

DOI: 10.20103/j.stxb.202406121362

王欣妍, 王辰星, 詹云军, 丁丁, 严岩. 基于全过程和适应性视角下的城市生态风险管理研究进展. 生态学报, 2024, 44(22): 10512-10523.

Wang X Y, Wang C X, Zhan Y J, Ding D, Yan Y. Research progress on urban ecological risk management from a whole process and adaptation perspective. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10512-10523.

基于全过程和适应性视角下的城市生态风险管理研究进展

王欣妍^{1,2}, 王辰星¹, 詹云军³, 丁 丁⁴, 严 岩^{1,*}

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 武汉理工大学, 资源与环境工程学院, 武汉 430070

4 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心, 北京 100035

摘要: 在全球气候变化加剧及中国城市化进程加速的背景下, 城市生态风险的管理日趋受到关注。面对日趋复杂且无法完全规避的生态风险, 主动的适应性管理和全过程动态监测是应对风险的关键。当前的适应性管理体系较为分散, 且对城市生态风险全过程综合管理的研究较少, 亟需形成统一规范的理论框架。在综述并总结国内外城市生态风险管理及适应性管理研究进展的基础上, 提出了全过程的生态风险适应性管理框架。基于适应性理论的“潜力-连通度-韧性”三维模型和适应性循环的四个阶段“开发、保护、释放、重组”, 开展对生态风险与城市发展阶段及相应的管理措施之间的动态响应关系的研究。框架包含三层循环, 内层为生态风险适应性管理的四个步骤, 包括问题形成、适应性理论三维框架分析、生态风险表征与适应性阶段识别、风险适应性管理。中层为全过程管控机制, 统筹考虑灾前预警、灾中应对和灾后恢复的全过程生态风险管理。外层为适应性管理的最终目标, 即建立“接纳风险、主动适应、韧性发展、动态循环”的复杂适应系统。该框架通过将生态风险管理从特定适应性能力转移到多种适应性能力的协同与权衡, 设计了一个能够吸收和适应未来干扰的系统。从生态风险指标体系的构建、生态风险的定量预测、生态风险管理系统的建立及全过程的适应性决策等方面讨论了研究前沿, 以推动我国全过程生态风险适应性管理的研究, 有助于确定城市未来发展路径并实现可持续发展。

关键词: 生态风险管理; 城市生态风险; 适应性管理; 全过程管理; 复杂适应系统

Research progress on urban ecological risk management from a whole process and adaptation perspective

WANG Xinyan^{1,2}, WANG Chenxing¹, ZHAN Yunjun³, DING Ding⁴, YAN Yan^{1,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

4 National Center for Climate Change Strategy and International Cooperation, Beijing 100035, China

Abstract: The increasing global challenge of climate change, combined with the rapid urbanization occurring in China, has made the management of urban ecological risks an urgent concern. Due to the inherent complexity of urban ecological risks, which cannot be completely eliminated, the adoption of active adaptive management and continuous dynamic monitoring throughout the entire process are critical for effectively addressing these ecological risks. However, current adaptive

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(42101250); 中国科学院战略先导 A 类专项(XDA23030101)

收稿日期: 2024-06-12; **采用日期:** 2024-08-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yyan@rcees.ac.cn

management systems are frequently disjointed, and there is a notable lack of research dedicated to the integrated management of urban ecological risks across all stages. Therefore, there is an urgent need to establish a cohesive and standardized theoretical framework. This study proposes a comprehensive framework for the adaptive management of ecological risk, drawing on a review and synthesis of existing research on urban ecological risk management and adaptive management, both domestically and internationally. The proposed framework is based on a three-dimensional model of “potential-connectedness-resilience” and the four phases of the adaptive cycle of “exploitation, conservation, release, reorganization” according to adaptation theory. It explores the dynamic response relationships between ecological risks and the phases of urban development, along with corresponding management strategies. The proposed framework consists of a three-layer cycle. The innermost layer includes the four steps of adaptive management of ecological risk: identifying the problem, analyzing the three-dimensional framework of adaptation theory, characterizing ecological risks and identifying adaptive phases, and implementing adaptive risk management. The middle layer represents a comprehensive process control mechanism, which consists of the pre-disaster warning phase, the in-disaster response phase, and the post-disaster restoration phase. The outer layer signifies the ultimate objective of adaptive management, which is to establish a complex adaptive system that is guided by the principles of “risk acceptance, proactive adaptation, resilience development, and dynamic cycles”. This framework shifts the focus of ecological risk management from a singular emphasis on specific adaptive capacities to a broader consideration of multiple adaptive capacities, synergies, and trade-offs. This approach aims to develop a system capable of absorbing and adapting to future disturbances. Furthermore, the study explores emerging research frontiers, which include the development of an ecological risk indicator system, the quantitative prediction of ecological risk, the establishment of an ecological risk management framework, and the implementation of adaptive decision-making throughout the entire process. This initiative aims to enhance the understanding of adaptive management of urban ecological risks throughout the entire process in China, thereby contributing to the formulation of future urban development pathways and the achievement of sustainable development.

Key Words: ecological risk management; urban ecological risk; adaptive management; whole process management; complex adaptive system

生态系统为人类社会提供物质基础和生态服务,其结构和功能的稳定性是社会可持续发展的根本保证^[1]。生态风险是生态系统客观存在的、受气候变化、洪涝等自然因素及污染排放^[2]、土地扩张等人类活动的影响而发生损害的概率^[3]。其特征及影响因素作为生态建设、环境修复、城市规划等工作和相关决策制定的重要依据^[4],引起国内外高度重视,制定了一系列生态风险的管理措施、具体目标和行动方案^[5-10]。最初是单一的人体健康风险研究^[5,11-12],随着城市化的发展逐渐延伸至对城市复合生态系统中自然-人为复合风险的研究^[13-15],如何进行城市生态风险管理已经成为可持续发展的重要议题^[16]。目前,国内外学者在自然灾害、人类活动以及气候变化引起的生态风险等方面已经开展了大量研究。气候变化的加剧使风险概率预测的不确定性增加,无法完全规避灾害的发生,变静态风险评估与被动风险治理为全过程动态监测的主动适应性管理将有效提升城市生态系统面临风险时的自适应能力,减缓风险的不利后果。然而,如何将当前分散的适应性管理和生态风险研究集结起来,形成统一规范的理论框架,是当前城市生态风险管理研究的难点之一。基于此,本文提出全过程的生态风险适应性管理框架,基于适应性理论的“潜力-连通度-韧性”三维模型,统筹考虑灾前、灾中及灾后的全过程生态风险管理,基于适应性循环开展对生态风险与城市发展阶段及相应的管理措施之间的动态响应关系的研究,为气候变化与城市化共同作用下城市的生态风险管理提供指导,有助于确定城市未来发展路径并实现可持续发展。

1 城市生态风险管理的国内外研究进展

城市生态风险管理是管理者基于生态风险评估结果,选用有效的防治技术并进行费用效益分析,确定可接受的风险水平,综合经济、社会、政治和法律等多种因素,针对风险发生前的预警、来临时的应对和过后的恢

