DOI: 10.20103/j.stxb.202408011813

王欣妍,王辰星,张英男,严岩.基于“潜力-连通度-韧性”的粤港澳大湾区城市群生态风险适应能力评估与提升策略.生态学报,2025,45(7):3047-3061.

Wang X Y,Wang C X,Zhang Y N,Yan Y.Assessment and promotion strategies of ecological risk adaptability based on “potential-connectedness-resilience” in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area urban agglomeration.Acta Ecologica Sinica,2025,45(7):3047-3061.

基于“潜力-连通度-韧性”的粤港澳大湾区城市群生态风险适应能力评估与提升策略

王欣妍[1,2],王辰星[1],张英男[3],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 国家食品安全风险评估中心,北京 100022

摘要:全球气候变化、城市人口的增加和活动强度的加剧、以及城市系统的脆弱性使得城市化区域生态风险防控变得越来越重要,加强主动适应性管理以提高风险适应能力是城市化区域应对生态风险的核心。然而,适应性应用的研究尚未形成涵盖风险应对全过程的系统体系。从适应性视角提出了基于“潜力-连通度-韧性”的三维城市化区域生态风险分析框架,采用主成分分析评估粤港澳大湾区全过程、多尺度的生态风险适应能力,基于适应性循环表征城市发展阶段特征。结果表明,大湾区城市群的生态风险适应能力总体处于中等水平,空间格局表现出由周围山区向中心和东南城市建成区降低的趋势,大湾区中部和东南部地区适应能力低值区占比达到 7.70%,主要涉及适应性循环中重组阶段的城市,包括澳门特别行政区、佛山市、东莞市、中山市、深圳市和广州市,面临较强的极端高温、内涝、景观破碎化等风险,建议该区域可作为重点防控区,优先加强风险防范和保护措施。实证研究显示,建立的三维评估框架能够更好的反映生态系统的结构、功能和动态变化对城市化区域生态风险适应能力的影响,为加强城市化区域生态风险全过程管理提供参考。

关键词:城市化区域生态风险;风险评估;适应性管理;全过程管理;粤港澳大湾区

Assessment and promotion strategies of ecological risk adaptability based on “potential-connectedness-resilience” in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area urban agglomeration

WANG Xinyan[1,2],WANG Chenxing[1],ZHANG Yingnan[3],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 *China National Center for Food Safety Risk Assessment,Beijing* 100022,*China*

Abstract: Global climate change,urban population growth,and increased activity intensity,along with the vulnerability of urban systems,have rendered the prevention and control of urban ecological risks increasingly crucial. The core of the urbanized areas response to ecological risks is to strengthen proactive adaptive management to improve risk adaptability. Existing research on adaptive theory and applications has primarily concentrated on predicting risk probabilities prior to ecological risk events,with less focus on emergency response during occurrences and post-occurrence restoration processes. It has not yet formed a systematic research system covering the whole risk response process. This study establishes a three-

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

收稿日期:2024-08-01; **网络出版日期**:2025-01-02

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

dimensional urban ecological risk analysis framework based on "potential-connectedness-resilience," addressing the full spectrum of urban ecological risk response, from pre- to during- to post-risk occurrence. It assesses urban adaptability to ecological risks across multiple scales and the entire process using principal component analysis and identifies urban development stages through the adaptive cycle. The results of the study, using the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area as an example, show that the ecological risk adaptability of the Greater Bay Area urban agglomeration is generally at a medium level. The spatial pattern indicates a decreasing trend from the surrounding mountainous areas to the built-up areas of the center and the southeast cities. The percentage of the area with low adaptability in the central and southeastern regions of the Greater Bay Area reaches 7.70%. This affects cities in the reorganization phase of the adaptive cycle, including Macao, Foshan, Dongguan, Zhongshan, Shenzhen, and Guangzhou. These cities are exposed to stronger risks of extreme heat, inland inundation, and landscape fragmentation. It is suggested that the region can be designated as a key prevention and control area, with priority given to strengthening risk prevention and protection measures. Cities in the exploitation phase, such as Hong Kong and Zhuhai, are recommended to prioritize ecological restoration in small areas with low adaptability and to increase the allocation of land for ecological purposes. Cities in the conservation phase, including Jiangmen, Huizhou, and Zhaoqing, exhibit a high adaptability to ecological risks. It is recommended that these cities enhance their infrastructure development initiatives and increase medical resources to bolster their capacity to respond effectively to emergencies. The empirical study shows that the three-dimensional assessment framework established in this study can better reflect the impacts of ecosystem structure, function, and dynamic changes on urban ecological risks. It also provides a reference for strengthening the whole-process management of urban ecological risks.

Key Words: ecological risk in urbanized areas; risk assessment; adaptive management; whole process management; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

气候变化和城市化双重压力下,随着城市人口的不断增多[1],城市生态系统对风险的应对和管理已经成为人与自然可持续发展的研究热点。人类活动引起的热岛效应、污染排放以及气候变化导致的暴雨、洪涝、干旱等风险加剧[2],严重威胁生态系统结构、功能的稳定性以及人类的生存。例如,2021 年美国、加拿大的历史性高温干旱和 2022 年河南郑州的"7·20"特大暴雨均造成严重的人员伤亡和财产损失,暴露出地方对风险认识不足、应急预案不到位等问题。面对复杂的、不确定的未来,联合国可持续发展目标 11 中明确提出要进行风险管理,减少突发事件带来的不良影响并增强抵御风险的能力。

城市化区域的生态风险是由环境自然变化、城市建设与经济发展、人类生产活动所引起的城市以及周边受城市化影响的城郊和农村地区的生态系统及其组成、结构的改变而导致服务和功能损失的概率,从而危及人类健康和生态系统安全[3—8]。从最初单一的人体健康风险评价[9—10]发展至多风险源、多受体、大尺度的复合生态系统风险评价[11—13],其评估方法及管理手段在联合国[14]、美国[15—16]、英国[17]、荷兰[18]和中国[19]等均受到高度重视。然而,基于风险的评估只是一种概率,存在不确定性,被动风险治理和静态风险评估逐渐被全过程的主动适应性管理所替代。从适应性思维的角度考虑,以城市韧性为目标,有助于建立对城市结构与功能调节[20—21]的自适应能力评估体系,依据城市全过程的发展阶段提出管理措施,提升城市响应冲击、适应外界干扰的能力[22—24]。

生态适应理论的三维框架通过"潜力-连通度-韧性"三个特征表征适应性循环中未来可能发展的动态性。与政府间气候变化专门委员会(IPCC)提出的风险框架"危害-暴露-脆弱性"相比,潜力通过加强系统应对风险的内在能力和资源储备抵御危害;连通度通过恢复生态系统结构和功能的完整性,降低暴露度;韧性通过系统状态的变化趋势表征对意外或不可预测冲击的脆弱性,以及适应和缓解风险行动的效果。通过将生态风险适应能力与适应性循环中开发(r)、保护(K)、释放(Ω)和重组(α)四个城市发展阶段相对应,能够更好的为城市化区域生态风险管理政策的制定提供支撑依据[25]。然而,以往应用适应性理论对城市及城市群生态风

险进行评估的研究[26—28]大多关注生态风险发生前的概率预测,较少考虑风险发生中应急和发生后恢复的全过程影响,尚未形成系统的研究体系。

本文的目的是基于生态适应理论的三维框架评估城市化区域多尺度的生态风险适应能力,统筹考虑生态风险发生前、发生中和发生后的全过程指标,识别城市适应性发展阶段,并提出能力提升策略。首先,基于生态系统的全过程动态风险响应构建“潜力-连通度-韧性”三维生态风险适应能力的指标体系。然后,基于主成分分析和主成分回归构建生态风险适应能力评估模型。最后,评估生态风险适应能力,识别城市所处的适应性循环阶段,在不同尺度确定分区、分发展阶段的能力提升策略。本文以城镇化率高、生态风险影响大的粤港澳大湾区为例进行实证研究,研究结果将为全球经济高速发展城市群的生态风险管理提供科学依据。

