# 受语境影响的韧性术语表：审视关键基础设施韧性相关术语

Andrea Mentges [a,*], Lukas Halekotte [a,+,*], Moritz Schneider [a]、Tobias Demmer [a]和 Daniel Lichte [a]

[a] 德国航空航天中心（DLR），陆地基础设施保护研究所，Rathausallee 12，53757，德国圣奥古斯丁

[+] 通讯作者。电子邮箱：lukas.halekotte@dlr.de

* 共同第一作者。

摘要

我们提出了一份全面的韧性术语表，其中包含91条定义，涵盖关键基础设施领域所使用的韧性相关术语。在文献中，许多此类术语以及“韧性”一词本身的定义和用法都存在极大差异。因此，我们从已发表的各类定义中汲取内容，整合多种相互对立的观点，对各个术语进行比较，并提供相关或相左观点的参考文献，以建立一套清晰的韧性术语体系。这套术语体系阐明了对韧性的特定理解，有助于有效评估和管理关键基础设施的韧性。这种理解的两个核心要素是：(1) 韧性是系统应对不确定且可能无法预见的破坏性事件所造成影响的能力；(2) 这种能力由三种支柱能力构成，其水平可从性能曲线中提取。

关键词：韧性定义；关键基础设施；术语；韧性能力；性能曲线

# 1 引言

## 1.1 背景 有时，失效

是不可避免的。50多年来，这一概念促使各领域的科学家研究系统和个体应对突发负面影响的能力（Comfort 等，2010年）。如今，这种能力——即广为人知的“韧性”——比以往任何时候都更加重要。韧性有助于关键基础设施应对全球化、数字化以及极端天气事件日益增多等各种全球变化带来的挑战（Bie 等，2017年；Caralli 等，2010年；Comfort 等，2010年；Thier与Pot d’Or，2020年）；从而保护我们的社会赖以运转的基本服务和资产。

## 1.2 研究动机 定义

韧性的定义表现出极大的变异性。这一概念历史悠久（Alexander，2013），早期以来人们对其最佳用法始终存在分歧（例如，参见 Holling（1973）和 Pimm（1984）的不同观点）；此外，该概念还在多个研究领域中不断适应并持续发展（例如生态学（S. Carpenter 等，2001；Holling，1973；Pimm，1984）、灾害管理（Adger 等人，2005；Bruneau 等，2003；Cutter 等，2008）或关键基础设施保护（Guo 等，2021；Poulin & Kane，2021）），因此其含义也日趋多样。由此，韧性的确切定义因领域而异（Alexander，2013；Xue 等人，2018），在同一领域内也不尽相同（Asadzadeh 等，2017；Rus 等，2018）；其定义还取决于研究重点（例如社区的地震韧性（Bruneau 等，2003）、电力系统的抗飓风韧性（Ouyang 和 Dueñas-Osorio，2014），或城市气候变化韧性（A. Brown 等人，2012）），并因作者而异（例如，Wied 等人（2020）、Biringer 等人（2013）或 Carlson 等人（2012）收录了大量定义）。因此，韧性不存在适用于所有情形的统一定义（Jore，2020），关于其定义的最终共识也尚未达成（Mottahedi 等，2021）。然而，明确的定义至关重要，因为我们定义韧性的方式将决定衡量韧性的方式（Biringer 等人，2013）。本文旨在汇编、定义并区分用于描述社会技术系统，尤其是关键基础设施韧性的术语。本文的目标是收集同义词、厘清相似术语之间的细微差别，并为每个术语提供参考资料和资源，以便深入了解。

## 1.3 此前的研究 其他韧性术语表此前已有

发表。然而，它们大多并非针对关键基础设施的背景，而是关注其他领域，例如风险分析学会术语表（Aven 等，2018年）、由 DRI International 编制的行业导向型术语表（DRI，2021年）、由 Andersson 及其同事编制的信息学导向型术语表（Andersson 等，2020年），或由韧性联盟编制的生态韧性术语表（韧性联盟，2021年）。一项近期研究评述了17个被描述为有助于基础设施韧性的术语定义（Mottahedi 等，2021）。本术语表的独特之处在于，强调梳理并讨论基础设施韧性背景下所使用的各种术语之间的差异与相似之处。

## 1.4 研究目的 我们定义并区分

在关键基础设施领域中，超过 90 个韧性相关术语。与“韧性”一词一样，许多术语的确切含义存在争议，且会随研究领域而变化。对此，我们强调，我们并不声称找到了“正确”的定义，也不认为其他人的定义有误。相反，

我们在前人工作的基础上，梳理出一套整合后的术语体系，其中涵盖了许多韧性相关术语，避免重复，并尽可能明确地区分各术语。因此，本研究的目的并非在已有的大量宝贵工作之上，再增添一个关于韧性及其相关概念的定义。相反，我们旨在汇集并整合现有定义，对其加以精炼，从而形成一套彼此尽可能清晰区分的统一术语。因此，接下来我们将：i）简要概述韧性定义的现状；ii）说明各术语之间仍存在矛盾、模糊之处和重叠；iii）基于现有文献，提出一份韧性相关术语表，阐述各术语的含义及其相互区别；iv）讨论我们对韧性的看法对其量化和管理所带来的影响。

# 2 韧性定义的现状

韧性概念主要是在过去二十年间于关键基础设施领域确立起来的，相关研究的数量仍在显著增长（Mottahedi 等，2021）。

## 2.1 术语差异：韧性 韧性的定义取决于

作者。此前的多项研究从众多来源汇编了大量韧性定义，并得出结论：这些定义之间差异很大（例如，Mottahedi 等，2021年列举了28种定义；Wied 等，2020年比较了251种定义；另见 Biringer 等人（2013年）和 Carlson 等人（2012年））。由于定义数量众多且彼此差异很大，韧性概念受到了广泛批评。例如，有人声称，该术语在恐怖主义研究中的应用“科学地位不佳”（Jore，2020），有人认为“若将该术语视为一种模型和范式而过度解读，可能会令人失望”（Alexander，2013）；还有人称其为流行词（Linkov 等人，2014），并指出其使用范围可能超出了应有的限度（Rose，2007）。事实上，韧性一词所指的含义并不总是明确。许多作者将韧性描述为系统的一种能力或本领（B. Cai 等人，2018；Engler 等人，2020；Francis & Bekera，2014；Ouyang 与 Wang，2015；Rose，2007；Sterbenz 等人，2010）。然而，有时韧性也被理解为系统受到扰动后所经历的过程或产生的结果（Béné 等人，2012）；这种理解使评估容易得多。有些作者认为，“力量或能力”（即能力）与“行动或行为”（即过程）都包含在韧性之中（Kanno 等人，2019）。其他一些广为人知的定义则不将韧性概念化为能力或过程，而是视为某种指标，例如速度、速率或程度；例如，Pimm（1984）提出的工程韧性定义就强调恢复速度。然而，若干关于工程与基础设施背景下韧性定义的综述（Biringer 等人，2013；Mottahedi 等，2021；Wied 等，2020）表明，大多数研究都将韧性视为一种能力。本文采用这一观点，将韧性过程视为发生扰动时这些能力所产生的结果。因此，我们不把过程视为韧性一词的一部分，而将韧性限定为能力。

## 2.2 术语差异：能力 韧性是一个雨伞术语，包含

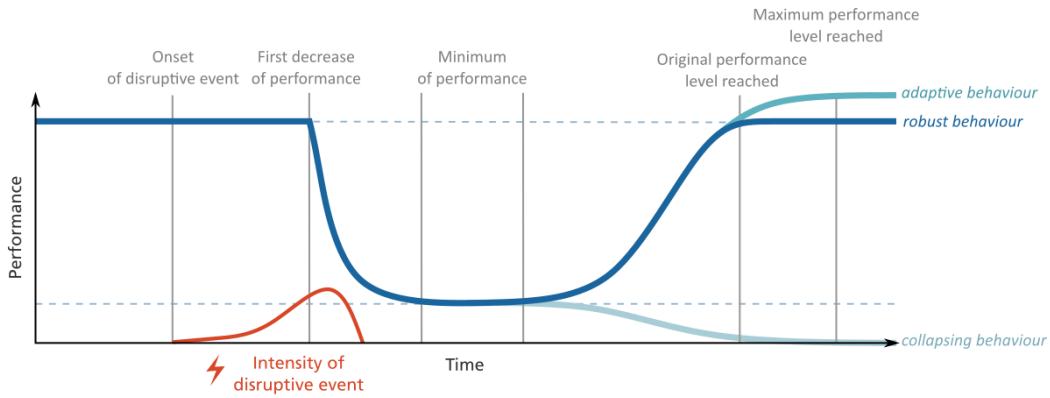
许多不同的系统能力（有时称为组成部分（Carlson 等人，2012；Rehak 等，2019）或维度（Bruneau 等，2003））。大多数来源（见 Wied 等人（2020））强调恢复能力（Teodorescu，2015），有些则强调吸收能力（Vugrin 等人，2011）或学习能力（Folke，2016；NIAC，2010；Norris 等人，2008）。与“韧性”一词本身一样，其各项能力的定义也

各不相同。例如，Carlson 等人（2012）对缓解的定义包含抵抗力和吸收能力，而 Ouyang 等人（2012）对抵抗力的定义则包含预防和减少。此外，不同研究对韧性能力的分类及其数量也各不相同。例如，Béné 等人（2012）区分了吸收能力、适应能力和变革能力；Rehak 等人（2019）区分了稳健性、可恢复性和适应性；MCEER 的“4R”韧性框架由稳健性、冗余、资源调度能力和快速性构成（Bruneau 等，2003）；阿贡国家实验室的框架则包括准备、缓解、响应和恢复（Carlson 等人，2012）。

此外，单项能力的含义也因作者而异。适应能力便是一个典型例子：其定义会因多种因素而有所不同，包括所考虑的扰动类型、这种能力发挥作用的时间（即扰动期间或之后），以及其效果（即维持性能或限制性能损失（Béné 等人，2012；Francis & Bekera，2014）、恢复性能（Nan 等人，2014）、提升性能（Häring 等人，2017）、增强韧性（NIAC，2010；Rehak 等人，2019））。例如，Béné 等人（2012）认为，当扰动强度（此处为压力扰动）超过系统的吸收能力时，系统的适应能力便变得至关重要——适应能力使系统在面临更强的持续性扰动时仍能维持系统运行。相比之下，其他作者将适应能力描述为从过去的扰动中吸取经验教训，以提升其余韧性能力的能力；也就是说，适应能力主要在恢复之后发挥作用（NIAC，2010；Rehak 等人，2019）。从这个意义上说，如果适应性较强，韧性便是一种能够自我强化的能力。

### 2.3 术语差异：阶段同样，在……方面也存在显著差异

关于韧性周期各阶段的术语。韧性周期以理想化性能曲线的形式，描述系统的行为；该曲线通常始于单一扰动事件发生前不久，终于系统从相关影响中恢复之后。概念上，这条曲线被划分为连续的几个阶段，不同作者对这些阶段的命名各不相同（图1）。大多数作者根据相应时间段内发生的韧性过程来命名各阶段（Braun 等人，2020年；Jovanović 等，2020年；Klimek 等，2019年）。有些作者则根据相应时间段内被认为最重要的韧性能力来命名（Rehak 等人，2018年）。另一些作者依据系统的状态或扰动演变来区分各阶段（Hossain 等人，2019年；Mottahedi 等，2021年）。然而，尽管命名方式各异，各阶段的一般顺序和持续时间仍已达成共识（图1）。




| Reference | Phases | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *Klimek et al. 2019* | Plan | | Absorb | Recover | Adapt |
| *Nan et al. 2014* | Original steady phase | | Disruptive phase | Recovery phase | New steady phase |
| *Rehak et al. 2018* | Crisis preparedness | Detection ability | Responsiveness | Recoverability | Adaptability |
| *Jovanović et al. 2020* | Understand risks | Anticipate/ prepare | Absorb/withstand | Respond/recover | Adapt/transform |
| *Braun et al. 2020* | | Resist | Absorb | Adapt/Restore | Improve |
| *Häring et al. 2017* | Preparation and prevention | | Absorption and response | Recovery | |
| *Fischer et al. 2018* | Prepare and prevent | | Protect | Respond | Recover |
| *Taleb-Berrouane et al. 2019* | Stability | | Disruption effect | Reaction | Rehabilitation | Return to stability |
| *Mishra et al. 2021* | Pre-disturbance | | Disturbance | Emergency | Restoration | Post-restoration |
| *Oboudi et al. 2019 ** | Pre-disturbance | | Disturbance progress | Post-disturbance | Restoration state | Post-restoration |
| *Mottahedi et al. 2021* | Initial normal state | | Damage propagation | Disrupted state | System recovery process | Recovered state |
| *Hossain et al. 2019* | Stable original state / Reliability | | Disruption / Vulnerability | Disrupted state | System recovery / Recoverability | |
| *Panteli et al. 2015 ** | Resilient state | | Event progress | Post-event degr. state | Restorative state | Post-restoration state |

* use resilience as the dependent variable, instead of performance

图1：不同研究中的韧性阶段。根据作者的不同，韧性周期的各阶段称谓也有所不同，有的强调系统的当前状态，有的强调相应阶段中的重要韧性能力，有的则强调通常在该时段发生的韧性过程。然而，所列示例表明，不同研究中各阶段的起止时间点大体一致。

### 2.4 什么是非韧性？要理解韧性的概念，

韧性方面，审视其边界，即厘清什么不属于韧性，可能会有所帮助。关于韧性概念的边界，存在许多不同观点。生态韧性概念的提出者 Holling（1973）强调韧性与稳定性的区别（Norris 等人（2008）也持类似观点）：稳定性被定义为系统在暂时扰动后恢复到原有平衡状态的能力，而韧性“是系统吸收变化和扰动，同时仍维持[...] 状态变量之间相同关系的能力”（Holling，1973）。因此，Holling 强调了韧性概念所包含的灵活性和转型能力。稳定性和韧性可以被视为系统相辅相成的能力，而另一些作者则将韧性与其所谓的反面进行对比，以阐明这一概念。Woods（2015，2016）认为韧性是脆性的反面；脆性指系统在其运行范围内或超出该范围时突然崩溃，而韧性则指面对意外扰动时仍能持续存在的能力（即优雅可扩展性）。在社会科学中，脆弱性有时被视为韧性的反面（Manyena 和 Gordon，2015年；经济合作与发展组织，2002年）。此外，脆弱性有时也被视为韧性的反面（Adger 等人，2005年），或者也可以

可被视为韧性能力中稳健性的反面（Mottahedi 等，2021），因为稳健性通常以性能损失量的倒数来衡量（Shinozuka et al., 2004），而脆弱性通常被定义为性能损失量（Aven 等，2018年；Fischer et al., 2018；Häring 等人，2017）。在我们看来，韧性概念并没有真正的反面。相反，高韧性意味着不存在或尽可能减少脆弱性、易损性和缺乏灵活性等问题。

韧性管理与风险管理之间存在一个重要区别。两者的差异及其关系一直受到热烈讨论（Aven, 2019；Fekete et al., 2020；Linkov et al., 2018；Linkov & Palma-Oliveira, 2017），观点各异：有些人认为韧性管理并未给现有风险实践带来任何新内容，另一些人则认为它是对风险管理的必要补充。我们认为，两者是应对扰动的互补方法（另见讨论第4.1.3节），可以在保护基础设施这一共同目标上相互促进，正如其他学者此前所提出的（Johansson et al., 2013；Park et al., 2013）。风险管理侧重于识别并避免或减少可预见的特定威胁所造成的影响（Ganin et al., 2016；Park et al., 2013）。风险管理可能会接受或承认某些残余风险会持续存在，而韧性管理则明确基于这样一种概念：并非所有风险都可预测，也并非所有风险都可避免（Linkov et al., 2018；Park et al., 2013）。因此，韧性管理较少强调减少个别风险，而是着重整体提升应对新出现扰动的能力（Anholt & Boersma, 2018），并强调初始扰动事件发生后的阶段，即恢复、学习和适应过程（Gasser et al., 2019）。

# 3 术语表

以下术语表呈现了一套统一的术语体系，整合了韧性的各个方面，并对它们进行了区分。我们决定按主题而非字母顺序排列术语，以便编制一份可从头至尾阅读的文档，同时也可作为对该主题相对陌生的学者的入门读物。术语表首先定义基本术语，例如系统、扰动和风险（第 3.1 节）；随后介绍描述系统维护重要概念的术语（第 3.2 节）。接下来，我们分别定义传统风险管理所重视的能力（第 3.3 节），以及韧性管理所强调的能力（第 3.4—3.6 节）。这些能力按照其变得相关的时间进行分组，即扰动发生之前（第 3.3 节）、扰动开始时（第 3.4 节）、扰动发生后立即（第 3.5 节），以及两次扰动之间（第 3.6 节）。最后，我们汇编与韧性管理（第3.7节）和分析（第 3.8 节）相关的术语。在整个术语表中，缩进体现了术语的层级关系：左对齐的术语是更宽泛的雨伞术语，其下包含分组排列的缩进子术语。术语的描述中还列出了同义词。

## 3.1 基本术语以下术语

是理解韧性相关概念的基础。

| Term | 描述 |
| --- | --- |
| 系统 | 一组协同运作、作为整体发挥作用以实现某项特定功能或一组功能的组成部分（IEEE 标准 610.12-1990；Skyttner，2006年）。系统组件例如可以是技术系统中的机器和电缆，也可以是承担特定职责的个体，以及社会技术系统中的任务。我们承认，对于系统的一般定义而言，执行某项功能可能并非绝对必要的条件（Backlund，2000），但在韧性的语境下，这是一个非常重要的条件：只有当某种期望的或可接受的行为或状态能够被定义，即其中某项功能得以履行时，才存在需要维持或恢复的对象因此，该系统能够表现出韧性行为。因此，我们的定义对应于满足基本韧性要求的系统。 |
| 系统之系统 | 一组系统，它们在特定情境下协同行动，以实现一个共同目标，而任何一个组成系统都无法单独实现该目标其自身（ISO，2018年；Nielsen 等，2015）。例如，一个系统之医疗情境中的系统之系统是卫生保健系统，其中患者的急诊治疗依赖于多个不同系统之间的相互作用，即医院管理、电力、交通（道路系统）和通信系统。 |
| 性能 | 系统相对于其指定功能的状态，即系统当前的行为在多大程度上实现了其目的。术语“性能”常被用作其定量表征的同义词，即性能度量（“性能曲线的纵轴a resilien） ”（Poulin & Kane，2021年），见图1）。在根据系统所能发挥的不同功能，性能及其度量可以指不同的事物。例如，在基础设施领域，Poulin 和 Kane（2021年）区分了三种不同类型的性能度量：可用性（例如，功能正常的管道数量）、生产率（例如，水需求得到满足）以及质量度量（例如，水质指数）。同义词：功能性（Cimellaro 等人，2010年）测量方式：性能变量（Wied 等，2020年）、性能度量（Poulin & Kane，2021年）、性能指标、关键绩效指标（Torres 等人，2020年） |
| 危害、威胁 | 系统可能处于的一种状态，或可能造成损害的情形或降低功能性（Aven 等，2018年）。尽管并非仅限于，“危害”通常指自然发生且非蓄意的危险来源或风险，例如火灾隐患、环境危害或事故隐患（与安全相关）；而“威胁”则更多指蓄意行动的主体所造成的风险（与安全相关），也就是说，威胁取决于行动主体的意图和能力（Bieder 和 Pettersen Gould，2020年；Smith 和 Brooks，2013）。 |
| 暴露 | 系统或资产受到风险源影响的程度（Adger，2006年；Aven 等，2018年）。该术语既可用于绝对意义，即系统要么暴露于某种危害或威胁之下，要么不暴露于其下；也可用于相对意义，即系统对某种危害或威胁的暴露程度可以较高或较低某种危害或威胁。例如，在灾害风险降低的语境下，暴露可用人员数量来表示， |

| | |
|---|---|
| | 基础设施的状况，或财产及其他人类资产的数量，这些资产位于易受灾害影响区域，因而体现了潜在损失（Kreibich 等，2022年；联合国国际减灾战略，2009年）。 |
| 应激源 | 所有会引发应力，进而促使受影响系统启动主动反应的内部和外部刺激。应激源可以触发破坏性事件，从而导致性能损失。“应激源”一词定义明确，并且常用于心理学和生态学领域。例如，在人类中，持续噪声等应激源会限制注意力，这可能导致错误决策（Endsley，1995年）。相比之下，在基础设施韧性的语境中，该术语的用法有所不同。一些作者将应激源视为破坏性事件的同义词。事件（Aven 等，2018年；Parsons 等，2016年），而另一些人则将应激源定义为可能引发事件的刺激因素，例如气候变化或日益加剧的全球化（O’Brien 等，2004）。后一种定义与该术语在心理学中的原始定义相对应，因此本术语表也采用了这一含义。<br>同义词：压力因素<br>例如：风、气候变化、关键资源短缺、材料疲劳 |
| 事件 | 可能造成负面后果的事件或情况（即可能造成扰动的事件）。在发生事件时，某种威胁或危害成为现实，从而导致系统的特定暴露。与扰动事件不同，事件不一定会导致任何负面后果（例如，暴露可能为零，或者系统可能完全吸收影响）。该术语通常会进一步细化，以突出其类型（例如，中毒事件、恐怖爆炸事件、大规模伤亡事件）或严重程度（例如，重大、严重、灾难性事件）（Aylwin 等人，2006年；美国国家科学院，2012年）。根据事件的起因，我们可以区分出三种一般类型的事件（Biringer 等人，2013年；Mitroff & Alpaslan，2003年）：自然灾害事件、事故和袭击。<br>同义词：事件（Wied 等，2020年） |
| 自然有危害的事件 | 一种源于自然（非人为）的事件，即它既非由人类直接造成，也非由人为系统间接造成（与安全相关）。这包括气候和与天气相关的事件（例如，洪水、风暴、干旱）、地球物理事件（例如，地震、火山喷发）和生物（例如疾病暴发、虫害）事件（IFRC，2020年）。<br>同义词：自然事故（Mitroff & Alpaslan，2003年） |
| 事故 | 一种由人类直接或间接造成，但在没有规划的情况下发生的事件，例如，作为某种后果非故意或错误的人为行为、技术故障或系统过载（与安全相关）。事故通常会造成，但不一定会造成损害、伤害或污染等负面后果（N. G. Leveson，2016年）。<br>同义词：正常事故（Mitroff & Alpaslan，2003年；Perrow，1999年） |
| 攻击 | 由蓄意行为（与安全相关）引起的事件。在与自然灾害事件或事故不同，攻击是由具有应变能力的对抗者（例如恐怖分子、罪犯或网络攻击者）策划并实施的，其行动遵循自身的 |

