生态防灾减灾研究重点领域和前沿趋势*

戴代新 李林勃 薄茗洋

同济大学建筑与城市规划学院 上海 200092

摘要：气候变化背景下城市面临的极端天气与灾害风险愈发突出，生态防灾减灾（Eco-DRR）是适应极端气候的重要途径，国内研究较为欠缺。文章以“生态防灾减灾”为主题，基于 Web of Science 核心合集（2007—2024 年）英文文献，运用 CiteSpace 分析 Eco-DRR 研究态势，系统梳理国际 Eco-DRR 研究概况与发展脉络，明晰重点领域和前沿趋势。结果表明：当前研究聚焦于灾害风险评估、减灾性能评估与实践、经济成本分析与资金运营机制、环境与人类福祉综合效益 4 大重点领域；前沿方向包括拓展灾害类型与应用区域、多重效益评估及新兴技术融合。未来研究应立足于韧性安全的视角，从现实需求出发，积极应用人工智能技术，深入探索 Eco-DRR 的理论框架及可持续实施路径，并推动其与国土空间防灾减灾规划技术体系深度融合。

关键词：生态防灾减灾；文献综述；计量分析；CiteSpace

DOI：10.12169/zgcsly.2025.07.14.0002

Key Areas and Frontier Trends in Ecosystem-based Disaster Risk Reduction

Dai Daixin Li Linbo Bo Mingyang

(College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Against the backdrop of climate change, cities face increasing risks of extreme weather events and disasters. Ecosystem-based disaster risk reduction (Eco-DRR) serves as a critical pathway to climate change adaptation, and yet the research in this area remains relatively scarce in China. Based on English literature in 2007-2024 from the Web of Science Core Collection, this study conducts a bibliometric analysis of current international Eco-DRR research and maps the research trend using CiteSpace, thereby identifying the key areas and frontier trend of Eco-DRR research. Key findings show that the current Eco-DRR research focuses on disaster risk assessment, mitigation performance evaluation and practice, economic cost analysis and funding mechanisms, and integrated environmental/human well-being benefits. Emerging frontiers include hazard and regional scope expansion, multi-benefit evaluation, and integration with emerging technologies. Future research should put the focus on the reality from a resilience and safety perspective to apply artificial intelligence technologies and investigate theoretical framework and sustainable implementation pathways of Eco-DRR. Additionally, efforts should be taken to advance its integration with technical systems for spatial planning of disaster risk reduction.

Keywords: ecosystem-based disaster risk reduction (Eco-DRR); literature review; bibliometric analysis; CiteSpace

收稿日期：2025-07-14

* 基金项目：2025 年度国家外国专家个人类项目（G2022133024L）

第一作者：戴代新（1975-），博士，副教授，研究方向为景观规划与生态修复、风景园林遗产保护。E-mail：daidaixin@tongji.edu.cn

通信作者：薄茗洋（1998-），博士生，研究方向为风景园林规划设计与生态防灾减灾。E-mail：2410362@tongji.edu.cn

气候变化及频发的极端天气事件已对全球自然生态系统和人类社会造成广泛负面影响。基于自然的解决方案（Nature-based Solutions，NbS）是风景园林适应气候变化与复杂气候风险的重要途径[1-2]。生态防灾减灾（Ecosystem-based Disaster Risk Reduction，Eco-DRR）通过整合 NbS 和灾害风险减少（DRR），被定义为“通过生态系统的可持续管理、保护和恢复，以减少灾害风险，促进可持续韧性发展”[3]，可以综合生态系统管理、灾害风险管理、适应气候变化与人居发展规划 4 大核心能力。我国多项规划文件、行动方案亦明确强调生态系统在防灾减灾中的重要作用。当前国土空间规划中防灾体系仍存在过度依赖传统工程手段，系统性适应能力不足等局限。Eco-DRR 凭借其前置性、多功能性和多尺度特征可有效弥补现有规划短板，适用于自然灾害风险评估、减灾方案实施及后效监测等场景，能够为构建韧性安全导向的国土空间防灾减灾规划体系提供理论支撑。尽管 Eco-DRR 提升气候韧性的价值已成国际共识，且理论研究日趋成熟，其本土化应用仍面临多重挑战：在国土空间规划的指标体系构建、空间布局优化、实施管理等环节存在障碍，尚未系统应用于应对气候变化与极端灾害[4-5]。国际实践表明，弥合 Eco-DRR 理论与实践的鸿沟仍需深入研究[6-7]。因此，系统梳理国际 Eco-DRR 研究概况与发展脉络，明晰重点领域和前沿趋势，将有助于推动我国在该领域的理论创新与规划实践探索。

