Draft version January 27, 2026年 使用 LaTeX
twocolumn 样式排版，采用AASTeX7

arXiv:2601.17147v1 [econ.TH] 23 Jan 2026

动态适应力设计：城市水系统原型

Margaret Garcia [1], Aaron Deslatte, [2] Elizabeth A. Koebele, [3] George M. Hornberger, [4] Adam Wiechman [5], John M. Anderies [1], Jesse Barnes, [3] Sara Alonso Vicario, [1] and Koorosh Azizi[1]

[1] *School of Sustainable Engineering & the Built, Environment, Arizona State University, Tempe, AZ 85281, USA*
[2] *Paul H. O'Neill School of Public and Environmental Affairs, Indiana University, Bloomington, Indiana, USA, USA*
[3] *Department of Political Science, University of Nevada, Reno, Nevada, USA*
[4] *Department of Civil and Environmental Engineering, Vanderbilt University, Nashville, TN, USA*[5] *Princeton University, Princeton, NJ, 08544, USA*[6] *School of Human Evolution and Social Change and School of Sustainability, Arizona State University, Tempe, AZ 85281, USA*

摘要

在变化加速的时代，城市水基础设施系统日益偏离其设计条件运行，这给系统的制度设计带来了新的压力，要求其能够应对不断出现的挑战。因此，水管理机构必须经过设计，具备“动态适应性”，即预见能力和响应能力。然而，我们尚未充分了解哪些制度设计的具体特征能够实现动态适应性，尤其是考虑到这种适应性所依赖的系统生物物理特征存在多样性。本文运用原型分析，基于美国16家城市供水公用事业单位35年的压力因素与响应数据集，推动城市供水系统动态适应性研究的发展。研究发现，能够应对较高生物物理复杂性的制度原型，会同时投入资源提升信息处理能力和响应多样性。动态适应性虽有代价，但信息处理能力与响应多样性之间的平衡有助于提高效率；通过促进信息共享的多中心区域制度结构，可以进一步提升效率。最后，应仔细权衡不同治理层级之间的利弊，因为有助于提升公用事业层级动态适应性的制度结构，可能会削弱较高治理层级的控制力和灵活性。

关键词：《水》供水 |制度适配 | 基础设施 | 鲁棒性 | 动态适 s

1. 引言

基础设施——无论涉及自然资源供给、交通运输、电信，还是众多其他领域——都是现代人类福祉、能动性和生产力的基石。基础设施一旦无法正常运行，哪怕只有几个小时，也可能演变成紧急状况；若持续数日，则可能酿成危机。因此，基础设施的鲁棒性，即其在特定扰动面前维持性能的能力（Carlson 和 Doyle 2002年；Rodriguez 等 2011年），至关重要，尤其是在现代社会。许多基础设施系统主要是为环境稳定的世界而设计的，而人类世的特征则是变化不断加速（Chester 等 2021年；Steffen 等 2015年），往往会产生更加动态且极端的压力因素，对基础设施的鲁棒性构成挑战。

增强基础设施系统鲁棒性有三种基本方法：改变其源系统结构、网络化流动和反馈控制（Anderies 2015）。这些方法分别融入基础设施系统的设计，体现为储存能力、运输与输送结构，以及能够检测变化并触发行动的控制系统。关键的是，这些方法涉及的并不仅仅是基础设施系统的物理组件（例如水坝、渡槽和传感器）。促进物理资产在较短时间尺度内灵活使用的运营过程，以及在较长时间尺度内管理维护与变革投资的政治与经济过程，也有助于增强鲁棒性，使基础设施系统能够应对广泛的环境和社会经济条件（Wiechman 等，2024）。因此，在当今时代，要实现鲁棒性，就要求构建政治和经济反馈路径的制度能够推动适应与转型，

并且速度足够快，以跟上变化。

基础设施背后的社会与政治过程发挥着关键作用，这凸显了制度设计的重要性。制度设计是指设计一套规则与规范，用以指导系统中参与者的行为和互动、分配任务与责任，并分配风险、收益和成本（Koppenjanand Groenewegen2005）。尽管我们或许对此抱有期待，但制度设计并不存在万能良方（Ostrom2007），而且即便是广泛适用的设计原则，其适用性也取决于系统及其环境的特征（Baggio etal. 2016；Ostrom 1990）。“制度适配”这一概念描述了制度安排与其所适用系统之间的一致性（Ostrom1995；Young 2002）。制度适配包含诸多方面，包括功能适配、时间适配和空间适配（Cox 2012；Ekstrom and Young2009）。一般而言，如果制度能够促进信息处理和响应行动，使系统在遭受各种类型和程度的扰动时得以持续存在（即具备鲁棒性），便可认为其与所处情境相适配。近期研究不再采用这种静态的适配定义，而转向动态适应性的概念：在不断变化的环境中，响应能力和预见能力有助于实现鲁棒性（Moore et al.2024）。换言之，制度适配衡量的是管理稳定变化机制的能力，而动态适应性则使系统能够追踪环境变化。动态适应性这一概念引出了基础设施系统设计中的两个宽泛问题：1）制度设计的哪些特征能够促进动态适应性？2）这些设计特征取决于基础设施系统及其（生物物理）环境的哪些特征？

我们以城市供水系统为背景，通过实证研究探讨这些广泛问题，因为城市供水系统集中体现了环境与社会变化对基础设施系统施加的压力（Krueger 等，2022年；Rock-str¨om 等，2014年）。为提升城市供水基础设施的鲁棒性，设计方法包括采用可快速部署的物理组件，例如储水设施、多元化供水组合、冗余、传感器和控制系统（Garcia 等，2020年；Gilrein 等，2019年）。在更长的时间尺度上，政治和经济反馈控制过程可能包括采用新的治理与管理实践，以及调整物理基础设施及其运行方式（Garcia 等，2019年；Hornberger 等，2015年；Wiechman 等，2024）。人们认为，任何特定系统中这些行动的具体细节和时间安排会受到多种因素综合影响（Azizi 等，2024；Baggio 等，2016年），例如供水系统所面临的社会环境压力因素的程度和类型、其物理与制度结构（Garcia 等，2019年；Hornberger 等，2015年；Treuer 等，2017年），以及该结构如何生成、处理并针对有关压力因素的信息采取行动（Deslatte 等，2024a；Wiechman 等，2024）。因此，水管理机构针对短期变异和长期系统变化，展现出从被动响应到主动行动、再到潜在变革性行动的连续谱（Rudnick 等，2025）。在此，我们特别关注于理解：特定系统的基础设施与环境（我们统称为生物物理特征）如何与其治理机构相互作用，以促进动态适配（Garcia 等，2019年；Hornberger 等，2015年；Wiech- man 等，2024）。

为了刻画和评估系统的生物物理与制度组成部分及其相互作用，我们借助原型这一概念。原型描绘了系统的基本特征，这些特征共同促成某种现象（Magliocca 等，2018年），其构建依据是对多个案例中重复模式的分析（Oberlack 等，2019年）。作为一种分析方法，原型兼顾了普遍性与特殊性，使我们能够在不丢失重要情境特征的前提下，对问题进行一般性描述（Eisenack 等，2006年）。识别和分析原型的方法包括多种定量方法（如聚类分析、机器学习算法和元分析）及定性方法（如定性分类、定性比较分析和专家评估）（Aggarwal 和 Anderies，2023年；Sietz 等，2019年）。在此，我们通过溯因推理，构建城市供水系统的生物物理与制度原型，以识别影响其动态适应性的高层级特征。运用原型有助于综合不同案例研究的成果，从而在中等抽象层次上构建一般性知识。以此方法为指导，我们围绕以下三个具体研究问题展开研究，旨在探讨如何更好地设计具备动态适应性的基础设施系统：

1. 在城市供水案例中，哪些生物物理系统与制度系统的原型配置可能有助于提升动态适应性？2. 这些原型的组合与观察到的动态适应性之间呈现出哪些模式？3. 面对环境变化，这些模式能为基础设施和制度设计提供哪些启示？

为回答这些问题，我们综合了1990年至2024年收集的有关16家城市供水公用事业单位的数据

，以刻画它们的生物物理系统和制度系统，并评估其适应能力（Deslatte 等，2022）。随后，我们采用溯因式定性分类来识别和评估原型，解释为何一些城市供水系统能够通过适应性改变来应对压力和危机，而另一些则反复经历表现不佳的时期。

2. 概念基础

基础设施和制度设计对城市水系统或任何基础设施系统在环境变异性与变化下绩效的综合影响，可以被界定为一个鲁棒控制问题。现代控制理论中的鲁棒控制概念阐释了城市水系统及其他基础设施系统如何处理信息并据此采取行动，以应对环境变化（Levin 等，2022；Ostrom，2011）。当供水基础设施通过连接来自多元化供水组合的多股流量，并利用储水设施将在水源高可用时期储存的水留待低可用时期使用，从而应对供需变异性时，其鲁棒性便会得到增强（McDonald 等，2014；Padowski 和 Jawitz，2012）。通过主动反馈控制，鲁棒性也会得到增强（图 1）。在较短时间段内，供水管理者遵循既定规程，在不同水源之间切换，并使水库和水处理厂转换运行模式（运行回路，图 1）。在较长时间段内，当观测到或预测的系统绩效不足时，参与者会在政治与经济过程中进行协调，以改变基础设施、其运行规则或管理所依据的制度（政治—经济回路，图 1 ）。由于其中涉及存在争议的目标、不完善的知识，以及多个管理组织内部及相互之间的协调，这一系列过程远非理想的反馈控制器（Anderies 等，2019）。

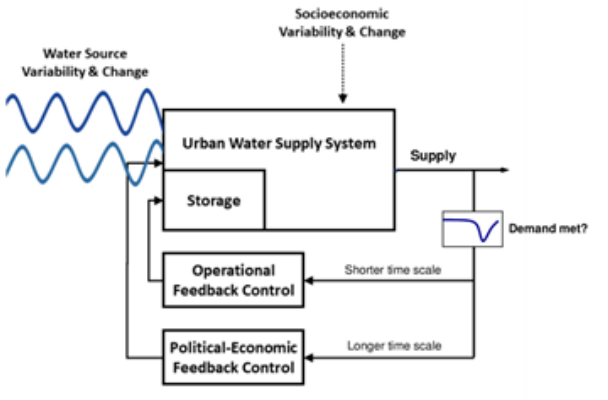

图 1. 概念图展示了城市供水系统如何通过被动稳健策略（例如利用多个水源和储水设施），以及通过反馈控制实现的主动响应，来应对水源供给和社会经济条件的变异性。改编自 Anderies(2015年)。

反馈控制是应对多变且不确定的条件、维持绩效的有力工具（Anderies 和 Janssen，2013）。然而，增强系统应对已知类别或频率扰动的鲁棒性，也可能使系统对其他类别的扰动变得脆弱——脆弱性指系统绩效对输入的敏感程度，从而损害更广泛的系统功能（Csete 和 Doyle，2002）。这些权衡既不可避免，也可以调整，尤其是在未来条件不确定的情况下。政策与制度的设计塑造了系统具备鲁棒性的条件，而能够使系统在不同政策之间动态切换的高层级制度，则拓宽了系统保持稳定的条件范围（Anderies 等，2019）。制度设计的动态适应性是指

制度设计在多大程度上能够使系统中的参与者调动知识，预见可能出现的变化类别，以及在发现需要转变时有效应对的能力。关键在于，预见并非预测（例如尽量减少预测误差）；相反，预见会将注意力引向一般性的事件类别（Boisot 和 Mckelvey，2011）。这凸显了制度设计各个层面的重要性：从规定日常行动的运行规则，到塑造规则变更方式、赋能并制约地方层级信息处理与行动的高层级集体制度架构（Deslatte 等，2024a）。

2.1. 生物物理系统：自然与建成基础设施

城市供水系统调动流域（地表水）和含水层（地下水）的自然基础设施。地表水源的特征是其在日、季节和年代等时间尺度上的变异（Dettinger 和 Diaz 2000；Singh 等 2021；Yao 等 2020）。这些频率特征因区域而异（Ho 等 2017），其变化由水文气象动态驱动（Peix´oto and Oort 1984；Yao 等 2020）。水文气象变异性如何传递为径流变化，取决于供给（降水）与用水需求（潜在蒸散）之间的时间交互作用，也取决于土壤和地下水储水的程度；这些储水使流域能够随时间蓄水和放水（Alonso Vi-cario et al. 2024；Massmann2020；Rice 和 Emanuel 2017）。地下水在季节至年代等时间尺度上发生变化，这种变化由水文气象条件驱动，并受水文地质特征影响——

气象条件影响，并受水文地质特征塑造（G¨untneret al. 2007；Lietal. 2015）。此外，一些地表水源和地下水源呈现出趋势，这些趋势被认为与土地利用变化、取水和气候变化有关（Humphreyetal.2016；McCabe and Wolock2016；Rice etal.2016；Saki et al. 2023）。气候变化导致的降水和温度观测变化及预测变化，正在改变人类世中这些时间尺度上的模式（Marvel et al.2023；Swainet al. 2025）。

如上所述，城市供水系统通过储水设施，以及混合使用多种供水水源，来平缓供水水源的时间变异性（McDonald et al.2014；Padowski and Jawitz 2012）。例如，水库及其运行规则能够平缓供水的高频变异（如每日、季节性变异），从而有效降低系统其余部分必须应对的变异性（Garcia et al. 2020）。关键在于，政治经济系统无需应对当地水文状况的全部变异性，而是可以受益于此前在基础设施建设与维护方面的投资。随着气候变化推动水文学发生转变，鉴于基础设施及其运营的响应能力有限，政治经济系统所承担的负担可能会加重。基础设施系统无法控制的残余变异性会增加生物物理复杂性。

除了利用基础设施管理时间变异性外，城市供水系统还包括输水基础设施、水与废水处理厂，以及供水分配和废水收集网络。这类基础设施通常被描述为具有高惯性（Davis 等 2010年；Williams 等 2021年），或者由于系统内部重新布线的挑战以及此类系统的庞大规模，而具有“适应不断变化的内部和外部条件的能力受到高度限制”（Chester 等 2021年）。导致高惯性的特征包括：服务于全部用水需求的集中式组件、集中式分配与收集网络结构、较长的设计寿命，以及与其他组件或系统之间的相互依赖（Helmrich 等 2023年）。尽管更灵活且惯性更低的设计是可行的（例如，分散式分配、模块化储存与处理（Turlington 等 2017年）），但美国城市供水系统总体上仍是集中式的，并且具有高惯性。克服这种惯性以改变基础设施系统的结构或功能，需要投入大量资源和时间，因此，惯性程度会在较短时间尺度上塑造有效的解空间。拥有更多样化供水来源，或以其他方式具有更高协调负担的城市供水系统，其生物物理复杂性更高。

