李 璐,段存存,龚逸伟,等.城市生态环境风险评估方法与模型研究进展 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):4124-4134.
Li L, Duan C C, Gong Y W, et al. Research progress on urban ecological environment risk assessment methods and models [J]. China Environmental Science, 2025,45(7):4124-4134.

城市生态环境风险评估方法与模型研究进展

李 璐[1],段存存[1],龚逸伟[1],张加文[1],杨铠名[1],高 进[1],曹智华[2],程红光[1*] (1.北京师范大学水科学研究院,北京 100875；2.北京师范大学国际学术交流中心 100082)

摘要：采用综合指数法、概率风险表征与多属性决策等多种城市生态环境风险评估方法,研究城市生态环境中多风险源、多受体及复杂暴露途径带来的治理挑战,系统分析风险源从自然到人为、从单一到多元的转变过程,以及风险受体从人体健康向社会经济等多领域的扩展与相应的评价指标.结果表明,综合类评价模型能够克服单一模型的局限性,整合生态环境、社会经济、人群健康等多个维度的信息,从全局视角有效应对复杂风险问题,是未来开展大尺度城市生态环境风险评估的重要方向,为城市可持续发展与风险管理决策提供了科学支持.

关键词：风险源；风险受体；风险评估方法；综合类模型
中图分类号：X17 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)07-4124-11

Research progress on urban ecological environment risk assessment methods and models. LI Lu[1], DUAN Cun-cun[1], GONG Yi-wei[1], ZHANG Jia-wen[1], YANG Kai-ming[1], GAO Gin[1], CAO Zhi-hua[2], CHENG Hong-guang[1*](1.College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China；2.International Exchange Center, Beijing Normal University, Beijing 100082, China). *China Environmental Science*, 2025,45(7)：4124~4134

Abstract：Using methods such as composite index evaluation, probabilistic risk characterization, and multi-attribute decision-making, this study investigates the governance challenges posed by multiple risk sources, diverse receptors, and complex exposure pathways in urban ecological environments. It systematically analyzes the transition of risk sources from natural to anthropogenic and from single to multiple origins, as well as the expansion of risk receptors from human health to broader domains such as socio-economic systems, along with the corresponding evaluation indicators. The results show that integrated assessment models can overcome the limitations of single-method approaches by combining information across ecological, socio-economic, and public health dimensions. These models offer a holistic perspective to effectively address complex risk issues and represent a crucial direction for large-scale urban ecological risk assessments, providing scientific support for sustainable urban development and risk management decision-making.

Key words：risk source；risk receptor；risk assessment method；comprehensive model

城市化进程在持续推进的同时,也引发了一系列的风险性问题,如人口剧增、污染加剧、环境恶化、资源短缺、交通拥堵、住房紧张、食品安全威胁、治安隐患、突发事件等,严重地影响和制约着城市的健康发展[1].因此,城市规划、建设和管理策略中需要更有效的风险管理与防控.推进风险导向的城市规划和建设是现代城市可持续发展的迫切要求,对于确保一个地区的可持续稳定发展至关重要[2].风险治理应融入城市发展的各个方面,包括土地利用、建设管理、环境管理、社会福利等.国外城市发展经验表明,当城市化率达到50%~60%的时候,经济比较容易失调,城市矛盾相对频发,易于出现所谓“城市病”[3].而当今中国正处于“城市社会来临”的关键节点,全国范围内大多数较为发达的城市在政治、经济以及社会等方面都面临着重大的结构性转变,随之而来的是各类城市风险的增加和城市治理难度的进一步加大[4].

个体风险评估主要由受体分析、风险危害、暴露评价以及风险表征共同构成,其评估主要有三大要素:风险受体,风险暴露途径,风险危害[5].与个体风险评估相比,城市生态环境风险评价侧重于关注区域的产业布局、功能区划、环境风险受体分布等大尺度的环境风险因素,是风险源危险性、暴露有效性、受体易损性以及环境抵抗力4个维度的要素综合作用的结果.其三要素是脆弱性、暴露和危害[6].

收稿日期：2024-12-20
基金项目：国家自然科学基金项目(41771496)
* 责任作者, 教授, chg@bnu.edu.cn

城市生态环境风险的特殊性使得风险评估过程更加复杂和不确定[7].我国的环境风险研究由原先对单一污染物的研究深入到对多种污染物同时研究的领域,从对局部环境的风险评估深入到区域性环境风险评估的研究领域,环境风险评估技术也由定性研究向定量研究的方向进行发展.城市生态环境风险评估的研究重点是为了明确城市生态风险评价的对象、范围和技术方法,揭示城市生态风险产生的机理与过程,为城市生态环境保护及其可持续发展提供理论基础.

城市生态环境风险评估方法与模型是提出“城市病”应对策略的重要依据,其评估结果可以为优化城市布局、调整产业结构提供科学指导,缓解人口、资源与环境之间的矛盾,有效减轻“城市病”的负面影响[8].如何科学评估和有效管理城市生态环境风险已成为生态学、城市规划与管理等领域的重要议题.本文基于城市生态学原理及生态环境风险评价方法论,结合国内外有关城市生态风险评价的文献报道,对城市生态环境风险评估方法与模型的研究进展进行总结和探讨,并对未来的研究方向进行展望,以期促进城市生态环境风险评价研究的发展.

1　城市生态环境风险

1.1　风险的研究进展

关于环境风险的研究最早起源于 20 世纪 30 年代人们对自然灾难的认识、评价及防治.经过数十年的发展,研究重点逐渐转向以人类活动为主要诱因的环境风险事故研究.1983 年《联邦政府的风险评估:管理程序》首次提出生态风险评估,1989 年 CRA 对其进行完善,指出生态风险评估是对某一种危害或者多种因素导致的负面效应的程度进行科学评价[9],是评估由于暴露于一种或多种压力源而可能发生或正在发生不利生态影响的可能性的过程,其评价结果可用于指导生态环境保护和管理工作.已有的研究把城市生态风险评价纳入了区域生态风险评价范畴,或者作为城市环境风险评价的内容之一[10].环境风险的最终受体不仅限于人类,还包括生态系统要素.城市环境风险研究在内容、方法上开始向综合性方向发展[11].Suter 等[12]在环境风险评估三步法(问题阐述、分析阶段和风险表征)的基础上,将人类健康风险和生态风险研究相结合,提出了一套更加适用的综合性环境风险评价框架.

