# 岛屿生态系统服务与气候变化中的不确定性

Nazli Demirel[1]*、Ioannis N. Vogiatzakis[2,3], 、George Zittis[4], 、Mirela Tase[5], 、Attila D. Sandor[6,7,8], 、Savvas Zotos[2], 、Christos Zoumides[9], 、Turgay Dindaroglu[10], 、Mauro Fois[11], 、Irene Christoforidi[12], 、Valentini Stamatiadou[13], 、Shiri Zemah-Shamir[14], 、Tamer Albayrak[15], 、Cigdem Kaptan Ayhan[16], 、Paraskevi Manolaki[17],、Ina Sieber[18], 、Ziv Zemah-Shamir[19], 、Elli Tzirkalli[2], 、Aristides Moustakas[20,21]

[1]伊斯坦布尔大学海洋科学与管理研究所，土耳其伊斯坦布尔 34820 [2]塞浦路斯开放大学纯科学与应用科学学院，塞浦路斯尼科西亚 [3]巴里阿尔多·莫罗大学土壤、植物与食品科学系，意大利 [4]塞浦路斯研究所气候与大气研究中心（CARE-C），塞浦路斯尼科西亚 [5]亚历山大·莫伊修大学旅游系，阿尔巴尼亚都拉斯 [6] HUN-REN-UVMB气候变化：新型吸血寄生虫与媒介传播病原体研究组，匈牙利布达佩斯[7]兽医大学寄生虫学与动物学系，匈牙利布达佩斯 [8]巴贝什-博雅伊大学ISTAR-UBB研究所，罗马尼亚克卢日-纳波卡 [9]塞浦路斯研究所能源、环境与水研究中心（EEWRC），塞浦路斯尼科西亚 [10]卡拉德尼兹技术大学森林工程系，土耳其特拉布宗 [11]卡利亚里大学生命与环境科学系，意大利卡利亚里 [12]希腊地中海大学农业系，希腊伊拉克利翁 [13]爱琴海大学海洋科学系，希腊米蒂利尼 [14]赖希曼大学可持续发展学院、跨学科中心（IDC），以色列赫兹利亚 [15]九月九日大学生物学系，土耳其伊兹密尔 [16]恰纳卡莱十八马尔特大学景观建筑系，土耳其恰纳卡莱[17]奥胡斯大学生物学系，丹麦奥胡斯 C，8000 [18]莱布尼茨大学自然地理与景观生态学研究所，德国汉诺威 [19]海法大学莱昂·H·查尼海洋科学学院海洋生物学系，以色列海法 [20]爱琴海大学产品与系统设计工程系，希腊锡罗斯 84100 [21]克里特大学克里特自然历史博物馆，希腊伊拉克利翁

*通讯作者：ndemirel@istanbul.edu.tr

摘要

中小型岛屿极易受到气候变化和生态系统退化的影响，但在针对其生态系统服务的科学评估中，不确定性在多大程度上得到系统处理，目前仍缺乏充分认识。本研究重新审视了从两项关于岛屿生态系统服务与气候变化的全球系统综述中选取的 226 篇同行评审论文，并采用结构化事后分析，评估各研究如何处理不同方法、服务类别、生态系统领域和决策情境中的不确定性。研究根据不确定性是否得到明确分析、仅被提及或遭到忽略进行分类。只有 30% 的研究明确纳入了不确定性，而超过半数的研究完全未予处理。基于情景的方法主导了不确定性评估，而概率框架和集合框架的应用仍然有限。文化生态系统服务和极端气候影响的不确定性整合程度最低，且只有少数研究将不确定性的处理与政策相关的决策框架联系起来。在岛屿系统中，对不确定性处理薄弱或完全缺失已成为一项结构性挑战；狭窄的生态阈值、强烈的陆海耦合、有限的空间缓冲区和较低的制度冗余，会放大在知识不完全的情况下进行决策所带来的后果。系统绘制不确定性的界定、操作化或忽略方式，有助于揭示持续存在的方法论和概念差距，并为加强未来以岛屿为重点的生态系统服务与气候评估中的不确定性整合提供切实方向。在建模实践、参与式过程和政策工具中更充分地纳入不确定性，对于提升岛屿社会—生态系统的科学可信度、治理相关性和适应能力至关重要。

关键词：中小型岛屿、岛屿韧性、生态系统服务、气候变化、决策

## 1. 引言

岛屿日益被视为理解并应对可持续发展挑战的前沿系统。其生物物理隔离、丰富的特有生物多样性、紧密的社会—生态依存关系，以及面临的叠加环境风险，使其成为开展生态系统服务（ES）研究的独特实验室（Balzan et al., 2018；Vogiatzakis et al., 2023）。与此同时，岛屿承受着日益加剧的气候变化（CC）压力，包括海平面上升、海洋酸化和极端天气事件；此外，土地利用变化、旅游业、污染和人口变化等非气候驱动因素也带来压力（Zittis et al., 2025；Moustakas et al., 2025）。这些相互交织的挑战，对生态系统服务评估的稳健性、实用性和政策相关性提出了非同寻常的要求。

过去十年来，生态系统服务框架日益应用于支持岛屿可持续发展战略，为保护、适应和发展规划提供指导。然而，这种日益增强的政策应用往往受到重大不确定性的阻碍。不确定性的主要来源包括生态知识缺口、时空分辨率不足、利益相关者参与有限、数据匮乏以及方法不一致（Hooftman 等，2022）。尽管集合建模、概率技术和基于情景的方法等方法学进展为应对不确定性提供了有力工具，但这些方法在以岛屿为重点的研究中仍未得到充分应用（Baustert 等，2018；Willcock 等，2023）。鉴于许多岛屿系统具有较高的生态敏感性和治理复杂性，缺乏稳健的不确定性处理可能会限制生态系统服务评估的科学价值和实际效用。这些挑战在小型偏远岛屿上尤为突出：监测基础设施不足、利益相关者难以接触，以及对定性或基于认知的数据的依赖（尤其是在文化服务和关系型服务方面），都进一步加大了表征和管理不确定性的难度（政府间气候变化专门委员会，2022；Walther 等，2025）。此外，分类体系的多样性

也会带来额外的不一致：生态系统服务评估中使用的分类体系，包括国际生态系统服务通用分类（CICES，v5.1）、生态系统与生态系统服务制图与评估（MAES）和生态系统和生物多样性经济学（TEEB）等框架，可能导致人们对不确定性的解读和报告方式进一步不一致（Haines-Young 和 Potschin-Young，2018）。

