DOI: 10.20103/j.stxb.202411292925
王辰星,王泽童,杨淼,赵兴华,潘垚辰,冯启源,郑力夫,王欣妍,严岩.基于生态网络构建与生态系统韧性的超大城市生态修复空间识别——以北京市为例.生态学报,2025,45(10):4626-4637.
Wang C X, Wang Z T, Yang M, Zhao X H, Pan Y C, Feng Q Y, Zheng L F, Wang X Y, Yan Y.Identification of ecological restoration spaces based on ecological network construction and ecological resilience in mega city: a case of Beijing.Acta Ecologica Sinica,2025,45(10):4626-4637.

基于生态网络构建与生态系统韧性的超大城市生态修复空间识别
——以北京市为例

王辰星[1],王泽童[1,2],杨　淼[3],赵兴华[4],潘垚辰[4],冯启源[5],郑力夫[1,2],王欣妍[1,2],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 北京市规划和自然资源委员会政务服务中心,北京　101160
4 北京市房山区重大项目协调服务中心,北京　102488
5 中信国安(北京)物业管理有限公司,北京　100000

摘要:超大城市面临复杂的内生发展压力和人为风险,也更容易受到自然灾害、气候变化等的影响和胁迫,面向超大城市的生态修复需要着重考虑如何通过生态修复的工程实践提升城市的生态系统韧性。城市化过程和人类活动对自然生态空间造成侵占和频繁扰动,生态修复的可实施空间破碎化显著,识别更加精准的生态修复空间、确定更加明确的修复目标具有重要的意义。基于生态网络与生态安全格局建立了“生态系统抵抗力—生态源地恢复力—生态廊道适应力”的城市生态韧性三维评估体系,基于生态系统抵抗力、生态源地恢复力和生态廊道适应力的构建保护修复空间识别方法,并在北京市开展应用,研究结果表明:①北京 51 处生态源地,占北京非建设空间的 21.88%,共 206 条生态廊道,均主要分布于生态涵养区内,为北京提供生态屏障及主要生态产品。②生态系统抵抗力指数较低,北部深山、西部灵山-百花山和东部边缘山区相对较好;生态源地恢复力较好,生态廊道适应力整体不高,亟需加强生态廊道的功能恢复。③识别出 7277.07 km^2生态修复空间,占北京非建设空间的 55.21%。为城市生态修复提供了一套基于生态系统韧性的保护修复空间识别方法体系,为北京市生态修复工程的规划提供科学依据,也为其他地区超大城市面向保护和发展协调的生态修复规划提供参考。

关键词:生态韧性;生态网络;生态修复;空间识别;规划策略

Identification of ecological restoration spaces based on ecological network construction and ecological resilience in mega city: a case of Beijing

WANG Chenxing[1], WANG Zetong[1,2], YANG Miao[3], ZHAO Xinghua[4], PAN Yaochen[4], FENG Qiyuan[5], ZHENG Lifu[1,2], WANG Xinyan[1,2], 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 *Government services center of Beijing Municipal Commission of Planning and Natural Resources, Beijing* 101160, *China*
4 *Fangshan Key Project Construction Office, Beijing* 102488, *China*
5 *Citic Guoan (Beijing) Property Management Company Limited, Beijing* 100000, *China*

基金项目:国家自然科学基金项目(71673268)
收稿日期:2024-11-29;　　**网络出版日期**:2025-04-08
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yyan@rcees.ac.cn

Abstract: Mega-cities face complex and diverse endogenous development pressures and human-induced risks, and are also more vulnerable to the impacts and threats of natural disasters and climate change. Ecological restoration in mega-cities needs to focus on enhancing urban ecological resilience to cope with pressures and impacts from both internal and external systems, and to ensure the sustainable development of urban society and economy. Ecological restoration in mega-cities needs to focus on how engineering practices can enhance the resilience of urban ecosystems. Ecological resilience is one of the essential cores of urban sustainability. Urban sustainability demands that the urban complex ecosystem possesses the capacity to cope with and resist natural disasters and anthropogenic damages, the ability to recover from and adapt to stress and disturbances, as well as the capability to anticipate and prevent risks. The urbanization process and human activities have led to the encroachment and frequent disturbance of natural ecological spaces, resulting in highly fragmented and limited space for ecological restoration. Therefore, accurately identifying potential ecological restoration areas and setting clear restoration goals is of great significance. This study establishes a three-dimensional urban ecological resilience assessment system based on ecological networks and ecological security patterns, focusing on " ecosystem resistance, ecological source restoration, and ecological corridor adaptability," and conducts spatial identification for ecological restoration. Taking Beijing as a case study, the results show: ①Beijing has 51 ecological sources, accounting for 21.88% of its non-construction space, and 206 ecological corridors, mainly distributed in ecological conservation areas, providing ecological barriers and key ecological products for Beijing. ②The ecosystem resistance index is relatively low, with the northern deep mountains, Ling Mountain-Baihua Mountain, and eastern peripheral mountainous areas performing better. Ecological source restoration is good, while the adaptability of ecological corridors is generally low, requiring urgent restoration of ecological corridor functions. ③A total of 7277.07 km^2 of ecological restoration space has been identified, accounting for 55.21% of Beijing´s non-construction space. This study provides a method for identifying protected restoration spaces based on ecological resilience, offering scientific guidance for ecological restoration planning in Beijing and providing a reference for ecological restoration planning in other mega-cities, aiming for a balance between conservation and development. By establishing the connection between the quantification of ecosystem resilience and the identification of regional ecological restoration spaces, and identifying ecological restoration spaces based on the level of ecosystem resilience, it can to a certain extent propose relatively effective strategies for the optimization and path of regional ecological restoration.

Key Words: ecological resilience; ecological restoration; ecological network; space identification; planning strategy

城市发展面临诸多不确定的自然与社会风险,地震、暴雨洪涝、沙尘暴、瞬时滑坡、泥石流等自然灾害和密集人类活动造成的环境污染、生态破坏等人为影响,都会给城市社会经济发展和居民福祉满足带来压力和胁迫[1]。城市韧性是城市可持续性的重要内核之一,城市可持续性要求城市复合生态系统面对自然灾害和人为损害的应对和抵抗能力,面对胁迫和扰动的恢复和适应能力,面对风险的预判和防控能力,以上是城市韧性的三个主要表征维度[2—3]。增强城市韧性是城市发展的重要策略,也是面向城市可持续发展目标的必然选择[4]。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇〇三五年远景目标的建议》提出“推进以人为核心的新型城镇化。建设海绵城市、韧性城市。提高城市治理水平,加强特大城市治理中的风险防控”,进一步从国家政策层面表明建设韧性城市对我国国民经济和社会发展的高度重要性[5]。

