

DOI: 10.20103/j.stxb.202401040033

张辛欣, 金晓斌, 梁坤宇, 韩博, 王世磊, 朱文洁, 梁鑫源, 周寅康. 社会-生态系统视角下快速城市化地区生态风险评价与管控分区——以江苏省为例. 生态学报, 2024, 44(18): 8138-8149.

Zhang X X, Jin X B, Liang K Y, Han B, Wang S L, Zhu W J, Liang X Y, Zhou Y K. Ecological risk assessment and management zoning in rapid urbanization areas from the perspective of social-ecological system: a case study of Jiangsu Province. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 8138-8149.

# 社会-生态系统视角下快速城市化地区生态风险评价与管控分区

## ——以江苏省为例

张辛欣<sup>1,2</sup>, 金晓斌<sup>1,2,3,\*</sup>, 梁坤宇<sup>1,2</sup>, 韩博<sup>1,2</sup>, 王世磊<sup>1,2</sup>, 朱文洁<sup>1,2</sup>, 梁鑫源<sup>1,2</sup>, 周寅康<sup>1,2,3</sup>

1 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

2 自然资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210023

3 江苏省土地开发整理技术工程中心, 南京 210023

**摘要:**快速城市化地区是经济增长、社会进步和人口聚集的重要区域,但城市化进程中剧烈的土地利用变化、大规模城镇建设、人口集聚和资源消耗等问题使其面临严峻的生态风险,开展生态风险评价与管控研究对区域生态文明建设和高质量发展至关重要。引入社会-生态系统框架诠释生态风险形成机理,构建了基于“内生性-外源性-控制性”的生态风险评估框架,结合多源数据对 2000—2020 年江苏省生态风险时空特征进行测度,综合考虑生态风险现状和变化趋势划定生态风险分区,并针对性地提出区域生态风险预防和治理策略。研究结果显示:(1)社会-生态系统理论有助于深化对快速城市化地区生态风险的认识,基于快速城市化地区生态风险源头复杂、受体多元、表现多样的特征,构建集成“内生性-外源性-控制性”的生态风险解析框架,可为快速城市化地区的生态风险诊断和管控发挥积极作用;(2)近 20a 江苏省内生性生态风险和外源性生态风险有所增加,控制性生态风险略有降低,综合生态风险呈现“南高北低”“西高东低”的特点,高值区主要分布在经济发达、人口密集的城镇中心以及环境敏感区,且风险普遍有所上升,低值区主要分布在水域湿地、大城市郊区以及主要的交通线路;(3)研究期内江苏省生态风险持续下降型、波动下降型、稳定型、波动上升型和持续上升型占比分别为 18.79%、2.96%、57.95%、15.88%、4.41%,并可据此将生态风险管控分区划分为生态风险紧急管控区、严格管控区、动态调控区、预防管理区、敏感监控区等 5 类分区,各区比例分别为 12.05%、2.19%、64.42%、16.11%、5.22%。本研究可为解析和评估快速城市化地区的生态风险提供新的视角和方法,并为快速城市化地区的生态风险管理提供参考。

**关键词:**生态风险; 时空特征; 社会-生态系统; 快速城市化地区; 江苏省

## Ecological risk assessment and management zoning in rapid urbanization areas from the perspective of social-ecological system: a case study of Jiangsu Province

ZHANG Xinxin<sup>1,2</sup>, JIN Xiaobin<sup>1,2,3,\*</sup>, LIANG Kunyu<sup>1,2</sup>, HAN Bo<sup>1,2</sup>, WANG Shilei<sup>1,2</sup>, ZHU Wenjie<sup>1,2</sup>, LIANG Xinyuan<sup>1,2</sup>, ZHOU Yinkang<sup>1,2,3</sup>

1 School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2 Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210023, China

3 Jiangsu Provincial Land Development and Consolidation Technology and Engineering Center, Nanjing 210023, China

**Abstract:** Rapid urbanization areas are significant regions for economic growth, social progress, and population aggregation.

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41971234, 41971235)

**收稿日期:**2024-01-04; **网络出版日期:**2024-07-12

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jinxb@nju.edu.cn

However, they face severe ecological risks due to drastic changes in land use, large-scale urban construction, population concentration, and resource consumption in the process of urbanization. Conducting research on ecological risk assessment and management control is crucial for regional ecological civilization construction and high-quality development. Therefore, in this paper, the society-ecology system framework is introduced to explain the formation mechanism of ecological risk, and an ecological risk assessment framework based on "endogenous-exogenous-control" is constructed, the spatial and temporal characteristics of ecological risk in Jiangsu Province from 2000 to 2020 were measured based on multi-source data. In the end, the paper considers the current situation and changing trend of ecological risk, and puts forward regional ecological risk prevention and management strategies. The research findings are as follows: (1) The theory of the social-ecological system is helpful in deepening the understanding of ecological risks in rapid urbanization areas. Based on the characteristics of complex sources, multi-receptor, and diverse expression of ecological risk in rapid urbanization areas, an analytical framework of ecological risk integrating "endogenous-exogenous-control" was constructed, it can play an active role in the diagnosis and management of ecological risks in the rapid urbanization areas. (2) In the past 20 years, the endogenous and exogenous ecological risks in Jiangsu Province were increased, while the controlled ecological risks were slightly decreased. The integrated ecological risk was characterized by "high in the south and low in the north, high in the west and low in the east", the high-value areas are mainly located in economically developed, densely populated urban centres and environmentally sensitive areas, and the risks have generally increased, the low-value areas were mainly distributed in the water wetland, the suburbs of big cities, and the areas along the main traffic routes. (3) In the ecological risk types in Jiangsu Province during the study period, the percentages of continuously decreasing, fluctuating decreasing, stabilizing, fluctuating increasing, and continuously increasing were 18.79%, 2.96%, 57.95%, 15.88% and 4.41%, respectively. Based on this, the ecological risk management and control zones can be divided into five categories: ecological risk emergency management and control zones, strict management and control zones, dynamic regulation zones, preventive management zones, and sensitive monitoring zones, and the proportion of each area was 12.05%, 2.19%, 64.42%, 16.11%, 5.22%, respectively. In a word, this study provides a new perspective and method for analyzing and assessing ecological risks in rapid urbanization areas and also provides a reference for ecological risk management in rapid urbanization areas.

