

DOI: 10.5846/stxb201705140890

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.

Chen W P, Kang P, Wang M E, Hou Y. Review on urban ecological risk management. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): 5224–5233.

城市生态风险管理关键问题与研究进展

陈卫平^{1,2,*}, 康 鹏^{1,2}, 王美娥^{1,2}, 侯 鹰^{1,2}

1 中国科学院生态环境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

摘要:我国目前正处于社会经济转型和城市化进程加快时期,随着城市化发展和城市人居环境的变化,城市生态风险受到越来越多关注。在综述国内外城市生态风险管理研究进展,总结风险源与受体特点和风险评价方法的基础上,结合城市生态风险管理的需求,明确了城市生态风险的管理目标,将管理目标系统归纳划分为控制目标、调控目标和规划目标 3 个层次;在解析城市生态风险管理特点的基础上,结合风险管理目标从弹性力、动态管理性和空间异质性 3 个方面对生态风险管理措施与方案进行了总结分析,并进一步探讨了风险管理保障机制。从生态风险管理目标制定、构建城市生态系统特点的风险管理体系及其管理机制等方面提出了建议与展望,以期推动我国城市生态风险管理的发展。

关键词:城市化;生态风险;评价;管理目标;弹性管理;动态管理;异质性管理

Review on urban ecological risk management

CHEN Weiping^{1,2,*}, KANG Peng^{1,2}, WANG Mei'e^{1,2}, HOU Ying^{1,2}

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

Abstract: With rapid urbanization and social-economic transformation, the changes of ecological structure, processes, and functions in urban ecosystems have resulted in the broad decline of environmental quality and ecosystem services. Thus, urban ecological risk management is important to regulate and protect urban ecosystems, which have many vital issues regarding regional sustainable development. Based on the review of researches on ecological risk management, and risk sources, receptor characteristics as well as risk evaluation methods in urban ecosystems, we defined the objectives of urban ecological risk management according to the need for risk management, which can be interpreted as control objectives, regulation objectives, and planning objectives. Of these, the control objectives focus on the protected entities and relative attributes. The regulation objectives are defined as cost-benefit analyses of corresponding risk prevention. Finally, the planning objectives integrate risk management into the blueprint of urban planning. Being oriented toward characteristics of urban ecosystem risk management, the methods and models of ecological risk management were analyzed based on the aspects of resilience, dynamic management, and spatial heterogeneity. Considering the character of vulnerability and resilience in urban ecosystems, the restoration and regulation function of natural ecosystems should receive more attentions. Furthermore, building an ecological infrastructure is a key point to enhance response capacity, with integration and optimization of different adaptive capabilities. Ultimately, building a resilient community is the basic unit of risk management, and its construction norms and design features should be incorporated into urban planning and construction to promote the substantial progress of urban risk management. The effects of managing actions should be analyzed in

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0505702);中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDB-SSW-DQC034);国家自然科学基金项目(41601556)

收稿日期:2017-05-14; 网络出版日期:2018-04-04

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

<http://www.ecologica.cn>

accordance with scenario analysis , considering the dynamic character of urban ecosystems , changes in the landscape , and risk prevention. Management that optimizes the ecological pattern should be integrated into urban planning. The risk map could provide significant information for the management of specific ecological risks , whereas the best management plan could be formatted considering the demand , and require coordination and trade-offs among key regulating services. The mechanisms of urban ecological risk management are discussed at the end of the article and suggestions on urban ecological risk management are put forward including specifying risk management objectives , building a risk management framework with urban characteristics , and establishing a management mechanism.

Key Words: urbanization; ecological risk; assessment; risk management objectives; resilient management; dynamical management; heterogeneity management

城市化是我国现代化建设的重大战略。城市的发展极大地推动了我国社会经济和文明的发展 ,与此同时 ,也带来一系列的生态环境问题^[1]。高速的城市化加剧了人与自然之间的矛盾 ,城市的维持一方面需要消耗大量的自然资源 ,另一方面向环境排放大量的废弃物 ,导致城市和周边区域生态环境质量退化、生态功能下降、城市居民健康风险提高等问题 ,影响了城市人居环境质量的提高和可持续发展^[2]。特别是在城市化和气候变化双重压力所导致的各种风险下城市生态系统的应对管理 ,已成为区域可持续发展的重要问题和研究热点^[3]。当前 ,国内外学者在城市环境污染风险、城市居民健康风险、城市自然灾害风险等方面已开展了大量的研究。城市是一个高度异质性的社会-经济-自然复合生态系统 ,城市生态风险不仅与社会经济发展和人类活动密切相关 ,也与自然因素的影响有关。如何在提升城市生态系统自适应能力的基础上提出科学有效的风险管理方法与调控对策 ,是当前城市生态学研究的一个难点^[4]。基于此 ,本文提出城市生态风险管理不同层次的目标 ,结合城市生态系统特点(弹性恢复力、系统动态性和异质性)对风险管理进行了系统阐述 ,为快速城市化和全球气候变化双重驱动力背景下的城市生态风险管理与调控提供帮助和指导。

1 城市生态风险

根据 USEPA 生态风险评价框架和城市生态学原理 ,城市生态风险可以认为是城市发展与城市建设导致城市生态环境要素、生态过程、生态格局和生态服务发生的可能不利变化 ,以及对人居环境产生的可能不良影响^[5]。

