#### DOI: 10.20103/j.stxb.202410092429

姚龙杰,岳邦瑞,赵若男,朱宗斌,潘卫涛,董清榕.综合空间分异与成本协调:生态安全格局供需错位的求解路径.生态学报,2025,45(9): 4155-4170.

Yao L J, Yue B R, Zhao R N, Zhu Z B, Pan W T, Dong Q R.Integration spatial differentiation and cost coordination: the solution path of the mismatch between supply and demand of ecological security pattern. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(9):4155-4170.

# 综合空间分异与成本协调:生态安全格局供需错位的 求解路径

姚龙杰<sup>1,2</sup>,岳邦瑞<sup>1,2,\*</sup>,赵若男<sup>3</sup>,朱宗斌<sup>1,2</sup>,潘卫涛<sup>4</sup>,董清榕<sup>1</sup>

1 西安建筑科技大学建筑学院,西安 710055

2 西安建筑科技大学绿色建筑全国重点实验室, 西安 710055

3 西安爱德空间设计机构有限公司,西安 710055

4 西京学院设计艺术学院,西安 710055

摘要:生态安全格局作为保障区域生态安全和提升人类福祉的关键内容,是国土空间总体格局的重要组成部分。然而,受规划 理念、技术手段等因素影响,既有研究通常仅基于单一空间尺度构建生态安全格局,忽略了域内不同空间区域的在地性生态系 统服务需求与生态保护行动的投入成本,加剧了生态安全格局供需错位问题的潜在风险。为此,在既有构建方法的基础上,基 于三生空间分异视角,精细考虑域内"生产-生活-生态"空间诉求与保护行动的帕累托效率(最优成本-效益比),提出了一种解 决生态安全格局供需错位问题的研究框架与技术路线。进一步以国土空间生态修复规划实施试点城市——西安市为例展开方 法应用与分析,结果表明,最佳生态安全格局由 692 个生态源地和 689 条关键生态廊道组成,获得投入总成本和保护总效益比 为 0.637, 是本研究中 164 组多情景方案中兼顾满足三生空间生态系统服务诉求与成本-效益率的理想方案,相较于既往研究构 建结果能够更好的适配地方诉求。研究意为当前普遍存在的生态安全格局供需错位问题的求解分析提供思路,旨在提升生态 安全格局构建结果的科学性与实施可行性。

关键词:国土空间生态修复规划;生态安全格局;供需错位;空间分异;成本-效益权衡;空间优先级判定

# Integration spatial differentiation and cost coordination: the solution path of the mismatch between supply and demand of ecological security pattern

YAO Longjie<sup>1,2</sup>, YUE Bangrui<sup>1,2,\*</sup>, ZHAO Ruonan<sup>3</sup>, ZHU Zongbin<sup>1,2</sup>, PAN Weitao<sup>4</sup>, DONG Qingrong<sup>1</sup>

1 College of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

2 State Key Laboratory of Green Building in China, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

3 Xi'an Aide Spatial Design Institution Co., Ltd., Xi 'an 710055, China

4 College of Art and Design, Institute of Xijing, Xi'an 710055, China

**Abstract**: As a crucial element in safeguarding regional ecological security and enhancing human well-being, the ecological security pattern constitutes a core component of the overall territorial spatial pattern. However, influenced by factors such as planning concepts and technical approaches, existing ecological security pattern source identification results often manifest as large, contiguous, and concentrated natural ecological patches (such as large forests and grasslands), while overlooking small, scattered semi-natural lands in residential and production areas that provide localized ecosystem services. Although

**基金项目**:国家重点研发计划项目(2022YFC3802803);教育部人文社会科学研究项目(24YJAZH209);陕西省社会科学年度项目(2024J040);陕 西省艺术科学规划项目(SYG2024020)

收稿日期:2024-10-09; 网络出版日期:2025-03-04

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yuebangrui@ xauat.edu.cn

http://www.ecologica.cn

large ecological patches with superior natural conditions make significant contributions to maintaining regional ecological security levels, these areas are typically distributed in natural zones with low population density. This not only creates a spatial mismatch with populated residential areas where social groups concentrate, but also leads to difficulties in aligning conservation objectives with social needs. Consequently, this results in a supply-demand misalignment in the ecological security pattern, characterized by spatial non-overlap and typological mismatch between supply and demand. In response, this study builds upon existing construction methods and, from the perspective of production-living-ecological space differentiation, carefully considers the Pareto efficiency (optimal cost-benefit ratio) of spatial demands and conservation actions within the region, proposing a research framework and technical approach to address the supply-demand misalignment in ecological security patterns. First, it establishes a method for delineating the scope of production-livingecological functional spaces, then references the Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) to determine the required ecosystem services matching each functional space, and further employs Zonation5 to identify multifunctional ecological source protection priorities within the three functional spaces. Finally, it incorporates two constraint conditions from realistic scenarios—costs (expenses for creating and maintaining green spaces) and benefits (the effective radiation range of source protection)-to develop a Pareto-optimal solution identification method that achieves the best costbenefit ratio. The method was further applied and analyzed using Xi'an city-a pilot city for territorial spatial ecological restoration planning—as a case study. Results indicate that the optimal ecological security pattern comprises 692 ecological source areas and 689 critical ecological corridors, achieving a total input cost to total conservation benefit ratio of 0.637. Among 164 multi-scenario schemes in this study, this represents an ideal solution that balances ecosystem service demands across production, living, and ecological spaces while maintaining cost-effectiveness. Compared to construction results from previous studies, it better accommodates local demands. This research aims to provide insights into resolving the prevalent supply-demand misalignment in ecological security patterns, with the goal of enhancing the scientific validity and implementation feasibility of ecological security pattern construction.

Key Words: territorial ecological restoration planning; ecological security pattern; misplaced supply and demand; spatial differentiation; conservation effectiveness; spatial priority determination

气候变化、城镇快速扩张发展加剧了区域生态系统失稳,引起了社会对于生态系统服务持续供应的不确 定性担忧<sup>[1]</sup>。因此,近年来围绕如何优化空间格局,维持并提升生态系统服务高效稳定供应的研究议题备受 关注<sup>[2]</sup>。其中,生态安全格局(ESP)作为一种整合景观生态学"格局-过程"互馈作用原理的空间规划工 具<sup>[3-4]</sup>,在调控关键生态过程、优化生态系统结构-功能方面展现出显著优势<sup>[5]</sup>。现有研究表明,不同区域的 ESP 构建研究通过识别并保护对生态过程起关键作用的斑块、廊道与节点,对促进区域生态系统稳定性<sup>[6]</sup>与 生态系统服务可持续性具有重要意义<sup>[7]</sup>。