城市的生态空间是保障社会-经济系统维持和可持续发展的重要前提,然而受高强度城市土地开发和人类活动的影响,往往呈现破碎化、功能低下、连通性降低的特征,无法满足城市发展对生态空间的安全屏障和生态功能的高需求[6],提升城市的生态系统韧性是保障城市生态安全、增强应对风险能力和实现城市可持续发展的重要手段[7]。近年来,我国部署了一系列的系统性生态修复工程以全面提升区域生态功能和生态质量,大量城市面向生态安全屏障的构建和生态产品的需求也制定了生态修复规划、安排生态修复工程,通过多

类型、系统性的生态修复提高城市的生态系统韧性[8—9]。生态修复空间的评估和识别,在面向研究区域社会经济发展的需求基础上,要兼顾生态系统质量方可持续提升和生态系统服务的可持续供给[10],需要综合考虑生态系统服务多功能性、生态系统稳定性和生态系统完整性[11],如分析生态系统格局变化、功能损失等可能风险确定生态保护的优先空间和亟待修复的受损生态空间、脆弱生态空间[12—13],面向生态安全格局构建与保障、基于“斑块-廊道-基质”的景观生态学网络模型开展生态修复空间识别等[14]。然而由于城市生态系统结构复杂、生态韧性内涵丰富,使得尽管在生态修复中能够明确宏观的修复目标[15—16],如何清楚识别生态系统韧性提升的关键节点和关键区域、如何准确识别生态修复的关键空间、如何厘清生态修复空间与城市发展空间的关联关系,成为城市生态修复的重要难题之一[17—18]。

当前生态系统韧性的刻画主要通过生态风险、气候变化、自然灾害等的应对和防控角度出发,通过构建生态系统韧性的评估体系分析生态系统韧性的状况和变化[19—20]。从生态安全格局的角度构建生态网络并以此为基础刻画生态系统韧性是进一步地对生态系统韧性的表征做了功能性解构[21],区域生态网络是对生态空间在生态安全格局构建目标下的进一步分区、分类明晰生态定位,在此基础上对生态系统韧性的抵抗力、恢复力、适应力提出了不同的要求[22]。相关学者通过不同的定量评估方法,如结合“源-流-汇”的生态系统韧性测度模型[23—24]、基于“源地-阻力面-廊道”的生态安全格局构建模型[25]等开展研究,探索生态网络构建视角下生态系统韧性的评估方法和提升策略。尽管我们认识到生态系统韧性是面向未来、应对变化的重要方面,生态修复也在不断地向着精细化、系统性和完整性演进,目前研究仍主要集中在对生态系统韧性的评估和解构,如何通过对生态系统韧性量化进一步与区域生态修复空间识别建立联系,基于生态系统韧性的水平识别生态修复空间、提出区域生态修复策略尚未有较为成熟的路径。

本研究以超大城市的生态修复为目标,基于生态网络的构建方法和生态安全格局构建范式,提出超大城市不同生态分区的生态系统韧性提升框架和要求,以此基础上建立超大城市生态系统韧性的评估框架和评价指标体系,基于生态系统抵抗力、生态源地恢复力和生态廊道适应力的尝试构建超大城市生态保护修复空间识别的方法体系,并在北京市开展应用,刻画超大城市生态系统韧性的状况和保障城市生态安全的目标需求,识别北京市生态修复的关键区域并提出生态修复的工程部署策略,进一步细化北京市已有国土空间生态修复规划的策略,为超大城市生态修复系统性和北京生态修复规划落地提供参考。

1 研究区域和数据来源

1.1 研究区域

本研究以我国首都北京市为研究区域,北京常驻人口超过 2000 万人,是我国最典型的超大城市,其城市发展对于我国其他城市具有重要的前瞻性和引导性价值。北京位于华北平原西北部,地势西北高、东南低,在西部、北部、东北部环绕太行山和燕山两大山系的交汇区,生态地质条件脆弱。北京处于海河流域北系,永定河、潮白河、北运河流经,受降雨影响河流水系流量不稳定,“七上八下”期间防洪防汛压力较大,冬春季节流量极小,甚至主要支流时有断流现象。北京市山区土壤主要以棕壤、褐土为主,平原区以褐土、潮土为主。

作为典型的超大城市,建设用地的扩张以及人口密集活动长期对周边自然生态系统造成扰动和胁迫,同时作为我国的首都,政治中心、文化中心、国际交往中心和科技创新中心的“四个中心”建设也对的生态安全屏障和生态产品具有极高的要求,《北京城市总体规划(2016—2035 年)》要求坚持生态空间山清水秀、大幅度提高生态规模与质量,实现对城市和自然关系的协调和重塑。北京的生态修复策略对全国其他城市生态修复规划和布局都具有相当的参考价值。

1.2 数据来源及预处理方式

本文所用数据主要包括行政区划、河流水系、路网密度、数字高程(Digital Elevation Model, DEM)、土地利用、植被指数(Normalized Differnce Vegetation Index, NDVI)、植被净初级生产力(Net Primary Production, NPP)、土壤参数数据、气象数据等(表 1),考虑到数据时间可用性,所有数据的年份统一确定为 2020 年,数据