近期的系统综述显著推进了对基于岛屿的生态系统服务评估的理解，尤其是在气候变化背景下的压力因素、响应措施和适应策略方面（Zittis 等, 2025年; Moustakas et al., 2025）。尽管已采用透明的筛选方案和一致的生态系统服务分类方法，以综合不同岛屿情境中的实证证据，但这些综述并未专门评估这些评估本身如何处理不确定性。这一缺口意义重大，尤其是在生态系统服务科学力求在加速的全球变化中提升其预测能力和决策相关性之际。尽管生态系统服务评估与气候评估日益增多，岛屿情境中对不确定性的系统性处理仍呈碎片化且理论化不足。本文通过提供一项综述后的分类，梳理以岛屿为重点的研究中各生态系统服务类别如何处理不确定性的证据缺口，从而推动方法创新。通过重新审视现有的系统性证据基础，我们超越描述性综合，揭示反复出现的方法学盲点、被忽视的不确定性维度，以及与政策转化之间的薄弱联系。该方法不仅识别当前方法表现不足之处，也为构建更具情境敏感性的框架奠定基础，从而提升岛屿生态系统服务评估与气候评估的可信度、透明度和决策相关性。

本文对前述两篇综述中的226篇同行评审论文进行了结构化事后分析。我们的目的是评估岛屿上生态系统服务与气候变化的实证研究如何考量不确定性。具体而言，我们考察：（i）是否以及如何在方法上处理不确定性；（ii）报告了哪些类型和来源的不确定性；（iii）不确定性是否被纳入决策过程或干预设计。我们还分析了不确定性处理在生态系统服务类别、生态系统类型、气候驱动因素和研究设计之间的差异。通过这一分析，我们旨在识别结构性模式，突出关键缺口，并提出推进以岛屿为重点的生态系统服务研究的方法学方向。

## 2. 材料与方法

本研究基于此前发表的两篇系统综述（Zittis et al., 2025；Moustakas et al., 2025），这两篇综述考察了基于岛屿的生态系统服务评估如何应对与气候驱动因素和非气候驱动因素相关的压力因素与响应措施。在此，我们对这些综述的实证子集进行了结构化事后再分析，重点关注与岛屿相关的生态系统服务和气候变化研究中如何处理不确定性。

岛屿被视为相互耦合的社会—生态系统，具有地理隔离、空间范围有限以及显著的陆海连通性。实际操作中，我们采用《联合国海洋法公约》（UNCLOS，1982年）确立的岛屿定义：岛屿是自然形成、四面环水、高潮时仍露出水面的陆地区域，并能够维持人类居住或经济生活。排除湖泊或河流中的内陆岛屿，也排除无法维持稳定生态系统或社会经济系统的露出水面的岩礁。除法律定义外，岛屿还是高度异质的系统，在面积、偏远程度、地貌、气候暴露度、生物多样性组成和社会经济结构方面差异显著，导致不同地区的生态系统功能、脆弱性和适应能力呈现鲜明的多样性。近期关于岛屿生态系统服务和气候影响的全球综合研究充分记录了这种异质性，并指出全球各地岛屿系统之间存在显著的地理、生态和社会经济差异（Zittis et al., 2025; Moustakas et al., 2025）。因此，纳入分析的岛屿涵盖了

广泛的类型，从低矮的小型珊瑚环礁和火山海洋岛屿，到大型大陆岛和复杂的群岛。

本分析聚焦于探讨岛屿情境中生态系统服务与气候变化的同行评审科学文章。初步文献检索使用了以下布尔运算符：（—ecosystem service*‖ OR —ecosystem good*‖）AND（climate* NEAR chang*）AND（island* OR islet* OR archipelag*），并在Scopus和ISI Web of Science 核心合集中作为主题检索应用。最终检索于2024年9月进行，涵盖截至2023年12月的出版物。检索范围限于原创研究、研究简报和综述；未纳入特定生态系统服务术语（例如—农作物‖、—渔业‖），以避免过度筛选。采用PRISMA方法剔除重复项、非同行评审及无法获取的条目（Page等人，2021年；Haddaway等人，2022年）。未聚焦于岛屿的研究，或术语“island”指代其他概念（例如“城市热岛”）的研究均被排除。该过程最终得到226篇与气候相关压力下岛屿及生态系统服务相关的文章（见图1）。