**Key Words:** ecological risk; spatial temporal characteristics; social-ecological system; rapid urbanization areas; Jiangsu Province

生态风险是由自然或人为活动引起的,对生态系统和人类健康可能产生不利影响的概率或程度<sup>[1]</sup>。快速城市化地区作为经济增长和社会进步的引擎,其快速的人口集聚、快节奏的城市扩张和高强度的经济活动对资源 and 环境造成显著压力,引发一系列生态风险挑战<sup>[2-3]</sup>。对快速城市化地区生态风险进行科学的分析和评估,并进行针对性的风险管控策略,对于快速城市化地区的生态环境保护和可持续发展具有重要意义。

早期生态风险研究主要关注特定环境污染物<sup>[4-5]</sup>,研究污染物对生态系统及其组成的影响<sup>[5-6]</sup>。随着研究的深入,学者们在生态风险的评估<sup>[7-9]</sup>、预警<sup>[10-12]</sup>和管理<sup>[13-15]</sup>方面进行了大量的研究。伴随着城市化和工业化进程逐步推进,越来越多的学者们开始关注城市化区域的生态风险问题<sup>[16]</sup>,相关研究逐渐形成了“诊断评价—管理策略”的研究范式。其中,诊断评价多利用景观格局指数<sup>[17-18]</sup>、风险“源-汇”法<sup>[19-20]</sup>,管理策略多从弹性管理<sup>[21-23]</sup>、动态管理<sup>[24-25]</sup>和异质性管理<sup>[26-27]</sup>视角出发。然而,传统的生态风险评估与管理在应用于快速城市化地区这一复杂系统时,对于快速城市化地区多种风险因素的相互作用和综合影响考虑不足,忽略了生态系统与社会系统之间的相互作用和影响,未考虑区域社会、自然复合特征与整体性。生态风险的形成机理与作用机制是由生态和社会过程共同组成的,社会-生态系统中多个系统元素相互作用,进而产生生态风险<sup>[8]</sup>。因此,通过将社会-生态系统框架应用于生态风险研究,可以更全面、系统地分析城市化对生态的

影响。

快速城市化进程对社会-生态系统的扰动不断加剧,由此造成的城市韧性降低、空气和水体污染、城市热岛强度增加、生态系统多功能损失、生物多样性降低等生态风险特征愈发明显<sup>[28]</sup>,制约着区域高质量发展。随着城市化进程的加速,面向复合系统特征的生态风险评价变得日益重要,快速城市化地区生态风险来源广泛、表现形式各异、作用机制复杂,在生态风险度量中需要突出社会-生态系统的综合性,构建一个兼顾系统、动态、特色的生态风险评估框架。因此,本文从社会-生态系统视角出发,构建集成“内生性-外源性-控制性”的生态风险解析框架以确定生态风险等级,并基于时间尺度变化特点对生态风险类型进行划分,在此基础上提出集成“等级—类型”的管控分区及管控策略,以期丰富生态风险的评价与分析方法,促进区域生态文明建设与高质量发展。

## 1 理论框架

### 1.1 快速城市化地区生态风险解析

快速城市化地区是指城市化发展进程较快的区域,随着人口增长和经济发展,以及高度的人类活动强度和剧烈的土地利用变化,这些地区面临土地资源稀缺、空间冲突剧烈、人地矛盾突出、利益相关主体复杂等问题,也对区域地表环境产生了复杂而深远的影响,带来了明显的生态风险挑战,生态保护面临更大的矛盾与阻力。因此,明晰快速城市化地区的特征,是全面把握其内涵的关键所在。

快速城市化地区的生态风险来源复杂且多元,表现形式各异。首先,快速城市化过程中的土地利用类型和格局的剧烈变化直接影响到生态系统结构和功能,带来生境丧失、生态系统破碎化、生态服务功能降低的风险<sup>[29]</sup>。其次,快速城市化地区高强度的人类活动引发复合性环境污染,工业排放、城市建设、交通运输等所导致的空气、水和土壤污染加剧,直接危及生态系统与人类健康<sup>[30]</sup>。同时,随着城市规模的快速扩大,城市中的热量难以散发,形成城市热岛效应,影响城市和周边地区的气候、水文过程和生态系统健康<sup>[31]</sup>。最后,快速城市化过程中自然生态系统的破坏和人类活动的干扰,导致生物多样性减少,从而导致生态系统的结构和功能发生显著变化<sup>[32]</sup>。综合来看,快速城市化地区生态风险具有多风险源和复杂风险受体的特点,这些生态风险之间相互交织,呈现出系统性、综合性的特征,要解决这些问题需要跨学科的综合性和系统性的管理策略。

### 1.2 生态风险多维评估框架

社会-生态系统(Social-ecological system, SES)框架是美国政治经济学家奥斯特罗姆基于多中心治理提出的一套分析与解构多中心利益主体治理公共事务的源理论语言。SES 框架内部包含 4 个基本系统,即资源系统、资源单位、治理系统和使用者的系统,阐释了社会经济发展与建设、资源系统、资源单位、参与者系统、治理系统、行动情景结果等多个维度之间的相互关系<sup>[33-34]</sup>。快速城市化地区生态风险评价是对人类与生态管理系统进行的全面综合评估,需在自然系统、人类经济和社会系统有机结合的基础上,形成一个全面的生态结构支撑,从而更好地为管理决策提供有力支持。而 SES 框架可以为系统剖析快速城市化地区生态风险的形成要素之间相互链接关系提供理论参考和综合的理论框架,有助于深入理解城市化过程中人类社会与生态系统之间的复杂关系<sup>[35]</sup>,不仅能帮助解析城市扩张和人类活动对资源系统和资源单位的影响,还能揭示治理系统在这一过程中的关键作用<sup>[36]</sup>。鉴于此,本文以 SES 视角为基础,构建了基于“内生性-外源性-控制性”的快速城市化地区生态风险评估框架(图 1)。

内生性生态风险主要与生态系统内部结构功能有关,表征了生态系统的活力、组织力和恢复力等,资源系统和资源单位是该类风险的主要载体。因此,内生性生态风险是指由生态系统内部因素引起的风险,反映了生态系统自然本底状况。内生性生态风险可能导致生态系统内部生物种群的失衡、生态系统结构和功能的异常,进而影响生态系统的整体健康和服务功能。生态本底越差,生态系统稳定性越差,越容易受到外界活动影响而产生生态退化且难以自我修复,内生性风险越大。丰富多样的生物种类、复杂的组织结构可以确保生态

