

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.03.011

CSTR:32310.14.stbxb.2025.03.011

刘川,张述清,黄义忠,等.主体功能区视角下云南省生态网络构建[J].水土保持学报,2025,39(3):172-181,190.

LIU Chuan, ZHANG Shuqing, HUANG Yizhong, et al. Construction of ecological networks in Yunnan Province from the perspective of main functional zones[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(3): 172-181, 190.

主体功能区视角下云南省生态网络构建

刘川¹, 张述清², 黄义忠¹, 李永平^{2,1}

(1.昆明理工大学国土资源工程学院,昆明 650093; 2.云南省国土资源规划设计研究院,昆明 650216)

摘要: [目的] 构建合理的生态网络对维护区域生态环境可持续发展具有重要作用。[方法] 基于主体功能区视角,针对三大主体功能区设置具有区域性差异的主体功能情景,利用 PLUS 模型模拟 2035 年主体功能情景和自然保护情景下的土地利用格局,耦合 InVEST 和 MSPA 模型综合识别生态源地,运用电路理论提取生态廊道,以此构建云南省 2020 年及 2035 年未来多情景生态网络,并对网络结构进行评价。[结果] 1) 主体功能情景下耕地、林地得到有效管控,建设用地区域性扩展力度加强,更能满足地区协调发展需求。2) 各情景生态源地空间布局相似,呈现“西部多、东部少”的特征,其中重要生态源地占比均超过 90%。3) 2020 年构建的生态廊道数为 125 条,2035 年自然发展情景和主体功能情景构建的生态廊道数分别为 113 条和 133 条,廊道密度呈现从西南向东北递减态势。4) 主体功能情景下生态网络结构指数均较优,基于该情景构建的生态网络较为理想。[结论] 研究提出的基于主体功能战略开展生态网络构建的方法及应用,可为云南省国土空间优化和建设“生态文明排头兵”提供理论支撑和应用参考。

关键词: 主体功能区; PLUS 模型; 生态源地; 生态网络; 云南省

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0172-10

Construction of Ecological Networks in Yunnan Province from the Perspective of Main Functional Zones

LIU Chuan¹, ZHANG Shuqing², HUANG Yizhong¹, LI Yongping^{2,1}

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Land and Resources Planning and Design Institute of Yunnan Province, Kunming 650216, China)

Abstract: [Objective] Constructing a rational ecological network plays a crucial role in maintaining the sustainable development of regional ecological environment. [Methods] From the perspective of main functional zones, main functional scenarios with regional differences were established for three main functional zones. The PLUS model was used to simulate the land use patterns under the main functional scenario and the natural protection scenario in 2035. By coupling the InVEST and MSPA models, the ecological sources were comprehensively identified, and the ecological corridors were extracted using the circuit theory. The methods were used to construct multi-scenario ecological networks for Yunnan Province in 2020 and 2035, and evaluate the network structure. [Results] 1) Under the main functional scenario, cultivated land and forest land were effectively managed, and the regional expansion of construction land was strengthened, better meeting the needs of coordinated regional development. 2) The spatial distribution of ecological sources was similar under different scenarios, exhibiting a characteristic of “more in the west and less in the east”, with important ecological sources accounting for over 90% under each scenario. 3) In 2020, 125 ecological corridors were constructed. In 2035, under the natural development scenario and the main functional scenario, the number of ecological corridors would be 113 and 133, respectively. The density of corridors showed a decreasing trend from southwest to northeast. 4) The ecological

收稿日期: 2024-11-04

修回日期: 2024-12-24

录用日期: 2025-01-02

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-03-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(42301304); 云南省哲学社会科学基础研究基地项目(ZD202218)

第一作者: 刘川(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事国土空间规划研究。E-mail: 2311754698@qq.com

通信作者: 张述清(1965—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事国土调查与国土空间规划研究。E-mail: xw2015014@Kust.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

network structure indices under the main functional scenario were superior, indicating that the ecological network constructed based on this scenario is more ideal. [Conclusion] The proposed method and application of ecological network construction based on the main functional strategy can provide theoretical support and practical references for optimizing land space and building a "pioneer of ecological civilization" in Yunnan Province.