换言之，生物物理复杂性是穿过基础设施系统的变异性与基础设施所需管理复杂性的结合。

2.2. 制度设计

在城市水资源管理领域，制度设计由规则、规范和共同策略构成，用以支持基础设施运营、维护和投资（Daems andSchaefer 2024；Ostrom 2009）。在区域层级，多个城市供水系统可能相互作用并彼此影响，而州和区域机构则可能促成或制约其行动。因此，城市供水系统可被描述为处于多中心治理安排之中，其特点是多个决策权力中心依照一套共同规则开展工作（AligicaandTarko 2012）。人们认为，这类安排之所以会出现，是因为它们能够有效治理复杂的社会或环境系统：既发挥因地制宜的分散式治理的优势，以支持竞争和自下而上的信息流，也发挥集中式治理（或至少协调治理）的优势，通过共同规则使治理更加简单、可预测（Daems and Schaefer2024）。多中心治理安排的（去）集中化程度会影响信息流，并促进或制约响应多样性。

同样重要的是公用事业层面的制度设计选择，它们会带来制度（决策）成本并创造灵活性。这些选择塑造了城市水系统处理信息并将信息转化为响应行动的能力（Daems and Schaefer，2024）。制度成本源于遵守监管、合同或信息处理要求所需的时间、精力和费用（Cox，2012年；DeCaro 等，2017；Ostrom，1995），并影响针对新误差信号所作响应的比例。例如，制度设计可能会促进特定类型的信息收集或使用，从而通过增加信息成本、设置否决点或要求采取行动的先决条件，影响预见能力（Mesdaghi 等，2022）。制度设计还可以通过影响决策所涉及的专业知识或经验的多样性，扩大或限制参与者的范围以及目标范围（Deslatte 等，2024b）。较高的制度成本可以通过稳定、成熟的政策和管理流程降低意外事件的风险（Deslatte 等，2023），但也可能阻碍试验和创新所必需的信息流（Deslatte 等，2024b）。

基础设施系统的制度设计的灵活性会影响行政裁量权和

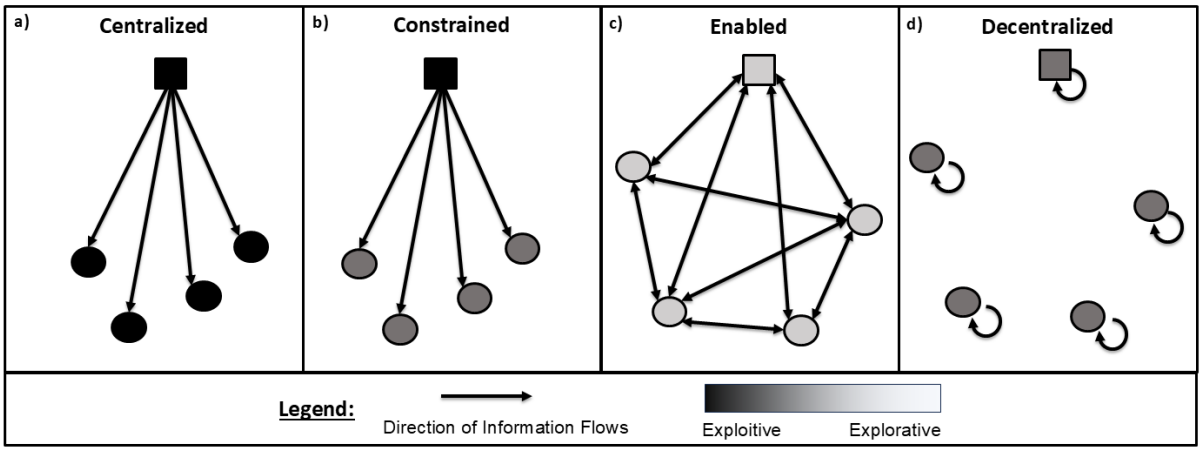

图 2. 制度配置图，其中每个圆圈代表一个城市水系统，正方形代表一个区域性或州级实体：a）集中式，信息流单向传递，决策主要由上而下作出；b）受限式，信息流单向传递，实现何种结果的决策由上而下作出，但较低级别负责作出实施决策；c）已启用式，整个网络共同拥有决策主管权，信息流在水平方向和垂直方向上双向传递；d）去中心化式，整个网络共同拥有决策主管权，但连通性和信息流有限。

决策的反思性。灵活性更高的制度设计可以促进更多探索性（即认识论上的）证据收集（Veissi`ere 等，2020），而灵活性较低的制度可能会规定更多利用性（即务实性的）证据工作。尽管灵活性更高的制度设计通常被视为有利，但灵活性也可能效率低下（例如分析瘫痪）、降低可预测性，甚至在缺乏保障措施的情况下导致灾难。因此，通过制约决策灵活性的制度成本，制度设计可能发挥作用，使反馈路径及其底层的注意力动态得以启用或受到约束。

兼顾城市供水系统所嵌套其中的多中心治理安排设计与公用事业层面的制度设计，有助于深入了解系统运行所处的整体制度配置。例如，完全集中的制度配置表现为自上而下的决策，灵活性极低（图 2a）。这类配置在低复杂性环境中有效，制度成本也较低。然而，其结构限制了信息流，并强调利用信息而非探索信息；当运行环境发生变化时，这会削弱纠错能力。高度受限的制度配置会为行动设定先决条件，缩小或限制目标并限制评价标准，但在实施方面仍允许一定灵活性（DeCaro 等，2017）（图 2b）。这类配置通常表现出更多自上而下的决策和更少自下而上的信息反馈。随着复杂性增加，受限型设计会限制决策的多样性和自发性（Daems 和 Schaefer，2024）。这类制度设计可能通过限制评价标准（即成本效益高还是公平）或应对新问题的选项来降低灵活性，从而增加制度系统的惯性。高度赋能的制度配置也会为行动设定先决条件，但可能允许更多样的目标和评价标准，从而促进政策或计划应对问题时采取更多样的方式，并使网络内的信息能够双向流动（图 2c）。因此，赋能型设计会带来较高的制度成本，但也拓宽了问题与解决方案空间（例如，提高灵活性），以便探索和利用不断演变的资源系统组成部分的动态变化（Deslatte 等，2024b）。完全去中心化的制度配置将主管权力下放，从而促进信息收集并提高灵活性，也使响应方式具备高度多样性的潜力（图 2d）。然而，碎片化限制了城市供水系统之间的信息流，导致重复工作和推断限制。因此，制度配置需要在管理复杂性的能力、效率以及不同级别上所提供的直接控制程度之间进行权衡。

2.3. 生物物理复杂性与制度设计之间的相互作用

根据我们对动态适应性的定义，如果制度设计能够调动知识以预见挑战，并投入资源增强响应能力，从而及时、有效地应对已遇到和预见到的各种问题，那么该系统就具备适应性。为了更好地说明预见能力和

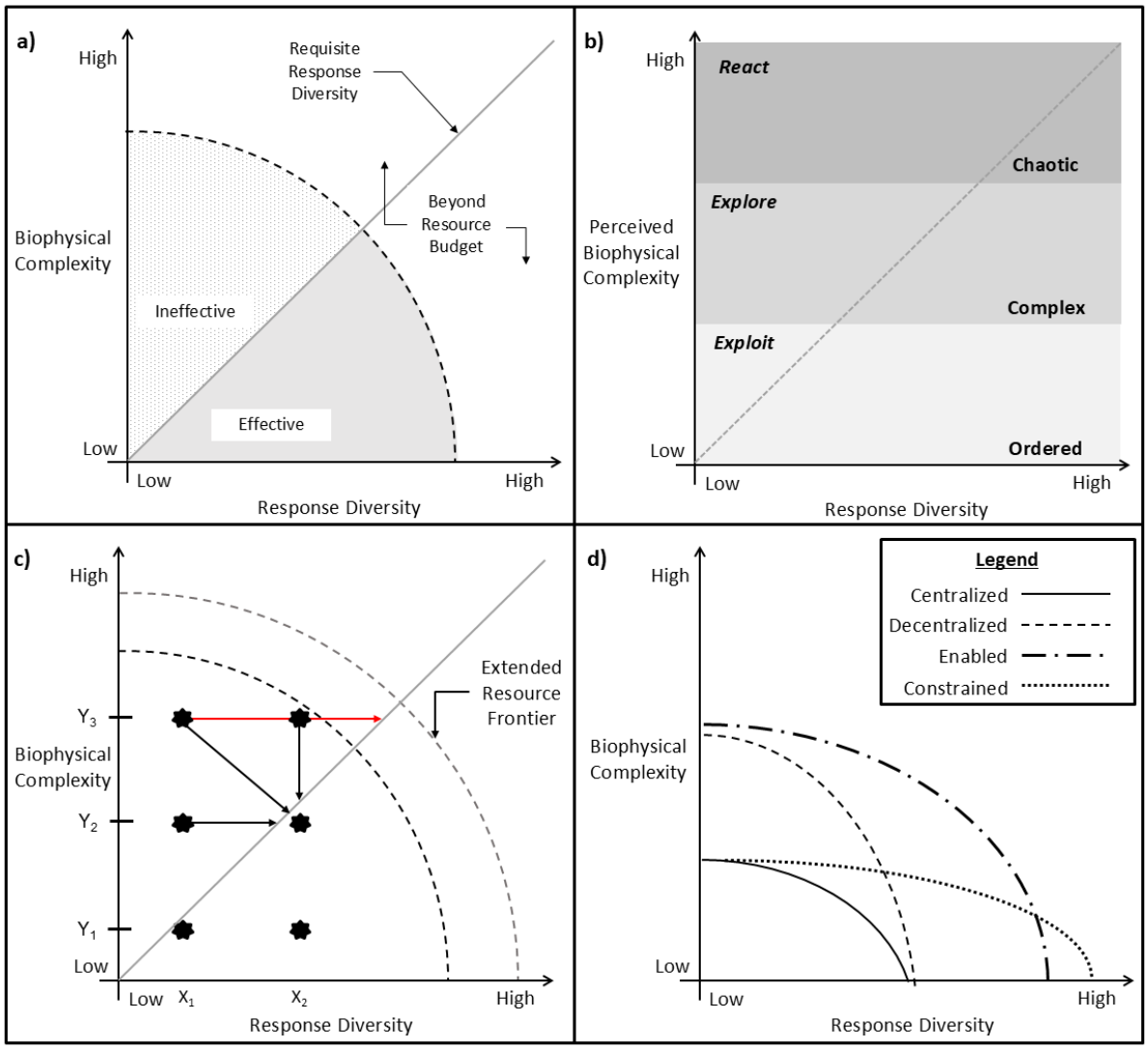

图 3. a）艾什比空间图的改编版，展示了必需的响应多样性如何随生物物理复杂性变化，而响应也受到可用资源的限制（改编自（Boisot 和 Mckelvey，2011年））；b）将生物物理复杂性的三种状态（以粗体标出）投射到阿什比空间中，并以斜体标示各状态下有效的知识动员类型；c）此图绘示了两个响应多样性（X）不同的实体对不同程度生物物理复杂性（Y）可能作出的响应；d）此图将制度配置映射到艾什比空间中，每种配置在图示边界内均有效。

响应能力如何协同发挥作用，我们借鉴艾什比必要多样性定律（Ashby 1968年）以及在此定律基础上形成的近期发展（Boisot 和 Mckelvey，2011）。艾什比必要多样性定律指出，只有响应多样性才能降低结果多样性，使其相对于生物物理环境的多样性有所减少（图 3a）。然而，环境中的多样性并非都同等重要。对于特定系统和目标而言，有些多样性实际上只是噪声。组织能否分离出信号、预见挑战及响应行动的后果，取决于其调动知识以理解系统动态。在生物物理动态可被理解为有序时，决策是常规性的，利用性信息处理便足以应对；在其被理解为复杂时，决策具有战略性，探索性信息处理则是必需的；而在其被理解为混沌时，信息处理无效，决策则是反应性的（图 3b）。

在特定时刻，一个实体拥有一定程度的可用响应多样性，但更高程度的响应多样性可能尚处于萌芽状态（Moore 等人 2024年）。例如，考虑两种制度设计：一种具有响应多样性 X_1，另一种具有响应多样性 X_2

（图 3c）。在生物物理复杂性级别 Y_1 下，两者都是有效的制度设计，拥有超过必要程度的多样性。随着生物物理复杂性增加至 Y_2，制度设计 X_2 仍然有效，而采用设计 X_1 的实体则必须采取行动以维持有效性。当 X_1 远离其资源边界时，它可以通过试错法增加响应多样性（向右移动并调动萌芽中的响应能力），然后才会耗尽其资源。然而，在生物物理复杂性级别 Y_3 下，两种设计都无效；同时，由于实体接近资源边界，除非资源边界能够扩展，否则试错法将不足以应对。如果实体没有开展探索性信息处理的能力，无法准确推断新的生物物理动态，那么它们可能会作出潜在适应不良的简化假设（向下移动）。相反，如果它们具备这种能力，就可以运用探索式信息处理来改进推断，并采用额外的、有针对性的响应多样性（沿对角线移动）。这一映射还揭示了在生物物理复杂性不断增加的情况下，制度设计可能出现的四种失效模式：1）在没有有效心智模型指导的情况下，通过试错法反复响应并耗尽资源（水平向右移动）；2）忽视复杂性，沿用现有惯例作出响应（向下移动）；3）试图将复杂性强行纳入现有心智模型，从而导致错误表征和适应不良的响应（在推断不准确的情况下沿对角线向右下方移动）；以及4）以有效性最优化为目标（将资源边界降至最低），并限制萌芽中的能力（也称为伊卡洛斯悖论（Miller 1992年））。每种制度配置都由对前瞻能力和响应多样性的不同投资组合构成，这一组合塑造了其能够保持有效性的生物物理复杂性范围（图3d）。

尽管在生物物理复杂性与制度设计交叉领域已有理论进展，但迄今针对这种相互作用在大型基础设施系统背景下如何体现、以及如何影响系统适应能力的实证研究仍然有限。这一研究空白促使我们探究生物物理系统与制度系统的原型配置，以及城市供水系统跟上不断变化条件的能力。

3. 材料与方法

虽然为动态适配而设计系统的目标着眼于未来，但我们无法凭经验评估未来的表现，只能从过去中学习。因此，我们回顾过去，以此为未来的发展路径提供依据，具体而言：综合分析1990年至2024年期间美国16家大型城市供水商的数据。