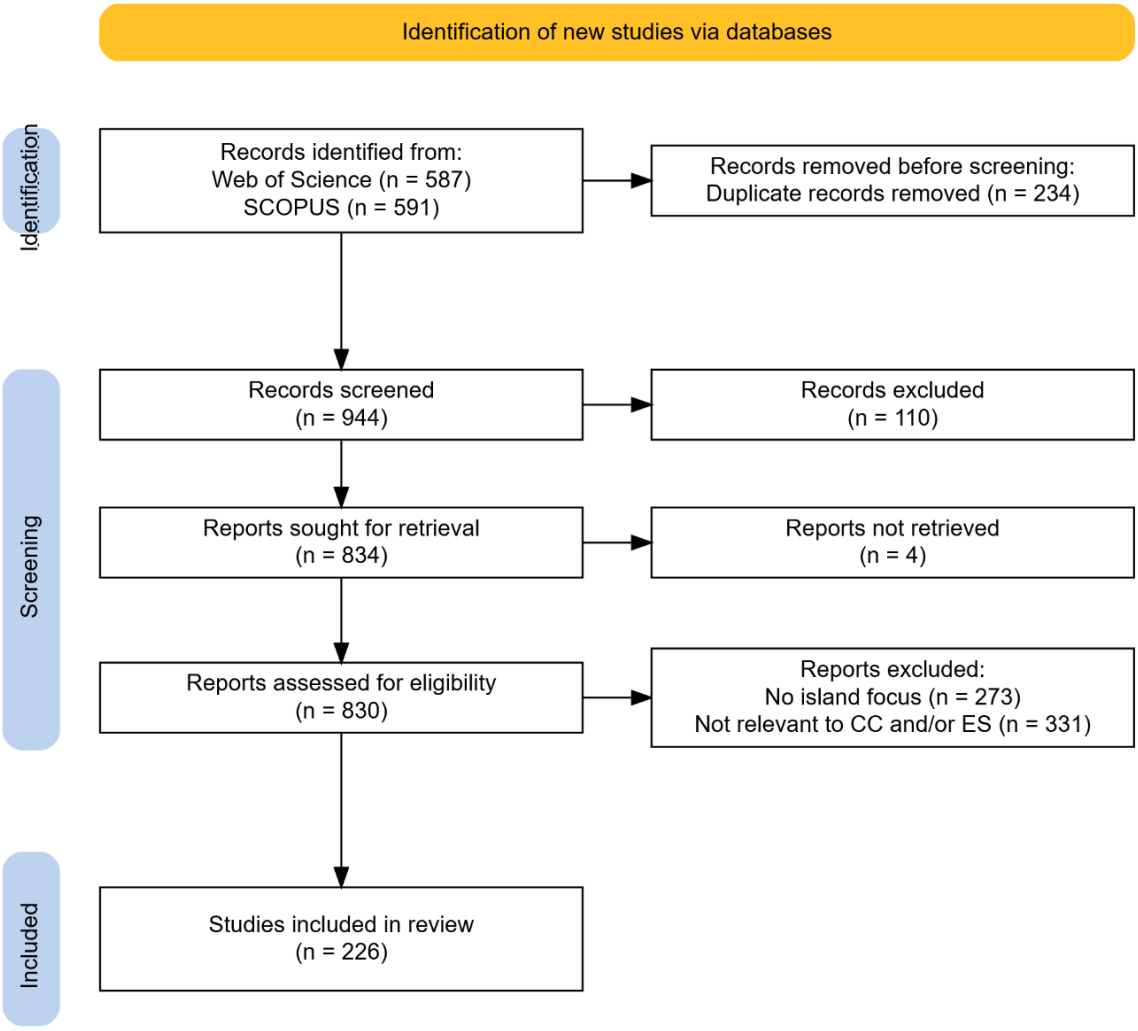


图1. 系统性文献综述的工作流程，遵循 PRISMA 方法，为事后不确定性分析奠定实证基础。

随后对每篇文章就其不确定性处理方式进行审阅和分类，采用改编自近期以不确定性为重点的综述的三层类型学（表1）；这些综述强调生态系统服务研究中的透明度与方法严谨性（Hamel和Bryant，2017；Bryant等人，2018；Walther 等，2025）。分类基于结构化内容分析，将明确术语与对方法选择、分析程序和报告实践的解释性评估相结合，而非仅依据是否出现术语—不确定性‖。研究被归类为:

- 明确地：直接量化、建模或通过概率分析、基于敏感性的分析、集成分析或基于情景的方法，系统地分析了不确定性；• 仅提及：仅以叙述或概念方式承认不确定性，未进行正式的分析处理；• 忽略：未明确提及不确定性，且研究设计和报告方式不足以推断是否对不确定性进行了处理。

随后开展描述性分析，以考察不确定性的处理方式在以下方面的差异（表1）：生态系统服务类别（供给、调节、文化、支持）；气候变化影响（例如海平面上升、温度升高、极端事件）；生态系统领域（陆地、海洋或耦合系统）；以及根据世界海洋（包括地中海）划分的地理位置。研究绘制了图表，以直观呈现主导方法、时间轨迹和主题分组。

表 1. 分析中使用的变量和取值列表。

| 变量 | 取值 |
|---|---|
| 不确定性考量 | 明确地<br>仅提及<br>忽略 |
| 研究类型 | 气候变化影响<br>生态系统服务评估 |
| 生态系统类型 | 陆地<br>海洋<br>淡水 |
| 不确定性方法 | 统计<br>情景<br>多个模型 |
| 生态系统服务评估 | 生态系统服务：食物供给<br>生态系统服务：原材料<br>生态系统服务：淡水<br>生态系统服务：药用资源<br>生态系统服务：气候调节<br>生态系统服务：碳封存<br>生态系统服务：废水处理<br>生态系统服务：土壤<br>生态系统服务：授粉/生物防治<br>生态系统服务：休闲/旅游<br>生态系统服务：审美欣赏<br>生态系统服务：精神/文化 |
| 气候变化影响 | 气候变化：温度<br>气候变化：降水<br>气候变化：海平面上升<br>气候变化：海洋酸化<br>气候变化：极值 |

| | 气候变化：其他 |
|---|---|
| 决策 | 已考虑<br>仅提及<br>None |
| 影响评估 | 适应性管理<br>成本效益分析 |

对于明确地处理不确定性的研究子集，进一步开展了主题编码。研究对方法论路径进行了分析，并将其分为三大类：（i）情景分析，包括探索性情景分析或规范性情景分析；（ii）多模型框架，包括敏感性检验或结构比较；以及（iii）统计技术，例如概率估计或置信区间的使用（表1）。研究还关注不确定性是否与决策或干预规划相关联。因此，研究被分类为：明确地将不确定性与决策支持相联系（例如通过成本—效益分析或适应性管理）；在干预措施背景下提及不确定性，但未将其纳入方法论整合；或未建立不确定性与干预措施之间的任何联系。最后，研究记录了经济估值或适应性管理框架在指导政策相关性方面的使用情况，遵循文献中的既有做法（Refsgaard 等，2007；Walther 等，2025）。

为考察岛屿生态系统服务与气候变化研究中不确定性处理方式的时间变化模式，我们采用了二元逻辑回归模型。分别分析了两个二元结果：（i）研究是否完全忽略了不确定性；（ii）研究是否明确纳入了不确定性。将发表年份作为连续预测变量，并进行均值中心化，以提高数值稳定性。针对每个结果拟合了两种模型设定。首先，采用仅包含年份的模型，以复现简单的时间趋势分析。其次，拟合调整后的多变量模型，以考虑研究之间的主要结构差异。调整后的模型纳入了研究类型（仅生态系统服务评估、仅气候变化影响、生态系统服务 + 气候变化的组合，或两者皆非）、生态系统领域（陆地、海洋、淡水；采用非互斥的二元指标）以及大致地理区域（太平洋、大西洋、印度洋、地中海、极地或全球），这些信息根据所报告的评估海域确定。

通过似然比（LR）$\chi 2$ 检验（将拟合模型与零模型〔仅含截距〕进行比较）评估模型表现，并比较仅包含年份的模型与调整后模型的赤池信息准则（AIC）值。结果以预测概率及其 95% 置信区间呈现，以便解读时间轨迹。本分析旨在进行描述；发表年份被视为时间排序变量，而非因果驱动因素。

## 3. 结果

在经审查的 226 项研究中，68 项（30%）明确地考虑了不确定性，37 项（16%）仅提及不确定性，121 项（54%）则忽略了不确定性（图 2A）。按生态系统类型来看，聚焦海洋系统的研究中，明确考虑不确定性的论文数量最多。陆地研究中被归类为忽略不确定性的论文数量最多，而淡水研究在这三类中的分布则较为均匀（图 2B）。按研究类型分类后发现，气候变化影响研究和生态系统服务评估均涵盖了属于全部三类不确定性的论文。明确考虑不确定性的生态系统服务评估略多一些，但在这两组中，忽略不确定性的研究占比最大（图 2C）。在评估生态系统服务的 154 项研究中，食物供给、原材料、淡水和气候调节最常见于明确考虑不确定性的论文。精神与文化服务、审美欣赏以及休闲与旅游则主要见于忽略或仅提及不确定性的研究。