Keywords: main functional zones; PLUS model; ecological source; ecological network; Yunnan Province

Received: 2024-11-04

Revised: 2024-12-24

Accepted: 2025-01-02

Online(www.cnki.net): 2025-03-20

近年来,日益频繁的人类活动显著改变土地利用结构和功能^[1],由此引发景观破碎化、生态服务功能退化、生物多样性减少等一系列问题^[2-3],对生态系统的稳定性和恢复力产生较大影响。生态网络是由多条生态廊道连接生态源而形成的网络体系^[4],构建合理的生态网络能够为生态系统内部物质与能量流动提供渠道,提升生态系统的抗干扰和自我修复能力^[5],对维护区域生态环境可持续发展具有重要作用。

国内外学者针对城市群、省市、县域等不同空间尺度及流域、喀斯特地区等典型地域的生态网络构建开展广泛的探索,形成以“源地-阻力面-廊道”为主要理论框架的经典研究范式^[6],其中生态源地识别与生态廊道提取是构建区域生态网络的关键步骤^[7]。生态源地是承担重要生态功能的关键斑块,其识别方法^[8]主要有2种:一种是直接选择面积较大的生态用地,但该方法忽略斑块的空间结构性和景观连通性;另一种是基于生态系统服务重要性、生态敏感性、生态系统服务价值和形态空间格局分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)等方法或多方法耦合来综合确定生态源地^[9-10]。在提取生态廊道方面,主要方法包括最小累积阻力模型(minimal cumulative resistance model, MCR)、电路理论、最小成本路径模型(least cost path, LCP)等。其中电路理论模型克服其他模型未能模拟生物随机游走的局限性,能够反映生态廊道的重要性以及准确捕捉廊道信息,成为廊道提取的重要方法。现有研究依据数据可分为2类:一是基于当前或历史数据进行生态网络构建和结构分析^[11];二是基于土地利用变化模拟预测来对生态网络的构建和演变进行探讨^[12]。

土地利用变化模拟可在一定程度上揭示区域土地利用演变趋势和未来土地利用格局,为区域生态风险管控和生态环境可持续发展提供科学依据^[13],其常用的模型包括CA-markov、CLUE-S、FLUS和PLUS等^[14]。其中,PLUS模型基于CA-Markov、FLUS等模型上进行优化改进,在模拟过程中能够更好地利用随机森林算法挖掘土地扩张变化的潜在因素,不仅能实现多类型土地斑块级的动态演变^[15],更

能在发展概率的约束下自动模拟斑块生成,刻画不同情景的土地利用格局^[16]。

主体功能区战略是优化国土空间开发格局的重要牵引力,具有顶层设计、长期稳定的特性^[17]。在主体功能区战略背景下,《云南省国土空间规划(2021—2035年)》^[18]把主体功能区划分为城市化地区、农产品主产区和重点生态功能区3类,不同主体功能区定位对土地利用变化及生态环境效应有着较强的影响作用^[19]。目前,一些学者基于土地利用变化多情景模拟预测来对生态网络的构建和演变进行探讨,但往往忽略主体功能区定位对研究区景观格局产生的区域性影响,从而导致构建的生态网络缺乏一定的局限性,不能准确展现未来国土空间生态环境和生态网络格局。