于 2024 年 6 月 12 日在 Web of Science 核心合集数据库中用主题=（“disaster risk reduction”）AND 主题=（“ecosystem”OR“Nature-based”）AND 出版年=（2005—2024）AND 文献类型=（Article）AND 语言=（English）为组合进行高级检索，最早的相关研究文献发表于 2007；使用 CiteSpace 去重删除后获取得到英文文献共计 341 篇，使用 CiteSpace V6. 3. R1 软件对 2007—2024 年发表的 341 篇文献进行多维度计量分析。

1　Eco-DRR 研究文献概况

1. 1　时间分布

Eco-DRR 领域研究发文量总体呈现增长趋势（图 1），这与国际社会对气候变化及极端灾害风险关注度的持续提升密切相关。2008 年前后，Eco-DRR 因其减少灾害风险并增强适应力的能力被认为是气候变化适应的重要议题。2015 年第三次联合国世界减少灾害风险大会上通过的《2015—2030 年仙台减少灾害风险框架》明确提到，各国应加强生态系统的可持续利用和管理，实施包含减少灾害风险内容的措施以提高抗灾能力。

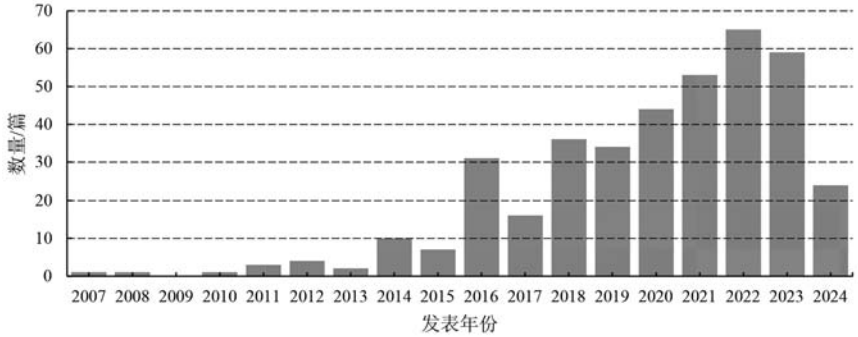


图 1　生态防灾减灾英文文献数量的时间分布

1. 2　区域分布合作情况

基于 CiteSpace 的国家/地区共现分析（表 1）显示，美国（16%）、日本（14%）、德国（13%）、中国（12%）、英国（10%）占据发文量前 5 位。进一步通过中介中心性测度学术影响力发现，美国（>0. 2）、中国（0. 19）、英国、德国、印度、日本构成核心枢纽网络，其中美国中心性最高，表明其学者在 Eco-DRR 领域具有最强的国际学术桥梁作用。

表 1　生态防灾减灾研究国家分布

序号	数量/篇	中心性	国家
1	54	0. 23	美国
2	49	0. 12	日本
3	46	0. 13	德国

表 1（续）

序号	数量/篇	中心性	国家
4	42	0.19	中国
5	35	0.19	英国
6	27	0.15	印度
7	26	0.06	意大利
8	24	0.06	澳大利亚
9	24	0.08	挪威
10	21	0.10	南非
11	21	0.09	瑞士
12	17	0.01	巴西

美国学者在沿海地区的灾害风险与自然解决方案领域开展了大量研究，深入探讨了 Eco-DRR 在减少灾害风险、降低经济损失、促进人类健康以及保护生物多样性方面的科学证据与评价框架；中国学者则在城市与区域尺度广泛研究城市扩张与生态因素对灾害风险的影响[8]，与此同时生态基础设施的经济效益与政策转化也是重要议题[9]。

在研究机构层面，联合国环境规划署（UNEP）持续牵头探索 Eco-DRR 的全球科学证据，并致力于将其落实到政策设计与生态工程及资源管理流程中[10]；东京大学与日本综合地球环境学研究所（IGES）则重点关注土地利用及传统智慧在减灾中的应用，尤其是水田生态系统对洪涝灾害的缓解作用[11]；格拉斯哥大学则聚焦公众对生态减灾方案的偏好及可持续实施的金融与治理框架[12]。

1.3 高被引文献

对本文数据集中被引频数前 5 的文献与高中心性的文献进行整理发现，高被引文章研究重点集中在 Eco-DRR 应用的性能证据问题、协同效益评估方法问题、NbS 应对气候灾害的实施机制、NbS 应用的成本收益问题等方面，Eco-DRR 被认为是理想的生态措施，具有在气候变化的未来创造共同效益的潜力[12]。Eco-DRR 研究的内容涉及环境、经济、社会多个学科，主要关注如何科学地开展 Eco-DRR 实践应用（表 2，图 2）。