当前,基于"源地-廊道-战略点"的生态安全格局构建范式已被广泛应用<sup>[5,8]</sup>。其中,源地作为核心保护 主体,承担维持 ESP 整体结构与发挥生态效能的关键任务<sup>[9]</sup>。在开展市域<sup>[10]</sup>、城市群<sup>[11,12]</sup>、流域<sup>[13-15]</sup>等全 域性生态安全格局构建时,现有研究通常关注于三类源地特性:①侧重于维持生态斑块连通性能的结构型源 地<sup>[16]</sup>,②关注于生态系统服务供给水平的功能型源地<sup>[6,14,17]</sup>;③整合景观结构-功能双重效益的综合型源 地<sup>[18]</sup>。上述研究思路为提高生态安全格局的福祉水平提供了支撑依据,然而,基于该思路生态源地技术识别 时普遍存在一个异常现象,即识别结果往往表现为大、连片且集中的自然生态斑块(如大型森林、草地 等)<sup>[10,18-21]</sup>,而忽略了生活区、生产区中小、分散且提供地方性生态系统服务的半自然土地<sup>[22]</sup>。例如,农业区 灌丛和城区绿化带贡献了诸如空气净化、洪涝控制、昆虫授粉等方面的重要生态系统服务<sup>[23-24]</sup>,但这些半自 然土地由于其较小的面积和复杂的土地利用形态,往往未被充分纳入生态安全格局构建过程。尽管本底优良 的大型生态斑块对维持区域生态安全水平具有重要贡献,但由于该类区域通常分布于人口密度低的自然地 带,不仅与社会群体聚集的人居区域在空间上错位,而且保护目标与社会需求很难一致匹配,导致产生生态安全格局"供给-需求"在空间上不重合、类型上不对接的供需错位问题。

究其成因,由于多数研究受当前国土空间规划的系统性理念<sup>[25, 26]</sup>与技术手段等因素影响,因此生态安全格局构建研究趋同于在单一空间尺度下,选择本底优良、相对重要性高的生态源地。尽管这种构建思路旨在通过全域统筹来规避以往局部生态保护行动的低效性<sup>[27]</sup>,但却简化了ESP构建过程中对域内空间差异性需求的思考,这不仅加剧了生态系统服务供需错位问题的潜在风险<sup>[28-30]</sup>,并致使保护资金集中重复用于本底较好的自然区域,导致保护资金低效使用<sup>[31]</sup>。进一步来看,在衔接国土空间生态修复详细规划,开展生态安全格局精细管控的现实需求背景下<sup>[26]</sup>,仅有少部分研究通过水-陆要素分离<sup>[32]</sup>的方法来精细划分域内不同空间并构建整合性生态安全格局,以确保针对水-陆要素能够进行差异化格局管控。然而,不同于以往针对单一"要素空间"的生态修复研究,当前国土空间生态修复的规划对象是整合要素一体化的"功能空间"<sup>[33, 34]</sup>,且形成了基于"生产-生活-生态"功能属性的空间分类认知思路<sup>[35, 36]</sup>。由于构建生态安全格局旨在提升生态系统服务供需匹配,因此基于功能空间分异思路,将全域划分为"生产-生活-生态"三类功能空间并分析诉求,能够促成不同空间的在地生态系统服务达成供需匹配<sup>[37]</sup>。然而,尽管基于三生功能空间分异视角构建生态安全格局对促进的国土空间管控至关重要,但少有研究对此展开深入探讨。

此外,由于实际规划实施存在保护资金的约束限制,意味着不同功能空间内的生态系统服务诉求不能完 全满足。故而需要平衡全域总体保护目标与三类功能空间内单项保护目标的协调关系,确保保护资金投入能 够获得最优效益<sup>[17]</sup>。因此,需要探讨不同情景下的三类空间的分配保护目标,优化保护成本与保护效益的协 调效率,并判别最具成本-效益的最佳方案以服务于规划实施管控<sup>[38]</sup>。综上,需要进一步的研究,以提供一个 改进方法,为决策过程、政策选择、管理措施和不同生态安全格局方案之间的公平权衡提供信息。

为应对上述挑战,本研究首先构建"生产-生活-生态"功能空间的范围划定方法,进一步参考国际生态系统服务通用分类体系(CICES)确定匹配各个功能空间的需求生态系统服务,并进一步使用 Zonation5 识别三 类功能空间内的多功能生态源地保护优先级。最后将现实情景的两类约束条件,即成本(保护行动的造绿和 维持绿化成本)和效益(保护源地的效益总量与辐射范围)纳入考虑,构建具有最佳成本-效益的帕累托最优 方案判别方法。研究在最大化区域生态安全格局保护效益的地方匹配性、效益-成本率的背景下,开发了一个 基于上述步骤的生态安全格局构建方法,进而将现实规划过程中遇到的资源和实施限制因素纳入考虑,通过 案例研究展示了应用该方法优化"生产-生活-生态"相关的生态系统服务的保护效益和成本投入,以期为生态 安全格局构建研究的科学性与可实施性提供参考。

# 1 供需错位问题界定与研究框架构建

确保生态系统服务供需匹配是当前生态安全格局构建研究的基础焦点。而在以解决供需不匹配问题为 导向的研究中,存在供需错位与供需错配两类主要问题(图1),且两类问题的产生语境、表现现象及形成原因 存在差异(表1)。其中,供需错位问题始于耕地多功能的供给-需求不平衡关系的研究<sup>[39]</sup>,发展至近期衍生 出城乡生态网络<sup>[29]</sup>、绿色基础设施<sup>[40]</sup>、生态安全格局<sup>[41]</sup>与受益人群所在区域在空间上不重叠导致供需不均 的研究探讨。

供需错位问题因单一尺度生态安全格局构建研究时域内空间差异化认知不足而产生(表1),由于问题存 在而致使现有生态安全格局构建结果在满足地方需求 ESs 时存在不足,导致生态安全格局在落地实施时存在 争议。而基于"生产-生活-生态"适宜性对全域空间进行差异分类,有助于判断对应功能空间的 ESs 需求类型 与 ESs 供给区,并通过进一步统筹考虑三类功能空间的保护成本与效益,确保识别结果的实施可行性。因此, 本研究框架(图 2)主要通过①基于"生产-生活-生态"功能适宜性划分全域空间;②确定并评估适配三生空间 诉求的生态系统服务;③还原现实约束条件(限制总体保护目标与三类空间的可保护面积),识别各类主导情 景的生态保护优先级;④结合帕累托效率(成本-效益率)确定最优方案。



图1 供需错位与供需错配问题的图解比较



表1 关	é于供需错位与	供需错配问题成因	、不良后果、	产生语境的比较
------	---------	----------	--------	---------

Table 1	Comparison of the causes,	adverse consequences and	i context of supply and	demand mismatch and misplaced
	1	1		1