投影坐标系统一为 WGS_1984_Albers,重采样至 30m 分辨率。

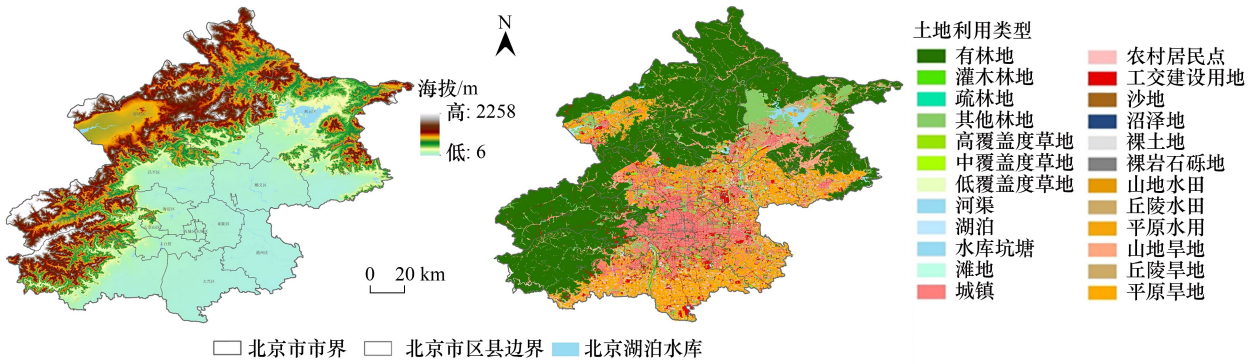

图 1　研究区示意图——北京市地理格局及 2020 年土地利用

Fig.1　Study area of Beijing and land use of 2020

表 1　数据来源

Table 1　Data source

数据类型 Data type	数据集名称 Dataset name	来源 Source	分辨率 Resolution	作用 Role in method
行政区划、河流水系及路网密度 Administration, river and road-network density	全国 1:100 万公众版地形数据(2021 版)	全国地理信息资源目录服务系统	1km	帮助确定生态修复空间的地理位置以及与周边的地理关系
数字高程 DEM	ASTER GDEM	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn/)	250m	划分小流域单元和分水岭
土地利用数据 Land use data	中国多时期土地利用遥感监测数据集 (CNLUCC)	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn/)	30m	景观指数、生态系统服务评估和生态系统韧性评估的主要输入数据
土壤可蚀性 Soil erodibility	世界土壤数据库 (HWSD)	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	土壤保持功能评估主要参数
归一化植被指数 NDVI	中国 30 m 年最大 NDVI 数据集	国家生态科学数据中心 (http://www.nesdc.cn/)	30m	生态系统质量评估输入数据
植被净初级生产力 NPP	全球逐日 NPP 模拟数据产品	国家生态科学数据中心 (http://www.nesdc.cn/)	30m	固碳释氧功能评估、生态系统质量评估输入数据
降雨 Precipitation	中国 1 km 分辨率月降水数据集	Science Data Bank (https://www.scidb.cn/en/cstr/31253.11.sciencedb.01607)	1km	水源涵养、土壤保持功能评估输入数据

DEM: 数字高程 Digital elevation model;NDVI: 植被指数 Normalized differnce vegetation index;NPP: 植被净初级生产力 Net Primary production

2　研究方法

2.1　分析框架

抵抗力、恢复力、适应力是城市韧性的三大特征维度,以表征城市对抗冲击能力、提高恢复能力、增加适应能力的韧性要求,本研究中城市生态系统韧性也从城市自然生态系统的抵抗力—恢复力—适应力三个维度解构。抵抗力是城市生态系统抵御干扰的能力,与生态系统、生态系统服务功能密切相关[26],生态系统抵抗力是韧性的基石。恢复力是生态系统受到影响后恢复到原有功能或质量的能力,与生态系统稳定性和顶级生态群落的恢复能力密切相关,超大城市的生态源地往往是区域内稳定性高、群落复杂程度高、恢复能力强的区域,因此,超大城市生态源地的恢复能力是区域生态系统韧性的重要方面之一。适应力是城市生态系统适应

外在环境和内生胁迫的调试能力[27],生态系统完整性、连通性能够显著地提升区域应对内外扰动和胁迫的能力,因此超大城市生态网络结构中生态廊道的贯通性是适应能力的重要方面。

面向城市生态修复的空间识别和修复策略研究,找到生态修复的关键层面和关键位置,明确修复中“牵一发动全身”和事半功倍的关键区域是修复策略制定的重点,在这样的考量之下,本研究基于生态网络构建的方法对城市自然生态系统进行功能划分,基于生态安全格局构建的范式进行生态源地-生态廊道的识别和提取,通过生态系统重要性和最小阻力面模型分别识别确定生态源地和生态廊道,构建出“生态系统抵抗力—生态源地恢复力—生态廊道适应力”的城市生态系统韧性框架,分别表征城市生态系统整体抵御干扰的能力、高生态功能的生态源地区受损恢复能力、高连通性需求的生态廊道适应影响的能力,通过评估城市生态韧性的水平识别出抵抗力较低的生态系统、恢复力较弱的生态源地、适应力较差的生态廊道为生态修复的关键空间,在此基础上划定生态修复分区和明确生态修复目标,基于生态修复紧迫性明确修复时序。

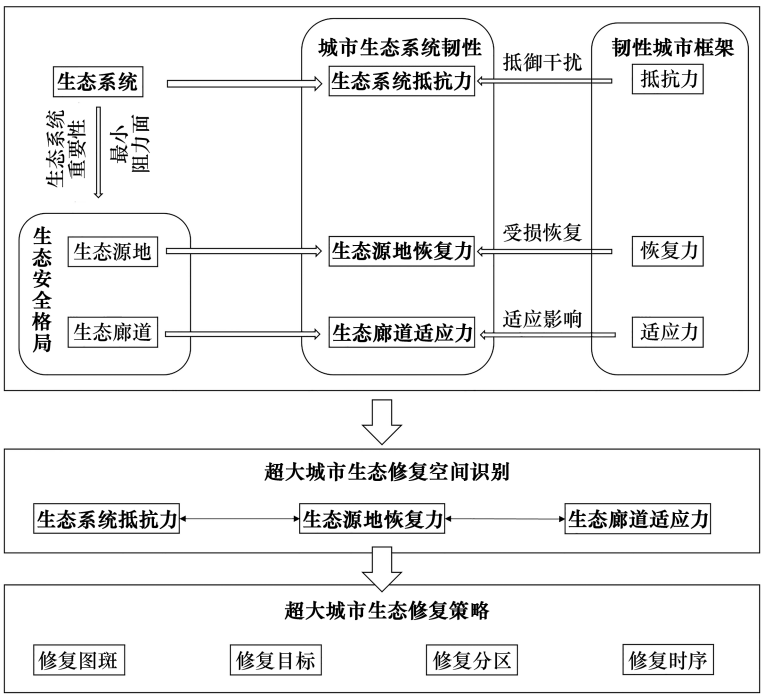

图 2 基于生态系统韧性的超大城市生态修复空间识别与策略构建框架

Fig.2 Framework of space identifying and ecological restoration strategies for Mega-city based on ecological resilience

2.2 生态源地识别与生态廊道提取

本研究依据生态安全格局研究范式,采用“源地识别—阻力面构建—廊道提取”开展生态源地识别和生态廊道提取。

(1)关键生态系统服务评估

根据《全国主体生态功能区划》,北京的生态涵养区主要处于京津冀北部水源涵养重要区和太行山区水源涵养与土壤保持重要区,结合当前“双碳”目标实现的宏观要求,本研究选择水源涵养、土壤保持、固碳释氧作为关键生态系统服务。

水源涵养服务采用水量平衡方程计算,计算公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^{n} A_i \times (P_i - R_i - ET_i) \times 10^{-3} \tag{1}$$

式中,Q 为水源涵养量,单位为 m^3/a;A_i 为第 i 类生态系统的面积,单位为 m^2;P_i 为第 i 类生态系统的产流降雨量,单位为 mm/a;R_i 为第 i 类生态系统的地表径流量,单位为 mm/a;ET_i 为第 i 类生态系统的蒸散发量,单

位为 mm/a;i 为生态系统类型,$i=1,2,3,\cdots\cdots,n$,分别表征进行计算的不同类型的生态系统。

土壤保持服务依据改进的美国通用流失方程 USLE 来评估土壤保持能力,以潜在侵蚀与实际侵蚀的差表示地表植被对水土流失量的降低,用来沙量与泥沙持留效率的乘积来计算地表植被拦截上游冲积的泥沙的作用和能力,两者相加即为生态系统土壤保持量。计算公式为:

$$\mathrm{SEDRET}_i = \mathrm{RKLS}_i - \mathrm{USLE}_i = R_i \times K_i \times L_i \times S_i \times (1 - C \times P) \tag{2}$$