授粉、土壤相关服务和废水处理在各类别中的分布更为多元（图 2D）。在气候变化影响研究子集中（n = 154），温度和降水最常见于明确考虑不确定性的研究。海平面上升、海洋酸化和极端事件则主要与仅提及或忽略不确定性的研究相关。“其他”类别中，被归为忽略不确定性的研究数量最多（图 2E）。按海洋和海域分类时，来自太平洋和大西洋的研究在全部三类不确定性中均占论文数量最多。在这两个区域，忽略不确定性的研究数量都超过了明确考虑不确定性的研究，尤其是太平洋（忽略 49 项，明确考虑 29 项）和大西洋（忽略 28 项，明确考虑 20 项）。印度洋中被归类为忽略不确定性的研究（10 项）也多于明确考虑不确定性的研究（6 项）。相比之下，地中海研究在各类别中的分布较为均衡，而极地（北极和南极）及全球尺度研究的发表数量相对较少（图 2F）。

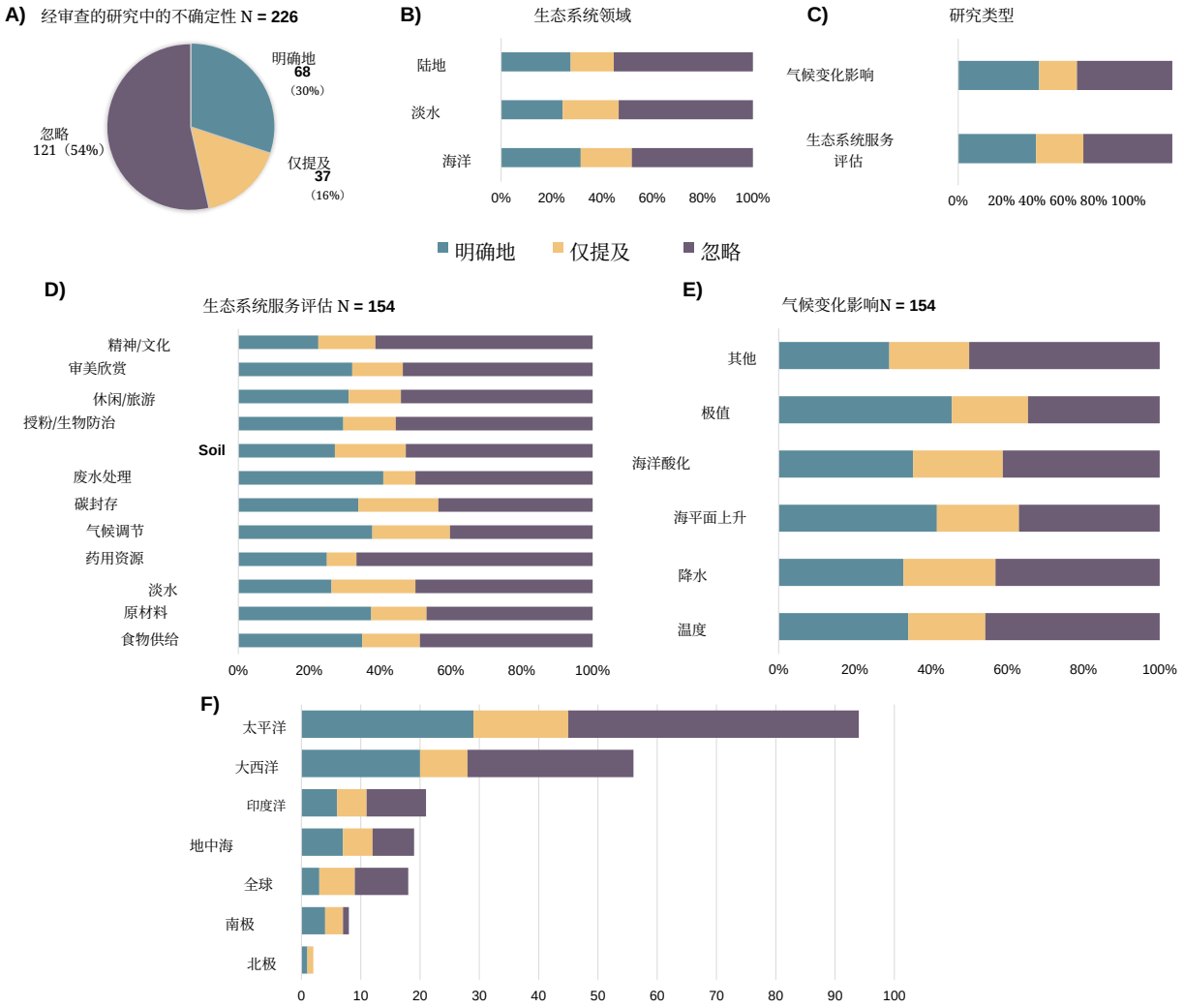


图2. 根据是否明确考量、仅提及或忽略不确定性，对不确定性考量进行分类：(A) 在所评述的226篇论文中；(B) 按生态系统类型划分；(C) 按研究类型划分；(D) 按不同生态系统服务领域划分（n = 154）；(E) 按不同气候变化影响类别划分（n = 154）；(F) 根据海洋划分的评估地点，包括地中海。

在明确考虑不确定性的68项研究中，最常采用的方法是基于情景的方法（45%），其次是统计方法（35%）和多模型方法（20%）（图3A）。在同时涉及决策或干预措施的研究中（n = 54），无论决策是被考虑、仅提及还是未涉及，最常采用的都是情景方法。在未讨论决策和干预措施的研究中，统计方法更为常见；而多个模型在所有类别中的使用频率都较低（图3B）。在评估干预措施影响的46项研究中，采用适应性管理的研究最常使用基于情景的方法。相比之下，成本效益分析中更常使用统计方法。多个模型在这两种情况下均有应用，但总体上仍是使用最少的方法（图3C）。在56项生态系统服务评估中，基于情景的方法常用于关注供给和调节服务的研究，例如食物供给、原材料、淡水、气候调节和碳封存。统计方法在文化服务、授粉与生物防治、土壤和废水处理的评估中更为常见。多个模型应用于多个生态系统服务领域，但频率较低（图3D）。在气候变化影响研究中（n = 62），情景最常用于评估温度、降水和海平面上升。统计方法更多用于海洋酸化、极端事件及其他类别。多个模型在所有类别中均有应用，但使用仍有限（图3E）。