表 2 生态防灾减灾研究高频英文文献

第一作者	文献名称	引用频次	发表年份
Intergovernmental Panel on Climate Change	Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation[13]	28	2012
Renaud Fabrice	Opportunities, challenges and future perspectives for ecosystem based disaster risk reduction[14]	15	2013
Kabisch Nadja	Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action[15]	17	2016
Narayan Siddharth	The Effectiveness, Costs and Coastal Protection Benefits of Natural and Nature-Based Defences[16]	12	
Onuma Ayumi	Comparing green infrastructure as ecosystem-based disaster risk reduction with gray infrastructure in terms of costs and benefits under uncertainty: A theoretical approach[17]	16	2018

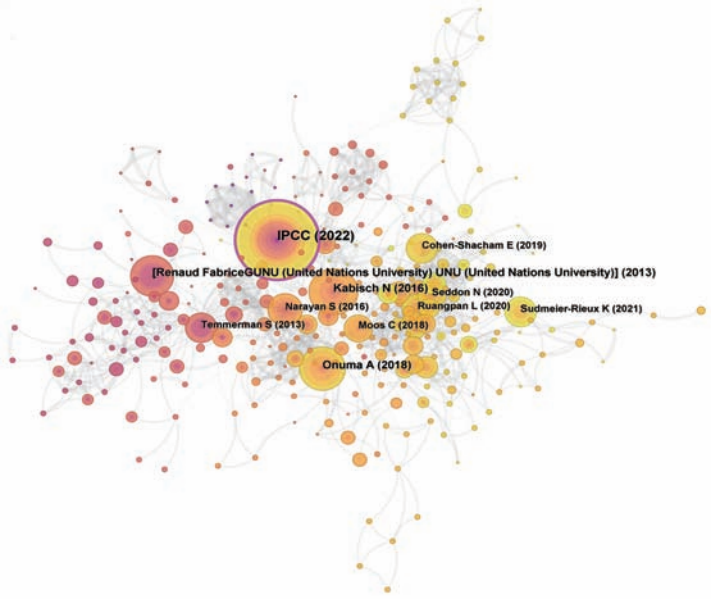


图 2 共被引文献共现网络

2　Eco-DRR 研究领域的发展脉络

基于 Eco-DRR 研究领域随时间分布的特征（图 3），将发展脉络划分为 4 个阶段。从第 3 阶段开始，中国学者对该领域的关注度显著提升，至 2024 年，中国学者已成为该领域的核心研究力量。