复所采取的一系列减轻、抑制和转移风险的管理决策及防范措施,以保护人群健康与城市生态系统的安全^[17-18]。已有研究对城市生态风险管理的多个方面进行了探讨。国际上对城市生态风险管理的研究较为成熟。1992 年美国国家环境保护局(EPA)颁布了《生态风险评估框架^[19]》,1998 年颁布的《生态风险评估指南^[12]》形成了迄今风险评价的“四步法”,即危害识别、剂量-反应评估、暴露评估和风险表征^[20]。随后,生态风险的研究逐步从单一生态系统、单一风险扩展到区域尺度、复合风险的研究^[21]。在人类活动影响方面,集中于对大气^[22]、水体^[23-24]、土壤^[25-26]中的污染物和固体废弃物^[27]的潜在生态风险和公共健康^[28]进行管理。在自然灾害方面,集中于对洪水风险的全过程管理^[29-31],例如,美国“低影响开发”、日本“多功能调蓄设施”、英国“可持续城市排水系统”、荷兰“还地于河”等理念^[32-34],旨在通过多种措施的综合运用管理城市洪涝灾害、水环境污染等风险。在气候变化方面,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的第六次评估报告提出了降低气候变化风险的适应举措。欧盟、美国和日本等国家建立了完善的碳排放监测、报告和核查(MRV)体系,通过法律依据、监测计划、定期报告和市场化核查等环节保障碳市场交易机制。诸多学者也对气候变化引起的自然灾害如火灾^[35]、干旱^[36]、极端高温^[37-38]以及造成的森林恢复力下降^[39-40]等风险管理进行了研究。

近年来,国内对城市生态风险管理的关注逐步提升,生态风险的评价方法趋于多样化(表 1)。同时,颁布了一系列指导性文件,如《生态环境健康风险评估技术指南 总纲^[9]》(HJ 1111—2020)就采用了风险评价的“四步法”。我国生态风险管理的研究集中于城市化引起的生态风险,包括城市土地扩张导致的耕地紧缺^[68-69]、水资源紧缺^[70]、绿地破碎化和生物多样性下降^[71-72];城市活动排放导致的大气^[73]、水体^[74]、土壤污染^[75]和生活垃圾潜在的生态风险^[76];城市化效应及自然灾害^[77]共同导致的极端高温^[78]、城市内涝^[79-81]、地

表 1 生态风险评价方法及特征
Table 1 Methods and characteristics of ecological risk assessment

类别 Category	方法 Method	优势 Advantage	不足 Disadvantage	参考文献 References
环境污染类 风险源 Environmental pollution risk sources	重金属	单项污染指数法	逐项与标准比较,计算简便,容易判断主要污染风险因子	大多用于水环境影响评价 [41]
		Hakanson 潜在生态风险指数模型	反映河流底泥污染物的种类、含量、毒性水平及地理空间的差异	用于河流底泥的重金属污染风险评价 [42—43]
		地累积指数法	考虑了自然地质过程	大多用于水环境影响评价 [44]
自然-人为复合类 风险源 Natural-human-combined risk sources	有机物	熵值法	环境暴露浓度与毒性数据的比值,计算简便、结果客观	用于单一化合物的毒性效应评估 [45—46]
	“源-汇”法	“源-汇”法	识别生态源地,理解生态格局与过程间的关系	难以表征多种风险源下的风险状况 [47—49]
	指标体系法	相对风险模型法 RRM	分析多风险源/压力/终点	变量多、数据量需求大;相对风险缺乏可比性 [50—51]
		生态损失度指数方法 R=P×D 模型	表达生态风险的时空特征	指标不一致使不同研究间缺乏可比性;数据量需求大 [52—54]
		生态等级风险评价法 PETAR	在数据较少时进行大尺度研究	未考虑风险的时间变化;相对风险缺乏可比性 [55—57]
		等级动态框架 HPDP	结合时空相互作用关系	概念模型无法量化风险 [58]
		景观指数法	定量表达景观格局和生态过程之间的关联	忽略生态过程及其动态变化 [59—60]
	“因果分析”法	DPSIR 模型	将系统中环境问题的因果关系结构化	低估复杂环境和社会经济固有的不确定性和因果关系的多样性 [61]
		证据权重法 WOE	建模过程易于解释、重现性好	数据需求量大,获取较为困难 [62]
	复杂网络模型	复杂网络模型	模拟人类干扰下自然系统的生态风险	模型结构较复杂;数据需求量大 [63—65]
	其他方法	模糊数学法、灰色系统理论	纳入生态风险本身的不确定性	缺少客观的标准或方法 [66—67]

面沉降^[82-83]等潜在的生态风险。面对气候变化带来的生态风险,中国在 2017 年建成全国碳排放权交易市场,随后发布《国家适应气候变化战略 2035》等政策文件强调了适应和减缓的策略,建设气候适应性城市试点^[84]以应对高温、干旱、内涝等生态风险问题^[85-86]。各界对城市生态风险管理不同研究方法及应用方式的持续关注体现了其在未来城市发展过程中的重要性。

目前国内外对城市生态风险管理的研究已经较为成熟。国外的管理策略更加注重综合性,不仅对多种管理手段进行对比和综合运用,提倡多方参与交流^[87],还注重灾后的监测和对决策的及时调整^[88]。国内则更加注重灾前的生态风险评估,通过不断提升风险概率预测的精度来提出更有针对性的风险管理策略。然而,国内虽然对生态风险预测效果逐渐变好^[89],但是大多数还是停留在静态风险评估阶段,对将灾前预警与风险来临时的应急响应和发生后的恢复措施结合起来的长期综合管理体系研究较少^[88]。国外虽然注重风险的综合治理和灾后恢复,但依旧面临风险治理技术的上限。随着全球气候变化的加剧,风险将变得更加复杂且难以管理。考虑到风险是一种概率,存在不确定性,无法完全规避的内在需求,主动适应性管理和全过程动态监测是突破困境的关键。

2 基于全过程适应性的城市生态风险管理国内外研究进展

适应性理论是分析系统如何应对气候变化、压力、灾害、风险或机遇的一种动态方法,描述了自然与人类生态系统为应对实际或预期的风险及其影响而通过过程、实践或结构变化做出的调整,以减轻或抵消潜在损害^[90-92]。“社会-经济-自然”复合生态系统(例如城市)是典型的复杂适应系统,由具有适应性的主体组成,在环境的影响下能自组织、自学习和自适应^[93-94],对环境变化做出响应并保持功能,依靠系统内部的动力不断演化其形态而生存、发展和进化^[95]。适应性循环是适应性理论中的关键启发式模型,常被用于表征城市生态系统的动态演变机制,强调系统发展是一个缓慢渐变与快速转换共存、互补的过程^[63],受到不连续事件干扰的生态系统具有“潜力-连通度-韧性”的三维特征属性^[96],并将依次经过具有不同特征的开发(exploitation, r)、保护(conservation, K)、释放(release, Ω)和重组(reorganization, α)四个阶段进行周期性循环^[97]。其中,潜力指生态系统各组成部分的内在能力和资源储备,潜力高的生态系统风险低,具有更多的生物多样性、丰富的物种组成和功能特性。连通度指生态系统中各个区域或群落之间的连接程度,高连通度的生态系统风险低,意味着不同区域之间的物质、能量和信息可以自由流动,生态系统的稳定性和适应性增强。韧性指动态时间趋势中生态系统对外界干扰的抵抗力和恢复力,高韧性的生态系统风险低,能够快速适应和恢复,减少干扰对整个生态系统功能的影响。