式中,SEDRET_i 是研究区内任意栅格 i 的土壤保持量,单位为 t/a;RKLS_i 和 USLE_i 分别为栅格 i 上的潜在侵蚀量和实际侵蚀量,单位为 t/a;R_i、K_i、L_i、S_i、C 和 P 分别是栅格 i 上的降雨侵蚀力因子、土壤可侵蚀因子、坡长因子、坡度因子、地表覆盖管理因子和土壤保持管理因子。

固碳释氧服务基于净初级生产力根据 CASA(Carnegie-Ames-Stanford Aproach)模型计算[28]。

(2)生态源地识别

生态源地的识别采用生态系统服务供给重要性评估,生态系统服务重要性基于关键生态系统服务评估的结果。生态系统服务重要性按照等权重叠加分析的方法,采用自然断点法对生态系统服务综合评估结果进行分级,共分为四级,分别是一般重要、中等重要、比较重要和极重要。

$$ES_i = (\omega_Q \times \mathrm{nor}(Q_i) + \omega_{\mathrm{SEDRET}} \times \mathrm{nor}(\mathrm{SEDRET}_i) + \omega_{\mathrm{Carbon}} \times \mathrm{nor}(\mathrm{Carbon}_i))/3 \tag{3}$$

式中,ES_i 为斑块 i 的生态系统服务重要性评估结果,ω_Q、ω_{SEDRET}、ω_{Carbon} 分别是水源涵养、土壤保持、固碳释氧服务的生态系统服务重要性权重,在本研究中,$\omega_Q = \omega_{\mathrm{SEDRET}} = \omega_{\mathrm{Carbon}}$,$\mathrm{nor}(Q_i)$、$\mathrm{nor}(\mathrm{SEDRET}_i)$、$\mathrm{nor}(\mathrm{Carbon}_i)$ 为图斑 i 水源涵养、土壤保持、固碳释氧生态系统服务的归一化结果。

本研究中生态源地的最终确定选取生态系统服务极重要的区域作为生态源地,主要是根据生态系统服务重要性评估结果,并考虑到本研究的案例选择为典型的高密度城市化地区,生态源地是能够为北京提供极高生态系统服务的自然生态系统。

(3)综合阻力面构建

构建阻力面是开展生态廊道构建的基础,阻力面的构建按照生态网络构建的要求,一般采用数字高程、土地利用类型、归一化植被指数、自然坡度等指标构建,并结合不同生态功能或发展需求下的导向性如夜间灯光指数、风沙通道等,本研究中,主要表征一般工况下阻力面,选取数字高程、土地利用类型、NDVI 和坡度构建生态廊道提取的综合阻力面,综合阻力面权重因子赋值参考孙梓渊等[29]的研究结果。

(4)生态廊道构建

生态廊道通过识别生态源地之间交互的最小成本路径进行提取,反映城市生态系统服务空间完整性。

2.3　超大城市生态系统韧性评估体系

(1)超大城市生态系统韧性评估指标体系构建

本研究通过构建生态系统抵抗力、生态源地恢复力和生态廊道适应力超大城市生态系统韧性评估框架,综合考虑气候变化、自然灾害、人类活动等对超大城市生态系统韧性的多维影响,进而通过对超大城市生态系统韧性的总和评估结果,建立生态修复空间的识别方法。具体评估指标体系见表 2。

表 2　超大城市生态系统韧性评估指标体系

Table 2　Urban ecological resilience indicator system

目标层 Target hierarchy	准则层 Criteria hierarchy	指标层 Indicator hierarchy	属性 Attribute	评估方法模型 Method or model	指标对生态系统韧性的支撑性 The supporting role for ecosystem resilience
生态系统抵抗力 Ecosystem resistance	景观稳定性	Shannon 多样性指数	+	计算公式为: $\mathrm{SHDI}_i = -\sum_{i=1}^{n} p_i \ln p_i$ (4) 式中,SHDI_i 为 Shannon 多样性指数,该值范围 0—1,1 表示完全均匀分布;n 为独特物种总数;p_i 为由物种 i 组成的整个群落的比例。	反映景观异质性,表征不同土地利用类型的非均衡分布,土地利用越丰富表示生态系统抵抗力越强。

续表

目标层 Target hierarchy	准则层 Criteria hierarchy	指标层 Indicator hierarchy	属性 Attribute	评估方法模型 Method or model	指标对生态系统韧性的支撑性 The supporting role for ecosystem resilience
		分离度指数	+	计算公式为：$V_i=\frac{D_{ij}}{A_{ij}}$ (5) 式中，V_i 为景观类型 i 的分离度，D_{ij} 为景观类型 i 的距离指数；A_{ij} 为景观类型 i 的面积指数。	反映景观中斑块的分离程度，值越大表明景观内斑块组成越破碎、景观越复杂，生态系统应对复杂影响的抵抗力越强。
		景观形状指数	-	计算区域内某斑块形状与相同面积的圆或正方形之间的偏离程度来测量起形状复杂程度，计算公式为：$LSI=\frac{0.25\times E}{\sqrt{A}}$ (6) 式中，E 为景观中所有斑块边界的总长度，A 为景观总面积。	反应景观斑块要素的规则程度，景观形状指数值越大，说明斑块越离散聚合程度越差，体现生态系统抵抗力越弱。
		最大斑块指数	-	计算公式为：$LPI=(\frac{Max[a_1,a_2,\cdots,a_n]}{A})\times 100$ (7) 式中，$Max[a_1,a_2,\cdots,a_n]$ 为景观中最大斑块的面积，A 为景观总面积。	确定景观的优势类型，计算最大斑块面积占整个景观面积的比例，反映人类活动的方向和强弱。最大斑块指数数值越低，说明景观破碎程度越大，相应地自然生态系统应对变化和扰动的抵抗力越低。
	连通性	景观连接度指数	+	计算公式为：$CONNECT=\left(\frac{\sum_{j=k}^{n}c_{ijk}}{\left(\frac{n_i(n_i-1)}{2}\right)}\right)\times 100$ (8) 式中，c_{ijk} 为在临界距离之内的与斑块类型 i 相关的斑块 j 与 k 的连接状况，n_i 为景观中斑块类型 i 的斑块数量。	反映景观组分之间的功能连接性，功能性连接点的连接比例较高，有利于物质、能量和信息等在景观斑块之间相互流动，增强生态系统抵抗力。
生态源地恢复力 Ecological source restoration	生态系统服务	水源涵养	+	评估公式见 2.2 中的公式 1	生态系统服务是生态系统健康程度的直观表征指标，通过对北京自然生态系统提供的三大类生态系统服务的评估计算，反映自然生态系统的健康程度以及生态系统的整体抵御外界扰动和风险的能力，生态系统服务较高则抵抗力也相对较高。
		土壤保持	+	评估公式见 2.2 中的公式 2	
		固碳释氧	+	评估公式见 2.2 关键生态系统服务评估部分	
	生态系统质量	NDVI 指数	+	直接采用中国 30 米年最大 NDVI 数据集生产的 NDVI 指数结果。	反映植物生长长势和营养信息的重要参数，直接反映植被质量。
		植被覆盖度	+	本研究中，根据 NDVI 数据进行估算。计算公式为：$FVC_i=\frac{NDVI_i-NDVI_{min}}{NDVI_{max}-NDVI_{min}}$ (9) 式中，FVC_i是斑块 i 的植被覆盖度，$NDVI_{min}$是研究区裸土或无植被覆盖区域的 NDVI，取累计 5%的 NDVI 值；$NDVI_{max}$是植被完全覆盖区域的 NDVI，取累计 95%的 NDVI 值。	反映区域植被覆盖的程度，植被覆盖度越高的区域，生态系统质量越好，则其恢复能力越强。
		净初级生产力	+	单位时间内单位面积上扣除自养呼吸部分后光合作用产生的有机质总量，直接采用全球逐日 NPP 模拟数据产品。	植物通过光合作用固定的净固碳量，植被质量的直接评估指数，通过植被质量反映植被面对各类扰动和胁迫影响的直接恢复能力