1　方法

1.1　理论探讨

适应性视角下的生态风险研究是从未受冲击时进行提前预防的角度进行评估,通过持续监测系统状态的变化[29],动态调整风险控制的阶段性目标。基于生态适应理论的三维框架“潜力-连通度-韧性”[30]考虑了生态系统的功能重要性、景观空间结构连通性以及动态恢复过程[31—32],通过开发、保护、释放和重组四个动态发展阶段的适应性循环与城市发展阶段建立对应关系[25],阐明了风险下生态系统的模式和过程如何随时间变化[33](图 1)。高潜力、高连通度和高韧性的生态系统具有更多的生物多样性;不同区域之间的物质、能量和信息可以自由流动;面对干扰能够快速适应和恢复,生态风险适应能力强[34]。从重组、开发、保护到释放分别对应城市生态风险适应能力最低、升高、最高和骤降的发展趋势[35]。具有较强韧性的系统将在重组阶段通过创新性变革、经验学习等方式重构,再次进入开发阶段,实现城市发展的适应性循环[26,36]。

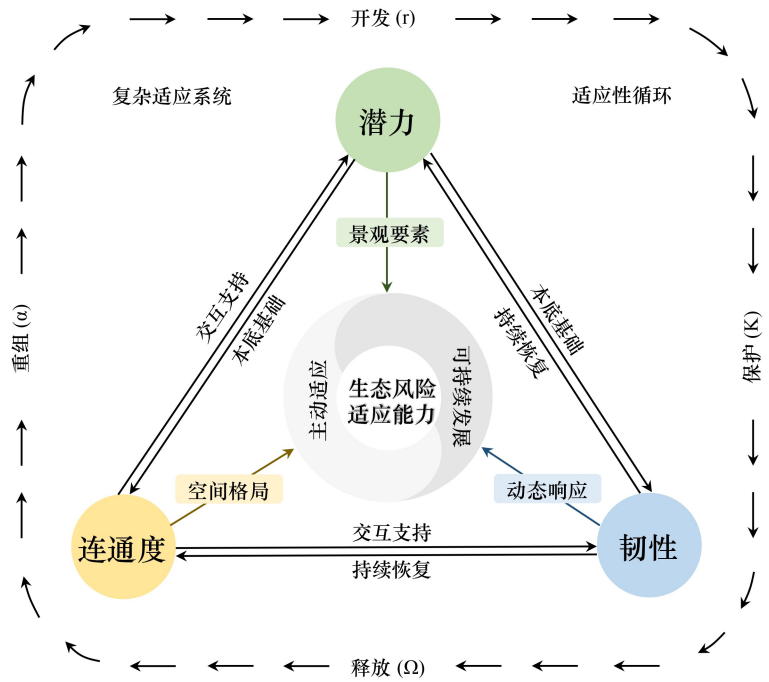

图 1　基于“潜力-连通度-韧性”的三维生态风险适应能力概念模型

Fig.1　Three-dimensional conceptual model of ecological risk adaptability based on “potential-connectedness-resilience”

1.2　生态风险适应能力指标体系的构建

本文筛选出环境变化、人类活动干扰、政策调控、生态系统服务损失、应急管控等 25 项指标(表 1)。

表 1 城市化区域生态风险适应能力评估的指标体系

Table 1 Indicator system for assessing ecological risk adaptability in urbanized areas

准则层 Criteria hierarchy	指标层 Indicator hierarchy	含义 Meaning	生态风险发生的阶段 Stages of ecological risk occurrence	计算方法 Calculation method	数据特征 Data characteristics
潜力 Potential	坡度 X_{11}	应对水土流失和滑坡、泥石流等地质环境突发事件的内在能力	生态风险发生前的预警阶段	ArcGIS 坡度分析	-
	土壤可蚀性 X_{12}	土壤的抗侵蚀能力以及应对潜在水土流失暴露的内在能力	生态风险发生前的预警阶段	参考《全国生态状况调查评估技术规范——生态系统服务功能评估》	-
	植被覆盖度 X_{13}	植被的空间分布及生态系统健康情况,表征应对风险的资源储备	生态风险发生前的预警阶段	增强植被指数	+
	植被净初级生产力 X_{14}	生态系统健康及碳封存服务的情况	生态风险发生前的预警阶段	—	+
	降雨侵蚀力 X_{15}	降雨强度以及应对潜在水土流失的内在能力	生态风险发生前的预警阶段	Wischmeier 土壤流失方程经验公式[37—38]	-
	相对地表温度 X_{16}	地表温度减去基准温度,表征应对热风险的内在能力	生态风险发生前的预警阶段	每个栅格的地表温度减去大湾区地表温度均值	-
	土地利用强度 X_{17}	人类活动对土地自然综合体的干扰强度	生态风险发生前的预警阶段	—	建设用地、未利用地、耕地、草地、水域和林地风险适应能力分别为 0、0.1、0.5、0.8、0.9 和 1
	夜间灯光强度 X_{18}	表征人口密度和人类活动强度,为城市社会经济发展与人类活动对生态系统的干扰	生态风险发生前的预警阶段	—	-
	空气质量指数 X_{19}	生态环境的污染情况	生态风险发生前的预警阶段	ArcGIS 克里金插值	-
连通度 Connectedness	香农多样性指数 X_{21}	景观类型丰富度和分布异质性	生态风险发生前的预警阶段	Fragstats 网格分析法	+
	景观分离度指数 X_{22}	景观破碎化程度	生态风险发生前的预警阶段	Fragstats 网格分析法	-
	距建设用地距离 X_{23}	城市扩张对生态系统结构的干扰	生态风险发生前的预警阶段	ArcGIS 欧氏距离	+
	人口密度 X_{24}	人口聚集对栖息地质量和连通性的干扰	生态风险发生前的预警阶段	—	-
	路网密度 X_{25}	道路建设对生态用地连通性的干扰	生态风险发生前的预警阶段	将道路分级后进行核密度分析	-
韧性 Resilience	植被覆盖度变化趋势 X_{31}	生态系统抗干扰能力及空气净化服务的变化趋势	生态风险发生后的恢复阶段	2020 年数据减去 2000 年数据	+
	植被净初级生产力变化趋势 X_{32}	生态系统抗干扰能力及碳封存服务变化趋势	生态风险发生后的恢复阶段	同上	+
	水源涵养量变化趋势 X_{33}	生态系统抗干扰能力及水源涵养服务变化趋势	生态风险发生后的恢复阶段	InVEST 算出产水量后,再计算水源涵养量	+
	土壤保持量变化趋势 X_{34}	生态系统抗干扰能力及水土保持服务变化趋势	生态风险发生后的恢复阶段	InVEST,改进的美国通用土壤流失方程 USLE	+
	生物多样性维持量变化趋势 X_{35}	生态系统抗干扰能力及生物多样性维持服务变化趋势	生态风险发生后的恢复阶段	利用植被净初级生产力、多年平均降水量、多年平均气温、海拔因子计算	+