3.1. 案例与数据

我们选取了16家美国大型城市供水公用事业机构，它们能够代表水资源管理结构、气候条件、社区特征和供水组合的多样性（Azizi 等，2024）（图 4）。这些案例依据（Deslatte 等，2022）所记载的方法，从197个美国大城市的初始样本中选出。这组案例的多样性使我们能够构建适用于更广泛美国大型城市供水公用事业机构类别的原型。下文图3总结了这16家公用事业机构的特征，包括：亚特兰大，佐治亚州（ATL）；波士顿，马萨诸塞州（BOS）；北卡罗来纳州夏洛特（CHA）；密歇根州底特律（DET）；哈里斯堡，宾夕法尼亚州（HAR）；哈特福德，康涅狄格州（HFD）；印第安纳波利斯，印第安纳州（IND）；杰克逊维尔，佛罗里达州（JAX）；孟菲斯，田纳西州（MEM）；菲尼克斯，亚利桑那州（PHX）；普罗维登斯，罗得岛州（PVD）；圣安东尼奥，得克萨斯州（SAN）；圣何塞，加利福尼亚州（SJC）；圣罗莎，加利福尼亚州（STR）；俄亥俄州托莱多（TOL）；以及华盛顿特区（DC）。有关这些案例的进一步说明，请参见补充信息（S1）。针对每座城市，我们汇总了大量有关水文与气候、基础设施设计、制度设计的数据，以及至少涵盖1990年至2024年期间的案例历史。

3.1.1. *Hydroclimatic and Infrastructure Metrics*

为刻画水源变异性的时间尺度和幅度以及基础设施设计，我们采用三个指标：K¨oppen 干旱度指数、K¨oppen-Geiger 气候类型中的季节性，以及供水多样性基尼指数。K¨oppen 干旱度指数是年平均降水量与年平均气温加上一个常数之比（Quan 等（2013））。K¨oppen-Geiger 气候类型根据长期月度降水量和温度，将地点划分为三级分类体系（Peel 等（2007））。该分类的一部分专门涉及季节性，即某地是否经历干燥或寒冷（低于 0 °C）季节。在此，我们将所有经历干燥或寒冷季节的城市归类为具有季节性。最后，按照（Gonzales 和 Ajami（2017）），我们根据某城市各个水源提供的年平均供水量，计算供水多样性基尼指数。该指标反映公用事业利用多个水源管理变异性的程度。供水多样性基尼指数间接衡量基础设施管理的复杂性，因为水源数量更多、分布更广且更加去中心化的系统将具有更高的指数值。

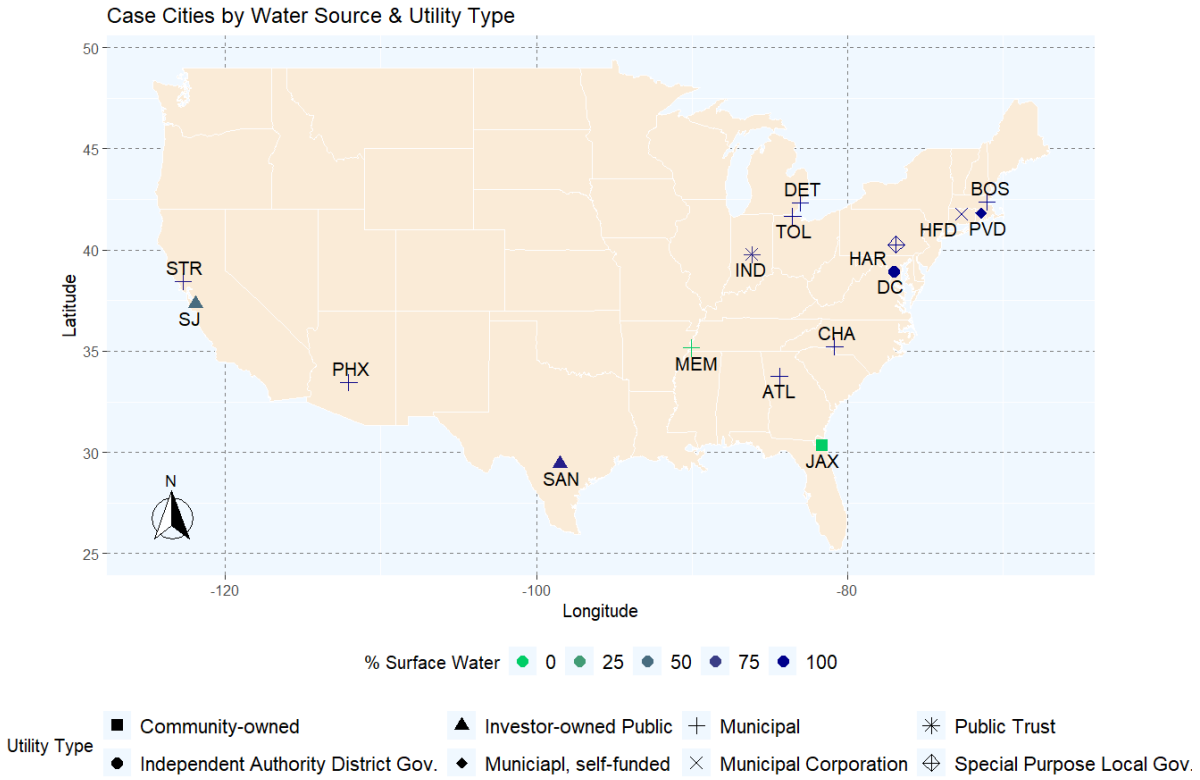

图4。 案例研究中的城市供水商，其中供水组合中的地表水占比以颜色表示，公用事业类型以形状表示。

为利用这些指标构建原型，我们首先确定干旱度和水源多样性的阈值，将指标范围划分为不同类别。对于干旱度，所有高于 15 的数值均归类为湿润，低于该数值的归类为干燥（包括干旱和半干旱）。对于水源多样性，我们确定了两类基础设施复杂性，并设定了一个模糊阈值：基尼指数低于 0.3 时完全属于“简单”，高于 0.5 时完全属于“复杂”。由于季节性已经是二元变量，因此无需进行额外处理。模糊阈值允许利用定性数据处理边界情况。

3.1.2. *Institutional Data*

鉴于治理安排具有多层级性质，我们分三个步骤收集用于构建制度原型的数据。首先，我们利用既有研究对州法律、地方条例和监管规则中的“制度语法”（IG）或句法组成部分进行编码，以识别与公用事业费率制定和投资相关的边界条件和选择条件（Crawford 和 Ostrom，1995；Deslatte 等，2022）。这使我们能够开始根据采取行动的前提条件，评估某项设计的制度成本和灵活性（按照（Deslatte 等，2023）的做法，这些前提条件在实证研究中被称为“制度依赖”），以及参与者的多样性参与其中，以及任何正式规定的响应选项（Deslatte 等，2024b）。其次，我们使用水效率联盟（一家追踪北美州水政策的非营利组织）提供的制度语法（IG）以及2012年、2017年和2022年州评分卡数据，以确定各州是否要求制定干旱与节水规划。虽然规划流程并不能保证反思性，也不能确保采用更多样的知识类型，但一些实证证据表明，这些流程确实会鼓励采用更长的时间尺度来管理风险，并促使更广泛的科学、技术或经验知识得到开发和运用（Deslatte 等，2024a、2025）。我们据此评估制度设计的促成性特征（即是否要求制定并定期更新干旱应急计划）（Deslatte 等，2024a）。第三步是根据是否要求州监管监督公用事业费率制定，确定设计的约束性特征。这里，我们再次借鉴实证研究的支持：对费率制定实行集中式监管监督，通常采取准司法证据审查程序的形式，往往会对审查公用事业机构基础设施需求时可使用的信息、参与方式和评价标准施加正式限制（Deslatte 等，2023）。因此，受限型设计

会带来高额制度成本，但与那些施加规划要求、同时基本将基础设施投资决策留给地方控制的设计相比，给予公用事业管理者的灵活性较低（Daems 和 Schaefer, 2024；Deslatte 等人，2025）。

3.1.3. *Response Data*

鉴于需要基于过去的观测结果对动态适应性进行实证评估，我们将响应分析聚焦于已观测到的危机级扰动：这些扰动要么造成了绩效影响，要么促使相关方在预测影响发生前采取响应措施。为系统地描述这些响应，我们查阅了公用事业规划、报告和网站，市政、州和联邦机构的报告、规划和立法文件，环境非政府组织文件、地方历史组织的报告以及地方新闻文章，为每座城市编制了与城市供水相关的基础设施和政策事件时间线，时间跨度从供水系统建成一直到2024年（Garcia 等, 2025年）。由于1990年以前的资料可获得性差异较大，此处采用1990年至今的时间范围。研究纳入了广泛的危机，以涵盖供水商面临的各类运营挑战，但本文仅呈现干旱危机（表 1）。每项危机事件响应均根据及时性、响应类别、治理层级和有效性进行编码。详情见补充材料S2。

为核验编码后的响应数据并开展进一步分析，我们编写了案例叙述，详细说明基础设施与水管理背景、危机事件的特征及其影响和应对措施，以及研究期间可能影响公用事业机构应对水文气候极端事件的脆弱性和应对危机事件能力的其他基础设施或管理变动。

3.2. 原型构建与分析

我们通过溯因法构建了两组构件原型。构件原型聚焦于子案例层面现象，并描述一个可能在多个案例中观察到的组件或过程（Eisenack 等，2021年；Oberlack 等，2019年）。每个案例可能包含多个构件原型。根据我们将系统概念化为鲁棒控制案例的方式（图1），我们识别出两个构件：生物物理系统，包括硬基础设施和运行反馈回路；以及制度系统，包括政治经济反馈回路。第3.1.1节和第3.1.2节所述的数据集，是根据第2节介绍的理论选取的，用于构建这些原型。随后，我们考察生物物理系统和制度系统的属性，以构建这些原型。通过将案例分解为这些构件，我们可以识别每个构件的替代结构，对构件组合进行模式分析，并评估这些组合与对扰动事件的响应之间的联系。

4. 结果

4.1. 原型

对16个案例的干旱度、季节性和供水多样性进行分析后，识别出四种涵盖水文学与基础设施的生物物理原型，见表 21）水文学简单（湿润且无季节性）且基础设施简单；2）季节性水文且基础设施简单；3）季节性水文且基础设施复杂；4）干燥且基础设施复杂。研究中未观察到一些可能的组合，例如湿润、无季节性且基础设施复杂。这是意料之中的，因为此类组合无法支撑所需的制度多样性。干旱气候且基础设施复杂的城市，无论是否具有季节性，都归为单一的“干燥且基础设施复杂”原型，因为水资源短缺是这些城市水管理方式的主要驱动因素。

表3 根据制度配置（集中式、受限型、赋能型或去中心化），并结合制度成本和灵活性，详细说明了通过溯因法构建的四种制度原型。由于我们预计生物物理复杂性会影响制度设计，表3还对与每种“理想型”制度原型相匹配的生物物理复杂性级别作出了假设。请注意，没有任何案例属于集中式原型，但这一原型在全球范围内可见；波士顿、哈里斯堡和托莱多符合去中心化的定义，因为它们不受州监管监督，也无需开展强制性干旱或节水规划。受限型设计（如印第安纳波利斯、普罗维登斯和圣何塞）具有较高的制度成本，体现为州监管监督，同时灵活性较低，其特点是在界定和解决问题的方式上反思能力或裁量权有限。赋能型设计（如菲尼克斯、底特律和夏洛特）虽然制度成本较高，但灵活性也较高，其特点是在探究环境条件的替代性解释，以及政策或管理应对措施方面拥有更大的自主空间。

4.2. 响应模式

表4总结了各城市被归属的生物物理与制度原型，以及各城市对过去干旱危机的响应能力。根据表3，据推测，赋能型和去中心化原型

表1。 S干旱危机事件及应对特征概要。基础设施缩写为 i nf.

City	Year	危机类型	应对类型	时间安排	级别	有效性
亚特兰大	2007	干旱	规划，保护	提示	公用事业，州	Yes
波士顿	1988	干旱	规划、保护、基础设施	提示	公用事业、州	Yes
夏洛特	2002	干旱	基础设施、规划、主管机构	提示	公用事业、州	No
夏洛特	2008	干旱	规划、保护	提示	公用事业、地方、州	No
夏洛特	2012	干旱	规划、主管机构	提示	公用事业、地方、州	Yes
哈里斯堡	1991	干旱	Inf.	中等	公用事业	No
哈里斯堡	1999	干旱	基础设施，政策	提示	公用事业，州	No
哈里斯堡	2002	干旱	政策、规划	提示	公用事业、地方、州	未知
印第安纳波利斯	1988	干旱	规划	延迟	州	Yes
印第安纳波利斯	1988	干旱	规划、基础设施	提示	公用事业、地方、州	Yes
菲尼克斯	2003	干旱	规划、保护、基础设施	提示	公用事业、地方、州	Yes
圣安东尼奥	2011	干旱	规划、主管机构、基础设施、保护	提示	公用事业、地方、州	Yes
圣何塞	2007	干旱	政策、保护	提示	州	No
圣何塞	2014	干旱	政策、保护	提示	公用事业、地方、州	Yes
圣罗莎	2014	干旱	政策、保护	提示	公用事业、地方、州	Yes

表2。 生物物理原型和支持数据。

City	K¨oppen 干旱度	柯本-盖革 气候类型	Gini 指数	基础设施类别	生物物理原型
亚特兰大	24.8	Cfa	0.45	简单	1) 简易水电、简单信息
波士顿	28.2	Dfb	0.48	复杂	3) 季节性水文、复杂信息
夏洛特	22.6	Cfa	0.32	简单	1) 易懂的水文信息、简单信息
底特律	18.4	Dfb	0.10	简单	2) 季节性水文信息、简单信息
哈里斯堡	24.3	Dfa	0.14	简单	2) 季节性水文、简单信息
哈特福德	29	Dfb	0.36	复杂	3) 季节性水文、复杂信息
印第安纳波利斯	24.4	Dfa	0.79	复杂	3) 季节性水文、复杂信息
杰克逊维尔	24.3	Cfa	0.00	简单	1) 易懂的水文信息、简单信息
孟菲斯	25.8	Cfa	0.00	简单	1) 易懂的水文信息、简单信息
菲尼克斯	3.6	BWh	0.66	复杂	4) 干旱、复杂感染
普罗维登斯	26.7	Dfa	0.00	简单	2）季节性水文信息、简单信息
圣安东尼奥	13.9	Cfa	0.58	复杂	4）干旱、复杂感染
圣何塞	10.6	Csb	0.58	复杂	4）干旱、复杂感染
圣罗莎	14.8	Csb	0.34	复杂	4）干旱、复杂感染
托莱多	20.6	Dfa	0.00	简单	2) 季节性水文信息、简单信息
华盛顿	22.6	Cfa	0.00	简单	1) 易懂的水文信息、简单信息