城市生态系统面临多种胁迫 ,按类型分城市生态风险源主要包括以不透水地表增加为主要特征的物理胁迫和以污染物排放为特征的化学胁迫^[5]。管理者可依据城市生态学原理对城市生态系统格局进行科学配置 ,实现对城市物理胁迫最大程度的调控与管理 ,化学胁迫可通过相应的环境管理与控制技术得到改善^[6]。与物理和化学胁迫相比 ,对城市生境生存与发展不利的各种生物因素如外来物种入侵、病原菌传播等的生物胁迫和自然风险源(地震、暴雪、冰雹、沙尘暴等) ,与城市自然生态环境条件的关系更为密切 ,具有偶然性、小概率和不可控等特点。

城市生态系统包括生物个体、种群、群落、生态系统以及城市整体水平等多个层次不同等级的功能实体 ,上述功能实体对城市化的胁迫响应的时间和空间跨度逐渐增大。城市化过程破碎、分离、弱化了自然生境 ,简化、同化了物种组成 ,从根本上改变了自然生态系统的过程和功能^[7]。城市复合生态系统的过程、功能受影响是各种生态环境问题产生的重要原因。因而 ,城市生态风险评价研究更应从城市生态系统整体水平开展 ,既可充分体现城市化特征 ,反映城市化过程与生态过程和生态功能变化的响应关系 ,也更符合城市生态风险管理的需求。

目前 ,相对风险法是应用较为广泛的城市生态风险评价方法。该方法将多重风险源、多重压力、多种生境与综合生态影响联系起来 ,强调区域的空间异质性 ,适用于大尺度生态风险评价。通过建立风险源-生境-生态受体的关联框架 ,按生态发生过程将评价区域划分为多个子区 ,量化风险源与生态终点之间的暴露-响应关

系^[8]。构建基于动态性的生态风险系统评价模型,以物质流为物质循环量纲,将控制理论运用到生态网络方法中,建立生态风险评价模型,分析系统结构功能之间所受到直接和间接风险^[9]。

另一方面,采用社会-生态学模型评价城市生态风险能够使评价过程与管理措施相结合,为生态风险管理提供方法模型的支撑。例如,生态系统脆弱性模型(SSVM)以生态系统服务为评价终点分析不同经济社会管理情景下相关的生态系统状态变化^[10];而DPSIR理论框架模型则可用于分析社会经济活动驱动下生态系统过程状态改变对生态系统服务的影响^[11]。此外,景观生态风险评价方法通过分析不同压力源对景观格局与过程的影响以及同一驱动因素或压力源下各生态系统服务的响应,为其后的生态风险管理提供理论指导和技术支撑^[12-13]。

综合指数法和模型模拟法是城市生态风险评价的重要手段,其共同特点是包含了风险源强度、风险受体与评价终点特征等信息,能够对风险产生的概率、强度及时空特征进行系统全面的估计和预测。社会生态系统评价方法能把握系统整体性及其子系统之间作用关系,能够直接为生态风险管理服务。

2 城市生态风险管理演进

20世纪中期美国开始把城市环境风险管理纳入到城市政府的职能范围。20世纪90年代以来,英国伦敦、日本东京、美国纽约等国际化大都市结合各自的情况,把生态风险管理作为城市应急管理的工作之一^[14]。20世纪90年代末期,美国“低影响开发”(low impact development),英国“可持续城市雨水系统”(sustainable urban drainage systems),澳大利亚“水敏感城市设计”(water sensitive urban design)、“绿色基础设施”(green infrastructure)等概念相继提出,旨在管理城市洪涝灾害、水环境污染等风险^[15]。

风险管理是根据风险评估结果,综合考虑法律、政治、社会、经济等因素,所采取的系列风险控制措施^[16]。国外对生态风险管理的研究关注生态风险管理措施的成本及其对后续管理措施的影响,注重多种决策方案的评估和比较权衡,强调基于监控的风险信息反馈机制以及风险各方利益者的参与和沟通,提倡综合防范和减灾的思路^[17]。目前,国际上对洪水风险管理方法研究较为成熟。洪水管理机制强调多种手段的综合运用,管理过程伴随洪水风险的整个过程^[18-19]。国内学界注重于对生态风险评价的研究,在此基础上提出生态风险的具体管理对策。虽然国内政府职能部门对自然灾害和外来物种入侵等方面的风险管理已较为成熟,但学界对生态风险管理的研究还不够系统和深入。完整的生态风险管理体系在国内还很有限,已有的体系缺乏有效的信息交流、共享和反馈机制和对风险管理措施和成本效益的评估^[20]。

3 城市生态风险管理特性研究

3.1 城市生态风险管理目标

缺乏明确的风险管理目标被认为是现有生态风险研究的“一贯缺陷”。Suter和Cormier^[21]指出决策者对生态风险评价结果关注较少的原因之一是研究没有对管理目标进行明确阐述,即利益方和决策者不知道要“保护什么”。在USEPA生态风险评估指南中“问题形成”阶段一个主要的任务就是制定所有利益相关方可接受和可理解的清晰表述的目标,进而在限定目标和范围内做出风险管理决策^[22]。然而,在如何制定管理目标的细节方面指南并没有给出明确的指导建议。Gregory等提出风险评估与管理时应遵循两个重要标准:一是管理的收益是否大于其投入的成本;二是适应性管理措施是否会引起未来管理的变革^[23]。