生态风险管理与适应性管理的协同有助于减小风险事中应急及事后恢复的困难,避免灾前、灾中、灾后管理的割裂,形成连贯的全过程动态监测(表 2)。生态风险管理聚焦于“灾前预防”,如果仅对风险进行管理,不仅可能加剧极罕见事件造成的灾难^[101-102],还可能过度预防风险并改变生态系统至超过阈值,发生急速的不可逆变化^[103]。适应性管理可以弥补对“灾中应对”和“灾后恢复”的局限性,但是如果仅对适应性进行管理,无法反映区域受自然或人为因素潜在冲击的后果及不确定性^[104]。因此,两者协同工作有助于在对生态

表 2 生态风险管理和适应性管理的主要要点

Table 2 Main points of ecological risk management and adaptive management

主要要点 Main points	生态风险管理 Ecological risk management	适应性管理 Adaptive management
目标 Objectives	使危害发生的概率最小化	使危害再发生时的后果最小化
原则 Principles	强调冲击发生前的预防,避免系统发生转变,虽然将高频事件造成的损害降至最低,但可能加剧极罕见事件造成的灾难	接受系统损害的可能性并在实践中学习、调整管理措施,观察系统是否转型至新的平衡状态,尽管可能导致危害较频繁的发生 ^[98-99]
不确定性来源 Sources of uncertainty	已知危害事件是否发生	已知或未知危害事件造成损害的程度 ^[100]

风险精准识别的基础上,运用适应性理论进行前瞻性布局管理,使系统根据风险中学到的经验不断改变自身结构和行为方式,以更好地适应环境选择的需要进行进化,从而实现从被动风险治理向主动适应性管理、从静态风险评估到全过程动态监测的转变,提升危急情况下的资源可利用性和系统的灵活性。

目前,适应性管理在应对气候变化风险研究方面较为成熟^[105],联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的《气候变化2022:减缓气候变化》和我国发布的《国家适应气候变化战略2035》均提出了适应和减缓的应对策略,通过对风险的识别来调整管理措施,减轻不利后果。在风险前的识别方面,已有学者基于适应性理论的三维框架“潜力-连通度-韧性”对区域^[106–107]、流域^[108]、城市群^[109–110]、城市^[111–113]等多个尺度的生态风险进行了评估。在风险发生中的应急方面,已有城市开始构建应急管理数据库、监测预警中心和应急指挥中心等用于实时监测自然变化和人为活动^[114–115],以开展全过程的应急救援处置。在风险发生后的恢复方面,已有城市将蓄滞洪区、分洪道等工程措施与风险预报、保险和灾后救济等非工程措施相结合^[116–118]减轻生态风险的危害后果。此外,现有研究大多对生态系统中耦合的各要素进行条块化、分割式的管理^[13, 87, 119],对各类生态风险事件间级联关系的考虑不足,容易造成从近端风险走向远端风险^[120]的僵局。因此,尽管多个组织和诸多研究已经开始将适应性和全过程理念引入生态风险研究,可以为城市应对风险挑战提供一定支持,但仍停留在试点阶段,尚未形成规范的应用体系,对生态风险、城市发展阶段及适应性管理措施之间的动态响应关系了解甚少。生态风险管理需要从特定适应性能力转移到多种适应性能力协同与权衡^[88],一套系统的理论框架和统一的指标体系对于分析全过程生态风险适应性管理的实际应用过程至关重要。

3 基于适应性视角的全过程生态风险管理框架

目前,对城市生态风险全过程综合管理的研究较少,风险的被动治理存在治理技术的上限。面对更加复杂、多元的生态风险,人们逐渐意识到主动的适应性管理和全过程的动态监测是风险响应的有效路径。主动的全过程适应性管理是使生态系统实现从短期静态治理到长期动态适应的过程,通过在灾前、灾中、灾后全过程的实践中学习经验来动态地调整管理措施^[121],通过降低脆弱性^[122]、提升韧性^[123]等途径帮助城市使风险再次来临时具备响应冲击、适应外界干扰的能力,使不利后果最小化(图1)。

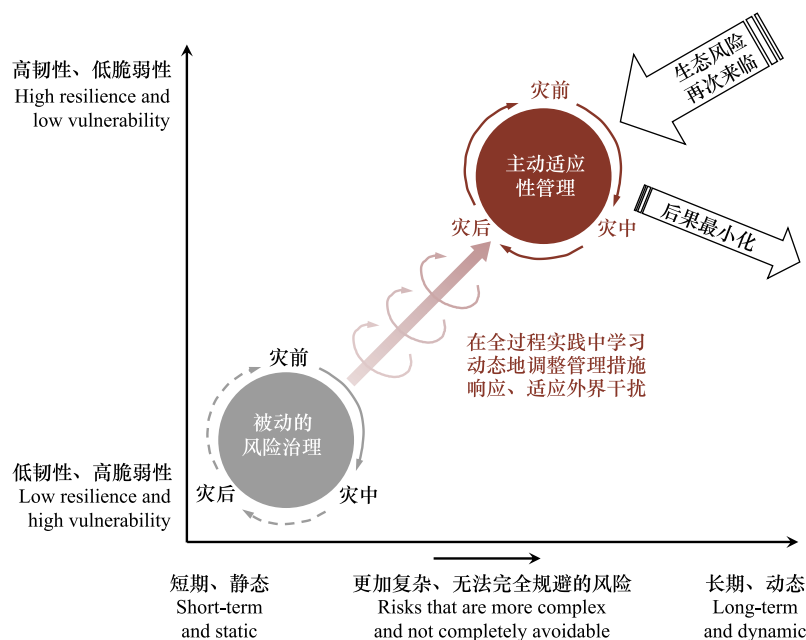


图1 全过程与适应性思维在生态风险管理中的概念模型

Fig.1 A conceptual model of whole process and adaptive thinking in ecological risk management

然而,已有管理仍较为分散,缺乏理论框架上的统一规范。因此,本文提出了适应性视角下的全过程生态风险管理框架(图2),包含三层循环,内层为生态风险适应性管理的步骤,中层为全过程管控机制,外层为适应性管理的最终目标。适应性研究可以涉及全球、国家、区域以及地方城市、部门等宏观、中观和微观尺度,本文重点关注城市尺度的生态风险管理问题。