问题类型 Problem types	供需错位 Misplace between supply and demand	供需错配 Mismatch between supply and demand
问题表象 Problems phenomena	描述提供 ESs 的蓝绿空间、生态源地等供给区与使用 生态系统服务的社会群体所在的需求区在空间上不 重合的现象	描述提供 ESs 的蓝绿空间、生态源地等供给区 与使用生态系统服务的社会群体所在的需求 区在空间上重合但不匹配需求的现象
问题成因 Causes of problems	通常仅在全域范围识别 ESs 供给区,缺乏需求区内的 ESs 供给区精细识别过程,识别结果较为粗糙	通常仅在需求区内识别 ESs 供给区,但未正确 判断需求区的功能诉求认知,导致错选 ESs 类型
不良效应 Adverse effect	由于保护行动产生的生态系统服务无法直接匹配需求 护行动的前期资金投入产生浪费甚至误用	,区域生态系统服务状态难以改善,并且导致保
问题语境 Problem context	单一尺度的生态安全格局构建研究	中心城区绿色基础设施构建研究 自然保护地生态网络构建研究

ESs: 生态系统服务 Ecosystem service

## 2 研究方法与数据来源

## 2.1 案例研究区域

陕西省西安市(107°40′E—109°49′E,33°42′N—34°45′N)处于中国西北地区,辖境东西长 204km,南北宽 116km,土地总面积 10108km<sup>2</sup>,2020 年西安市常住人口为 1296 万人。因西安市处于中国重要农业生产区(关中平原粮食主产区)、重要自然保护地(秦岭国家公园北麓)以及西北地区最大的人口常驻地,其"生产-生活-生态"空间分异特征十分显著,故而以该地区作为案例展开研究。

2.2 数据来源

本研究所使用的各类数据及其来源如表 2 所示,所有数据在 ArcGIS 10.5 中裁剪至研究区边界范围并重 采样至统一分辨率。根据研究目标和研究区土地覆被特征,将土地利用类型数据分为 9 类:林地、灌林地、草 地、耕地、城市建设用地、农村建设用地、裸地、永久性水体、湿地。

# 2.3 研究方法

2.3.1 研究框架构建

研究框架中包括研究思路图示解读及其对应的技术构建路径(图 2),其中总体步骤分为4部分:①"生

4159

产-生活-生态"空间划界;②"生产-生活-生态"空间需求生态系统服务分析与评估;③"生产-生活-生态"优先 发展情境的保护目标分析与保护优先级判别;④"生产-生活-生态"优先发展情境的保护成本-效益评估与帕 累托最优网络构建。

表 2 本研究使用的数据及来源

Table 2   Data and sources used in this study						
数据名称	分辨率	数据来源				
Data name	Resolution	Data sources				
土地利用数据(2020年)	10	ESA 欧洲航空航天局				
Land use data (2020)	10 m	( https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover/ )				
高程 (DEM)	30 m	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn)				
年平均降雨量 (2020 年) Average annual rainfall (2020)	30 m	西安市气象数据中心,通过克里金插值得到				
年平均蒸散量 (2020年) Annual average evapotranspiration (2020)	30 m	西安市气象数据中心 基于 Penman-蒙蒂思公式并结合软件计算				
年平均气温 (2020 年) Average annual temperature (2020)	1km	引自参考文献 <sup>[42]</sup>				
土壤现状 Soil status	1km	HWSD 世界土壤数据库				
道路交通现状(2020年) Road traffic status (2020)	30m	西安市自然资源与规划局				
植被生产力(2020年) Vegetation productivity (2020)	500m	美国地质调查局(https://lpdaac.usgs.gov)				
归一化植被指数(2020 年) Normalized Difference Vegetation Index (2020)	1km					
人口密度(2020年) Population density(2020)	1km	世界人口数据库 (https://www.worldpop.org)				
夜景灯光现状(2020年) Nightscape lighting status (2020)	1km	美国国家海洋和大气管理局(https://www.ngdc.noaa.gov/)				
社会经济发展程度(2020年) GDP(2020)	1km	中国科学院生态环境研究中心(http://www.resdc.cn)				

2.3.2 "生产-生活-生态"空间划界

传统的土地利用分类方法复杂,较少考虑土地利用类型的功能。因此,本研究从土地现状特征与主观功能的角度出发<sup>[35-36]</sup>,结合专家知识和相应的政策标准,构建三生空间分类标准。

(1)现状用地分类

依据 2020 年西安市土地利用数据识别土地现状并 进行空间分类,具体分类依据如下表 3:

(2)"生产-生活-生态"功能适宜性评估

根据土地的"生产-生活-生态"功能适宜程度评估 不同土地的潜在利用倾向。具体而言,生产适宜性是指 土地为人类提供有形产品(如农产品、能源资源等)或 者无形产品(如固碳、洪涝防控等生态系统服务)的适 宜性,反映土地生产能力,主要受自然气候、土地肥沃程 度、开发便利性等因素的影响。生活适宜性是指在土地 承载便利设施、住房、公共活动和其他居住条件的适宜 性,主要受公共设施分布度、地形和社会经济因素等影 响。生态适宜性是指一个地区向人类提供直接或间接

#### 表 3 三生空间对应的土地利用数据类型

 
 Table 3
 The land use data types corresponding to the productionliving-ecological space

8 8 1		
空间类型 Space type		用地类别 Land use type
生产空间 Production spaces	农业生产空间	耕地
生活空间	城镇生活空间	城镇建设用地
Living spaces	农村生活空间	农村建设用地
生态空间	森林生态空间	林地
Ecological spaces	灌丛生态空间	灌林地
	草地生态空间	草地
	水生生态空间	永久性水体、湿地

http://www.ecologica.cn



http://www.ecologica.cn

的生态产品和服务的适宜性,主要受环境质量和社会环境的影响。基于现有研究成果<sup>[35,36]</sup>遴选 14 种分别评价"生产-生活-生态"功能的因子指标,并结合使用熵权法和层次分析法共同计算得到,最终构建三生空间适 宜性评价指标体系(表 4)。