适用于复杂生物物理条件，但预计在简单生物物理条件下不会导致表现不佳。因此，像亚特兰大这样的案例展现出这些组合，并且有及时、有效应对干旱的历史，这并不令人意外。值得注意的是，我们没有发现证据表明，据推测最适合简单生物物理条件的受限制度原型，会一贯与简单生物物理原型1和2相匹配。相比之下，我们观察到两个案例（圣安东尼奥和圣何塞）呈现出这样的情况：在气候干燥且基础设施系统复杂的地方，制度受到限制。圣安东尼奥的地方政府和供水机构迅速、有效地应对了2011年干旱，响应行动来自供水机构、地方政府和州政府。然而，圣安东尼奥从爱德华兹含水层抽取地下水，而多年争议促成了一项全面的规划工作，因此它可能能够有效地

表3. 制度原型特征与分类标准。

属性类型	属性	1）集中式	2）受限	3）已启用	4）去中心化
特征	制度成本：协调成本，谈判与执行协议或政策	最低	中等	High	最高
特征	灵活性：更高探索的特权替代选项	最低	中等（目标，行动与评估标准已形式化）	High	最高
预期	经验指纹（我们预期会在原型中看到类别）	依赖关系较少，空缺；整合区域；区域性的主管机关。	依赖关系较多，少量空缺；高度监管性；可选规划。	依赖关系较多 & 空缺；中度监管性；必需规划。	依赖关系较少，大量空缺；最小监管或规划。
预期	生物物理复杂性	Low	Low	High	High

作为一个已启用的系统运作，因为它必须参与这一规划过程（Votteler 2023）。相比之下，圣何塞没有对2007—2009年干旱作出地方层面的响应，尽管州政府作出了响应。（值得注意的是，圣何塞受到限制，而圣罗莎已启用，这是因为圣何塞拥有一家投资者所有的公用事业公司，且加利福尼亚州的监管制度要求对私人公用事业公司实行不同的监督。）在2012—2016年加利福尼亚州干旱期间，圣何塞于2014年发布了市级缺水声明，这与要求实施城市节水的州级决议相一致。所有其他响应行动均发生在州级层面，表明正如受限制度设计所预期的那样，州政府在圣何塞的干旱响应中发挥着重要作用。

4.3. 从危机中学习

在1990—2024年研究期内，包括夏洛特、哈里斯堡、印第安纳波利斯和圣何塞在内的多家供水商经历了重复的干旱危机。它们通过响应性以及响应有效性随时间的变化，展现出动态适应性。这些案例为我们了解供水商如何从危机事件、响应和影响中学习提供了一个窗口。我们为其中三个案例——夏洛特、哈里斯堡和印第安纳波利斯——撰写了叙述，这些案例代表了三种不同的生物物理和制度原型（S3）。下文将重点介绍这些叙述中的关键事件和洞见。

在研究期间，夏洛特遭遇了三次重大干旱，人口和需求也显著增长。1998—2002年干旱导致北卡罗来纳州各地的水库水位降至历史低点，其中包括夏洛特的供水水库。州级对这场严重干旱迅速作出响应，包括设立新的州级机构，负责提供干旱信息并就水资源管理提供指导，以及制定低流量规程。

然而，公用事业公司并未采取主导响应。夏洛特被归类为已启用型制度原型，其生物物理环境简单（易处理水文和简单基础设施）。在这种情况下，如有需要，预计地方层级会迅速作出响应。夏洛特于2008年和2012年再次遭遇干旱。州级和地方层级的响应都很迅速，包括节水计划和水资源可持续性规划。2002年干旱之后，州级对干旱信息和低流量规程的投资，可能在一定程度上促成了随后干旱期间地方层级和公用事业层级的迅速响应（图5a）。还需指出的是，对2008年干旱的响应不足以使系统具备抵御2012年干旱的能力；但之后的干旱（例如2016—2017年冬季）并未达到危机级别。

在研究期间，哈里斯堡经历了三次全州范围的干旱紧急状态：1991—1992年、1999年和2002年。为应对1991—1992年干旱，哈里斯堡的供水商首都地区水务公司修建了萨斯奎哈纳河泵站，作为紧急备用水源，以防德哈特水库水位过低（图 5b 从 Y_1 到 Y_2）。1999年干旱后，该公用事业公司安装了自动水表读数系统，以更高效地追踪用水需求。2002年干旱后，州政府通过了《水资源规划法》，该法案制定了全州水资源规划，并设立区域委员会审查地方规划。公用事业公司对1991—1992年和1999年干旱的迅速响应，符合去中心化制度原型和简单生物物理环境（生物物理原型2：季节性水文和简单基础设施）的预期。自2002年以来，没有

表4。各城市的危机应对特征，以及生物物理与制度原型。粗体表示经历过干旱危机的城市。

City	危机	应对摘要	应对级别	生物物理原型	制度类型
亚特兰大	干旱	及时、有效	公用事业状态	1) 易懂的水文信息、简单信息	3) 已启用
波士顿	干旱	及时、有效	公用事业状态	3) 季节性水文，复杂基础设施	4) 去中心化
夏洛特	重复干旱	提示无效，最终有效	先状态，后续地方公用事业	1) 简易水电，简单信息	3) 已启用
底特律	金融	提示，未见效	地方及州公用事业	2) 季节性水文信息、简单信息	3) 已启用
哈里斯堡	重复干旱	最初延迟，较晚提示、有效性	地方公用事业，州	2) 季节性水文信息、简单信息	4) 去中心化
哈特福德	None	N/A	N/A	3) 季节性水文，复杂信息	3) 已启用
印第安纳波利斯	干旱	最初有所延迟，后续提示，及时、有效	州优先，后续地方公用事业	3) 季节性水文、复杂基础设施	2) 受限
杰克逊维尔	飓风	及时、有效	地方、州	1) 易懂的水文信息、简单信息	3) 已启用
孟菲斯	None	N/A	N/A	1) 易懂的水文信息、简单信息	3) 已启用
菲尼克斯	干旱	及时、有效	地方及州公用事业	4) 干旱、复杂感染	3) 已启用
普罗维登斯	None	经历的干旱但没有危机	N/A	2) 季节性水文信息、简单信息	2) 受限
圣安东尼奥	干旱	及时、有效	地方及州公用事业	4) 干旱、复杂感染	2) 受限
圣何塞	重复干旱	带变量的提示有效性	主要为州级	4) 干旱、复杂感染	2）受限
圣罗莎	干旱，洪水	及时应对干旱，无洪水应对	地方公用事业州	4) 干旱、复杂感染	3) 已启用
托莱多	水质	及时、有效	地方公用事业	2) 季节性水文信息、简单信息	4) 去中心化
华盛顿	None	经历的干旱但没有危机	N/A	1) 易懂的水文信息、简单信息	N/A

发生严重干旱，城市和公用事业公司一直专注于应对财务和水质挑战。尽管哈里斯堡大都会区在此期间持续增长，但20世纪90年代和21世纪初，哈里斯堡市人口下降，而公用事业客户大多居住在该市，这加剧了财务挑战（图 5b）。这凸显了资源可用性对于地方应对的重要性。

1990—2024年，印第安纳波利斯经历了两次严重干旱；这一时期，供水所有权几经变更，覆盖区域也不断扩大。20世纪80年代末的一场干旱，导致州级应对直到20世纪90年代初才姗姗来迟。这是受约束的制度类型在复杂生物物理环境中的预期影响。然而，在20世纪90年代中后期，尽管低流量程度相近，我们并未看到干旱危机反复出现。这归因于20世纪80年代末干旱发生前规划的供水基础设施投资（图5c 从 Y_1 到 Y_2）。2012年干旱虽然持续时间短，却引发了危机，因为它恰逢夏季用水高峰需求，并使需求进一步上升。公用事业机构（其所有权已转移给一家非营利公共信托机构）和州政府都迅速作出了响应；此前州政府对缺水规划的投资可能推动了这一响应。在这两次干旱危机之间的时期，由于美国环境保护署颁布的同意令，注意力和资源集中在废水处理和水质上。虽然这减少了可用于提升供水应对干旱鲁棒性的资源，但也可能提高了公用事业机构迅速处理复杂问题的能力（图5c）。

5. 讨论

我们确定了四种生物物理原型（表 2），用于刻画历史生物物理环境（水文学和基础设施）的复杂性；还确定了四种制度原型（表3），用于刻画政治经济反馈控制的两个关键方面（信息处理和响应多样性）。这些原型的配置若有助于实现动态适应性，其制度原型应能够应对与观测到的生物物理复杂性相当或更高的复杂性（图 3a）。不同的制度设计会导致资源投资水平不同，

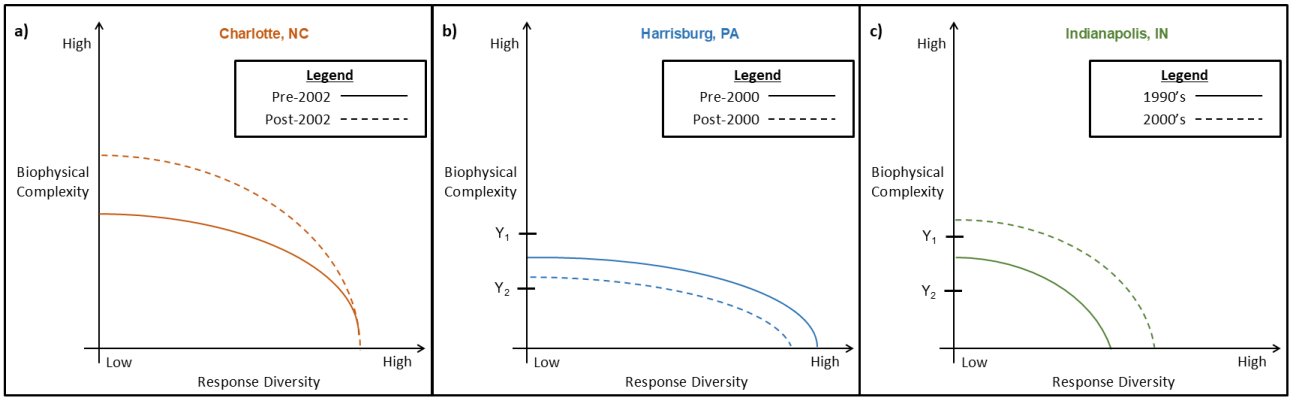

图5. 阿什比空间中制度配置随时间的演变，展示了各配置有效空间的变化：a）夏洛特通过州级投资开展干旱信息收集并制定低流量规程，提升了信息处理能力；b）在哈里斯堡，对备用供水基础设施的投资使制度必须应对的生物物理复杂性从 Y_1 转变为 Y_2；随着时间推移，用户群体减少，可用资源随之减少，有效空间也因此缩小；c）在印第安纳波利斯，对额外供水基础设施的投资使制度必须应对的生物物理复杂性从 Y_1 转变为 Y_2 ，同时，制度通过应对复杂的水质挑战提升了能力。

反馈能力的提升（图 3d，资源预算范围内的面积大小）以及信息处理能力与响应多样性之间的资源分配不同（图 3d，边界形状）。能够有效应对观察到的生物物理复杂性，同时尽量减少资源消耗的制度设计效率较高，但应对不断变化的条件时缓冲空间较小。

除了用于支持反馈能力的资源总量之外，分配给信息处理和响应多样性的比例也会塑造动态适应性。当公用事业机构投资于信息处理时，它们可以扩大被其视为井然有序的条件范围，和/或构建探索性信息处理能力，从而在被视为复杂的条件下实现有效响应（图3b）。充足的信息处理能力使公用事业机构能够区分信号与噪声、识别条件何时发生变化，并确定有效的响应行动。然而，对于某一制度设计而言，要支持适应性，它还必须具备足够的响应多样性。例如，一个制度结构受限的公用事业单位可能能够识别适当的响应，却缺乏实施该响应所需的响应多样性。相比之下，具有分权式制度结构的公用事业单位具有较高的潜在响应多样性，因为设定目标和选择行动的主管权被下放给各个地方公用事业单位；但碎片化限制了共享信息和经验的能力，而缺乏更高级别的（例如州级）规划要求，则降低了开展探索性信息处理的激励。如果生物物理复杂性增加，一个缺乏探索性信息处理能力、无法理解新颖条件的去中心化公用事业单位可能诉诸试错法（图3c），或采取反应式（观望）策略。

考察16座城市的模式后，我们没有发现证据表明，各城市 consistently采用了最适合其现有生物物理原型的制度原型。虽然案例数量适中，无法支持广泛概括，但我们推测，这些配对之所以呈现多样性，部分原因在于制度设计采用了不同的逻辑（Franco-Torres 等，2021），也因为路径依赖可能凌驾于所采用的逻辑之上。例如，分权可能被优先视为目标，而非效率，导致简单生物物理系统的管理被委托给地方主管机关，尽管实行集中管理会更有效（Estache 和 Sinha，1995；Peterson 和 Muzzini，2005）。就路径依赖而言，复杂基础设施可能随着时间推移受到多重主体层层叠加的监管，因而受到严重限制（Ekanem 等，2025；Lawless 等，2024）。此外，我们承认，尽管我们仅根据生物物理复杂性对案例进行分类，但其他复杂性来源（例如需求和水用户的多样性）也会影响制度设计。

在考察原型配对与时间安排、有效性和响应之间的模式时，我们观察到预期结果、具有启发性的矛盾，以及随时间变化的不同响应。根据原型配对，在研究期间的多个案例中，始终观察到了预期的地方层级响应能力（例如亚特兰大、波士顿、菲尼克斯、圣何塞、圣罗莎）。同样，在其他一些案例中，由于充足的水资源可用性和基础设施已充分应对观察到的变异性，因此根本不需要采取响应措施（例如底特律、哈特福德、

杰克逊维尔、孟菲斯、普罗维登斯、托莱多、华盛顿）。具有相同原型的城市在响应方面存在差异，这让我们得以洞察分析的局限性。例如，圣何塞和圣安东尼奥都被归类为干燥、复杂基础设施和受限原型，但两者应对干旱危机的方式不同。在圣何塞，面对多次干旱，州级响应力度很大，而城市层级的响应极少，这符合受限制度设计下的预期。然而，在圣安东尼奥，城市层级的响应迅速且有效；我们推测，这可能受到公用事业参与含水层范围规划流程的影响。圣安东尼奥表明，动态适配能力的实现条件可以通过多种制度设计机制来达成，而这些机制并非都能被我们的分类标准捕捉到。

此外，其他因素也会影响响应特征，例如在干旱响应中发挥主导作用的政府级别。比如，当一个州的大范围地区受到干旱影响时，可能需要州级响应来协调多个从同一水源取水的水用户采取行动（例如哈里斯堡）。或者，地方供水商可能会依从州级响应（例如下令在干旱期间节水），以避免将政治资本耗费在重复或重叠的响应行动上（例如圣何塞）。这与多中心系统的作用相符：它既能促进竞争，也能推动协调，从而在整个网络中实现高效响应（Aligica and Tarko 2012年）。此外，我们还观察到响应行动类型上的规律，其中大多数着重于信息收集、规划和节水。基础设施既创造了响应机会，也对其形成制约。集中式供水基础设施具有很高的惯性，因此扩建或改造此类基础设施的成本高昂，也促使人们选择其他响应行动（Helmrich et al. 2023年）。这种高惯性凸显了预见能力的重要性，因为实施基础设施变更需要提前留出时间。