续表

准则层 Criteria hierarchy	指标层 Indicator hierarchy	含义 Meaning	生态风险发生的阶段 Stages of ecological risk occurrence	计算方法 Calculation method	数据特征 Data characteristics
	生态系统减缓城市热岛效应的能力 X_{36}	城市降温能力变化趋势及应对极端高温的脆弱性	生态风险发生后的恢复阶段	InVEST 模型中的城市降温模块	+
	城市洪水风险缓解能力变化趋势 X_{37}	生态系统应对洪水风险的脆弱性	生态风险发生后的恢复阶段	InVEST 模型中的城市洪水风险缓解模块	+
	夜间灯光强度变化趋势 X_{38}	城市发展和人类活动对生态系统的干扰趋势	生态风险发生后的恢复阶段	—	-
	基础设施建设 X_{39}	城市基础设施完善程度及应对冲击时的社会保障	生态风险发生中的应急响应和发生后的恢复阶段	对周边基础设施(学校、餐饮、超市、风景名胜、公园、商场、市场、地铁站、公交站、银行、邮局和加油站)进行核密度分析	+
	环境管控政策 X_{310}	生态风险管控政策对未来风险的控制能力	生态风险发生后的恢复阶段	依据环境管控单元图划分	优先保护单元、一般管控单元和重点管控单元风险适应能力分别为 1、0.5 和 0
	应急管理 X_{311}	保障设施投入强度,表征系统应对冲击的能力	生态风险发生中的应急响应和发生后的恢复阶段	依据医院的“就医圈”进行多环缓冲区分析	+

+(-)代表指标与生态风险适应能力呈正(负)相关

1.3　基于主成分分析和主成分回归构建生态风险适应能力评估模型

(1)对正、负向指标数据分别进行标准化处理。

(2)利用 SPSS 进行 KMO 检验和 Bartlett 球形检验。分别对潜力、连通度和韧性数据进行主成分分析,提取特征值大于 1 且累计贡献率较大的主成分,并计算主成分得分:

$$F_{ij}=a_{j1}ZX_{i1}+a_{j2}ZX_{i2}+\cdots+a_{jn}ZX_{in} \tag{1}$$

式中,F_{ij}为第 j 个主成分得分,a_{j1}为第 j 个主成分中 X_{i1}的成分得分系数,ZX_{in}为标准化后的指标值,$i=1,2,3$ 分别代表“潜力-连通度-韧性”的三个特征值,n 为各准则层指标个数。

(3)计算“潜力-连通度-韧性”的特征值和生态风险适应能力指数:

$$R_i=\sum_{j=1}^{n}(\omega_j F_{ij}) \tag{2}$$

$$R=\sum_{i=1}^{3}R_i \tag{3}$$

式中,R 为生态风险适应能力指数,R_i 为“潜力-连通度-韧性”的特征指数值,ω_j 为第 j 个主成分的贡献率。采用自然间断点法将 R 分为五类:高、较高、中等、较低和低适应能力。

1.4　生态风险适应能力空间特征分析

应用全域莫兰指数和局域莫兰指数表示特定区域属性与其他区域属性之间的相互依赖和聚集程度。全域莫兰指数的取值范围为[-1,1],计算模型为:

$$I=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(Y_i-\bar{Y})(Y_j-\bar{Y})}{\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\bar{Y})^2} \tag{4}$$

式中,n 表示区域空间单元总数;Y_i 和 Y_j 表示随机变量 x 在地理单元 i 和 j 上的属性值;W_{ij}为地理单元相互之间邻接关系的权重矩阵。

在无空间相关性的零假设下,利用莫兰指数构建的标准正态统计量为:

$$Z=(I-E(I))/\sqrt{\mathrm{Var}(I)} \tag{5}$$

式中,均值 $E(I)$ 和标准差 $Var(I)$ 取决于数据的空间分布及空间滞后矩阵元素的排列方式。当 Z 值显著且为正(负)时,表明存在正(负)的空间自相关,即相似的观测值趋于空间集聚(分散)。

利用局域莫兰指数刻画各区域属性值的局域空间相互依赖性及空间异质性特征,计算模型为:

$$I_i = \frac{(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y})^2} \cdot \sum_{j \neq i}^{n} W'_{ij}(Y_j - \bar{Y}) \quad (6)$$

式中,W'_{ij}为标准化后的空间权值矩阵(每行加总的和为 1)。

在局域莫兰指数的计算结果图中,高-高和低-低集聚为典型的局域正向空间相关,代表高(低)观测值的区域单元被高(低)值区域所包围;高-低和低-高集聚为局域负向空间自相关,代表高(低)观测值的区域单元被低(高)值区域所包围。

1.5 适应性循环阶段识别

分别以粤港澳大湾区下属城市和区县为统计单元,计算潜力、连通度、韧性的平均值并正向归一化至 −1—1 区间。构建“潜力-连通度-韧性”三维坐标图,识别各城市所处的适应性循环阶段。

2 研究区域和数据来源

2.1 研究区域

本文以生态风险高、多样且影响较大的粤港澳大湾区为研究区域。粤港澳大湾区是世界四大湾区之一[39],由广东省 9 市(广州、佛山、肇庆、深圳、东莞、惠州、珠海、中山和江门)及香港、澳门两个特别行政区组成(图 2)。其以中国 0.6%的土地,聚集了 6%的人口,对国内生产总值贡献率 12.4%,人口城镇化率超过 85%[40]。大湾区地势北高南低,东、西、北三面分布山林,中部为平原。属亚热带季风气候,终年高温、降水丰沛[41]。短历时强降雨频发及城市扩张使大湾区面临城市内涝、山体滑坡、热岛效应和环境污染等生态风险的胁迫。

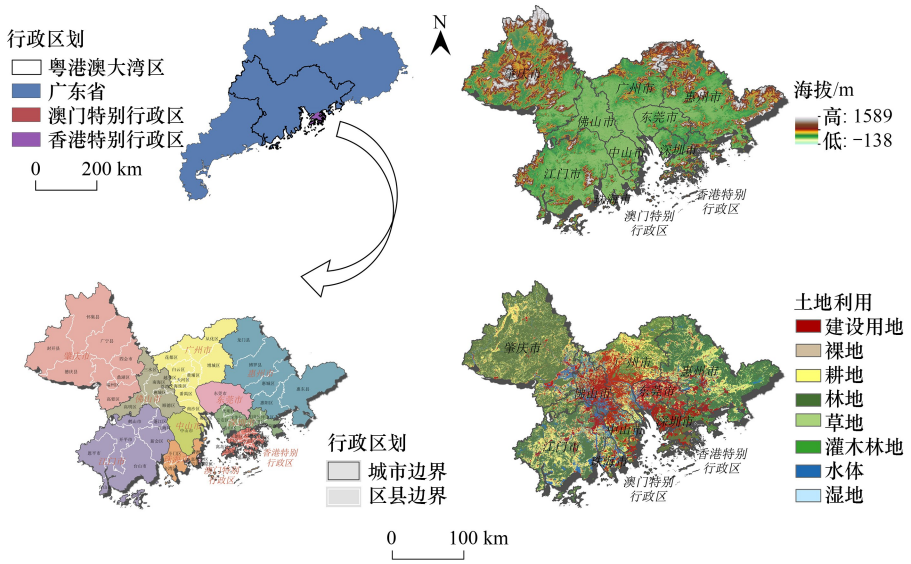

图 2 粤港澳大湾区的行政区划、海拔和土地利用类型图

Fig.2 Map of administrative regions, elevation and land use types in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

2.2 数据来源及预处理

本文所用数据主要包括行政区划、路网密度、DEM、土地利用、增强植被指数、植被净初级生产力、地表温度、夜间灯光强度、人口密度、土壤数据、气象数据、POI 点位、空气质量和“三线一单”数据(表 2)。所有数据统一投影坐标系为 WGS_1984_UTM_Zone_49N,重采样为 1km 分辨率。