	Table 4	Land suitabili	ty evaluation of	production-living	-ecological space		
适宜类别	指标			因子评分	Factor scores		
Suitable category	Indicator	权重值	100	70	50	30	10
生产适宜性	空间类型	0.1439	农业生产空间	/	草生生态空间	农村生活空间	其他类型空间
Production suitability	坡度/(°)	0.1053	<2	2—8	8—15	15—25	>25
	年平均降雨/mm	0.2002	>996	852—996	738—852	651—738	<651
	土壤有机质	0.1695	>1.13	1.13-1.31	0.92—1.13	0.88—0.92	<0.88
	土壤 pH 值	0.1772	6—6.5	6.5—7.5	7.5—8.4	8.4—8.8	<6
	年平均气温/℃	0.2040	>19.1	16.6—19.1	13.2—16.6	8.9—13.2	<8.9
生活适宜性 Living suitability	空间类型	0.1098	城镇生活空间	农村生活空间	农业生产空间 水生生态空间	森林、灌丛、 草地生态空间	其他类型空间
	人口密度(万人/km <sup>2</sup> )	0.2314	>250	100—250	30—100	10—30	<10
	道路密度/(km/km <sup>2</sup> )	0.1598	>11.5	6.5—11.5	3.3-6.5	1.1-3.3	<1.1
	距中心城区距离/m	0.1508	<8766	8766—22354	22354—35504	35504—58735	>58735
	夜景灯光强度	0.1286	>27.49	7.85—27	2.62-7.85	1.31-2.62	<1.31
	社会经济发展程度	0.2196	>684.66	241.65—684.66	120.82—241.65	40.27—120.82	<40.27
生态适宜性 Ecological suitability	空间类型	0.4150	森林生态空间 灌丛生态空间	草地生态空间 水生生态空间	农业生产空间	其他类型空间	生活空间
	NDVI	0.2337	>0.7	0.5-0.7	0.25-0.5	0.1-0.25	<0.1
	景观破碎度(PD 指数)	0.1475	< 0.01	0.01-0.28	0.28-0.56	0.56-0.84	>0.84
	与森林距离/m	0.1019	<700	700—2000	2000—4000	4000—6500	>6500
	与水体距离/m	0.1019	<2000	2000—4000	4000—6000	6000—10000	10000—37815

表 4 "生产-生活-生态"空间土地适宜性评价 le 4 Land suitability evaluation of production-living-ecological space

综合三生空间用地现状与潜在功能适宜性评价结果,取等级为"重要"及"极重要"区域作为三生适宜区域,并进一步结合西安市自然资源与规划局《西安市国土空间总体规划(2021—2035)》(http://zygh.xa.gov.cn/)布局的生活发展区、生产潜力区、生态保护区调整三类空间的重叠区域,划定最终三生空间边界范围。 2.3.3 "生产-生活-生态"空间需求生态系统服务分析与评估

根据已有研究<sup>[17]</sup>与西安市自然资源与规划局发布的《国土空间生态修复规划(2023 版)》相关内容 (http://zygh.xa.gov.cn/),西安市南部生态空间作为重要的供水源地与自然保护区,中部生产空间应顾及农 业面源污染问题和粮食增产需求,北部生活空间需缓解近期频发的城市内涝、热岛等问题。同时,为减少生态 系统服务类型的语义理解差异,本研究参考国际生态系统服务通用分类框架(CICES)确定三类空间的需求生 态系统服务(表 5)。

2.3.4 "生产-生活-生态"优先发展情境的保护目标分析与保护优先级判别

参考相关研究<sup>[9]</sup>,以及《西安市国土空间总体规划(2021—2035)》、《西安市国土空间生态修复规划(2021—2035)》规划设定的预期目标(即全域生态保护红线面积占比达到 38%,其中自然保护地面积不低于 2633.63km<sup>2</sup>).因此本研究将全域的总体保护目标设定为保护区域内 38%的自然/半自然土地来维持区域生态 系统服务稳定供应。而在三种差异化情境中(即生产优先、生活优先、生态优先),"生产-生活-生态"三类空 间内分配的保护目标则存在不同,需要对应研究对象的保护现状进行考虑。以案例研究选取的西安市为例,目前西安市"生产-生活-生态"空间中的现状林草等绿地面积占比为 21.96%、19.93%、79.37%。考虑到当地实际能够投入的保护成本,同时基于《西安市国土空间总体规划(2021—2035)》、《西安市国土空间生态修复规 划(2021—2035)》、《西安市国土空间生态修复规

空间类型 Space type 生态空间 Ecological spaces

生活空间 Living spaces

生产空间

Production spaces

e 5	The types of ecosystem service demand corresponding to the production-living-ecological space in Xi 'an							
	生态系统服务类型	评估方法	参考文献					
	Types of ecosystem services	Appraisal procedure	References					
	水源涵养(CICES代码:4.2.2)	InVEST water yield model	[17,43]					
	气候调节-碳储量(代码:2.2.6.1)	基于 CASA 模型计算	[44,45]					
	土壤保持(代码:2.2.1.1)	RUSLE model	[46]					
	生境质量(代码:2.2.2.3)	InVEST Habitat quality model	[17,46]					
	空气净化(代码:2.1.1.2)	参考自文献[47],基于叶片滞尘能力公式计算	[47—48]					
	气候调节-热岛调节(代码:2.2.6.1)	InVEST urban cooling model	[47]					
	水文调节-洪涝防治(代码:2.2.1.3)	InVEST flood risk mitigation model	[47, 49—50]					
	授粉服务(代码:2.2.2.1)	InVEST pollination model	51-53					

InVEST Nutrient delivery ratio model

InVEST flood risk mitigation model

InVEST pollination model

基于 CASA 模型计算

**BUSLE** model

表 5 西安市三生空间对应的生态系统服务需求类型

-		
±κ	二年穷间却毕年太南北	~ 바 도 얘 비 타 ト 녜 깐 문
(x U		

#### Table 6 The proportion of the current area of the ecological space and the upper and lower limits of the conservation target

六间米刑		面积 Area/km <sup>2</sup>	保护目标 Conservation target/%		
Space type	区域总面积 Total area	现状林草地面积 Current forest and grassland area	底限 Lower limit	上限 Upper limit	
生产空间 Production spaces	2539.84	557.74(占比 21.96%)	22	25	
生活空间 Living spaces	904.53	180.27(占比 19.93%)	20	25	
生态空间 Ecological spaces	6523.46	5177.67(占比 79.37%)	38	44	
全域范围 Whole region	10087.35	5915.68	38	38	

进一步将"生产-生活-生态"空间的保护目标分别设定为 $X_1, X_2, X_3$ ,使用 Python 计算三类优先发展情境 下的 X1-X3具体保护目标数值组,计算公式如下:

(1)生产优先情境,即生态安全格局优先服务于生产空间最大保护目标诉求,设定X<sub>1</sub>为25%,则:

 $2539.84 \times 25\% + 904.53 X_2 + 6523.46 X_3 = 10087.35 \times 38\%$ (1)

(2)生活优先情境,设定 X,为 25%,则:

水质净化(代码:2.2.5.1)

授粉服务(代码:2.2.2.1)

土壤保持(代码:2.2.2.1)

气候调节-碳储量(代码:2.2.6.1)

水文调节-洪涝防治(代码:2.2.1.3)