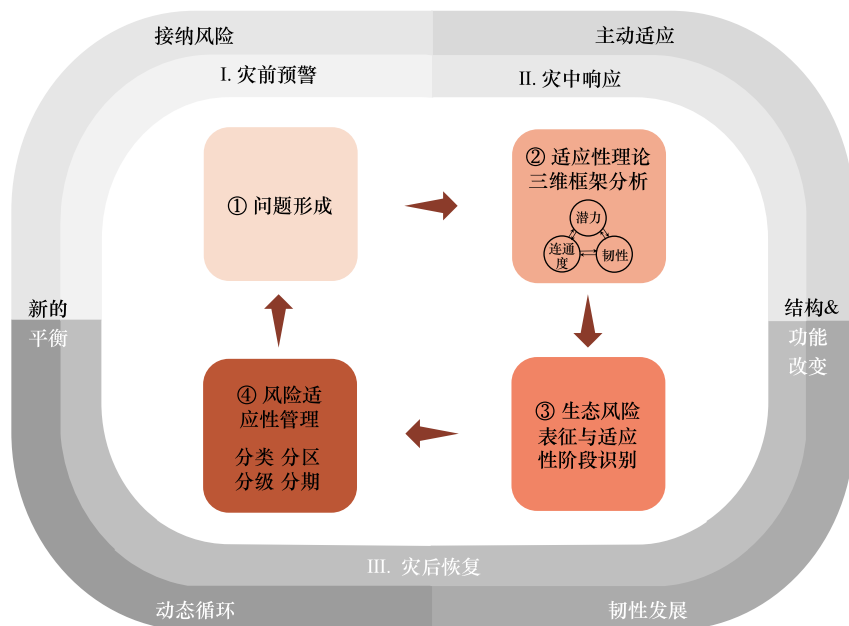


图2 基于适应性视角的全过程生态风险管理框架

Fig.2 A whole-process ecological risk management framework based on an adaptation perspective

内层为某一时间节点上生态风险适应性管理的四个步骤:问题形成、适应性理论三维框架分析、生态风险表征与适应性阶段识别、风险适应性管理。第一步,建立复合、多元、跨界的管理工作小组或制度平台^[124-125],收集灾害现象和社会需求、排查潜在风险隐患并转化为科学问题。第二步,基于适应性理论“潜力-连通度-韧性”的三维框架和评估指标体系(图3)建立不同情景下的生态风险分析模型。然后,探究多种适应性能力间共同影响因子的阈值^[126],以达到多种适应性能力的协同。第三步,通过适应性循环阶段与全过程生态风险管理及城市发展阶段的对应关系进行生态风险表征(图4)。前循环(r 和 K)的城市网络形成并逐步稳定,生态风险较低但趋于升高,抵抗及存续能力增强,城市生态风险管理以灾前预警为主^[127];后循环(Ω 和 α)的城市过度发展至系统崩溃,生态风险由高骤降,网络结构由衰退至重组,调适及学习能力增强^[127],以灾中响应和灾后恢复为主;韧性较强的系统将通过学习和变革再次进入开发阶段,进而实现生态风险管理的适应性循环^[109, 128]。第四步,基于适应性循环阶段及风险阈值提出“分类、分区、分级、分期”的风险适应性管理措施。分类指明确优先控制的干扰类别,分区指在区域内划分不同的控制单元,分级指设立多级标准以实施不同的目标管理,分期指制定短期和长期的治理目标。处于前循环时,关注日常生态风险识别与管理^[129]构建,重视开发建设时重要生态斑块的保护和生态发展转型,优化生态格局。处于后循环时,亟需优先应急准备^[130],规划城市应急物资储备基地、配送路径以及相邻城市物资的调度安排,降低需求并重视生态系统服务,保证底线不被突破。

中层为连续时间尺度上生态风险“灾前预警、灾中应对和灾后恢复”的全过程管控机制。灾害全过程涉及的主要生态风险包括三种:致灾因子风险(对应降雨侵蚀力、夜间灯光强度等指标)、孕灾环境风险(植被覆盖度、城市洪水风险缓解能力等)和承灾体危害风险(土壤可蚀性、生物多样性维持量等)。灾前三类生态风险均有涉及,通过指标风险的量化捕捉生态系统状态转变的阈值识别早期预警信号^[131],识别潜在风险隐患,建立灾害阶段与风险阈值及后果之间关系的目录清单。灾中三类生态风险均有涉及,应及时启动应急管理措



图 3 生态风险适应性评估指标体系

Fig.3 Indicator system for ecological risk adaptation assessment

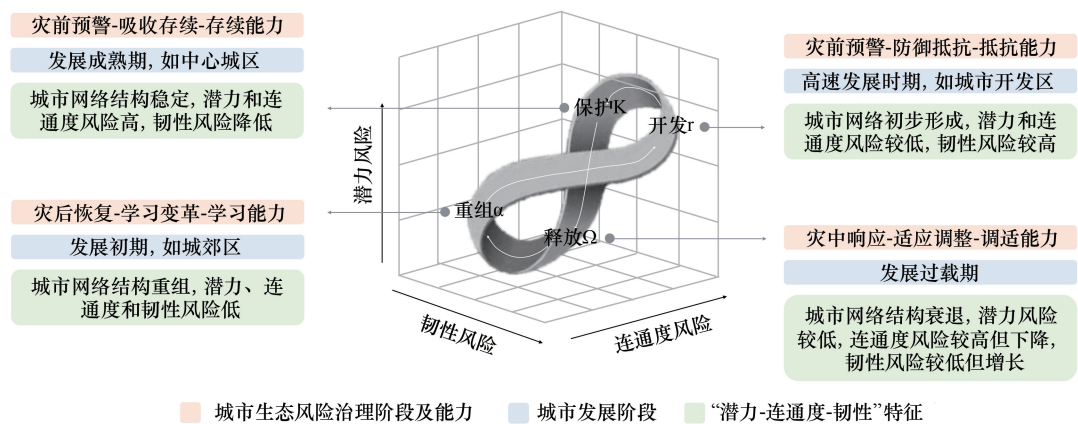


图 4 适应性循环阶段与全过程生态风险管理及城市发展阶段的对应关系

Fig.4 Corresponding relationship between the adaptive cycle phase, the whole process ecological risk management, and the urban development stage

施应对冲击,进行跨区域的设施调配和资源统筹,同时谨防次生灾害的发生。灾后仅涉及承载体危害风险,需要对灾中所得的经验教训和变化模式进行学习分析并完善风险目录清单,只需要准备承载体危害风险的相关措施即可有效应对。下一次风险来临前,基于建立的风险目录清单,可以有效根据各风险关联指标的发展态势确定灾害所处的发展阶段及可能面临的风险后果,使资源分配更加精准高效。