鉴于城市生态系统具有多风险源、多受体、动态性和高异质性特点,城市生态风险管理应遵循风险防范为主、效益最优化的原则。相应地,城市生态风险管理的目标应综合考虑生态风险受体、保护实体与属性、风险管理过程和成本,在保护城市生态系统与城市人群健康的基础上,实现以最小的代价获取最大的风险控制效益以及系统降低城市化生态风险胁迫的目标。由于缺乏统一、清晰的管理目标,限制了生态风险评价与管理研究成果在城市生态管理中的应用^[24]。制定明确的管理目标是开展风险管理的前提。依据城市生态风险特征,风险管理目标可划分为三个层次,即控制目标、调控目标和决策目标。

为达到城市生态中多种风险源复合作用下有效降低风险的控制目标,风险管理目标应锁定在实体及其属性。一方面要关注实体(城市生态系统结构与过程和城市人群健康)的客观状态,另一方面更要关注实体内在的本质及其所提供的基本功能,以城市生态系统功能和城市人群健康为基本需求^[25]。管理者需要在满足和优化控制目标的前提下,设计多个风险控制情景,对相应的风险防控成本和收益进行界定,在次基础上,对风险源防范所取得的社会经济生态效益及其人体健康效益进行核算和货币化,合理设计管理调控方案,实现以最小的代价获取最大的风险控制综合效益的调控目标^[26]。就决策目标而言,城市生态风险管理旨在不断提高城市生态系统适应性,将风险管理纳入城市规划和未来发展的蓝图中,融入社会经济系统管理中,从而引领未来管理的变革^[27]。

3.2 城市生态风险管理特点

以人类活动为主的城市生态系统风险管理,其风险发生作用过程更为复杂,其风险管理本身既需达到传统风险管理的需要,也需要根据城市生态系统特性进行发展。城市作为一个复杂的自适应系统,其自身特点就是自组织性,系统内部相互作用可能会产生相应外界干扰的抵抗力。城市系统组织与发展是一个自适应的过程,由3个关键决定因素决定,即自适应、物质流动和异质性^[28-29]。把握好适应性发展和决定因素的关系,能够引导城市生态系统往稳定高效的方向发展。

根据风险管理需求和生态系统系统特点,城市生态风险管理有以下3个特征:1)城市生态系统具有易损性和弹性,该特点要求管理者在制定管理措施时考虑自然生态系统及其功能的恢复,提升城市整体的风险应对能力,如基于城市生态基础设施建设对城市生态风险过程进行调控;2)城市生态系统具有动态性,一方面基于城市景观动态变化,依据模型模拟设计和评估风险调控措施;另一方面从能量代谢的动态角度将水能关系纳入城市生态风险的风险管理中;最后从城市生态格局优化着手,将风险防范管理纳入城市规划;3)城市生态系统具有高异质性,该特点要求管理者针对城市某类特定生态系统风险源,制定风险地图,进而针对关键生态服务提供者的空间异质性,从服务提供与风险应对、关键服务协同与权衡等角度,形成最佳管理方案。

4 城市生态风险管理体系

4.1 城市生态系统弹性管理

生态学弹性(恢复力)可认为为生态系统在保持现有基本结构和功能作用的前提下,抵抗外界干扰的能力^[30],可理解为社会生态复合系统两者相互作用的表征。一般来说,生态系统依赖其结构与功能的相互适应性即多重稳定性。城市生态系统结构越复杂,功能越稳定,自我调节能力就越强,反馈机制就越完善^[31]。由此看出城市生态系统弹性力或者适应性管理是生态风险的重要基础,管理生态系统弹性力是风险管理中的关键与核心。

4.1.1 弹性管理的理论意义

城市生态系统的自我调节能力是有限的,超过一定的界限,反馈能力将丧失,自我调节将失去作用,从而导致系统被破坏甚至崩溃。针对城市某特定弹性能力的研究,一般对其最大可能自适应能力即承载能力进行估算。城市生态系统中弹性力可分为某特定弹性力(目标弹性力)和整体弹性力^[32-33]。特定弹性力能够明确指出某种弹性力应对某种具体风险,例如城市热岛加剧对应人类和生态系统健康热平衡的适应力;而整体弹性力是指系统现有整体的弹性力应对未知而不确定扰动的表现。Walker和Salt指出,系统内某类特定弹性力虽然重要,但城市生态系统作为一个有机整体其本质并不是孤立的,过多强调与优化特定的弹性力可能会使生态系统整体活力减弱、多样性降低,可能会导致系统整体自适应能力降低^[34]。从系统论角度来看,城市生态系统是复杂自适应的系统,其主要特点是自组织性,其适应性管理可理解为自组织性在一定时空范围内的发展与变革,即从一个旧组织形态突破到一个新组织秩序的过程。因此,把握好系统与自适应相关的关键因素,能引导城市生态系统弹性与自适应能力向上循环的良性发展。