 $2539.84 X_1 + 904.53 \times 25\% + 6523.46 X_3 = 10087.35 \times 38\%$ (2)

(3) 生态优先情境, 设定 X, 为 44%, 则:

$$2539.84 X_1 + 904.53 X_2 + 6523.46 \times 44\% = 10087.35 \times 38\%$$
(3)

使用 python 基于上述公式计算并获取不同优先发展情境的三生空间保护目标组后,进一步使用 Zonation5 工具计算三类空间各自的综合生态系统服务保护优先级, Zonation5 是系统保护规划研究中用来解 决多功能效益最大化问题的主要模型<sup>[56]</sup>。Zonation5基于系统保护规划中的互补性-效率原理<sup>[57]</sup>,整合多个 重要生态系统服务的空间数据,通过识别多功能效率最优的权衡区域(即多种生态系统服务均是高供给水平 的区域)并为整体空间布局提供保护优先级<sup>[17]</sup>。同时,Zonation5为用户提供了多种用于确定多功能最大化 收益的算法规则,其中 CAZ1 规则用于确保所选的每种生态系统服务均有中高水平供应而不会出现单一服务 低效的特征。因此为确保优先保护区域种综合生态系统服务的最优无损效率,本研究采用 CAZ1 规则计算得 到的三类空间的生态源地保护优先级。

2.3.5 "生产-生活-生态"优先发展情境的保护成本-效益评估与帕累托最优网络构建

(1)成本-效益评估

[54]

[51-53]

[17,44]

[43, 46, 55]

[47, 49—50]

保护成本方面,涉及在三类空间中进行造绿(在非绿用地上进行土地平整、植物栽植、灌溉建设)和维持绿化(在原有林草地上进行人工修剪、灌溉喷水、虫害防治)的投入成本,因此参考相关研究<sup>[38]</sup>与西安市实际情况设定三类空间的投入成本金额(表7),进一步在 python 中统计三生空间保护区域内各类用地的面积占比后计算保护成本。

	Table 7         Conservation cost setting in ecologi	cal-production-living space	
空间类型	保护成本 Cons	ervation $\cot(\vec{\pi}/(\vec{m}^2))$	
Space type	造绿 Greening	维持绿化 Maintain green	
生态空间 Ecological spaces	建设用地造绿 300	6	
生产空间 Production spaces	农业用地造绿 90	6	
生活空间 Living spaces	河流水域造绿 30	8	

表 7 "生产-生活-生态"空间中保护成本设定

保护效益方面,本研究目的旨在提升生态安全格局对当地生态系统服务的匹配供应并最大化 ESP 的受益覆盖范围。因此,在确保了三类空间保护目标与生态系统服务总量后,以保护区域周边的生态系统服务辐射面积作为保护效益指标<sup>[38,58]</sup>,相关研究表明 1km<sup>2</sup>的保护区域的生态系统服务溢出效应至少能到达其周边800m 的缓冲区域<sup>[59]</sup>,因此本研究采用 Python 将所有保护方案结果进行缓冲区分析,以计算保护方案的受益覆盖总面积指标。

(2)帕累托最优生态安全格局构建

在本案例研究中,以帕累托最优(保护成本-效益比最优)为基准目标,使用 R 统计软件中的 lpSolve 包的 线性规划工具作为求解方法,线性规划通常是进行非线性优化的优选算法,由于约束右侧的变化,线性规划还 有助于敏感性分析的阐释,基于上述多组计算结果获得的最优保护方案。

在获得不同情境下的最优保护源地方案后,进一步采用"源地-阻力面-廊道"方法构建生态安全格局,阻 力面构建过程参考已有研究成果<sup>[60]</sup>,并使用 Linkage mapper 模型基于阻力面与生态源地结果构建生态安全 格局,通过调用 Pinchpoint mapper 模块将所有核心生境斑块对之间的电流进行组合,使用"多对一(All-toone)"模式通过运算得到最终结果。

# 3 结果与分析

3.1 "生产-生活-生态"空间划界

三生空间适宜性评价结果如图 3 所示,其中饼图反映了不同适宜性水平的大小比例。(1)图 3 显示的生产适宜性评价结果,其中极重要、重要和一般三个等级的区域(作为适宜性水平的主要作用)分别占生产空间大小的 19.3%、35.08%和 45.62%。(2)生活空间适宜区域在全域空间中占比较小,适宜性水平以一般等级为主(占生活空间比例为 58.94%),其中极重要和重要的面积比分别为 13.95%和 28.18%。(3)生态空间适宜性评价结果中,以极重要区域占生态空间面积比例约 59.5%,且集中分布于西安市南侧。重要和一般等级区域占比约为 20.74%和 19.77%。(4)根据调整后的生态、生活、生产空间总体分布如图 3 所示,总体上西安市的生态和生产空间面积占主导地位,生活空间主要分布于中偏北部。

3.2 "生产-生活-生态" 空间的需求生态系统服务评估

生产、生活、生态空间的生态系统服务评估结果如图 4 所示。生产空间中,中偏北区域的生态系统服务水 平总体较低,西南侧与东侧的秦岭北麓浅山区域因优良的自然植被状态而呈现出较好的生态系统服务供应水 平。生活空间中,散步的城市公园绿地是建成区生态系统服务的主要供应区域,同时西侧高新区、东侧浐灞区 因植被绿化条件较好,因此在空气净化、热岛消解等方面的服务能力也更强。生态空间中,极重要区位于为林 地覆盖度较高、林相质量较高的秦岭山麓段,其中生境质量与碳储量的极重要区集中于秦岭北麓西侧与南侧区 域;土壤保持服务的分布呈现南部高、北部低的格局;水源涵养服务的分布呈现西南高、东北低的空间分布态势。



图 3 研究区三生适宜性评估结果与空间分布格局 Fig.3 The results of ecological suitability assessment and spatial distribution pattern in the study area

3.3 "生态-生产-生活"优先发展情境下的保护优先级分析

图 5 显示了三类空间的生态保护优先级。生产空间中,极重要区主要分布于南侧、东侧的秦岭北麓和骊山区域,面积约为 600.35km<sup>2</sup>。生活空间中,东北侧、西北侧、西侧区域是应进行优先保护的区域,面积约为 188.33km<sup>2</sup>。生态空间,西南侧、东南侧的林草生态空间是水源涵养、土壤保持功能的重要供给区域,因此需要 进行优先保护,面积约为 1330.25km<sup>2</sup>。