外层为生态风险适应性管理的最终目标:“接纳风险、主动适应、韧性发展、动态循环”。接纳风险指对系统进行环境管理时,将重点放在冲击已经发生的情况下寻求系统所处的新平衡,使冲击再发生时的后果最小化。主动适应指系统在应对冲击时主动响应并动态调整的机制,需要揭示并充分利用复杂适应系统固有的适应性机制(物种间相互作用网、空间构造复杂性和进化可能性等),将其引入系统构建、恢复和管理实践中,使社会意识从克服风险转变为适应变化,突破当前“被动”治理的环境生态技术的局限^[132],变为“主动”的适应性管理。韧性发展指提升系统在冲击后迅速恢复、反弹与提升的能力,需要满足冲击发生后恢复社会生产活动所激增的“韧性需求”。动态循环指在灾前、灾中、灾后的全过程管理中,生态风险适应性管理框架内层与中层的不断循环。每一次灾害发生前都将进行问题识别、生态风险评估和适应性阶段识别,灾中进行应急管理,灾后吸取教训提出生态风险适应性管理措施,并重新进行问题识别和风险评估作为措施调整的依据,下一次灾害发生前将依据上次的学习经验和新的适应性阶段重新识别生态风险水平,使风险再次发生时的不利后果最小化。

4 结论与展望

复杂多变的外部环境和内部压力使城市生态系统的复杂性和脆弱性增加,由于对复杂风险发生概率的预测不能完全规避灾害的发生,全过程动态监测的主动适应性管理逐渐替代静态风险评估与被动的风险治理,生态风险管理开始引入适应性思维,但仍停留在尝试阶段,尚未形成统一规范的理论框架。因此,本文通过适应性循环的动态演进过程统筹考虑干扰发生前、发生中及发生后的应对,深入开展对生态风险与城市发展阶段及相应的管理措施之间的动态响应关系的研究,提出全过程的生态风险适应性管理框架,有助于确定未来发展路径并实现可持续发展。框架基于适应性理论的“潜力-连通度-韧性”三维模型,从提升系统应对冲击的适应性角度出发,通过灾前预警、灾中应对和灾后恢复的动态反馈应对干扰,遵循“接纳风险、主动适应、韧性发展、动态循环”的目标。

本文提出的框架仍存在一定局限性。基于相关研究或专家意见总结的评估指标具有一定主观性,研究结果很容易受到主观因素的影响;社会子系统涉及到的社会经济数据大多为行政单元尺度,难以统一至栅格尺度。本文依据对已有研究的系统分析,讨论了以下几点前沿研究:未来的生态风险管理研究将着重关注如何建立全面的指标体系以应对未知生态风险;在生态风险的定量预测方面,提高栅格数据单元的精度以确保更可靠的结果;阐明相互关联的系统如何在不同尺度上相互作用、匹配以及适应能力的作用方式是适应性研究的难点和挑战;全过程的适应性决策本身应该成为研究、创新和转型的目标。拥有一套丰富的案例研究,分析检查城市全过程及适应性理论主流化的决策过程、采取了哪些行动、这些行动与理论的关系以及理论如何指导系统议程和实施,将是未来全过程适应性管理研究的关键步骤。

参考文献(References):

- [1] 彭建,王仰麟,吴健生,张玉清.区域生态系统健康评价——研究方法与进展.生态学报,2007,27(11):4877-4885.
- [2] Yuan J J, Lu Y L, Wang C C, Cao X H, Chen C C, Cui H T, Zhang M, Wang C, Li X Q, Johnson A C, Sweetnnan A J, Du D. Ecology of industrial pollution in China. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2020, 6(1): 17.
- [3] De Sherbinin A, Schiller A, Pulsipher A. The vulnerability of global cities to climate hazards. *Environment and Urbanization*, 2007, 19(1): 39-64.
- [4] Suter G W, Norton S B, Barnthouse L W. The evolution of frameworks for ecological risk assessment from the red book ancestor. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2003, 9(5): 1349-1360.
- [5] Camargo J A, Alonso Á. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: a global assessment. *Environment*

- International, 2006, 32(6): 831-849.
- [6] DEFRA. A Green Future; Our 25 Year Plan to Improve the Environment. UK; Department for Environment, Food & Rural Affairs, 2023.
- [7] UN. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015—2030. Sendai, JAPAN; United Nations, 2015.
- [8] USEPA. EPA/600/R-01/050 Clinch And Powell Valley Watershed Ecological Risk Assessment. Washington, DC; US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment, Washington Office, 2002.
- [9] 中华人民共和国生态环境部. HJ 1111—2020 生态环境健康风险评估技术指南总纲. 北京: 生态环境部, 2020.
- [10] MHPPE. Premises for Risk Management; Risk Limits in the Context of Environmental Policy. The Netherlands; The Hague; Directorate General for Environmental Protection, 1989.
- [11] Kavlock R J, Daston G P, DeRosa C, Fenner-Crisp P, Gray L E, Kaattari S, Lucier G, Luster M, Mac M J, Maczka C, Miller R, Moore J, Rolland R, Scott G, Sheehan D M, Sinks T, Tilson H A. Research needs for the risk assessment of health and environmental effects of endocrine disruptors; a report of the U.S. EPA-sponsored workshop. *Environmental Health Perspectives*, 1996, 104(Suppl 4): 715-740.
- [12] USEPA. EPA/630/R-95/002F Guidelines for Ecological Risk Assessment. Washington, DC; Risk Assessment Forum, US Environmental Protection Agency, 1998.
- [13] Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, Vennetier M, Kitzberger T, Rigling A, Breshears D D, Hogg E H, Gonzalez P, Fensham R, Zhang Z, Castro J, Demidova N, Lim J H, Allard G, Running S W, Semerci A, Cobb N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 660-684.
- [14] Foley J A, Defries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Coe M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Prentice I C, Ramankutty N, Snyder P K. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [15] Hunsaker C T, Graham R L, Suter G W, O' Neill R V, Barnhouse L W, Gardner R H. Assessing ecological risk on a regional scale. *Environmental Management*, 1990, 14(3): 325-332.
- [16] Fu B J, Liu Y X, Li Y, Wang C, Li C J, Jiang W, Hua T, Zhao W W. The research priorities of resources and environmental sciences. *Geography and Sustainability*, 2021, 2(2): 87-94.
- [17] Council U S N R. Risk Assessment in the Federal Government; Managing the Process. Washington, D. C.; National Academies Press, 1983.
- [18] 刘燕华, 葛全胜, 吴文祥. 风险管理: 新世纪的挑战. 北京: 气象出版社, 2005.
- [19] USEPA. EPA/630/R-92/001 Framework for ecological risk assessment. Washington, DC; Risk Assessment Forum, US Environmental Protection Agency, 1992.
- [20] 陈辉, 刘劲松, 曹宇, 李双成, 欧阳华. 生态风险评价研究进展. *生态学报*, 2006, 26(5): 1558-1566.
- [21] 阳文锐, 王如松, 黄锦楼, 李锋, 陈展. 生态风险评价及研究进展. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1869-1876.
- [22] Zhang X, Eto Y, Aikawa M. Risk assessment and management of PM_{2.5}-bound heavy metals in the urban area of Kitakyushu, Japan. *Science of the Total Environment*, 2021, 795: 148748.
- [23] Tran-Nguyen Q A, Le T M, Nguyen H N Y, Nguyen Q T, Trinh-Dang M. Microplastics in the surface water of urban lakes in central Vietnam: Pollution level, characteristics, and ecological risk assessment. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2024, 9: 100622.
- [24] Uddin M J, Jeong Y K. Urban river pollution in Bangladesh during last 40 years: potential public health and ecological risk, present policy, and future prospects toward smart water management. *Heliyon*, 2021, 7(2): e06107.
- [25] Łyszczarz S, Lasota J, Błońska E. Ecological risk assessment, distribution and source of polycyclic aromatic hydrocarbons in the soil of urban and suburban forest areas of southern Poland. *Forests*, 2024, 15(4): 595.
- [26] Moon H G, Bae S, Chae Y, Kim Y J, Kim H M, Song M, Bae M S, Lee C H, Ha T, Seo J S, Kim S. Assessment of potential ecological risk for polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils with high level of atmospheric particulate matter concentration. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024, 272: 116014.
- [27] Najjar Marín E. The reality of solid waste management in urban areas of Latin America. Vol 28, No 2: 2024, 2024(28, No 2 (Julio - Diciembre)): 98-111.
- [28] Hsu A, Sheriff G, Chakraborty T, Manya D. Disproportionate exposure to urban heat island intensity across major US cities. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 2721.
- [29] Kenyon W. Evaluating flood risk management options in Scotland: a participant-led multi-criteria approach. *Ecological Economics*, 2007, 64(1): 70-81.
- [30] Plate E J. Flood risk and flood management. *Journal of Hydrology*, 2002, 267(1/2): 2-11.
- [31] Hemmati M, Ellingwood B R, Mahmoud H N. The role of urban growth in resilience of communities under flood risk. *Earth's Future*, 2020, 8(3): e2019EF001382.
- [32] Ahiablame L M, Engel B A, Chaubey I. Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012, 223(7): 4253-4273.
- [33] Gruber N, Boyd P W, Frölicher T L, Vogt M. Biogeochemical extremes and compound events in the ocean. *Nature*, 2021, 600(7889): 395-407.