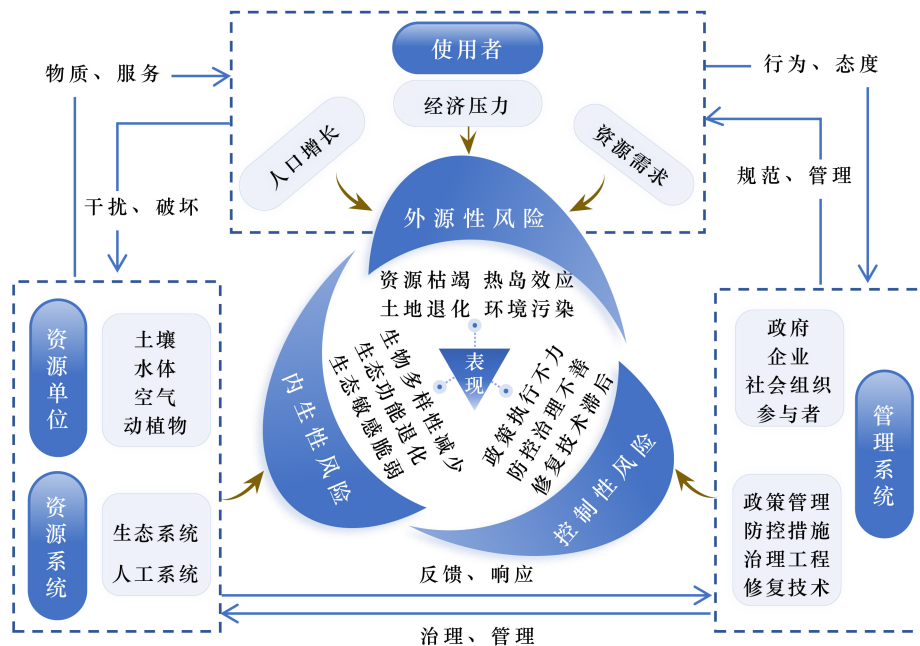


图1 基于社会-生态系统的生态风险识别框架

Fig.1 Ecological risk identification framework based on Society-ecology system

系统中各关键功能生态位的正常运行,增强其抗干扰能力,保持整个生态系统结构和功能的相对稳定<sup>[37]</sup>,内生性风险相对较小。

外源性生态风险主要与人类活动密切相关,是由使用者的行为导致的,例如,资源过度开采、城市无序发展、工业污染排放等行为都可能对生态系统造成压力,引发外源性生态风险。因此,外源性生态风险是指由系统外部因素引起的生态风险,大规模城镇建设与人口集聚、沉重的经济压力与财政负担、资源的需求攀升与过度消耗等,使快速城市化地区面临土地退化、生物多样性降低、环境污染、城市热岛与高温风险增强、资源枯竭等一系列生态风险<sup>[38—39]</sup>。

控制性生态风险与治理系统相关,由政府、企业、公众等对生态环境的治理、保护、管理的政策、工程、技术等举措所产生。因此,控制性生态风险是由管理政策和控制措施缺位或不当导致的生态风险。影响因素包括人类的管理决策、生态保护政策的制定和执行、生态治理与修复的技术和措施等。控制性生态风险的管理和控制得当,可以有效减少或避免对生态系统造成的负面影响。生态环境管理体系越完备,城市生态环境保护与建设越完善,污染控制和生态建设力度越强,控制性风险越小。

内生性、外源性和控制性生态风险及其影响因素在社会-生态系统中相互作用,可能导致复杂的生态风险结果。内生性风险和外源性风险相互作用,共同影响生态系统的结构和功能。外源性风险可能会导致生态系统结构和功能的改变,进一步影响生态系统的健康和稳定性,从而增加内生性风险。而治理系统是应对生态风险的重要手段,控制性风险的管理措施可能会降低外源性风险对生态系统的影响;同时,通过保护和恢复生态系统,也可以提高生态系统对内生性风险的抵抗力。因此,在生态风险管理过程中,需要综合考虑各种风险因素,以保障生态系统的健康和可持续发展。

## 2 材料与方法

### 2.1 研究区概况

江苏省位于我国大陆东部沿海地区中心,地处长江、淮河下游地区,介于东经 116°18'—121°57',北纬 30°45'—35°20'之间,东濒黄海,西连安徽,北接山东,东南与浙江和上海毗邻。江苏省处于丝绸之路经济带和



21 世纪海上丝绸之路的交汇点,是支撑长江经济带发展、长三角一体化发展等国家区域重大战略实施的重要地区。江苏省共有 13 个设区市,96 个县(市、区),2000 年以来,随着工业化、城镇化进程不断加速,省域范围内城镇化率从 41.5%跃升至 74.4%,城市建成区面积从 1382.27km<sup>2</sup>增加到 4916.17 km<sup>2</sup>,扩大了 3.56 倍。江苏省跨江滨海,平原辽阔,水网密布,湖泊众多,是重要的滨海生物多样性保护区、重要的农产品和水产品提供区、重要的洪水调蓄功能区、重要的水源涵养功能区以及重要的人居生态安全保障区,拥有太湖丘陵生态绿心、江淮湖群生态绿心、运河沿岸生态保护修复带、沿海和西部丘陵湖荡生态屏障等多重生态空间,生态保护与建设总体上呈现生态改善的良好势头,但高强度的人类活动和快节奏的经济发展,使部分地区出现生境的破碎、丧失或退化,生物多样性受到威胁,空气质量面临严峻挑战,城市热岛效应日益显著等现象,对居民健康、生态平衡和城市可持续发展构成了威胁。

2.2 数据来源

为了对近 20a 江苏省生态风险演变进行实证研究,本研究使用了包括土地利用、地表辐射温度、夜间灯光、PM<sub>2.5</sub>等空间数据以及社会经济统计数据,共涵盖 2000、2005、2010、2015、2020 年 5 期数据,具体数据说明见表 1。

表 1 研究数据来源  
Table 1 Data sources

| 数据名称<br>Data name                                                           | 数据精度<br>Data precision | 数据来源<br>Data sources                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 土地利用数据<br>Land use data                                                     | 30m                    | 中国土地覆盖数据集 (CLCD) <sup>[40]</sup>                                        |
| 归一化植被指数<br>Normalized difference vegetation index                           | 30m                    | LANDSAT/LT05/C01/T1_TOA, LANDSAT/LC08/C01/T1_RT_TOA                     |
| 夜间灯光遥感数据<br>Nighttime-light data                                            | 1km                    | 国家青藏高原科学数据中心:中国长时间序列逐年人造夜间灯光数据集(1984—2020) <sup>[41]</sup>              |
| 地表温度<br>Land surface temperature                                            | 1km                    | MODIS/061/MOD11A2<br>MOD11A2 V6.1 地表温度产品                                |
| PM <sub>2.5</sub><br>Particulate matter with aerodynamic diameters ≤ 2.5 μm | 1km                    | 国家青藏高原科学数据中心:中国高分辨率高质量 PM <sub>2.5</sub> 数据集(2000—2021) <sup>[42]</sup> |
| 社会经济数据<br>Socio-economic data                                               | —                      | 江苏省及各市生态环境状况公报,江苏省统计年鉴                                                  |