3.4 "生态-生产-生活"优先发展情境的保护成本-效益评估与帕累托最优网络构建

生态、生产、生活优先发展情境下的保护目标组的计算结果表明,生产优先情景中共存在 59 个保护目标 组,其中第 31 号保护目标组的帕累托效率在整体 59 种方案种呈现最优(图 6):生产空间的成本-效益比为 1.242,生活空间的成本-效益比为 2.559,生态空间的成本-效益比为 0.335,全域范围的综合成本-效益比为 0. 641。基于该目标组,共识别生态源地 712 个,面积 3592.62km<sup>2</sup>,构建后的生态安全格局,关键生态廊道共计 710 条,总长度为 331.88km。

生活优先情景中共存在 45 个保护目标组,其中第 34 号保护目标组的帕累托效率在整体 45 种方案种呈现最优(图 7):生产空间的成本-效益比为 1.196,生活空间的成本-效益比为 2.378,生态空间的成本-效益比为 0.339,全域范围的综合效益-成本比为 0.641。基于该目标组,共识别生态源地 703 个,面积 3565.69km<sup>2</sup>,构建 后的生态安全格局,关键生态廊道共计 701 条,总长度为 324.07km。

生态优先情景中共存在 60 个保护目标组,其中第 17 号保护目标组的帕累托效率在整体 60 个方案中呈现最优(图 8):生产空间的综合效益-成本比为 1.318,生态空间的综合效益-成本比为 2.556,生活空间的综合 效益-成本比为 0.34,全域范围的综合效益-成本比为 0.659。基于该目标组,共识别生态源地 702 个,面积 3597.51km<sup>2</sup>,构建后的生态安全格局,关键生态廊道共计 699 条,总长度为 341.49km。

# 4 讨论与结论

# 4.1 讨论

(1) 与既往研究的比较

目前,生态安全格局作为大尺度区域规划的重要工具,已得到广泛应用。其中,生态源地作为 ESP 的重



图 4 研究区三生空间需求生态系统服务评估结果 Fig.4 The results of ecosystem service assessment of ecological-production-living space demand in the study area

要组成部分,目前有许多方法支持不同属性的生态源地识别,如生态系统健康水平、生态系统脆弱性等,其中 生态系统服务是最常用的指标<sup>[6]</sup>。而在本研究中,笔者强调生态源地识别需要精细考虑域内分异空间特征 与需求生态系统服务类型,以确保源地保护提升的生态系统服务效益能够精准满足区域需求。因此,这种按 照生态、生产、生活功能定位来划分区域内空间类型,进一步根据不同空间需求识别生态源地并构建 ESP 的 方法,与以往研究存在较大不同。既往西安市生态安全格局构建研究的结果中<sup>[61,62]</sup>(图 9),南侧秦岭自然保 护区由于其优良的生态系统服务供应水平,因此多被识别为重要源地,并且该源地面积占到总源地面积的 70%以上,而中偏北侧区域仅存在少量的生态源地,生态源地的空间分布不均现象与供需错位问题十分显著。 导致既有研究识别的生态源地集中于南部秦岭山区的原因,其成因在于生态安全格局构建的技术过程仅在单 一的市域范围下分析生态系统服务功能重要性,而缺乏考虑域内不同区域的需求,这些研究结果指导着西安

9期



图 5 基于 Zonation 的西安市三生空间保护优先级评估 Fig.5 Protection priority evaluation of production-living-ecological space in Xi 'an based on Zonation





市空间规划布局与保护行动,意味着人类居住、生产区域中应该保护的半自然绿地可能仅能得到较少的保护 资金投入,生活空间与生产空间的需求生态系统服务难以满足,而大量的资金用于已经得到保护并呈现较好 状态的无人自然保护区,造成保护资金低效使用。因此,生态源地的识别不仅需要考虑生态系统服务供应的 高低水平,还应考虑它们对地方性需求的满足程度,以确保生态安全格局构建结果能够公平的促进多类型生 态系统服务效能提升。

(2)研究不足与进一步的拓展内容

本研究基于空间分异与成本协调的视角构建了生态安全格局,探索了不同情景下的生态源地保护成本-效益率,并确定了具有最优帕累托效率的生态安全格局实施方案。但是,研究仍存在一些限制。首先,生态-生产-生活空间范围界定时考虑了用地现状和潜在功能适宜性,需要结合实际调研修正边界范围。其次,由于 数据可获得性,本研究仅考虑了单一时期的生态系统服务供应水平,未来研究中应结合生态系统服务的历史 状态来辅助设定保护目标并判断优先级。最后,结合造绿和维持绿化两类投入因素计算保护成本,基于生态





源地服务能力的溢出效益,计算其辐射的受益范围,可进一步全面对象考虑成本-效益的相关因素以支持识别 结果落地实施。在后续的生态安全格局构建与优化研究中,应就"生产-生活-生态"空间内自然区域的管理现 状对生态安全格局构建结果进行评估分析,宏观尺度上判别生态安全格局的整体性与布局失衡程度,中观尺 度上就关键生态廊道的连通堵点、断点进行缺陷分析,微观尺度上对不同空间的生态源地重要性进行评估补 充。进而结合不同情景的保护目标诉求,优化初始生态安全格局构建结果,调和 ESP 的整体布局并减少供需 错位现象,最终构建三生均衡协调的综合生态安全格局。

# 4.2 结论

生态安全格局(ESP)是优化大尺度宏观布局的重要方法之一。然而,目前的生态安全格局构建研究忽略 了生态源地的空间布局均匀性,难以确保构建结果能够适配地方生态系统服务诉求。因此,本研究中基于区 域的生态、生产、生活空间分异特征识别了匹配其功能空间需求的生态系统服务供应源地,并进一步考虑了不 同情景下达成帕累托最优效率的 ESP 空间模式。结果表明:综合考虑三种情景的最佳 ESP 由 692 个生态源 地(总面积为 3548.87km<sup>2</sup>)和 689 条关键生态廊道(总长度为 326.62km)组成,获得总投入成本和总保护效益 比为 0.637,是所有 164 组方案中的理想方案。本研究旨在为保护规划者提出了一个缓解生态安全格局供需 错位问题的求解思路与技术路径,为改善 ESP 空间布局模式并实现 ESP 落地管控提供指导。