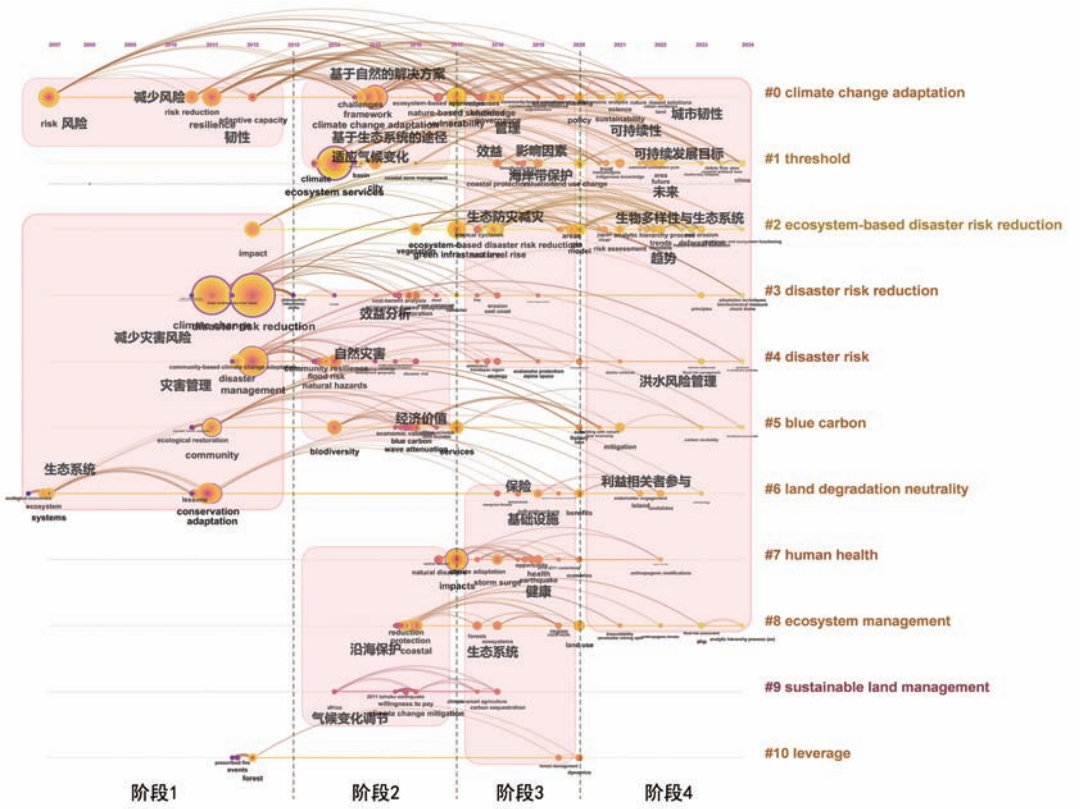


图 3　Eco-DRR 研究领域的发展脉络

2.1　第 1 阶段（2007—2013 年）

研究初期，学者开始系统性构建生态系统理论和减少灾害风险理论间的关联框架。此阶段灾害仍被视为由极端自然事件（如地震、洪水等）引发的物理现象[18]，但研究焦点已开始转向生态系统对灾害过程的调控作用。尽管刚性防御仍是减灾工程的主导范式，但研究表明生态基础设施可以通过调节水文循环，削减洪峰[19]，从而降低灾害概率。这一阶段的理论奠基突破了传统灾害认知，揭示了刚性工程与生态韧性提升之间的深层矛盾，为后续研究指明了关键方向。

2.2　第 2 阶段（2013—2017 年）

这一阶段灾害认知发生转变，被重新定义为是“社会-生态系统耦合的产物”，即自然扰动与社会系统脆弱性动态交互的结果[20]。这一认知革新推动了研究范式的转型，研究焦点转向 Eco-DRR 的减灾效益及其作用机制。多城市与跨案例的比较研究证实，将 Eco-DRR 纳入灾害风险管理技术体系对于提升社会-生态系统的服务能力、缓解灾害风险[21]具有显著成效。这一阶段的核心理论进步在于确立 Eco-DRR 的核心实施范式，通过构建与优化生态基础设施增强社会-生态系统韧性，进而提升灾害韧性。

2.3　第 3 阶段（2017—2020 年）

基于社会-生态系统（SES）视角，灾害被界定为社会结构与生态过程交互的共同产物。此阶段研究通过融合经济学、心理学、生态学等多学科方法揭示 Eco-DRR 多重协同效益产生机制[22]：证实灾害加剧的健康风险可被 Eco-DRR 有效缓解[23]，是灾后心理恢复的可靠方案；其生态价值也得到量化证实，例如对于生物多样性保护能力的提升[24]。中国学者更关注人类活动、自然灾害与生态系统之间的关系，特别是区域灾害风险的影响因素[25]。

2.4　第 4 阶段（2020 至今）

在气候变化与极端天气灾害威胁加剧的背景

下，研究视角再度发生转型，当前核心议题聚焦于 Eco-DRR 的可持续实施路径与多层级治理机制创新。研究显示，可持续的土地管理可增强生态系统恢复力[26]，多方协同参与治理以及稳定的财政支持是 Eco-DRR 可持续实施的核心要素[27]。值得注意的是，中国学者尤为关注如何通过政策制定推动 Eco-DRR 的落实并缓解水文灾害风险[28]。当前重点已转向生态基础设施的实施与动态监测、多层级治理机制创新，为 Eco-DRR 的可持续实施奠定了理论依据。

3 Eco-DRR 研究的重点领域

将关键词聚类分布与关键词共现网络耦合叠加（图 4~5）分析，将现有研究归纳出灾害风险评估、减灾性能评估、成本效益分析与资金运营机制、环境与人类福祉综合效益 4 大重点研究领域，中国学者在灾害风险评估与综合效益评估领域作出较大贡献。