夏洛特、哈里斯堡和印第安纳波利斯的案例叙述表明，基础设施与制度会如何随时间共同演变。在夏洛特（易处理水文、简单基础设施、已启用），我们首先观察到21世纪初仅由州层面应对干旱，具体措施是投资信息基础设施。2008年和2012年随后发生干旱时，地方响应迅速。夏洛特展现了多个治理层级的动态适应性：根据需要进行投资，以增强预期和响应能力（图5a）。在哈里斯堡（季节性水文、简单基础设施、去中心化），我们观察到公用事业对第一和第二次干旱的响应迅速，但对研究期间经历的第三次干旱则并非如此。第三次干旱发生在财务压力与投资需求相互竞争的时期，凸显了资源可用性（包括财务资源及其他资源）对于将响应能力转化为实际响应的重要性（图5b）。在印第安纳波利斯（季节性水文、复杂基础设施、受限），对1988年干旱的响应有所延迟，且仅发生在州层面；而对2012年干旱的响应则迅速，并覆盖地方—公用事业—州多个层级。这一响应模式被认为既受到公用事业从私营转变为非营利信托机构的影响，也得益于其应对其他公用事业挑战（如水质问题）所积累的能力。这表明，即使制度变革未改变原型，也仍可能改变动态适应性（图5c）。

跨城市和随时间变化的原型与响应模式，为动态适应性的设计机遇与权衡提供了洞见。现有基础设施和水文条件决定了制度必须通过反馈过程加以管理的变异性（图 1）。制度配置在多层级系统中创造、促成或限制这些反馈路径（图 2）。通过制度原型的构建与应用，我们发现，各治理层级间控制权与灵活性的分布，影响着公用事业机构的信息处理能力、响应多样性以及制度成本。针对当前条件优化效率的配置会限制初始能力，并容易受到环境变化的影响。具备信息处理和响应多样性缓冲能力的设计，成本较高。然而，区域内公用事业机构与州级实体之间的连通性和协调，可通过共享信息与经验降低增加这些能力所需的成本。此外，信息处理能力与响应多样性的平衡十分重要；只投资其中一项而不投资另一项，收益会递减。简言之，尽管在公用事业层级提升信息处理能力和响应多样性的制度设计，能够促进该层级的动态适应性，但这也伴随着权衡。集中式系统可最大限度地提高州（或更广义地说，更高层级）的控制力和灵活性；在某些条件下，州政府等较高层级实体能够高效响应（例如全州范围的加利福尼亚州干旱）。因此，在考虑制度设计的权衡、平衡各治理层级的动态适应性以实现不同空间尺度间的连通性时，值得考虑特定基础设施提供方可能面临的灾害尺度（Moore 等人 2024）。此外还有

通过制度手段可管理的变异性存在上限（例如飓风海伦（Cooper2024）），而在某些情况下，维持绩效需要进行基础设施变更。由于供水基础设施具有很强的惯性，观察到的响应行动中，只有少数促成了新建或改造基础设施。这凸显了预见能力的重要性：它能提供充分的前瞻性，确保及早启动基础设施投资，留出充足的实施时间。

在开发和检验原型时，我们依赖历史数据。依赖历史数据存在局限，因为动态适应性按定义着眼于未来，用以衡量制度设计预见并应对尚未经历的未来挑战的能力。为弥补这一局限，我们聚焦于被视为危机的历史事件，因为在这些情况下，公用事业机构无法仅依靠常规运营，而必须针对较不熟悉的条件制定策略或作出反应。这项实证分析的发现初步建立了广泛理论进展与城市供水背景之间的联系，并为探讨如何在多样化条件下主动进行动态适应力设计奠定了基础。

6. 结论

随着基础设施系统越来越频繁地超出其设计条件运行，人们开始关注制度设计，以应对新出现的挑战（Chester 等，2021；Moore 等人，2024；Wiechman 等，2024）。尽管人们普遍认同，制度要取得成功，就必须适配具体情境（Cox，2012；Ostrom，1995；Young，2002），但在这个快速变化的时代，制度适配已不宜再作静态定义（Steffen 等，2015）：随着条件变化，能否在不同政策之间灵活转换，决定着长期绩效（Anderies 等，2019）。核心挑战在于，制度仅仅做到适配已不足够（即管理稳定的变化机制），而必须具备动态适应性（即能够跟踪环境变化）。在当前时代，由响应能力和预见能力所界定的动态适应性至关重要（Moore 等人，2024）。为理解哪些制度设计特征能够实现动态适应性，以及这些特征所依赖的生物物理特征，我们将研究重点放在城市供水系统上，因为它们充分体现了环境和社会变化给基础设施系统带来的压力（Krueger 等，2022；Rockstr¨om，2014）。

具体而言，我们利用美国16家城市供水公用事业单位涵盖35年的广泛数据集来开发并检验原型，这些原型描绘了促成动态适应性的制度设计和生物物理环境的关键特征。我们假设，有助于实现动态适应性的原型配置，会将能够应对不低于实际观察到的生物物理复杂程度的制度原型与之相配。既能提升信息处理能力又能促进响应多样性的制度设计，更能应对复杂的生物物理环境，但会产生更高的制度成本。不过，区域层级的多中心治理有助于共享信息与经验，从而在一定程度上缓解这些较高成本。相较之下，为当前环境条件下的效率进行优化的制度设计，虽能节省成本，却会以增加对环境变化的脆弱性为代价。

此外，治理的不同级别之间在制度设计上存在权衡：有助于提升公用事业层级信息处理有效性和响应能力的制度结构，可能会削弱州等较高级别治理层级的控制力和灵活性。鉴于生物物理环境变化的尺度范围，以及不同尺度之间的连通性，这些权衡值得关注（Moore 等人 2024年）。最后，我们发现案例集中基础设施变更的实例较少，这可能是因为基础设施系统具有很强的惯性。然而，基础设施变更仍是维持绩效、减轻制度负担的重要方式，也进一步凸显了预见能力的必要性，以便为基础设施建设等响应缓慢的行动争取时间。

致谢

所有作者感谢美国国家科学基金会“综合城市供水系统转型动态”项目（编号：1923880）提供的支持。本文所表达的观点和结论仅代表作者本人，并不一定反映美国国家科学基金会的观点。

参考文献

Aggarwal, R. 和 Anderies,J. M.（2023年）。理解社会—生态系统中的治理如何涌现：来自原型分析的见解。*Ecology and Society*, 28(2)。电子版：https://doi.org/10.5751/es-14061-280202.

Aligica, P. D. 和 Tarko, V.（2012）。管理方差：人类世的主要政策挑战。*Governance*，（英国牛津），25，237–262。

Alonso Vicario, S.、Hornberger, G. M.、Mazzoleni, M. 和 Garcia, M. （ 2024 ）。气候与人为影响对美国本土连续部分降水分配的重要性。 *Journal of Hydrology*, 633（130984）, 130984。Anderies, J. M.（2015）。管理方差：人类世的主要政策挑战。 *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112（47）：14402–14403。Anderies, J. M. 和 Janssen, M. A.（2013）。社会—生态系统的鲁棒性：对公共政策的启示。*Policy Studies Journal*, 41（3）：513–536。Anderies, J. M.、Mathias, J. D. 和 Janssen, M. A.（2019）。社会—生态系统中的知识基础设施与安全运行空间。 *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116（12）：5277–5284。Ashby, W. R.（1968）。《自组织系统原理》。载于 W. Buckley（编）, *Systems Research forBehavioral Science*, Routledge。Azizi, K.、Hornberger, G. M.、Baggio, J.、Koebele, E. A.、Anderies, J. M. 和 Garcia, M.（2024）。支持美国优质且价格可负担的城市饮用水供应的条件。 *Journal of Water Resources Planning and Management*, 150。电子版：https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-6289。Baggio, J. A.、Barnett, A. J.、Perez-Ibarra, I.、Brady, U.、Ratajczyk, E.、Rollins, N.、Rubi ̃nos, C.、Shin, H. C.、Yu, D. J.、Aggarwal, R.、Anderies, J. M. 和 Janssen, M. A.（2016）。阐释公地治理的成功与失败：奥斯特罗姆制度设计原则的构型特征。 *International Journal of the Commons*, 10（2）, 417。Ballard, G. A.（2012）。印第安纳波利斯市长 Gregory A. Ballard 在美国众议院作证 *Committee On Science, Space andTechnology*。访问日期：2025年1月31日：https://democrats-science.house.gov/imo/media/doc/Ballard %20Testimony.pdf Binda, L.（2018）。Capital Region Water 制定2019年预算，将提高供水和污水处理费。 *The Burg News*。访问日期：2025年1月31日：https://theburgnews.com/news/crw-sets-2019-budget-will-increase-water-sewer-rates Boisot, M. 和 Mckelvey, B.（2011）。复杂性与组织—环境关系：重新审视艾什比必要多样性定律。载于 *The Sage Handbook of Complexity and Management*, SAGE Publications Ltd. Carlson, J. M. 和 Doyle, J.（2002年）。复杂性与鲁棒性。 *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99（增刊1）：2538–2545。Capital Region Water（2025a）。水质报告。访问日期：2025年2月19日：htt ps://capitalregionwater.com/resources/water-quality-reports/ Capital Region Water（2025b）。确保清洁用水。访问日期：2025年2月19日：https://capitalregionwater.com/what-we-do/ensuring-clean-water/#:˜:text=Drinking%20 Water,you%20turn%20on%20the%20faucet. Capital Region Water（2025c）。高级计量基础设施（AMI）升级。访问日期：2025年3月28日：htt ps://capitalregionwater.com/projects/drinking-water-distrib ution-system-automated-meter-reading-network-conversion/ Capital Region Water（2025d）。City Beautiful H2O：帮助哈里斯堡应对径流污染。访问日期：2025年3月28日：https://capitalregionwater.com / what-we-do/cbh2o/ Capital Region Water（2024年）。替代方案分析报告。访问日期：2025年2月19日：https://capitalregionwater.com/ wp-content/uploads/2024/04/ CRW Alternatives Analysis Report.pdf Capital Region Water（2021a）。供水系统咨询工程师年度报告。访问日期：2025年2月19日：https://capitalregionwater.com/wp-content/uploads/2021/11/2021-09-30-Water-CEAR-FINAL-2021.pdf Capital Region Water（2021b）。Capital Region Water批准2022年预算和费率。访问日期：2025年2月19日：https://capitalregionwater.com/news/capital-region-water-approves-2022-budgets-and-rates/ Capital Region Water（2020a）。财务报表、规定的补充信息和补充信息。访问日期：2025年2月19日：https://capitalregionwater.com/wp-content/uploads/2021/09/CRW-Financial-Statements-2020.pdf Capital Region Water（2020b）。Capital Region Water批准2021年预算和费率。访问日期：2025年2月19日：https://capitalregionwater.com/news/capital-region-water-approves-2021-budgets-and- rates/#:˜:text=Drinking%20water%20rates%20will%20incr ease %20by%202%,收费%20为%20$7.93，适用于%20标准%205/8%E2%80%9D

Capital Region Water（2017年）。社区绿化计划：哈里斯堡绿色雨洪基础设施计划。访问日期：2026年1月15日：https://capitalregionwater.com/wp-content/uploads/2017/04/Community-Greening- Plan FINAL smallest.pdf Capital Region Water（2016年）。历史协议永久保护哈里斯堡饮用水水源。访问日期：2025年2月19日：https://capitalregionwater.com/wp-content/uploads/2014/05/Historic-Agree ment-Protects- Drinking-Water1.pdf Capital Region Water（2015a）。德哈特水库和萨斯奎哈纳河水源保护计划。访问日期：2025年2月19日：https://capitalregionwater.com/wp-c ontent/uploads/2016/02/2015-09-00-S WP-Final-Screen- v1.pdf Capital Region Water（2015b）。前街泵站升级专业工程服务招标邀请书——第1号补遗。访问日期：2025年2月19日：https://capitalregionwater.com/wp-content/uploads/2014/06/2015-05-27-Addendu m-No.-1- to-FSPS-Upgrade-RFP.pdf#page=1.31 Capital Region Water（2014年）。水费。访问日期：2025年2月19日：https://cityofharrisburg.zendesk.com/hc/en-us/article attachments/202266260 Charlotte Water（2025a）。关于我们。访问日期：2025年4月30日：https://www.charlottenc.gov/water/About-Us。Charlotte Water（2025b）。夏洛特水务局跨流域调水。访问日期：2025年4月30日：https://www.charlottenc.gov/water/Water-Quality/Charlotte-Water-IBT。Charlotte Water（2025c）。智能灌溉。访问日期：2025年4月30日：https://www.charlottenc.gov/water / Programs/Smart-Irrigation。Charlotte Water（2023年）。夏洛特水务年度报告。访问日期：2025年4月30日：https://www.charlottenc.gov/files/sharedassets/cltwater/v/1/documents/about-us/cltw annual-report 2023 fnl.pdf。卡托巴-沃特里水管理组［CWWMG］（2014年）。卡托巴-沃特里河流域供水总体规划。访问日期：2025年4月30日：https://www.charlottenc.gov/files/sharedassets/cltwater/v/1/documents/about-us/cltw annual-report 2023 fnl.pdf。

Chester, M., Underwood, B. S., Allenby, B., Garcia, M., Samaras, C., Markolf, S., Sanders, K., Preston, B., 和 Miller, T. R.（2021）。人类世中基础设施韧性如何应对日益不确定且复杂的条件。 *Npj Urban Sustainability*，1。电子版：https://doi.org/10.1038/s42949-021-00016-y。Chester, M. 和 Allenby, B.（2021）。迈向适应性基础设施：第五项修炼。 *Sustainable andResilient Infrastructure*，6，334–338。Citizens Energy Group（2013）。干旱管理计划。访问日期：2025年1月31日：https://info.citizensenergygroup.com/conservation/water/drought-alerts Citizens Energy Group（2025a）。《水》。访问日期：2025年1月31日：https://info.citizensenergygroup.com/water Citizens Energy Group（2025b）。长期控制计划。访问日期：2025年1月31日：https://info.citizensenergygroup.com/digindy/regulation/ control-plan Citizens Energy Group（2025c）。Citizens水库：面向未来的供水。访问日期：2025年1月31日：https://info.citizensenergygroup.com/projects/citizens-reservoir 哈里斯堡市。（2013）。哈里斯堡强劲计划。访问日期：2025年1月31日：https://dced.pa.gov/download/harrisburg-strong-plan-pdf/ 宾夕法尼亚州联邦。（无日期）。第4编，第119章：在联邦干旱紧急区域内禁止非必要用水。《宾夕法尼亚州法规》。访问日期：2025年1月31日：https://www.pacodeandbulletin.gov/Display/pacode?file=/secure/pacode/data/004/chapter119/chap119toc.html Cooper, R.（2024）。海伦飓风灾后恢复。州预算与管理办公室。Cox, M.（2012）。诊断制度适配：一种形式化视角。 *Ecology and Society*，17(4)。电子版：https://doi.org/10.5751/ES-05173-170454 Crawford, S. E. S., 和 Ostrom, E.（1995）。制度语法。 *The American Political Science Review*，189(3)，582–600。Csete, M. E., 和 Doyle, J. C.（2002）。生物复杂性的逆向工程 *Science*，295(5560)，1664–1669。Daems, D., 和 Schaefer, A.（2024）。复杂性问题与多中心政治秩序的兴起。载于 D. Thunder 和 P. Paniagua（编） *Polycentric governance and the good society: a normative and philosophical investigation*（第1版，第87–113页）。Lexington。