1.2　城市生态环境风险的评价范围

城市是一个集地理、经济、政治、社会及其文化的空间地域实体[13].一些研究基于行政区划来定义“城市”,即按照城市的行政边界来界定(如市辖区、直辖市),适用于一些政策性或地方性研究.另一种定义方式是根据城市的功能区来划分,如都市圈、城市群、城市扩展区等.考虑了城市的辐射影响和周边区域的生态环境压力,能够较为全面地反映城市生态系统的实际影响范围[14].

如果采用行政区划定义,评估的范围通常较小,只关注城市本身的生态风险,忽略了与周边地区的交互.此时,评估的模型和方法可能偏向于局部性、定量的分析.基于较小的行政区划或单一城市的评估结果可能会高估或低估一些跨区域问题的影响,例如城市扩展带来的环境破坏可能被低估,跨区域的空气质量污染则可能被忽略.

若采用都市圈或城市群的定义,评估需要涵盖更广泛的区域,涉及多个城市的生态风险.此时,评估方法更多地依赖于综合性模型或多尺度模型,如生态足迹分析、环境影响评估(EIA)等,考虑到多个区域的资源和污染流动.因此需要更多的区域性和系统性评估方法,如生态网络分析、区域集成模型、空间回归模型等,以处理更复杂的空间关系和跨区域的环境风险.城市群生态环境风险评估是指针对多个城市组成的城市群区域,分析其整体生态环境风险的过程.它包括跨区域资源利用、污染转移和协同治理等方面.城市群内部协调难度较大,不同城市发展水平差异显著.因而数据获取困难,尤其是跨区域环境数据的统一性和精度问题难以协调[15].

2　风险源与风险受体

2.1　风险源与风险驱动

随着城市生态环境风险评价的不断推进,风险源由最初关注化学污染等单一风险源过渡到关注多元化的风险源(噪声、固废、突发事故等).风险源识别作为风险评价的准备阶段又可分为风险源辨析与描述两个层次,风险源辨析可理解为对阻碍生态修复实现的风险因素的辨别[16];风险源描述则侧重于对风险源进行定性、定量分析,并形成风险程度、发生概率等初步认识.

城市生态环境风险主要来源包括自然风险源和人为风险源,自然风险源主要指洪涝灾害等气候变化和突发性灾害事件,人为风险源指由于人类活动引起、可能导致损失或危害的潜在因素,人为风险源的驱动力为城市经济社会活动,包括人口高度密集、土地利用改变和不透水地表增加、工业生产和污染物排放、交通压力增加等.表 1 列举了不同风险源分类及其评价指标.

吴健生等[17]基于危险性-脆弱性-潜在损失三维评价框架,选取高程、坡度、剖面曲率、平面曲率、地层岩性、断层距离、NDVI、边坡点核密度和年平均降雨量等指标评价深圳市街道尺度滑坡灾害生态风险,采用蒙特卡洛模拟进行不确定性分析,进而提出生态风险管理措施.Badina 等[18]基于现有人口密度、人口波动机制以及人口指标与官方统计数据的偏差特征,利用聚类分析和类型学进行人为风险评估,城市工业和公用事业设施也被添加到人口脆弱性的概念中,提出可以通过领土发展规划,优化交通流量和城市空间的功能分区来管理风险和降低人口的脆弱性.

城市生态风险评价中自然风险源具有偶然性、小概率和高强度的特点,并且与人为风险源紧密相关. 人为风险源具有经常性和可控制性,概率大但是强度可以预测与控制.

表 1 风险源分类及评价指标

Table 1 Classification of risk sources and evaluation indicators

风险源分类	风险类型	指标	文献
自然风险源	气象灾害	降雨强度;极端温度;台风频率;洪水水位;风速	[19]
	地质灾害	平面曲率、地层岩性、断层距离、NDVI、边坡点核密度;	[20]
	生态系统退化	植被覆盖率;生物多样性指数;水体富营养化指数	[21]
人为风险源	工业污染	废水废气排放量,土壤重金属浓度,危险废物存储量	[22]
	交通污染	汽车尾气排放量,交通噪声水平(dB),城市拥堵指数	[23]
	城市规划	河流作业,灌渠改造,热岛效应,垃圾产生量	[24]

2.2 风险受体及其评价指标

风险受体即风险承受者,在风险评价中指生态系统中可能受到来自风险源的不利作用的组成部分,包含生物体和非生物体.鉴于城市生态环境风险的复杂性,风险受体通常受到多风险源交叉共同作用.随着生态环境风险评价的不断推进,风险受体已经由人体健康扩展到经济发展、城市安全、流域景观乃至整个生态系统的大范围.如何科学有效地构建城市生态环境风险评价指标,对城市生态环境有效治理提供基础依据至关重要.

Xu 等[25]选取了地形、气候、人口密度、国内生产总值等 16 个评价指标分析了石羊河流域生态脆弱性的时空变化;Xiao 等[26]从植被、地形、土壤、气象、社会文化等角度选取 11 个影响因素,分析川西山区生态脆弱性时空格局演变.Yepyintsev 等[27]以沃罗涅日市为例,研究了社会经济对城市生态环境风险的影响,发现市区环境污染和环境风险因素的主要来源是车辆排放(90%以上).Duan 等[28]研究居民关于城市绿色基础设施的看法及城市绿色基础设施与社会人口变量的关系.结果表明,居民对空气质量差和高温的关注度远高于洪水等自然灾害事件.在对环境风险对人类福祉影响的认知方面,具有较高教育水平的老年人和女性受访者对这些影响最敏感.

生物个体、种群、群落水平上的评价终点主要体现在城市自然生态系统中这些风险受体对环境胁迫的响应[29].城市生态系统水平上的评价终点更多地体现了社会、经济等要素.城市整体水平上的评价终点包括: 景观格局、生态要素质量、生态过程、服务功能,以及城市自然与社会灾害、事件发生频率等.

在城市生态风险评价中,不同等级的评价终点相互作用、互相关联.人类是最重要的风险受体,人体和人群的健康状况、过敏症状,以及流行病、地方病、老龄化等是城市生态风险的重要评价终点.

表 2 系统梳理了城市生态环境风险受体类型及其评价体系.自然生态类聚焦大气/水质/土壤污染及地质灾害指标,社会经济类涵盖资源承载力、发展水平等复合参数,人群健康类突破传统生物指标,整合心理健康与社会福祉数据.研究通过大气质量指数、人均 GDP、癌症发生率等量化指标构建多维度评价

体系,为识别关键风险节点、建立跨尺度监测网络提　　供科学依据.