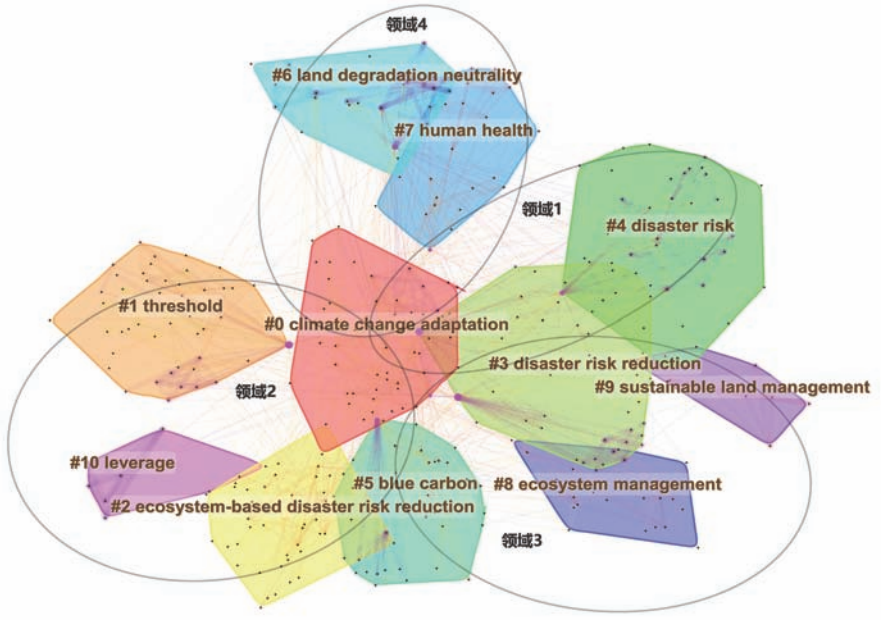


图 4 Eco-DRR 研究聚类图谱



图 5 关键词共现网络图谱

3.1　灾害风险评估

灾害风险评估是防灾减灾决策的关键前置工作，其研究范式正在经历从单一灾种向复杂系统评估的深刻转变。主流研究基于致灾因子、孕灾环境和承灾体的灾害系统理论框架，使用灾害模拟、机器学习等方法进行风险评估。早期研究将自然灾害、社会和生态系统的相互作用纳入了统一分析维度[29]，奠定了理论基础。当前灾害风险评估技术方法创新活跃，各类模型模拟与算法预测已经应用于前沿研究[30]，应用智能技术对洪水风险开展不确定性分析代表了国内外该领域未来重要的研究方向[31]。

3.2　减灾性能评估

减灾性能评估是 Eco-DRR 实施效果的重要验证手段，大量学者基于生态系统服务理论，评估各类生态基础设施对灾害的调节功能。波浪衰减率模型和落石风险量化模型等方法被应用于评估特定生态要素的减灾性能，而多元回归和贝叶斯网络等方法更适用于复杂系统的减灾效能评价[32]。混合基础设施方案强调了兼具生态效益和工程韧性，例如，海岸带生态系统可以有效降低洪水风险[33-36]。然而，监测数据的高精度要求和统一评估标准的缺乏仍是当前研究的局限，未来研究应着力构建可靠的减灾性能评估体系标准，以更好地支撑 Eco-DRR 的规划实施。

3.3　成本效益分析与资金运营机制

成本效益分析是量化 Eco-DRR 多重效益的核心方法，其理论基础源于经济学和生态系统服务理论的交叉融合。早期研究多依赖经济模型分析 Eco-DRR 的短期效益，随着气候变化的不确定性的加剧，研究范式转向动态分析框架：基于实物期权理论的研究量化了气候风险对 Eco-DRR 投资决策的影响[37]；经济模型与特定环境交叉的研究也揭示了红树林等生态基础设施作为减灾方案的经济性[38]。Eco-DRR 不仅具备经济可行性，其可持续性效益还需通过金融机制、政策立法来实现固化[39-40]。当前的核心理论框架包括生态系统服务价值评估和动态投资决策模型，通过测算生态防灾工程的长期经济价值，推动防灾规划从“被动投入”向“增值运营”转型。

3.4　环境与人类福祉综合效益

Eco-DRR 的多功能性正推动相关研究从单一效益评估向多维协同增益分析的范式转型，这一转型的标志性成果是健康响应模型的引入。Sandifer 等[41]提出的“灾害-压力状态-生态系统服务-响应-健康”（DPSERH）模型表明，Eco-DRR 策略可通过多种生态系统服务支持民生、健康及优化生活方式，湿地生态系统提供的多重服务还可有效缓解灾害相关的心理压力与疾病风险[23]。中国学者 Tian 等[42]指出，海洋灾害风险的综合管理可维护沿海生态系统稳定、提升固碳功能并减缓气候变化影响。该领域研究基于社会-生态系统模型与生态系统服务理论，通过量化 Eco-DRR 在改善环境、促进健康与社会公平等方面的综合效益，为生态安全格局构建提供了科学依据。

4　Eco-DRR 研究领域的前沿趋势

4.1　灾害类型与应对路径的多元化拓展

当前 Eco-DRR 的应用研究在灾害种类覆盖上存在局限性。其在应对水文气象灾害和重力灾害已形成较为扎实的理论与实践基础。沿海地区因面临突出的复合灾害威胁，亟需提升风险管理能力；此外，针对风灾、野火等灾害类型的 Eco-DRR 技术开发仍需进一步加强。值得注意的是，对于地震等复杂灾害事件，尽管 Sudmeier-Rieux 等[43]揭示了生态系统对地质灾害风险的缓释作用，但 Eco-DRR 的应对路径仍存在缺口。中国学者对于滑坡等山区系统的灾害风险评估与减灾策略十分关注[44]；同时我国学者已经开始在滨海地区、山地地区等重点地区展开研究[45-46]，以应对多样化灾害风险挑战。