2.3 研究方法

2.3.1 生态风险评价指标体系

(1) 评价指标体系构建

基于上述内涵解析,快速城市化地区的生态风险可通过构建综合评价体系进行评估,具体指标计算方法见表 2。其中:内生性风险评价运用生态系统健康评价的 VORS 模型, *EV* (Ecosystem Vigor) 表示生态系统活力,用归一化植被指数表征; *EO* (Ecosystem Organization) 表示生态系统组织力,运用 Fragstats 移动窗口法计算 Shannon 多样性指数 (SHDI)、面积加权平均斑块分形指数 (AWMPFD)、Shannon 均匀性指数 (SHEI)、聚合度指数 (COHESION)、蔓延度指数 (CONTAG),表征景观多样性和景观连通性<sup>[12]</sup>; *ER* (Ecosystem Resilience) 表示生态系统恢复力,选择生态弹性系数表征<sup>[30]</sup>,生态弹性度是生态系统受到压力或破坏时自我调节恢复的能力; *ES* (Ecosystem Services) 表示生态系统服务<sup>[43]</sup>,以谢高地等<sup>[44]</sup>改进后的中国生态系统单位面积生态服务当量表为基础,结合江苏省实际进行修正和计算得到生态系统服务价值。外源性风险考虑人为干扰度、热岛效应强度和空气污染强度三项指标,其中人为干扰度选取不同土地利用方式和强度,结合夜间灯光分布进行修正<sup>[45]</sup>;热岛效应强度基于谷歌地球引擎 (Google Earth Engine, GEE) 平台,以长时间序列的 MODIS 卫星资料为基础数据源反演地表温度<sup>[46]</sup>,均值—标准差法划分相应的温度等级区<sup>[31]</sup>;空气污染强度用与人类社会生产生活密切相关的 PM<sub>2.5</sub>浓度表征<sup>[47]</sup>。控制性风险包括生态保护、环境改善和污染防治三个维度,其中生

态保护用人均园林绿地面积和建成区绿化覆盖率表征;环境改善用空气环境质量达标率和声环境状况表征;污染防治用污水处理率、生活垃圾处理率表征。

表 2 基于“内生性-外源性-控制性”的快速城市化地区生态风险评价指标体系

Table 2 The ecological risk assessment index system of “endogenous-exogenous-control” in the rapid urbanization areas

| 准则(权重)<br>Criteria (weights)               | 指标(权重)<br>Indicators (weights) | 内涵<br>Meaning               | 计算方法<br>Method of calculation    | 属性<br>Attributes |
|--------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------|
| 内生性风险 $I(0.4)$<br>Endogenous risk $I(0.4)$ | 生态系统服务 $ES$                    | 生态系统为人类提供的各种直接和间接的服务        | 生态服务价值评估法                        | 负向               |
|                                            | 生态系统活力 $EV$                    | 生态系统的新陈代谢或初级生产力             | GEE 计算归一化植被指数                    | 负向               |
|                                            | 生态系统组织力 $EO$                   | 由景观格局决定的生态系统的结构稳定性          | 景观异质性和景观连通性, Fragstats4.2 移动窗口计算 | 负向               |
|                                            | 生态系统恢复能力 $ER$                  | 区域生态系统在受到外界干扰后恢复其原有结构和功能的能力 | 生态弹性系数                           | 负向               |
| 外源性风险 $O(0.4)$<br>Exogenous Risk $O(0.4)$  | 人类活动强度 $HA(0.6)$               | 人类生产生活活动对生态环境的干扰程度          | 地表覆盖面积权重的人为干扰指数+夜间灯光修正           | 正向               |
|                                            | 城市热岛效应强度 $HE(0.2)$             | 特定地区的气温高于周围地区的现象            | GEE 反演地表温度                       | 正向               |
|                                            | 空气污染排放 $AP(0.2)$               | 环境空气质量                      | $PM_{2.5}$ 污染物浓度                 | 正向               |
| 控制性风险 $C(0.2)$<br>Control Risk $C(0.2)$    | 生态保护 $EP(0.2)$                 | 生态保护管控政策与措施实施力度             | 人均园林绿地面积、建成区绿化覆盖率                | 负向               |
|                                            | 环境改善 $EI(0.2)$                 | 环境改善情况                      | 空气环境质量达标率、声环境状况                  | 负向               |
|                                            | 污染防治 $PC(0.2)$                 | 污染防治情况                      | 污水处理率、生活垃圾处理率                    | 负向               |

GEE:谷歌地球引擎 Google earth engine

三种类型生态风险评价公式分别为:

$$I = 1 - \sqrt[4]{EV \times EO \times ER \times ES} \quad (1)$$

$$O = 0.6HA \times 0.2HE \times 0.2AP \quad (2)$$

$$C = 1 - 0.4EP \times 0.2EI \times 0.4PC \quad (3)$$

$$ERI = 0.4I + 0.4O + 0.2C \quad (4)$$

式中,ERI 代表综合生态风险指数, $I$  为内生性生态风险, $O$  为外源性生态风险, $C$  为控制性生态风险, $EV$  为生态系统活力, $EO$  为生态系统组织力, $ER$  为生态系统恢复力, $ES$  为生态系统服务; $HA$  为人类活动强度, $HE$  为城市热岛强度, $AP$  为空气污染排放, $EP$  为生态保护, $EI$  为环境改善, $PC$  为污染防治。

## (2) 指标标准化和权重确定

由于各指标单位、量级均不相同,故按指标正负属性进行标准化处理。本文运用极差标准法,将各指标分成效益型指标和成本型指标,其中效益型指标属性值越大越好,而成本型指标属性值越小越好,见公式(5)和(6)。采用层次分析法对指标进行权重赋值,通过构建判断矩阵,计算各指标的权重值(表 2)。

$$R_{ij} = \frac{(X_{ij} - X_{j\min})}{(X_{j\max} - X_{j\min})} \quad (5)$$

$$R_{ij} = \frac{(X_{j\max} - X_{ij})}{(X_{j\max} - X_{j\min})} \quad (6)$$

式中, $R_{ij}$  为指标标准化值; $X_{ij}$  为各指标实际值; $X_{j\max}$  和  $X_{j\min}$  分别为第  $j$  个指标的最大值和最小值。

## 2.3.2 生态风险类型划分

将综合生态风险水平分为五级:低风险(I级)、较低风险(II级)、中等风险(III级)、较高风险(IV级)和高风险(V级)。为了更好地了解风险的变化趋势,逐期比较生态风险等级,后一期减去前一期得到四组生态