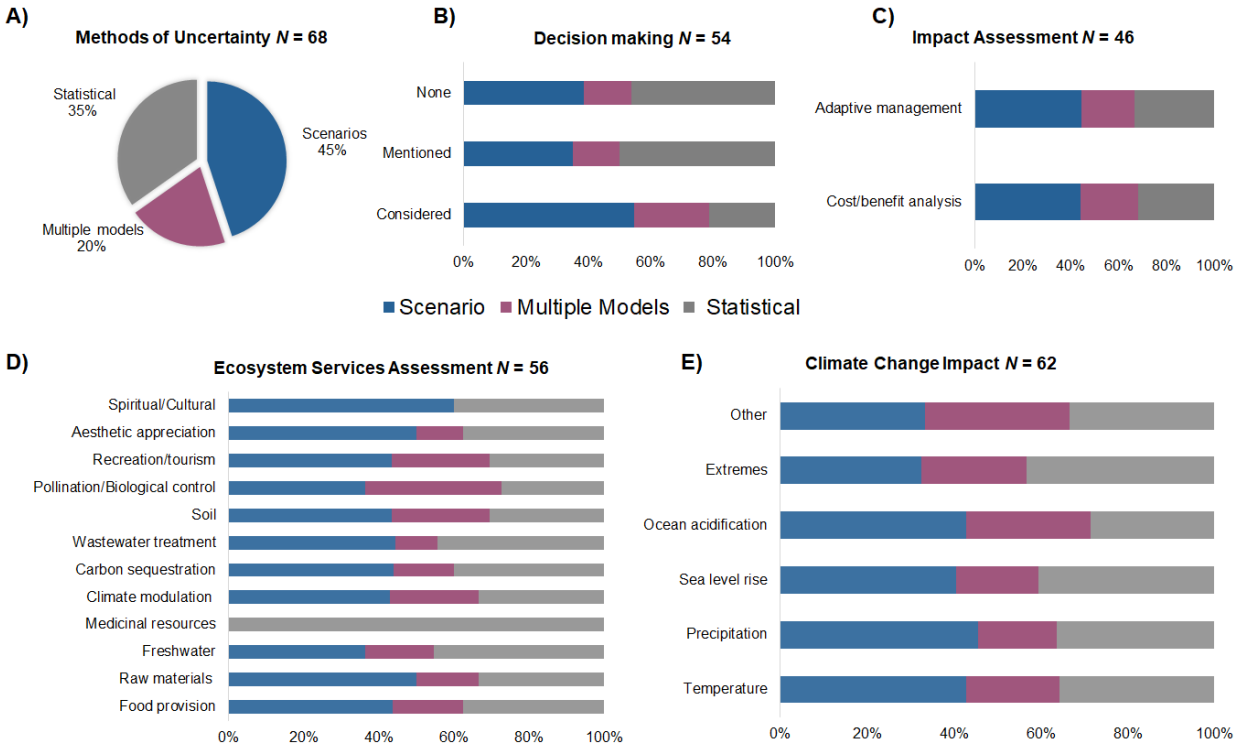


图3. 明确考虑不确定性的研究中不确定性评估方法的分布：(A) 总体所用方法（n = 68），(B) 按决策和干预措施是被考虑、仅提及还是未涉及（n = 54），(C) 按影响评估方法类型（n = 46），(D) 跨不同生态系统服务（n = 56），以及 (E) 跨不同气候变化影响类别（n = 62）。

研究中忽略不确定性的概率随时间略有下降（图4a）。在仅包含年份的模型中，纳入发表年份后，相较于零模型，模型拟合度略有改善（LR $\chi 2$ = 3.04，p = 0.081），表明时间上存在较弱的下降趋势。然而，在

控制研究类型、生态系统领域和地理区域后，时间效应进一步减弱，且仍未达到显著水平（LR $\chi 2 = 12.76$, $p = 0.078$）。信息准则比较表明，从仅包含年份的模型转为调整后模型，并未改善整体模型拟合度（AIC = 309.1 vs. 311.4），这说明不确定性遗漏的差异在很大程度上由研究特征而非单独由发表年份所解释。相比之下，明确纳入不确定性并未呈现时间趋势（图

4 $\chi$ = b）。仅包

0 07, = 0 798

含年份的模型与零模型没有差异（LR 2 . p . ），表明没有证据显示明确处理不确定性的情况随时间增加。在调整后模型中，相较于零模型，整体模型拟合度有所改善（LR $\chi 2 = 14.72$，$p = 0.040$），反映了研究类型、生态系统领域和地理区域的影响。然而，发表年份本身仍不显著，且与仅包含年份的模型相比，调整后模型的信息准则仅有边际改善（AIC = 277.7 vs. 280.4）。

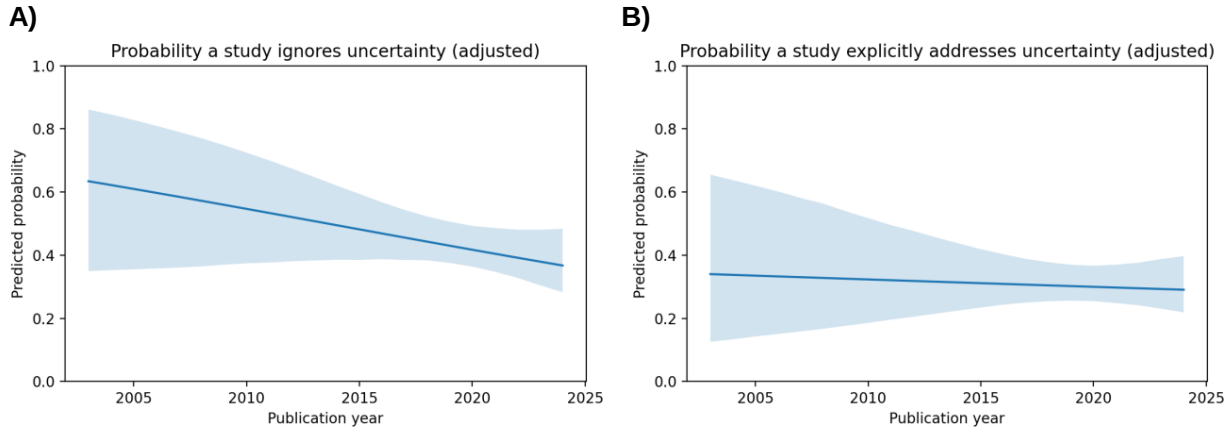


图4. 基于调整后的二元逻辑回归，岛屿生态系统服务与气候变化研究中不确定性处理方式的时间趋势。(A) 研究忽略不确定性的预测概率；(B) 研究明确地纳入不确定性的预测概率，均按发表年份绘制。预测结果源自多变量模型；模型纳入发表年份，同时考虑研究类型、生态系统领域和地理区域的差异。实线表示基于模型的预测概率，阴影带表示95%置信区间。发表年份被视为时间排序变量，而非因果驱动因素。