Davis, S. J., Caldeira, K., 和 Matthews, H. D.（2010）。现有能源基础设施带来的未来二氧化碳排放与气候变化。 *Science*，329，1330–1333。DeCaro, D. A., Chaffin, B. C., Schlager, E., Garmestani, A. S., 和 Ruhl, J. B.（2017）。适应性环境治理的法律和制度基础。*Ecology and Society*, 22(32)。Delany, R.（2015）。Citizens 将在费希尔斯建造一座27亿加仑水库，以增加供水。访问日期：2/12/2025：htt
ps://www.wfyi.org/news/articles/citizens-will-add-to-w
ater-supply-by-building-27-billion-gallon-reservoir-in-fishers Deslatte, A., Adams, J. A., Cheema, F., Barnes, J. L., Koebele, E. A., 和 Alonso Vicario, S.（2025）。理解制度对气候适应型政策设计的影响：城市供水系统中的集体行动推断研究。 *PolicyStudies Journal*，53，637–653。Deslatte, A., Adams, J., Cheema, F., Alonso Vicario, S., Barnes, J., 和 Koebele, E. A.（2024）。国家强化的知识基础设施如何影响适应性城市水治理。 *Ecology and Society*, 29(28)。Deslatte, A., Helmke-Long, L., Anderies, J. M., Garcia, M., Hornberger, G. M., 和 Koebele, E. A.（2022）。通过城市供水系统的制度语法评估可持续性。 *Policy Studies Journal*，50:387–406。Deslatte, A., Koebele, E. A., Bartels, L., Wiechman, A., Alonso Vicario, S., Coughlin, C., 和 Rybolt, D.（2023）。制度、空缺与依赖关系：追溯城市供水系统的设计与鲁棒性。 *International Review of Public Policy*，5，180–222。Deslatte, A., Koebele, E. A., 和 Wiechman, A.（2024）。拥抱模糊性：追溯城市水资源管理中的气候响应多样性。 *Public Administration*，103(1)，250-272。电子版：https://doi.org/10.1111/padm.13017 Dettinger, M. D., 和 Diaz, H. F.（2000）。河川流量季节性与变异性的全球特征。 *Journal of Hydrometeorology*，1，289-310。干旱管理咨询委员会（2025）。DMAC 流程。访问日期：2025年1月31日：https://www.ncdrought.org/DMAC-text-new Eisenack, K., Luedeke, M., 和 Kropp, J.（2006）。将原型构建作为分析社会生态系统的形式化方法 *Proceedings of the Institutional Dimensions of Global Environmental Change*。

Eisenack, K., Oberlack, C., 和 Sietz, D. (2021)。原型分析的路径：可持续性研究的根源、成果与下一步。 *Ecology and Society*, 26(2)。Ekanem, M., Noble, B., 和 Poelzer, G. (2025)。制度叠层对电力部门改革的影响：挪威电力部门的经验教训。 *EnergyResearch and Social Science*, 119, 103864。Ekstrom, J. A., 和 Young, O. R. (2009)。评估一组制度与生态系统之间的功能适配。 *Ecology and Society*, 14(2)。Envision Charlotte (2018)。Envision Charlotte：水资源报告——用水基准评估与节水。访问日期：2019年6月29日：https://envisioncharlotte.com/wp-content/uploads/2018/03/101594WP-01 Envision-Charlotte-White-Paper-1.pdf Estache, S., 和 Sinha, A. (1995)。分权是否会增加公共基础设施支出？ *World BankPublications*。第1457号。Franco-Torres, M., Kv˚alshaugen, R., 和 Ugarelli, R. M. (2021)。从制度逻辑视角理解城市供水服务的治理。 *UtilitiesPolicy*, 68, 101159¯。Frost, J. (2025)。夏洛特节水与用水项目。访问日期：2025年4月30日：https://www.youtube.com/watch?v=Hii2j03TYsc Garcia, M., Wiechman, A., Alonso Vicario, S., Hornberger, G. M., Bartels, L., Azizi, K., Anderies, J. M., Koebele, E. A., Barnes, J., Deslatte, A., 和 Adams, J. (2025)。美国水务公司时间线 1990-2020 *CUASHI Hydroshare*。http://www.hydroshare.org/resource/7a1d900ea3c84676a417089ef4e0d7b9。Garcia, M., Koebele, E. A., Deslatte, A., Ernst, K., Manago, K. F., 和 Treuer, G. (2019)。迈向城市水资源可持续性：分析迈阿密、拉斯维加斯和洛杉矶的管理转型。 *Global Environmental Change*, 58(101967), 101967。Garcia, M., Ridolfi, E., 和 Di Baldassarre, G. (2020)。不断变化的条件下水库蓄水量与运行规则之间的相互作用。 *Journal of Hydrology*, 590(125270), 125270。GeoDecisions。(2024)。Capital Region Water 选择 GeoDecisions 提供地理信息系统和计算机化维护管理系统。访问日期：2025年3月28日：https://www.geodecisions.com/news/2024/6/24/capital-r
e
gi
on-water-taps-geodecisions-for-gis-and-computerized-maintenance-management-systems

Gilrein, E. J., Carvalhaes, T. M., Markolf, S. A., Chester, M. V., Allenby, B. R., 和 Garcia, M. (2019)。将基础设施从僵化转变为适应性的概念与实践。 *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 6(3-4), 213-234。Gonzales, P., 和 Ajami, N. K. (2017)。Gonzales, P., 和 Ajami, N. K. (2017)。面向不断变化的城市水范式的综合区域韧性框架。*Sustainable Cities and Society*, 30, 128–138。G¨untner, A., Stuck, J., Werth, S., D¨oll, P., Verzano, K., 和 Merz, B. (2024)。大陆水储量时间与空间变化的全球分析。 *WaterResources Research*, 43(5)。Helmrich, A., Chester, M., Miller, T. R., 和 Allenby, B. (2023)。锁定：其在基础设施系统中的起源与意义。 *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 3(3):032001。出版商：IOP出版社。Ho, M., Lall, U., Sun, X., 和 Cook, E. R. (2017)。美国本土径流555年来的多尺度时间变异性与区域模式。 *WaterResources Research*, 53(4), 3047–3066。Hornberger, G. M., Hess, D. J., 和 Gilligan, J. (2024)。美国城市的节水与水文转型。 *Water Resources Research*, 51(6), 4635–4649。Humphrey, V., Gudmundsson, L., 和 Seneviratne, S. I. (2016)。利用GRACE卫星评估全球水储量变异性：趋势、季节周期、季节内异常与极端事件。 *Surveys in Geophysics*, 37, 357–395。印第安纳州自然资源部 [IDNR]。(2007)。《印第安纳州建议示范条例》。访问日期：2025年1月31日：https://www.in.gov/dnr/water / files/Model ordinance Final Draft 7-2-07.doc 印第安纳州自然资源部 [IDNR]。(2015)。《印第安纳州水资源短缺计划》。访问日期：2025年1月31日：https://www.in.gov/dnr/water/files/watshplan.pdf 印第安纳州自然资源部 [IDNR]。(2025)。印第安纳州用水效率与节水报告。访问日期：2025年1月31日：https://www.in.gov/oucc/watersewer/key-cases-by-utility/citizens-water-and-sewer-rates /# Current Sewer Base Rates 印第安纳州公用事业消费者顾问办公室。(2025)。Citizens水务与污水费率。访问日期：2025年1月31日：https://www.in.gov/dnr/water/lake-michigan/great-lakes-compact / r e p ort-on-indiana-water-use-efficiency-and-conservation/

Koppenjan, J., and Groenewegen, J. (2005). 复杂技术系统的制度设计。 *International Journal of Technology Policy and Management*, 5, 240. Krueger, E. H., McPhearson, T., and Levin, S. A. (2022). 城市供水安全与韧性的综合评估：迈向精简方法 *Environmental Research Letters*, 17(7), 075006. Lawless, K. L., Garcia, M., and White, D. D. (2024). 科罗拉多河流域水治理的制度分析，1922–2022。 *Frontiers in Water*, 6, 1451854. Levin, S. A., Anderies, J. M., Adger, N., Barrett, S., Bennett, E. M., Cardenas, J. C., Carpenter, S. R., Cr´ epin, A.-S., Ehrlich, P., Fischer, J., Folke, C., Kautsky, N., Kling, C., Nyborg, K., Polasky, S., Scheffer, M., Segerson, K., Shogren, J., van den Bergh, J., Walker, B., Weber, E. U., and Wilen, J. (2022). 极端事件面前的治理：从演化过程中汲取经验以构建干预措施，并认识到超越现有框架的必要性。 *Ecosystems*, 25(3):697–711. Li, B., Rodell, M., and Famiglietti, J. S. (2015). 美国中部和东北部不同时间与空间尺度上的地下水变异。 *Journal ofHydrology*, 525, 769–780. Magliocca, N. R., Ellis, E. C., Allington, G. R. H., de Bremond, A., Dell'Angelo, J., Mertz, O., Messerli, P., Meyfroidt, P., Seppelt, R., and Verburg, P. H. (2018). 填补全球知识空白：从社会—生态系统案例研究中提炼概化知识。 *Global Environmental Change*, 50, 1–14. Marvel, K., Su, W., Delgado, R., Aarons, S., Chatterjee, A., Garcia, M., Hausfather, Z., Hayhoe, K., Hence, D., Jewett, E., Robel, A., Singh, D., Tripati, A., and Vose, R. (2023). 第2章：气候趋势 *Fifth NationalClimate Assessment.*。 Massmann, C. (2020). 采用自上而下方法识别影响大量美国流域水文模型性能的因素。*Hydrological Processes*, 34, 4–20. McCabe, G. J., and Wolock, D. M. (2016). 美国本土的径流效率变异性与趋势。 *Journal of the American Water ResourcesAssociation*, 52, 1046–1055. McDonald, R. I., Weber, K., Padowski, J., Fl¨orke, M., Schneider, C., Green, P. A., Gleeson, T., Eckman, S., Lehner, B., Balk, D., Boucher, T., Grill, G., and Montgomery, M. (2014). 城市化星球上的水：城市化与城市供水基础设施的覆盖范围。 *Global Environmental Change*, 27, 96–105.

McNeely, E.(2023). 夏洛特水务史。访问日期：2/12/2025：https://cltwaterblog.org/2023/04/the-history-of-charlotte- water/#:˜:text=夏洛特市议会购买

d

Mesdaghi, B., Ghorbani, A., 和 de Bruijne, M.（2022）。交通基础设施气候适应中的制度依赖：一种制度网络分析方法。 *Environmental Science and Policy*, 127, 120–136。Miller, D.（1992）。伊卡洛斯悖论：卓越企业如何导致自身衰败。 *BusinessHorizons*, 35(1), 24–35。Miller.（2017）。哈里斯堡地区的水费和污水处理费上涨。 *PennLive* 访问日期：2025年3月28日：https://www.pennlive.com/news/2017/11/ water sewer rates rising in ha.html Moore, M. L., Wang-Erlandsson, L., Bodin, ¨O., Enqvist, J., Jara millo, F., J´on´as, K., Folke, C., Keys, P., Lade, S. J., Garcia, M. M., Martin,R., Matthews, N., Pranindita,A., Rocha, J. C., 和 Vora, S.（2024）。从适配到适应力：人类世的水治理。 *NatureWater*, 2, 511-520。Modarres, R.（2007）。河川流量干旱时间序列预测。 *Stochastic Environmental Research and RiskAssessment*, 21: 223–233。《市政水务领袖》。（2026）。以色列水务局的核心作用 https://municipalwaterleader.com/the-central-role-of-the-israel-water-authority/ 美国国家海洋和大气管理局（2012）。印第安纳波利斯，印第安纳州天气预报办公室：2012年初夏高温干燥天气。访问日期：2025年2月12日：https://www.weather.gov/ind/summer2012 Novak咨询集团（2011）。《市政财政复苏法》复苏计划：哈里斯堡市。为宾夕法尼亚州社区与经济发展部编制。访问日期：2025年2月12日：https://media.pennlive.com/midstate impact/other/Act-47-Harrisburg.pdf Oberlack, C., Sietz, D., Bonanomi, E. B., de Bremond, A., Dell'Angelo, J., Eisenack, K., Ellis, E. C., Epstein, G., Giger, M., Heinimann, A., Kimmich, C., Kok, M. T. J., Manuel-Navarrete, D., Messerli, P., Meyfroidt, P., V´aclav´ık, T., 和 Villamayor-Tomas, S.（2019）。可持续性研究中的原型分析：含义、动因与循证政策制定。 *Ecology and Society*, 24(26)。

-

Ostrom, E. (2009). 分析社会—生态系统可持续性的一般框架。 *Science*, 325, 419–422. Ostrom, E. (1990). *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action.*剑桥大学出版社。Ostrom, E. (1995). 设计复杂性以治理复杂性。载于 S. Hanna 和 M. Munasinghe（编）, *Property Rights and the Environment: Social and Ecological Issues*, （第 94 卷）。世界银行。Ostrom, E. (2007). 超越万能药的诊断方法。 *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(39), 15181–15187. Ostrom, E. (2011). 制度分析与发展框架的背景。 *Policy StudiesJournal*, 39, 7–27. Padowski, J. C., 和 Jawitz, J. W. (2012). 美国 225 座大城市的水资源可用性与脆弱性 *Water Resources Research*, 48(12). Peel, M. C., Finlayson, B. L., 和 McMahon, T. A. (2007). 更新后的柯本—盖格气候分类世界地图。 *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633–1644. Peix´oto, J. P., 和 Oort, A. H. (1984). 气候物理学。 *Reviews of Modern Physics*, 56, 365–429. 宾夕法尼亚州环境保护部。(2009). 干旱历史地图：1980年至今。访问日期：2025年1月31日：https://files.dep.state.pa.us/water/bsdw/Drought/DroughtStatusMaps/PA Drought History Maps 1980 Present.pdf 宾夕法尼亚州环境保护部。(2025). 宾夕法尼亚州水资源规划原则。访问日期：2025年3月28日：https://spcwater.org/wp-content/uploads/2020/01/StateWtrPlan.pdf Peterson, G., 和 Muzzini, E. (2005). 基本基础设施服务分权化。 *East Asia Decentralizes: MakingLocal Government Work*, （第 209–236 页）。世界银行。QC Water。(2025). Renew Brew。访问日期：2025年1月31日：https://www.drinkqcwater.org/ Quan, C., Han, S., Utescher, T., Zhang, C., 和 Liu, Y.-S. (2013). 基于温度—降水的干旱指数验证：古气候学意义。*Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 386, 86–95.