风险等级变化结果。根据生态风险等级变化,将其归纳为五种生态风险类型:持续下降型(I型)、波动下降型(II型)、稳定型(III型)、波动上升型(IV型)和持续上升型(V型)(表3)。

$$\Delta L_t = L_{t+1} - L_t \tag{7}$$

$$S_L = \sum_{t=1}^n \Delta L_t \tag{8}$$

式中, $L$ 为生态风险等级, $\Delta L$ 为生态风险等级变化, $S_L$ 为生态风险等级变化之和, $t$ 为研究时期。

表 3 生态风险类型

Table 3 Type of ecological risks

| 风险类型 Type of ecological risks                 | 范围 Division criteria                                                  | 描述 Characteristics |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 持续下降型(I型) Continuous decline type (type I)    | $\Delta L_t \leq 0 \wedge S_L < 0$                                    | 生态风险持续下降趋势         |
| 波动下降型(II型) Fluctuation decline type (type II) | $\exists \Delta L_t > 0 \wedge \exists \Delta L_t < 0 \wedge S_L < 0$ | 生态风险有波动但总体下降       |
| 稳定型(III型) Stable type (type III)              | $\Delta L_t = 0 \wedge S_L = 0$                                       | 生态风险相对稳定           |
| 波动上升型(IV型) Fluctuation rise type (type IV)    | $\exists \Delta L_t > 0 \wedge \exists \Delta L_t < 0 \wedge S_L > 0$ | 生态风险有波动但总体上升       |
| 持续上升型(V型) Continuous rise type (type V)       | $\Delta L_t \geq 0 \wedge S_L > 0$                                    | 生态风险持续上升趋势         |

2.3.3 生态风险管控分区

为了更好反映江苏省综合生态风险情况,并更有效地进行生态风险的应对,根据江苏省生态风险等级与类型进行生态风险管控分区。考虑到县作为基层行政管理单位,具有相对独立的管理权限和资源调配能力,因此选择县域尺度可以更好地进行生态风险的管控。由生态风险等级和风险类型可以得到23种“等级-类型”组合类型,进一步得到紧急管控区、严格管控区、动态调控区、预防管理区和敏感监控区5种不同强度的管控分区(表4)。

表 4 生态风险管控分区

Table 4 Ecological risk management zoning

| 管控分区 Management zoning           | 组合 Combination types                    | 特点 Zoning characteristics |
|----------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------|
| 紧急管控区 Emergency control area     | IV—V, V—V, V—IV, IV—IV                  | 现状风险程度较高,且风险持续增加的区域       |
| 严格管控区 Strictly control area      | V—II, V—III, IV—I, IV—II, IV—III        | 现状风险程度较高,但风险变化趋于稳定的区域     |
| 动态调控区 Dynamic regulatory area    | III—I, III—II, III—III, III—IV, III—V   | 现状风险程度中等,且风险变化相对稳定的区域     |
| 预防管理区 Preventive management area | I—II, I—III, I—IV, II—II, II—III, II—IV | 现状风险程度较低,且风险下降/保持稳定的区域    |
| 敏感监控区 Sensitive monitoring area  | I—I, II—I, II—V                         | 现状风险程度较低,但风险变化剧烈的区域       |

3 结果与分析

3.1 生态风险时空演变

根据表2,计算各项风险指标,得到内生性、外源性和控制性三类生态风险,对三类生态风险进行叠加,得到江苏省2000—2020年综合生态风险(图2)。

内生性生态风险。在时间变化上,2000—2020年江苏省内生性风险总体呈现波动变化趋势,具体表现为下降、上升、再下降、后上升的态势,这一变化是城市化进程不断推进、生态保护措施实施与生态系统自我调节机制共同作用的结果。在空间分布上,内生性生态风险呈现不均衡性,高风险区域主要集中在城市中心及其周边经济、人口、城镇聚集区域,这些区域深受人类生态胁迫影响,人类活动频繁且强度高;低风险区则主要分布在具有重要生态功能的区域,如洪泽湖、淮河、江淮湖群、长江、太湖、京杭大运河等重要水源涵养区,沿海湿地等生物多样性富集区,以及北部海湾、中部沿海滩涂和长江口北侧海域等重要滩涂和浅海水域,这些区域人类活动干扰较小,生态系统展现出较强的稳定性、抗干扰能力及自我调节恢复能力。