| | | |
|---|---|---|
| | | 能力，以及针对特定目的/意图（G. Brown 等人，2006年；Haimes，2006年；Jenelius 等人，2010年）。<br>同义词：异常事故（Mitroff & Alpaslan，2003年）、恶意事件（Biringer 等人，2013年） |
| 扰动事件 | | 导致负面后果的事件，即扰动事件是性能损失的原因（见图1）。与更一般的术语“事件”相比，这意味着实际（即非零）暴露于该事件，且系统无法完全吸收其影响。包括所有导致性能下降的来源，例如自然灾害、技术故障、人为错误、极端负载和组织问题，以及蓄意行为恶意袭击（Gasser et al., 2019; Häring 等，2016; Z. Xu 等，2020年）。<br>同义词：扰动（Pimm，1984）、不利事件（美国国家科学院，2012年）、非期望事件（Biringer 等人，2013年） |
| | 突发性破坏性的事件 | 一种强度瞬间增大的破坏性事件（Zobel 和 Khansa，2012年），例如地震或潮汐洪水。在韧性的语境中，许多作者关注此类突发性破坏事件（Gasser et al., 2019；Klise等人，2017年）。它指的是破坏性事件发生速度的两种极端情况之一（Hewitt & Burton，1971），另一个极端则被归入缓慢发生的扰动事件类别。 |
| | 缓慢发生的扰动事件 | 一种强度在较长时间内逐渐增加的扰动事件随着时间推移（Zobel 和 Khansa，2012年），例如组件劣化或因气候变化而导致的条件日益严酷。需要注意，缓慢发生的扰动事件仍可能导致性能突然崩溃，例如接近分岔或临界点时（Dai 等人，2012年；Gao 等人，2016年）。我们认为，扰动事件的发生被视为缓慢还是快速应取决于所讨论系统的时间尺度，即，如果系统的内在动力学快于事件的出现，则应将该事件称为缓慢发生。<br>同义词：渐进式发生（Hewitt & Burton，1971）、渐进式干扰事件（Häring 等人，2017）、缓慢发生的变化或过程（van der Geest & van den Berg，2021） |
| | 脉冲干扰 | 持续时间极短的（突发型）扰动事件，例如化学品泄漏（Donohue等，2016年）。它指的是破坏性事件持续时间谱的两个极端之一，另一个极端是压力扰动。<br>同义词：冲击（Ives与Carpenter，2007年）、急性干扰（Donohue等，2016年） |
| | 压力扰动 | 具有持久影响的扰动事件（Donohue等，2016年；Ives与Carpenter，2007年），例如有毒化学物质持续流出。该术语主要用于生态学文献中。<br>同义词：不利变化（Wied 等，2020）、长期变化，慢性扰动（Donohue等，2016年） |
| | 高影响**Low**概率（HILP）事件 | 一种极端的扰动事件，即发生概率低且会造成严重后果（Aven，2015b；Mahzarnia等，2020年；Masys，2012年；Panteli等，2017年）。 |

| | |
|---|---|
| | 同义词：极端事件（Mahzarnia 等人，2020年；Panteli 与 Mancarella，2015b；Umunnakwe 等人，2021年），高影响低概率（HR）事件（Gholami 等人，2018年） |
| 扰动 | 扰动由扰动事件引起，其持续时间与系统性能因该事件的后果而下降的时间一样长（即，扰动由韧性曲线中的性能下降来表征，见图1）。当系统恢复后，扰动即告结束，也就是说，系统已回到正常运行状态（另见第3.5节中的恢复能力）。因此，扰动可能持续得比扰动事件更久（也可能持续时间更短，例如系统能够适应持续时间较长的扰动事件）。一个重要的这一界定意味着，扰动的表现形式取决于致因事件（扰动事件），以及受影响系统的能力（即其韧性和脆弱性）。所提出的区分扰动与扰动事件的做法，与（Rehak 等，2016年；Rehak 等，2019年；Roege等人，2014年）中术语的用法一致，这里仅举几例。不过应当指出，这两个这些术语经常被混用，有时甚至与我们的定义截然相反（例如，Fox-Lent等人使用的“扰动事件”一词，（2015））。 |
| 灾害 | 社区功能受到扰动，这种扰动考验或超出了其利用自身资源应对这种情况的能力。这种扰动以对人类福祉造成严重且往往广泛的影响为特征，例如死亡、疾病、伤害和财产损失，以及对基本服务或自然资源的影响（IFRC，2022；联合国国际减灾战略，2009年；联合国大会，2016年）。尽管自然事件（例如风暴、洪水、地震）是最常见的起因，灾害也可能由人为因素引发（例如运输或工业事故）（CRED，2022；IFRC，2020）。需要注意的是，灾害并不等同于其触发事件（扰动事件），而是取决于事件以及受影响社区的特性（脆弱性、暴露、能力）和相关行动者（灾害是一种扰动，而非扰动事件）。 |
| 危机 | 与灾害（见上文）类似，它描述的是一种扰动，在此期间系统提供的核心服务受到威胁，和/或其性能已受到显著影响。例如，超出已知模式的关键基础设施暂时或部分瘫痪可称为危机。灾害和危机这两个术语常被互换使用。不过，危机一词通常指较轻微的情况，例如没有死亡人数，或关键服务并未永久丧失（Boin & McConnell，2007年）。然而，若未妥善应对，危机可能演变为灾害（联合国国际减灾战略，2009年）。<br>将危机定义为一种扰动，与“作为过程的危机”这一观点一致，正如 Williams 等人（2017年）所概述的那样。这一观点意味着对致因事件的响应塑造了新兴危机。相反的观点则认为，危机就是致因事件（即事件或扰动事件），这与“危机作为事件”的观点一致（Williams 等人，2017年）。 |
| **Risk** | 风险这一概念描述的是“对感知到的伤害的不确定暴露”（Smith 和 Brooks，2013年），或“损失的可能性”（O’Neill，2017年）。 |

| | |
|---|---|
| | 描述有害影响发生的概率以及<br>不良后果的预期严重程度（联合国减少灾害风险办公室，2019年）。<br>风险可以通过不同方式进行概率形式化，例如，<br>将概率与后果相乘（Smith 和 Brooks，2013）<br>或者，在保密性的语境中，将威胁、脆弱性与<br>后果相乘（McGill等人，2007年），其中脆弱性描述了<br>扰动事件造成负面影响的可能性。无论<br>采用何种度量指标，风险通常都可以描述为以下<br>（三项）基本决定因素的结果：风险源（即危害或<br>威胁），以及系统对该风险<br>源的暴露和脆弱性（Francis 与 Bekera，2014年；Lavell 等人，2012年）。 |
| 不确定性 | 不确定性可以描述为“任何偏离无法实现的<br>完全决定论的理想”（W. E. Walker 等，2003年）。因此，<br>它不只是知识缺失（W. E. Walker 等，2013年）。<br>感知到的不确定性程度在一定程度上具有主观性，因为它<br>取决于对现有知识的满意程度（W. E. Walker<br>等，2013年）。在社会技术系统中，不同来源的<br>不确定性可以存在于例如决策制定中，不确定性可以<br>指不确定的未来状态以及世界的<br>不确定性，以及对不同参与者行为的不确定性（Quade，1989年）。 |
| 认知<br>不确定性 | 一种不确定性，随着更多信息的获取，最终会随时间推移变得确定<br>收集数据和/或知识。因此，可以<br>通过收集更多数据或改进模型来降低认知不确定性<br>（Kiureghian 与 Ditlevsen，2009年；W. E. Walker 等，2003年）。 |
| 偶然<br>不确定性 | 建模者无法预见的一类不确定性<br>降低它的可能性（Kiureghian 与 Ditlevsen，2009年）。例如，<br>例如，押注一次<br>公平硬币抛掷结果所带来的不确定性属于随机不确定性（W. E. Walker 等，2003年）：即使<br>人们完全熟悉这一过程及其<br>可能结果，输掉的概率仍为 50%。一般而言，自然<br>和人类系统通常都包含一定程度的随机不确定性<br>不确定性，例如由错误或反复无常的行为引起（Kiureghian 与<br>Ditlevsen，2009年），或源于“自然过程的混沌和不可预测性<br>”（W. E. Walker 等，2003年）。<br>同义词：内在随机性（Kabir 等，2018）、变异性<br>不确定性（W. E. Walker 等，2003年） |
| **Deep**<br>不确定性 | 深度不确定性指的是高度不确定，只有<br>“完全无知”这一极端情况代表着更高的不确定性（W. E.<br>Walker 等，2013年）。深度不确定性的存在意味着，人们<br>能够列举出几种合理的可能选项，却无法<br>按可能性高低对它们排序（W. E. Walker 等人，2013年）。<br>此外，在情况不明朗时，也存在深度不确定性<br>或存在争议，哪些模型最适合描述相互作用<br>系统变量之间的相互作用，以及如何使用<br>概率分布来描述这些变量，和/或哪些系统状态是理想的<br>（Lempert 等人，2003年）。 |
| 情景 | 情景是对某种可能情况通俗易懂的描述<br>未来，基于一个由影响因素构成的复杂网络<br>（Gausemeier 等人，1998年）。这一描述包含一系列<br>按照明确的时间顺序发生的事件。每个已识别的<br>情景都会产生一系列后果，这些后果取决于 |

| | |
|---|---|
| | 初始事件、相关的关键基础设施及其地理组织背景（Setola 等，2016年）。 |

3.2 系统维护 以下术语指的是

在基础设施维护语境中经常使用的系统属性。

| | |
|---|---|
| 安全 | 安全是指对伤害风险或其他非预期的不良<br>后果（例如自然灾害事件、<br>事故）的控制状态（Aven 等，2018年；Maurice 等，1997年）。 |
| 保密性 | 保密性是指对他人蓄意造成的伤害风险进行控制的状态<br>（Aven 等，2018年）（例如恐怖袭击）。 |
| 可靠性 | 在较长时间段内达到可接受或所需性能水平的能力<br>（Beyza 等，2020年），即使在<br>不利的运行条件（涉及任何类型的破坏性事件）<br>，例如，在电力系统情境中“保持电力供应”（NIAC，<br>2010年）。与安全相比，可靠性始终与<br>关于所需性能的规范相关（什么是<br>可接受的？）（N. G. Leveson，2016年）。<br>同义词：业务连续性（经济学语境，（BCI，2013年）） |
| 可持续性 | 可持续性一词最初是在林业领域提出的，<br>它描述的是一种不过度从<br>系统中获取资源、确保取用量不超过可恢复量的方法，从而保证资源供应稳定，<br>并使其长期持续（参见 Grober（2013年）和 Spindler<br>（2013年），他们引用了 Hans Carl 的著作《Sylvicultura Oeconomica》<br>von Carlowitz 于 1713年 出版，这是该术语首次有文献记载的使用<br>术语）。在社会科学领域，可持续发展被<br>定义为“满足当代人的需求，<br>同时不损害后代满足其<br>自身需求的能力”（WECD，1987年），具体涵盖<br>“需求”“代内正义”和“限制”等概念。示例<br>遵循可持续发展理念的包括循环经济、<br>材料与能源效率、寿命终止回收，以及<br>环境排放（acatech，2014年；Fiksel，2003年）。可持续性<br>强调环境、社会和<br>经济方面之间的相互联系与相互依存。<br>可持续性与韧性之间的关系仍在研究中<br>讨论（Marchese等人，2018年）。一些作者认为，要实现<br>可持续性，需要具备较高的稳健性、适应能力和学习能力<br>（acatech，2014年；Fiksel，2003年），因此韧性是<br>可持续性概念的一部分。然而，也可以反过来认为，<br>韧性才是最终目标，而可持续性<br>有助于实现这一目标，也就是说，可持续性是……的一部分<br>韧性概念（S. R. Carpenter 等，2012；Marchese等人，<br>2018年）。最后，一些作者认为可持续性和韧性是两个<br>互补的概念，二者不存在等级关系（Marchese等人，<br>2018年）。 |
| 韧性 | 韧性是系统应对影响的能力<br>不具体且可能无法预见的破坏性事件。这种能力 |

取决于多样化技能与策略的可用性和完善程度，即韧性能力。例如，具备预见、抵御、吸收、响应负面影响并从中恢复的能力（Carlson 等人，2012年），履行其原有功能的能力（NIAC，2010年），以及根据过去经验中吸取的教训或变化的情势进行适应的能力（Francis 与 Bekera，2014），都能增强韧性。韧性的核心概念是“承认我们的无知；不是假设未来事件是可预期的，而是承认它们将出乎意料”（Holling，1973）。因此，目标是增强系统能力，以便更好地应对未来事件，无论其可能采取何种形式；也就是说，无需事先明确潜在扰动事件的特征。韧性并不是系统固有的、静态的特征，而是一组可以主动习得的技能和应对策略（Anholt 和 Boersma，2018）；这意味着韧性会随时间发生变化。基于上述定义，韧性描述的是一组各种有用的技能。在我们看来，韧性因此是“韧性能力”的同义词，而由此产生的韧性过程不属于韧性这一术语的范畴（详情见讨论部分 4.1）。可以通过代理指标估算韧性，例如 Hollnagel（2011a）或 Shirali 等人（2013年）所提出的方法。同义词：韧性能力、韧性（Braun 等人，2020年）、韧性基因型（Kanno 等人，2019年） 一般 一种韧性。一般韧性体现了系统的基础性韧性，即系统的底层韧性能力（S. R. Carpenter 等，2012年；B. H. Walker 和 Pearson，2007年）。它影响系统在任何情境下的反应能力。例如，一般韧性描述城市在快速且不可预测地变化的世界中持续存在的总体能力，而不规定会发生何种扰动（B. H. Walker 和 Pearson，2007年）。特定 一种韧性。特定韧性描述系统的特定特征或功能应对特定类型破坏性事件的能力（S. R. Carpenter 等，2012年；B. H. Walker 和 Pearson，2007年）。它也被描述为“什么对什么的韧性”（S. Carpenter 等，2001），或“关于什么”以及“针对什么”的韧性（Tamberg 等人，2022），例如，作物生产应对降雨变化的韧性，或电力系统总产量抵御极端风的韧性。因此，特定韧性描述系统针对特定类别的胁迫因素（或单一应激源）的反应，并涉及若干指定的性能指标（或单一性能指标）；这与一般韧性相反，后者描述系统整体对所有可想象的胁迫因素的反应。有人提出，由于这种限制，特定韧性可以量化，而一般韧性则难以评估（S. Carpenter 等，2001；B. H. Walker 和 Pearson，2007年）。因此，可以找到许多特定韧性的实例；这些实例通常会明确规定“针对什么”或“抵御什么”，例如地震韧性（Bruneau 等，2003）、气候韧性（Kahiluoto 等人，2019年）、抗飓风韧性（Ouyang 和 Dueñas-Osorio，2014）或洪涝韧性（McClymont 等人，2020年），或者规定“什么的韧性”或“关于

| | |
|---|---|
| | “什么”，例如水韧性（Simpson 等，2020）或作物生产韧性（Zampieri 等，2020）。然而，具体取决于对破坏性事件类型的界定有多严格，这类韧性在概念上接近风险管理；因为原则上，韧性应对扰动的形式保持中立。 |
| 工程学韧性 | 工程韧性和生态韧性这两个术语由 Holling 提出，旨在区分对生态学文献中通常所应用的韧性的两种不同观点（Holling，1996）。根据 Holling 的观点，工程韧性指的是由其抵抗力构成的唯一稳定状态的稳定性抵御扰动以及在发生扰动后恢复到这一均衡状态的速度（不要将其与“韧性工程”混淆，参见第3.7节）。然而，后来，工程韧性常常被等同于Pimm（1984）提出的定义，即韧性只是系统恢复到其长期均衡状态的速度（例如参见Herrera（2017）），而抵抗力是系统的另一个独立方面（另见 Pimm 等人（2019年））。需要注意的是，许多（如果不是大多数）生态学——尤其是实证研究——都按照 Pimm 的定义使用“韧性”一词，也就是说，它们将韧性等同于我们在基础设施韧性语境中所说的快速性（例如，Hoover 等人（2014年）、Donohue 等人（2016年）或 Hillebrand 等（2018年））。<br>如今，工程韧性有时被用来指基于性能曲线（如图1）来评估韧性的框架，即将韧性视为以结果或成效为导向的概念的框架（例如，Rus 等（2018）或 Asadzadeh 等（2017））。<br>同义词：稳定性（Holling，1973）、韧性（Pimm，1984） |
| 生态韧性 | 与工程韧性一样，生态韧性的定义根植于动力系统理论。然而，其核心前提是认为生态系统通常远离任何稳态，而且用多稳态复杂系统来描述更为恰当（Holling，1973），例如，具有多个可能长期行为的系统。在此背景下，生态韧性被等同于系统维持在其当前吸引域内的能力，这一能力由若干子类别共同构成（Dakos 与 Kéfi，2022；Mitra 等人，2015；B. Walker 等，2004）。<br>一般而言，生态韧性被定义为“……的能力系统吸收扰动并在经历变化的同时进行重组，从而仍能保持相同的功能、结构、特性和反馈”（B. Walker 等，2004）。这一定义强调了生态系统的变异性和内在自组织能力，这些对于其持续性至关重要（Comfort 等人，2010年；Folke，2006年）。在这方面，以及在将韧性理解为一种涌现系统属性或能力，生态韧性这一概念影响深远，并塑造了人们在各个领域理解韧性的方式（例如，参见 Folke（2006年）或 Zampieri（2021年）。<br>同义词：韧性（Holling，1973），系统韧性（McClymont 等人，2020年） |

| | |
|---|---|
| 社会—生态韧性 | 这一概念是在生态韧性视角的基础上扩展而来，旨在探讨社会—生态系统（Folke，2006；Folke 等人，2016），即社会与生态组成部分不可分割地交织在一起的系统（Berkes 和 Jolly，2002）。根据社会—生态视角，韧性不仅关乎系统持续存在的能力（生态韧性），还特别强调其适应性和转型能力（例如，S. Carpenter 等人（2001）、Adger（2006）或 Folke（2016））。从这个意义上说，韧性并非一种静态特征，而是受持续发展动态过程影响的特性（由适应和转型推动）；这一过程要求对韧性进行管理，涵盖灵活性、预见（前瞻性视角，例如 Folke（2016））以及促进社会学习等方面（例如 Cutter（2016b））。关于这一概念动态本质的说明，参见 S. Carpenter 等人（2001）或 Elmqvist 等人（2019）。<br><br>如今，工程韧性和社会生态韧性通常被视为韧性的两种核心且相互对立的视角（例如，Asadzadeh 等（2017）、Jesse 等（2019）、Liu 等（2022）、Rus 等（2018）或 Butler 等（2014）），或被视为韧性不同解释构成的光谱两端（Engle，2011）。前者将韧性理解为扰动后的结果（即恢复到均衡状态），后者则是一种以适应能力为核心的动态概念。尽管社会生态韧性视角在当代学术界对韧性的定义中相当流行，但实践中的应用往往仍建立在体现工程韧性视角的理解之上（Engle，2011）。<br><br>同义词：适应性韧性（Jesse 等，2019；Liu 等，2022；Simmie 和 Martin，2010）、复杂适应系统韧性（McClymont 等人，2020）、社会生态韧性（Cretney，2014） |
| 社区灾害韧性 | 社区或任何具有地理边界的社会单元（社区韧性：哪个系统的韧性），例如邻里、城市、县、区域或国家，面对危险灾害及其相应灾害事件（灾害韧性：针对什么的韧性）的韧性，例如地震、飓风、海啸、大流行病或恐怖袭击（Burton，2014；Cutter 等，2008；美国国家科学院，2012；Norris 等人，2008）。通常，社区韧性和灾害韧性这两个术语可互换使用，尽管它们也可能指代略有不同的对象，例如特定基础设施的灾害韧性（H. Cai 等，2018；Cimellaro 等，2010）。<br><br>鉴于对韧性概念的理解存在变异性（例如，分别遵循工程学、生态视角或社会—生态视角），且应用背景各不相同，因此提出了多种测量框架（Asadzadeh 等，2017；H. Cai 等，2018；Ostadtaghizadeh 等，2015；Rus 等，2018）。许多框架所反映的一个重要方面，是将韧性理解为多维概念（Bruneau 等，2003；Burton，2014；Cutter 等，2010；Parsons 等，2016）。因此，对其进行评估需要纳入来自不同领域和学科的输入， |