4.2　实施场域向乡村空间的扩展延伸

当前 Eco-DRR 研究呈现明显的城乡失衡：大量成果聚焦城市区域，而乡村及郊野空间的研究创新较为有限。农业生产空间受到气候变化威胁[47]，尽管 Ruangpan 等[48]提出的多尺度 NbS 应用框架为乡村防灾提供了技术路径，但关于 Eco-DRR 的研究实践仍存在局限。我国作为农业大国在农业防灾减灾领域面临双重挑战：一方面，对广袤农业腹地的灾害响应机制尚不完善；另一方面，农村防汛抗旱设施亟待升级。未来应关注如何将 Eco-DRR 理论融入农业防灾减灾现代化进

程，以增强农业系统的灾害防御与恢复能力。

4.3 多重效益证据体系的科学建构

尽管 Eco-DRR 的生态、社会与经济协同效益已获初步认可，但其多重协同效益仍需进一步的科学证据支持。目前研究仍主要依赖案例研究[49]，缺乏标准化、系统化的评估框架，研究成果难以推广；此外，效益评估工具的缺乏制约了生态措施与传统工程的科学比选，尤其对于中国，如何将 Eco-DRR 嵌入政策支持的工程技术体系，以及面向不同人群的治理框架[50]，仍然是未来需要探索的方向。

4.4 人工智能技术的深度整合

人工智能在 Eco-DRR 研究中灾害风险评估领域的应用已相对成熟，但在数据采集与处理领域仍处于初始阶段。中国学者戴代新等[51]构建了人工智能技术在城市生态减灾应用的理论框架，总结出人工智能技术将生态系统与减少灾害风险整合的 4 种途径（生态系统服务评估、生态系统指标计算、风险动态变化预测以及生态基础设施建设决策）。未来，人工智能将深度参与 Eco-DRR 的核心需求，其在生态系统灾害调节服务的评估、监测及后评估中的应用将成为研究前沿。

5 展望

在全球气候变化加剧背景下，生态防灾减灾（Eco-DRR）的理论与实践价值日益凸显。相关研究数量显著增长，受到越来越多国家和地区的关注，该领域的研究发展演进历经 4 个阶段，反映出对于灾害风险从“灾害应急”到“韧性治理”的理念革新、对于防灾减灾从“单一工程”到“系统协同”的范式升级。Eco-DRR 领域的研究基于社会-生态系统韧性理论、复杂适应系统理论、生态系统服务理论、景观生态学等理论框架展开，已形成 4 大重点领域。在生态文明建设与国土空间规划转型的双重背景下，其研究内容可以紧密融入国土空间与防灾减灾规划技术体系，服务于多尺度的国土空间规划与风景园林规划设计。

但当前我国 Eco-DRR 领域的研究系统性不足，尚未形成针对复杂灾害场景的理论体系，也未能深入挖掘中小尺度城乡空间的灾害韧性特征。我国面临沿海水文气象灾害、山区地质灾害、极端高温等多重灾害威胁，这些灾害的影响范围已从区域宏观层面延伸至街道等微观层面，而相应的 Eco-DRR 实施路径、评价框架及可持续管理仍处于探索阶段；现有研究成果难以满足未来韧性安全导向的国土空间规划需求，难以有效指导气候变化背景下与频发的极端天气灾害应对中的风景园林规划设计实践。

未来中国学者应紧密结合国家需求与城乡发展的本土现实问题，深入研究 Eco-DRR 的可持续实施与管理机制；应用人工智能等新兴技术，开发适配复合灾害等复杂场景的 Eco-DRR 综合效益评估技术工具；探索 Eco-DRR 提高城市与农村地区气候适应与灾害应对能力的实施途径；推动国土空间防灾减灾规划深度融合 Eco-DRR 方法技术，实现向韧性安全导向的规划转型。

参考文献

[1] PAGANO A, PLUCHINOTTA I, PENGAL P, et al. Engaging stakeholders in the assessment of NBS effectiveness in flood risk reduction: a participatory System Dynamics Model for benefits and co-benefits evaluation[J]. Science of The Total Environment, 2019, 690: 543-555.

[2] 徐琳琳, 胡文浩, 徐文辉. 国外基于自然的解决方案(NbS)研究进展[J]. 中国城市林业, 2024, 22(3): 176-183.

[3] RENAUD F G, SUDMEIER-RIEUX K, ESTRELLA M. The role of ecosystems in disaster risk reduction[M]. Tokyo: United Nations University Press, 2013.