续表

目标层 Target hierarchy	准则层 Criteria hierarchy	指标层 Indicator hierarchy	属性 Attribute	评估方法模型 Method or model	指标对生态系统韧性的支撑性 The supporting role for ecosystem resilience
	生态源地重要性	生态源地重要性指数	+	根据生态系统服务功能进行等权叠加分析,采用自然断点法分级,评估公式见 2.2 中的公式 3。	反映生态源地的直接恢复能力,重要性越高区域其面对各类扰动或影响的恢复力越好。
生态廊道适应力 Ecological corridor adaptability	生态廊道连通性	连通性指数	+	生态廊道斑块的连通性,使用 Conefor Sensinode 2.6 计算后提取。	反映生态廊道的健康程度,生态廊道连通性越高则其适应各种扰动的能力越高。
	生态廊道质量	生态廊道长度	-	计算提取出各条生态廊道的长度,利用 ArcGIS 直接计算。	生态廊道越长则其面临的可能风险越多、情况约复杂,适应的难度越大。
		生态廊道与河流距离	-	生态廊道与最近河流的直线距离,利用 ArcGIS 采用生态廊道图层与河流水系图层直接计算的每条生态廊道的与河流的最短直线距离。	反映河流对生态廊道的影响,距离越短则廊道的适应能力越低。
		生态廊道距主要道路平均距离	-	生态廊道与最近道路的直线距离,利用 ArcGIS 采用生态廊道图层与道路图层直接计算的每条生态廊道的与河流的最短直线距离。	反映道路对生态廊道的影响或阻断风险,距离越短则廊道的适应能力越低。

(2)超大城市生态系统韧性评估方法

本研究以生态系统抵抗力、生态源地恢复力、生态廊道适应力作为超大城市生态系统韧性的评估目标层,分别针对超大城市生态韧性的三个维度,具体指标层间按照等权重进行综合叠加分析,分别计算超大城市的生态系统抵抗力、生态源地恢复力和生态廊道适应力,并考虑到三个维度分别表征了超大城市生态韧性的三个方面,在本研究中并不计算其综合的生态系统韧性指数,而是分别从生态系统抵抗力、生态源地恢复力、生态廊道适应力的评估结果出发,基于自然断点分级,支撑生态修复空间的识别。具体计算公式如下:

$$F(\text{resistance},\text{adaptability},\text{restoring}) = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \times R_i \tag{8}$$

其中, $F(x)$ 为城市生态系统韧性三个维度的评估结果, ω_i 为指标 i 的权重,在本研究中按照等权重进行计算, R_i 为指标 i 的结果,在本研究中,为便于空间叠加分析,所有指标均进行无量纲化处理。

3　结果与讨论

3.1　生态网络构建结果

根据水源涵养、土壤保持、固碳释氧生态系统服务的评估结果,北京市关键生态系统服务功能表现出显著的空间异质性,通过等权重的空间叠加分析计算得到综合生态系统服务,并采用自然断点法进行划分,确定极重要、比较重要、中等重要、一般重要四个等级,将较高重要的自然生态空间确定为生态源地。本研究共识别出 51 处生态源地,总面积 2883.39 km^2,主要生态系统类型为林地,占北京市市域非建设空间总面积的21.88%(图 3),在空间上主要分布于北部、西部和东部的山区。从斑块特征来看,北京市的生态源地平均面积 55.45 km^2,最大的一块生态源地斑块面积为 370.49 km^2,位于平谷区东部边缘的丘陵山地。进一步地基于数字高程、土地利用类型、归一化植被指数、自然坡度构建综合阻力面。生态廊道的识别通过最小成本路径进行计算,通过 ArcGIS 软件的 Linkage Mapper 工具进行计算,共识别出 206 条条生态廊道,总长度 1271.96 km,平均长度 6.17 km(图 3)。生态廊道总体位于北京北部、西部、东部,主要在北京城市总体规划确定的生态涵养区内,呈现出以北部为核心、向西部、东部扩散蔓延的形态,将北部较高生态系统服务功能的生态源地与西部屏障区、东部涵养区连通,西部-北部-东部半环绕包裹北京市中心建成区,共同组成北京城市发展区的环绕式生态安全屏障,为北京市城区的社会经济发展提供充裕的生态产品和屏障功能。

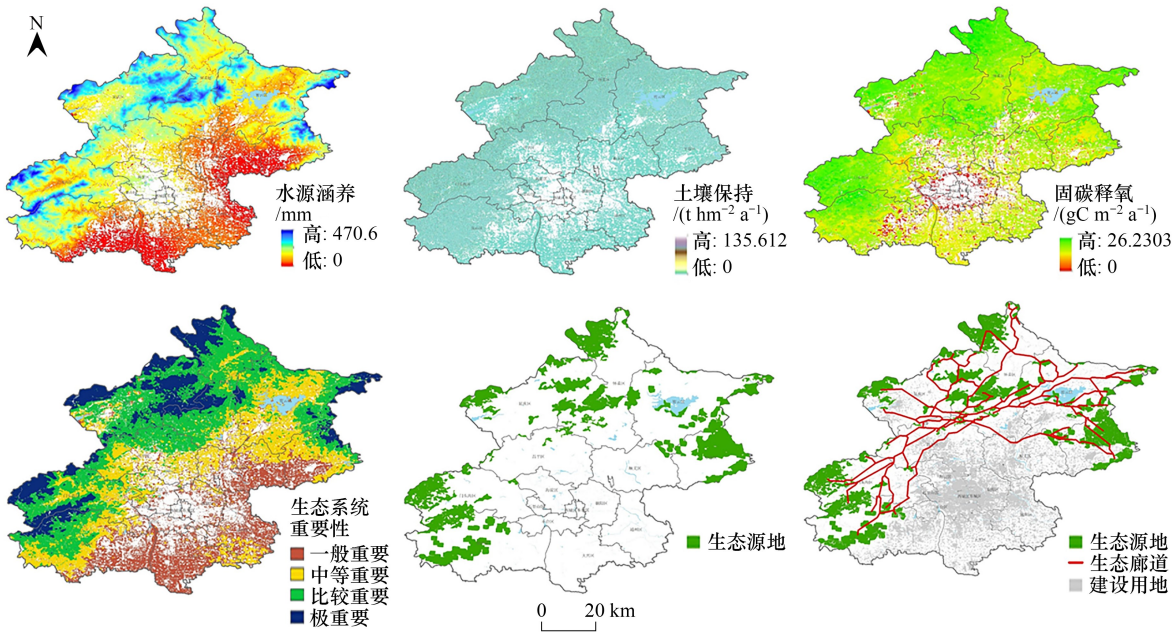

图 3 北京市主要生态系统服务及生态网络(2020 年)