表 2　城市生态环境风险受体及评价终点

Table 2　Urban ecological environment risk receptor and evaluation endpoint

受体类型	评价终点	评价指标	参考文献
自然生态环境	大气	大气质量指数	[30]
	水质	化学需氧量,重金属含量,藻类含量	[31]
	土壤	农药残留量,重金属含量,有机污染物含量,盐碱化	[32]
	地质灾害损失	软土厚度,砂液化,土壤湿陷度,地下水污染,地面沉降	[33]
	洪涝损失	主要汛期的极端降雨量,海拔,地形,排水密度,滞洪流域模量	[34]
	气象灾害损失	综合气象干旱指数,台风强度	[35]
	生态系统	生态系统服务功能,生态系统过程,生态系统组成与结构	[36]
社会经济	经济水平	人均 GDP	[37]
	城市发展水平	城市化率,废弃物处置能力,基础设施建设能力,交通流量密度	[38]
	景观格局	斑块密度,整体连通性指数,辛普森多样性指数	[39]
	资源承载力	能源消费强度、人均水资源消耗量	[40]
	突发环境事件	突发环境事件频率	[41]
人群健康	身体健康	死亡率,发病率,人群流行病,癌症发生率,地方病	[42]
	心理健康	焦虑、精神病、情绪或成瘾障碍	[43]
	幸福度	犯罪率,绿地暴露程度	[28]

3　生态环境风险评估方法

3.1　城市生态环境风险评估定义

城市生态环境风险评估方法指为了识别、量化和分析城市生态环境中可能的风险或问题而采取的一系列步骤和技术手段.通常侧重于如何收集、处理和分析数据,强调评估过程中使用的策略和技术,属于更具操作性和实践性的内容.

单一城市生态环境风险评估专注于某一特定领域的风险评估,如大气污染、水质污染、土壤污染等.它通常涉及较为单一的环境因素或系统,目标是分析特定领域的生态风险,评估方法和模型都较为简单,数据需求相对较少.可以用统计分析法对大气污染、水质指数、土壤污染进行相应的评估[44].

综合性城市生态环境风险评估指的是对整个城市生态系统的健康、稳定性和可持续性进行全面评估.需要考虑到环境生态系统本身的复杂性和动态性,多种生态因素的交互作用,包括环境污染、土地利用变化、生物多样性丧失、气候变化等,以及数据获取的可行性等问题.具有成因复杂、系统性、空间与时间维度广、数据要求高等特点[45].

3.2　城市生态环境风险评估方法的分类

定性的评估方法包括专家咨询、德尔菲法、质性比较分析(QCA)等. 当缺乏完备客观数据、需要依赖专业知识时,专家咨询法快速有效.比如在城市生态环境综合风险初筛或指标权重赋值时,可组织专家打分讨论.德尔菲法适合于需要整合多位专家意见、缺乏客观数据的复杂问题[46].当研究涉及多个城市或区域案例、希望探究不同情景下风险成因组合时,可采用 QCA[47].例如比较多个城市生态风险治理案例,以找出导致风险水平高低的关键条件组合.

定量评估方法包括层次分析法、灰色关联分析、物元分析和主成分分析法等.Flaherty 等[48]采用 k 均值聚类工具,通过纳入爱尔兰的多项社会经济和生态指标以及地理和人口统计数据来分析粮食安全.Han 等[49]建立了基于熵权的模糊评价方法,对京津冀都市圈 13 个城市 2003~2012 年城市生态安全排名进行了分析.Kleemann 等[50]提出了一种基于专家的贝叶斯信念网络方法,用于评估西非加纳北部的农业生态安全,考虑多种驱动力和土地利用变化.然而,传统的评价方法很难避免确定指标权重时的主观性,无法有效处理系统相互作用的定性和定量性质.

面对需要考虑多种风险指标的情况,以往的研究通常采用综合指数法来表征城市生态环境风险[51].综合指数法能够综合多个因素指标进行评价并定量化.对于非定量化因子,采用质量等级评分,并兼顾专家意见,由定性转向定量.但综合指标只能定性或半定量地描述风险,反映风险是否存在.

与综合指标法相比,概率风险表征是一种描述

风险发生可能性的定量方法,能够更好地体现风险概念,增加风险评估结果的准确性和实用性[52].将概率风险表征应用于城市生态风险评估的关键是计算单指标风险概率和多指标风险概率.Liu 等[53]提出了一种基于计算机模拟的、能够方便计算风险概率的新方法.该方法利用生态模型量化多个生态风险相关指标,通过蒙特卡洛模拟计算单个指标的风险概率,并应用 copula 模型计算多个指标的联合风险概率,具有评估不同类型城市生态风险的潜力.

城市生态环境风险评估面临着生态系统复杂性、动态性以及数据获取可行性等挑战,传统的评估方法如层次分析法、灰色关联分析等虽然广泛应用,但往往存在主观性较强和定性定量结合困难的局限[54].综合指数法常被用于将多个因素合成一个指标进行定量评估,但它通常只能定性或半定量地描述风险,无法准确反映风险的发生可能性.相比之下,概率风险表征通过计算单指标和多指标的风险概率,提供了更准确的评估结果,增强了评估的实用性.

4 城市生态环境风险综合评价模型

模型模拟法是生态环境风险评价的最主要、应用最广泛的方法,是研究和评估生态系统结构与功能的重要工具,尤其是在面对复杂的城市生态环境风险时,能够提供多角度的科学支持.

综合评价模型不同于风险评估方法,往往针对复杂现实问题,涵盖了跨学科数据整合能力、模型的系统性和面向应用的综合策略.在城市生态环境风险评估中建立的综合评价模型,可能需要同时考虑自然生态指标和社会经济指标,将风险度、韧性、适应能力等多维要素纳入模型.其结果为管理实践提供直观的综合风险指数或等级.

结合评价模型所关注的核心对象(生态环境要素、社会经济指标、人群健康状况等)、研究目的(评估生态风险、经济风险、健康风险等)和应用领域等多方面因素[55],本文将城市生态环境风险综合评价模型分为生态环境模型、社会经济模型、人群健康模型以及综合类模型四个类别[56].未来的生态环境风险评估将趋向更加多元化、精细化和动态化,以应对复杂的环境挑战并为可持续发展提供科学依据.

表 3 总结了各类城市生态环境风险综合评价模型的优缺点.综合类模型能够减小在风险评价过程中由于易混淆的多重因子、复杂的交互作用以及数据缺口而产生的不确定性,是今后大尺度生态风险评价方法包括城市生态风险评价方法的发展方向.综合模型的优势在于其全局视角和多维度评估,能为城市可持续发展提供更为准确的预测和更有针对性的应对措施.