Raftelis。(2019). 雨洪费提案与实施计划。访问日期：2025年3月28日：https://capitalregionwater.com/wp-content/uploads/2019/06/2019-06-19-Stormwater-Fee-Proposal-and-Implementation-Plan.pdf Raftelis。(2025). Capital Region Water。访问日期：2025年3月28日：https://www.raftelis.com/work/capital-region-water/ Rice, J. S., 和 Emanuel, R. E. (2017). 流域特征如何影响河川流量对厄尔尼诺—南方涛动的响应？ *Water Resources Research*, 53, 4393–4406. Rice, J. S., Emanuel, R. E., 和 Vose, J. M. (2016). 流域特征对美国本土年尺度河川流量变异性趋势空间格局的影响。 *Journal of Hydrology*, 540, 850–860. Rockstr¨om, J., Falkenmark, M., Allan, T., Folke, C., Gordon, L., J¨agerskog, A., Kummu, M., Lannerstad, M., Meybeck, M., Molden, D., Postel, S., Savenije, H. H. G., Svedin, U., Turton, A., 和 Varis, O. (2014). 人类世水危机的展开：迈向基于韧性的全球可持续水资源视角。 *Ecohydrology*, 7, 1249–1261. Rodriguez,A. A., Cifdaloz, O., Anderies, J. M., Janssen, M. A., 和 Dickeson, J. (2011). 应对高度不确定的自然资源系统中的管理挑战：稳健性—脆弱性权衡方法。 *Environmental Modeling and Assessment*, 16(1), 15–36. Rudnick, J., Heikkila, T., Koebele, E., Morrison, T., 和 Batavia, C. (2025). 评估萨克拉门托—圣华金三角洲气候治理研究与实践的现状及成效。 *San Francisco Estuary and Watershed Science*, 23. Saki, S. A., Sofia, G., 和 Anagnostou, E. N. (2023). 描述美国本土范围内日降水量、流量及极端事件变异性的时空变化。*Journal of Hydrology*, 626, 130336. Sietz, D., Frey, U., Roggero, M., Gong, Y., Magliocca, N., Tan, R., Janssen, P., 和 V´aclav´ık, T. (2019). 可持续性研究中的原型分析：方法组合与分析前沿。 *Ecology and Society*, 24(34). Singh, S., Abebe, A., Srivastava, P., 和 Chaubey, I. (2021). 年代际和多年代际气候振荡对美国本土连续部分河川流量中 ENSO 调制效应的影响。 *Journal of Hydrology. RegionalStudies,* , 36, 100876. Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., and Ludwig, C. (2015). 人类世的轨迹：大加速。 *The Anthropocene Review*, 2, 81–98. Swain, D. L., Prein, A. F., Abatzoglou, J. T., Albano, C. M., Brunner, M., Diffenbaugh, N. S., Singh, D., Skinner, C. B., and Tou ma, D. (2025). 变暖地球上的水文气候波动性。 *Nature Reviews. Earth andEnvironment*, 6, 35–50. Treuer, G., Koebele, E., Deslatte,A., Ernst, K., Garcia, M., and Manago, K. (2017). 分析城市水资源管理转型的叙事方法：迈阿密-戴德水务与污水处理局案例。 *Water Resources Research*, 53, 891–908. Turlington, M. W., de Neufville, R., and Garcia, M. (2017). 水基础设施系统的灵活设计。载于 S. Islam 和 K. Madani（编）, *Contingent Complexity and Prospects for Water Diplomacy: Understanding and Managing Risks and Opportunities for an Uncertain Water Future*, Anthem Press。美国与宾夕法尼亚州环境保护部诉哈里斯堡市与 Capital Region Water。（2015）。第 1:15-cv-00291 号（宾夕法尼亚州中区，2015）。访问日期：2025年1月31日：https://www.epa.gov/sites / default/files/2015-02/documents/cityofharrisburg-cd.pdf Unterreiner, J.（2011）。《印第安纳州水资源短缺计划》。2011年干旱数据驱动方法研讨会。论文 9。访问日期：2025年1月31日：http://docs.lib.purdue.edu/ddad2011/9 美国农业部（1988）。《印第安纳州农业统计》—1988年。访问日期：2025年1月31日：https://www.nass.usda.gov/Statistics by State/Indiana/Publications/Annual Statistical Bulletin/hist pdf /as 1988 ebook.pdf 美国地质调查局 [USGS]。（1992）。《1988年干旱对印第安纳州地下水位、径流和水库水位的描述及影响》。访问日期：2025年1月31日：_ _ https://pubs.usgs.gov/wri/wri914100/pdf/wrir_91- 4100 a.pdf 美国地质调查局 [USGS]。（2005）。《北卡罗来纳州1998—2002年干旱——降水与水文状况》。访问日期：2025年1月31日：https://pubs.usgs.gov/sir/2005/5053/pdf/SIR2005-5053.pdf Veissi`ere, S. P. L., Constant, A., Ramstead, M. J. D., Friston, K. J., and Kirmayer, L. J. (2020). 跨越他心思考：认知与文化的变分方法。 *The Behavioral and Brain Sciences*, 43, e90.

Votteler, T. H. (2023).《水畔携手：爱德华兹含水层长达57年的争端如何开始、延续并得到解决》。 *Water*, 15, 1835。水研究基金会。（2013）。定义并提升多用途、多水库供水的安全产量。访问日期：2025年1月31日：
h
ttps://
www.waterrf.org/research/projects/defining-and-enhancing-safe-yield-multi-use-multi-reservoir-water-supply WBTV 3。（2011）。夏洛特—梅克伦堡公用事业机构启动灌溉激励计划。访问日期：2025年1月31日：
https://www.wbtv.com/story /
15361888/charlotte-mecklenburg-utilities-launches-irrigation-incentive-program/ Wiechman, A., Alonso Vicario, S., Anderies, J. M., Garcia, M., Azizi, K., and Hornberger, G. (2024). 制度动态对城市社会—水文系统应对供水挑战的影响。 *WaterResources Research*, 60(2):e2023WR035565.

Wiechman, A., Vicario, S.A., and Koebele, E. A.（2024年）。多中心环境治理中中间协作论坛的作用。 *Journal of Public Administration Research and Theory*, 34, 196–210。Williams, J. H., Jones, R. A., Haley, B., Kwok, G., Hargreaves, J., Farbes, J., and Torn, M. S.（2021年）。美国的碳中和路径。 *AGUAdvances*, 2。Yao, L., Libera, D. A., Kheimi, M., Sankarasubramanian, A., and Wang, D.（2020）。气候强迫及其变异性在日、月、年和长期尺度上对径流的作用。 *Water ResourcesResearch*, 56(7):e2020WR027111。Young, O. R.（2002年）。 *The institutional dimensions ofenvironmental change: fit, interplay, and scale.*麻省理工学院出版社。

附录

A：案例特征

表5。 案例特征概要

City	公用事业	公用事业类型	% 地表水	% 地下水
亚特兰大，佐治亚州	流域管理部	市政供水公用事业	100	0
波士顿，马萨诸塞州	波士顿水务与污水处理委员会	市政供水公用事业	100	0
北卡罗来纳州夏洛特	夏洛特水务	市政供水公用事业	100	0
密歇根州底特律	底特律供水与污水处理局	市政供水公用事业	100	0
哈里斯堡，宾夕法尼亚州	Capital Region Water	专门用途单位地方政府的	100	0
哈特福德，康涅狄格州	大都会区委员会	市政公司	100	0
印第安纳波利斯，印第安纳州	Citizens Energy	公共信托	84	16
杰克逊维尔，佛罗里达州	杰克逊维尔电力局	社区所有的公用事业	0	100
孟菲斯，田纳西州	孟菲斯照明、燃气与供水	市政供水公用事业	0	100
菲尼克斯，亚利桑那州	菲尼克斯市供水服务局	市政供水公用事业	97	3
普罗维登斯，罗得岛州	普罗维登斯水务	市政供水公用事业，自筹资金	100	0
萨克拉门托，加利福尼亚州	公用事业部水务处	市政供水公用事业	80	20
圣安东尼奥，得克萨斯州	投资者所有的公用事业	90	10	
圣何塞，加利福尼亚州	圣何塞水务	投资者所有的公用事业	50	50
圣罗莎，加利福尼亚州	水务部门	市政供水公用事业	93	7
俄亥俄州托莱多	公共事业部	市政供水公用事业	100	0
华盛顿特区	DC Water	独立管理机构的特区政府	100	0

B：响应编码方法

由于在研究期间观察到明确的响应，因此将1988年发生的两起危机事件（波士顿和印第安纳波利斯的干旱）纳入数据集。事件按照事件类别（主管机构、基础设施、水源、融资、费率、政策、保护和教育）以及治理层级（公用事业、地方、州或国家）进行编码。十六座城市共记录了488起独立事件，其中包括32起危机事件。其中一座城市——普罗维登斯，罗得岛州——未发现任何危机。

数据分析的下一步是审查每次危机事件发生后的10年内的事件，以识别并编码响应行动。每项危机事件响应均按及时性、响应类别、治理层级和有效性进行编码。及时性分为三类：及时（0—2年内响应）、中等（3—5年）和延迟（5—10年）。如果未发现危机事件发生后10年内采取任何响应行动，则将该危机事件编码为无响应。上述事件类别和治理层级均适用，并且在两种情况下都记录所有适用的代码（例如，规划与基础设施、地方和州级）。响应的有效性根据随后10年内是否发生由相似类型和规模的扰动引发的后续危机进行评估。如果危机事件发生至今尚未满10年，则将有效性编码为未知。

C：案例叙述

INDIANAPOLIS

印第安纳波利斯的供水与管理

目前由 Citizens Energy Group 运营的印第安纳波利斯大都会区供水系统，为该地区超过 800,000 名用户提供服务（Citizens Energy Group 2025a）。供水量约有 60% 来自怀特河，另有 15% 来自福尔溪、9% 来自伊格尔溪、12% 来自地下水，4% 则向邻近供水商购买（Citizens EnergyGroup 2013）。印第安纳波利斯地处湿润地区，正常条件下水源充足，但仍会周期性遭遇季节性干旱，影响供水运营。在州级层面，印第安纳州目前没有强制性的干旱或节水规划要求。不过，印第安纳州已制定并实施一项自愿性的水资源节约与效率计划（即为公用事业机构提供节水规划框架）（IDNR 2025）。

1988年干旱危机与应对

1988年春季和夏季，印第安纳州全州降水低于平均水平、气温高于平均水平，导致全州发生干旱，其中也包括印第安纳波利斯市的供水流域（USGS 1992）。图6显示，为公民能源公司提供关键供水的盖斯特水库入库径流，根据标准化径流指数（SSI）测量，处于干旱状态。干旱通过径流量和地下水位下降直接影响市政供水，也通过农业用水需求增加间接造成影响（美国农业部 1998；USGS 1992）。

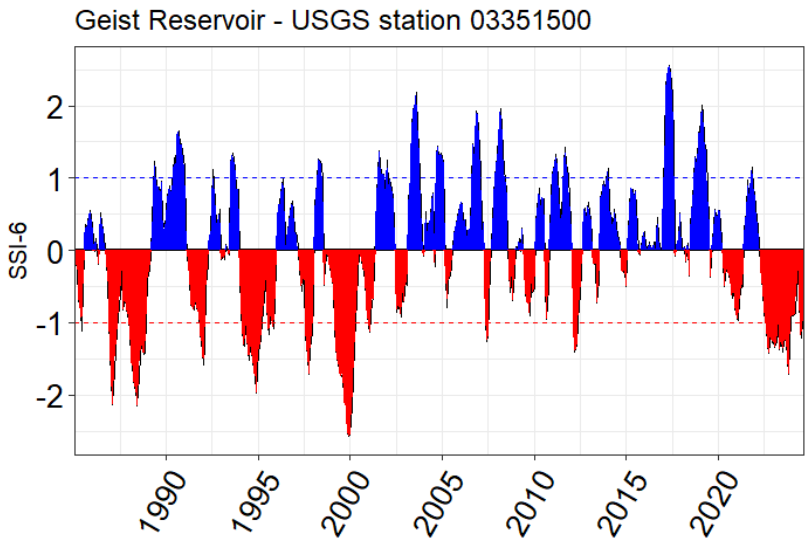

图 6。标准化径流指数（SSI）用于衡量特定地点在特定平均时段内径流相对于正常水平的偏离程度（Modarres R）。此处采用 6 个月的平均时段，展示盖斯特水库流域从 1985年至2024年底的 SSI。红色填充表示低于平均水平的时段，蓝色填充表示高于平均水平的时段。低于 -1 的数值被视为干旱。

虽然没有关于城市层面响应的记录，但1988年干旱确实促使州层面采取了行动。1991年，印第安纳州议会通过了HB 1260，要求印第安纳州水资源部制定一份缺水计划（Unterreiner 2011）。该州的第一份缺水计划于1994年完成。1989年至1991年，在计划完成之前，印第安纳波利斯供水公司（IWC，即该市的供水机构）新建了三座水处理厂，处理来自水井区和怀特河的水。这些水处理厂虽在干旱发生前就已开始建设，但确实提升了供水能力，从而增强了应对干旱的鲁棒性。2006年，《印第安纳州法典》设立了州缺水特别工作组。该工作组审查并更新了缺水计划，还为该州制定了其他资源，例如《印第安纳州建议示范条例》

(下级 iner 2011；IDNR2007）。更新后的州缺水计划于200 9.