表 2　数据来源

Table 2　Data source

数据用途 Data use	数据名称 Data name	年份 Year	来源 Source	分辨率 Resolution	参考文献 References
矢量边界及行政区划分、路网密度 Vector boundary, administrative division, and road density	全国 1∶100 万公众版地形数据(2021 版)	现势性为 2019 年	全国地理信息资源目录服务系统	1km	[42]
坡度 Slope	ASTER GDEM	2009	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)	30m	[43]
土壤可蚀性 Soil erodibility	世界土壤数据库(HWSD)	2009	联合国粮食及农业组织(https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/)	1km	[44]
植被覆盖度 Fractional vegetation cover	MOD13Q1.061 (MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061)	2000,2020	https://www.earthdata.nasa.gov/	250m	[45]
植被净初级生产力 Net primary productivity	MOD17A3HGF.006 (MODIS/Terra Net Primary Production Gap-Filled Yearly L4 Global 500m SIN Grid V006)	2000,2020	https://www.earthdata.nasa.gov/	500m	[46]
降雨侵蚀力 Rainfall erosivity	1960—2020 年中国 1km 分辨率月降水数据集	2000,2020	Science Data Bank (https://www.scidb.cn/en/cstr/31253.11.sciencedb.01607)	1km	[47]
相对地表温度 Relative land surface temperature	MOD11A2.061(MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V061)	2020	https://www.earthdata.nasa.gov/	1km,8d	[48]
土地利用强度、距建设用地距离 Land use intensity and distance to construction land	GlobeLand30	2000,2020	GlobeLand30:全球地理信息公共产品	30m	[49]
夜间灯光强度 Nighttime light intensity	全球 500m 分辨率“类 NPP-VIIRS”夜间灯光数据集	2000,2020	国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)	500m	[50]
空气质量指数 Air Quality Index	空气质量数据	2021	《粤港澳珠江三角洲区域空气监测网络》和中国空气质量在线监测分析平台(https://www.aqistudy.cn/historydata/)	—	—
人口密度 Population density	LandScan 人口数据集	2020	OAK RIDGE National Laboratory (https://landscan.ornl.gov/)	人/km^2	[51]
水源涵养量、生物多样性维持量变化趋势 Water conservation and biodiversity conservation trends	中国气象要素年度空间插值数据集(蒸散发、平均气温)	2000,2020	时空三极环境大数据平台(https://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/8b11da09-1a40-4014-bd3d-2b86e6dccad4/)、资源环境科学数据注册与出版系统(http://www.resdc.cn/DOI)	1km	[52—53]
城市洪水风险缓解能力变化趋势 Urban flood risk mitigation trends	Global Hydrologic Soil Groups (HYSOGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling	—	https://daac.ornl.gov/SOILS/guides/Global_Hydrologic_Soil_Group.html	250m	[54]
基础设施建设、应急管理 Construction of infrastructure and emergency management	POI	2020	高德地图爬取	—	—
环境管控政策 Environmental regulation policy	广东省“三线一单”数据	—	《关于印发广东省“三线一单”生态环境分区管控方案的通知(有效期至 2025 年 12 月 31 日)》	—	—

填海措施使大湾区每年的沿海边界范围有所变化,本文将多源数据统一至现势性为 2019 年的沿海边界,行政边界划分采用 2021 年全国行政区划以给各区未来规划做指导。经查验,发现沿海部分的小部分缺失并不影响边界划分和结果展示

3 结果

3.1 指标层级的大湾区生态风险适应能力评估

从潜力层面来看(图 3),中部及东南部平原区为城市建成区,强烈的人为扰动使城区植被条件变差,植被降温和截流能力减弱,面临极端高温、空气污染等潜在风险;西北、东北及部分西南山区面临滑坡、泥石流和水土流失风险;东部和东南部区域较强的土壤可蚀性及降雨侵蚀力极易引发城市局部内涝。从连通度层面来看,景观类型的丰富度和分布的异质性较差;建设用地和道路对建成区周边生态用地的连通性造成干扰,景观

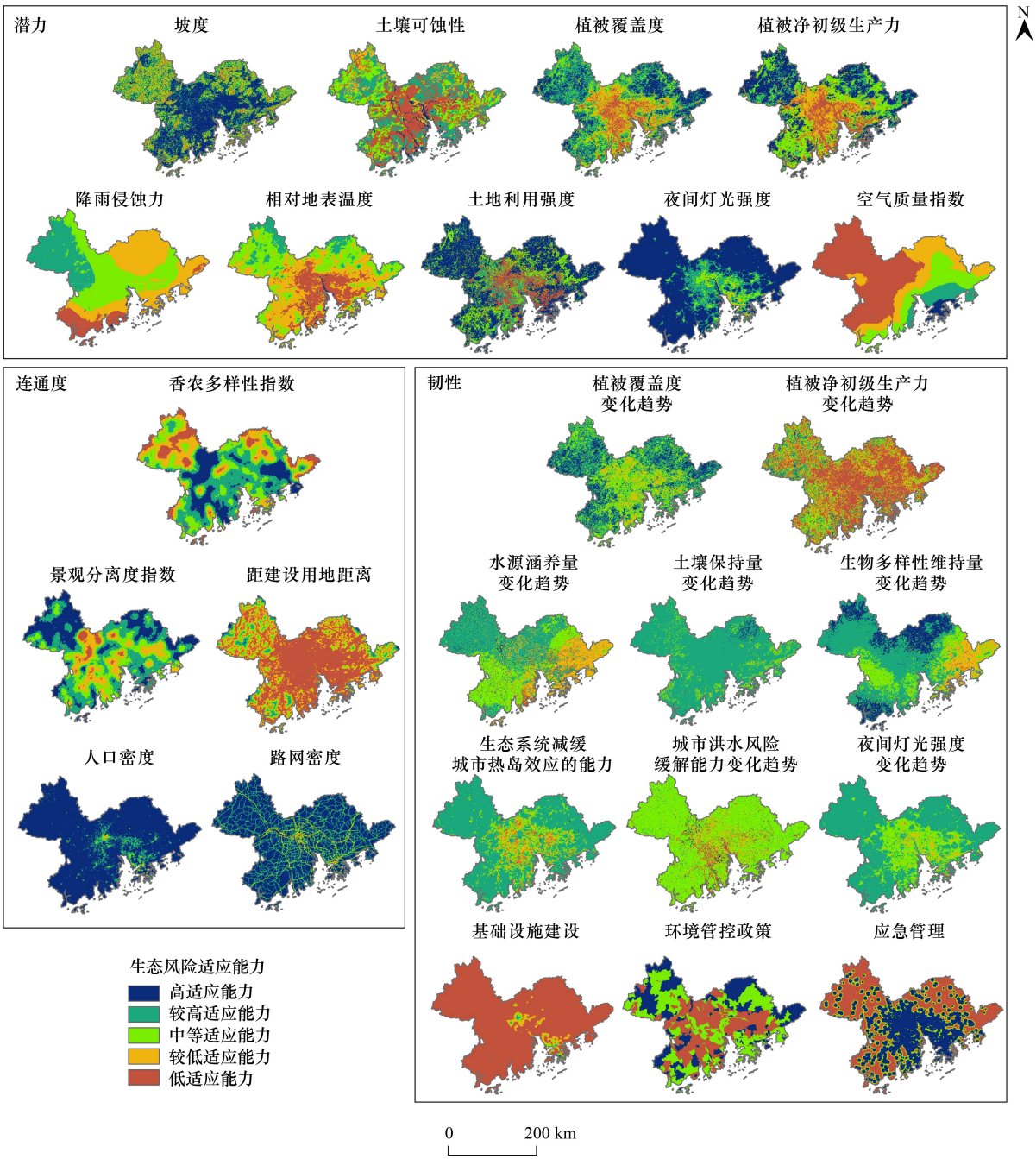

图 3 粤港澳大湾区城市化区域生态风险适应能力的指标层级评估结果

Fig.3 Results of the indicator hierarchy assessment of ecological risk adaptability of urbanized areas in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

破碎化加剧,使生态系统抵抗外部风险的能力减弱。从韧性层面来看,东南部水源涵养服务和生物维持量存在下降趋势;山区稀缺的基础设施和医疗资源使其风险发生中的应急响应和发生后的恢复能力降低。