表 3 城市生态环境风险综合评价模型

Table 3 A comprehensive assessment model of urban ecological environment risk

模型类别	模型名称	优点	缺点	参考文献
生态环境模型	洪水风险评价模型	多维度综合评估,时空分析全面	指标体系局限	[57]
	热风险评价模型	准确识别和量化城市热岛效应及其对居民健康和环境的影响	无法充分考虑复杂的局部气候变化和城市微气候差异,导致评估结果的局限性.	[58]
	LER 模型	能够评估土地利用变化对生态环境的影响,并考虑景观异质性,适用于多尺度的生态风险分析	模型的输入数据需求量大,且对土地利用变化的假设可能过于理想化,忽略了动态变化中的不确定性	[59]
社会经济模型	净效益分析模型	综合评估环境风险管理的经济效益与环境效益,帮助决策者优化资源配置	过于依赖于经济学理论和假设,忽视了生态系统非市场价值和长期环境风险.	[60]
	PSR 模型	系统地分析社会、经济和环境因素之间的相互作用,能够全面评估生态环境的压力和响应	无法捕捉复杂的环境系统反馈和非线性关系,导致评估结果不够精准	[61]
人群健康模型	CLEA 模型	可以有效评估土壤中污染物的传输与暴露风险	假设土壤污染物的迁移过程简单,可能忽视实际环境中污染物的复杂行为和多变性	[62]
	LCR 模型	能够评估环境中多个污染源的相互作用和长时间的累积效应,适合长期环境风险评估	通常假定污染物的影响是线性和可加的,忽略了环境中潜在的复杂交互作用和阈值效应,可能低估风险	[63]
	分布式滞后非线性模型	可以描述复杂的非线性关系和滞后效应,适用于评估城市生态系统中长时间滞后和复杂反馈机制	过于依赖历史数据和假设,无法有效应对城市环境中突发事件或急剧变化的情况,且模型的调整和优化难度较大	[64]

续表 3

模型类别	模型名称	优点	缺点	参考文献
综合模型	多尺度环境事故风险评估模型	能够在不同空间尺度和时间尺度上评估环境事故的风险,适用于复杂多变的城市生态环境	不同尺度之间的结果不一致或难以协调,增加了模型整合和比较的难度	[65]
	GCAM 模型	可以同时考虑气候变化、能源、土地使用和经济系统之间的相互影响,适合用于长期环境风险预测	模型的假设和参数设置可能过于简化,无法完全反映实际系统的复杂性,可能导致预测结果的偏差	[66]
	IAM 模型	能够整合经济、能源和环境等多领域数据,为城市生态环境决策提供综合性分析	忽视了短期非线性效应和突发事件的影响,导致对突发生态灾难的预测不足	[67]
	系统动力学模型	通过模拟系统内部的反馈机制,帮助理解生态环境风险的动态变化过程	模型的结果可能对初始条件和参数假设高度敏感,小范围的变动可能导致大幅度的结果差异	[68]
	多介质持久性模型	能够分析污染物在不同介质(如空气、水、土壤)中的迁移与持久性,适合评估污染风险	模型过于依赖理论假设,可能无法有效反映真实世界中的动态变化和不确定性,导致结果的可靠性较低	[69]

4.1　生态环境模型

在城市生态环境风险评价中,自然环境模型通过多种方法和指标评估城市面临的生态风险,有助于决策者制定有效的防灾减灾措施.

城市洪水风险评价是洪水管理的重要内容,Li 等[57]以郑州市为例,通过构建基于地理信息系统(GIS)的多指标城市洪水风险评价框架,提出了一种综合考虑灾害性、脆弱性和暴露性影响的城市洪水风险评价方法.其中,灾害指数包括年均降雨量和距河流距离两个指标;脆弱性指数包括人口密度、GDP 和土地利用/土地覆被(LULC)3 个指标;暴露指数包括海拔、坡度和归一化植被指数(NDVI)3 个指标.采用层次分析法确定城市洪水风险指数因子的权重值,采用 Jenks 自然突变分类法进行洪水风险评价,将城市洪水风险分为极高、高、中、低、极低 5 类,为郑州市今后城市防洪减灾提供科学依据.

Wang 等[58]在利用 IPCC 的风险评估框架和对地观测、健康和社会生态数据,对澳大利亚的城市进行了高温风险评估,包括热暴露指数、热危害指数和热脆弱性指数 3 个单项指标,以及一个综合的热健康风险指数(HHRI).其中,热脆弱性指数采用经典的 Cutter 脆弱性框架,利用主成分分析(PCA)方法构建.除此之外,Wang 进一步研究了不同层次的 HHRI 在地区人口和社会经济地位、住房特征和建成环境方面的地区特征的不公平性.结果表明,高温风险区主要分布在悉尼西南部、墨尔本西郊等远离市中心的居民区,而布里斯班和珀斯的高温风险区相对于其他省会城市更零星地分布在大都市区的各个区域.研究还发现,不同热风险水平的地区在人口和社会经济特征、居住特征、建筑环境等方面存在着不公平性.与低热风险地区相比,高热风险地区往往以居民为主,绿色覆盖率较低.

土地利用和土地覆盖变化(LUCC)作为人类活动和自然生态系统的首要响应,反映了区域生态环境中自然因素、社会经济和政策的相互作用,是探讨人类活动对生态系统影响的合适尺度,可用于评估城市扩张和生物多样性等生态风险.与传统的生态环境风险评估不同,景观生态风险(LER)评估分析生态风险对景观组成和功能的影响,强调生态风险的时空异质性[59].Guo 等[70]基于 PLUS 模型的多情景模拟预测广州市土地利用变化的未来趋势,结合随机森林算法、适宜性开发概率、基于多类随机斑块种子(CARS)机制的 CA 模型、等构建土地利用模拟框架,评估广州市多情景下的 LER.结果表明,近 20 年来,广州市城市化进程明显.铁路、公路和二级公路对广州市耕地、草地和建设用地的扩张分别具有主要影响;2000~2020 年广州市整体 LER 处于较低水平.

城市生态环境风险评价不仅依赖于对自然环境因素的全面分析,还需要结合社会经济和政策因素,采取多维度的评估框架.这些研究为城市管理者提供了数据支持和理论依据,有助于制定更加精准的生态保护和灾害应对策略,确保城市可持续发展与居民生活环境的安全.

4.2　社会经济模型

采用社会经济模型评价城市生态环境风险能够使评价过程与相关法律法规相结合,评价结果符合社会经济利益和目标.

净效益分析模型(NBAM)[60]可以对入侵植物生物防治的风险和效益进行了预测.美国环保局将该

模型重新描述为在生态经济系统背景下将不确定性分析与风险管理决策联系起来的一种有用的跨领域方法.