Fig.3 Ecosystem services and ecological networks in Beijing (2020)

3.2 城市生态系统韧性评估结果

本研究基于“生态系统抵抗力—生态源地恢复力—生态廊道适应力”的超大城市生态系统韧性评估框架,生态源地-生态廊道的识别和提取基于生态安全格局构建的范式,通过 ArcGIS 10.8.2、Conefor Sensinode、Fragstats 4.2、Let 软件分别计算研究区生态系统抵抗力、生态源地恢复力和生态廊道适应力,评估结果分级按照每 0.2 度为一级,共分为 5 级,分别为低、较低、中等、较高、高,评估结果如图 4 所示。

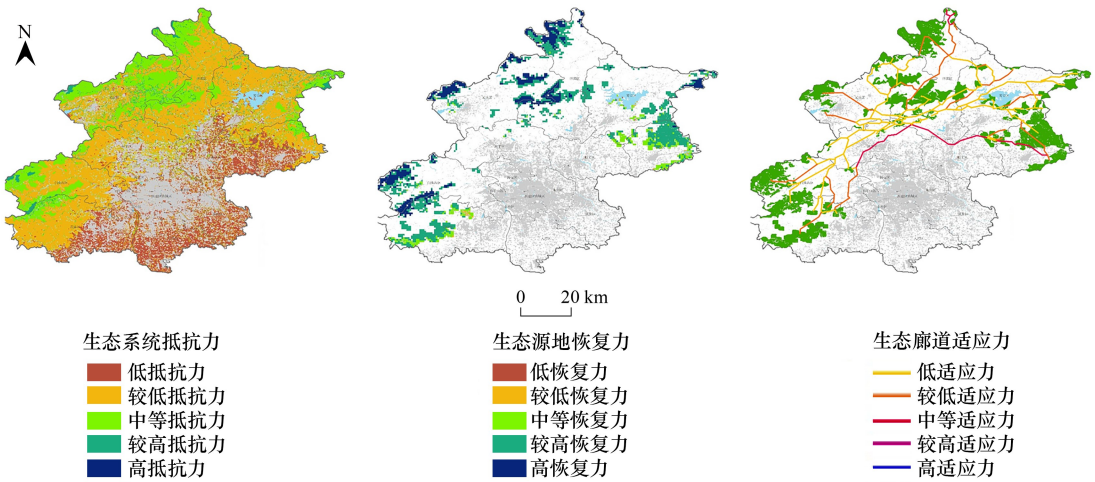

图 4 北京市生态系统韧性评估结果(2020 年)

Fig.4 Ecosystem resilience in Beijing (2020)

生态系统抵抗力方面,北京市自然生态系统抵抗力指数介于 0.015—0.772 之间,大部分生态涵养区的抵抗力较低,抵抗力指数超过中等水平的生态系统主要位于北部深山区、西部灵山-百花山和东部边缘地区。抵抗力水平较低的区域集中在西部浅山区、东北部山区和密云水库周边等区域,与城市建成区距离较近,更容易

受人类活动影响的区域。从生态系统的抵抗力来看,较低的抵抗力难以抵御城市化过程、气候变化、极端天气等带来的各种风险和胁迫,生态系统抵抗力较低的区域是生态修复工程部署需要重点考虑的空间。

生态源地恢复力方面,北京市生态源地恢复力指数介于 0.05—0.917 之间,综合来看,生态源地的恢复力整体较好,但东部生态涵养区的生态源地恢复力整体低于其他区域,52 块生态源地中有只有 2 块生态源地恢复力较差、6 块生态源地恢复力中等,其余生态源地的生态恢复力均处于较好或好的状态,恢复力较差的生态源地主要分布于西部山区大石河出山口、密云水库周边,是北京重要的生态产品提供的区域。生态源地是生态系统服务供给重要性较高的区域,对城市生态安全格局的构建具有重要的节点性意义,生态源地的恢复力应长期处于较好或好的状态,以确保城市生态安全屏障的健康稳定。

生态廊道适应力方面,北京市生态廊道适应力指数介于 0—0.529 之间,平均适应力小于 0.5,生态廊道整体的适应力不高,区内路网、水系密布,生态廊道容易受扰动,亟需加强所有生态廊道的连通和廊道功能恢复,确保应对外部冲击的能力。

3.3　基于生态系统韧性的生态修复空间识别

基于北京市生态涵养区生态系统韧性的三个主要维度,分别按照生态系统抵抗力低、生态源地恢复力差、生态廊道适应力弱的空间识别生态修复的主要空间图斑(图 5),并结合叠加自然生态系统质量低、生态系统服务供给能力差的空间,识别出的北京市应开展生态修复的区域总面积为 7277.07 km^2,占北京非建设空间(13180 km^2)总面积的 55.21%。与 2022 年王文静等人[22]的研究成果相比,本研究中的总体结果和分布基本一致,但本研究识别出的生态修复空间面积增加了 1671 km^2,空间上主要分布于密云水库及周边流域,该区域是北京市的饮用水水源地,水源涵养和土壤保持服务以及生态系统抵抗力的需求更高,因此生态系统整体韧性要求高,生态修复的需求更大。

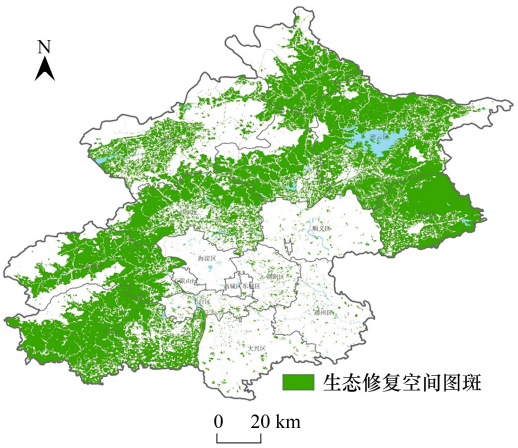

图 5　北京市生态修复空间识别

Fig.5　Ecological restoration spaces in Beijing

结合《北京市国土空间生态修复规划 2021—2035 年》[30]和《北京市生态安全格局专项规划 2021—2035 年》[31],基于城市生态系统韧性识别出应开展生态修复的图斑,主要分布于房山南部生物多样性保护与森林修复区、房山北部水土保持修复期、门头沟水土保持与森林修复区、西山水土保持修复区、怀柔-昌平水源涵养与水土保持修复区、延庆水源涵养与复合功能修复区、密云水库上游水源涵养区、密云水库南部水生态修复区和平谷-密云生物多样性与森林修复区,其中约有 40%的图斑是北京市生态安全格局的底线安全格局图斑。