3.2　基于城市化区域生态风险适应能力的主成分结果

基于 KMO 检验和 Bartlett 球形检验,本文潜力、连通度和韧性三个维度均 KMO≥0.6,结果显著,表明变量之间存在相关关系和共线性问题。潜力、连通度和韧性三个维度分别提取了前 3、2、3 个主成分,累计贡献率分别为 66.075%、72.421%和 53.633%。三个特征值反映的主要维度在不同地理区域具有显著差异(表 3)。

表 3　“潜力-连通度-韧性”的特征值主要维度的影响因子及空间特征

Table 3　Influencing factors and spatial characteristics of the main dimensions of characteristic risk adaptability

特征值 Characteristic value		维度 1 Dimension 1	维度 2 Dimension 2	维度 3 Dimension 3
潜力 Potential	主要因子	植被资源、土地覆被、坡度等地形地貌特征	降雨侵蚀等气候特征	人类活动强度、空气污染等人为干扰特征
	空间特征	中部和东南部适应能力较低	中部、东部和西南部适应能力较低	西部适应能力较低
连通度 Connectedness	主要因子	多样性、分离度等景观空间特征	人口密度、路网建设等人为干扰特征	\
	空间特征	中部、南部及东南部适应能力较低	中部和东南部以及沿着路网向四周延伸的小部分地区适应能力较低	\
韧性 Resilience	主要因子	植被资源变化趋势等地形地貌变化特征	水源涵养、土壤保持和生物多样性等生态系统服务特征	城市防洪、基础设施建设、应急管理等城市规划特征
	空间特征	中部及东南部适应能力较低	东部和西南小部分地区适应能力较低	西北和东北部适应能力较低

3.3　综合指数层级的大湾区生态风险适应能力评估

“潜力-连通度-韧性”的特征值和生态风险适应能力指数呈现周围高、珠江口和东南区域较低的格局(图 4)。生态风险适应能力指数平均水平为中等,低值区占 7.70%,呈中部-东南分布,并进一步向西南-东北方向扩张。

3.4　生态风险适应能力空间特征分析

局域莫兰指数结果(图 5)显示,生态风险适应能力呈现正向集聚分布。周边山区呈现高-高集聚分布,为适应能力高值区,中部和东南部建成区呈现低-低集聚分布且有向四周扩散的趋势,为适应能力低值区。

3.5　基于栅格尺度的大湾区生态风险适应能力空间分区及措施

依据生态风险适应能力从低到高的五个等级将大湾区划分为 5 类分区:重点防控区、能力提升区、优先恢复区、生态过渡区和长期保护区(图 6),由中部地区依次向外分布,土地利用由建设用地和耕地逐渐转变为以林地为主,五个分区中潜力均为“潜力-连通度-韧性”中的最低值。其中,生态过渡区占比最大,为大湾区总面积的 25.92%;重点防控区占比最小,为 7.70%。重点防控区受人为扰动强烈,植被资源稀缺,必须优先实施紧急保护措施,加强防洪工程建设和空气污染治理,执行严格的生态保护边界以遏制不可持续的发展活动。能力提升区涉及大量耕地,需要平衡人地矛盾和资源供给,结合环境质量底线和资源利用上限实施土地利用规划。优先恢复区需要进行针对性的管理,例如恢复退化的生态系统、退耕还林、实施生态环境准入清单等。生态过渡区起到隔绝外界干扰的作用,建立生态缓冲区以保护内部的关键林区。长期保护区需要加强水土保持修复措施,划定生态保护红线对自然生态系统实行长期保护,并完善基础设施建设,加大医疗资源投入。

3.6　基于适应性循环的全过程城市化区域生态风险适应能力特征及提升策略

如图 7 所示,重组阶段的城市(澳门特别行政区、佛山市、东莞市、中山市、深圳市、广州市)生态风险适应能力最低,“潜力-连通度-韧性”最低,高度的城市化使其需要平衡城市发展与生态保护的关系。建议采取恢复植被、调控风险适应能力低值区、构建蓝绿基础设施等适应能力提升策略。开发阶段的城市(香港特别行政区、珠海市)生态风险适应能力升高,处于中等水平,“潜力-连通度-韧性”呈现升高趋势,建设用地的持续扩

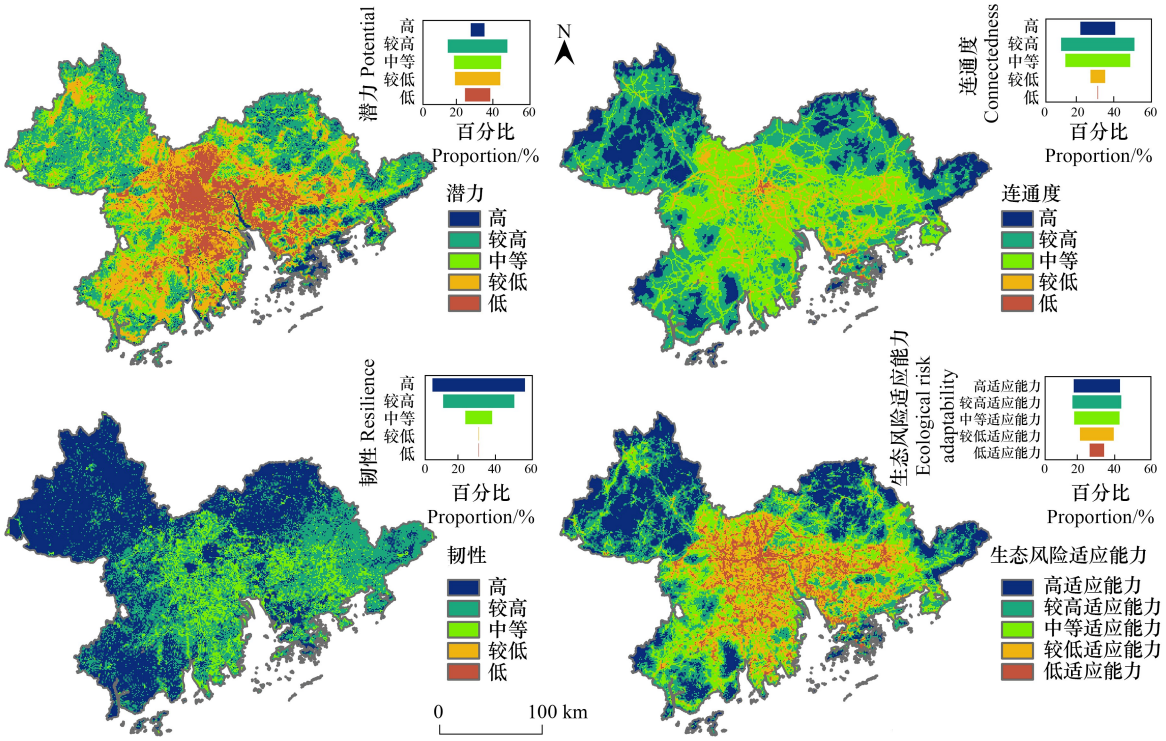

图 4 粤港澳大湾区“潜力-连通度-韧性”的特征值及生态风险适应能力综合指数

Fig.4 Characteristic value of “potential-connectedness-resilience” and composite index of ecological risk adaptability in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

张使其必须针对新增建设用地进行合理的土地利用规划。建议优先对低适应能力的小斑块进行生态恢复,扩大生态用地面积。保护阶段的城市(江门市、惠州市、肇庆市)生态风险适应能力最高,“潜力-连通度-韧性”最高,但仍需建立缓冲带、提升生态系统服务功能,加大基础设施建设力度和医疗资源投入以提升对突发事件的响应能力。