管理变革与合规挑战

1997年，北印第安纳公共服务公司（NIPSCO）收购了IWC。然而，仍负责管理该公用事业机构的是印第安纳波利斯供水公司。2000年，NIPSCO接到命令，须从IWC撤资；2002年，印第安纳波利斯市从IWC手中购入了该公用事业机构。

2006年，美国环境保护署起诉印第安纳波利斯市，指控其因合流制溢流而违反《清洁水法》。该同意令分别于2009年和2010年进行了两次修订，修改了近一半的合流制溢流措施（Citizens Energy Group2025b）。虽然这并未直接影响干旱响应或鲁棒性，但遵守该同意令需要投入大量人员和金融资源，从而降低了处理其他问题的能力。2011年，该市将供水和污水处理公用事业出售给Citizens Energy Group（CEG），一家非营利性公共信托机构。2012年，CEG启动了DigIndy隧道系统，以减少合流制溢流并继续遵守同意令；该同意令后来第三次修订，以说明公用事业从该市移交给CEG的情况。Citizens Water于2014年将其服务区域扩展至韦斯特菲尔德，并建造了Harbour水处理厂，用于处理来自Harbour水井区的水。自CEG接管供水系统运营以来，供水和污水费率已多次上调（例如在2014年、2016年、2017年和2019年）；与同意令合规相关的支出被列为费率上调的主要驱动因素（IndianaOffice ofUtility Consumer Counselor 2025）。2012年干旱危机与应对

2012年春季和夏季，低于平均水平的降水量和高于平均水平的温度导致印第安纳波利斯供水系统出现干旱（Citizens Energy Group2013；美国国家海洋和大气管理局 2012年）。尤其是，2012年6月，印第安纳波利斯机场观测到有记录以来最低的降水量，SSI也达到自2000年以来的最低值（图6）。由于夏季极端高温，2012年6月和7月的用水需求增至历史最高水平（Ballard 2012年）。为应对不断下降的水库水位，城市先后采取了自愿和强制性节水措施，使用水需求暂时减少了三分之一（Ballard 2012年）。用水需求的下降以及降雨的恢复，最终结束了干旱引发的供水危机。

在眼前的干旱危机缓解后，CEG和印第安纳州均采取措施，以降低未来干旱对供水影响的风险。CEG于2013年发布了自己的干旱管理计划（Citizens Energy Group 2013），并于2015年宣布建设一座新水库，以增加储水设施（Delany 2015年）。这座名为Citizens水库的水库于2020年投入运行（Citizens Energy Group 2025c）。2012年初，在干旱迹象尚未显现之前，州议会废除了此前成立的州缺水工作组，因此该工作组未参与干旱响应。然而，印第安纳州于2015年发布了州缺水计划的另一项更新（IDNR 2015）。

CHARLOTTE

夏洛特的供水与管理

夏洛特水务是北卡罗来纳州规模最大的公共供水与污水处理公用事业，为夏洛特市及整个梅克伦堡县大区的逾一百万名用户提供服务（夏洛特水务 2025a）。服务范围包括夏洛特市以及 Matthews、明特希尔、派恩维尔、亨特斯维尔、戴维森和科尼利厄斯等城镇。夏洛特水务是由夏洛特市运营的公用事业，自 1899 年起投入运营（McNeely2023）。其主要水源为卡托巴-沃特里河流域，取水口设在诺曼湖和芒廷艾兰湖（夏洛特水务 2025b）。夏洛特水务受北卡罗来纳州环境管理委员会和北卡罗来纳州环境质量部监管。

尽管夏洛特相对湿润（属无干季的温带气候，Peel 等（2007）），仍须应对干旱，并面临用水需求增长和降雨变率带来的挑战。近年来降水量高于平均水平（图 7，2018—2022年），但从历史来看，夏洛特曾遭遇多次干旱。例如，造成严重影响的 1911年事件，当时必需通过铁路运水，并促使当地建设更可靠的卡托巴河供水泵系统，同时在芒廷艾兰湖修建更大的水库（夏洛特水务 2023）；此外，近期三个持续性干旱期——2002年、2008年和2012年——在图 7的标准化降水指数中清晰可见。

2002年干旱危机与应对

1998—2002年干旱期间，北卡罗来纳州部分地区的降水亏缺，是自开始系统收集气象数据以来有记录以来最大的之一。这场持续4年的干旱造成了广泛的

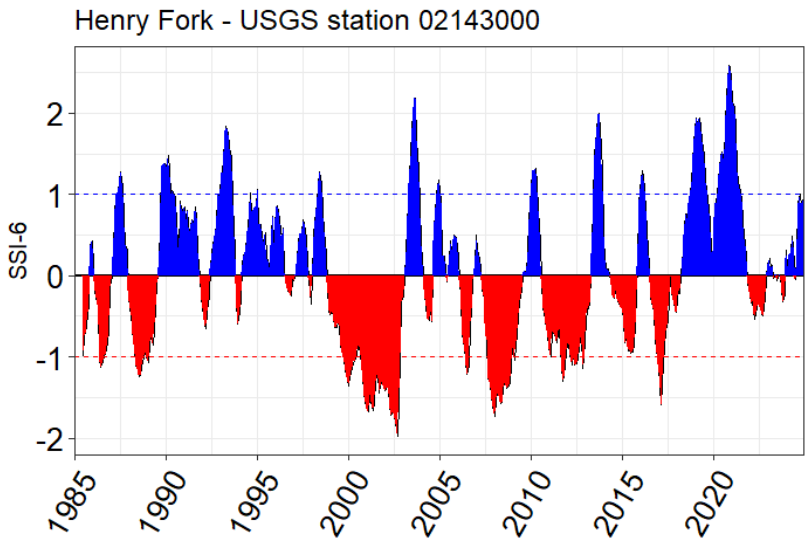

图7。1985年至2024年底，诺曼水库上游亨利福克河的6个月平均窗口标准化降水指数（SSI）。红色填充表示低于平均水平的时期，蓝色填充表示高于平均水平的时期。低于 -1 的数值视为干旱。

困难和经济损失；到2002年年底，200多个市政当局采取了某种形式的自愿、强制或紧急节水措施。北卡罗来纳州各地的水库水位达到或接近历史最低水平，因此必须谨慎调度，以平衡上游和下游用水者的需求（USGS 2005）。

作为回应，州议会通过了2002-167号会议法，后编入第143-355.1号州法，赋予干旱管理咨询委员会（DMAC）法定权限，使其能够依据技术数据发布客观的干旱状况通报，并根据该州不同地区的具体条件制定通报（干旱管理咨询委员会 2025）。这项立法还要求环境管理委员会制定并实施有关干旱期间供水规划、保护和再利用的规则。不久之后，杜克能源卡托巴-沃特里水电项目重新许可所需的2006年供水研究完成，其中评估了截至2058年流域未来用水量的预测，并指出该地区供水可持续性面临的潜在挑战。此举促成了卡托巴-沃特里水管理组（CWWMG）于2006年成立。CWWMG是一家非营利机构，负责通过制定供水总体规划，确定、资助和管理相关项目，在满足人类需求的同时平衡水资源并维护河流的生态健康（CWWMG 2014）。其成果之一是制定低流入协议（LIP），为2006年卡托巴-沃特里流域低流入期间减少用水确立程序，该协议由卡托巴-沃特里干旱管理咨询组（DMAG）实施（CWWMG2014）。

2008年和2012年干旱危机及应对措施

2008年和2012年的干旱持续推动了干旱管理投资的发展，这些投资建立在卡托巴-沃特里水管理组、卡托巴-沃特里干旱管理咨询组和 LIP 的基础之上。相关举措包括智能灌溉计划，该计划鼓励用户为灌溉系统配备经批准的先进设备，以减少用水需求并控制径流（WBTV 3 2011年；夏洛特水务 2025c），以及在 Envision Charlotte 能源计划的基础上开展工作。该计划与当地利益相关方合作，解决水资源可持续利用这一复杂问题。夏洛特水务加入该项目，着力解决用水和供水问题，最终目标是大幅减少用水量（Envision Charlotte，2018年）。夏洛特-梅克伦堡公用事业公司继续参与有关可持续水资源管理的合作研究。例如，开展了《2013年多用途、多水库供水安全产水量的定义与提升研究》调查；该调查与美国东南部研究相结合，有助于制定确保供水安全产量的策略（水研究基金会 2013年）。卡托巴-沃特里水管理组于2014年实现了制定供水总体规划的任务。该规划着重于

在保护、保存和..... 扩大卡托巴-沃特里河及其11座水库的可用供水量 .

制度动态概要

夏洛特水务持续积极开展节水工作，并致力于尽量减少用水和浪费（Frost2025）。LIP 和缺水管理计划（制定于 2003 年，随后更新了 5 次）仍是管理干旱状况的核心工具。LIP 采用分级反馈控制机制（分为 5 个阶段，从 “ 关注 ” 到“紧急状态”），以便根据水资源供应情况减少用水。近期节水领域的创新包括：夏洛特水务与水技术公司 Xylem 以及当地啤酒厂 Town Brewing 合作，利用经过深度处理的污水处理厂出水酿造啤酒（“Renew Brew”）（QC Water 2025）。CLTWater 也制定了完善的资本投资计划。

HARRISBURG

哈里斯堡的供水与管理

哈里斯堡都市区的供水目前由 Capital Region Water 运营，为哈里斯堡市及多芬县的市政当局，包括彭布鲁克自治市镇的部分地区和周边四个乡镇的 60,000 多名居民和企业提供服务（CapitalRegion Water 2025a）。主要水源是德哈特水库，距哈里斯堡约 20 英里，由克拉克溪供水；萨斯奎哈纳河则是应急情况下可用的备用水源（Capital Region Water 2025b）。哈里斯堡位于湿润地区，正常情况下水资源充足，但仍会周期性遭遇季节性干旱，可能影响供水可用性。在州层面，没有强制性的干旱或节水规划要求；然而，根据 1981 年通过、并于 1991 年和 2001 年修订的法规，如果州长发布公告，宣布进入与干旱相关的州紧急状态，宾夕法尼亚州便要求供水公用事业单位实施节水措施。

干旱危机与响应

自1990年以来，宾夕法尼亚州曾宣布三次全州干旱紧急状态，并直接影响多芬县，分别发生于1991年7月至1992年4月、1999年7月至9月，以及2002年2月至11月（宾夕法尼亚州环境保护部 2025）。图8 显示，流入萨斯奎哈纳河的径流——这条流经哈里斯堡并作为应急水源的河流——在上述每个干旱紧急状态期间，根据标准化径流指数（SSI）测定均处于干旱状态。每个时期都出现了持续较长时间的流量减少。州长办公室宣布的每次干旱紧急状态都呼吁居民节约用水，并要求在已宣布干旱紧急状态的县运营的供水公用事业单位采取旨在节约用水的措施。这些强制性要求主要包括减少户外浇水（例如浇灌草坪、运动场、户外花园和高尔夫球场，清洗铺装路面、洗车等）（宾夕法尼亚州联邦政府 未注明日期）。以下段落将讨论每个干旱时期结束后采取的具体行动。

管理变革与合规挑战A

尽管哈里斯堡市上一次宣布紧急干旱是在2002年，但持续存在的合规与管理挑战促成了多项地方举措，提升了系统应对干旱及其他环境挑战的鲁棒性。2013年8月，哈里斯堡市通过了哈里斯堡强劲计划，提出了财政复苏的具体措施，其中包括对该市的供水、雨洪和污水系统进行重大重组（哈里斯堡市 2013）。2013年末，这些系统的运营控制权和所有权移交给了 Capital Region Water（CRW）——一个独立的市政管理机构——使其能够独立管理基础设施升级、遵守环境法规并重新进入资本市场（Raftelis 2025）。

接管后，CRW采取了多项措施，旨在改善管理并升级基础设施，包括于2013年采用地理信息系统（GIS）资产管理计划（GeoDecisions2024），以及于2014年提高水费（Capital RegionWater 2014）。2015年，CRW与美国环境保护署和宾夕法尼亚州环境保护部（PDEP）签署了部分同意令，以处理违反《清洁水法》和《宾夕法尼亚州清洁水流法》的行为（U.S. vs CapitalRegion Water 2015）。该法令

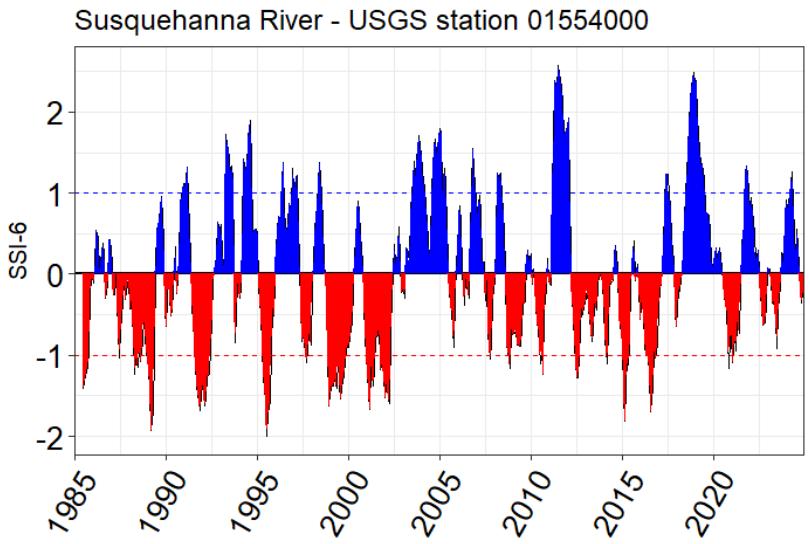

图8。 1985年至2024年底期间，萨斯奎哈纳河SSI的6个月平均窗口。红色填充表示低于平均水平的时期，蓝色填充表示高于平均水平的时期。低于-1的值被视为干旱。1991年干旱后，1994年有两个新的基础设施项目投入运行，包括萨斯奎哈纳河泵站和罗伯特·E·杨博士供水服务中心（水过滤厂）。当德哈特水库的流量较低时，泵站用于从萨斯奎哈纳河取水（Capital Region Water 2021a）。这两项举措共同提高了城市的水资源管理和输配能力。

要求CRW减少合流制溢流，消除污水系统基础设施中的严重缺陷，并制定长期控制计划，其中包括考虑采用绿色基础设施解决方案。

随后，CRW于2015年启动了针对德哈特水库和萨斯奎哈纳河的水源保护计划（CapitalRegion Water2015a），称为美丽城市 H20（Capital Region Water 2025d），并采取了多项符合该法令要求的行动，包括建设新的高级污水处理设施（Capital RegionWater 2015b）、于2016年批准通过地役权保护其8200英亩德哈特土地的协议（Capital Region Water 2016），以及于2017年通过社区绿化计划（该计划重点改善城市雨洪基础设施）（Capital RegionWater2017）。美丽城市 H20规划于2018年完成；为资助新的基础设施升级，2018年至2024年期间通过了七项费用和费率上调（水、污水和雨洪）（Binda 2018；Capital RegionWater 2024、2020a、b、2021b；Miller2017；Raftelis 2019）。2024年，CRW通过了一项更新美丽城市 H20的计划，以进一步增强社区基础设施的鲁棒性（Capital Region Water 2024）；更新水表的新举措也正在推进中（CapitalRegionWater 2025c）。