4.1.2 弹性管理的实践

城市生态系统服务的格局和多样性与生态健康与人类福祉密切相关,在城市生态系统弹性建立与发展中

有着基础性的作用^[35]。城市绿色与蓝色生态基础设施所提供的调节服务在风险应对与管理中发挥着不可替代的作用,通过合理方式设计生态基础设施可显著增加其弹性能力。例如 Vogt 等从场地自然特征、树木本身属性、生态系统服务和所需管理建立城市树数据库 Citree,在考虑到城市异质性的基础上最大限度地发挥树木抗风险的自适应性能力^[36]。Davies 等通过量化城市森林的重要生态系统服务来加强其应对风险的弹性能力^[37]。在应对城市热浪的风险中,Yu 等提出了城市冷却岛和效率阈值等评价管理指标,用来管理和布局城市绿地,从而增加城市对气候变化的抵御力^[38]。Hatvani-Kovacs 等建立生态基础设施、建筑规划设计、公共卫生和社会研究相结合的框架,全方位管理城市热应力弹性^[39]。考虑到多种生态服务之间的相互作用关系,基于生态系统自适应管理体系已成为一种潜在全方面的成本效益分析的方法,用来评估和管理各种生态基础设施在应对气候有关灾害的效果^[40]。2007 年 King County 与华盛顿大学与 ICLEI 联合,出版了各级政府应对气候变化的手册中指出:保护生态系统和自然缓冲区,综合考虑基本生态服务之间协同与权衡,建立有弹性的生态社区,以减轻洪水、风暴潮、热浪所带来的风险概率和效应^[41]。因此,城市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,构建多维度高效的弹性基础设施,从而实现风险管理效益的最大化。

城市生态系统弹性管理既要倚重基于生态系统格局过程与功的生态服务,也要从社会经济弹性管理着手推进。社区是城市管理的基本单元,许多研究计划明确以弹性社区作为风险管理的基本单元。在联合国出版的关于政府管理和灾害预防的报告中明确提出:城市规划和地方政府在降低风险方面的最重要途径是建立弹性社区^[42]。国际地方环境倡议理事会(ICLEI)的研究计划将“弹性社区”作为应对城市风险弹性管理的基本单元。该计划提出“弹性社区”管理可利用工程和管理知识、技术创新和社会教育识别社区现有的脆弱性、提升社区的抵抗能力,降低风险概率^[43]。此外,Buergelt 和 Paton 基于社区组织形式,建立了符合风险管理的承载力模型,从而将社区弹性管理推广到城市风险管理的层面^[44]。

从国内外城市生态系统弹性管理的实践来看,如何评估某特定的生态系统适应力,把握好某特定弹性力与系统整体自适应能力的关系,并最终有效地引导城市系统自适应能力的发展,是实现城市生态风险管理三层次目标的关键。实践中将弹性社区作为风险管理的基本单元,将其建设规范、设计特征等纳入到城市规划建设中,能够推动城市风险管理的实质性进展。

4.2 城市生态风险动态管理

城市生态系统的动态性特点要求管理者开展城市生态风险的动态管理。针对城市景观格局长时间序列的改变,进行基于景观动态模拟的时效性风险管理。最后,可基于风险管理目标和城市可持续发展的目标,将风险管理纳入到城市规划的制定和对现有规划的修正。

4.2.1 基于景观动态模拟的时效性风险管理

城市化发展过程中最直观表征就是城市扩张和发展,大规模不透水地表建设影响到原本生态系统的结构与过程,使得生态系统服务呈现出下降的趋势。由于城市中景观格局变化本身就是动态变化的过程,根据时间序列分析和未来情景设计,可对城市历史洪水管理和生态服务的变化进行动态模拟以及匹配相应风险管理。Pérez-Molina 等建立基于城市扩张细胞自动机模型耦合相关水文过程模型,用来动态模拟洪水和城市扩张之间适应性的变化,从而评估分析政策驱动下缓解措施的效果^[45]。依据地理加权的细胞自动机结合四种生态服务的评价模型,Xu 等对 1985—2020 年太湖流域内生态系统服务进行模拟评估,对流域内城市生态风险管理的动态管理进行了一定的探讨^[46]。城市生态风险管理需注重景观动态全过程管理,即从回顾性风险事件评价、现有状态的评估、未来情景风险预警等过程,评估和模拟针对性对策和措施的效果。对于城市生态系统,从风险作用的时间序列宏观层面进行剖析,通过城市格局优化和城市生态基础设施等弹性力的建设降低风险事故发生概率和潜在后果,构建风险全过程的动态管理体系,满足风险管理的时效性的要求^[47]。

4.2.2 基于规划目标的生态风险管理

作为动态发展的城市生态系统,在其发展过程中可能会遇到一系列风险效应。因此,许多研究计划指出,为了达到风险管理的最终目的,应将可适应性风险管理纳入到城市规划发展中。亚洲城市减灾计划