压力—状态—响应(PSR)模型主要描述社会、经济和环境系统等多个部门之间相互关联(例如因果)的关系[61].具体来说,PSR 框架说明社会、经济和人口发展作为环境的驱动因素,从而对环境产生压力(P),从而引起环境状态(S)的变化,从而影响环境.生态敏感性-生态恢复力-生态压力(SRP)模型、压力—状态—响应(PSR)模型,压力状态响应管理(PSRM)模型、压力—支持—状态—响应(PSSR)模型和曝光—灵敏度—适应(VSD)模型也为构建城市生态环境脆弱性影响因素体系提供了不同的视角.

柴铎等[71]选取地价、获益能力、可持续性、出让土地利用效率 4 个指数构建指标体系,评价中国城市土地市场分化、土地财政依赖度与经济风险,划分风险评级矩阵,提出分类、分级实施调控的策略组合建议.Martin 等[72]基于资本的框架(CBF)为南非开普敦 77 个主要郊区的 6 个不同资本类别,制定了经济财富及其气候变化风险的空间分解基线和未来情景评分,为经济风险评估提供了一种通用的方法,可帮助城市管理者更好地了解整个城市的相对资本水平与长期气候相关危害的相对暴露水平.

社会经济模型强调模型与社会经济目标及法律法规的结合.净效益分析模型(NBAM)用于评估生态经济风险,并结合社会与生态因素提供决策支持.压力-状态-响应(PSR)模型等进一步探讨了社会、经济和环境之间的因果关系,并为构建城市生态环境脆弱性评估提供了多维度的视角.

4.3 人群健康模型

随着城市化进程的加快,空气污染、水质污染和温度变化等环境因素对城市居民健康的影响日益成为公共卫生和环境健康领域的重要议题.人群健康模型通过评估环境风险,探究不同污染物和环境变化对人群健康的潜在影响.

农业用地缺乏基于人类健康的通用评估标准(GAC),Cheng 等[62]利用 CLEA(受污染土地暴露评估)模型推导出镉和六氯环己烷的 GAC,反映了 19 个省/市的饮食和土壤特征的差异.评价结果显示,我国南方地区的农业用地 Cd 的健康风险从极高到极高,而北方地区的Cd健康风险从极低到极低.乙型六氯环己烷在一些省/市会造成一定的健康风险.在对乙型六氯环己烷应用区域性活性炭时,北京和四川的农业用地风险最高,黑龙江和江西的农业用地风险最低.区域 GAC 可以简化和加快中国不同地区农业用地的风险评估,避免计算特定地点的评估标准,从而避免过度或不足的补救,从而节省时间和金钱.

Wu 等[63]在中国珠三角 9 个主要城市的居民区同步采样并详细调查了室内外总悬浮颗粒物(TSP)、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 共 22 对样本.根据中国居民室内外活动模式的暴露参数,采用美国环保署推荐的 LCR 模型对居民通过吸入进行健康风险评估.健康风险评估显示,珠三角大部分城市居民受到空气中致癌金属的影响,致癌风险仍在可以承受的范围之内.

Vidhee 等[64]利用分布式滞后非线性模型,研究了艾哈迈达巴德当前与温度相关的死亡率影响和土地利用的作用.与使用空气温度进行死亡风险评估相比,使用地表温度进行死亡风险评估得出的结果明显不同.因此,与气温相比,以地表温度为代表的城市小气候是估计温度相关死亡相对风险的更好指标.研究推断,随着土地利用组合中建筑空间增加 1%,与热相关的死亡的相对风险在 40°C 时增加 0.59%,在 45°C 时增加 0.78%.

上述基于人群健康模型的研究,涵盖了空气污染、饮用水污染和温度变化对健康的风险评估,分析了不同环境因素如何影响城市居民的健康状况,相关的评估模型及其应用为城市健康风险管理提供了重要的科学依据,有助于制定更有效的公共健康政策和应对措施.

4.4 综合类模型

随着城市生态风险评价需求的不断增加,单一模型往往难以全面、准确地反映复杂的生态环境、社会经济和人群健康等多方面的影响因素.因此,综合模型的应用逐渐成为生态风险评价领域的发展趋势.通过将不同类型的模型组合起来,形成系统模型法,不仅可以降低因多重因子和交互作用而产生的不确定性,还能够更有效地应对数据缺失和模型局限带来的挑战.

多尺度环境事故风险评估模型(MEARA)可以综合评价不同尺度环境风险的特征和影响. Meng 等[65]采用 GeoDetector 模型(GED)来探索主导驱动因素及其在多个尺度之间的相互作用.中国东莞市

被选为研究区域,通过分析 GeoDetector 的结果,得出经济和人口是影响环境事故风险水平的主导因素.交互作用结果表明,各因素之间的交互作用显著提高.人口与 GDP、生态敏感性、生态功能重要性、医院辐射强度的交互作用增加了环境事故风险水平的解释力.

GCAM 模型旨在定量模拟自然环境系统与能源经济系统、社会系统之间的联动和相互作用,有效克服基于具体学科研究方法而难以全面分析碳中和等绿色转型政策影响的不足[66].GCAM 是 IPCC 综合评估模型之一,也是 RCP−SSP 基础情景框架的基准模型之一.

IAM 模型可以模拟城市在面临气候灾害时的经济损失情况,考虑城市经济系统的动态演变,更新损害函数和损失曲线,以应用于未来情景分析[67].例如,随着城市的发展,经济结构、产业布局等会发生变化,IAM 模型可以根据这些变化调整对经济损失的评估,更准确地反映未来不同情景下气候灾害对城市经济的影响.同时,通过 IAM 模型可以评估不同适应措施对减轻气候变化导致的经济损失的潜力,并比较其有效性,从而为城市选择合适的气候适应措施提供依据,例如分析建设防洪设施、调整产业结构等措施对降低经济损失的作用[73].

系统动力学(SD)模型在城市风险评估中,通过动态仿真和因果反馈分析,可广泛应用于自然灾害、公共卫生、气候变化、社会经济、基础设施等领域,帮助识别风险源、预测动态变化,并评估应对政策的效果[68].例如,它可模拟洪水、传染病传播、气候变化对城市的长期影响,以及经济波动和基础设施失效的连锁反应.SD 模型以其动态性、多情景分析和可视化优势,支持城市综合风险管理和科学决策,但同时对数据质量和模型设计要求较高,需克服复杂性与参数敏感性等挑战.