| | | |
|---|---|---|
| | | 例如健康科学、工程学、经济学和地理学（Cutter，2016a）。一种特别流行、能够整合多个维度的方法是所谓的综合指标，它将若干被认为对构建所需系统能力至关重要的指标结合起来。<br>同义词：社区韧性（Norris 等人，2008）、灾害韧性（Cutter，2016a） |
| 韧性维度 | | 尤其是在应用于复杂的管理系统（例如关键基础设施、城市或社区）时，韧性概念包含多个相互关联的维度或领域这些维度有助于提升系统的整体韧性（Bruneau 等人，2003；Cutter，2016a；Pagano 等，2018；Qin 和 Faber，2019）。尽管提出的维度数量各不相同（Cantelmi 等，2021；Cutter 等，2010；Guo 等，2021），但最常采用且被认为最为重要的维度，仍然是开创性工作中最初提出的四个维度由 Bruneau 等（2003）提出，即技术、组织、社会和经济维度（也称 TOSE 维度，见下文）。 |
| | 技术韧性 | 韧性的技术维度，或工程系统。它指的是物理系统或建成环境的韧性能力（Guo 等，2021年）。<br>同义词：技术韧性（Mottahedi 等，2021年），基础设施韧性（Cutter 等，2010年；Opdyke 等，2017年） |
| | 组织韧性 | 韧性的组织维度，或系统所有者组织的韧性（Mottahedi 等，2021）。这包括参与组织管理和维护的所有人员，例如管理人员、人员和操作人员；这取决于例如，他们的问题解决思维、培训、经验、沟通技能和问题解决思维，以及整体组织文化和既定的管理流程（Gover 和 Duxbury，2018年；Pagano 等，2018年）。<br>同义词：韧性的治理维度（Opdyke 等，2017年） |
| | 社会韧性 | 韧性的社会维度，或社会的韧性，系统所处的环境（Mottahedi 等，2021）。它指的是社会群体或社区应对影响的能力破坏性事件（Adger，2000）。 |
| | 经济韧性 | 韧性的经济维度（Guo 等，2021）。它指的是系统将与以下事项相关的经济损失降至最低的能力扰动事件。 |
| | 硬韧性 | 指系统的结构、技术、机械和网络空间特性及系统的能力（Kahan 等，2009年） , i.e., 韧性的“硬”维度。 |
| | 软韧性 | 指与社区和社会相关的韧性能力，强调人类需求、行为和关系（Kahan 等，2009年），即韧性的“软”维度。 |
| 脆弱性 | | 脆弱的系统在受到应力时，性能会显著下降超过某一特定水平/阈值（Taleb 与 Douady，2012）。脆弱系统可与韧性系统相对照，后者遭受扰动时的后果要轻微得多（Aven， |

| | |
|---|---|
| | 2015a）。因此，脆弱性可描述为缺乏能力，以及在变化面前维持基本功能所需的资源和应对扰动的资源（Manyena & Gordon, 2015；经济合作与发展组织，2008）。与韧性概念类似，脆弱性的定义及其应用仍存在诸多争议（Manyena & Gordon, 2015；经济合作与发展组织，2008）。 |
| 脆性 | 脆性可视为一种脆弱性。脆性系统会突然在扰动作用下超过阈值时崩溃（Woods，2015），而不是适应新环境，这类似于材料在应力作用下可能发生脆性破坏（Woods，2016）。该术语由 Woods（2015，2016）创造，且主要由其使用。在在基础设施韧性的语境下，这一术语并不常用。我们搜索了 Web of Science 中使用关键词“韧性 AND 脆性”的文章，共找到64条结果。除三条外，其余均来自材料科学、建筑力学或生态学领域（检索日期：2021年4月20日，Web of Science）。有两篇文章在能源或交通运输系统的语境下提到了脆性（Dias，2015；Gomes 等人，2009年），但缺乏对脆性的明确界定。相反：优雅可扩展性（Woods，2016年）。 |
| 反脆弱性 | 从应力中获益，并可能因此提高应力作用下的性能（Aven，2015a；Taleb 与 Douady，2012年）。反脆弱性被认为是以下一组特性中的一种三种可能的系统状态，其中稳健性（定义为应力耐受性，且性能不会下降）和脆弱性是另外两种可选的系统状态（Taleb 与 Douady，2012）。例如，作为反脆弱性的例子，Verhulsta（2014年）介绍了航空业，该行业能够通过每年分析过去的扰动并从中学习，减少死亡人数。作者将其与这种“反脆弱性”与“韧性”不同，后者在他的定义中仅仅关注于恢复到扰动发生前的同一状态，而不会有所改善。与优雅可扩展性相反，反脆弱性因此描述的是这样一种系统：其性能会因扰动而提升扰动。 |
| 脆弱性 | 描述系统的性能可能降低多少大小规律。扰动事件可能在多大程度上降低系统的性能，即该扰动事件造成的负面影响有多大（Aven 等人，2018年；Fischer 等人，2018年；Häring 等人，2017年）。根据 Zio（2016年），系统的这种“弱点”包含两个方面：（1）易受破坏性，以及（2）无法恢复稳定状态。然而，该术语的定义在其他领域有所不同，例如在安全环境中，脆弱性指遭受负面影响的可能性，这些影响由破坏性事件造成（McGill等人，2007年）；在社会—生态系统中，它描述了因变化和缺乏适应性而导致的易受潜在危害影响的程度（Adger，2006年），而在灾害风险降低领域，该术语存在很大争议（Manyena，2006年）。尽管脆弱性与韧性之间的确切关系仍在讨论中，但人们普遍认为，韧性是降低脆弱性的几种方式之一（Jhan 等，2020；Mottahedi 等，2021；Rose，2007）；另一种策略是缓解（Rose，2007），或者更具体地说，是防护（缓解的一个方面，参见第3.3节）。 |

### 3.3 风险管理策略：在已知扰动发生前将其降至最低

这些策略旨在降低特定已知扰动发生的概率或其影响，因此属于传统风险管理流程的一部分。

| | |
|---|---|
| 风险管理 | 制定、审查、权衡并实施计划的过程，以及用于识别和监测危险/威胁，并避免这些危险/威胁或降低其影响，从而使系统继续发挥功能的行动（业务连续性）（Linkov 等人，2014年；美国国家科学院《科学》2012年）。重点关注高风险扰动事件，例如可预见的、单一的、突发的、高概率或高强度的扰动。<br>包括：预防、缓解、防护和吸收能力措施（见下文和第3.4节；例如水坝、泄洪道、预警系统（美国国家科学院，2012年））。 |
| 缓解 | 通过针对发生概率和/或尽量减少相关负面后果，降低未来扰动带来的风险发生概率和/或尽量减少相关负面扰动事件的后果（NIBS，2019；Rose，2007；Rose 和 Dormady，2018）。缓解有时被视为韧性的一部分，例如，Ouyang及其同事将缓解归入抵抗能力（Ouyang等，2012年）。<br>我们提出，根据所针对的风险决定因素（来源、暴露，脆弱性），可以区分出三种不同类型的缓解策略：预防、规避和防护（见下文和图4）。虽然我们认为这一区分特别有助于对不同的缓解措施进行分类，但对于区分不同缓解措施尤其有帮助，它应该需要注意的是，通常单一措施无法专属于这三个类别中的某一类。<br>包括：预防、规避、防护<br>同义词：风险降低（Aven 等，2018年；Smith 和 Brooks，2013） |
| 预防 | 通过针对风险源（危害/威胁）来降低风险。一般而言，预防可以通过改变风险源的性质来实现（例如，通过降低极端天气事件发生的概率进行气候减缓），将其彻底消除，或拦截从风险源通向破坏性事件实现的路径（Aven 等，2018年）。预防的主要目标是降低特定扰动事件发生的概率（Fischer 等，2018年；Häring 等，2016年；Ouyang等，2012年）。应当，不过需要注意，预防措施也可以针对所发生事件的严重程度（这会影响后果，而不是概率）。<br>同义词：灾害干预（Birkmann 等，2013年）<br>示例：日常维护、气候减缓（旨在减少限制全球变暖的温室气体排放、气候适应则可能相反，指规避或保护措施（IFRC，2020年），通过规范/禁止枪支持有来预防枪支暴力 |
| 规避 | 通过减少对相应风险的暴露来降低风险源，例如，不执行可能导致危害的流程（Aven 等，2018年；Smith 和 Brooks，2013）或通过避开地点或预计暴露程度较高的区域（BBK，2011）。虽然规避的主要规避的主要重点是尽可能降低负面 |

| | |
|---|---|
| | 减少扰动事件造成的后果，也会影响<br>事件演变为（严重）扰动事件的概率（因为<br>没有暴露，就不会发生扰动事件）。<br>例如：在紧急情况即将发生时疏散建筑物，<br>以避免人员伤亡；不在<br>地震或洪涝易发区内建造设施，也不搬迁到某个区域<br>饮用水稀缺，通过支付来消除持械抢劫的风险<br>员工薪酬采用电子银行而非现金支付（Smith 和 Brooks，<br>2013年）。 |
| 防护 | 通过降低系统的脆弱性来降低风险，即降低<br>在遭受特定暴露时产生的影响或后果<br>通过调整系统属性来应对扰动事件（已实现的威胁）<br>（DIN EN ISO 22300:2018；Häring 等，2016）。这也可能意味着<br>降低事件导致任何负面<br>后果的概率。实现防护的一种方式是制定<br>应急预案和危机预案，以便在发生<br>紧急情况、危机或灾害情境时使用（Park 等人，2013；Petersen 等<br>等，2020年）。因此，防护与应急<br>响应措施相关，这些措施属于危机或灾害管理的一部分（见<br>下文）。<br>与吸收（与韧性相关，见第3.4节）不同，许多<br>保护措施明确针对特定且已识别的<br>扰动，例如抬高建筑物，以降低<br>它们将被洪水淹没，或者将输电线路<br>转移到地下，以更好地抵御风荷载和冰荷载（NIBS，2019年）。<br>然而，由于防护直接针对系统或其<br>能力，因此它是与韧性联系最为密切的风险缓解策略<br>——它与吸收能力存在一定的重叠<br>以及相应的增强措施（见下文及章节<br>4.1.3）。<br>示例：修建水坝或墙体、携带盾牌或雨伞 |
| 风险接受 | 风险只能缓解到一定程度（Smith 和 Brooks，<br>2013年）。风险接受描述的是经过充分了解后，对<br>剩余风险或残余风险作出接受决定（BBK，2011年；DIN EN ISO 22300:2018）。<br>因此，它主要关注对已识别的（即，<br>已知的）风险进行判断（Aven 等，2018年）：风险被视为<br>可接受或不可接受；若不可接受，则必须（进一步）<br>加以缓解。 |
| 危机管理 | 所有旨在阻止危机发生并降低其<br>危机和灾害的影响，即危机管理通常涉及<br>承担不同职责的多个参与者，例如政策制定者、风险<br>管理者、系统操作人员或技术人员（Boin 等人，2018年）。<br>尽管危机管理的范围有时侧重于<br>危机应对（Williams 等人，2017年），但大多数定义遵循一种<br>更广义的危机管理理解，其中纳入了<br>危机出现之前、期间及之后开展的活动（Branicki，<br>2020年；Bundy 等人，2017年；Christensen 等人，2016年）。危机前、<br>危机期间和危机后阶段通常会进一步细分，以<br>突出整个过程中所涉及的不同任务。<br>危机管理周期中所涉及的不同任务，例如风险评估、预防、<br>准备、响应、恢复和学习（Pursiainen，2017年）。 |

| | |
|---|---|
| | 传统上，危机管理深深植根于风险管理，因为它高度依赖于对已知和／或预期情境／情景进行分析、预防，并为其制定响应计划／惯例及组建专门组织。也就是说，这适用于较为反复出现的危机，例如洪水、地震或部分基础设施故障；这些危机在一定程度上遵循熟悉的模式（Boin 等人，2018年），或仅指最近发生的严重危机（Boin 与 't Hart，2010年）。然而，这种基于风险的危机管理方法对于指导参与者如何应对此前未知、前所未有的危机，作用有限（Boin 与 't Hart，2010年；Lagadec，2009年）。因此，许多作者主张，全面的危机管理应同时纳入基于风险和基于韧性的管理方法（Boin 等人，2018年；Boin & McConnell，2007年；Park et al., 2013）。<br><br>同义词：灾害管理（我们不区分危机管理与灾害管理，因为广义上的危机管理既包括防止事件演变为危机，也包括防止危机演变为灾害）、灾难管理 |

3.4 吸收能力：扰动之初 这种能力旨在限制扰动的即时影响。

性事件对系统的影响。下表列出了有助于吸收能力的子能力或设计原则。

| | |
|---|---|
| 吸收能力 | 系统降低最初不利影响并……的能力<br>在扰动事件后继续发挥功能（Aven 等，2018年；Jackson & Ferris，2013年）。吸收能力旨在确保持续性。<br>系统（Béné 等人，2012年）。吸收能力包括一些方面。<br>自动显现或无需费力便可实现（Rose 和 Dormady，2018年；Setola 等，2016年；Vugrin 等人，2011），这与恢复能力和适应能力不同。与防护不同，吸收措施<br>不针对特定情景，而是增强系统整体的普遍能力，<br>使其能够抵御任何扰动事件。完全成功的<br>吸收在性能曲线上体现为没有出现<br>下降（Wied 等，2020年）。<br>同义词：静态经济韧性（Rose，2007年）、吸收能力（H. Xu 等，2020年）<br>相关过程：吸收<br>包括：稳健性、冗余、多样性、资源调度能力、<br>态势感知、监测和模块化。<br>示例：安全裕度、过剩或缓冲能力（Francis 与 Bekera，2014年；Rose 和 Dormady，2018年）、使用备用发电机、储备关键材料，以及进口<br>在受影响地区供应短缺的商品，以及备用裕度<br>（Rose 和 Dormady，2018年） |
| 稳健性 | 系统承受某一<br>扰动事件的即时影响的能力。增强稳健性的度量能够降低影响破坏性事件的影响，并会在事件发生前实施（NIAC，2010年；Vugrin 等人，2011）。稳健性是最常被 |

| | |
|---|---|
| | 用于描述韧性能力的术语（Mottahedi 等，2021年）。稳健性可以通过系统能够维持其多少性能来描述在扰动事件发生后（Aven 等，2018年；Häring 等人，2017；Mottahedi 等，2021年）。因此，对特定扰动事件的稳健性可以通过事件发生后的最低性能进行量化（Nan 等人，2014年），例如，至少80%的家庭拥有地震后持续供电（Shinozuka et al., 2004），或者，更一般地说，以扰动事件的强度除以其引发的初始性能损失的强度（Meyer，2016）。同义词：抵抗力（Carlson 等人，2012）、生存能力（Mottahedi 等，2021）<br>示例：能够防止飓风对化学品造成损害的堤坝设施（Vugrin 等人，2011） |
| 冗余 | 系统运行机制可运行的替代路径数量（Vugrin 等人，2011），或系统中有多少独立组成部分可以执行相同的功能，从而能够替代发生故障的部分，以确保系统的功能性（Kumar 等，2021年）。冗余会提升系统的吸收能力（Mottahedi 等，2021）。<br>示例：备用通信系统，从多个供应商处采购投入资源（Vugrin 等人，2011） |
| 多样性 | 形式和行为的多样性（Fiksel，2003年），包括对扰动响应的变异性（Elmqvist 等人，2003年）。多样性与冗余密切相关，但其目标是避免系统中不同部分（可能存在冗余）发生相关故障（Sterbenz 等人，2010年）。在生态学/生物学语境中，这通常被称为响应多样性（Elmqvist 等人，2003年；Mori 等人，2013年）在这些语境中，它有时被视为功能冗余的一个方面（Kahiluoto 等人，2014年；Simpson 等，2020）。与冗余类似，多样性是构建韧性基础设施的一项基本设计原则（Thier与Pot d'Or，2020年）。多样性包括例如设备多样性、人员多样性和软件多样性（Thier与Pot d'Or，2020年）。<br>示例：从多家制造商处采购组件，使用用于控制设备的不同协议（Thier与Pot d'Or，2020年） |
| 资源充足性 | 系统操作人员在扰动演变过程中巧妙应对的能力。它包括识别问题、确定优先处理事项，并将决策传达给负责执行的人员这些优先事项（Kumar 等，2021；NIAC，2010）。实施这些优先事项必然需要具备财务和技术资源的可用性。与稳健性和冗余不同，资源调度能力主要取决于人员，而非技术（NIAC，2010）。有时，资源调度能力被视为恢复能力的一部分（Mottahedi 等，2021）。事实上，如果资源调度能力较强，这可能会同时提高吸收能力和恢复能力（Argyroudis 等，2020年）。我们则将资源调度能力归入吸收能力，即针对正在发生的扰动采取行动，时间尺度要短得多，并意味着对系统进行短期临时变化。需要注意的是，我们所归类为资源调度能力的概念被一些作者称为适应能力或适应性（例如，参见 Mottahedi 等人（2021年）、Vugrin 等人（2011年）或 Francis 和 Bekera（2014年））。在 |

| | |
|---|---|
| | 相比之下，我们将适应性定义为进行长期<br>适应的能力，这意味着在系统中实施持久性变化<br>以防止未来的负面影响（见第3.6节）。<br>同义词：固有韧性（Rose，2007年）<br>示例：系统管理者具备良好的决策能力，<br>为供应短缺的关键材料寻找新的替代品（Rose & Dormady，2018年） |
| 态势感知 | “了解正在发生什么”，以感知、理解和<br>预测为基础。感知是识别环境中的线索，<br>理解则是分析这些线索的含义，<br>多条信息，而预测则是指进行<br>对近期状态的预测（Endsley，1995年；<br>Mutzenich 等，2021年）。态势感知能够提升短期<br>应对突发危险的能力。因此，与预见不同，<br>态势感知旨在识别当前情境以及<br>即将发生的事件。有人可能会认为，态势<br>按定义，认知关注的是识别特定<br>扰动，因此它并非韧性能力，而是风险<br>管理的一部分。然而，识别出“某些事情正在<br>发生”，并正确评估和判断这一观察结果对<br>系统的影响，是一种韧性能力，因为它使实体能够<br>应对先前未知且出乎意料的情况，并从中学习<br>来自这一过程。<br>示例：导航系统中的自动化过程，以避免<br>船舶碰撞（Engler 等人，2020年）<br>同义词：情境意识（Stanton 等人，2001）（注：我们<br>更倾向于使用“态势感知”这一术语，以强调其所指的是<br>人们希望感知的情境，而不是其他某种其<br>感知可能会受到情境条件的影响） |
| 监测 | 监测通常指持续收集<br>能够反映系统当前状况的数据（经济合作与发展组织，2002年）。<br>供水网络中的监测系统<br>会定期检查水质（Sankary 和 Ostfeld，2017年），而铁路<br>监测系统会捕捉列车的速度、重量、加速度以及<br>列车的声发射（Ngamkhanong 等，2018年）。因此，<br>监测有助于发现危险并应对<br>正在发生的扰动（Jovanović 等，2018年；Ngamkhanong 等，2018年）。<br>与态势感知不同，监测不一定<br>着眼于外部，但强调感知当前状态以及<br>系统内部过程的性能。从这个意义上说，<br>监测也可以指对系统自身<br>韧性状态的监测（参见第3.7节中的韧性监测），这构成了<br>运营韧性管理等实践的基础（参见<br>第3.7节）。 |
| 模块化 | 模块化指系统设计，描述一个<br>系统划分为局部且相对独立的隔间或<br>模块的程度（Biggs 等，2012；S. R. Carpenter 等，2012）。同样，在<br>网络理论的语境中，模块化“指的是以下程度：<br>存在若干由紧密连接的节点构成的子集，而这些子集之间的连接较为松散<br>到其他节点子集”（Biggs 等，2012）。模块化或 |

分区化设计能够在系统的部分组件发生故障时维持剩余功能（Jackson 和 Ferris，2013），并遏制扰动的扩散（S. R. Carpenter 等，2012）。同义词：局部化能力（Jackson 和 Ferris，2013）示例：基于多个微电网运行电力配电系统（Mahzarnia等，2020年；Schneider 等，2017年），以及通过防火带网络对森林区域进行分区（S. R. Carpenter 等，2012；Kharrazi 等，2020年）

3.5 恢复能力：在扰动期间 当扰动事件的即时影响显现，并且系统正逐步恢复这些影响时，这种能力便变得十分重要

。下表列出了有助于恢复能力的子能力或设计原则。

恢复能力 系统在扰动事件发生后尽可能迅速地重新建立性能的能力。绝大多数韧性定义都将恢复能力视为韧性的核心方面（Mottahedi 等，2021）。它指为逆转扰动事件影响而采取的行动