3.4　生态修复分区策略

根据北京市生态系统韧性及“山水林田湖草沙是生命共同体”的系统性、一体化保护修复理念[32],北京市生态修复空间可以按照生态网络及生态安全格局的主要功能定位划分为西部生态屏障修复区、东部生态源地修复区和中部生态廊道修复区(图 6)。根据《北京市国土空间生态修复规划 2021—2035 年》和《北京市生态安全格局专项规划 2021—2035 年》的分区情况与本研究生态修复空间识别结果互相结合,进一步总结出:(1)西部生态屏障修复区主要围绕西部山区生态屏障功能的恢复重建为目标,主要包括房山南部生物多样性保护与森林修复区、房山北部水土保持修复区、门头沟水土保持与森林修复区以及部分新城综合整治与生态修复区,区内部分自然生态系统抵抗力较低,生态修复的策略主要为在拒马河、大石河、永定河等流域中上游采用水土流失防治和水源涵养功能提升等修复措施。(2)东部生态源地修复区围绕密云水库流域生态源地恢复力提升为目标,主要包括密云水库上游水源涵养区、密云水库南部水生态修复区、平谷-密云生物多样性保护与森林修复区,作为北京的重要饮用水源地,密云水库流域以水源涵养和生物多样性维持作为主要修复

方向,生态修复策略为在密云水库上游部署保水修复措施、水库及周边部署水生态水环境综合提升措施、水库下游及密云-平谷山区部署水源涵养功能提升措施。(3)中部生态廊道修复区以西山水土保持修复和怀柔-昌平北部山区水源涵养与水土保持修复为目标,主要措施围绕中部生态涵养区生态廊道的打通展开,有效连通西部生态屏障与东部生态源地的生态产品流通以及生态功能耦合,将北京的生态涵养区以远程的耦合形态连通形成为具有高度韧性的生态网络。

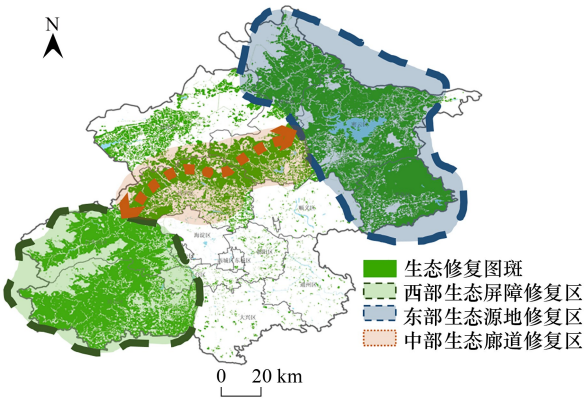

图 6 北京市生态修复格局

Fig.6 Ecological Restoration Partition Plan in Beijing and

按照生态修复的渐进式原则,生态修复具体工作的展开应按照“生态安全保障-源地质量提升-廊道功能连通”的修复范式,在实际生态修复工程的时序布设上,首先开展生态安全屏障重建,提升生态系统抵抗力,进而开展生态源地恢复力提升修复,在此基础上打通关键生态廊道,促进生态系统韧性的越级提升。划定生态保护修复空间和分区分类修复策略,不仅能够厘清区域生态修复的关键区域,还对地方生态修复工程开展具有重要的指导意义。本研究成果对北京的生态修复具体实践工作也产生了一定的支撑作用,2023 年北京市以“首都西部生态屏障区山水林田湖草沙一体化保护和修复工程”获批国家“十四五”第三批“山水工程”,按照优先重建生态屏障的修复路径,以提升和重建西部生态屏障功能为主要修复目标[33]。本研究为生态修复规划提供了可参考的方法体系,也为地方生态修复工作的实际开展提供了科学依据。

4 结论与展望

本研究构建了基于生态网络的城市生态系统韧性评估的三维框架,综合考虑了自然生态系统抵抗力、生态源地恢复力和生态廊道适应力三个层面的韧性维度,基于城市生态系统韧性的评估结果综合识别城市生态修复空间和建立生态修复分区规划。评估和识别结果显示,北京应开展生态修复空间总面积为 7277.07 km^2,主要分布在生态涵养区中人类活动相对频繁、与城市建成区距离较近的区域,重点修复的空间位于西部生态屏障区的流域中游、东部生态源地的大部分区域以及北部山区生态廊道破碎割裂的区域。生态修复空间共占北京市非建设用地的 55.21%,通过生态修复工程的实际开展能够提升大部分生态涵养区的水源涵养、水土保持等功能,经过与前人研究结论比较发现,本研究的评估结果和生态修复空间分布基本一致。本研究通过基于生态网络分析的基本方法构建了城市生态系统韧性的评估体系,基于生态系统抵抗力、生态源地恢复力和生态廊道适应力的构建保护修复空间识别方法,为超大城市生态修复的空间识别提出了改进的方法体系,在生态格局破碎、生态系统退化、生态质量降低、生态功能下降等生态修复空间的一般性识别方法基础上,引入对生态系统韧性的综合考量,进一步精细化了生态修复空间的识别体系,并更加明确了生态修复的目标和策略。本研究可以为国土空间生态修复规划、区域山水林田湖草沙一体化保护修复等工作提供理论和方法支撑,也对于北京市生态修复工作的开展具有一定的借鉴意义。

本研究面向城市生态系统韧性的客观需要和生态修复空间识别存在的问题,提出了基于生态网络构建的生态系统韧性评估体系并开展修复空间识别案例研究,目前尚存一些需要改进提升的地方:(1)本研究构建的生态系统韧性评估体系主要考虑城市自然生态系统面对城市化进程、气候变化、自然灾害等影响和胁迫的应对能力,在后续的研究中还应考虑城市社会经济发展对城市生态系统韧性的需求方面,进一步综合明确在生态韧性的目标框架下生态修复的精细化空间,促使生态修复工作的开展更具有落地性和可行性。(2)本研究针对生态修复分区开展时序的安排是按照“生态系统安全保障-生态源地韧性提升-生态廊道韧性贯通”的大原则进行,但在生态修复的实际工作中,仍需要综合考虑生态风险、城市发展需求、人类活动影响等多重因

素,共同综合确定生态修复工作开展的实际时序,进一步有效支撑生态修复实践工作的顺利实施。

参考文献(References):

[1] 王辰星, 朱捷缘, 郑天晨, 严岩, 徐舒. 面向可持续未来的生态系统服务——第十届生态系统服务伙伴关系全球大会述评. 生态学报, 2019, 39(21): 8193-8199.