外源性生态风险。在时间变化上,近20a江苏省外源性生态风险呈现先上升后下降的趋势,2000—



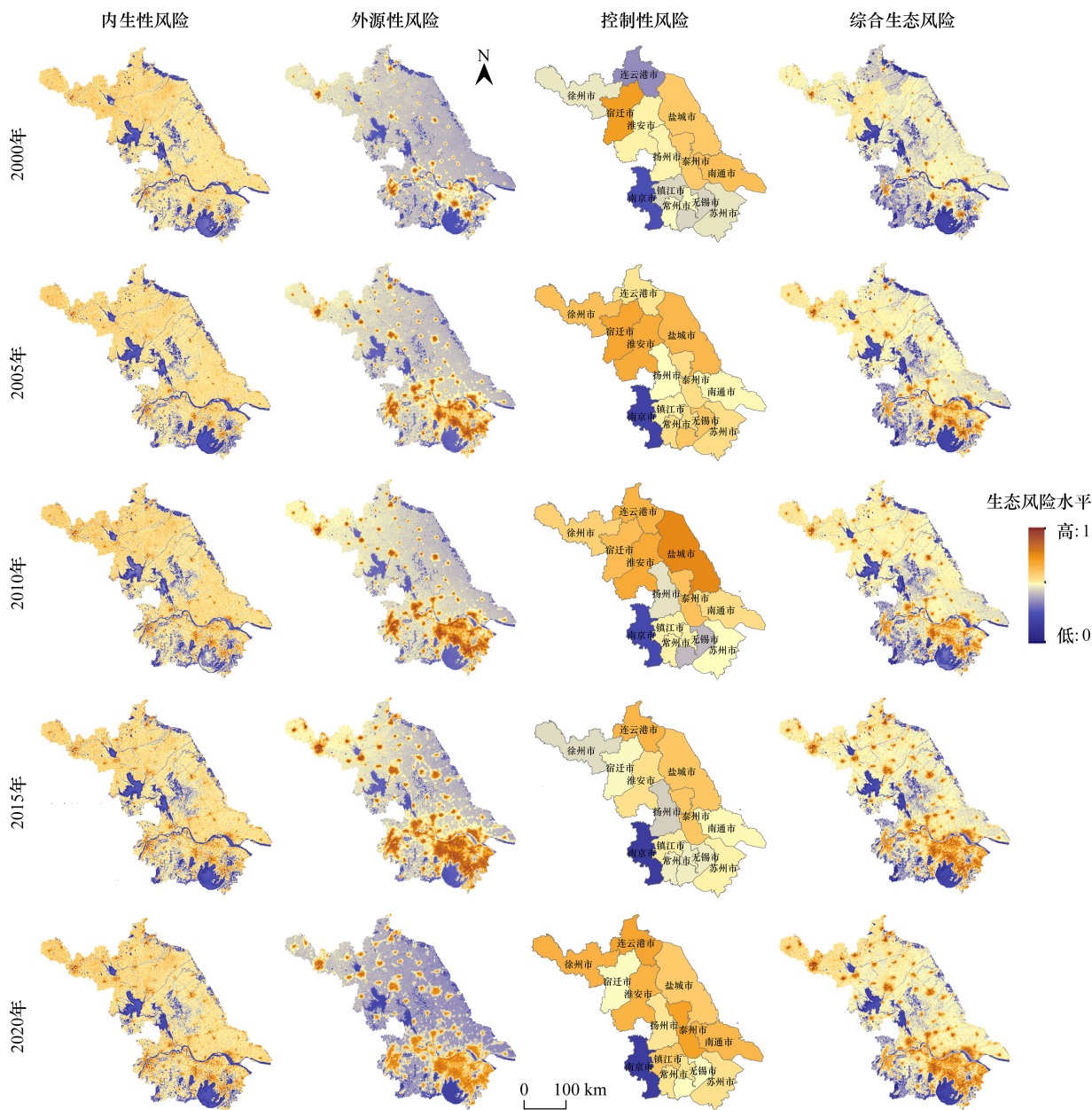


图2 江苏省生态风险时空演变

Fig.2 Spatial and temporal distribution of ecological risk in Jiangsu

2015年期间,江苏省外源性生态风险呈逐步上升趋势,典型区域为长江沿线城市及苏锡常都市圈,主要归因于该地区长期依赖高投入、高消耗、高污染的产业经济增长方式;而2015—2020年期间,江苏省外源性生态风险整体上有所降低,这可能是由于政府采取了一系列措施来减少对自然环境的破坏,加强生态保护和修复工作,推动绿色发展和可持续发展。在空间分布上,外源性生态风险较高的区域主要集中在城市化快速发展的苏南地区以及苏北和苏中经济发达的城市中心和工业园区周边;而太湖、洪泽湖等具有较强的开放性、流动性、自我净化能力且受人类活动干扰较小的地区,外源性生态风险相对较低。

控制性生态风险。在时间变化上,近20a江苏省控制性生态风险呈现出明显的下降趋势,这一变化主要得益于生态环境保护政策体系的持续完善和执行力度的不断加强,以及“清水蓝天”行动、“美丽江苏”建设等重大工程项目的有效实施,这些举措共同降低了控制性生态风险。在空间分布上,江苏省控制性生态风



险呈现出显著的区域差异,南京市、扬州市、无锡市等地区由于政策管理严格、执行力度强、技术水平先进,控制性生态风险相对较低;相比之下,泰州市、淮安市、盐城市等地区控制性生态风险较高,反映了不同地区在生态风险管理和防控方面的不同挑战和应对策略。

综合生态风险。从生态风险变化来看,全省生态风险先升高后降低,2000年、2005年、2010年、2015年和2020年生态风险值分别为0.5566、0.5832、0.5934、0.5874和0.5765。苏南中心城区等人类活动密集区,由于城市化、工业化的高强度活动,生态环境承受较大压力,2000—2015年生态风险逐步上升,2015年全省生态风险最高,到2020年有一定程度的下降;随着沿岸城市化和工业化的加速发展,长江、太湖等主要流域生态风险加剧。从生态风险分布上来看,江苏省生态风险总体上呈现出“南高北低”“西高东低”的特点,经济发达地区、人口密集地区以及环境敏感地区的生态风险普遍较高,苏南地区生态风险高于苏中地区高于苏北地区;较低风险区域主要分布在苏北地区、东部沿海地区、远离城市和工业区的农村地区以及部分水域、山区等生态环境相对较好的地区。

### 3.2 生态风险类型和管控分区

根据江苏省生态风险变化特征划分五个生态风险类型区域(图3),结果显示,近20a江苏省生态风险整体稳定,部分地区变化较为明显。具体而言,持续下降型主要分布在太湖部分水域、南京市郊区等,占总面积的4.41%;波动下降型在江河湖泊附近零散分布,占总面积的15.88%;稳定型分布最广,占总面积的57.95%;波动上升型分布较为零散,以耕地和建设用地为主,占总面积的2.96%;持续上升型分布在北部连云港市、中部城市扩张区、南部长江沿线及苏锡常等城市化快速发展区,占总面积的18.79%。

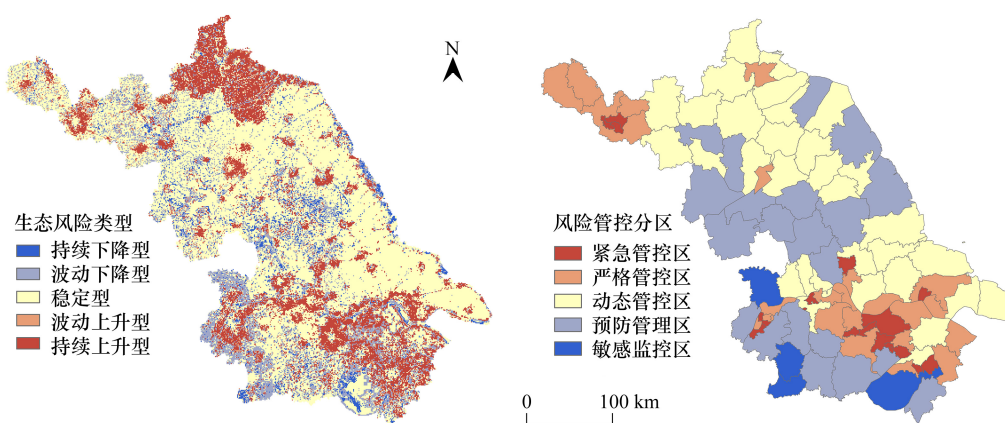


图3 江苏省生态风险类型和生态风险管控分区

Fig.3 Ecological risk types and ecological risk management zones in Jiangsu

通过组合生态风险等级和生态风险类型,得到五类生态风险的管控分区(图3)。具体来看,紧急管控区是江苏省生态风险高且呈上升趋势的区域,主要分布在城市扩张区、南部长江沿线及苏锡常等城市化快速发展区,占总面积的12.05%;严格管控区主要分布在城镇中心,这类区域一直保持着较高的生态风险,占总面积的2.19%;动态调控区生态风险程度一般且变化相对稳定,主要分布在江苏省北部及东部沿海地区,占总面积的64.42%;预防管理区主要分布在骆马湖、洪泽湖湿地、高邮湖、江淮丘陵、太湖丘陵等具有重要水源涵养、水土保持、洪水调蓄、生物多样性维护功能的区域以及东部沿海滩涂等生态系统,占总面积的16.11%;敏感监控区针对风险程度低但变化较为剧烈的区域,主要分布在太湖部分区域、东部沿海部分地区等生态敏感区,占总面积的5.22%。