- [34] 刘远新, 刘博, 杨智, 叶清华. 荷兰洪水风险管理对我国中小河流治理的启示. 中国水利, 2023(18): 67-72.
- [35] Chen B, Wu S B, Jin Y F, Song Y M, Wu C, Venevsky S, Xu B, Webster C, Gong P. Wildfire risk for global wildland - urban interface areas. *Nature Sustainability*, 2024, 7: 474-484.
- [36] Carrão H, Naumann G, Barbosa P. Mapping global patterns of drought risk: an empirical framework based on sub-national estimates of hazard, exposure and vulnerability. *Global Environmental Change*, 2016, 39: 108-124.
- [37] Falchetta G, De Cian E, Sue Wing I, Carr D. Global projections of heat exposure of older adults. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 3678.
- [38] Sun Y D, Zhu S P, Wang D P, Duan J P, Lu H, Yin H, Tan C, Zhang L R, Zhao M Z, Cai W J, Wang Y, Hu Y X, Tao S, Guan D B. Global supply chains amplify economic costs of future extreme heat risk. *Nature*, 2024, 627(8005): 797-804.
- [39] Esperon-Rodriguez M, Tjoelker M G, Lenoir J, Baumgartner J B, Beaumont L J, Nipperess D A, Power S A, Richard B, Rymer P D, Gallagher R V. Climate change increases global risk to urban forests. *Nature Climate Change*, 2022, 12: 950-955.
- [40] Forzieri G, Dakos V, McDowell N G, Ramdane A, Cescatti A. Emerging signals of declining forest resilience under climate change. *Nature*, 2022, 608(7923): 534-539.
- [41] Uddin M G, Nash S, Olbert A I. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107218.
- [42] 刘晨宇, 田爱民, 孙菲, 袁鹏. 生态风险评价方法与应用研究进展. 科技管理研究, 2020, 40(2): 79-83.
- [43] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [44] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 1969, 2108-118.
- [45] 雷炳莉, 黄圣彪, 王子健. 生态风险评价理论和方法. 化学进展, 2009, 21(2): 350-358.
- [46] European C. EUR 20418 EN/2 Technical Guidance on Risk Assessment in Support of Commission Directive 93/67/EEC on Risk Assessment for New Notified Substances Commission Regulation (EC) No 1488/94, on Risk Assessment for Existing Substances Directive 98/8/EC of European Parliament and of the Council Concerning the Placing of Biocidal Products on the Market. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003.
- [47] 曹祺文, 张曦文, 马洪坤, 吴健生. 景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架: ESRISK. 地理学报, 2018, 73(5): 843-855.
- [48] 李道进, 逢勇, 钱者东, 陈惠平. 基于景观生态学源-汇理论的自然保护区功能分区研究. 长江流域资源与环境, 2014, 23(S1): 53-59.
- [49] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义. 生态学报, 2006, 26(5): 1444-1449.
- [50] Landis W G, Wieggers J K. Ten years of the relative risk model and regional scale ecological risk assessment. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2007, 13(1): 25-38.
- [51] Wang J, Bai W Q, Tian G H. A review on ecological risk assessment of land use. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(3): 576.
- [52] 付在毅, 许学工, 林辉平, 王宪礼. 辽河三角洲湿地区域生态风险评价. 生态学报, 2001, 21(3): 365-373.
- [53] 蒙古军, 赵春红. 区域生态风险评价指标体系. 应用生态学报, 2009, 20(4): 983-990.
- [54] 许学工, 林辉平, 付在毅, 布仁仓. 黄河三角洲湿地区域生态风险评价. 北京大学学报: 自然科学版, 2001, 37(1): 121-127.
- [55] Guo K, Liu Y, Lan Z Y, Qin L J, Lin T, Gan Q, Jin B B, Chen M. A PETAR method for risk assessment of human health and environment on the regional scale. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2023, 19(1): 239-253.
- [56] Moraes R, Molander S. A procedure for ecological tiered assessment of risks (PETAR). *Human and Ecological Risk Assessment*, 2004, 10(2): 349-371.
- [57] Xu X B, Yang G S, Tan Y, Zhuang Q L, Li H P, Wan R R, Su W Z, Zhang J. Ecological risk assessment of ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China from 1985 to 2020. *Science of the Total Environment*, 2016, 554: 7-16.
- [58] Landis W G. The frontiers in ecological risk assessment at expanding spatial and temporal scales. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2003, 9(6): 1415-1424.
- [59] 刘珍环, 张国杰, 付凤杰. 基于景观格局-服务的景观生态风险评价——以广州市为例. 生态学报, 2020, 40(10): 3295-3302.
- [60] Xu W X, Wang J M, Zhang M, Li S J. Construction of landscape ecological network based on landscape ecological risk assessment in a large-scale opencast coal mine area. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 286: 125523.
- [61] 高小明, 潘璐璐, 周童. 基于 DPSIR 模型的巢湖生态风险评估. 安徽农业大学学报: 社会科学版, 2022, 31(6): 49-54.
- [62] 王美娥, 马万凯, 姜璐, 谢天. 基于改进的“证据-权重法”评估污染土壤生态风险: 以江苏靖江某电镀场地为例. 应用生态学报, 2022, 33(6): 1639-1651.
- [63] Fang D L, Fath B D, Chen B, Scharler U M. Network environ analysis for socio-economic water system. *Ecological Indicators*, 2014, 47: 80-88.
- [64] Zhang W, Liu G Y, Yang Q, Yang Z F. Urban ecological risk transmission model based on Bayesian network. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 296: 126559.
- [65] Wu Z N, Shen Y X, Wang H L, Wu M M. Assessing urban flood disaster risk using Bayesian network model and GIS applications. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2019, 10(1): 2163-2184.
- [66] 卢舒婷, 吴洁, 周思宇, 王龙帅, 王莹, 邢志祥. 基于 AHP-模糊数学法洪涝灾害风险评估. 工业安全与环保, 2022, 48(1): 50-54.
- [67] Zuo Q T, Wu Z N, Zhao W. Uncertainties in Water Resources System and Risk Analysis Method. *Arid Land Geography*, 2003, 26(2): 116-121.