9期



图 9 本研究结果与已发表成果的比较

Fig.9 The results of this study were compared with the published results

#### 参考文献(References):

- [1] Brito-Morales I, Schoeman D S, Everett J D, Klein C J, Dunn D C, García Molinos J, Burrows M T, Buenafe K C V, Dominguez R M, Possingham H P, Richardson A J. Towards climate-smart, three-dimensional protected areas for biodiversity conservation in the high seas. Nature Climate Change, 2022, 12: 402-407.
- [2] Dabalà A, Dahdouh-Guebas F, Dunn D C, Everett J D, Lovelock C E, Hanson J O, Buenafe K C V, Neubert S, Richardson A J. Priority areas to protect mangroves and maximise ecosystem services. Nature Communications, 2023, 14(1): 5863.
- [3] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. 生态学报, 1999, 19(1): 8-15.
- [4] 彭建,赵会娟,刘焱序,吴健生.区域生态安全格局构建研究进展与展望.地理研究,2017,36(3):407-419.
- [5] Peng J, Liu Y X, Corstanje R, Meersmans J. Promoting sustainable landscape pattern for landscape sustainability. Landscape Ecology, 2021, 36 (7): 1839-1844.
- [6] Jiang H, Peng J, Liu M L, Dong J Q, Ma C H. Integrating patch stability and network connectivity to optimize ecological security pattern. Landscape Ecology, 2024, 39(3): 54.
- [7] 王悦露, 董威, 张云龙, 傅伯杰, 赵正嫄, 吕一河, 张建军, 伍星. 基于生态系统服务的生态安全研究进展. 生态学报, 2023, 43(19): 7821-7829.
- [8] Hu Y Y, Li Y, Li Y J, Wu J C, Zheng H Z, He H M. Balancing urban expansion with a focus on ecological security: a case study of Zhaotong City, China. Ecological Indicators, 2023, 156: 111105.
- [9] 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.
- [10] 潘卫涛,岳邦瑞,姚龙杰,薛建锋,李军峰.耦合风险与服务的市域生态安全格局构建——以陕西省咸阳市为例.应用生态学报,2023, 34(1):178-186.
- [11] Gao J, Gong J, Li Y, Yang J X, Liang X. Ecological network assessment in dynamic landscapes: Multi-scenario simulation and conservation priority analysis. Land Use Policy, 2024, 139: 107059.
- [12] Li L, Huang X J, Wu D F, Yang H. Construction of ecological security pattern adapting to future land use change in Pearl River Delta, China. Applied Geography, 2023, 154: 102946.
- [13] Wei W, Liu C Y, Ma L B, Xie B B, Zhou J J, Nan S X. Optimization strategies of ecological security patterns through importance of ecosystem services and ecological sensitivity—a case study in the Yellow River Basin. Land Degradation & Development, 2024, 35(3): 985-1001.
- [14] Zhou G J, Huan Y Z, Wang L Q, Lan Y, Liang T, Shi B L, Zhang Q. Linking ecosystem services and circuit theory to identify priority conservation and restoration areas from an ecological network perspective. Science of the Total Environment, 2023, 873: 162261.

- [15] 孔凡斌, 段淑慧, 徐彩瑶. 基于生态系统服务和生态敏感性的生态安全格局构建——以钱塘江流域为例. 生态学报, 2024,44 (24): 11359-11374.
- [16] Chen X Q, Kang B Y, Li M Y, Du Z B, Zhang L, Li H Y. Identification of priority areas for territorial ecological conservation and restoration based on ecological networks: a case study of Tianjin City, China. Ecological Indicators, 2023, 146: 109809.
- [17] Yao L J, Yue B R, Pan W T, Zhu Z B. A framework for identifying multiscenario priorities based on SCP theory to promote the implementation of municipal territorial ecological conservation planning policy in China. Ecological Indicators, 2023, 155; 111057.
- [18] 朱宗斌,彭佳新,姚龙杰,潘卫涛,朱玲,朱宗珍,姜婧,岳邦瑞.整合结构连通与功能提升的黄土高原县域生态安全格局构建:以延安 市安塞区为例.应用生态学报,2024,35(7):1915-1924.
- [19] 姚材仪,何艳梅,程建兄,张天翼,潘洪义,马红菊.基于 MCR 模型和重力模型的岷江流域生态安全格局评价与优化建议研究.生态学报,2023,43(17):7083-7096.
- [20] 王蓓, 岳邦瑞, 南吴, 雷雅茹, 董清榕, 姚龙杰. 生态安全视角下山地-平原型城市土地利用冲突区分级识别. 中国城市林业, 2024, 22 (5): 130-137,49.
- [21] 李倩瑜, 唐立娜, 邱全毅, 李寿跳, 徐烨. 基于形态学空间格局分析和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建. 生态学报, 2024, 44 (6): 2284-2294.
- [22] Manning P. A global target for semi-natural land cover within human dominated landscapes? One Earth, 2024, 7(2): 180-181.
- [23] Neyret M, Fischer M, Allan E, Hölzel N, Klaus V H, Kleinebecker T, Krauss J, Le Provost G, Peter S, Schenk N, Simons N K, van der Plas F, Binkenstein J, Börschig C, Jung K, Prati D, Schäfer D, Schäfer M, Schöning I, Schrumpf M, Tschapka M, Westphal C, Manning P. Assessing the impact of grassland management on landscape multifunctionality. Ecosystem Services, 2021, 52: 101366.
- [24] Mohamed A, DeClerck F, Verburg P H, Obura D, Abrams J F, Zafra-Calvo N, Rocha J, Estrada-Carmona N, Fremier A, Jones S K, Meier I C, Stewart-Koster B. Securing Nature's Contributions to People requires at least 20%-25% (semi-) natural habitat in human-modified landscapes. One Earth, 2024, 7(1): 59-71.
- [25] 彭建, 吕丹娜, 董建权, 刘焱序, 刘前媛, 李冰. 过程耦合与空间集成: 国土空间生态修复的景观生态学认知. 自然资源学报, 2020, 35 (1): 3-13.
- [26] 朱志兵,刘奇志,徐放,张露予,杨昊.市级国土空间生态修复规划编制体系构建与传导机制探索——以武汉市为例.城市规划学刊, 2023,(5):62-70.
- [27] Shen Z, Wu W, Tian S Q, Wang J. A multi-scale analysis framework of different methods used in establishing ecological networks. Landscape and Urban Planning, 2022, 228: 104579.
- [28] Shen J S, Li S C, Wang H, Wu S Y, Liang Z, Zhang Y T, Wei F L, Li S, Ma L, Wang Y Y, Liu L B, Zhang Y J. Understanding the spatial relationships and drivers of ecosystem service supply-demand mismatches towards spatially-targeted management of social-ecological system. Journal of Cleaner Production, 2023, 406: 136882.
- [29] Sun X, Liu H X, Liao C, Nong H F, Yang P. Understanding recreational ecosystem service supply-demand mismatch and social groups' preferences: Implications for urban-rural planning. Landscape and Urban Planning, 2024, 241: 104903.
- [30] Fang G J, Sun X, Sun R H, Liu Q H, Tao Y, Yang P, Tang H J. Advancing the optimization of urban-rural ecosystem service supply-demand mismatches and trade-offs. Landscape Ecology, 2024, 39(2): 32.
- [31] Pressey R L, Visconti P, McKinnon M C, Gurney G G, Barnes M D, Glew L, Maron M. The mismeasure of conservation. Trends in Ecology & Evolution, 2021, 36(9): 808-821.
- [32] 魏家星,倪雨淳,寿田园,张昱镇.基于水-陆耦合生态系统服务的生态安全格局构建研究——以长三角生态绿色一体化发展示范区为例.生态学报,2023,43(13):5305-5319.
- [33] 于海涛,林坚,彭震伟,叶斌,吴次芳,周强,陈少琼,胡晓忠,田莉,吴洪涛,陈韦,张尚武."健全国土空间用途管制制度"学术笔谈. 城市规划学刊,2023,(5):1-11.
- [34] 王新哲,杨雨菡,宗立,薛皓颖.国土空间"总-详"规划空间传导:现实困境、基本逻辑与优化措施.城市规划学刊, 2023, (2): 96-102.
- [35] Zhang Z, Li J M. Spatial suitability and multi-scenarios for land use: Simulation and policy insights from the production-living-ecological perspective. Land Use Policy, 2022, 119: 106219.
- [36] Fu J Y, Bu Z Q, Jiang D, Lin G, Li X. Sustainable land use diagnosis based on the perspective of production-living-ecological spaces in China. Land Use Policy, 2022, 122: 106386.
- [37] Rodríguez González M I, Pijanowski B C, Fahey R T, Hardiman B S. The role of conserved and managed land in ecosystem service inequity. Landscape and Urban Planning, 2022, 227: 104516.
- [38] Nyelele C, Kroll C N. A multi-objective decision support framework to prioritize tree planting locations in urban areas. Landscape and Urban Planning, 2021, 214: 104172.