Song 等[69]研究了一种将多介质持久性模型与 GIS 技术结合的方法.该方法可以在不同环境介质(如空气、水、土壤)中跟踪污染物的动态分布,从而提供全面的风险评估.这种整合的方法提高了评估的深度和广度,使得生态风险评估不仅限于地表特征,还涵盖了污染物在不同环境介质中的迁移与累积.GIS 的优势在于不仅局限于静态数据展示,还通过动态模型提高了预测与评估的准确性,促进了城市可持续发展的规划和执行.

未来的大尺度生态风险评价将更多依赖于跨学科、集成化的模型体系,以应对日益复杂的城市生态环境挑战.

5　结论与展望

城市生态环境风险评估作为支持城市可持续发展和风险治理的关键手段,其研究内容与方法体系日益系统化、综合化.本文围绕风险要素、评估方法与综合模型等方面进行了系统梳理与总结,试图构建较为完整的城市生态环境风险评估框架.

从风险要素角度看,风险源已从单一污染类型扩展为自然与人为复合风险源,受体则从传统的人体健康延伸至生态系统、社会经济、城市功能等多个层面,风险的多元性与系统性特征愈加凸显.特别是在城市与周边农村地区高度耦合的背景下,城乡交错地带已成为生态环境风险的重要界面.城市扩张与产业外溢加剧了对周边生态系统的扰动,同时农村地区生态退化也反向影响城市生态安全.这表明城市生态风险评估不应局限于行政边界内部,而应采用区域协同、一体化视角,将城乡互动纳入整体分析框架.

在方法体系方面,传统的层次分析法、灰色关联分析、主成分分析等方法广泛应用于风险指标筛选与加权计算,但存在主观性强、信息整合能力不足等问题.为提升评估结果的科学性与可操作性,近年来研究引入了综合指数法、概率风险表征和多属性决策方法.这些方法在应对风险多因子特征、提高量化精度等方面取得了显著进展.与此同时,定性方法在数据不足或机制复杂的情境中依然不可替代,尤其是在风险识别、情景构建与指标体系设计阶段,专家咨询、德尔菲法、案例研究与 QCA 等方法发挥着重要作用,成为定量分析的有力补充.

针对城市生态风险的复杂特性,综合评价模型逐渐成为主流趋势.综合模型通过集成生态、社会、经济等多个子系统,实现多尺度、多维度的系统模拟,能够较好地反映风险生成与扩散的真实机制.GCAM、IAM、系统动力学模型等具代表性的综合模型,已在城市群气候风险、水资源安全与健康暴露等领域得到应用.模型的结构不仅融合多学科知识体系,更具备较强的实践导向和政策支撑能力.因此,

本文将综合评价模型作为独立章节加以论述,体现其在方法集成、结果整合与决策支持中的核心地位.

本文在方法论层面回应了风险评估的定量与定性融合需求,在内容上呼应了风险要素多样化、城乡联动机制等研究趋势;同时通过对综合模型的系统分类与案例解析,拓展了对模型适用性与局限性的认知,增强了研究对实践问题的响应能力.

未来,城市生态环境风险评估研究需从以下四个方向深化推进:一是加强方法集成,融合遥感、大数据、人工智能等手段,构建数据驱动的动态评估体系;二是拓展空间尺度与时间维度,关注城市群及区域尺度上的生态风险迁移与联动机制;三是完善城乡协同评估框架,深入探讨城市与农业生态系统在资源、污染与服务供需方面的交互影响;四是推动综合模型的应用化、平台化建设,开发支持城市规划与生态治理的决策支持工具,提高研究成果的可用性与可视性.

城市生态环境风险评估正朝着系统性、综合性与实用性方向快速演进.通过方法创新与区域统筹的协同推进,有望为城市生态安全保障与高质量发展提供更加科学、有效的支撑.

参考文献:

[1] Fan F, Wen X, Feng Z. Optimizing urban ecological space based on the scenario of ecological security patterns: The case of central Wuhan, China [J]. Applied Geography, 2022,138:102619.

[2] Liu J, Zhang S, Yin L. Exploring the relationship between seasonal variations of land surface temperature and urban morphological factors in complex urban areas [J]. Environmental Science Pollution Research, 2023,30(21):59861-59876.

[3] 曾贤刚,牛木川.高质量发展条件下中国城市环境效率评价 [J]. 中国环境科学, 2019,39(6):2667-2677.
Zeng X G, Niu M C. Evaluation of China's urban environmental efficiency under the conditions of high-quality development [J]. China Environmental Science, 2019,39(6):2667-2677.

[4] 徐 辉,王文静,徐钰清,等.一体化推进城市体检与城市更新的方法探索 [J]. 城市规划, 2024,48(S1):70-78,160.
Xu H, Wang W J, Xu Y Q, et al. Exploration of methods for integrated promotion of urban health check and urban renewal [J]. Urban Planning, 2024,48(S1):70-78,160.

[5] Gibbs M. Ecological risk assessment, prediction, and assessing risk predictions [J]. Risk Analysis, 2011,31(11):1784-1788.

[6] Tang L, Wang L, Li Q. A framework designation for the assessment of urban ecological risks [J]. International Journal of Sustainable Development and World Ecology, 2018,25(5):387-395.

[7] Lin X, Wang Z T. Landscape ecological risk assessment and its driving factors of multi-mountainous city [Z]. Ecological Indicators, 2023, 146.

[8] 黄 蕾,黄雨佳,刘朋辉,等.区域综合环境风险评价方法体系研究 [J]. 中国环境科学, 2020,40(12):5468-5474.
Huang L, Huang Y J, Liu P H, et al. Research on regional comprehensive environmental risk assessment method system [J]. China Environmental Science, 2020,40(12):5468-5474.

[9] Barnthouse L W. Issues in ecological risk assessment: the CRAM perspective [J]. Risk Analysis, 1994,14(3):251-256.

[10] Sun X, Fang C. Model and application of ecological risk appraisal in the course of urbanization in arid area [J]. Arid. Land. Geol., 2006, 29:668-674.

[11] Suter G W, 2nd, Vermeire T, Munns W R, Jr. An integrated framework for health and ecological risk assessment [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2005,207(2Suppl):611-616.

[12] Suter II G W, Vermeire T, Munns W R. Framework for the integration of health and ecological risk assessment [J]. Human Ecological Risk Assessment, 2003,9(1):281-301.

[13] Perrodin Y, Boillot C, Angerville R. Ecological risk assessment of urban and industrial systems: A review [J]. Science of the Total Environment, 2011,409(24):5162-5176.

[14] 彭 翀,左沛文,李月雯.城市空间多风险耦合及规划的韧性应对 [J]. 城市规划学刊, 2024,(5):88-97.
Peng C, Zuo P W, Li Y W. Multi-risk coupling in urban space and resilience response of planning [J]. Urban Planning Journal, 2024,(5): 88-97.