## 4. 讨论

以岛屿为重点的生态系统服务与气候变化研究对不确定性的处理并不均衡，这揭示了科学建模与实际决策之间长期存在的张力，尤其是在数据有限且生态特征鲜明的情境下。尽管方法学取得了进展，例如情景规划、集合

尽管建模和概率技术日益普及，但经审查的研究中，提供有实质意义的不确定性方法学处理的还不到一半。这进一步印证了文献中提出的担忧：忽略不确定性或仅对其进行表面处理的评估，可能会损害可信度并降低政策相关性；在高度敏感且快速变化的地理区域，这一问题尤为突出（Refsgaard 等，2007；Cash 等，2003；Walther 等，2025）。虽然基于情景的方法应用最为频繁，但其用途往往局限于探索性前瞻，较少结合概率建模、模型比较或敏感性检验。这些发现与早期关于生态系统服务建模的综述相符（Runting 等，2017；Baustert 等，2018），并继续引发人们对相关评估之稳健性和可解释性的担忧，因为这些评估旨在为小岛屿情境下的可持续性转型提供依据。时间分析进一步表明，这些模式并非主要由发表年份单独驱动。在考虑研究类型、生态系统领域和地理区域的差异后，研究忽略不确定性的倾向有所减弱

但未发现对不确定性进行明确方法学处理的情况呈现系统性增加。这表明，尽管对不确定性的认知在表述层面可能有所提升，但其在实践中的整合仍不均衡，且主要受研究的结构特征和关注重点影响，而非单纯随时间推移而变化。

岛屿系统面临着独特且往往相互叠加的不确定性来源，包括狭窄的生态基线、陡峭的陆海梯度、对气候驱动影响的高度暴露，以及较低的制度冗余。这些条件会放大在科学分析和政策决策中淡化或忽视不确定性所造成的后果。尽管如此，只有少数研究承认，将全球模型或大陆假设应用于岛屿环境可能存在局限；在这些环境中，生态与社会阈值可能更快被突破，适应能力也更弱（Snell et al., 2018; Moustakas et al., 2025）。一些研究纳入了海平面上升、降水变率或海洋酸化等气候敏感变量，但很少报告置信区间，或探讨不确定性如何在生态系统服务估算中传递。此外，尽管极端事件动态对海岸与海洋系统的影响日益显著，对其纳入仍然有限，这凸显出风险评估实践与岛屿治理的空间和时间现实之间仍存在差距（Zittis et al., 2025; Hernández-Delgado, 2024）。综上，与大陆环境相比，在岛屿系统中，基于未获承认或特征描述不足的不确定性开展决策，可能造成不成比例的巨大生态和社会后果。有限的空间缓冲区限制了风险转移的机会，狭窄的生态阈值提高了快速发生体制转变的可能性，而强烈的陆海耦合则促进扰动在不同生态系统组分间传播。与此同时，较低的制度冗余和治理能力制约了适应性响应措施，加剧了不当适应的代价。从这个意义上说，岛屿的不确定性不仅仅是技术层面的建模挑战，更是脆弱性的核心结构性维度，直接影响韧性、可持续发展轨迹和政策风险。

在岛屿情境中，不同生态系统服务类别的不确定性表述呈现出差异化模式。供给和调节服务，尤其是与渔业、淡水可获得性和碳储存相关的服务，较常伴有明确的不确定性评估，最常见的方式是情景建模或多基线分析。相比之下，文化服务和较难量化的调节服务（如精神价值、地方感和景观美学）很少采用任何结构化的不确定性框架。这一模式反映了生态系统服务评估中普遍存在的偏向：非物质或关系性价值往往代表不足；而将不确定性完全排除在外，则会进一步加剧这种不足。在岛屿情境中，文化遗产、传统海洋产权和精神层面对于生态系统的价值认知与利用至关重要；若缺少对不确定性的表述，地方优先事项在管理和空间规划过程中可能因此遭到边缘化（Solé Figueras et al., 2024; Bennett et al., 2024）。

岛屿特征预计会影响生态系统服务的组成，以及不确定性的产生和传达方式。岛屿面积、偏远程度、暴露状况和社会经济条件的差异，会显著影响哪些生态系统服务在生计、治理重点和脆弱性特征中占主导地位，同时也会限制数据可用性以及开展精细尺度建模的可行性（Balzan et al., 2018; Vogiatzakis et al., 2023）。尺度相关问题尤其难以解决，因为各项研究的空间覆盖范围差异很大，从部分陆地或海洋区域到整座岛屿不等；而案例研究中的表面积相差数个数量级，限制了可比性和泛化（Snell et al., 2018）。较小且更偏远的岛屿往往依赖粗分辨率的气候与生态系统数据集，无法捕捉局地变率；与偏远程度相关的后勤限制也造成了持续存在的地理研究空白（Moustakas et al., 2025; Zittis et al., 2025）。因此，在我们的事后再分析中，与岛屿

特征相关的变异性只能通过能够在各项研究中一致提取的描述指标间接反映出来，包括生态系统领域（陆地、海洋、淡水）、生态系统服务类别、气候驱动因素类型，以及按海域进行的区域汇总。

尽管数据集中频繁提及利益相关者观点和参与式方法，但它们实际上融入不确定性评估的程度有限。共同构建的建模框架、迭代式规划流程，以及围绕数据和模型局限开展的结构化审议，均明显缺失。这在岛屿环境中尤为值得关注，因为生活经验、传统知识和社区治理体系在环境守护中发挥着核心作用（Balzan et al., 2018; Kenter et al., 2011）。若缺乏阐明偏好不确定性、制度约束或基于价值的权衡的机制，情景分析就有可能脱离决策的现实情况。这与新近研究证据一致：利益相关者对驱动因素和影响的认知，包括对土地利用与气候变化所作的区分，可能影响生态系统服务结果的界定方式（Moustakas 等 2026）。尽管不确定性评估参与式方法（如置信度制图、多准则分析或利益相关者引导的参数测试）有望提升建模输出的相关性和可信度，但这些方法仍很少得到应用（Latour 与 van Laerhoven, 2024; Galaitsi 等, 2024）。