[4] 屠梦慈, 朱颖. 基于空间句法的城市防灾公园空间可达性分析: 以苏州桐泾公园为例[J]. 中国城市林业, 2019, 17(1): 16-20.

[5] 李改维. 合肥市城市绿地系统防灾避险规划[J]. 中国城市林业, 2010, 8(3): 31-33.

[6] 李禾, 王思元. 公共安全视角下日本东京都防灾公园体系规划[J]. 中国城市林业, 2021, 19(3): 49-54.

[7] 童彤, 鲍沁星. 基于生态系统的适应与减灾理论在国外城市气候规划中的实践研究[J]. 风景园林, 2022, 29(1): 102-107.

[8] LIU Y M, YANG S N, HAN C L, et al. Variability in regional ecological vulnerability: a case study of Sichuan Province, China[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2020, 11(6): 696-708.

[9] FERREIRA C S S, KAŠANIN-GRUBIN M, SOLOMUN M K, et al. Wetlands as nature-based solutions for water management in different environments[J]. Current Opinion in Environmental Science & Health, 2023, 33: 100476.

[10]SANDHOLZ S, LANGE W, NEHREN U. Governing green change: ecosystem-based measures for reducing landslide risk in Rio de Janeiro [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 32: 75-86.

[11]YAMADA Y, TAKI K, YOSHIDA T, et al. An economic value for ecosystem-based disaster risk reduction using paddy fields in the kasumitei open levee system[J]. Paddy and Water Environment, 2022, 20(2): 215-226.

[12]ANDERSON C C, RENAUD F G, HANSCOMB S, et al. Green, hybrid, or grey disaster risk reduction measures: what shapes public preferences for nature-based solutions? [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 310: 114727.

[13] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation [R]. [2025-07-14]. https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/ 2024.

[14]RENAUD F G, SUDMEIER-RIEUX K, ESTRELLA M. The role of ecosystems in disaster risk reduction [M]. Tokyo: United Nations University Press, 2013.

[15]KABISCH N, FRANTZESKAKI N, PAULEIT S, et al. Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action [J]. Ecology and Society, 2016, 21(2): 39.

[16]NARAYAN S, BECK M W, REGUERO B G, et al. The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences[J]. PLOS ONE, 2016, 11(5): e0154735.

[17]ONUMA A, TSUGE T. Comparing green infrastructure as ecosystem-based disaster risk reduction with gray infrastructure in terms of costs and benefits under uncertainty: a theoretical approach[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 32: 22-28.

[18]PEDUZZI P. 2009 global assessment report on disaster risk reduction: Patterns, trends and drivers[J]. 2009.

[19]JANSSEN M A, BODIN Ö, ANDERIES J M, et al. Toward a network perspective of the study of resilience in social-ecological systems[J]. Ecology and Society, 2006, 11(1): 15.

[20]TIERNEY K. The social roots of risk: producing disasters, promoting resilience [J]. Disaster Prevention and Management, 2016, 25(1): 111-114.

[21]KLOOS J, RENAUD F G. Overview of ecosystem-based approaches to drought risk reduction targeting small-scale farmers in sub-Saharan Africa [M]//Ecosystem-based disaster risk reduction and adaptation in practice. Cham: Springer International Publishing, 2016.

[22]LANDRIGAN P J, FULLER R, ACOSTA N J R. The lancet commission on pollution and health [J]. The Lancet, 2018, 391(10119): 462-512.

[23]SUTTON-GRIER A E, SANDIFER P A. Conservation of wetlands and other coastal ecosystems: a commentary on their value to protect biodiversity, reduce disaster impacts, and promote human health and well-being[J]. Wetlands, 2019, 39(6): 1295-1302.

[24]YAMANAKA S, ISHIYAMA N, SENZAKI M, et al. Role of flood-control basins as summer habitat for wetland species -a multiple-taxon approach[J]. Ecological Engineering, 2020, 142: 105617.

[25]ZHANG Y, ZHOU D M, LI Z H, et al. Spatial and temporal dynamics of social-ecological resilience in Nepal from 2000 to 2015[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2020, 120: 102894.

[26]LUCATELLO S, HUBER-SANNWALD E. Sustainable development goals and drylands: addressing the interconnection [M]// Stewardship of future drylands and climate change in the global south. Cham: Springer International Publishing, 2019.

[27]MARTIN J G C, SCOLOBIG A, LINNEROOTH-BAYER J, et al. Catalyzing innovation: governance enablers of nature-based solutions[J]. Sustainability, 2021, 13(4): 1971.

[28]XUE Y M, DING L L, LAI K H. How does index-based insurance support marine disaster risk reduction in China? Evolution, challenges and policy responses [J]. Ocean & Coastal Management, 2023, 235: 106477.