扰动，例如派出维修队、通过修理组件
使用备件、订购缺少的备件。应急预案可以
增强恢复能力，此外还需要胜任的紧急行动，以及能够
将合适的人员和资源调配到合适的地点（NIAC，2010年）。
如果能够迅速恢复性能，且所需资源
很少，恢复能力就很强（Ouyang等，2012）。与……相比
资源调度能力通常包括用于减轻
扰动造成的初始不利影响的临时措施，而恢复能力通常
包括对系统进行持久性变化。此外，恢复
能力始终指消除扰动在系统中造成的负面影响，
而资源调度能力也
涉及限制潜在的次生影响
扰动事件，从而实现性能的快速恢复（注：
因此，较强的资源调度能力可以提升系统的恢复
能力）。大多数研究将恢复定义为回到
正常运行状态，而少数研究则将其定义为回到
原始运行状态（扰动前）（Mottahedi
等，2021）。总体而言，我们倾向于使用“正常状态”这一概念或“期望状态”，因为它涵盖了扰动前后性能水平可能存在差异的情况（见图1）。不过，需要注意的是，何为正常状态或期望状态（以及何为非正常状态或非期望状态）因系统而异，因此应当指出，何为正常状态或期望状态（以及何为非正常状态或非期望状态）取决于具体系统，因此，在开展针对恢复能力的评估之前，需要先明确界定恢复能力。
同义词：快速恢复（NIAC，2010年）、可恢复性（H. Xu 等，2020）。相关过程：恢复、恢复、复原。包括：快速性、可恢复性。示例：库存中备有大量备件

| | |
|---|---|
| 可恢复性：系统恢复其性能和韧性能力的能力 | 在扰动后（Mottahedi 等，2021），例如在<br>可恢复性高时，系统可恢复至原有性能的 100%。<br>同义词：可修复性（Jackson & Ferris，2013年） |
| 快速性 | 系统在扰动后恢复其性能的速度。这可以<br>例如，可通过性能曲线的斜率进行量化（Mottahedi<br>等，2021；Nan 等人，2014），例如每<br>天恢复 10% 的性能；或在地震发生后 3 天内完全恢复（Shinozuka 等人<br>，2004）。<br>同义词：恢复斜率、工程韧性（B. Walker 等，<br>2004），Pimm 韧性（Pimm，1984；Pimm 等，2019）<br>示例：由于维修团队距离较近，因此能够快速恢复 |
| 优雅<br>可降级性 | 弹性系统的能力：当应对<br>扰动所需的系统能力被超出时，性能逐渐下降<br>而非突然下降（Wied 等，2020）。这使系统能够<br>暂时处于安全但退化的状态运行，从而能够提供帮助<br>在扰动后恢复正常运行（Bie 等，2017年）。它<br>也被定义为系统恢复到可接受状态的能力<br>在扰动之后恢复，而完全鲁棒的系统则会<br>恢复到最优状态（Andersson 等，2020年）。<br>同义词：弱鲁棒性（Andersson 等，2020年；Schmeck 等，<br>2010年)<br>相关过程：优雅降级、优雅退化<br>(Wied 等，2020)<br>示例：紧急情况下切换到安全运行模式 |

### 3.6 适应能力：扰动之间 我们提出的韧性区分基于

分为三种主要能力，依据两项主要论点：（1）每种能力都应与韧性周期中的一个阶段相关联，在该阶段，其相关过程占主导地位；（2）每种能力都应对系统应对破坏性事件的能力产生独特影响，而这种影响可以从性能曲线中提取出来（见讨论部分4.1.1）。然而，也存在其他合理的框架，按照不同的分类标准组织这些能力。对于适应能力，不同解释之间的差异尤其明显。一些作者使用“适应能力”一词来描述防止系统失效的临时行动（Mottahedi 等，2021年）；然而，由于这主要涉及缓冲当前扰动的影响，我们将其称为资源调度能力，并将其归入吸收能力（旨在将初始影响保持在较低水平）。另一些作者指出，适应能力和恢复能力在恢复期内并行发挥作用（例如，Klimek 等（2019年）的图1中有所体现），因此只能根据潜在机制加以区分（而不能依据分析性能曲线所获得的信息，也不能依据相关过程发生的时间进行区分，见本文档中的图1）——其中，适应能力被定义为系统在恢复阶段自我调整的内生能力，而恢复能力则被定义为系统在该阶段通过外部行动得到修复的外生能力（Nan 等人，2014年；Vugrin 等人，2011年）。按照我们的理解，内生能力和外生能力都应纳入恢复能力，因为二者都旨在恢复性能（“区分它们对系统性能的影响并非易事”，Nan 等人（2014年））。另一种解释是，与其他能力不同，适应能力使系统能够在特别严重的破坏性事件期间维持功能，而这类事件需要对

当前实践（Rose，2007年；Rose 和 Dormady，2018年）认为，功能的维护既可以指吸收性能损失，也可以指恢复性能。因此，我们会将这种能力的一部分归入吸收能力和恢复能力。

所有这些解释都将适应能力描述为一种情境性技能，即以娴熟的方式管理正在发生的扰动，以尽量减少性能损失（我们将其称为吸收能力），或在扰动之后恢复性能（我们将其称为恢复能力）。相比之下，我们认为适应能力是一种战略性技能，重点在于从过去成功克服的扰动中学习（与例如 NIAC（2010年）或 Rehak 等人（2019年）提出的定义一致）。因此，相关过程（适应）主要发生在扰动之间，并不会直接影响性能曲线。相反，适应会作用于另外两种韧性能力；也就是说，如果适应成功，就会同时增强系统的适应能力和恢复能力（更多细节见下表）。

下表列出了有助于提升适应能力的子能力或设计原则。这些能力体现在系统正常运行期间以及两次扰动之间，而不仅仅是在扰动发生期间。

| | |
|---|---|
| 适应能力 | 系统的适应能力描述了其改变自身以应对未来扰动的能力（NIAC，2010年；Rehak 等，2019）。这也意味着对当前实践或政策实施变化，并从扰动中学习，例如通过修订计划、修改程序以及引入所需的新工具和技术，在下一次危机之前加以改进（NIAC，2010年；Toroghi 与 Thomas，2020年）。因此，系统的适应能力主要由社会组成部分（人类行为）决定，较少取决于技术特征（B. Walker 等，2004）。如果适应能力较高，系统的性能可能会比扰动发生前有所提升（Häring 等人，2017年），或者即使系统承受的压力增加，性能仍保持不变（Béné 等人，2012年）。然而，最重要的是，作为对扰动的后续响应，高度适应性系统本身的韧性将得到提升（Rehak 等，2019）。<br><br>适应能力是一种独特而强大的韧性能力，其影响体现在其他韧性能力（即吸收能力和恢复能力）的发展上。与吸收能力和恢复能力相比，适应能力通常不着眼于当前的扰动，而是旨在提升系统应对未来扰动的能力（NIAC，2010年；Rehak 等人，2019年）。例如，恢复能力关注的是恢复到先前的性能水平，从而克服当前扰动造成的影响（例如，修复损坏的组件）；适应能力则旨在通过改变当前实践（例如，使用新材料制造未来的组件，使其更能抵御某些影响）来提升应对未来扰动的能力。只有当持续性压力扰动的强度过大，无法被完全吸收时，适应能力才会用于应对正在发生的扰动，也就是说，它使系统能够适应新的条件（Béné 等人，2012年）。然而，在我们的 |

| | |
|---|---|
| | 据此理解，这种调整是通过吸收能力实现的：<br>适应增强了吸收能力，进而使<br>系统能够吸收压力扰动带来的影响。由于<br>适应能力在系统韧性中发挥着核心作用，一些<br>作者甚至将韧性视为适应性的同义词（Norris 等人，<br>2008）。<br>同义词：适应能力、适应性、适应性、重新调整<br>能力（Toroghi 与 Thomas，2020年）<br>相关过程：适应、适应、学习过程（S.<br>Carpenter 等，2001）<br>包括：预见、准备（Béné 等人，2012年）和灵活性<br>示例：高度意识到某些事情可能会出错，并且频繁<br>根据近期事件更新应急计划（Setola 等，2016年） |
| 前瞻<br>能力 | 系统或组织预测未来风险的能力<br>（Francis 与 Bekera，2014）在对 25 种以上韧性定义的综述中，<br>只有三种明确定义包含预见的能力<br>扰动（Mottahedi 等，2021年）。<br>不同于态势感知，前瞻能力并不<br>关注当前情况和近期未来，而是关注将要发生的事件<br>在中长期内发生。预见超越了<br>预测，还包括对潜在事件应采取适当行动方案的分析<br>（Pezzulo 等，2008）。<br>相关过程：预见 |
| .....的能力<br>做好准备 | 系统预先采取适当度量以应对<br>潜在不利事件的能力（Francis 与 Bekera，2014）。例如，在<br>关键基础设施中，准备工作的一项重要组成部分可能是<br>建立足够灵活的危机管理体系，以便<br>适用于各种不同的情景。一些作者将<br>准备或规划归入韧性周期的一个独立阶段，<br>而不是将其纳入适应之中（见图1或 Ganin 等人（2016年））。<br>我们假设适应和准备都发生在两次<br>扰动之间，并且准备只是适应的一种表现形式。<br>与规避、预防和防护不同，准备并不<br>旨在改变与特定<br>扰动相关的风险或其影响，而是接受风险并增强社会和<br>知识层面的能力，以便从过去的扰动中学习并采取适当的<br>行动。以下简单示例可以说明这一点：在某个<br>施工现场，砖块时不时会意外掉落并造成<br>工人的头部受伤。在此情况下，掉落的砖块是扰动<br>事件，而工人因此受到的伤害就是该事件的影响。<br>预防可能意味着每天检查是否有砖块已经<br>松动，从而降低砖块掉落的概率（即降低<br>事件发生的概率，以风险源为着力点）。<br>规避可能意味着在有风险的区域使用机器，而不是工人<br>砖块特别可能掉落的地方（即减少工人的暴露<br>）。防护措施可以包括向工人发放头盔，<br>从而降低伤害的严重程度（即降低<br>扰动的直接影响）。相比之下，准备则会<br>接受工人可能因各种原因受伤这一事实无法完全避免，并因此雇用<br>医生来治疗伤害<br>在现场，使工人能够迅速恢复工作（即，接受 |

| | |
|---|---|
| | 扰动及其直接影响的可能性，但要做好准备<br>使系统能够更好地应对这些影响）。<br>同义词：规划能力<br>相关过程：准备、规划<br>示例：快速规划过程（Häring 等，2016年）、动态<br>自适应政策路径（Haasnoot 等，2013年）、应急演练 |
| 灵活性 | 系统应对环境变化的能力（Schmeck<br>等，2010）或应对可接受的性能水平变化的能力<br>（Andersson 等，2020）。灵活性与优雅可扩展性（见下文）密切相关，<br>因为它体现了系统相较于其原始设计所能改变和扩展的程度，<br>系统可以改变和扩展的程度与其原始设计相比<br>（Andersson 等，2020）。这需要改变<br>系统的内部过程。<br>可恢复性描述的是恢复到初始<br>可接受性能水平的能力，而灵活性描述的是系统改变<br>其对何为可接受性能水平的判定标准的能力<br>（示例见 Andersson 等人（2020年）中的图4）。<br>同义词：持续适应性（Andersson 等，2020；Woods，<br>2015）<br>示例：公司适应政治设定的新限值，<br>或组织逐步实现数字化 |
| 优雅<br>可扩展性 | 系统持续适应不断增大的应力的能力，而<br>脆性系统则不同，一旦扰动<br>事件超出系统最初设计用来应对的事件范围，系统便会突然崩溃<br>（Woods，2015，2016年，2018年）。该术语由 Woods 提出，<br>他将其描述为优雅降级与软件<br>可扩展性的结合（Woods，2018年）；软件可扩展性描述的是一种<br>软件工程中的一项原则，即提前考虑未来软件<br>扩展的需求，并在设计过程的早期就予以考量。因此，<br>优雅可扩展性描述了系统转变为一种<br>new “状态 performance”, 即进行转变，调动新的资源，<br>响应、关系和优先事项的能力。如果优雅可扩展性较低，<br>当系统承受应力时，会失去适应新环境的能力<br>持续增加时，系统会失去适应新环境的能力（Woods，2018年）。<br>Woods（2015）将优雅可扩展性描述为多种<br>关于韧性的概念视角之一。与此相反，我们将优雅<br>可扩展性视为适应能力的一个方面，专门<br>针对挑战不断变化和加剧的情形。该<br>与反脆弱性概念的区别在于，反脆弱系统<br>不仅能在应力作用下继续发挥功能，甚至还能<br>提升其性能（Aven，2015b）。<br>反义词：脆性（Woods，2018年）<br>相关过程：渐进式扩展 |
| 转型<br>能力 | 与描述渐进式变化的适应性不同，<br>转型能力描述的是经历深刻<br>变化的能力，这些变化涉及系统的主要结构或功能。例如，<br>较强的转型能力有助于一个区域从农业型经济转向资源开采型经济<br>（Béné 等人，2012年）。原则上，<br>转型能力表示一种极端的适应能力，<br>即适应。<br>同义词：转型能力 |

| | |
|---|---|
| | 示例：从化石能源转向可再生能源，例如在电力供应网络或道路基础设施中。相关过程：转型 |

### 3.7 以韧性为目标的管理流程 以下术语描述了旨在提升系统韧性相关能力的管理策略。

| | | |
|---|---|---|
| 韧性管理 | | 与针对特定已知威胁强化系统的传统风险管理（Aven, 2019；Francis & Bekera, 2014）不同，韧性管理承认并非所有风险都能预先预测或识别，即“意外已成新常态”（Linkov 等人，2014；联合国减少灾害风险办公室，2019），也并非所有风险都能避免（Francis & Bekera, 2014）。因此，重点不再是预防和解决个别可预见的危机，而是从不利情况中学习并适应。由此，韧性管理较少关注对个别风险的预防和防护，而是旨在整体提升应对扰动的能力（Anholt & Boersma, 2018）。此外，韧性管理还明确纳入多种缓慢发生、低概率和低强度的扰动。韧性管理的主要对象是韧性<br><br>能力或能力（Lichte 等，2022）。第二种情况下，韧性管理是绩效管理的一部分，因为韧性的目标是在各种扰动面前使系统能够保持良好运行，（Aven & Thekdi，2018年）。韧性管理通常包括对韧性的量化和评估，以及对各种方案的选择、优先排序和实施，旨在提升韧性（Häring 等人，2017）。一些作者指出，韧性管理可以受益于借鉴传统风险管理的方法，例如广泛识别、判断和分类潜在扰动，评估其发生概率以及与之相关的不确定性（Aven，2017）。同样，风险管理也可以受益于韧性管理，例如采取度量为使系统免受未明确的扰动（例如，扩大安全裕度）而采取的措施，也总会增强对某些特定已知扰动（例如，抵御极端天气天气）。 |
| | 运营韧性管理 | 基于能够捕捉并实施韧性概念的韧性管理（Ganin 等，2016），即将其操作化，或“付诸实践”（Caralli 等，2016；S. Carpenter 等，2001；Herrera，2017）。已有若干用于将韧性管理操作化的框架，例如 Schauer 等（2021），Caralli 等（2010）或 Lichte 等（2022）。韧性的具体实施需要提前开展——在系统遭受损害且出现不良后果之前（Kahan 等，2009）。 |
| | 运营韧性管理 | 短时间尺度上的韧性管理 , i.e., “实时”且处于相应系统的运行之中（Jaroš 等，2016年；Thibodeaux 与 Favilla，1996年）。运营韧性管理基于 |

| | |
|---|---|
| | 持续更新、快速变化的信息。运营<br>运营韧性管理因此可视为战略韧性管理的反面<br>（Dvorakova 等人，2017年；Klumpp 等人，2010年）。<br>运营韧性管理强调韧性框架的适用性<br>运营韧性管理则强调<br>为提升韧性而作出决策的时间尺度较短<br>韧性能力得以形成。因此，运营韧性<br>管理侧重于管理当前的韧性<br>能力在某一特定情境下的状态。 |
| 战略<br>韧性<br>管理 | 战略管理是指规划如何实现长期<br>目标；相比之下，运营管理则以<br>较短的时间尺度开展（Dvorakova 等人，2017年；Klumpp 等人，2010年）。对于<br>韧性管理而言，这意味着要聚焦一般韧性，<br>即韧性中描述应对<br>扰动的一般能力的部分，而不受当前情境影响。<br>同义词：一般韧性管理 |
| 韧性<br>工程学 | 一种韧性管理。“韧性工程”一词<br>由 Hollnagel 创造，他将其描述为一种通过应用韧性的四大基石，使<br>系统更具韧性的过程<br>(Hollnagel, 2011a)：预见、监测、响应（即，<br>吸收能力）和学习（即适应能力）。<br>韧性工程增强系统维持<br>功能性的能力，使其能够适应各种条件（包括扰动）（Madni<br>& Jackson, 2009）。根据Hollnagel的观点，韧性工程与<br>他所说的传统安全管理不同，它不仅<br>分析“出了什么问题”，同时也着重理解<br>系统在正常条件下如何运行（“哪些方面运转良好”）<br>（Hollnagel，2011b）。因此，根据这一定义，韧性<br>工程学旨在识别能够支持韧性的技术，<br>例如自修复材料，或能源自给型自动化<br>传感器网络（Linkov 等人，2014年）。不过需要指出的是<br>韧性工程的概念受到一些人的强烈批评，<br>例如，有人认为该概念对安全管理中普遍实践的描述有误<br>（Aven，2022；N. Leveson，2020），或者认为<br>与……理论相比，它几乎没有体现出任何新意<br>高可靠性组织（Haavik，2021）。 |
| 韧性设计 | 一种在设计过程中将韧性融入系统的方法<br>阶段，例如通过明确优化韧性设计原则（见<br>下文），如多样性和凝聚力（Fiksel，2003年）。该术语主要被<br>从业者使用。例如，洛杉矶市<br>开展了一项“韧性设计”计划，以提高地震<br>韧性，该计划强制要求对1980年前建造的建筑进行改造<br>并为新建通信塔制定更严格的标准<br>（Jones 和 Aho，2019年）。其他例子来自绿色<br>工程学领域，其通过最大限度发挥内在特性来减少或<br>消除扰动可能造成的负面影响（Anastas 和<br>Zimmerman，2003年；Fiksel，2006年）。与之相关的方法，如基于风险的<br>设计（Park 等，2011年）或安全引导设计（N. G.<br>Leveson，2016年），旨在降低已知风险，而韧性设计则<br>主要关注于构建使系统能够<br>灵活应对潜在突发事件的能力，其中包括 |

| | |
|---|---|
| | 适应不断变化的条件并恢复性能的能力<br>一旦失效不可避免。与韧性管理相比，<br>韧性设计并不是贯穿系统<br>生命周期的持续性主动过程，但它为此奠定了基础。<br>同义词：固有韧性（Fiksel，2006年）、基于韧性的设计<br>（Park 等，2011） |
| 设计原则 | 设计原则描述了韧性的潜在来源，因此可以<br>帮助构建和维持韧性（S. R. Carpenter 等，2012年；<br>Jackson 和 Ferris，2013年）。弹性系统广为人知的一般设计原则包括<br>例如多样性、冗余、<br>模块化、辅助原则、缓冲储备、地理分散<br>(Thier与Pot d'Or，2020年)、凝聚力（Fiksel，2003年）、反馈，<br>监测、领导力和信任（S. R. Carpenter 等，2012年）。<br>同义词：韧性原则（Jackson 和 Ferris，2013年） |
| 韧性建设<br>系统属性 | 设计原则是对潜在来源的抽象表述<br>韧性（Engler 等人，2020年；Jackson & Ferris，2013年）。例如，<br>在特定系统中，一般原则"多样性"可能指的是<br>供应商多样性、消费者多样性、能源来源多样性、<br>软件多样性、员工多样性等。因此，为了<br>提高实际系统的韧性，需要将抽象原则<br>转化为实际启示（Engler 等人，2020年），这些启示<br>与特定的韧性建设系统属性相关。<br>同义词：韧性资源（Mahzarnia等，2020年；Richards，<br>2016年） |
| 韧性<br>监测 | 一般而言，监测是指持续且系统地收集<br>关于特定指标的数据，以追踪目标的实现进展<br>目标以及拨付资金的使用情况（经济合作与发展组织，2002年）。数据收集<br>方法和工具可能包括文件审查、观察、<br>调查、焦点小组访谈和关键知情人访谈<br>（Ngamkhanong 等人，2018年；世界银行集团，2017年）。韧性<br>应利用韧性监测向管理者和利益相关方通报<br>韧性能力的状态（Béné 等人，2015），基于适当的<br>韧性指标或指数（见第 3.8 节）。 |