在政策相关工具中将岛屿的不确定性转化为可操作的内容，在已审阅的文献中仍然较为薄弱。尽管有些文献提及适应性管理框架，但纳入正式机制、用于评估不确定性下权衡、稳健性或机会成本的研究寥寥无几。更少有研究将不确定性与可执行的决策联系起来，例如确定保护阈值、排列恢复方案的优先顺序，或评估岛屿基础设施投资风险。对于小岛屿而言，这一点尤其令人担忧，因为空间限制、路径依赖和有限的制度能力，会使政策失误更难纠正（Watson 等人，2021年；Minderhoud 等人，2025年）。此外，可持续性模型中采用的全球阈值，例如气温上升2°C或海平面上升0.5米，可能对岛屿系统产生截然不同的影响。此类预测中即使存在相对较小的不确定性，也可能改变适应、迁移或不作为之间的权衡，并对生态系统与人类安全产生长期影响（Katz 等人，2013年；Benavides Rios 等人，2024年）。

本综述补充了 Zittis 等（2025年）和 Moustakas 等（2025年）近期开展的岛屿专项系统综述；这些综述考察了更广泛地理区域内气候与生态系统建模中的不确定性。另一方面，我们的贡献在于系统梳理岛屿情境下不同生态系统服务类型如何应对或忽视不确定性，并揭示在更大尺度评估中仍被掩盖的模式。通过对方法、主题和政策关联进行分类，本综述发现了持续存在的缺口：尤其是文化服务中缺乏对不确定性的阐释、参与式方法运用不足，以及基于情景的估值研究在方法上的不透明性。不过，仍须承认本综述存在若干局限。本综述仅关注英文同行评审文献，因此可能未能充分涵盖地方性知识、灰色文献或以区域语言发表的见解。此外，本研究仍属于定性综合。尽管主题模式一致且具有意义，但我们不对定量效应量或统计可推广性作出任何判断。重要的是，本综述受到其数据集所依据的原始系统综述范围的影响（Zittis et al., 2025; Moustakas et al., 2025）。这些综述清楚表明，同行评审的岛屿研究在地理分布上仍不均衡，研究高度集中于有限的若干区域，尤其是太平洋和部分大西洋海盆；与此同时，许多小型、偏远的岛屿国家以及发展中岛屿国家仍鲜少得到研究。这种结构性不对称反映了科研基础设施、资金获取和出版能力方面更广泛的差距，而非气候相关影响或生态系统转变的缺失。此外，这些来源研究并未系统追踪不确定性如何在各建模组件中传递，也未区分

认知不确定性与随机不确定性；这些局限也制约了我们的重新分析。因此，输入数据质量、情景一致性或模型结构有效性等维度不在本次综合的范围之内。未来研究可通过纳入多语种检索、灰色文献综述和结构化专家 elicitation，弥补这些缺口，从而更好地体现地方嵌入式知识和实践者主导的创新。

总体而言，我们的研究结果凸显了在岛屿情境下的气候和生态系统服务评估中，将不确定性视为核心特征所具有的科学与伦理重要性。不确定性在不同方法、服务类型和地理区域中的整合既零散又不一致，限制了这些研究的可解释性和实际效用。本综述通过梳理不确定性在岛屿评估中的界定、量化和操作化方式，推动了该领域的发展，并为制定更契合情境、更具参与性且更稳健的评估框架奠定了基础。对于具有独特社会—生态耦合特征且面临全球变化更高风险的小岛屿而言，将不确定性纳入评估设计、情景建模和利益相关方参与，并非仅仅是方法论上的要求，更是构建公正、适应性强且持久的可持续发展路径的关键。

## 5. 结论与建议

对于岛屿而言，应对不确定性不仅是对方法的改进，更是实现可信、公正且具备适应能力的可持续发展路径的先决条件。本综述表明，尽管理论上人们普遍承认不确定性，但其在生态系统服务类别和决策框架中的操作化仍不均衡。为增强稳健性和政策相关性，我们建议未来研究与实践采取以下进一步措施：

1. 应通过将集合方法与概率方法适配于数据匮乏和质量约束普遍存在的情境，制定针对岛屿的评估框架，包括采用针对岛屿条件定制的简化或混合建模技术。2. 必须通过将地方知识与传统知识系统地纳入不确定性评估来强化参与式机制，运用共同开发的模型、参与式情景开发，以及对数据和模型局限性开展结构化审议。3. 应拓展对文化生态系统服务的处理方式，将不确定性框架嵌入对关系性价值与非物质价值的评估之中，并承认其在岛屿生计、身份认同和治理体系中的关键作用。4. 应在政策工具中更直接地将不确定性加以操作化，将其明确地与空间分区、修复优先排序和气候适应策略相关的决策联系起来，以确保评估能够支撑可执行成果。5. 应将专为岛屿情境、尤其是小型偏远岛屿设计的岛屿类型学、统一的空间元数据，以及降尺度的气候与生态系统服务数据集，纳入未来的气候变化与生态系统服务评估。6. 需要加大对区域数据基础设施和能力建设的投入，包括建设协作型数据枢纽、开放获取知识库和培训计划，以增强岛屿机构有效管理、解读和沟通不确定性的能力。

岛屿情境下的生态系统服务和气候评估需要更加透明、可信，并能直接为政策制定者和社区所用。归根结底，纳入不确定性不仅是技术上的必要之举，也是一项伦理要求，以确保在风险和资源受限的条件下作出的决策能够支持生态系统和社会的长期韧性。