[15] 张 达,石 云,李祖昊.长江经济带城市灾害风险与应对能力耦合分析 [J]. 人民长江, 2024,55(5):7-14.
Zhang D, Shi Y, Li Z H. Coupling analysis of urban disaster risk and response capacity in the Yangtze River Economic Belt [J]. Yangtze River Journal, 2024,55(5):7-14.

[16] Li K, Gu Y, Li M. Spatial analysis, source identification and risk assessment of heavy metals in a coal mining area in Henan, Central China [J]. International Biodeterioration Biodegradation, 2018,128: 148-54.

[17] 吴健生.城市滑坡灾害生态风险不确定性分析及风险管理——以深圳市为例 [J]. 生态学报, 2020,40(11):3612-3621.
Wu J S. Uncertainty analysis and risk management of ecological risk of urban landslide disasters: A case study of Shenzhen [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(11):3612-3621.

[18] Badina S, Babkin R, Bereznyatsky A, et al. Spatial aspects of urban population vulnerability to natural and man-made hazards [Z]. 2022, 15:100082.

[19] Barria P. From multi-risk evaluation to resilience planning: The case of central chilean coastal cities [J]. Water, DOI:10.3390/W11030572.

[20] 张 云,资 锋,郭杰华.基于生态位模型的地质灾害风险评价——以邵阳市隆回县为例 [J]. 水文地质工程地质, 2025,52(1):190-201.
Zhang Y, ZI F, Guo J H. Geological hazard risk assessment based on ecological niche model: A case study of Longhui County, Shaoyang City [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025,52(1): 190-201.

[21] Peng J, Pan Y, Liu Y. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape [J]. Habitat International, 2018,71:110-124.

[22] Xiang M, Li Y, Yang J. Assessment of heavy metal pollution in soil and classification of pollution risk management and control zones in the industrial developed city [J]. Environmental Management, 2020,66: 1105−1119.

[23] Heidari M, Darijani T, Alipour V. Heavy metal pollution of road dust in a city and its highly polluted suburb; quantitative source apportionment and source−specific ecological and health risk assessment [J]. Chemosphere, 2021,273:129656.

[24] Zhou Y, Liu M J R A A I J. Risk assessment of major hazards and its application in urban planning: A case study [J]. 2012,32(3):566−577.

[25] Xu C, Hu X, Wang X. Spatiotemporal variations of eco−environmental vulnerability in Shiyang River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2024,158:111327.

[26] Xiao H, Shao H, Long J. Spatial−temporal pattern evolution and geological influence factors analysis of ecological vulnerability in Western Sichuan mountain region [J]. Ecological Indicators, 2023,155: 110980.

[27] Yeprintsev S, Kurolap S, Klepikov O. The Study of the Environmental Risk of Urban Areas on the Example of the City of Voronezh; proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, F, 2020 [Z]. IOP Publishing.

[28] Duan J, Wang Y, Fan C, et al. Perception of urban environmental risks and the effects of urban green infrastructures (UGIs) on human well−being in four public green spaces of Guangzhou, China [J]. Environmental management, 2018,62:500−517.

[29] Zhao Z, Hao M, Li Y. Contamination, sources and health risks of toxic elements in soils of karstic urban parks based on Monte Carlo simulation combined with a receptor model [J]. Science of the Total Environment, 2022,839:156223.

[30] Sui X, Qi K, Nie Y. Air quality and public health risk assessment: A case study in a typical polluted city, North China [J]. Urban Climate, 2021,36:100796.

[31] Latif M, Nasir N, Nawaz R. Assessment of drinking water quality using Water Quality Index and synthetic pollution index in urban areas of mega city Lahore: a GIS−based approach [J]. Scientific Reports, 2024,14(1):13416.

[32] Wang M, Bai Y, Chen W. A GIS technology based potential eco−risk assessment of metals in urban soils in Beijing, China [J]. Environmental Pollution, 2012,161:235−242.

[33] Ma C M. Geo−environment risk assessment in Zhengzhou City, China [J]. Geomatics Natural Hazards & Risk, 2020,11(1):40−70.

[34] Wu Y N. Integrated flood risk assessment and zonation method: a case study in Huaihe River basin, China [J]. Natural Hazards, 2015,78(1): 635−651.

[35] Shah M A R, Renaud F G, Anderson C C. A review of hydro−meteorological hazard, vulnerability, and risk assessment frameworks and indicators in the context of nature−based solutions [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2020,50:101728.

[36] Huang X, Wang X, Zhang X. Ecological risk assessment and identification of risk control priority areas based on degradation of ecosystem services: A case study in the Tibetan Plateau [J]. Ecological Indicators, 2022,141:109078.

[37] Chang X, Li Y X. Lead distribution in urban street dust and the relationship with mining, gross domestic product GDP and transportation and health risk assessment [J]. Environmental Pollution, 2020,262:114307.

[38] Satterthwaite D. The impact of urban development on risk in sub−Saharan Africa's cities with a focus on small and intermediate urban centres [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2017,26:16−23.

[39] Yang Y, Chen J, Lan Y. Landscape pattern and ecological risk assessment in Guangxi based on land use change [J]. International Journal of Environmental Research Public Health, 2022,19(3):1595.

[40] Wang Y, Zhang M−s, Xue Q. Risk−based evaluation on geological environment carrying capacity of mountain city−A case study in Suide County, Shaanxi Province, China [J]. Journal of Mountain Science, 2018,15(12):2730−2740.

[41] Bernal G A, Salgado−Gálvez M A, Zuloaga D, et al. Integration of probabilistic and multi−hazard risk assessment within urban development planning and emergency preparedness and response: Application to Manizales, Colombia [J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2017,8:270−283.

[42] Adimalla N. Heavy metals pollution assessment and its associated human health risk evaluation of urban soils from Indian cities: a review [J]. Environmental Geochemistry Health, 2020,42(1):173−190.

[43] Gruebner O, Rapp M A, Adli M. Cities and mental health [J]. Deutsches Arzteblatt International, 2017,114(8):121.

[44] 易承志,黄子琪.风险情境下城市韧性治理的逻辑与进路——一个系统的分析框架 [J]. 理论探讨, 2023,(1):78−86.
Yi C Z, Huang Z Q. The logic and path of urban resilience governance in risk situations — A systematic analytical Framework [J]. Theoretical Discussion, 2023,(1):78−86.

[45] 李　琼,宋慧娟.韧性治理视阈下上海城市风险评估及防控研究 [J]. 贵州社会科学, 2023,(6):100−106.
Li Q, Song H J. Research on urban risk assessment and prevention in Shanghai from the perspective of resilient governance [J]. Guizhou Social Sciences, 2023,(6):100−106.