4 讨论

4.1 与已有研究的比较

本文建立的三维评估框架能够从生态系统的结构、功能和动态变化反映城市化区域对生态风险的适应能力。与已有研究相比,从城市化区域的整体角度来看,大湾区生态风险呈现圈层结构的空间分布,内圈层即珠江口附近的生态风险高,依次向四周蔓延至外圈层低风险区域[55],与本文研究结果一致。京津冀[56]和长三角城市群[26]生态风险也呈现由高度城市化区域向生态区域降低的趋势。北京市[28,35]、深圳市[27]的生态风险均呈现由城市建成区向远郊降低的趋势。与本文对生态风险适应能力的研究结果结合可以看出,城市化区域的生态风险一般呈现出由中心城区向外围生态区域降低的趋势,即对生态风险的适应能力逐渐升高。近年来,城市扩张对林地和湿地的侵占使其生态系统服务下降[57]。同时,由于高度集聚的人口、资源和活动,城市生态系统容易受到外部自然灾害以及内部基础设施条件等诸多因素的影响[58—59],最终导致其对生态风险的适应能力降低。在空间分区方面,已有研究将大湾区内圈层和外圈层分别划分为严格管控区和生态保护区[60],与本文的重点防控区和长期保护区具有相似的含义。

从城市化区域内部各城市和特别行政区的角度来看,深圳市、广州市、佛山市、东莞市、中山市和澳门特别行政区位于广佛肇、深莞惠和珠中江 3 个都市圈中心的区域[61—62],人口密集,产业多样,城镇化率高,对生态风险的适应能力较低。周边辐射到的珠海市和香港特别行政区生态风险的适应能力中等。外围的江门市、惠

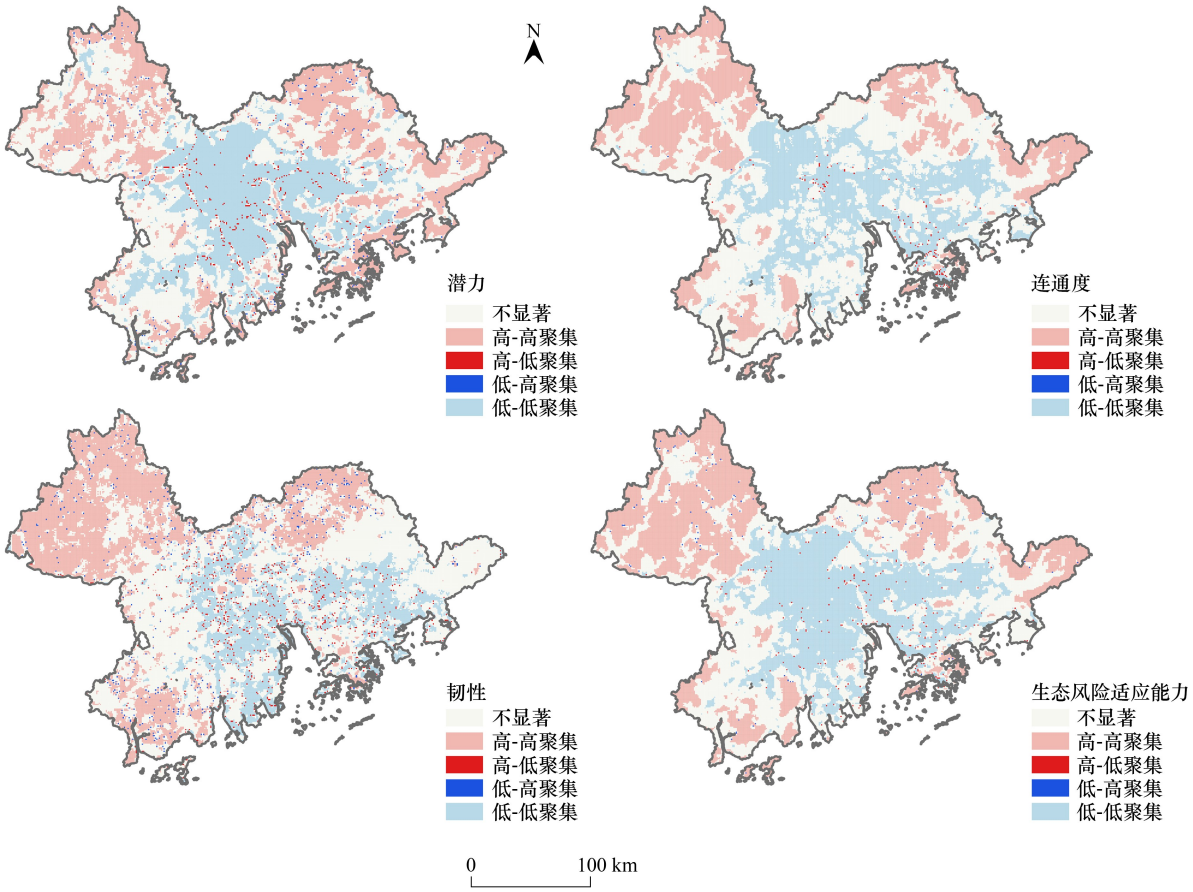

图 5　局域莫兰指数的空间分布

Fig.5　Spatial distribution of the Local Moran′s *I*

州市和肇庆市生态风险的适应能力较高。在京津冀[56]和长三角[26]中也出现了类似的结果,中部核心功能区的北京-天津-廊坊区域、上海大都市圈和南京都市圈区域具有高风险,并且开始向周边中小城市蔓延。将已有研究结果与本文结果相结合发现,核心功能区和都市圈中高速发展的城市,如北京、天津、上海、深圳、广州等超大城市和南京、东莞等特大城市中,大部分对生态风险的适应能力较低。

值得注意的是,深圳、香港和澳门特别行政区的城镇化率均接近 100%。然而,香港的生态风险适应能力却明显高于深圳和澳门,可能有两点原因。一是香港的生物多样性较高。香港陆地面积中只开发了 25%的土地,其余 75%的土地被划为保护地区。其中,郊野公园占香港总面积的 40%,为超过 98%的动植物种提供了栖息地[63]。二是香港的环境污染治理较好,尤其是在空气质量方面。从城市发展定位上来看,澳门作为世界旅游休闲中心,由于其面积较小且游客量大、车辆密度高,空气质量可能会受到影响。深圳作为国际科技创新中心,以电子信息类产业为主,高强度的工业活动带来较高的排污量,使其环境质量下降。而香港作为国际金融、航运和贸易中心,空气污染较小[64]。从地形地势和主导风向上来看,大湾区以平原和丘陵为主,地势平坦,有利于污染物的扩散。湾区内城市群主要集中在珠江口沿岸,广州、东莞、深圳均分布有密集的工业生产活动,受主导风向南风和东南风的影响,这些工业作为污染源可能会将空气污染风险传递给北部和西南部地区的下风城市,如肇庆市[65]。因此,香港处于上风向的地理位置使其不易受到其他城市的空气污染影响。丰富的生物多样性和良好的环境质量使香港较深圳和澳门具有较高的生态风险适应能力。由此可见,本文提出的框架能够较全面的反映城市化区域在不同尺度、不同过程中对生态风险的适应能力特征,为生态风险的全过程管理提供依据。