### 3.8 韧性分析 以下术语经常

用于评估和解释韧性及其对系统性能的影响。

| | |
|---|---|
| 韧性过程 | 韧性过程描述了系统的韧性行为，<br>这种行为源于其韧性能力。韧性过程<br>由此展示韧性能力如何得以实现，或如何在某一时刻"付诸<br>行动"，这一过程受到不确定性、当前<br>情境以及系统近期经历的影响。因此，<br>不应将韧性过程与韧性本身混为一谈，<br>韧性能力是驱动因素或原因，而<br>过程则是由此产生的行动。<br>可以根据基于性能的<br>韧性指标推断韧性过程，例如性能曲线下面积<br>（Kanno 等人，2019年）。 |

| | |
|---|---|
| | 同义词：韧性表型（Kanno 等人，2019年）<br>示例：吸收、恢复、适应 |
| 韧性周期 | 扰动展开过程中各阶段的概念性序列，其中<br>某些能力和行动比其他能力和行动更为重要（参见<br>图1中的韧性阶段）。通常包括<br>准备/预防阶段、吸收/响应阶段，以及<br>恢复阶段（Fischer et al., 2018; Häring 等人，2017; Rehak 等，<br>2019年）。恢复阶段之后，可能会进入适应阶段，<br>在此期间，系统从扰动中学习，并将<br>所学经验融入其中，使其更能抵御下一次扰动<br>（Rehak 等，2019）。为简单起见，韧性周期假定<br>扰动不会相互重叠，且某次扰动对<br>系统运行的主要影响会集中在一个简短的时间<br>跨度内。然而，显然韧性能力只能部分<br>映射到各个阶段。例如，学习（Mottahedi 等，<br>2021年）和预见贯穿整个周期都必不可少，而非仅限于<br>各自对应的阶段。<br>同义词：危机管理周期（Pursiainen，2017年） |
| 性能曲线 | 通常指性能随时间变化的曲线（Argyroudis 等<br>等，2020；Jovanović 等，2018年；Mishra 等，2021年；Oboudi 等，<br>2019年；Panteli 和 Mancarella，2015a；Taleb-Berrouane 与 Khan，2019年）。<br>它通常以概念化、简化的方式呈现为典型的<br>“浴缸形状”，即一条直线，随后出现陡峭下降，<br>明显且持续时间较长的上升，并恢复到先前水平（参见<br>图1）。为避免混淆，我们主张使用术语<br>“性能曲线”，而不是常用的术语“韧性<br>曲线”，因为因变量通常是性能，而不是<br>韧性。 |
| 风险曲线 | 风险曲线根据发生以下情况的可能性概括系统风险：<br>在灾害中经历不同程度的性能退化<br>并将其表示为该性能退化的函数（Shinozuka et al., 2004）。 |
| 易损性曲线 | 显示失效概率或超过特定<br>损伤等级的概率与灾害特征的依赖关系（Kilanitis 与<br>Sextos，2019年；Panteli 和 Mancarella，2015a；Schultz 等人，2010年）。截至<br>目前，它主要用于自然灾害的语境中（Schultz 等人，<br>2010年）。<br>示例：损害概率与峰值地面加速度的关系<br>地震（Kilanitis 与 Sextos，2019年）、电力<br>系统组件关于风速或降雨强度的函数<br>（Panteli 和 Mancarella，2015a） |
| 指标 | 指标是用于#+#+#+#+<br>描述系统某项特征的定量或定性度量，例如韧性、风险，<br>社会脆弱性（Tate，2012年）或可持续性（Fiksel，2006年）。<br>指标用于决策、建立共识，以及<br>探索某些现象背后的过程（Tate，2012年）。 |
| 韧性<br>指标 | 韧性指标通常根据访谈和<br>评估某些被认为是<br>在相应情境中必不可少的韧性能力或构成要素，例如高层<br>管理承诺、学习文化、风险意识和<br>灵活性（Cutter，2016a；Hollnagel，2011b；Shirali 等人，2013；<br>Storesund 等，2018年）。 |

| | | |
|---|---|---|
| | **Key** 性能 指标（关键绩效指标） | 关键绩效指标用于衡量系统的表现或功能（Engler 等人，2018年；Torres 等人，2020年）。例如，电网的运行性能可以通过“供电客户”这一关键绩效指标来衡量（Braun 等人，2020年）（一种生产率的度量）或“最大频率偏差”（Groß 等人，2017年）（电能质量的一项度量，参见第 3.1 节中对“性能”的定义）。 |
| | 关键风险指标（KRI） | 关键风险指标（KRIs）用于估算可能的暴露或损失，即系统未来可能遭受负面影响的可能性（Torres 等人，2020年）。当关键风险指标达到不可接受的数值时，这可能是一个信号，表明必须采取应对措施，以减少对系统的负面影响（Engler 等人，2018年）。同一指标既可作为关键绩效指标，也可作为关键风险指标。例如，在电网中，“最大频率偏差”不仅用于度量电能质量，而且一旦超过某个阈值，还会触发负荷削减等反制措施，或断开发电机（Groß 等人，2017年；Kruse 等人，2021年）。 |
| 指数 | | 指数汇总多项指标，以概括一种复杂的现象（Hawken 与 Munck，2013年；Tate，2012年）。为此，指数通常会将多个度量相互关联，常见的做法是使用比率。例如，在经济学中，指数通常将价格或数量与参考标准联系起来。聚合模型会显著影响指数的稳健性和可靠性（Tate，2012年），以及应用该指数所得出的结论（Bakkensen 等，2017年）。<br>同义词：综合指标（Tate，2012年） |
| | 韧性指数 | 韧性指数结合多项度量，以估算某一系统的韧性。例如，Argyroudis 及其同事编制的韧性指数整合了有关稳健性和快速性的信息资产对多种灾害的应对能力，取决于影响、脆弱性和发生时间（Argyroudis 等，2020年）。Eldosouky 等提出的韧性指数将系统的韧性与其最大韧性联系起来，方法是估算系统从关键状态恢复到正常运行状态的概率（Eldosouky 等，2021年）。种类繁多的韧性指数用于描述韧性基于性能曲线的属性（例如，参见 Bruneau 等（2003）、Francis 和 Bekera（2014）或 Rose（2007））。与基于性能或基于结果的方法（例如，采用性能曲线的方法）不同，另一种做法是估算韧性其依据是被认为有助于构建韧性的系统特征（例如，参见 Asadzadeh 等（2017）或 Cutter（2016a）），即，相应的方法并不以扰动事件的发生为前提，而是关注系统应对潜在事件的能力。在这一系列多样化的相应方法中，最常见的是（例如，Cantelmi 等（2021）、Guo 等（2021）、Bakkensen 等（2017）或 Asadzadeh 等（2017）提供了一些详尽的综述），这些方法是韧性综合指标框架，它们整合了可测量的来自各种来源的信息（例如调查数据、人口统计数据，专家意见），并对其进行汇总或组合，通常遵循某种特定的概念层级（例如，Storesund 等（2018年）、Jovanović 等（2020年）或 Petit 等（2013年）），以获得用于展示系统韧性的指数，其依据包括不同的变量等 |

（Rehak 等，2019）、主题（Jhan 等，2020）、系统功能（Fox-Lent 等，2015）和／或韧性周期的阶段（Jovanović 等，2020）。

# 4 讨论与结论

本术语表汇集了关键基础设施领域中与韧性相关术语，形成了一套综合术语体系。由于其中许多术语的确切含义存在争议，要编纂一套清晰且一致的术语，必须就所采纳的概念脉络作出一些关键选择。这个筛选过程不可避免地受到我们自身对韧性的理解，以及聚焦关键基础设施这一目标的影响。因此，为了阐明我们所作的一些选择，本文最后将讨论其核心内容——我们对韧性的理解。

## 4.1 我们对韧性的理解（为何强调能力？）我们对韧性的理解融合了三

种或许最为根本且影响深远的韧性观点，即工程韧性、生态韧性和社会生态韧性（见第3.2节）。首先，所提出的框架提倡使用性能曲线评估韧性（见第4.1.1节）；这一做法源自工程韧性视角（例如，参见 Yodo 和 Wang（2016）或 Asadzadeh 等（2017））。其基本假设是，系统具有一个明确可界定的期望性能状态，在扰动过程中，系统可能偏离该状态并重新回到该状态。这与我们的框架非常契合，因为该框架旨在适用于关键基础设施；从本质上说，关键基础设施（Petersen 等，2020）为公众提供基本服务，也就是说，期望状态可以定义为服务得以维持的状态。

然而，使用性能曲线的目的不应被误解为韧性可以从单条性能曲线中提取出来，即韧性既不是性能曲线下面积，也不是最低性能水平和／或恢复曲线的斜率（另见 Engle（2011），他指出了最常见的定义与实践中对韧性的运用之间的差异）。性能曲线呈现的是扰动事件与已启动的系统响应相互作用的结果，而这种系统响应受到三个韧性过程（吸收、恢复和适应）的塑造。然而，韧性过程仅仅描绘了系统潜在能力或本领的一种表现形式；另一方面，韧性本身正是这种能力（或能力集合），使系统能够以更理想的方式作出响应。将韧性视为系统的能力或本领这一概念，植根于生态韧性视角（Holling，1973；B. Walker 等人，2004）。

将适应能力纳入韧性的三大主要构成要素之一，为框架增添了社会—生态视角（Adger，2006；S. Carpenter 等人，2001；Folke，2016）。这一补充强调，韧性并非静态特质，而是处于持续发展之中。因此，有效地调控韧性，不仅需要了解系统属性的改变可能如何影响系统进一步发展的潜力，还需要了解此类变化会如何影响当前的系统动力学。总的来说，我们将韧性理解为由三种能力构成的系统所具备的能力，这对我们设想

如何才能最好地评估韧性（见下文第4.1.1节）、如何将韧性融入系统（见下文第4.1.2节），以及如何管理韧性而非风险（见下文第4.1.3节），具有重要意义。

#### 4.1.1 为什么是三种能力？（性能曲线的作用）将韧性理解为由少数几种基本支柱能力构成

这一观点与许多其他作者的研究一致（Francis & Bekera，2014；Rehak 等人，2019）。然而，我们的命名和分类与其他框架有所不同；这些框架依据不同的区分标准来定义支柱能力（Béné 等人，2012；Bruneau 等，2003；Carlson 等人，2012）。例如，Béné 等人（2012）根据系统应对不同强度扰动事件所需的变化程度，区分出三种能力——吸收能力、适应能力和变革能力。其他框架，例如 Francis 和 Bekera（2014）、Vugrin 等人（2011）或 Biringer 等人（2013）提出的框架，使用了与我们相同的名称，但对适应能力的理解截然不同（见第 3.6 节）。有些框架在名称和含义上都与我们的区分大体一致，但额外纳入了一种能力（Linkov 等人，2014；NIAC，2010），例如，考虑系统准备或规划的能力（Linkov 等人，2014），或系统的资源调度能力（NIAC，2010）。我们认为，这两者都是三种基本支柱能力之一的子方面（见第 3.6 节和第 3.4 节）。

那么，我们为何选择这组特定的能力？原则上，我们选择这三项主要能力，是为了最终能够验证相关增强韧性措施的效益与效率。因此，我们考虑了两项要求（Bruneau 等，2003）：第一，能力组合应体现所有增强韧性措施的最终目标（要求 I：目标导向方法）；第二，支柱能力的选择应有助于测量韧性（要求 II：可测量性）。为满足第一项要求，我们的能力需要涵盖韧性的全部范畴，即所有能够区分弹性系统与韧性较低系统的方面。为此，我们考虑了两项能力，它们涵盖应对正在发生或持续进行的扰动的两个关键方面（并且大多数韧性框架都涉及这两项能力），再以第三项更具战略性的能力加以补充，特别强调考虑长期发展、变化和灵活性的必要性。最终形成的能力组合包括：（1）尽可能减小非特定扰动事件初始影响的能力（吸收能力）；（2）尽可能快速、彻底地从扰动中恢复的能力（恢复能力）；（3）从扰动中学习并对系统实施相应改变，从而降低未来破坏性事件影响的能力（适应能力）。

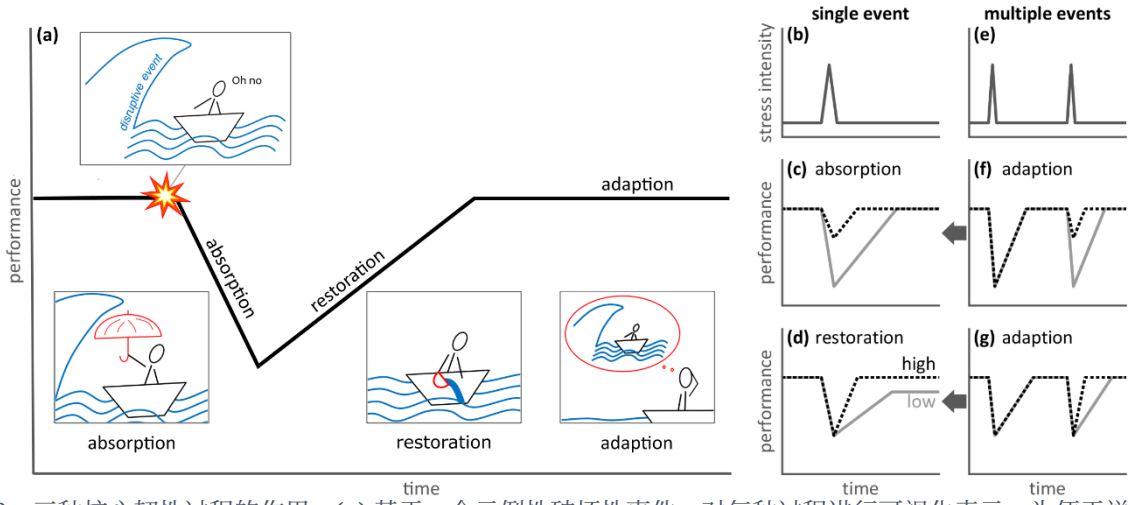



图 2：三种核心韧性过程的作用。(a) 基于一个示例性破坏性事件，对每种过程进行可视化表示。为便于说明，可以将每种过程与韧性周期中的一个阶段对应起来，尽管在现实中，不同阶段很可能在时间上有所重叠。(b-g) 三种过程对系统性能的影响。图中分别展示了吸收和恢复（b-d）在单次破坏性事件下，以及适应（e-g）在多次破坏性事件下的影响；每种情况下均包括能力较高的系统（黑色虚线）和能力较低的系统（灰色实线）。

此外，这三项主要能力满足了我们的第二项要求，即构成测量韧性的基础。在这方面，我们主要考虑的是，为了评估这三项能力，每一项都应对应一种独特且可区分的过程，而该过程参与应对扰动事件（见图 2a）。此外，每项过程的改进都应清晰地反映在性能曲线上（见图 2 右侧）。例如，如果两个系统中有一个能够更好地吸收同一扰动事件，这一点就应体现为两条相应性能曲线之间具有特征性的差异。对于吸收和恢复，我们分配给相应能力的一些子方面（第 3.4 节的稳健性、第 3.5 节的可恢复性和快速性）描述了在单次扰动事件中，能力提升将如何影响性能曲线：吸收能力提高会减小初始影响（稳健性），从而提高最低性能水平（图 2c）；恢复能力提高则会增大扰动事件后性能提升的幅度（可恢复性）和速率（快速性）（图 2d）。对于适应，情况则不那么明朗。在文献中，有时会将一个韧性周期内性能的净增益（相对于扰动前的性能水平，性能有所提高）视为适应的度量（例如，见 Häring 等人（2017年）、Klimek 等（2019年）或 Jovanović 等（2020年））。我们不赞同这一概念，因为我们认为，在正常或无应力条件下优化系统性能不属于韧性的范畴（不过，性能净增益仍可能表明适应已经发生）。在我们看来，适应意味着学会更好地应对未来的破坏性事件。我们认为，这一学习过程最适合描述为另外两项能力的变化；换言之，适应能力是系统调整其两项应对能力（吸收能力和恢复能力）的能力。因此，增强适应的影响不会直接体现在单个韧性周期中，而只会在另外两项能力及其相关过程的长期发展中显现出来，即在未来的扰动中表现为吸收能力或恢复能力增强（图 2fg）。

#### 4.1.2 如何构建韧性？（原则的作用）运用所提出的三种支柱能力有助于

如基于性能曲线对韧性进行评估。然而，我们在此强调，为提升韧性而需要调节的螺钉，是受管理系统的属性（

韧性建设系统属性）。设计或韧性原则（见第3.7节）可为选择适当的韧性建设度量提供指导。我们将认为尤为重要的原则纳入了术语表。其中一些更侧重于“目的”（Bruneau 等，2003），描述韧性设计应实现什么（例如稳健性、快速性、前瞻能力）；另一些则更侧重于“手段”，描述如何实现这些目标（例如冗余、多样性、灵活性）。不过，所有这些原则都有助于描绘弹性系统应有的样貌。

在文献中，设计原则或韧性建设原则通常依据其所促进的能力或更高层次目标，归入少数几个不同的类别（Jackson & Ferris，2013；Rehak 等，2019）。我们沿用了这一做法，将每项原则归为三种支柱能力之一的子类别（见第3.4至3.6节）。然而，这种归类并非完全明确。事实上，某项具体设计原则只涉及三种能力中的一种，这种情况反而并不常见。例如，模块化设计起初可能会阻碍初始有害影响在系统内传播，从而增强吸收能力；但随后，它也能促进系统恢复到先前的性能水平——例如，在多个较小的平衡区域（微电网）内运行能源配电网，可使其在紧急情况下以孤岛模式运行，最终也可能缩短恢复时间（Panteli 和 Mancarella，2015a）。我们认为，大多数韧性建设原则也是如此，因此多数原则都具有多条因果路径（我们的建议见图3）；不过，实际关系最终取决于所关注系统的具体情况。

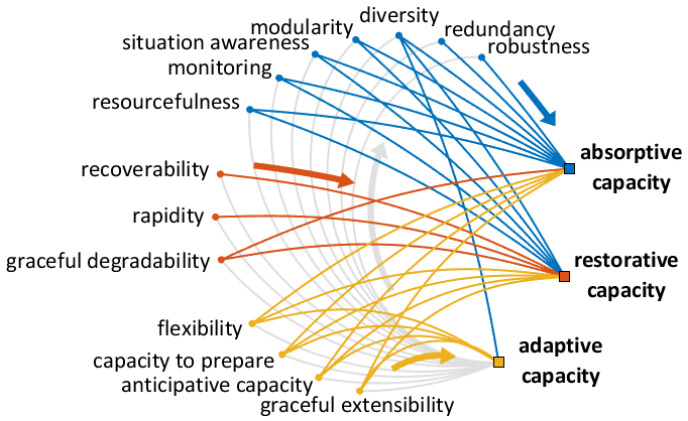



图3：韧性原则与三种韧性能力之间的联系。彩色连线表示假定哪些原则会影响哪些能力。背景中的灰色连线表示适应能力可以通过改变韧性建设系统的任何属性发挥作用。

在韧性原则的实际实施过程中，可能会产生相互依赖关系（另见 Jackson 和 Ferris（2013年））。例如，在上文提到的例子中，模块化设计是电网实现孤岛运行的必要条件，使系统操作人员能够在紧急情况下切换运行模式——将电力供需的平衡从全局平衡转变为局部平衡。多种运行模式的可用性最终增加了灵活处理扰动的选项数量。因此，提高模块化程度有助于提升多样性和资源调度能力。此类依赖关系很可能出现，因为冗余或监测等更具技术性的原则，往往可以为资源调度能力和态势感知等更具组织性的原则奠定基础。

此外，不同原则之间的相互关系也可能涉及权衡。例如，相较于架空输电线路，建设地下输电线路或许能够提高电网的稳健性，但一旦受损，也会妨碍其可修复性（Panteli 和 Mancarella，2015a）。归根结底，我们不能期待系统设计与系统韧性之间存在简单的因果关系——尤其是在关键基础设施等复杂动力系统中。因此，建设韧性始终需要以整体视角审视整个系统，否则可能会忽视不同设计目标之间重要的权衡、依赖关系或协同效应。

### 4.1.3 边界何在？（建设韧性与降低风险的区别）为凸显韧性概念的边界及相应

管理工作的范围，考察旨在降低风险与旨在建设韧性的两种方法之间的区别会有所帮助。对于这两种方法有何区别及其相互关系这一问题，答案很大程度上取决于所咨询的作者（见第 2.4 节），但一个重要且广受认可的区分标准，是这两种方法旨在应对的事件所具有的不确定性，或“可知性”：风险方法有助于为已知或熟悉模式范围内的事件做好准备；韧性方法则旨在使系统能够有效应对任何事件，包括意料之外且独一无二的事件（Boin 等人，2018年；Park 等，2013）。事实上，正是人们日益认识到后一类事件，推动了“韧性思维”在关键基础设施政策中的日益普及（经济合作与发展组织，2019年；Petersen 等，2020；Pursiainen & Kytömaa，2022）。

针对的事件不同，会影响可用于增强韧性的策略性质。我们提出，缓解或降低风险策略可根据其针对的风险决定因素进行分类（见第3.3节）：预防旨在降低严重危害或威胁发生的概率，规避针对的是对这些风险源的暴露，而防护则旨在降低系统的脆弱性（见图4左侧）。这三种策略中的两种——预防和规避——不属于有效的增强韧性措施（见图4右侧），因为它们仅适用于此前已知的危害或威胁（另见 Boin 等人（2018））；也就是说，预防和规避显然完全是以风险为基础的。