为应对江苏省不同类型区域面临的多样化生态风险挑战,需采取差异化的分区管理策略。紧急管控区面临“重化围江”、污染排放及黑臭水体等多重挑战,因此应积极推动沿江化工企业向绿色转型、加强长江及太湖的生态保护、维护大江大河流域生态系统的完整性和地理单元的连续性。而在严格管控区,由于人类活动

密集、土地开发强度高、城镇空间快速扩展,必须坚守生态保护红线,推动国土空间的有序开发和高效集约利用,加强治理系统的设计和实施,提高生态环境治理的效率和效果,防止生态风险进一步升级。动态调控区分布最广,要加强对资源系统和资源单位的保护与管理,维护生态系统的健康和稳定,也要规范使用者的行为,减少对生态系统的压力,积极开展风险评估和预警工作,确保风险稳定可控。预防管理区重要生态空间分布较多,应加强预防和预警工作,充分利用丘陵、水体、湿地资源,维护沿海生态屏障,并密切监控风险的变化情况,防止潜在风险转化为实际损害。敏感监控区风险低但变化剧烈,是维护生态安全的核心区域,推进生态保护和生态修复,实施严格的区域准入措施,确保风险保持在可控范围内。总的来说,需要以统筹兼顾的方式,同步推进这些区域的高质量发展和高水平保护,制定强有力的政策支持和资金保障措施,以实现生态环境保护 and 可持续发展,更好支撑和服务中国式现代化江苏新实践。

#### 4 讨论

党的十八大以来,国家对生态问题的关注持续增强,凸显了生态文明建设在国家发展全局中的重要地位,在此背景下,对快速城市化地区的生态风险研究显得尤为迫切和重要。江苏省人口集聚、经济发达、城镇密集,是快速城市化的典型区域,承载着巨大的发展压力,也肩负着多重生态功能的重要使命,面临着诸多生态问题,生态风险不容忽视。因此,对江苏生态风险的研究不仅具有本地意义,更能为其他快速城市化地区提供参考与借鉴。针对目前生态风险研究尚存的不足,本研究将综合了人类社会治理与自然环境利用研究视角的社会-生态系统引入生态风险研究,把快速城市化地区的生态风险解构为内生性、外源性和控制性生态风险,构建了更系统综合的风险等级评价体系,兼顾时间变化进行了风险类型划分,集成“等级—类型”进行分区划定与管控策略制定,丰富了相关研究内容;以江苏省为例进行风险评价和管控,针对不同风险区探索生态风险管控策略,对于快速城市化地区有效加强生态环境保护与监管、保障生态安全、促进经济社会的协调可持续发展具有现实意义。

本研究虽然涵盖了 2000—2020 年的五期数据,但数据的时间跨度相对狭窄且不连续,限制了对生态风险全面、深入的分析,因此未来研究需要加强长期监测和数据积累,以便能够捕捉到更长时间的生态变化,从而更加全面准确地评估和管理生态风险。此外,虽然本研究尝试将生态风险解构为内生性、外源性和控制性三类生态风险,但对于不同风险类型之间的相互作用和影响机制,探究仍然不够深入,未来研究需要更深入地探讨这些风险类型之间的相互关系,以便更好地理解和管理生态风险。在探讨生态风险管控分区时,本研究基于生态风险等级和风险类型提出了一些管控策略和方案,这些策略和方案还需要不断地完善和细化,以更好地满足实际的管理需求。未来研究还可以进一步开展生态风险的不确定性分析、风险驱动因素分析、风险分区优化以及优化效果的评估等方面的研究,以提高生态风险管理的效率和效果。

#### 5 结论

本文构建了基于社会-生态系统的“内生性-外源性-控制性”生态风险评价体系,探究了近 20a 江苏省生态风险演变特征和生态风险管控分区。主要结论如下:

(1) 社会-生态系统框架为理解生态风险的形成与表现提供了一个系统全面的新视角。围绕社会-生态系统框架,基于快速城市化地区生态风险源头复杂、受体多元、表现多样的区域特征,可以将快速城市化地区生态风险分为内源性、外源性和控制性生态风险。

(2) 从生态风险时空演变来看,2000—2020 年江苏省综合生态风险呈先上升后下降趋势,总体表现为“南高北低”“西高东低”的分布格局。内生性生态风险波动变化,高值区聚集在城市密集区及工业集中地带,低值区则主要分布在生态功能重要区域;外源性生态风险先上升后下降,长江沿线城市及苏锡常都市圈风险尤为显著,水域湿地等风险较低;控制性生态风险总体显著下降,政策完善、管理严明和技术先进的地区风险低,政策滞后、管理松散、技术陈旧的地区风险仍较高。

(3)从生态风险类型来看,2000—2020年江苏省综合生态风险可划分为持续上升型、波动上升型、稳定型、波动下降型和持续下降型,面积占比分别为18.79%、2.96%、57.95%、15.88%、4.41%,持续上升型分布于城市化进程迅速的区域,波动上升型呈现零散分布的特点,稳定型广布于多个地区,波动下降型零散分布在江河湖泊周边,持续下降型主要集聚于太湖部分水域和南京市郊区。

(4)基于生态风险等级测度与类型划定,将江苏省生态风险管控区分为紧急管控区、严格管控区、动态管控区、预防管理区、敏感监控区五类,面积占比分别为12.05%、2.19%、64.42%、16.11%、5.22%,紧急管控区分布在南部和东北部中心城区,严格管控区围绕在紧急管控区周围,动态管理区分布在北部和东南部,预防管理区呈带状分布在中部和南部,敏感监控区零星分布在南部。并分别提出了强化绿色转型、严控污染排放,坚守生态红线、有序开发治理,加强资源保护、确保风险可控,强化预防预警、维护生态屏障,推进保护修复、实施严格准入等针对性策略。