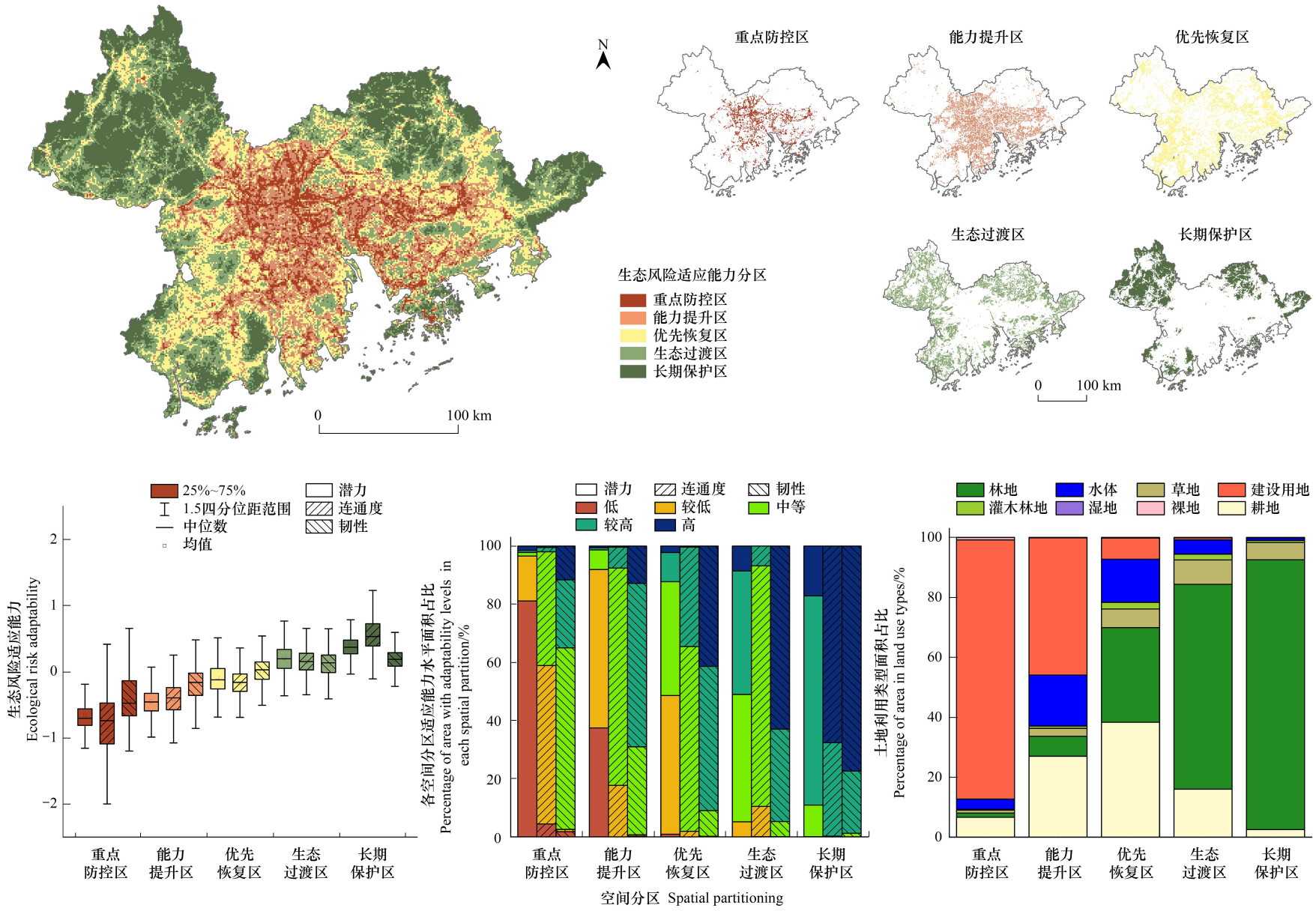

图 6 基于栅格尺度的粤港澳大湾区的生态风险适应能力空间分区及各子区域的风险适应能力统计特征

Fig.6 Spatial partitioning and statistical characteristics in subregions of ecological risk adaptability in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on raster scale

http://www.ecologica.cn

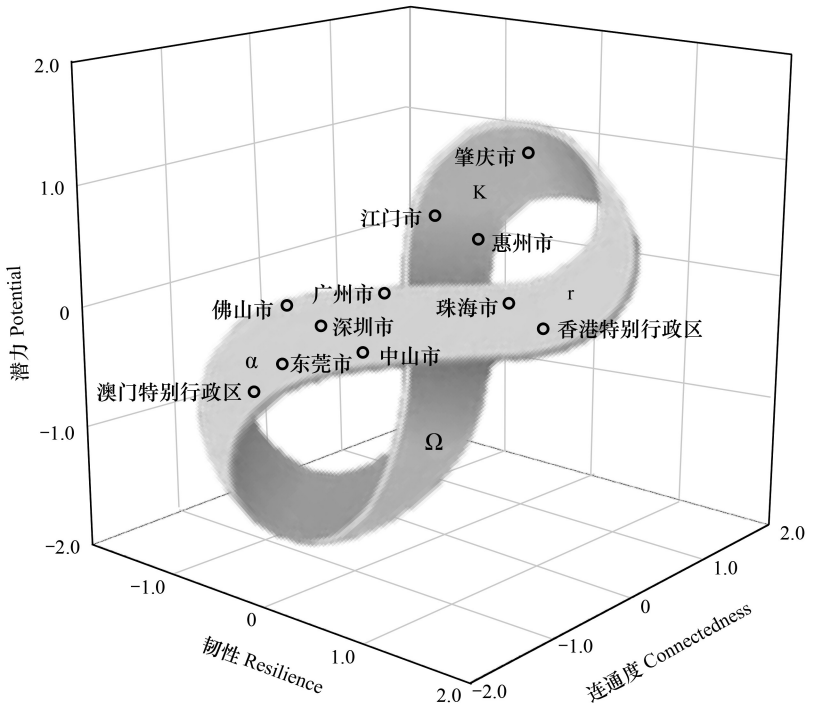

图 7　粤港澳大湾区适应性循环的三维坐标图

Fig.7　Three-dimensional coordinate diagram of the adaptive cycle in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

4.2　局限性和未来展望

本文仍存在一定局限性。构建的指标体系可能未完全覆盖生态风险适应能力的表征方向,例如救援速度等社会经济类指标难以表征。未来的生态风险适应能力预测将着重关注如何建立全面的指标体系以应对不同类型的生态风险,提升系统综合适应能力。同时,未来将结合国土空间规划细化土地利用布局,实现土地空间开发与城市化区域生态风险适应能力提升的调控衔接,确保其在城市化区域生态风险管理中的实际应用和指导。

5　结论

气候变化和人类活动的加剧使城市化区域生态风险预控受到关注,被动的风险治理逐渐被主动适应性管理所替代。然而,以往应用适应性理论的研究大多关注生态风险发生前的概率预测,较少考虑风险发生中应急和发生后恢复的全过程影响。因此,本文构建“潜力-连通度-韧性”的三维框架,统筹考虑生态风险发生前、发生中和发生后的全过程指标,基于主成分分析和主成分回归评估大湾区多尺度的生态风险适应能力。结果表明,大湾区城市群的生态风险适应能力整体处于中等水平,空间集聚特征显著,呈现周围高、珠江口和东南区域较低的格局。处于重组阶段的城市(澳门特别行政区、佛山市、东莞市、中山市、深圳市和广州市)生态风险适应能力低,面临极端高温、内涝、景观破碎化等潜在风险,需要从植被恢复、防洪设施完善及建设用地规划等全方位提升城市化区域生态风险适应能力。周边山区的城市(江门市、惠州市和肇庆市)大部分处于保护阶段,适应能力最高,但仍存在滑坡、泥石流和水土流失的潜在风险,风险发生中的应急响应和发生后的恢复能力较低,需要从生态系统服务功能提升、基础设施建设及医疗资源投入等方面提升对突发事件的响应能力。本文建立的评估方法能够科学有效地从生态风险适应能力辨识、分区管理等方面提升生态安全,为城市化区域生态风险管理提供依据。

参考文献(References):

[1] Elmqvist T, Andersson E, Frantzeskaki N, McPhearson T, Olsson P, Gaffney O, Takeuchi K, Folke C. Sustainability and resilience for transformation in the urban century. Nature Sustainability, 2019, 2: 267-273.