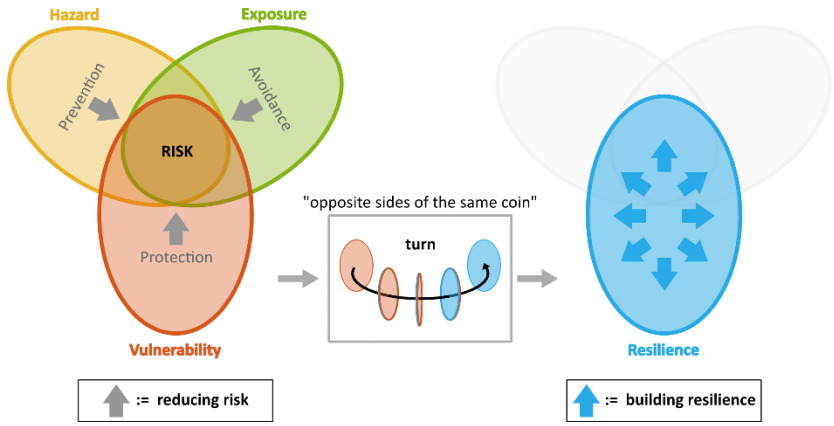



图4: D—预防、规避和防护（以灰色箭头表示）——都针对三个风险决定因素之一降低风险与构建韧性之间的差异与重叠。每一种降低风险的策略

at

预期风险所在之处，即危害、暴露和脆弱性预计交汇之处。增强韧性与防护存在一定重叠，因为这两种度量作用于“同一枚硬币的两面”（IFRC，2020），也就是说，两者都涉及系统的能力。然而，增强韧性不受任何预期风险的影响，因此，相应的度量针对的是全部韧性能力（以蓝色箭头表示，箭头未指向任何特定方向）。左侧插图基于 Lavell 等人（2012）。

相比之下，第三种降低风险策略——防护——与增强韧性的方法存在一定重叠：两者都旨在通过实施能够增强系统能力的变化来降低破坏性事件的影响；从风险视角看，防护针对的是系统对特定事件的脆弱性；从韧性视角看，增强韧性针对的是系统应对任何事件的能力。因此，我们将二者描绘为“同一枚硬币的两面”（IFRC，2020）。为保护系统免受未指明扰动而采取的增强韧性措施（例如扩大安全裕度），也总会增强系统对某些特定已知扰动的防护能力（例如抵御极端天气的影响）；也就是说，提升韧性可被视为一种有效的降低风险策略（例如，Birkmann 等人（2013）或 O'Brien 等人（2006）即采用了这种做法）。同样可以合理地认为，针对特定威胁采取的保护措施，例如制定灾害应急预案或针对特定灾害情景开展培训，通常会增强系统应对意外扰动的能力。归根结底，这两种主动措施的有效性将在系统响应新出现的扰动事件时累积体现。然而，这两种对立视角之间的概念差异，体现在不同的方法论路径上。作为风险管理的一部分，防护是应对不可接受风险的一种缓解选择（另外两种选择是预防和规避）。因此，在权衡和确定不同风险的优先次序时，防护会纳入这一流程：判断已识别的风险中哪些构成最大威胁、发生概率如何，以及缓解最紧迫风险的最高效方法是什么。另一方面，韧性管理并不着眼于处理特定风险，而是致力于维持和增强韧性能力，即系统在任何情况下吸收、恢复并适应任何类型应力的能力。因此，增强韧性是更具整体性、以系统为中心的系统能力建设方法，其中包括系统的长期发展及其自我改进能力（适应能力已明确纳入其中）。因此，我们将韧性提升描绘为涵盖代表韧性的整枚硬币，而防护仅涉及与预期威胁和暴露相重叠的脆弱性部分（见图4）。

归根结底，减少风险与构建韧性在概念上是两项不同的任务，其范围和重点各不相同，但二者的共同目标都是使破坏性事件所造成的负面影响尽可能轻微。因此，我们坚信，在致力于建设安全可靠的基础设施时，最佳途径是采用R2方法，同时开展减少风险和构建韧性的工作（R2等于减少风险乘以构建韧性）：在可能的情况下（付出合理努力），预防和/或规避已知威胁；针对剩余风险保护系统，并构建韧性，以便为意外或无法预测的事件做好准备（预测有时不可避免地会失败）。这种整体性方法能够同时应对已知和未知情况（Park et al., 2013），并同时着眼于减少事件发生的概率，以及在这些事件发生时应对它们的能力（Jovanović 等, 2017）。

## 4.2 结论（它有什么用？）它

有人认为，《科学》取决于对概念的清晰且普遍认可的定义，以及明确界定的参数”（Blokland & Reniers，2020年）。虽然我们非常支持使用清晰的定义并对其进行传播，但我们也意识到，韧性研究领域过于多样且分散，无法通过一份让所有人都满意的统一术语表加以概括。本术语表的目标，是呈现一套整合且一致的术语体系，展现一种关于韧性的可能视角——我们认为，当致力于对关键基础设施的韧性进行可操作和有效的处理时，这一视角尤其有帮助。在这方面，它可以作为新入行学者的引言，也可以作为研究范围相近的学者开展工作的资料来源。通过聚焦于一种特定视角，本术语表能够为将韧性从理论转化为实践奠定稳固的概念基础，例如，探究如何衡量、构建或管理韧性。

虽然我们着重呈现一种关于韧性的观点，但我们也通过借鉴不同学科发展出的多样化理念，在可能的情况下整合不同观点，并在必要时提及相近或相互竞争的观点，以此向围绕这一概念的多样性与模糊性致意。通过这种方式，我们为持有不同理解和/或背景的学者创造了切入点。这些切入点使学者能够将所呈现的定义与自身理解相结合；如果他们不同意术语表中的某些内容，也可以轻松地根据自身需求进行调整。背景在于，我们希望避免使韧性概念失去可塑性，因为正是这种可塑性使该概念在学科边界之内及跨越学科边界时具有广泛吸引力（Brand & Jax，2007年；Meerow 等人，2016年），并最终为跨学科交流与合作提供了机会（Moser 等人，2019年）。归根结底，本术语表在聚焦于一种观点的同时，也充分重视围绕这一概念的多样性，从而为有时令人困惑的韧性术语领域提供方向，构建韧性应用的概念基础，并邀请广泛的人员使用、讨论、调整和进一步发展所呈现的理念。

## 5 致谢我们感谢韧性与风险方法

部门的成员

提供宝贵意见并参与富有启发性的讨论；他们是 Walaa Bashary、Jens Kahlen、Alexander Khanin、Ingo Schönwandt 和 Dustin Witte。此外，我们感谢 Tobias Koch 和 Kostyantin Konstantynovski 对本手稿早期版本提出的宝贵意见。

## 6 参考文献acatech。

（2014年）。韧

面向技术未来主题的韧性设计策略。Adger, W. N. (2000). 社会韧性与生态韧性：二者有关联吗？《人文地理学进展》, 24(3), 347–364. https://doi.org/10.1191/030913200701540465 Adger, W. N. (2006). 脆弱性。《全球环境变化》, 16(3), 268–281. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006 Adger, W. N., Hughes, T. P., Folke, C., Carpenter, S. R., & Rockstro¨m, J. (2005). 沿海灾害中的社会—生态韧性。《科学》, 309(5737), 1036–1039. https://doi.org/10.1126/science.1112122

Alexander, D. E. (2013). 韧性与灾害风险降低：一次词源学之旅。《自然灾害与地球系统科学》, 13(11), 2707–2716. https://doi.org/10.5194/nhess-13-2707-2013 Anastas, P. T., & Zimmerman, J. B. (2003). 通过绿色工程的12项原则进行设计。《环境科学与技术》, 37(5), 94A-101A. https://doi.org/10.1021/es032373g Andersson, J., Grassi, V., Mirandola, R., & Perez-Palacin, D. (2020). 韧性概念框架：基本定义、策略与度量指标。《计算》。在线预先发表。 https://doi.org/10.1007/s00607-020-00874-x Anholt, R., & Boersma, K. (2018). 从保密性到韧性：长期危机国际应对的新视野。载于 B. D. Trump, M.-V. Florin, & I. Linkov (编), 《IRGC韧性资源指南》（第2卷）：复杂互联系统的韧性领域。洛桑：EPFL国际风险。Argyroudis, S. A., Mitoulis, S. A., Hofer, L., Zanini, M. A., Tubaldi, E., & Frangopol, D. M. (2020). 多灾害环境下关键基础设施的韧性评估框架：交通资产案例研究。《整体环境科学》, 714, 136854. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136854 Asadzadeh, A., Kötter, T., Salehi, P., & Birkmann, J. (2017). 将概念操作化：衡量社区灾害韧性的综合指标构建系统性综述。《国际灾害风险降低期刊》, 25, 147–162. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.09.015 Aven, T. (2015a). 反脆弱性概念及其对风险分析实践的启示。1539-6924, 35(3), 476–483. https://doi.org/10.1111/risa.12279 Aven, T. (2015b). 黑天鹅对风险评估与管理基础及实践的启示。《可靠性工程与系统安全》, 134, 83–91. https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.10.004 Aven, T. (2017). 某些类型的风险评估如何支持韧性分析与管理。《可靠性工程与系统安全》, 167, 536–543. https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.07.005 Aven, T. (2019). 呼吁从风险转向韧性：这意味着什么？1539-6924, 39(6), 1196–1203. https://doi.org/10.1111/risa.13247 Aven, T. (2022). 关于安全I、安全II和安全III讨论的风险科学视角。《可靠性工程与系统安全》, 217, 108077. https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108077 Aven, T., Ben-Haim, Y., Andersen, H. B., Cox, T., Droguett, E. L., Greenberg, M., Guikema, S., Kröger, W., Renn, O., Thompson, K. M., & Zio, E. (2018). 风险分析学会术语表。Aven, T., & Thekdi, S. (2018). 基于韧性的策略在风险分析中的重要性，反之亦然（IRGC韧性资源指南（第2卷）：复杂互联系统的韧性领域）。EPFL国际风险治理中心（IRGC）。Aylwin, C. J., König, T. C., Brennan, N. W., Shirley, P. J., Davies, G., Walsh, M. S., & Brohi, K. (2006). 城市大规模伤亡事件中的危重病例死亡率降低：2005年7月7日伦敦爆炸案后的检伤分类、激增应对与资源使用分析。《柳叶刀》, 368(9554), 2219–2225. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(06)69896-6 Backlund, A. (2000). 系统的定义。《Kybernetes》, 29(4), 444–451. https://doi.org/10.1108/03684920010322055 Bakkensen, L. A., Fox-Lent, C., Read, L. K., & Linkov, I. (2017). 在自然灾害背景下验证韧性与脆弱性指数。1539-6924, 37(5), 982–1004. https://doi.org/10.1111/risa.12677

BBK. (2011). 关键基础设施保护–风险与危机管理：企业与政府机构指南。波恩。联邦民事保护与灾害援助局。BCI. (2013). 《2013年良好实践指南：业务连续性的全球良好实践指南》。业务连续性协会。https://www.thebci.org/uploads/assets/uploaded/5c0205f3-a9ff-4f81-9695c3813b674a3b.pdf Béné, C., Frankenberger, T., & Nelson, S. (2015). 韧性干预的设计、监测与评估：概念与实证考量。发展研究所。https://opendocs.ids.ac.uk/opendocs/handle/20.500.12413/6556 Béné, C., Wood, R. G., Newsham, A., & Davies, M. (2012). 韧性：新乌托邦还是新暴政？反思韧性概念在脆弱性降低计划中的潜力与局限。发展研究所工作论文，2012(405)，1–61。https://doi.org/10.1111/j.2040-0209.2012.00405.x Berkes, F., & Jolly, D. (2002). 适应气候变化：加拿大西部北极地区社区的社会生态韧性。《保护生态学》，5(2)。https://doi.org/10.5751/es-00342-050218 Beyza, J., Gil, P., Masera, M., & Yusta, J. M. (2020). 跨境电力互联线路的安全评估。《可靠性工程与系统安全》，201，106950。https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106950 Bie, Z., Lin, Y., Li, G., & Li, F. (2017). 应对极端情况：电力系统韧性研究。《IEEE会刊》，105(7)，1253–1266。https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2679040 Bieder, C., & Pettersen Gould, K. (编). (2020). 施普林格应用科学与技术简明丛书。《安全与安保的耦合》。施普林格国际出版公司。https://doi.org/10.1007/978-3-030-47229-0 Biggs, R., Schlüter, M., Biggs, D., Bohensky, E. L., BurnSilver, S., Cundil, G. l., Dakos, V., Daw, T. M., Evans, L. S., Kotschy, K., Leitch, A. M., Meek, C., Quinlan, A., Raudsepp-Hearne, C., Robards, M. D., Schoon, M. L., Schultz, L., & West, P. C. (2012). 制定增强生态系统服务韧性的原则。载于 Biringer, B., Vugrin, E., & Warren, D. (2013). 关键基础设施系统安全与韧性。CRC出版社。https://doi.org/10.1201/b14566 Birkmann, J., Cardona, O. D., Carreño, M. L., Barbat, A. H., Pelling, M., Schneiderbauer, S., Kienberger, S., Keiler, M., Alexander, D., Zeil, P., & Welle, T. (2013). 构建脆弱性、风险与社会应对的框架：MOVE框架。《自然灾害》，67(2)，193–211。https://doi.org/10.1007/s11069-013-0558-5 Blokland, P. J., & Reniers, G. L. (2020). 风险、安全与保密性的概念：对相似性与差异的基础性探究与理解。载于 C. Bieder & K. Pettersen Gould (编)，施普林格应用科学与技术简明丛书。《安全与安保的耦合》（第9–16页）。施普林格国际出版公司。https://doi.org/10.1007/978-3-030-47229-0_2 Boin, A., & ’t Hart, P. (2010). 组织有效的应急管理：研究启示1。《澳大利亚公共行政杂志》，69(4)，357–371。https://doi.org/10.1111/j.1467-8500.2010.00694.x Boin, A., Hart, P. ‘., & Kuipers, S. (2018). 危机应对方法。载于 H. Rodríguez, W. Donner, & J. E. Trainor (编)，《社会学与社会研究手册》（第23–38页）。施普林格国际出版公司。https://doi.org/10.1007/978-3-319-63254-4_2 Boin, A., & McConnell, A. (2007). 为关键基础设施故障做好准备：危机管理的局限与韧性的必要性。《突发事件与危机管理杂志》，15(1)，50–59。https://doi.org/10.1111/j.1468- 5973.2007.00504.x

Brand, F. S., & Jax, K. (2007). 聚焦韧性的含义：韧性作为描述性概念与边界对象。《生态与社会》，12(1)。https://www.jstor.org/stable/26267855 Branicki, L. J. (2020). 新冠肺炎、关怀伦理与女性主义危机管理。《性别、工作与组织》，27(5)，872–883。https://doi.org/10.1111/gwao.12491 Braun, M., Hachmann, C., & Haack, J. (2020). 停电、恢复与孤岛运行：系统韧性视角。IEEE Power and Energy Magazine，18(4)，54–63。https://doi.org/10.1109/MPE.2020.2986659 Brown, A., Dayal, A., & Del Rumbaitis Rio, C. (2012). 从实践到理论：亚洲在建设城市气候变化韧性方面的新兴经验。《环境与城市化》，24(2)，531–556。https://doi.org/10.1177/0956247812456490 Brown, G., Carlyle, M., Salmerón, J., & Wood, K. (2006). 关键基础设施防护。《接口》，36(6)，530–544。https://doi.org/10.1287/inte.1060.0252 Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W. A., & Winterfeldt, D. von (2003). 定量评估并增强社区地震韧性的框架。《地震谱》，19(4)，733–752。https://doi.org/10.1193/1.1623497 Bundy, J., Pfarrer, M. D., Short, C. E., & Coombs, W. T. (2017). 危机与危机管理：整合、解释与研究发展。《管理学杂志》，43(6)，1661–1692。https://doi.org/10.1177/0149206316680030 Burton, C. G. (2014). 以卡特里娜飓风后的恢复为案例，验证衡量社区应对自然危害与灾害韧性的度量指标。《美国地理学家协会年报》，105(1)，67–86。https://doi.org/10.1080/00045608.2014.960039 Butler, D., Farmani, R., Fu, G., Ward, S., Diao, K., & Astaraie-Imani, M. (2014). 城市水管理新方法：安全可靠。《工程学Procedia》，89，347–354。https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.198 Cai, B., Xie, M., Liu, Y [Yonghong], Liu, Y [Yiliu], & Feng, Q. (2018). 基于可用性的工程韧性度量指标及其相应的评估方法。《可靠性工程与系统安全》，172，216–224。https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.12.021 Cai, H., Lam, N. S. N., Qiang, Y., Zou, L., Correll, R. M., & Mihunov, V. (2018). 灾害韧性测量方法与指数综述。《国际灾害风险降低期刊》，31，844–855。https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.07.015 Cantelmi, R., Di Gravio, G., & Patriarca, R. (2021). 评述关键基础设施韧性研究中的定性研究方法。《环境系统与决策》，41(3)，341–376。https://doi.org/10.1007/s10669-020-09795-8 Caralli, R. A., Allen, J. H., Curtis, P. D., White, D. W., & Young, L. R. (2010). 改进运营韧性过程：CERT韧性管理模型。IEEE。Caralli, R. A., Allen, J. H., White, D. W., Young, L. R., Mehravari, N., & Curtis, P. D. (2016). CERT韧性管理模型，1.2版。http://www.cert.org/resilience/ Carlowitz, H.-C. von. (1713).《Sylvicultura Oeconomica：关于林业经营的记述与野生树木栽培的自然方法指南》。Johann Friedrich。Carlson, J. L., Haffenden, R. A., Bassett, G. W., Buehring, W. A., Collins, III, M. J., Folga, S. M., Petit, F. D., Phillips, J. A., Verner, D. R., & Whitfield, R. G. (2012). 韧性：理论与应用：ANL/DIS-12-1。https://doi.org/10.2172/1044521 Carpenter, S. R., Arrow, K. J., Barrett, S., Biggs, R., Brock, W. A., Crépin, A.-S., Engström, G., Folke, C., Hughes, T. P., Kautsky, N., Li, C.-Z., McCarney, G., Meng, K., Mäler, K.-G., Polasky, S., Scheffer, M., Shogren, J., Sterner, T., Vincent, J. R., . . . Zeeuw, A. de (2012). 应对极端事件的一般韧性。《可持续性》，4(12)，3248–3259。https://doi.org/10.3390/su4123248

Carpenter, S., Walker, B., Anderies, J. M. 与 Abel, N.（2001）。从隐喻到度量：什么对什么的韧性？《生态系统》，4(8)，765–781。https://doi.org/10.1007/s10021-001-0045-9 Christensen, T., Lægreid, P. 与 Rykkja, L. H.（2016）。危机管理组织：构建治理能力与合法性。《公共行政评论》，76(6)，887–897。https://doi.org/10.1111/puar.12558 Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M. 与 Bruneau, M.（2010）。灾害韧性的分析量化框架。《工程结构》，32(11)，3639–3649。https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.08.008 Comfort, L. K., Boin, A. 与 Demchak, C. C.（2010）。设计韧性：为极端事件做好准备。匹兹堡大学出版社。https://books.google.de/books?id=ZN4LLw6YcmEC CRED。（2022）。EM-DAT 术语表：EM-DAT 国际灾害数据库。灾害流行病学研究中心。https://www.emdat.be/Glossary Cretney, R.（2014）。谁的韧性？社会生态韧性新兴的批判地理学。《地理学指南》，8(9)，627–640。https://doi.org/10.1111/gec3.12154 Cutter, S. L.（2016a）。美国灾害韧性指标的现状。《自然灾害》，80(2)，741–758。https://doi.org/10.1007/s11069-015-1993-2 Cutter, S. L.（2016b）。对什么的韧性？谁的韧性？《地理学杂志》，182(2)，110–113。https://doi.org/10.1111/geoj.12174 Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E. 与 Webb, J.（2008）。理解社区应对自然灾害韧性的基于地方的模型。《全球环境变化》，18(4)，598–606。https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.07.013 Cutter, S. L., Burton, C. G. 与 E mrich, C. T.（2010）。用于基线条件基准评估的灾害韧性指标。《国土安全与应急管理杂志》，7(1)。https://doi.org/10.2202/1547-7355.1732 Dai, L., Vorselen, D., Korolev, K. S. 与 Gore, J.（2012）。导致种群崩溃的临界点之前韧性丧失的通用指标。《科学》，336(6085)，1175–1177。https://doi.org/10.1126/science.1219805 Dakos, V. 与 Kéfi, S.（2022）。生态韧性：测量什么以及如何测量。《环境研究快报》，17(4)，43003。https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5767 Dias, P.（2015）。坚韧性是否比韧性更好的隐喻？《土木工程与环境系统》，32(1-2)，68–76。https://doi.org/10.1080/10286608.2015.1016922 DIN EN ISO 22300:2018。安全与韧性 - 术语（*ISO 22300:2018*），德国版本 EN ISO 22300:2018。柏林。德国标准化学会。Donohue, I., Hillebrand, H., Montoya, J. M., Petchey, O. L., Pimm, S. L., Fowler, M. S., Healy, K., Jackson, A. L., Lurgi, M., McClean, D., O'Connor, N. E., O'Gorman, E. J. 与 Yang, Q.（2016）。探索生态稳定性的复杂性。《生态学快报》，19(9)，1172–1185。https://doi.org/10.1111/ele.12648 DRI。（2021）。DRI 国际韧性术语表。国际灾害恢复研究所。https://drii.org/resources/viewglossary Dvorakova, L., Kronych, J. 与 Mala, A.（2017）。企业战略与运营管理中的资金管理。载于 Z. Ndaba 与 T. Mokoteli（编），第五届管理、领导力与治理国际会议论文集（icmlg 2017）（第119–127页）。Acad Conferences Ltd. https://www.webofscience.com/wos/wosco/full-record/WOS:000404892000016 Eldosouky, A., Saad, W. 与 Mandayam, N.（2021）。韧性关键基础设施：贝叶斯网络分析与基于契约的优化。《可靠性工程与系统安全》，205，107243。https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107243