致谢

本研究由 COST 行动 SMILES（CA21158）资助：通过保障生态系统服务的可持续性，增强中小岛屿韧性。

参考文献

Balzan, M.V., Marion, P.-Y. & and Haines-Young, R. (2018) 岛屿生态系统服务：关于案例研究中岛屿生态系统服务的文献综述及未来展望。International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management, 14, 71-90. Baustert, P., Othoniel, B., Rugani, B., Leopold, U. (2018). 综合环境模型中生态系统服务评估的不确定性分析：框架、挑战与不足。Ecosystem Services, 33, 110–123. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.08.007 Benavides Rios, E., Sadler, J., Graham, L. & Matthews, T.J. (2024) 物种分布模型与岛屿生物地理学：挑战与展望。Global Ecology and Conservation, 51, e02943. Bennett, M., March, A. & Failler, P. (2024) 加勒比海岛国渔业和水产养殖行业的蓝色经济融资解决方案。Fishes, 9, 305. Bryant, B.P., Borsuk, M.E., Hamel, P., Oleson, K.L.L., Schulp, C.J.E., Willcock, S. (2018). 透明且可行的不确定性评估可为应用生态系统服务建模增值。Ecosystem Services, 33, 103–109. https://doi.org/10.1016/j. ecoser.2018.09.001 Cash, D. W., Clark, W. C., Alcock, F., Dickson, N. M., Eckley, N., Guston, D. H., Jäger, J., Mitchell, R.B. (2003). 可持续发展的知识系统。Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 100(14), 8086–8091. https://doi.org/10.1073/pnas.1231332100 Galaitsi, S.E., Corbin, C., Cox, S.A., Joseph, G., McConney, P., Cashman, A., Springer, C., Keenan, J., Cummings, C.L., Trump, B.D. & Linkov, I. (2024) 平衡加勒比小岛屿发展中国家的气候韧性与适应：建设制度能力。Integrated Environmental Assessment and Management, 20, 1237-1255. Haddaway, N. R., Page, M. J., Pritchard, C. C., & McGuinness, L. A. (2022). PRISMA2020：用于生成符合 PRISMA 2020 标准的流程图的 R 软件包和 Shiny 应用程序，支持交互功能，以优化数字透明度和开放综合。《坎贝尔系统综述》, 18, e1230. https://doi.org/10.1002/cl2.1230 Hamel, P., Bryant, B. P. (2017). 生态系统服务分析中的不确定性评估：七项挑战与务实应对措施。Ecosystem Services, 24, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.12.008 Hernández-Delgado, E.A. (2024) 海平面上升和气候变化背景下小岛屿发展中国家海岸修复面临的挑战与策略。Coasts, 4, 235-286. Hooftman, D.A.P., Bullock, J.M., Jones, L., Eigenbrod, F., Barredo, J.I., Forrest, M., Kindermann, G., Thomas, A., Willcock, S. (2022). 通过加权集成减少生态系统服务建模中的不确定性。Ecosystem Services, 53, 101398. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101398 政府间气候变化专门委员会 (2022). 决策者摘要。载于：Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A., Rama, (编), 《2022 年气候变化：影响、适应与脆弱性》。政府间气候变化专门委员会第二工作组对第六次评估报告的贡献。剑桥大学出版社，剑桥，英国及纽约，纽约州，美国，页码 3–33 https://doi.org/10.1017/9781009325844.001. Katz, R., Craigmile, P., Guttorp, P., Haran, M., Sansó B., Stein, M.L. (2013). 气候变化评估中的不确定性分析。《自然·气候变化》, 3, 769–771 (2013). https://doi.org/10.1038/nclimate1980 Kenter, J.O., Hyde, T., Christie, M. & Fazey, I. (2011) 发展中国家生态系统服务价值评估中审议的重要性——来自所罗门群岛的证据。《全球环境变化》, 21, 505-521。

Latour, M. & van Laerhoven, F. (2024) 边界组织工作的新视角：在太平洋小岛屿发展中国家的海洋保护行动者之间搭建知识桥梁。Environmental Science & Policy, 162, 103903. Minderhoud, P.S.J., Shirzaei, M. & Teatini, P. (2025) 从 InSAR 派生的地面沉降到相对海平面上升——呼吁严谨研究。Earth's Future, 13, e2024EF005539. Moustakas, A., Zemah-Shamir, S., Tase, M., Zotos, S., Demirel, N., Zoumides, C., Christoforidi, I., Dindaroglu, T., Albayrak, T., Ayhan, C.K., Fois, M., Manolaki, P., Sandor, A.D., Sieber, I., Stamatiadou, V., Tzirkalli, E., Vogiatzakis, I.N., Zemah-Shamir, Z. & Zittis, G. (2025) 气候、土地利用及其他驱动因素对岛屿生态系统服务的影响：全球综述。Science of The Total Environment, 973, 179147. Moustakas, A., Christoforidi, I., Zittis, G., Demirel, N., et al. (2026). 土地利用—气候变化—生物多样性关联在欧洲岛屿利益相关者认知中的体现。Environmental Impact Assessment Review, 117, 108199. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.108199 Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D., Shamseer, L., Tetzlaff, J.M., Akl, E.A., Brennan, S.E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J.M., Hróbjartsson, A., Lalu, M.M., Li, T., Loder, E.W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L.A., Stewart, L.A., Thomas, J., Tricco, A.C., Welch, V.A., Whiting, P. & Moher, D. (2021) PRISMA 2020 声明：系统综述报告指南的更新。BMJ, 372, n71. Refsgaard, J. C., van der Sluijs, J. P., Højberg, A.L., Vanrolleghem, P.A. (2007). 环境建模过程中的不确定性：框架与指导。Environmental Modelling & Software, 22(11), 1543–1556. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.02.004 Runting, R.K., Bryan, B.A., Dee, L.E., Maseyk, F.J.F., (...) Rhodes, J.R. (2017). 将气候变化纳入生态系统服务评估与决策：综述。Global Change Biology, 23:28–41. https://doi.org/10.1111/gcb.13457 Snell, R.S., Elkin, C., Kotlarski, S., Bugmann, H. (2018). 气候不确定性对森林生态系统服务预测的重要性。Regional Environmental Change, 18:2145-2159. https://doi.org/10.1007/s10113-018-1337-3 Solé Figueras, L., Zandt, E.I., Buschbaum, C. & Meunier, C.L. (2024) 多种人为驱动因素的影响在海洋生态系统服务研究中是如何考量的？系统性文献综述。Journal of Applied Ecology, Vogiatzakis, I. N., Balzan, M. V., Drakou, E. G., Katsanevakis, S., (...) Manolaki, P. (2023). 通过保障生态系统服务的可持续性，增强中小岛屿的韧性：SMILES COST行动。Research Ideas and Outcomes, 9, e116061. https://doi.org/10.3897/rio.9.e116061 Walther, F., Barton, D.N., Schwaab, J., Kato-Huerta, J. (...), Grêt-Regamey, A. (2025). 生态系统服务评估中的不确定性及其对决策支持的影响——半系统性文献综述。Ecosystem Services, 73:101714. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2025.101714 Watson, C.S., Legresy, B. & King, M.A. (2021) 验证全球平均海平面气候记录所涉及的不确定性。Advances in Space Research, 68, 487-495. Willcock, S., Hooftman, D.A.P., Neugarten, R.A., Chaplin-Kramer, R. (...) Bullock J.M. (2023). 生态系统服务模型集合弥补全球确定性和能力方面的缺口。Science Advances 9(14): eadf5492. https://doi.org/10.1126/sciadv.adf5492 Zittis, G., Zoumides, C., Zemah-Shamir, S., Tase, M., Zotos, S., Demirel N., Christoforidi, I., Dindaroglu, T., Albayrak, T., Kaptan Ayhan, C., Fois, M., Manolaki, P., Sandor, A., Sieber, I., Stamatiadou, V., Tzirkalli, E., Vogiatzakis, I., Zemah-Shamir, Z., Moustakas, A. (2025). 岌岌可危的海岛生态系统服务：气候变化及其他驱动因素影响的系统综述。《气候变化》, 178:127. https://doi.org/10.1007/s10584-025-03961-0