(AUDMP) 提倡在全球气候变化背景下, 将“城市风险预防”作为发展战略纳入到规划中^[48]。

Dovie 构建基于风险筛选工具(CRISTAL) 和 U-学习理论的交互式风险管理平台, 决策加纳沿海城市气候变化的风险中, 强调沿海地区绿色区域建设可提升预防风险的能力^[49]。将风险管理纳入城市相应规划发展中, 首先需要将风险管理重点转移到风险前期预防上, 这样有助于生态系统安全与健康及自然资源及生命财产的保护。沿海气候变化影响评估决策支持系统(DESYCO) 的建立, 通过整合气候情境下多信息多准则决策分析(MCDA) 模型, 采用可扩展和可复制的框架可在一定范围内评估规划与决策中生态效益^[50]。但由于在短期内无法评估风险管理措施所带来的生态保护和环境效益, 需要明确规划中实施风险管理措施所需的时间较长。最后, 要对已进行的风险管理措施开展后评估, 将规划中出现的新问题和有效经验纳入到新的规划计划中^[51]。将其具体规划措施与布局纳入到城市生态系统规划中, 合理规划城市布局和功能用地, 提升城市生态系统自适应能力。例如基于潜在生物多样性收益的“生态土地利用互补”, 可以在规划新的城市地区时采用 ELC 来提升生态系统的弹性^[52]; 将产权转让作为一种主动的战略工具, 定义了空间(再)生产、开发、保护和管理过程, 并通过替代土地管理模式提出了一种创造性城市生态系统弹性的方法, 规避市场和规划机构对其存在和发展的影响^[53]。具体而言, 可结合风险管理重点“弹性社区”的建立, 科学控制人口经济社会发展规模, 降低风险源的产生和风险事件的发生概率, 减小城市化对城市生态系统的胁迫作用。

4.3 城市生态风险异质性管理

城市生态系统具有高度的空间异质性, 内部存在不同功能格局分异现象, 不同单元内经济活动差异性较大, 使得风险源与保护受体间作用途径和方式多样, 导致城市生态风险管理中生态风险分区更加复杂。首先, 针对城市特定生态系统风险源, 制定风险地图, 确定城市生态风险空间分布差异规律和大小, 可以为城市规划和管理提供重要支撑。其次, 针对关键生态服务提供者的空间异质性, 从服务提供与风险应对、关键服务协同与权衡等角度, 形成最佳管理方案, 可解决现有风险管理过程中风险应对与风险收益不匹配的问题。

4.3.1 风险地图管理

近年来, 风险地图已成为风险管理中迅速发展的新领域^[54]。风险地图不但可以探讨风险源的空间特征, 而且可作为风险可视化的重要工具。由于风险地图具有可视化、直观性等特点, 被越来越多应用于风险的安全管理以及应急决策中。Jacquin 等提出一套基于城市复杂对象的特征分类方法, 用来绘制城市扩张中洪水灾害评估图, 可为城市水利和规划部门制定土地利用规划和城镇化均衡发展提供相应的建议^[55]。目前, 欧洲许多国家在洪水管理中普遍采用专家打分定性方法, 通过影响矩阵打分计算出潜在的损伤程度图, 从而绘制出洪水风险图, 给各利益相关方提供最直接的风险管理信息^[56]。在综合环境要素质量、土地利用特征和生态系统服务功能后, 应用风险地图方法为区域土地利用制定合理的发展策略和方式, 以期最大限度地减少风险转变为灾害的可能性^[57]。总体上, 城市生态风险地图绘制可确定城市中高风险区域、风险敏感区域及环境质量恶化区域, 为城市生态风险管理及预警提供技术支撑。

4.3.2 基于生态服务供需关系的风险管理

城市生态基础设施作为城市生态服务的主要载体, 其格局分布及其与周边作用关系, 很大程度上决定城市生态系统弹性力表现, 是城市生态风险管理的重要环节。Pulighe 等在综述城市绿色基础设施研究中, 明确指出整合了多学科、先进理论和方法的绘图模型, 不但可以得到提供服务的大小与流向, 也可帮助城市管理者 and 规划从业者更有效地进行风险管理^[58]。在选取与抗洪能力的相关弹性指标基础上, 绘制城市景观中抗洪能力水平的空间分布, 建立适用于城市区域的空间数据管理平台, 跟踪和评价其在洪水中表现^[59]。绿色基础设施空间规划模型用来评估绿色基础设施的六项主要生态服务属性, 提供综合各利益相关者的驱动方法来最大限度地提高生态系统服务, 推动绿色基础设施在风险管理中协同作用^[60]。城市生态系统服务功能与生态风险匹配失衡是城市生态风险管理面临的另一个重要挑战。对于风险易发的地方与关键生态服务供给的重点区域进行规模、强度匹配分析, 有助于现有风险管理过程中风险应对与风险收益不匹配的问题, 形成最佳管理方案, 从而更好地利用生态系统服务, 实现弹性和可持续性风险管理^[61]。McPhearson 针对城市化驱动下纽

约生态系统服务提升及其与风险管理空间上的不匹配问题开展了研究,在空间尺度上,从生态系统多样性、生态服务和生态风险管理的角度提出了改善管理的方案和措施,提升了风险管理效益的建议^[62]。

4.4 风险管理后续——保障实施机制

城市生态风险管理是相互关联的、结构化、程序化的系统化工作,包括风险评价结果的决策、制定风险管理措施、管理决策的执行、以及监控和不断改进等主要步骤。

弹性管理方面,需要构建并完善包括政府监管、金融手段等方面的城市生态风险管理实施保障体系。政府监管包括制定与风险管理政策相关的法律法规、空间规划和自然环境保护方案、技术导则等。金融手段包括激励管理风险的各种工程措施建设、运行和维护等方面。基于不同保障手段的优化组合,做到人力、物力、财力及其他相关资源的合理配置,以最小的投入,获得最大的效益。

在动态管理方面,畅通的信息共享机制尤为重要。管理实践中应当以全面风险管理为基础,将生态风险活动信息化,利用 WebGIS、网络服务器架构、物联网等相关理论和方法以及多智能主体决策技术,实现“多主体、全过程、交互式”的城市生态风险信息共享机制。此外,信息共享机制需要整合管理和决策信息,保障信息流通,从而为相关主体提供足够高质量的信息服务,以便实现系统预定目标的控制,有效开展生态风险管理工作。