Elmqvist, T., Andersson, E., Frantzeskaki, N., McPhearson, T., Olsson, P., Gaffney, O., Takeuchi, K [Kazuhiko], 与 Folke, C.（2019）。城市世纪中的转型可持续性与韧性。《自然·可持续性》，2(4)，267–273。https://doi.org/10.1038/s41893-019-0250-1 Elmqvist, T., Folke, C., Nyström, M., Peterson, G., Bengtsson, J., Walker, B. 与 Norberg, J.（2003）。响应多样性、生态系统变化与韧性。《生态学与环境前沿》，1(9)，488–494。https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0488:RDECAR]2.0.CO;2 Endsley, M. R.（1995）。迈向动态系统中的态势感知理论。《人为因素》，37(1)，32–64。https://doi.org/10.1518/001872095779049543 Engle, N. L.（2011）。适应能力及其评估。《全球环境变化》，21(2)，647–656。https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.01.019 Engler, E., Baldauf, M., Banys, P., Heymann, F., Gucma, M. 与 Sill Torres, F.（2020）。态势评估——韧性导航系统的一项基本功能。《海洋科学与工程杂志》，8(1)，17。https://doi.org/10.3390/jmse8010017 Engler, E., Göge, D. 与 Brusch, S.（2018）。ResilienceN - 海事基础设施的多维挑战：Otpornost - višedimenzionalni izazov za pomorsku infrastrukturu。《Naše More》，65(2)，123–129。https://doi.org/10.17818/NM/2018/2.8 Fekete, A., Hartmann, T. 与 Jüpner, R.（2020）。韧性：洪水风险研究与实践中的持续浪潮还是消退趋势？《WIREs水》，7(1)，e1397。https://doi.org/10.1002/wat2.1397 Fiksel, J.（2003）。设计韧性可持续系统。《环境科学与技术》，37(23)，5330–5339。https://doi.org/10.1021/es0344819 Fiksel, J.（2006）。可持续性与韧性：走向系统方法。《可持续性：科学、实践与政策》，2(2)，14–21。https://doi.org/10.1080/15487733.2006.11907980 Fischer, K., Hiermaier, S., Riedel, W. 与 Häring, I.（2018）。城市区域韧性的形态依赖性评估。2071-1050，10(6)，1800。https://doi.org/10.3390/su10061800 Folke, C.（2006）。韧性：社会\textendashecological 系统分析视角的兴起。《全球环境变化》，16(3)，253–267。https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002 Folke, C.（2016）。韧性（再版）。《生态与社会》，21(4421)。https://doi.org/10.5751/ES-09088-210444 Folke, C., Biggs, R., Norström, A. V., Reyers, B. 与 Rockström, J.（2016）。社会生态韧性与基于生物圈的可持续性科学。《生态与社会》，21(3)。https://doi.org/10.5751/es-08748-210341 Fox-Lent, C., Bates, M. E. 与 Linkov, I.（2015）。社区韧性评估的矩阵方法：洛克威半岛的示例案例。《环境系统与决策》，35(2)，209–218。https://doi.org/10.1007/s10669-015-9555-4 Francis, R. 与 Bekera, B.（2014）。工程系统与基础设施系统韧性分析的度量指标与框架。《可靠性工程与系统安全》，121，90–103。https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.07.004 Ganin, A. A., Massaro, E., Gutfraind, A., Steen, N., Keisler, J. M., Kott, A., Mangoubi, R. 与 Linkov, I.（2016）。运营韧性：概念、设计与分析。《科学报告》，6，19540。https://doi.org/10.1038/srep19540 Gao, J., Barzel, B. 与 Barabási, A.-L.（2016）。复杂网络中的普适韧性模式。《自然》，530(7590)，307–312。https://doi.org/10.1038/nature16948 Gasser, P., Lustenberger, P., Cinelli, M., Kim, W., Spada, M., Burgherr, P., Hirschberg, S., Stojadinovic, B. 与 Sun, T. Y.（2019）。能源44

系统。《可持续与韧性基础设施》，0(0)，1–27。
https://doi.org/10.1080/23789689.2019.1610600 Gausemeier, J., Fink, A., & Schlake, O.（1998年）。情景管理。《技术预测与社会变迁》，59(2)，111–130。
https://doi.org/10.1016/S0040- 1625(97)00166-2 Gholami, A., Shekari, T., Amirioun, M. H., Aminifar, F., Amini, M. H., & Sargolzaei, A.（2018）。迈向电力系统韧性定义与分类法的共识。2169-3536，6，32035–32053。
https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2845378 Gomes, J. O., Woods, D. D., Carvalho, P. V., Huber, G. J., & Borges, M. R.（2009年）。海上直升机运输系统中的韧性与脆性：识别飞行员工作中的约束与取舍决策。《可靠性工程与系统安全》，94(2)，311–319。
https://doi.org/10.1016/j.ress.2008.03.026 Gover, L., & Duxbury, L.（2018）。洋葱之内：理解哪些因素促进或阻碍组织韧性。《应用行为科学杂志》，54(4)，477–501。
https://doi.org/10.1177/0021886318797597 Grober, U.（2013）。《可持续性的发现：一个概念的文化史》。Antje Kunstmann。 Groß, D., Bolognani, S., Poolla, B. K., & Dörfler, F.（2017）。通过虚拟惯量和阻尼提升低惯量电力系统的韧性。载于 *IREP'2017* 论文集 研讨会。发表于国际电力系统动态研究与教育研究所（IREP）会议。
https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/232185/2/paper64s0a4badi.pdf Guo, D., Shan, M., & Owusu, E. K.（2021）。关键基础设施韧性评估框架：最新进展综述。《建筑》，11(10)，464。https://doi.org/10.3390/buildings11100464 Haasnoot, M., Kwakkel, J. H., Walker, W. E., & Maat, J. ter（2013）。动态自适应政策路径：为高度不确定的世界制定稳健决策的方法。《全球环境变化》，23(2)，485–498。
https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.12.006 Haavik, T. K.（2021）。安全科学中的辩论与政治。《可靠性工程与系统安全》，210，107547。
https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107547 Haimes, Y. Y.（2006）。关于基础设施风险度量中脆弱性的定义。1539-6924，26(2)，293–296。https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2006.00755.x Häring, I., Ebenhöch, S., & Stolz, A.（2016）。量化社会技术系统韧性工程的韧性。《欧洲安全研究杂志》，1(1)，21–58。
https://doi.org/10.1007/s41125-015-0001-x Häring, I., Sansavini, G., Bellini, E., Martyn, N., Kovalenko, T., Kitsak, M., Vogelbacher, G., Ross, K., Bergerhausen, U., Barker, K., & Linkov, I.（2017）。迈向通用韧性管理、量化与开发流程：一般定义、要求、方法、技术与度量，以及案例研究。载于《北约和平与安全科学系列C：环境安全》（第21–80页）。施普林格·荷兰。
https://doi.org/10.1007/978-94-024-1123-2\textunderscore2 Hawken, A., & Munck, G. L.（2013）。基于性别分类数据的跨国指数：衡量什么？效度如何？《社会指标研究》，111(3)，801–838。https://doi.org/10.1007/s11205-012-0035-7 Herrera, H.（2017）。从隐喻到实践：运用系统动力学建模将韧性分析操作化。《系统研究与行为科学》，34(4)，444–462。https://doi.org/10.1002/sres.2468

Hewitt, K., & Burton, I.（1971）。地方的危害性：破坏性事件的区域生态学。多伦多大学地理系。 Hillebrand, H., Langenheder, S., Lebret, K., Lindström, E., Östman, Ö., & Striebel, M.（2018）。分解全球变化实验中稳定性的多个维度。《生态学快报》，21(1)，21–30。https://doi.org/10.1111/ele.12867 Holling, C. S.（1973）。生态系统的韧性与稳定性。《生态学与系统学年度评论》，4(1)，1–23。https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245 Holling, C. S.（1996）。工程韧性与生态韧性：生态约束下的工程学。载于（第31–44页）。美国国家科学院出版社。https://doi.org/10.17226/4919 Hollnagel, E.（2011a）。后记：RAG——韧性评估网格。载于阿什盖特韧性工程研究丛书。《实践中的韧性工程：指南》（第316–337页）。阿什盖特。 Hollnagel, E.（2011b）。序言：韧性工程的范围。载于阿什盖特韧性工程研究丛书。《实践中的韧性工程：指南》（第30–41页）。阿什盖特。 Hoover, D. L., Knapp, A. K., & Smith, M. D.（2014）。草原生态系统对极端气候的抵抗力与韧性。《生态学》，95(9)，2646–2656。https://doi.org/10.1890/13- 2186.1 Hossain, N. U. I., Jaradat, R., Hosseini, S., Marufuzzaman, M., & Buchanan, R. K.（2019）。利用贝叶斯网络建模和评估系统韧性的框架：相互依存的电力基础设施系统案例研究。《关键基础设施保护国际期刊》，25，62–83。https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2019.02.002 IEEE 标准 610.12-1990。IEEE 软件工程术语标准词汇表。美国新泽西州皮斯卡塔韦。IEEE。IFRC。（2020）。《2020年世界灾害报告：无论酷暑还是洪水》。日内瓦。红十字会与红新月会国际联合会。https://www.ifrc.org/document/world-disasters-report-2020 IFRC。（2022）。什么是灾害？红十字会与红新月会国际联合会。https://www.ifrc.org/what-disaster ISO。（2018）。ISO/IEC/IEEE 15288:2015。https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec- ieee:24748:-1:ed-1:v1:en Ives, A. R., & Carpenter, S. R.（2007）。生态系统的稳定性与多样性。《科学》，317(5834)，58–62。https://doi.org/10.1126/science.1133258 Jackson, S., & Ferris, T. L. J.（2013）。工程系统的韧性原则。《系统工程》，16(2)，152–164。https://doi.org/10.1002/sys.21228 Jaroš, L., Starý, M., & Brezková, L.（2016）。通过水库调节洪水流量的运行控制随机方法。《水文学与水力机械学期刊》，64(1)，91–96。https://doi.org/10.1515/johh-2016-0012 Jenelius, E., Westin, J., & Holmgren, Å. J.（2010）。在攻击者认知不完善的情况下保护关键基础设施。《关键基础设施保护国际期刊》，3(1)，16–26。https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2009.10.002 Jesse, B.-J., Heinrichs, H. U., & Kuckshinrichs, W.（2019）。将韧性理论应用于能源系统：综述与展望。《能源、可持续性与社会》，9(1)，27。https://doi.org/10.1186/s13705-019-0210-7 Jhan, H.-T., Ballinger, R., Jaleel, A., & Ting, K.-H.（2020）。用于台湾地方气候变化适应的社会经济脆弱性指标框架（SVIF）的开发与应用。2071-1050，12(4)，1585。https://doi.org/10.3390/su12041585

Johansson, J., Hassel, H., & Zio, E. (2013年). 关键基础设施的可靠性与脆弱性分析：在电力系统背景下比较两种方法。《可靠性工程与系统安全》, 120, 27–38. https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.02.027 Jones, L., & Aho, M. (2019年). 韧性设计。《桥梁》, 49. https://www.nae.edu/212175/Resilience-by-Design Jore, S. H. (2020年). 韧性是恐怖主义研究中的一个好概念吗？恐怖主义韧性的概念充分性分析。《冲突与恐怖主义研究》, 0(0), 1– 20. https://doi.org/10.1080/1057610X.2020.1738681 Jovanović, A., Klimek, P., Choudhary, A., & al, e. (2018年). 现有韧性评估方法、指标和数据源分析：用于评估、预测和监测关键基础设施韧性的现有指标的可用性与限制。Jovanović, A., Klimek, P., Renn, O., Schneider, R., Øien, K., Brown, J., DiGennaro, M., Liu, Y [Y.], Pfau, V., Jelić, M., Rosen, T., Caillard, B., Chakravarty, S., & Chhantyal, P. (2020年). 评估暴露于新冠肺炎的医疗卫生基础设施韧性：新兴风险、韧性指标、相互依存关系和国际标准。《环境系统与决策》, 40(2), 1–35. https://doi.org/10.1007/s10669-020-09779-8 Jovanović, A., Quintero, F., & Choudhary, A. (2017年). 在智能关键基础设施（SCI）韧性评估中使用安全相关指标。载于《安全与可靠性- 理论与应用 》(p. 162). CRC出版社. https://doi.org/10.1201/9781315210469-139 Kabir, H. M. D., Khosravi, A., Hosen, M. A., & Nahavandi, S. (2018年). 基于神经网络的不确定性量化：方法与应用综述。2169-3536, 6, 36218–36234. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2836917 Kahan, J. H., Allen, A. C., & George, J. K. (2009年). 韧性的运营框架。《国土安全与应急管理杂志》, 6(1). https://doi.org/10.2202/1547-7355.1675 Kahiluoto, H., Kaseva, J., Balek, J., Olesen, J. E., Ruiz-Ramos, M., Gobin, A., Kersebaum, K. C., Takác, J., Ruget, F., Ferrise, R., Bezak, P., Capellades, G., Dibari, C., Mäkinen, H., Nendel, C., Ventrella, D., Rodríguez, A., Bindi, M., & Trnka, M. (2019年). 欧洲小麦气候韧性的下降。《美国国家科学院院刊》, 116(1), 123–128. https://doi.org/10.1073/pnas.1804387115 Kahiluoto, H., Kaseva, J., Hakala, K., Himanen, S. J., Jauhiainen, L., Rötter, R. P., Salo, T., & Trnka, M. (2014年). 通过实证揭示响应多样性来培育韧性。《全球环境变化》, 25, 186–193. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.02.002 Kanno, T., Koike, S., Suzuki, T., & Furuta, K. (2019年). 用于模拟灾后恢复过程的城市系统多重相互依存关系以人为中心的建模框架。《认知、技术与工作》, 21(2), 301–316. https://doi.org/10.1007/s10111-018-0510-2 Kharrazi, A., Yu, Y., Jacob, A., Vora, N., & Fath, B. D. (2020年). 网络韧性中的冗余、多样性和模块化：国际贸易的应用及其对公共政策的影响。《环境可持续性最新研究》, 2, 100006. https://doi.org/10.1016/j.crsust.2020.06.001 Kilanitis, I., & Sextos, A. (2019年). 地震易发区道路网络的综合地震风险与韧性评估。《地震工程通报》, 17(1), 181– 210. https://doi.org/10.1007/s10518-018-0457-y Kiureghian, A. D., & Ditlevsen, O. (2009年). 随机不确定性还是认知不确定性？这重要吗？Structural Safety, 31(2), 105–112. https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.06.020

Klimek, P., Varga, J., Jovanovic, A. S., & Székely, Z. (2019年). 应急响应中的定量韧性评估揭示了组织如何以效率换取冗余。《安全科学》, 113, 404–414. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.12.017 Klise, K. A., Bynum, M., Moriarty, D., & Murray, R. (2017年). 用于评估饮用水系统灾害韧性的软件框架，并以地震案例研究为例, 95, 420–431. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.022 Klumpp, M., Bioly, S., & Mai, A. (2010年). 可持续物流管理运营仿真。会议论文集, 378–382. Kreibich, H., van Loon, A. F., Schröter, K., Ward, P. J., Mazzoleni, M., Sairam, N., Abeshu, G. W., Agafonova, S., AghaKouchak, A., Aksoy, H., Alvarez-Garreton, C., Aznar, B., Balkhi, L., Barendrecht, M. H., Biancamaria, S., Bos-Burgering, L., Bradley, C., Budiyono, Y., Buytaert, W., . . . Di Baldassarre, G. (2022). 风险管理中前所未有的洪水与干旱挑战。《自然》, 1–7. https://doi.org/10.1038/s41586-022-04917-5 Kruse, J., Schäfer, B., & Witthaut, D. (2021年). 利用可解释人工智能揭示电网频率稳定性的驱动因素和风险。Patterns, 2(11), 100365. https://doi.org/10.1016/j.patter.2021.100365 Kumar, N., Poonia, V., Gupta, B. B., & Goyal, M. K. (2021年). 面向气候变化的关键基础设施风险评估与韧性新框架。《技术预测与社会变迁》, 165, 120532. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120532 Lagadec, P. (2009 年 ). 风险与危机的新宇宙观：范式与实践亟待根本性转变。《政策研究评论》, 26(4), 473–486. https://doi.org/10.1111/j.1541-1338.2009.00396.x Lavell, A., Oppenheimer, M., Diop, C., Hess, J., Lempert, R., Li, J., Muir-Wood, R., Myeong, S., Moser, S., Takeuchi, K [Kuniyoshi ], Cardona, O. D., Hallegatte, S., Lemos, M., Little, C., Lotsch, A., & Weber, E. (2012年). 气候变化：灾害风险、暴露、脆弱性和韧性的新维度。载于 (pp. 25–64). 剑桥大学出版社. https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.004 Lempert, R. J., Popper, S. W., & Bankes, S. C. (2003年). 《塑造未来一百年：定量长期政策分析的新方法》。兰德公司. https://www.ebook.de/de/product/2567224/robert_j_lempert_steven_w_popper_steven_c_bankes_shaping_the_next_one_hundred_years_new_methods_for_quantitative_long_term_policy_analysis.html Leveson, N. (2020年). 安全III：安全与韧性的系统方法。MIT工程系统实验室。Leveson, N. G. (2016年). 《构建更安全的世界：应用于安全的系统思维》。麻省理工学院出版社. https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/26043 Lichte, D., Torres, F. S., & Engler, E. (2022). 关键基础设施和组织运营韧性管理框架。Infrastructures, 7(5), 70. https://doi.org/10.3390/infrastructures7050070 Linkov, I., Bridges, T., Creutzig, F., Decker, J., Fox-Lent, C., Kröger, W., Lambert, J. H., Levermann, A., Montreuil, B., Nathwani, J., Nyer, R., Renn, O., Scharte, B., Scheffler, A., Schreurs, M., & Thiel-Clemen, T. (2014年). 改变韧性范式。《自然·气候变化》, 4(6), 407–409. https://doi.org/10.1038/nclimate2227 Linkov, I., Fox-Lent, C., Read, L., Allen, C. R., Arnott, J. C., Bellini, E., Coaffee, J., Florin, M.-V., Hatfield, K., Hyde, I., Hynes. William, Jovanovic, A., Kasperson, R., Katzenberger, J., Keys, P. W., Lambert, J. H., Moss, R., Murdoch, P. S., Palma- Oliveira, J., . . . Woods, D. (2018年). 韧性评估分层方法。《风险分析》, 38(9), 1772–1780. https://doi.org/10.1111/risa.12991

Linkov, I., & Palma-Oliveira, J. M. (2017). 北约和平与安全科学系列C：环境安全。《韧性与风险：环境、网络与社会领域的方法及应用》（Igor Linkov, & José Manuel Palma-Oliveira, 编）。施普林格·荷兰。https://doi.org/10.1007/978-94-024-1123-2 Liu, X., Li, D., Ma, M., Szymanski, B. K., Stanley, H. E., & Gao, J. (2022). 网络韧性。《物理学报告》，971，1–108。https://doi.org/10.1016/j.physrep.2022.04.002 Madni, A. M., & Jackson, S. (2009). 韧性工程概念框架的构建。《IEEE Systems Journal》，3(2)，181–191。https://doi.org/10.1109/JSYST.2009.2017397 Mahzarnia, M., Moghaddam, M. P., Baboli, P. T., & Siano, P. (2020). 提升电力系统韧性的度量综述。《IEEE Systems Journal》，14(3)，4059–4070。https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2965993 Manyena, S. B. (2006). 重新审视韧性概念。《Disasters》，30(4)，434–450。https://doi.org/10.1111/j.0361-3666.2006.00331.x Manyena, S. B., & Gordon, S. (2015). 弥合韧性、脆弱性与稳定化概念之间的鸿沟。《灾害预防与管理》，24(1)，38–52。https://doi.org/10.1108/DPM-04-2014-0075 Marchese, D., Reynolds, E., Bates, M. E., Morgan, H., Clark, S. S., & Linkov, I. (2018). 韧性与可持续性：环境管理应用中的异同。《整体环境科学》，613-614，1275–1283。https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.086 Masys, A. J. (2012). 从黑天鹅到灰天鹅：揭示不确定性。《灾害预防与管理》，21(3)，320–335。https://doi.org/10.1108/09653561211234507 Maurice, P., Lavoie, M., Chapdelaine, A., Bonneau, H. B., & Ellison, L. (1997). 安全与安全促进：概念和操作层面。《加拿大慢性疾病》。McClymont, K., Morrison, D., Beevers, L., & Carmen, E. (2020). 洪涝韧性：系统性综述。《环境规划与管理杂志》，63(7)，1151–1176。https://doi.org/10.1080/09640568.2019.1641474 McGill, W. L., Ayyub, B. M., & Kaminskiy, M. (2007). 关键资产保护的风险分析。1539-6924，27(5)，1265–1281。https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2007.00955.x Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016). 界定城市韧性：综述。《景观与城市规划》，147，38–49。https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011 Meyer, K. (2016). 生态学中韧性的数学综述。《自然资源建模》，29(3)，339–352。https://doi.org/10.1111/nrm.12097 Mishra, D. K., Ghadi, M. J., Azizivahed, A., Li, L., & Zhang, J. (2021). 有源配电系统韧性研究综述。《可再生与可持续能源评论》，135，110201。https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110201 Mitra, C., Kurths, J., & Donner, R. V. (2015). 基于生态韧性的复杂系统多稳态综合量化指标。《科学报告》，5(1)，16196。https://doi.org/10.1038/srep16196 Mitroff, I. I., & Alpaslan, M. C. (2003). 为恶行做准备。《哈佛商业评论》，81(4)，109-115，124。Mori, A. S., Furukawa, T., & Sasaki, T. (2013). 响应多样性决定生态系统对环境变化的韧性。《生物学评论》，88(2)，349–364。https://doi.org/10.1111/brv.12004 Moser, S., Meerow, S., Arnott, J., & Jack-Scott, E. (2019). 韧性的动荡世界：跨学科对话的解释与主题。《气候变化》，153(1)，21–40。https://doi.org/10.1007/s10584-018-2358-0