39	胡伟艳,	魏安奇	,赵志尚,	张安录,	宋彦.	农地多功能供需错位与协同作用研究进展及趋势. 中国	国土地科学,	2017,	31(3)	): 89	9-96
----	------	-----	-------	------	-----	---------------------------	--------	-------	-------	-------	------

- [40] 肖华斌,盛硕,安淇,施俊婕.供给-需求匹配视角下城市绿色基础设施空间分异识别及优化策略研究——以济南西部新城为例.中国园林,2019,35(11):65-69.
- [41] 张艺玟,张淑怡,朱泓恺,赵铖钰,王雅葳,王玥,刘敏.基于多尺度生态系统服务供需的大都市区生态安全格局构建与优化.生态学报,2024,44(21):9596-9609.
- [42] Yao R, Wang L C, Huang X, Cao Q, Wei J, He P X, Wang S Q, Wang L Z. Global seamless and high-resolution temperature dataset (GSHTD), 2001-2020. Remote Sensing of Environment, 2023, 286: 113422.
- [43] 李文青,赵雪雁,杜昱璇,马平易.秦巴山区生态系统服务与居民福祉耦合关系的时空变化.自然资源学报,2021,36(10):2522-2540.
- [44] 王菲,曹永强,周姝含,范帅邦,姜雪梅.黄河流域生态功能区植被碳汇估算及其气候影响要素.生态学报,2023,43(6):2501-2514.
- [45] 王茜,穆琪,罗漫雅,赵永华,杨舒媛,张磊,瞿植.秦岭生态系统服务协同与权衡的时空异质性.应用生态学报,2022,33(8): 2057-2067.
- [46] 耿甜伟,陈海,张行,史琴琴,刘迪.基于 GWR 的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析.自然资源学报,2020,35 (7):1714-1727.
- [47] Hamel P, Guerry A D, Polasky S, Han B, Douglass J A, Hamann M, Janke B, Kuiper J J, Levrel H, Liu H, Lonsdorf E, McDonald R I, Nootenboom C, Ouyang Z, Remme R P, Sharp R P, Tardieu L, Viguié V, Xu D, Zheng H, Daily G C. Mapping the benefits of nature in cities with the InVEST software. NPJ Urban Sustainability, 2021, 1: 25.
- [48] Wei J, Li Z Q, Lyapustin A, Wang J, Dubovik O, Schwartz J, Sun L, Li C, Liu S, Zhu T. First close insight into global daily gapless 1 km PM<sub>2</sub>.
   5 pollution, variability, and health impact. Nature Communications, 2023, 14(1): 8349.
- [49] Wade Ross C, Prihodko L, Anchang J, Kumar S, Ji W J, Hanan N P. HYSOGs250m, global gridded hydrologic soil groups for curve-numberbased runoff modeling. Scientific Data, 2018, 5: 180091.
- [50] Li Y B, Ji C, Wang P, Huang L. Proactive intervention of green infrastructure on flood regulation and mitigation service based on landscape pattern. Journal of Cleaner Production, 2023, 419: 138152.
- [51] Zhao Z Q, Shan R F, Sun X Y, Sun J Y, Wang B Y, Wang Z. Mapping and assessing supply and demand of crop pollination services in Shandong Province, China. Journal of Cleaner Production, 2023, 426; 139024.
- [52] JI L. China checklist of animals. Catalougue of Life China: 2018 Annual Checklist (ed Biodiversity Committee of Chinese Academy of Sciences), Beijing, China(http://www.sp2000 org cn), 2019.
- [53] Zhao C, Sander H A, Hendrix S D. Wild bees and urban agriculture: assessing pollinator supply and demand across urban landscapes. Urban Ecosystems, 2019, 22(3): 455-470.
- [54] Lin Y, Zhong D Q, Rong Y, Yu J, Li L, Chen X, Zhou X F, Wang H T. A comprehensive framework for assessing the spatiotemporal impact of land use and cover change on lake eutrophication. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2024, 131: 103989.
- [55] 姚龙杰.国土空间生态修复规划优先区域评估框架整合优化研究[D].西安建筑科技大学, 2023: 125-130.
- [56] Moilanen A, Wilson K A, Possingham H P. Spatial conservation prioritization: quantitative methods and computational tools. Oxford: Oxford University Press, 2009.
- [57] Kukkala A S, Moilanen A. Core concepts of spatial prioritisation in systematic conservation planning. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 2013, 88(2): 443-464.
- [58] Pang B, Zhao J Y, Zhang J X, Yang L. Calculating optimal scale of urban green space in Xi'an, China. Ecological Indicators, 2023, 147: 110003.
- [59] Cardinali M, Beenackers M A, van Timmeren A, Pottgiesser U. The relation between proximity to and characteristics of green spaces to physical activity and health; a multi-dimensional sensitivity analysis in four European cities. Environmental Research, 2024, 241; 117605.
- [60] 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
- [61] 卢培嘉,韦燕飞,童新华,姚胜.国土空间生态修复关键区域识别研究——以西安市为例.环境工程技术学报,2024,14(6):1877-1891.
- [62] 周璐红, 王盼婷, 白雨霞. 基于最小累积阻力模型的西安市生态安全格局构建. Journal of Resources and Ecology, 2023, 14(6): 1127-1137.