5 结论与展望

构建完善的城市生态风险管理体系是应对快速城市化和全球气候变化胁迫的重要途径。总体上,城市生态风险具有易损性和弹性、动态性和高度异质性等特点,需要基于这些特点建立针对性的管理体系如生态基础设施弹性管理、生态系统自适应管理等,进而实现三层次的风险管理目标(图1)。目前针对城市生态风险管理的研究还不够系统和深入。在管理实践中,缺乏将管理目标同城市生态风险发生过程进行有机关联的手段,管理特点还不明确,难以满足城市生态风险全过程动态管理的需求。本文依据对已有研究的系统分析,提出以下几点展望:

1) 明确城市生态风险管理目标。缺乏清晰的管理目标,限制了生态风险评估与管理成果在城市生态管理中的应用。制定所有利益相关方可接受和可理解的形式清晰的管理目标,进而在限定目标和范围内做出风险管理决策,是城市生态管理成功的前提。

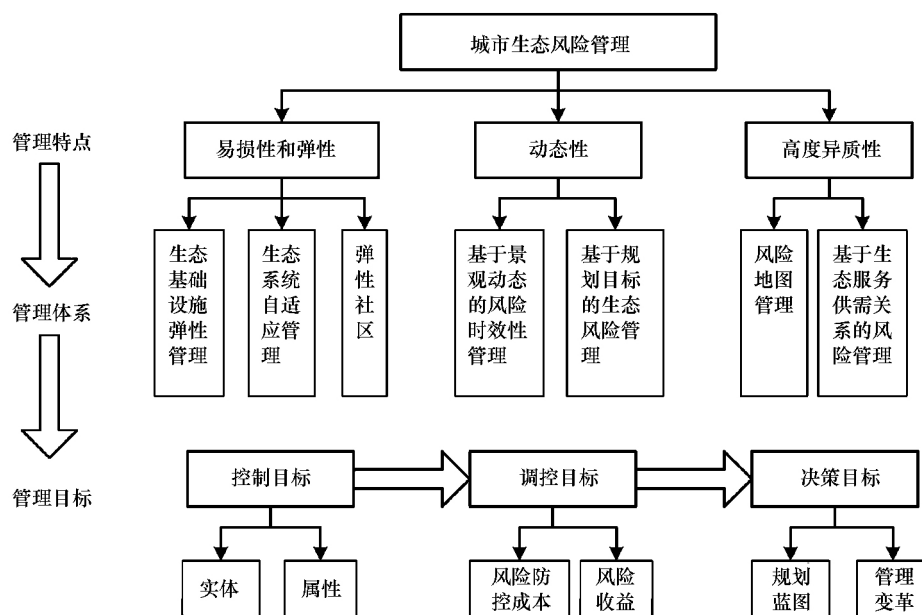


图1 城市生态风险管理体系示意图

Fig.1 The framework for urban ecological risk management

2) 探索建立符合城市生态系统的风险管理体系。在环境风险管理和自然灾害风险管理方面国内外已积累了成熟的经验。这些经验可以进一步推广到城市复合生态系统中。管理实践中需要加强城市生态系统整体弹性能力的建设,探索建立成熟的弹性社区的范式;加强城市生态系统风险动态管理,将弹性社区建设纳入到城市规划中,引领城市规划管理的变革;注重城市风险异质性管理,寻求关键生态服务的供需平衡;综合以上因素建立全方位-全过程的城市生态风险管理体系。

3) 创新城市生态风险管理的体制与机制。城市生态风险管理目标的实现,需要从体制机制进行创新,建立信息共享机制、决策机制、公众参与机制、实施保障机制,与各种调控措施和手段协同作用,充分调动利益相关方的积极性,实现生态风险管理与区域的经济效益有机结合。