#### 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 乔伟峰,吴菊,戈大专,王亚华,曹敏.快速城市化地区土地利用规划管控建设用地扩张成效评估——以南京市为例.地理研究,2019,38(11):2666-2680.
- [3] 梁鑫源,金晓斌,韩博,孙瑞,张晓琳,周寅康.长三角快速城市化地区景观多功能性演变——以苏州市为例.地理科学进展,2021,40(2):207-219.
- [4] 郭平,谢忠雷,李军,周琳峰.长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价.地理科学,2005,25(1):108-112.
- [5] 马德毅,王菊英.中国主要河口沉积物污染及潜在生态风险评价.中国环境科学,2003,23(5):74-78.
- [6] 蔡文贵,林钦,贾晓平,王增焕,李纯厚,杨美兰.考洲洋重金属污染水平与潜在生态危害综合评价.生态学报,2005,24(3):343-347.
- [7] 戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳.山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价.环境科学,2015,36(2):507-515.
- [8] 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.
- [9] 杨帆,金晓斌,刘晶,张晓琳,宋家鹏,李权荃,周寅康.时空动态视角下快速城市化地区景观生态风险评价与分区.农业工程学报,2023,39(18):253-261.
- [10] 曹佳梦,官冬杰,黄大楠,殷博灵,和秀娟.重庆市生态风险预警等级划分及演化趋势模拟.生态学报,2022,42(16):6579-6594.
- [11] 曹曦,陈翔,魏志祥,王燕.我国城市生态风险预警研究.产业与科技论坛,2018,17(18):88-89.
- [12] 李杨帆,林静玉,孙翔.城市区域生态风险预警方法及其在景观生态安全格局调控中的应用.地理研究,2017,36(3):485-494.
- [13] 余思洁,侯鹰,刘长峰,刘宝印,陈卫平.城市化区域生态风险驱动力及管控策略——以北京市为例.生态学报,2023,43(24):10443-10453.
- [14] 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.
- [15] Hou Y, Ding W H, Liu C F, Li K, Cui H T, Liu B Y, Chen W P. Influences of impervious surfaces on ecological risks and controlling strategies in rapidly urbanizing regions. The Science of the Total Environment, 2022, 825: 153823.
- [16] Tang L, Ma W. Assessment and management of urbanization-induced ecological risks. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2018, 25(5):383-386.
- [17] Wang H, Liu X M, Zhao C Y, Chang Y P, Liu Y Y, Zang F. Spatial-temporal pattern analysis of landscape ecological risk assessment based on land use/land cover change in Baishuijiang National nature reserve in Gansu Province, China. Ecological Indicators, 2021, 124: 107454.
- [18] Malekmohammadi B, Rahimi Blouchi L. Ecological risk assessment of wetland ecosystems using Multi Criteria Decision Making and Geographic Information System. Ecological Indicators, 2014, 41: 133-144.
- [19] 景培清,张东海,艾泽民,郭斌.基于格局-过程生态适应性循环三维框架的自然景观生态风险评价——以黄土高原为例.生态学报,2021,41(17):7026-7036.
- [20] Wu J S, Zhu Q L, Qiao N, Wang Z Y, Sha W, Luo K Y, Wang H L, Feng Z. Ecological risk assessment of coal mine area based on "source-sink" landscape theory-A case study of Pingshuo mining area. Journal of Cleaner Production, 2021, 295: 126371.
- [21] 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.



- [22] 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.
- [23] Buerget P T, Paton D. An ecological risk management and capacity building model. Human Ecology, 2014, 42(4): 591-603.
- [24] 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. The Science of the Total Environment, 2016, 554/555: 7-16.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Gao L N, Tao F, Liu R R, Wang Z L, Leng H J, Zhou T. Multi-scenario simulation and ecological risk analysis of land use based on the PLUS model: a case study of Nanjing. Sustainable Cities and Society, 2022, 85: 104055.
- [29] 史芳宁, 刘世梁, 安毅, 孙永秀, 董世魁, 武雪. 城市化背景下景观破碎化及连接度动态变化研究——以昆明市为例. 生态学报, 2020, 40(10): 3303-3314.
- [30] 陈万旭, 赵雪莲, 钟明星, 李江风, 曾杰. 长江中游城市群生态系统健康时空演变特征分析. 生态学报, 2022, 42(1): 138-149.
- [31] 姚灵筠, 王力, 牛铮, 尹子琪, 付雨文. 2000—2018 年长株潭城市群城市扩张及其热岛响应. 自然资源遥感, 2023, 36(1): 162-168.
- [32] 袁贞贞, 王秋红, 王勇, 李维杰, 高洁, 程先, 朱大运. 多情景模拟下重庆市土地利用变化对生态系统健康的影响. 生态学报, 2023, 43(20): 8279-8291.
- [33] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. Science, 2009, 325(5939): 419-422.
- [34] McGinnis M D, Ostrom E. Social-ecological system framework: initial changes and continuing challenges. Ecology and Society, 2014, 19(2): art30.
- [35] 梁坤宇, 金晓斌, 张晓琳, 宋家鹏, 李权荃, 应苏辰, 祁翌, 周寅康. 耦合生态系统服务供需的生态安全格局构建——以苏南地区为例. 生态学报, 2024, 44(9): 1-17 [2024-03-20]. <https://doi.org/10.20103/j.stxb.202307271608>.
- [36] 王晗, 张丹妮, 华廷, 赵宇豪, 王振宇, 吴健生. 社会-生态系统: 研究态势、主题演进与地域实践. 生态学报, 2023, 43(15): 6499-6513.
- [37] 何念鹏, 徐丽, 何洪林. 生态系统质量评估方法——理想参照系和关键指标. 生态学报, 2020, 40(6): 1877-1886.
- [38] HIEN W N, JUSUF S K, SAMSUDIN R, 姜思伟. 高密度城市中城市规划影响气候的模型: 以新加坡商业区为例. 城市规划学刊, 2019(4): 124.
- [39] 解若璠, 沈永明, 劳桦. 基于人为干扰度的盐城滨海湿地景观格局动态变化及响应. 生态学杂志, 2022, 41(2): 351-360.
- [40] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [41] 张立贤, 任浙豪, 陈斌, 宫鹏, 付昊恒, 徐冰. 中国长时间序列逐年人造夜间灯光数据集 (1984-2020). 国家青藏高原科学数据中心. <https://doi.org/10.11888/Socioeco.tpd.271202>. <https://cstr.cn/18406.11.Socioeco.tpd.271202>.
- [42] 韦晶, 李占清. 中国高分辨率高质量 PM2.5 数据集 (2000-2021). 国家青藏高原科学数据中心. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3539349>.
- [43] Peng J, Liu Y X, WU J S, Lv H L, Hu X X. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: A case study in Shenzhen City, China. Landscape and Urban Planning, 2015, 143: 56-68.
- [44] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [45] 刘春艳, 张科, 刘吉平. 1976—2013 年三江平原景观生态风险变化及驱动力. 生态学报, 2018, 38(11): 3729-3740.
- [46] 刘建, 陈静, 肖禾, 丁忆, 张斌, 卢建洪. 快速城市化地区热力景观格局演变研究——以重庆两江新区为例. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2021, 39(6): 36-44.
- [47] 郭向阳, 穆学青, 丁正山, 秦东丽. 长三角多维城市化对 PM2.5 浓度的非线性影响及驱动机制. 地理学报, 2021, 76(5): 1274-1293.