[2] 史晨辰, 朱小平, 王辰星, 吴锋. 韧性城市研究综述——基于城市复杂系统视角. 生态学报, 2023, 43(4): 1726-1737.

[3] 王新兴, 赵雪雁. 天山北坡经济带经济韧性与生态韧性的时空耦合研究. 生态学报, 2024, 44(21): 1-14.

[4] 李强, 吕军骁. 基于生态韧性的山水林田湖草沙一体化保护修复框架. 河北省科学院学报, 2024, 41(3): 1-8.

[5] 夏楚瑜, 董照樱子, 陈彬. 城市生态韧性时空变化及情景模拟研究——以杭州市为例. 生态学报, 2022, 42(1): 116-126.

[6] 张傲翔, 苗成林, 陈峥妍. 黄河流域城市生态韧性、社会网络及其影响因素分析. 干旱区地理, 2025, 48(1): 1-16.

[7] 汪东川, 龙慧, 王康健, 王鸿艺, 柴华, 高建设. 京津冀城市群城市化强度与生态韧性的耦合协调分析. 生态学报, 2023, 43(15): 6321-6331.

[8] 唐立娜, 欧阳静怡, 徐烨, 王豪伟, 王璐妍. 基于景感生态学对生态修复的再思考. 生态学报, 2022, 42(4): 1639-1644.

[9] Ran Y J, Zhao X Q, Ye X M, Wang X B, Pu J W, Huang P, Zhou Y Q, Tao J Y, Wu B H, Dong W W, Qu G X. A framework for territorial spatial ecological restoration zoning integrating "Carbon neutrality" and "Human-geology-ecology": Theory and application. Sustainable Cities and Society, 2024, 115: 105824.

[10] Liu Z H, Huang Q D, Zhou Y, Sun X. Spatial identification of restored priority areas based on ecosystem service bundles and urbanization effects in a megalopolis area. Journal of Environmental Management, 2022, 308: 114627.

[11] Peng J, Wang A, Luo L W, Liu Y X, Li H L, Hu Y N, Meersmans J, Wu J S. Spatial identification of conservation priority areas for urban ecological land: an approach based on water ecosystem services. Land Degradation & Development, 2019, 30(6): 683-694.

[12] Lü T Y, Zeng C, Lin C X, Liu W P, Cheng Y J, Li Y B. Towards an integrated approach for land spatial ecological restoration zoning based on ecosystem health assessment. Ecological Indicators, 2023, 147: 110016.

[13] Wang Z F, Liu Y, Xie X Q, Wang X K, Lin H, Xie H L, Liu X Z. Identifying key areas of green space for ecological restoration based on ecological security patterns in Fujian province, China. Land, 2022, 11(9): 1496.

[14] Li H, Zhang T, Cao X S, Zhang Q Q. Establishing and optimizing the ecological security pattern in Shaanxi province (China) for ecological restoration of land space. Forests, 2022, 13(5): 766.

[15] Prach K, Durigan G, Fennessy S, Overbeck G E, Torezan J M, Murphy S D. A primer on choosing goals and indicators to evaluate ecological restoration success. Restoration Ecology, 2019, 27(5): 917-923.

[16] Yao Y, Fu B J, Liu Y, Wang Y, Song S. The contribution of ecosystem restoration to SDGs in Asian drylands: A literature review. Land Degradation & Development, 2021, 32.

[17] 乔治·甘 著, 刘俊国, 李德龙, 张学静 译. 生态恢复实践的国际原则与标准(第二版).生态恢复实践的国际原则与标准(第二版),2020.

[18] Jiang J, Zhang H L, Huang Q, Liu F, Li L, Qiu H R, Zhou S Z. Diagnosis of key ecological restoration areas in territorial space under the guidance of resilience: a case study of the Chengdu-Chongqing region. Land, 2023, 12(5): 973.

[19] 冯一凡, 冯君明, 李翅. 生态韧性视角下绿色空间时空演变及优化研究进展. 生态学报, 2023, 43(14): 5648-5661.

[20] 来洒洒, 陈文波, 危小建, 程钰颖. 基于生态韧性评价的鄱阳湖流域自然保护地预测与空缺区识别. 应用生态学报, 2024, 35(12): 3461-3468.

[21] 李加林, 张旖芯, 张海涛, 龚虹波, 刘永超. 基于"潜力-弹性-稳定性"模型的温州市生态韧性时空变化及影响因素研究. 生态学报, 2024, 44(8): 3253-3267.

[22] 王文静, 逯非, 欧阳志云. 国土空间生态修复与保护空间识别——以北京市为例. 生态学报, 2022, 42(6): 2074-2085.

[23] 荣月静, 严岩, 王辰星, 章文, 朱婕缘, 卢慧婷, 郑天晨. 基于生态系统服务供需的雄安新区生态网络构建与优化. 生态学报, 2020, 40(20): 7197-7206.

[24] 薛飞, 张念慈, 夏楚瑜, 张健, 王楚玥, 李淞, 周珺. 城市生态韧性水平空间评估及其驱动力——以北京市通州区为例. 生态学报, 2023, 43(16): 6810-6823.

[25] Xu DM, Peng J, Dong J Q, Jiang H, Liu M L, Luo Y H, Xu Z H. Expanding China's protected areas network to enhance resilience of climate connectivity. Science Bulletin, 2024, 69(14): 2273-2280.

[26] 刘世梁, 董玉红, 王方方, 刘华, 赵奕菲. 生态系统服务价值评估在生态修复中的应用. 中国生态农业学报: 中英文, 2023, 31(8): 1343-1354.

[27] Tsahor M, Katoshevski-Cavari R, Alfasi N. Assessing urban adaptability: The key is in the land use plan. Land Use Policy, 2023, 126: 106508.

[29] 孙梓渊, 王赛鸽, 陈彬. 基于生态系统服务的生态安全格局构建与生态韧性评估——以长株潭城市群为例. 生态学报, 2024, 44(11): 4650-4661.

[30] 北京市人民政府. 北京市国土空间生态修复规划(2021—2035 年). 2022.

[31] 北京市人民政府. 北京市生态安全格局专项规划(2021—2035 年). 2022.

[32] 吴钢, 赵萌, 王辰星. 山水林田湖草生态保护修复的理论支撑体系研究. 生态学报, 2019, 39(23): 8685-8691.

[33] Yang M, Wang Z T, Zhang Z M, Chen P, Zhao D, Cheng E Q, Wang C X, Yan Y. Pathways for ecological restoration of territorial space based on ecosystem integrity: a case study of approach to protecting and restoring mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands in Beijing, China. Ecological Frontiers, 2024, 44(6): 1214-1223.