总之,城市作为复合生态系统,其生态风险管理需在较大尺度和较高层次上进行分析和统领。从城市生态系统层次开展城市生态风险评价与管理方法研究,明确城市生态风险评价的对象、范围以及技术方法,构建符合城市生态系统的风险管理体系,指导城市生态管理,对提高我国城市生态管理水平具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] 王少剑,方创琳,王洋. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度. 生态学报, 2015, 35(7): 2244-2254.
- [2] Grimm N B, Foster D, Groffman P, Grove J M, Hopkinson C S, Nadelhoffer K J, Pataki D E, Peters D P C. The changing landscape: ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2008, 6(5): 264-272.
- [3] Rosenzweig C, Solecki W, Hammer S A, Mehrotra S. Cities lead the way in climate-change action. *Nature*, 2010, 467(7318): 909-911.
- [4] Pickett S T A, Cadenasso M L, Grove J M. Resilient cities: meaning, models, and metaphor for integrating the ecological, socio-economic, and planning realms. *Landscape and Urban Planning*, 2004, 69(4): 369-384.
- [5] 王美娥,陈卫平,彭驰. 城市生态风险评价研究进展. 应用生态学报, 2014, 25(3): 911-918.
- [6] 张小飞,王如松,李正国,李锋,吴健生,黄锦楼,于盈盈. 城市综合生态风险评价——以淮北市城区为例. 生态学报, 2011, 31(20): 6204-6214.
- [7] 李伟峰,欧阳志云. 城市生态系统的格局和过程. 生态环境, 2007, 16(2): 672-679.
- [8] Wayne G, Landis W G, Janice K. Ten years of the relative risk model and regional scale ecological risk assessment. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2007, 13: 25-38.
- [9] Chen S Q, Fath B D, Chen B. Information-based Network Environ Analysis: a system perspective for ecological risk assessment. *Ecological Indicators*, 2011, 11(6): 1664-1672.
- [10] De Chazal J, Quétiér F, Lavorel S, Van Doorn A. Including multiple differing stakeholder values into vulnerability assessments of socio-ecological systems. *Global Environmental Change*, 2008, 18(3): 508-520.
- [11] Atkins J P, Burdon D, Elliott M, Gregory A J. Management of the marine environment: integrating ecosystem services and societal benefits with the DPSIR framework in a systems approach. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(2): 215-226.
- [12] Su S L, Xiao R, Jiang Z L, Zhang Y. Characterizing landscape pattern and ecosystem service value changes for urbanization impacts at an eco-regional scale. *Applied Geography*, 2012, 34: 295-305.
- [13] Ernstson H, Sörlin S. Ecosystem services as technology of globalization: on articulating values in urban nature. *Ecological Economics*, 2013, 86: 274-284.
- [14] Gencer E A. The Interplay between Natural Disasters, Vulnerability, and Sustainable Development: Global Trends and Local Practice in Istanbul [D]. New York: Columbia University, 2007: 49-93.
- [15] 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.
- [16] 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: 20-21.
- [17] Sergeant A. Management objectives for ecological risk assessment-developments at US EPA. *Environmental Science & Policy*, 2000, 3(6): 295-298.
- [18] Kenyon W. Evaluating flood risk management options in Scotland: a participant-led multi-criteria approach. *Ecological Economics*, 2007, 64(1): 70-81.
- [19] 魏一鸣,金菊良,杨存建,黄诗峰,范英,陈德清. 洪水灾害风险管理理论. 北京: 科学出版社, 2002: 1-9.
- [20] 周平,蒙古军. 区域生态风险管理研究进展. 生态学报, 2009, 29(4): 2097-2106.

- [21] Cormier S M , Suter II G W. Revitalizing environmental assessment. *Integrated Environmental Assessment and Management* , 2008 , 4(4) : 385–385.
- [22] US Environmental Protection Agency. Generic Ecological Assessment Endpoints (GEAEs) for Ecological Risk Assessment. EPA/630/P-02/004F. Washington , DC: EPA Office of the Science Advisor , 2003.
- [23] Gregory R , Failing L , Higgins P. Adaptive management and environmental decision making: a case study application to water use planning. *Ecological Economics* , 2006 , 58(2) : 434–447.
- [24] Faber J H. European experience on application of site-specific ecological risk assessment in terrestrial ecosystems. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* , 2006 , 12(1) : 39–50.
- [25] 康鹏, 陈卫平, 王美娥. 基于生态系统服务的生态风险评价研究进展. *生态学报* , 2016 , 36(5) : 1192–1203.
- [26] Folke C , Carpenter S , Elmqvist T , Gunderson L , Holling C S , Walker B. Resilience and sustainable development: building Adaptive capacity in a world of transformations. *Ambio* , 2002 , 31(5) : 437–440.
- [27] Dodman D , McGranahan G , Dalal-Clayton B. Integrating the Environment in Urban Planning and Management: Key Principles and Approaches for Cities in the 21st Century. Nairobi , Kenya: United Nations Environment Programm , 2013: 84.
- [28] Holling C S. Understanding the complexity of economic , ecological , and social systems. *Ecosystems* , 2001 , 4(5) : 390–405.
- [29] Levin S A. Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems. *Ecosystems* , 1998 , 1(5) : 431–436.
- [30] Holling C S. Resilience and stability of ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics* , 1973 , 4: 1–23.
- [31] Holling C S. The resilience of terrestrial ecosystems: local surprise and global change//Clark W C , Munn R E , eds. *Sustainable Development of the Biosphere*. London: Cambridge University Press , 1986.
- [32] Klein R J T , Nicholls R J , Thomalla F. Resilience to natural hazards: how useful is this concept? *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards* , 2003 , 5(1/2) : 35–45.
- [33] Walker B H , Pearson L. A resilience perspective of the SEEA. *Ecological Economics* , 2007 , 61(4) : 708–715.
- [34] Walker B , Salt D. Resilience Thinking: Sustaining Ecosystems and People in A Changing World. Washington , DC: Island Press , 2006.
- [35] McPhearson T , Andersson E , Elmqvist T , Frantzeskaki N. Resilience of and through urban ecosystem services. *Ecosystem Services* , 2015 , 12: 152–156.
- [36] Vogt J , Gillner S , Hofmann M , Tharang A , Dettmann S , Gerstenberg T , Schmidt C , Gebauer H , Van De Riet K , Berger U , Roloff A. Citree: a database supporting tree selection for urban areas in temperate climate. *Landscape and Urban Planning* , 2017 , 157: 14–25.
- [37] Davies H J , Doick K J , Hudson M D , Schreckenberg K. Challenges for tree officers to enhance the provision of regulating ecosystem services from urban forests. *Environmental Research* , 2017 , 156: 97–107.
- [38] Yu Z W , Guo X Y , Jørgensen G , Vejre H. How can urban green spaces be planned for climate adaptation in subtropical cities? *Ecological Indicators* , 2017 , 82: 152–162.
- [39] Hatvani-Kovacs G , Belusko M , Skinner N , Pockett J , Boland J. Heat stress risk and resilience in the urban environment. *Sustainable Cities and Society* , 2016 , 26: 278–288.
- [40] Brink E , Aalders T , Ádám D , Feller R , Henselek Y , Hoffmann A , Ibe K , Matthey-Doret A , Meyer M , Negrut N L , Rau A L , Riewerts B , Von Schuckmann L , Törnros S , Von Wehrden H , Abson D J , Wamsler C. Cascades of green: a review of ecosystem-based adaptation in urban areas. *Global Environmental Change* , 2016 , 36: 111–123.
- [41] 蔡建明, 郭华, 汪德根. 国外弹性城市研究述评. *地理科学进展* , 2012 , 31(10) : 1245–1255.
- [42] United Nations(UN) . Local governments and disaster risk reduction: good practices and lessons learned. Geneva: UNISDR , 2010.
- [43] 王冰, 张惠, 张伟. 社区弹性概念的界定、内涵及测度. *城市问题* , 2016 , (6) : 75–81.
- [44] Buerget P T , Paton D. An ecological risk management and capacity building model. *Human Ecology* , 2014 , 42(4) : 591–603.
- [45] Pérez-Molina E , Sliuzas R , Flacke J , Jetten V G. Developing a cellular automata model of urban growth to inform spatial policy for flood mitigation: a case study in Kampala , Uganda. *Computers , Environment and Urban Systems* , 2017 , 65: 53–65.
- [46] 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 , 554–555: 7–16.
- [47] Alberti M , Asbjørnsen H , Baker L A , Brozović N , Drinkwater L E , Drzyzga S A , Jantz C A , Fragoso J , Holland D S , Kohler T A , Liu J G , McConnell W J , Maschner H D G , Millington J D A , Monticino M , Podestù G , Pontius Jr R G , Redman C L , Reo N J , Sailor D , Urquhart G. Research on coupled human and natural systems (CHANS) : approach , challenges , and strategies. *Bulletin of the Ecological Society of America* , 2011 , 92(2) : 218–228.
- [48] Vatsa K S , Joseph J. Disaster management plan for the state of Maharashtra , India: evolutionary process. *Natural Hazards Review* , 2003 , 4(4) : 206–212.
- [49] Dovie D B K. A communication framework for climatic risk and enhanced green growth in the eastern coast of Ghana. *Land Use Policy* , 2017 , 62:

326–336.

- [50] Torresan S , Critto A , Rizzi J , Zabeo A , Furlan E , Marcomini A. DESYCO: a decision support system for the regional risk assessment of climate change impacts in coastal zones. *Ocean & Coastal Management* , 2016 , 120: 49–63.
- [51] Walker B H , Holling C S , Carpenter S R , Kinzig A P. Resilience , adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society* , 2004 , 9(2) : 5.
- [52] Colding J. ‘Ecological land-use complementation’ for building resilience in urban ecosystems. *Landscape and Urban Planning* , 2007 , 81(1/2) : 46–55.
- [53] Eren S G , Günay A S. Analyzing the transfer of immovable property rights for urban resilience: an alternative land management model for the Karaburun-Cesme-Seferihisar Peninsula. *Ocean & Coastal Management* , 2015 , 118: 139–157.
- [54] Basta C , Neuvel J M M , Zlatanova S , Ale B. Risk-maps informing land-use planning processes: a survey on the Netherlands and the United Kingdom recent developments. *Journal of Hazardous Materials* , 2007 , 145(1/2) : 241–249.
- [55] Jacquin A , Misakova L , Gay M. A hybrid object-based classification approach for mapping urban sprawl in periurban environment. *Landscape and Urban Planning* , 2008 , 84(2) : 152–165.
- [56] Molinari D , Minucci G , Mendoza M T , Simonelli T. Implementing the European “floods directive”: the case of the Po river basin. *Water Resources Management* , 2016 , 30(5) : 1739–1756.
- [57] Norman L M , Villarreal M L , Lara-Valencia F , Yuan Y P , Nie W N , Wilson S , Amaya G , Sleeter R. Mapping socio-environmentally vulnerable populations access and exposure to ecosystem services at the U.S.-Mexico borderlands. *Applied Geography* , 2012 , 34: 413–424.
- [58] Pulighe G , Fava F , Lupia F. Insights and opportunities from mapping ecosystem services of urban green spaces and potentials in planning. *Ecosystem Services* , 2016 , 22: 1–10.
- [59] Kotzee I , Reyers B. Piloting a social-ecological index for measuring flood resilience: a composite index approach. *Ecological Indicators* , 2016 , 60: 45–53.
- [60] Meerow S , Newell J P. Spatial planning for multifunctional green infrastructure: growing resilience in Detroit. *Landscape and Urban Planning* , 2017 , 159: 62–75.
- [61] Cadenasso M L , Pickett S T A , Schwarz K. Spatial heterogeneity in urban ecosystems: reconceptualizing land cover and a framework for classification. *Frontiers in Ecology and the Environment* , 2007 , 5(2) : 80–88.
- [62] McPhearson T , Hamstead Z A , Kremer P. Urban ecosystem services for resilience planning and management in New York City. *Ambio* , 2014 , 43(4) : 502–515.