- [68] 谢贤健. 四川省城市建设用地扩张及其占用耕地的时空特征. 水土保持研究, 2024, 31(3): 342-349.
- [69] 郑希平, 陈竹安, 危小建. 鄱阳湖生态经济区建设用地扩张对耕地景观破碎化的影响. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 280-291.
- [70] 赵博舟, 刁洪全. 城市化对水文水资源的影响探讨. 电力勘测设计, 2019(S1): 55-58.
- [71] 焦利民, 肖丰涛, 许刚, 卢延年. 武汉都市区绿地破碎化格局对城市扩张的时空响应. 资源科学, 2015, 37(8): 1650-1660.
- [72] 马远, 李锋, 杨锐. 城市化对生物多样性的影响与调控对策. 中国园林, 2021, 37(5): 6-13.
- [73] 王璋磊. 城市化进程中大气污染的环境影响评价分析. 资源节约与环保, 2023(3): 110-113.
- [74] Chen Y F, Xu Y, Zhou K. The spatial stress of urban land expansion on the water environment of the Yangtze River Delta in China. Scientific Reports, 2022, 12(1): 17011.
- [75] 黄冉. 城市表层土壤重金属污染分析与研究. 化工管理, 2023(26): 57-60, 85.
- [76] 张英民, 尚晓博, 李开明, 张朝升, 张可方, 荣宏伟. 城市生活垃圾处理技术现状与管理对策. 生态环境学报, 2011, 20(2): 389-396.
- [77] Shi P J, Du J, Ye T, Zheng J, Ji M X. Enhancing researches on integrated disaster risk and improving disaster risk coping capacity of business and industry: integrated disaster reduction in China based on "the Sixth Annual IASA-DPRI Forum on Integrated Disaster Risk Management, 2006". Journal of Natural Disasters, 2006, 15(5): 1-6.
- [78] Bai X Y, Yu Z W, Wang B Y, Zhang Y T, Zhou S Q, Sha X H, Li S H, Yao X H, Geng X L. Quantifying threshold and scale response of urban air and surface temperature to surrounding landscapes under extreme heat. Building and Environment, 2024, 247: 111029.
- [79] Ding Y, Wang H, Liu Y, Lei X H. Urban waterlogging structure risk assessment and enhancement. Journal of Environmental Management, 2024, 352: 120074.
- [80] Zhou Y H, Wu Z N, Liang Q H, Xu H S, Wang H L, Xue W J. Threshold and real-time initiation mechanism of urban flood emergency response under combined disaster scenarios. Sustainable Cities and Society, 2024, 108: 105512.
- [81] Wang T, Wang H M, Wang Z Q, Huang J. Dynamic risk assessment of urban flood disasters based on functional area division—a case study in Shenzhen, China. Journal of Environmental Management, 2023, 345: 118787.
- [82] Yang Y, Wang R, Zhou Y, Jiang Y, Wang X. The interaction between land subsidence and urban development in China. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2015, 372: 471-474.
- [83] Ao Z R, Hu X M, Tao S L, Hu X, Wang G Q, Li M J, Wang F, Hu L T, Liang X Y, Xiao J F, Yusup A, Qi W H, Ran Q W, Fang J Y, Chang J F, Zeng Z Z, Fu Y S, Xue B L, Wang P, Zhao K F, Li L, Li W K, Li Y M, Jiang M, Yang Y H, Shen H H, Zhao X, Shi Y, Wu B, Yan Z B, Wang M J, Su Y J, Hu T Y, Ma Q, Bai H, Wang L J, Yang Z Y, Feng Y H, Zhang D H, Huang E H, Pan J M, Ye H Y, Yang C, Qin Y W, He C Q, Guo Y P, Cheng K, Ren Y, Yang H T, Zheng C Y, Zhu J L, Wang S P, Ji C J, Zhu B, Liu H Y, Tang Z Y, Wang Z H, Zhao S Q, Tang Y H, Xing H F, Guo Q H, Liu Y, Fang J Y. A national-scale assessment of land subsidence in China's major cities. Science, 2024, 384(6693): 301-306.
- [84] 郑艳, 翟建青, 武占云, 李莹, 史巍娜. 基于适应性周期的韧性城市分类评价——以我国海绵城市与气候适应型城市试点为例. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(3): 31-38.
- [85] Cai W J, Ng B, Wang G J, Santoso A, Wu L X, Yang K. Increased ENSO sea surface temperature variability under four IPCC emission scenarios. Nature Climate Change, 2022, 12: 228-231.
- [86] 裴孝东, 吴静, 薛俊波, 赵金彩, 刘昌新, 田园. 中国城市气候变化适应性评价. 城市发展研究, 2022, 29(3): 39-46, 52, 封3.
- [87] Armijos M T, Phillips J, Wilkinson E, Barclay J, Hicks A, Palacios P, Mothes P, Stone J. Adapting to changes in volcanic behaviour: Formal and informal interactions for enhanced risk management at Tungurahua Volcano, Ecuador. Global Environmental Change, 2017, 45: 217-226.
- [88] 陈卫平, 康鹏, 王美娥, 侯鹰. 城市生态风险管理关键问题与研究进展. 生态学报, 2018, 38(14): 5224-5233.
- [89] Liu C F, Chen W P, Hou Y, Ma L C. A new risk probability calculation method for urban ecological risk assessment. Environmental Research Letters, 2020, 15(2): 024016.
- [90] 崔胜辉, 李旋旗, 李扬, 李方一, 黄静. 全球变化背景下的适应性研究综述. 地理科学进展, 2011, 30(9): 1088-1098.
- [91] Smit B, Wandel J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 282-292.
- [92] Smit B, Burton I, Klein R J T, Wandel J. An anatomy of adaptation to climate change and variability//Societal Adaptation to Climate Variability and Change. Dordrecht: Springer Netherlands, 2000: 223-251.
- [93] 郭雷. 系统科学进展-1. 北京: 科学出版社, 2017.
- [94] Holland J H. Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity. Chapter 3. New Jersey: Addison-Wesley, 1995.
- [95] Levin S A. Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems. Ecosystems, 1998, 1(5): 431-436.
- [96] Sundstrom S M, Allen C R. The adaptive cycle: More than a metaphor. Ecological Complexity, 2019, 39: 100767.
- [97] Holling C S, Gunderson L H. Resilience and adaptive cycles. Panarchy, 2001, 25-62.
- [98] Linkov I, Trump B D, Keisler J. Risk and resilience must be independently managed. Nature, 2018, 555(7694): 30.
- [99] Park J, Seager T P, Rao P S C, Convertino M, Linkov I. Integrating risk and resilience approaches to catastrophe management in engineering systems. Risk Analysis, 2013, 33(3): 356-367.
- [100] Soufi H R, Esfahanipour A. Modeling Financial Resilience in Commercial Banks using Multinomial Logistic Regression; proceedings of the 17th