[29]DEPIETRI Y. The social-ecological dimension of vulnerability and risk to natural hazards[J]. Sustainability Science, 2020, 15(2): 587-604.

[30]YE T, LIU W H, WU J D, et al. Event-based probabilistic risk assessment of livestock snow disasters in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2019, 19(3): 697-713.

[31]KANG S Y, YIN J B, GU L, et al. Observation-constrained projection of flood risks and socioeconomic exposure in China[J]. Earth's Future, 2023, 11(7): e2022EF003308.

[32]BANAN-DALLALIAN M, SHOKATIAN-BEIRAGH M, GOLSHANI A, et al. Use of a Bayesian Network for storm-induced flood risk assessment and effectiveness of ecosystem-based risk reduction measures in coastal areas (Port of Sur, Sultanate of Oman)[J]. Ocean Engineering, 2023, 270: 113662.

[33]MASHIYI S, WEESAKUL S, VOJINOVIC Z, et al. Designing and evaluating robust nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2023, 93: 103787.

[34]TIGGELOVEN T, DE MOEL H, VAN ZELST V T M, et al. The benefits of coastal adaptation through conservation of foreshore vegetation[J]. Journal of Flood Risk Management, 2022, 15(3): e12790.

[35]王敏. 基于生态流的城市绿地生态防护效能优化研究[J]. 中

国城市林业,2013,11(5):20-23.

[36]张德顺,曾明璇,奉树成,等.我国沿海地区城市行道树抗台风评价与应用[J].中国城市林业,2022,20(5):151-156,162.

[37]AGATON C B,COLLERA A A.Now or later? Optimal timing of mangrove rehabilitation under climate change uncertainty[J]. Forest Ecology and Management,2022,503:119739.

[38]MENÉNDEZ P,LOSADA I J,TORRES-ORTEGA S,et al.The global flood protection benefits of mangroves[J]. Scientific Reports,2020,10:4404.

[39]REGUERO B G,BECK M W,SCHMID D,et al. Financing coastal resilience by combining nature-based risk reduction with insurance[J].Ecological Economics,2020,169:106487.

[40]CHABBA M,BHAT M G,SARMIENTO J P.Risk-based benefit-cost analysis of ecosystem-based disaster risk reduction with considerations of co-benefits, equity, and sustainability[J]. Ecological Economics,2022,198:107462.

[41]SANDIFER P A,KNAPP L C,COLLIER T K,et al. A conceptual model to assess stress-associated health effects of multiple ecosystem services degraded by disaster events in the Gulf of Mexico and elsewhere[J].GeoHealth,2017,1(1):17-36.

[42]TIAN S Z,ZHANG K C,WANG Q B,et al.Three-dimensional analyses of China's marine disaster management policies (1990-2022): with implications for carbon neutrality[J]. Ocean & Coastal Management,2023,246:106884.

[43]SUDMEIER-RIEUX K,ARCE-MOJICA T,BOEHMER H J,et al. Scientific evidence for ecosystem-based disaster risk reduction[J]. Nature Sustainability,2021,4(9):803-810.

[44]BROQUET M,CABRAL P,CAMPOS F S.What ecological factors to integrate in landslide susceptibility mapping? An exploratory review of current trends in support of eco-DRR[J].Progress in Disaster Science,2024,22:100328.

[45]黄海静,马金辉,杨雨飞.山地城市高温热浪灾害空间识别与风险评估:以重庆市为例[J].风景园林,2024,31(8):95-103.

[46]薄茗洋,戴代新,廖晚迪.基于生态防灾减灾的沿海城市规划韧性响应:以上海市雨热灾害复合风险为例[J].风景园林,2005,32(10):80-88.

[47]JONES H P,HOLE D G,ZAVALETA E S.Harnessing nature to help people adapt to climate change[J].Nature Climate Change,2012,2(7):504-509.

[48]RUANGPAN L,VOJINOVIC Z,DI SABATINO S,et al.Nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction:a state-of-the-art review of the research area[J].Natural Hazards and Earth System Sciences,2020,20(1):243-270.

[49]TEMMERMAN S,MEIRE P,BOUMA T J,et al.Ecosystem-based coastal defence in the face of global change[J].Nature,2013,504(7478):79-83.

[50]陈畅,吴亚男,赖文波.应对高温胁迫的老龄化社区热适应性规划治理框架[J].中外建筑,2023(10):35-40.

[51]DAI D X,BO M Y,REN X S,et al.Application and exploration of artificial intelligence technology in urban ecosystem-based disaster risk reduction: a scoping review[J]. Ecological Indicators,2024,158:111565.