Mottahedi, A., Sereshki, F., Ataei, M., Nouri Qarahasanlou, A., & Barabadi, A. (2021). 关键基础设施系统的韧性：系统性文献综述。《Energies》，14(6)，1571。https://doi.org/10.3390/en14061571 Mutzenich, C., Durant, S., Helman, S., & Dalton, P. (2021). 更新我们对自动驾驶车辆远程操作员态势感知的理解。《Cognitive Research: Principles and Implications》，6(1)，9。https://doi.org/10.1186/s41235-021-00271-8 Nan, C., Sansavini, G., Kröger, W., & Heinimann, H. R. (2014). 评估基础设施系统韧性的定量方法。PSAM 2014 - 概率安全评估与管理，12。美国国家科学院。（2012）。灾害韧性：国家迫切任务。美国国家科学院出版社。http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=13457Ngamkhanong, C., Kaewunruen, S., & Costa, B. (2018). 铁路轨道韧性监测最新进展综述。《Infrastructures》，3(1)，3。https://doi.org/10.3390/infrastructures3010003 NIAC。（2010）。建立关键基础设施韧性目标的框架报告：美国国家基础设施咨询委员会的最终报告与建议。NIBS。（2019）。《自然灾害减灾效益：2019年报告》。美国全球变化研究计划。https://www.nibs.org/files/pdfs/NIBS_MMC_MitigationSaves_2019.pdf Nielsen, C. B., Larsen, P. G., Fitzgerald, J., Woodcock, J., & Peleska, J. (2015). 系统之系统工程。《ACM Computing Surveys》，48(2)，1–41。https://doi.org/10.1145/2794381 Norris, F. H., Stevens, S. P., Pfefferbaum, B., Wyche, K. F., & Pfefferbaum, R. L. (2008). 社区韧性：作为灾害准备的隐喻、理论、能力集合与策略。《American Journal of Community Psychology》，41(1)，127–150。https://doi.org/10.1007/s10464-007-9156-6 O’Brien, K., Leichenko, R., Kelkar, U., Venema, H., Aandahl, G., Tompkins, H., Javed, A., Bhadwal, S., Barg, S., Nygaard, L., & West, J. (2004). 多重压力因素下的脆弱性制图：印度的气候变化与全球化。《全球环境变化》，14(4)，303–313。https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.01.001 O’Neill, P. F. (2017). 通过风险分析建设韧性。载于 Igor Linkov & José Manuel Palma-Oliveira（编），《北约和平与安全科学系列C：环境安全》。《韧性与风险：环境、网络与社会领域的方法及应用》（第451–468页）。施普林格·荷兰。https://doi.org/10.1007/978-94-024-1123-2_17 Oboudi, M. H., Mohammadi, M., & Rastegar, M. (2019). 可重构配电系统面向韧性的主动孤岛运行。《Journal of Modern Power Systems and Clean Energy》，7(4)，741–752。https://doi.org/10.1007/s40565-019-0567-9 O'Brien, G., O'Keefe, P., Rose, J., & Wisner, B. (2006). 气候变化与灾害管理。《Disasters》，30(1)，64–80。https://doi.org/10.1111/j.1467-9523.2006.00307.x 经济合作与发展组织。（2002）。评估与基于结果的管理关键术语词汇表。巴黎。经济合作与发展组织。OECD（2008）。脆弱局势下国家建设的概念与困境，第二部分：从脆弱性走向韧性。《OECD Journal on Development》。经济合作与发展组织。（2019）。关键基础设施韧性的善治。经济合作与发展组织。
h
t
t
p
s://
w
w
w.
o
e
c
d-ilibrary.org/governance/good-governance-for-critical-infrastructure-resilience_02f0e5a0-en

Opdyke, A., Javernick-Will, A., & Koschmann, M. (2017). 基础设施灾害韧性趋势：对25年研究的分析。《自然灾害》, 87(2), 773–789. https://doi.org/10.1007/s11069-017-2792-8 Ostadtaghizadeh, A., Ardalan, A., Paton, D., Jabbari, H., & Khankeh, H. R. (2015). 社区灾害韧性：评估模型和工具的系统综述。PLoS Currents, 7, ecurrents.dis.f224ef8efbdfcf1d508dd0de4d8210ed. https://doi.org/10.1371/currents.dis.f224ef8efbdfcf1d508dd0de4d8210ed Ouyang, M., & Dueñas-Osorio, L. (2014). 电力系统的多维飓风韧性评估。Structural Safety, 48, 15–24. https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2014.01.001 Ouyang, M., Dueñas-Osorio, L., & Min, X. (2012). 城市基础设施系统的三阶段韧性分析框架。Structural Safety, 36-37, 23–31. https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2011.12.004 Ouyang, M., & Wang, Z. (2015). 相互依赖基础设施系统的韧性评估：聚焦联合恢复建模与分析。《可靠性工程与系统安全》, 141, 74–82. https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.03.011 Pagano, A., Pluchinotta, I., Giordano, R., & Fratino, U. (2018). 供水系统“硬”与“软”基础设施韧性评估的整合。Complexity, 2018, 1–16. https://doi.org/10.1155/2018/3074791 Panteli, M., & Mancarella, P. (2015a). 电网：更强、更大、更智能？提出电力系统韧性的概念框架。IEEE Power and Energy Magazine, 13(3), 58–66. https://doi.org/10.1109/MPE.2015.2397334 Panteli, M., & Mancarella, P. (2015b). 极端天气事件下关键电力基础设施韧性的建模与评估。IEEE Systems Journal, 11(3), 1733–1742. https://doi.org/10.1109/JSYST.2015.2389272 Panteli, M., Pickering, C., Wilkinson, S., Dawson, R., & Mancarella, P. (2017). 极端天气下的电力系统韧性：脆弱性建模、概率影响评估与适应措施。IEEE Transactions on Power Systems, 32(5), 3747–3757. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2641463 Park, J., Seager, T. P., & Rao, P. S. C. (2011). 风险导向与韧性导向设计和管理的经验教训。15513777, 7(3), 396–399. https://doi.org/10.1002/ieam.228 Park, J., Seager, T. P., Rao, P. S. C., Convertino, M., & Linkov, I. (2013). 将风险与韧性方法整合到工程系统的灾难管理中。风险分析, 33(3), 356–367. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01885.x Parsons, M., Glavac, S., Hastings, P., Marshall, G., McGregor, J., McNeill, J., Morley, P., Reeve, I., & Stayner, R. (2016). 灾害韧性的自上而下评估：运用应对能力与适应能力的概念框架。《国际灾害风险降低期刊》, 19, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.07.005 Perrow, C. (1999). 正常事故：与高风险技术共存。普林斯顿大学出版社。 Petersen, L., Lange, D., & Theocharidou, M. (2020). 谁在乎它意味着什么？在关键基础设施运营者中使用“韧性”一词的实际理由。《可靠性工程与系统安全》, 199, 106872. https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106872 Petit, F. D., Bassett, G. W., Black, R., Buehring, W. A., Collins, M. J., Dickinson, D. C., & al, e. (2013). 韧性测量指数：关键基础设施韧性的指标。www.osti.gov/bridge Pezzulo, G., Butz, M. V., Castelfranchi, C., & Falcone, R. (2008). 引言：自然与人工认知中的预见。载于 G. Pezzulo, M. V. Butz, C. Castelfranchi, & R. Falcone (编), 预期的挑战：用于分析和设计人工认知系统的统一框架。Springer。

Pimm, S. L. (1984). 生态系统的复杂性与稳定性。《自然》, 307(5949), 321–326. https://doi.org/10.1038/307321a0 Pimm, S. L., Donohue, I., Montoya, J. M., & Loreau, M. (2019). 若要理解韧性，衡量韧性至关重要。《自然·可持续性》, 2(10), 895–897. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0399-7 Poulin, C., & Kane, M. B. (2021). 基础设施韧性曲线：性能度量与汇总指标。《可靠性工程与系统安全》, 216, 107926. https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107926 Pursiainen, C. (2017). 危机管理周期。Routledge出版社。https://doi.org/10.4324/9781315629179 Pursiainen, C., & Kytö maa, E. (2022). 从欧洲关键基础设施保护到欧洲关键实体的韧性：这意味着什么？《可持续与韧性基础设施》, 0(0), 1–17. https://doi.org/10.1080/23789689.2022.2128562 Qin, J., & Faber, M. (2019). 风力涡轮机园区的韧性导向完整性管理。Energies, 12, 2729. https://doi.org/10.3390/en12142729 Quade, E. S. (1989). 公共决策分析（第3版）。North-Holland出版社。 Rehak, D., Markuci, J., Hromada, M., & Barcova, K. (2016). 关键基础设施系统故障协同效应的定量评估。《关键基础设施保护国际期刊》, 14, 3–17. https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2016.06.002 Rehak, D., Senovsky, P., Hromada, M., & Lovecek, T. (2019). 评估关键基础设施要素韧性的综合方法。《关键基础设施保护国际期刊》, 25, 125–138. https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2019.03.003 Rehak, D., Senovsky, P., & Slivkova, S. (2018). 关键基础设施要素的韧性及其主要因素。《系统》, 6(2), 21. https://doi.org/10.3390/systems6020021 韧性联盟。(2021). 术语表。https://www.resalliance.org/glossary Richards, L. (2016). 对谁而言金钱不那么重要：社会联结作为英国的一种韧性资源。《社会指标研究》, 125(2), 509–535. https://doi.org/10.1007/s11205-014-0858-5 Roege, P. E., Collier, Z. A., Mancillas, J., McDonagh, J. A., & Linkov, I. (2014). 能源韧性的度量指标。《能源政策》, 72, 249–256. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.012 Rose, A. (2007). 自然灾害与人为灾害的经济韧性：多学科起源与情境维度。《环境灾害》, 7(4), 383–398. https://doi.org/10.1016/j.envhaz.2007.10.001 Rose, A., & Dormady, N. (2018). 动态经济韧性分析与衡量的进展。爱思唯尔公司。SSRN电子期刊。 Rus, K., Kilar, V., & Koren, D. (2018). 复杂城市系统应对自然灾害的韧性评估：一篇新的文献综述。《国际灾害风险降低期刊》, 31, 311–330. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.05.015 Sankary, N., & Ostfeld, A. (2017). 在供水系统安全预警系统设计优化中纳入运行不确定性。《工程学Procedia》, 186, 160–167. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.222 Schauer, S., Latzenhofer, M., König, S., & Rass, S. (2021). 面向相互依赖基础设施的风险与韧性综合框架的概念方法。载于 Research Publishing Services。https://doi.org/10.3850/978-981-18-2016-8_584-cd Schmeck, H., Müller-Schloer, C., Çakar, E., Mnif, M., & Richter, U. (2010). 有机计算系统中的适应性与自组织。《ACM自主与自适应系统汇刊》, 5(3). https://doi.org/10.1145/1837909.1837911 Schneider, K. P., Tuffner, F. K., Elizondo, M. A., Liu, C.-C., Xu, Y., & Ton, D. (2017). 评估将微电网用作韧性资源的可行性。IEEE

《智能电网汇刊》，8(2)，687–696。https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2494867 Schultz, M. T., Gouldby, B. P., Simm, J. D., & Wibowo, J. L. (2010). 超越安全系数：开发易损性曲线以表征系统可靠性。弗吉尼亚州贝尔沃堡。https://doi.org/10.21236/ADA525580 Setola, R., Rosato, V., Kyriakides, E., & Rome, E. (2016). 管理关键基础设施的复杂性。《系统、决策与控制研究》：第90卷。施普林格国际出版公司。https://doi.org/10.1007/978-3-319-51043-9 Shinozuka, M., Chang, S. E., Cheng, T.-C., Feng, M., O'Rourke, T. D., Saadeghvaziri, M. A., Dong, X., Jin, X., Wang, Y [Yu], & Shi, P. (2004). 电力与水资源综合系统的韧性。Shirali, G. A., Mohammadfam, I., & Ebrahimipour, V. (2013). 一种采用主成分分析和NT方法定量评估韧性工程的新方法：流程工业案例研究。《可靠性工程与系统安全》，119，88–94。https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.05.003 Simmie, J., & Martin, R. (2010). 区域经济韧性：迈向一种演化方法。《剑桥区域、经济与社会杂志》，3(1)，27–43。https://doi.org/10.1093/cjres/rsp029 Simpson, N. P., Shearing, C. D., & Dupont, B. (2020). "部分功能冗余"：家庭层面韧性应对气候风险的一种表现。《气候风险管理》，28，100216。https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100216 Skyttner, L. (2006). 《一般系统论：问题、视角与实践》（第2版）：问题、视角与实践，第2章：一般系统论的基本思想。世界科学出版公司。http://ebookcentral.proquest.com/lib/dlr- ebooks/detail.action?docID=1681395Smith, C. L., & Brooks, D. J. (2013). 安全科学：安全的理论与实践。爱思唯尔BH。http://www.sciencedirect.com/science/book/9780123944368 Spindler, E. A. (2013). 可持续性史：一个流行概念的起源与影响，9–31。https://doi.org/10.1007/978-3-8349-7043-5_1 Stanton, N. A., Chambers, P. R. G., & Piggott, J. (2001). 情境意识与安全。《安全科学》，39(3)，189–204。https://doi.org/10.1016/S0925-7535(01)00010-8 Sterbenz, J. P. G., Hutchison, D., Çetinkaya, E. K., Jabbar, A., Rohrer, J. P., Schöller, M., & Smith, P. (2010). 通信网络的韧性与生存能力：策略、原则及学科综述。《计算机网络》，54(8)，1245–1265。https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.03.005 Storesund, K., Reitan, N. K., Sjöström, J., Rød, B., Guay, F., Almeida, R., & Theocharidou, M. (2018). 分析关键基础设施韧性的新方法。载于 S. Haugen, A. Barros, C. van Gulijk, T. Kongsvik, & J. E. Vinnem (编)，《安全与可靠性——变革世界中的安全》（第1221–1229页）。CRC出版社。https://doi.org/10.1201/9781351174664-154 Taleb, N. N., & Douady, R. (2012). （反）脆弱性的数学定义、映射与检测。Taleb-Berrouane, M., & Khan, F. (2019). 流程系统的动态韧性建模。《化学工程汇刊》，77。https://doi.org/10.3303/CET1977053 Tamberg, L. A., Heitzig, J., & Donges, J. F. (2022). 研究社会—技术—环境系统韧性的建模者指南。《环境研究快报》，17(5)，55005。https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac60d9 Tate, E. (2012). 社会脆弱性指数：运用不确定性和敏感性分析进行比较评估。《自然灾害》，63(2)，325–347。https://doi.org/10.1007/s11069- 012-0152-2

Teodorescu, H.-N. L. (2015). 使用概率事件树定义韧性，35(2)，279–290。https://doi.org/10.1007/s10669-015-9550-9 Thibodeaux, M. S., & Favilla, E. (1996). 通过战略管理实现组织效能与承诺。《工业管理与数据系统》，96(5)，21–25。https://doi.org/10.1108/02635579610123307 Thier, P., & Pot d'Or, C. (2020). 多样性对能源系统韧性的贡献——文献综述。第30届欧洲安全与可靠性会议暨第15届概率安全评估与管理会议论文集。Toroghi, S. S. H., & Thomas, V. M. (2020). 纳入临时发电系统的电力基础设施系统韧性分析框架。《可靠性工程与系统安全》，202，107013。https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107013 Torres, F. S., Kulev, N., Skobiej, B., Meyer, M., Eichhorn, O., & Schafer-Frey, J. (2020). 基于指标的海上风电场安全与安保评估。2020年韧性周，26–33。https://doi.org/10.1109/RWS50334.2020.9241287 Umunnakwe, A., Huang, H., Oikonomou, K., & Davis, K. R. (2021). 电力系统韧性的定量分析：标准化、分类与挑战。《可再生与可持续能源评论》，149，111252。https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111252 联合国减少灾害风险办公室。(2019). 《全球减灾风险评估报告》（GAR）（第5版）。https://gar.undrr.org/sites/default/files/reports/2019-05/full_gar_report.pdf 联合国国际减灾战略。(2009). 2009年联合国国际减灾战略灾害风险降低术语。htt
ps://www.undrr.org/publication/2009-unisdr-terminology-disaster-risk-reduction 联合国大会。(2016). 关于灾害风险降低相关指标和术语的不限成员名额政府间专家工作组报告。https://www.preventionweb.net/files/50683_oiewgreportenglish.pdf van der Geest, K., & van den Berg, R. (2021). 缓发事件：政府间气候变化专门委员会关于陆地、海洋和冰冻圈的特别报告证据综述。《环境可持续性最新观点》，50，109–120。https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.03.008 Verhulsta, E. (2014). 运用系统与安全工程原理实现反脆弱性。《计算机科学 Procedia》，32，842–849。https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.500 Vugrin, E. D., Warren, D. E., & Ehlen, M. A. (2011). 基础设施和经济系统的韧性评估框架：飓风情境下石化供应链的定量与定性韧性分析。《过程安全进展》，30(3)，280–290。https://doi.org/10.1002/prs.10437 Walker, B. H., & Pearson, L. (2007). 环境经济核算体系的韧性视角。《生态经济学》，61(4)，708–715。https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.04.010 Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. S., & Kinzig, A. (2004). 社会—生态系统中的韧性、适应性与转型能力。《生态与社会》，9(2)。Walker, W. E., Harremoës, P., Rotmans, J., van der Sluijs, J. P., van Asselt, M., Janssen, P., & Krayer von Krauss, M. P. (2003). 定义不确定性：基于模型的决策支持中不确定性管理的概念基础。《综合评估》，4(1)，5–17。https://doi.org/10.1076/iaij.4.1.5.16466 Walker, W. E., Lempert, R., & Kwakkel, J. (2013). 深度不确定性。载于（第395–402页）。https://doi.org/10.1007/978-1-4419- WECD。(1987年). 《我们共同的未来：世界环境与发展委员会报告》。https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf Wied, M., Oehmen, J., & Welo, T. (2020). 工程系统韧性的概念化：文献分析。《系统工程》，23(1)，3–13。https://doi.org/10.1002/sys.21491

Williams, T. A., Gruber, D. A., Sutcliffe, K. M., Shepherd, D. A., & Zhao, E. Y.（2017年）。组织对逆境的响应：融合危机管理与韧性研究领域。《管理学会年鉴》，11(2)，733–769。https://doi.org/10.5465/annals.2015.0134 Woods, D. D.（2015）。韧性的四个概念及其对未来韧性工程的意义，141，5–9。https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.03.018 Woods, D. D.（2016）。韧性作为克服脆性的优雅可扩展性。载于 M.-V. Florin & I. Linkov（编），《IRGC韧性资源指南》（第258–263页）。Woods, D. D.（2018）。优雅可扩展性理论：支配自适应系统的基本规则。《环境系统与决策》，38(4)，433–457。https://doi.org/10.1007/s10669-018-9708-3 世界银行集团。（2017）。气候与灾害韧性建设行动的监测与评估（M&E）操作指南。华盛顿特区。
h
t
t
p://
d
o
c
u
m
e
n
t
s.
w
o
rl
dbank.org/curated/en/692091513937457908/Operational-guidance-for-monitoring-and-evaluation-M-E-in-climate-and-disaster-resilience-building-operations Xu, H., Li, Y., & Wang, L [Lin]（2020）。复杂城市公共空间的韧性评估。《国际环境研究与公共卫生杂志》，17(2)，524。https://doi.org/10.3390/ijerph17020524 Xu, Z., Ramirez-Marquez, J. E., Liu, Y [Yu], & Xiahou, T.（2020）。面向多状态网络的新型基于韧性的组件重要性度量。《可靠性工程与系统安全》，193，106591。https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106591 Xue, X., Wang, L [Liang], & Yang, R. J.（2018）。探索韧性科学：批判性综述与文献计量分析。《自然灾害》，90(1)，477–510。https://doi.org/10.1007/s11069-017-3040-y Yodo, N., & Wang, P.（2016）。工程韧性量化与系统设计启示：文献综述。《机械设计杂志》，138(11)。https://doi.org/10.1115/1.4034223 Zampieri, M.（2021）。协调韧性的生态学定义与工程学定义。《Ecosphere》，12(2)，e03375。https://doi.org/10.1002/ecs2.3375 Zampieri, M., Weissteiner, C. J., Grizzetti, B., Toreti, A., van den Berg, M., & Dentener, F.（2020）。估算作物生产系统的韧性：从理论到实践。《整体环境科学》，735，139378。https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139378 Zio, E.（2016）。关键基础设施脆弱性与风险分析中的挑战。《可靠性工程与系统安全》，152，137–150。https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.02.009 Zobel, C. W., & Khansa, L.（2012年）。量化网络基础设施韧性以应对多事件袭击。《决策科学》，43(4)，687–710。https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2012.00364.x