- Iranian International Industrial Engineering Conference (IIIEC2021), F, 2021.
- [101] 周利敏. 韧性城市: 风险治理及指标建构——兼论国际案例. 北京行政学院学报, 2016(2): 13-20.
- [102] 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. Changing the resilience paradigm. *Nature Climate Change*, 2014, 4: 407-409.
- [103] Scheffer M, Bascompte J, Brock W A, Brovkin V, Carpenter S R, Dakos V, Held H, van Nes E H, Rietkerk M, Sugihara G. Early-warning signals for critical transitions. *Nature*, 2009, 461(7260): 53-59.
- [104] Aven T. On some foundational issues concerning the relationship between risk and resilience. *Risk Analysis*, 2022, 42(9): 2062-2074.
- [105] 赵传慧, 杨兴柱, 王群. 国内外适应性研究进展与启示. 云南地理环境研究, 2019, 31(3): 65-76.
- [106] 张向龙, 杨新军, 王俊, 刘文兆, 张潇. 基于恢复力定量测度的社会-生态系统适应性循环研究——以榆中县北部山区为例. 西北大学学报: 自然科学版, 2013, 43(6): 952-956.
- [107] 张玉娇, 曾杰, 陈万旭, 黄成. 基于适应性循环的丹江口库区生态风险评价. 水土保持研究, 2022, 29(1): 349-360.
- [108] Bao T T, Wang R F, Song L H, Liu X J, Zhong S W, Liu J, Yu K Y, Wang F. Spatio-temporal multi-scale analysis of landscape ecological risk in Minjiang river basin based on adaptive cycle. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5540.
- [109] 李嘉艺, 孙聰, 郑曦. 基于适应性循环理论的区域生态风险时空演变评估——以长江三角洲城市群为例. 生态学报, 2021, 41(7): 2609-2621.
- [110] Zhang L, Huang Q X, He C Y, Yue H B, Zhao Q B. Assessing the dynamics of sustainability for social-ecological systems based on the adaptive cycle framework: a case study in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 70: 102899.
- [111] 刘焱序, 王仰麟, 彭建, 张甜, 魏海. 基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价. 地理学报, 2015, 70(7): 1052-1067.
- [112] Feng X H, Xiu C L, Li J X, Zhong Y X. Measuring the evolution of urban resilience based on the exposure-connectedness-potential (ECP) approach: a case study of Shenyang city, China. *Land*, 2021, 10(12): 1305.
- [113] Luo F H, Liu Y X, Peng J, Wu J S. Assessing urban landscape ecological risk through an adaptive cycle framework. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 180: 125-134.
- [114] 深圳市城市公共安全技术有限公司. 深圳: 构建“智慧安全城市”. 中国建设信息化, 2021, (15): 14-17.
- [115] 唐林霞. 地震灾害应急救援物资配置的全过程机理研究. 中国行政管理, 2015(2): 125-128.
- [116] 陈天慧, 田耀. 美国防洪治理的策略演变及启示——以密西西比河洪水治理为例. 中国水利, 2017(13): 51-53.
- [117] 黄一洁. 民族地区自然灾害“全过程治理”研究——以连南瑶族自治县大坪镇为例. 农业灾害研究, 2020, 10(7): 158-160.
- [118] 孙忠, 运迎霞, 耿红生. 智慧技术导向下的大城市内涝减缓方法研究. 天津大学学报: 社会科学版, 2021, 23(6): 525-530.
- [119] Ranjan R, Marshall E, Shortle J. Optimal renewable resource management in the presence of endogenous risk of invasion. *Journal of Environmental Management*, 2008, 89(4): 273-283.
- [120] Wassénius E, Crona B I. Adapting risk assessments for a complex future. *One Earth*, 2022, 5(1): 35-43.
- [121] Janssen M A, Schoon M L, Ke W M, Börner K. Scholarly networks on resilience, vulnerability and adaptation within the human dimensions of global environmental change. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 240-252.
- [122] Adger W N. Vulnerability. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 268-281.
- [123] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [124] Folke C, Hahn T, Olsson P, Norberg J. Adaptive governance of social-ecological systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 2005, 30: 441-473.
- [125] Pickett S T A, Cadenasso M L, Childers D L, McDonnell M J, Zhou W Q. Evolution and future of urban ecological science: ecology in, of, and for the city. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2016, 2(7): e01229.
- [126] Stratford C, Brewin P, Acreman M, Mountford O. A simple model to quantify the potential trade-off between water level management for ecological benefit and flood risk. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2015, 15(3): 150-159.
- [127] 蔡秋蓉, 叶继红. 城市公共安全韧性治理何以可能——适应性循环模型的视角. 天府新论, 2021(4): 118-126.
- [128] 邵亦文, 徐江. 城市韧性: 基于国际文献综述的概念解析. 国际城市规划, 2015, 30(2): 48-54.
- [129] Zhang J Q, OKADA N, TATANO H. Integrated natural disaster risk management: comprehensive and integrated model and Chinese strategy choice. *Journal of Natural Disasters*, 2006, 15(1): 29-37.
- [130] Oliver-Smith A. Anthropological research on hazards and disasters. *Annual Review of Anthropology*, 1996, 25: 303-328.
- [131] Dakos V, Matthews B, Hendry A P, Levine J, Loeuille N, Norberg J, Nosil P, Scheffer M, De Meester L. Ecosystem tipping points in an evolving world. *Nature Ecology & Evolution*, 2019, 3(3): 355-362.
- [132] 日本东北大学 生态适应性科学全球卓越研究中心, 李伟. 生态适应性科学: 活用自然机制, 开拓可持续未来. 北京: 科学出版社, 2021.