[2] De Sherbinin A, Schiller A, Pulsipher A. The vulnerability of global cities to climate hazards. Environment and Urbanization, 2007, 19(1): 39-64.

[3] 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.

[4] 刘长峰, 侯鹰, 陈卫平, 崔昊天. 基于生态系统服务的城市化区域生态风险表征方法研究. 生态学报, 2021, 41(9): 3343-3353.

[5] 吕永龙, 王尘辰, 曹祥会. 城市化的生态风险及其管理. 生态学报, 2018, 38(2): 359-370.

[6] 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.

[7] 王雅莉. 城市群与城市化区域的关联性及其政策意义. 区域经济评论, 2017(5): 17-18.

[8] 张思锋, 刘晗梦. 生态风险评价方法述评. 生态学报, 2010, 30(10): 2735-2744.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] Xu L, Dai H P, Skuza L, Wei S H. Comprehensive exploration of heavy metal contamination and risk assessment at two common smelter sites. Chemosphere, 2021, 285: 131350.

[14] UN. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. Sendai, JAPAN: United Nations, 2015.

[15] USEPA. EPA/630/R-95/002F Guidelines for Ecological Risk Assessment. Washington, DC: Risk Assessment Forum, US Environmental Protection Agency, 1998.

[16] 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.

[17] DEFRA. A Green Future: Our 25 Year Plan to Improve the Environment. UK: Department for Environment, Food & Rural Affairs, 2023.

[18] MHPPE. Premises for Risk Management: Risk Limits in the Context of Environmental Policy. The Netherlands: The Hague: Directorate General for Environmental Protection, 1989.

[19] 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.

[20] Holling C S. Engineering resilience versus ecological resilience. Engineering within ecological constraints, 1996, 31(1996): 32.

[21] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.

[22] 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.

[23] Kasperson J, Kasperson R, Turner B, Hsieh W C, Schiller A. Vulnerability to global environmental change. The Social Contours of Risk, 2006, 16(3): 268-281.

[24] 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.

[25] 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.

[26] 李嘉艺, 孙璁, 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.

[27] 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.

[28] 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.

[29] Peng J, Xu D M, Xu Z H, Tang H, Jiang H, Dong J Q, Liu Y X. Ten key issues for ecological restoration of territorial space. National Science

Review,2024,11(7): nwae176.

[30] Ostrom E. Panarchy: understanding transformations in human and natural systems. Ecological Economics,2004,49(4): 488-491.

[31] Zhang D H,Ren H H,Sun P J,Jing P Q,Guo B. Construction of multi-level ecological security network in fragmented nature landscape using the three-dimensional framework of ecological adaptability. Ecological Indicators,2023,157: 111229.

[32] Holling C S. Understanding the complexity of economic,ecological,and social systems. Ecosystems,2001,4(5): 390-405.

[33] Gunderson L H. Ecological resilience—In theory and application. Annual Review of Ecology and Systematics,2000,31: 425-439.

[34] Walker B,Gunderson L,Kinzig A,Folke C,Carpenter S,Schultz L. A handful of heuristics and some propositions for understanding resilience in social-ecological systems. Ecology and Society,2006,11: art13.

[35] 李嘉艺. 适应性循环视角下的北京市生态风险评估与空间优化策略研究 [D]. 北京:北京林业大学,2021.

[36] 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.

[37] Wischmeier W H,Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Agricultural Handbook,1965,282.

[38] Wischmeier W H,Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses -A Guide To Conservation Planning. United States Dept of Agriculture Agriculture handbook (USA),1978.

[39] 蔡文博,韩宝龙,逯非,冼超凡,欧阳志云. 全球四大湾区生态环境综合评价研究. 生态学报,2020,40(23): 8392-8402.

[40] 刘芳锐,张正栋,王欣怡,毛源远,董剑彬,黄楚珩,刘钰坤. 粤港澳大湾区生态系统健康时空变化及其对城镇化的响应. 生态学报,2023,43(7): 2594-2604.

[41] 韦家怡. 粤港澳大湾区生态安全格局识别、风险评估及优化[D]. 广州: 广州大学,2022.

[42] 全国地理信息资源目录服务系统. 全国 1:100 万公众版地形数据. 2021.

[43] 地理空间数据云. ASTER GDEM. 2009.

[44] Fischer G,Nachtergaele F,Prieler S,van Velthuizen H T,Verelst L,Wiberg D. Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008). 2008.

[45] Didan K. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061. 2015.

[46] Running. S,Zhao M. MOD17A3HGF MODIS/Terra Net Primary Production Gap-Filled Yearly L4 Global 500 m SIN Grid V061. 2021.

[47] Qu L S,Zhu Q A,Zhu C F,Zhang J. Monthly precipitation data set with 1 km resolution in China from 1960 to 2020. 2022.

[48] Wan Z,Hook S,Hulley G. MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V061. 2021.

[49] GlobeLand30. GlobeLand30. 2020.

[50] 国家地球系统科学数据中心. 全球 500 米分辨率 “类 NPP-VIIRS”夜间灯光数据集(2000-2023 年). 2024.

[51] Dobson J E,Bright E A,Coleman P R,Durfee R C,Worley B A. LandScan: a global population database for estimating populations at risk. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,2000,66(7): 849-857.

[52] 时空三极环境大数据平台. 中国 1km 逐月潜在蒸散发数据集(1990-2021). 2017.

[53] 资源环境科学数据注册与出版系统. 中国气象要素年度空间插值数据集. 2022.

[54] Ross C W,Prihodko L,Anchang J,Kumar S,Ji W J,Hanan N P. HYSOGs250m,global gridded hydrologic soil groups for curve-number-based runoff modeling. Scientific Data,2018,5(1): 180091.

[55] 何晔宇. 基于景观格局视角的粤港澳大湾区生态韧性研究[D]. 北京: 中国科学院大学,2021.

[56] 郭力嘉,刘瑞民,门聪,王清睿,张妍. 城市扩张背景下京津冀地区景观格局演变及生态风险变化评价研究; proceedings of the 2018 中国环境科学学会科学技术年会,中国安徽合肥,2018.

[57] 王文静,韩宝龙,郑华,欧阳志云. 粤港澳大湾区生态系统格局变化与模拟. 生态学报,2020,40(10):3364-3374.

[58] 毛亚会,余丹林,郑江华,常琳琳,王慧玲. 城市脆弱性评价研究进展. 环境科学与技术,2017,40(12):97-103.

[59] 王岩,方创琳,张蔷. 城市脆弱性研究评述与展望. 地理科学进展,2013,32(5):755-768.

[60] 李超,牛文浩,黄怀玉,姚顺波,龚直文. 城市化背景下粤港澳大湾区生态风险时空演变及生态分区识别研究. 环境工程技术学报,2024,14(2): 562-573.

[61] 李郇,周金苗,黄耀福,黄玫瑜. 从巨型城市区域视角审视粤港澳大湾区空间结构. 地理科学进展,2018,37(12): 1609-1622.

[62] 杨静波. 从都市圈视角看崛起的粤港澳大湾区. 金融言行: 杭州金融研修学院学报,2020(6): 21-25.

[63] 张志辉. 香港的郊野公园和受保护地区. 香港;中华人民共和国香港特别行政区立法会. 2016. https://www.legco.gov.hk/research-publications/cn/essentials-1617ise06-country-parks-and-protected-areas-in-hong-kong.htm

[64] 蔡松锋,肖敬亮,文韵. 粤港澳大湾区发展现状与未来展望. 财经界,2019(16): 30-34.

[65] Zhang W,Liu G Y,Yang Z F. Urban agglomeration ecological risk transfer model based on Bayesian and ecological network. Resources,Conservation and Recycling,2020,161: 105006.