[46] 古雄杰,邓建明,曾　剑,等.活力海岸概念辨析及评价指标体系构建 [J]. 中国环境科学, 2024,44(6):3387−3394.
Gu X J, Deng J M, Zeng J, et al. Concept analysis of vibrant coast and construction of evaluation index system [J]. China Environmental Science, 2024,44(6):3387−3394.

[47] Cragun D, Pal T, Vadaparampil S T, et al. Qualitative Comparative Analysis: A Hybrid Method for Identifying Factors Associated with Program Effectiveness [J]. Journal of mixed methods research, 2016, 10(3):251−272.

[48] Flaherty E. Assessing the distribution of social–ecological resilience and risk: Ireland as a case study of the uneven impact of famine [J]. Ecological Complexity, 2014,19:35−45.

[49] Han B, Liu H, Wang R. Urban ecological security assessment for cities in the Beijing–Tianjin–Hebei metropolitan region based on fuzzy and entropy methods [J]. Ecological Modelling, 2015,318:217−225.

[50] Kleemann J, Celio E, Nyarko B K. Assessing the risk of seasonal food insecurity with an expert−based Bayesian Belief Network approach in northern Ghana, West Africa [J]. Ecological Complexity, 2017,32:53−73.

[51] Gasiorek M, Kowalska J, Mazurek R. Comprehensive assessment of heavy metal pollution in topsoil of historical urban park on an example of the Planty Park in Krakow (Poland) [J]. Chemosphere, 2017,179: 148−158.

[52] Li C, Jiang Y, Yang X. A multi−level characterization method for the assessment of urban ecological risks [J]. International Journal of Sustainable Development World Ecology, 2018,25(5):396−402.

[53] Liu C, Chen W, Hou Y. A new risk probability calculation method for urban ecological risk assessment [J]. Environmental Research Letters, DOI:10.1088/1748-9326/a66667.

[54] Gao P P, Li Y P, Sun J. Coupling fuzzy multiple attribute decision−making with analytic hierarchy process to evaluate urban ecological security: A case study of Guangzhou, China [J]. Ecological Complexity, 2018,34:23−34.

[55] Jibhakate S M, Timbadiya P V, Patel P L. Multiparameter flood hazard, socioeconomic vulnerability and flood risk assessment for densely populated coastal city [J]. Journal of Environmental Management, 2023,344:118405−118420.

[56] Xu L Y, Liu G Y. The study of a method of regional environmental risk assessment [J]. Journal of Environmental Management, 2009,90(11): 3290−3296.

[57] Li G, Liu J, Shao W. Urban flood risk assessment under rapid urbanization in Zhengzhou City, China [J]. Regional Sustainability, 2023,4(3):332−348.

[58] Wang S, Sun Q C, Huang X. Health−integrated heat risk assessment in Australian cities [J]. Environmental Impact Assessment Review, DOI:10.1016/j.eiar.2023.107176.

[59] Darvishi A, Yousefi M, Marull J. Modelling landscape ecological assessments of land use and cover change scenarios. Application to the Bojnourd Metropolitan Area (NE Iran) [J]. Land Use Policy, 2020, 99:105098.

[60] Raghu S, Dhileepan K, Scanlan J. Predicting risk and benefit a priori in biological control of invasive plant species: a systems modelling approach [J]. Ecological Modelling, 2007,208(2−4):247−262.

[61] Das S, Pradhan B, Shit P K. Assessment of wetland ecosystem health using the pressure–state–response (PSR) model: A case study of mursidabad district of West Bengal (India) [J]. Sustainability, 2020,12 (15):5932.

[62] Cheng Y, Nathanail C P. Regional human health risk assessment of cadmium and hexachlorocyclohexane for agricultural land in China [J]. Environmental Geochemistry Health, 2021,43(9):3715−3732.

[63] Wu Y, Li G, Yang Y. Pollution evaluation and health risk assessment of airborne toxic metals in both indoors and outdoors of the Pearl River Delta, China [J]. Environmental research, 2019,179:108793.

[64] Avashia V, Garg A, Dholakia H. Understanding temperature related health risk in context of urban land use changes [J]. Landscape Urban Planning, 2021,212:104107.

[65] Yang M, Shi L, Liu B. Risks assessment and driving forces of urban environmental accident [J]. Journal of Cleaner Production, 2022,340: 130710.

[66] Zhu H, Yue J, Wang H. Will China's urbanization support its carbon peak goal?–A forecast analysis based on the improved GCAM [J]. Ecological Indicators, 2024,163:112072.

[67] Cultice B, Irwin E, Jones M. Accounting for spatial economic interactions at local and meso scales in integrated assessment model (IAM) frameworks: challenges and recent progress [J]. Environmental Research Letters, 2023,18(3):035009.

[68] Zuo Y, Shi Y−l, Zhang Y−z. Research on the sustainable development of an economic−energy−environment (3E) system based on system dynamics (SD): A case study of the Beijing−Tianjin−Hebei Region in China [J]. Sustainability, 2017,9(10):1727.

[69] Song H M, Xu L Y. A method of urban ecological risk assessment: combining the multimedia fugacity model and GIS [J]. Stochastic environmental research risk assessment, 2011,25:713−719.

[70] Guo H, Cai Y, Li B, et al. An integrated modeling approach for ecological risks assessment under multiple scenarios in Guangzhou, China [J]. Ecological Indicators, 2022,142:109270.

[71] 柴 铎,吴云艳,周小平.中国城市土地市场分化、土地财政依赖度与经济风险评价——73 城地价动态监测数据实证 [J]. 城市发展研究, 2018,25(10):33−40,50.
Chai D, Wu Y Y, Zhou X P. Differentiation of urban land market, land finance dependence and economic risk assessment in China: An empirical study of dynamic monitoring data of land price in 73 cities [J]. Urban Development Research, 2018,25(10):33−40,50.

[72] Martin de Wit, Jonty Rawlins, Belynda Petrie. Economic risk assessment of climate change at the city level. The case of Cape Town, South Africa [J]. International Journal of Urban Sustainable Development, 2023,15(1):118−140.

[73] Zhao Z J, Chen X T, Liu C Y. Global climate damage in 2° C and 1.5° C scenarios based on BCC_SESM model in IAM framework [J]. Advances in Climate Change Research, 2020,11(3):261−272.

作者简介：李 璐(2002−),女,安徽铜陵人,北京师范大学硕士研究生,研究方向为生态修复.202421470048@mail.bnu.edu.cn.