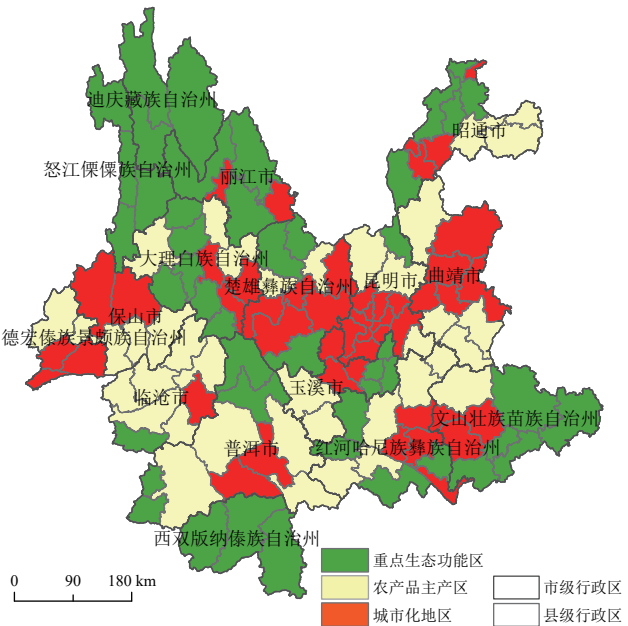
云南省以争当全国生态文明建设排头兵作为战略目标,构建科学性、前瞻性的生态网络就显得尤为重要。因此,本文以云南省为研究对象,针对三大主体功能区设置具有区域性差异的主体功能情景,运用PLUS模型模拟2035年主体功能情景和自然保护区情景下的土地利用格局,耦合InVEST和MSPA模型综合识别生态源地,进一步运用电路理论提取生态廊道,以此构建云南省2020年及2035年未来多情景生态网络,并以生态网络结构指数对生态网络结构的闭合度、连接度和连通度进行评价。研究旨在探讨主体功能区战略对未来土地利用格局及生态网络的影响,以期为云南省国土空间优化和建设“生态文明排头兵”提供理论支撑和应用参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云南省坐落于在中国西南边陲(21°08′32″~29°15′08″N, 97°31′39″~106°11′47″E),国土面积39.41万km²,下辖8个地级市,8个少数民族自治州,129个县级行政区,土地利用类型以林地为主。云南省作为我国西南地区重要的生态安全屏障,在国家环境保护和生态安全体系建设中发挥着重要作用。《云南省国土空间规划(2021—2035年)》^[18]中把主体功能区分为城市化地区、重点生态功能区和农产品主产区3类。其中,城市化地区分为国家级城市

化地区(28个县)和省级城市化地区(17个县),重点生态功能区分为国家重点生态功能区(44个县)和省级重点生态功能区(2个县),以县级行政区为基本单元的国家农产品主产区共有38个。本文按县级行政单位将不同等级的城市化地区、农产品主产区和重点生态功能区进行归并分析(图1)。



注:基于自然资源部标准地图服务系统下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作,边界无修改。下同。

图1 研究区主体功能区区划

Fig. 1 Division of main functional zones in the study area

1.2 数据来源

1.2.1 土地利用数据涉及 2000—2020年多期土地利用数据,来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>),空间分辨率为30 m,重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。

1.2.2 土地利用变化驱动因子数据 1)自然因素数据。DEM数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>);年平均气温、年降雨量数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>)。2)社会经济数据。人口数据来源于WorldPop数据中心(<https://hub.worldpop.org>);GDP来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)。3)可达性数据。包括水系、道路和居民点数据,来源于云南省“三调”成果,通过欧氏距离分析处理得到可达性状况。

1.2.3 其他数据 1)限制区数据。以自然保护区作为限制性转换区域,来源于中国自然保护区标本资源共享平台(<http://www.papc.cn/html/folder/946895-1.htm>)。2)归一化植被指数(NDVI)来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)。

3)主体功能区划来源于《云南省国土空间规划(2021—2035年)》^[18]。考虑到研究区大小对PLUS模型运行的有效性影响,将数据的空间分辨率统一为300 m。

1.3 研究方法

1.3.1 情景设定 依据研究区发展规划设置主体功能情景,模拟2035年的土地利用状况,同时设置自然发展情景进行对比分析。主体功能情景模拟是对研究区内的三大主体功能区设置对应转换矩阵和地类转换概率(表1),分别进行土地利用变化模拟,进一步合并分区模拟结果得到整体土地利用模拟情况。

表1 不同分区转换矩阵设置

Table 1 Settings of the conversion matrices for different zones

地类 编号	分区	a	b	c	d	e	f	分区	a	b	c	d	e	f
a	1	1	1	1	1	1	1	2	1	0	0	0	1	0
b		1	1	1	0	1	1		1	1	1	1	1	1
c		1	1	1	1	1	1		1	1	1	0	1	1
d		1	0	1	1	0	1		1	0	1	1	0	1
e		0	0	0	0	1	0		1	0	0	0	1	0
f		1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1
a	3	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1
b		1	1	1	0	0	0		1	1	1	0	1	1
c		1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1
d		1	0	0	1	0	0		1	0	1	1	0	1
e		1	0	0	0	1	0		0	0	0	0	1	0
f		1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1

注:a、b、c、d、e、f分别表示耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地;分区1为自然发展情景下的所有主体功能区;分区2、3、4分别为主体功能情景下的农产品主产区、重点生态保护区、城市化地区;l表示地类可以发生转换,0表示地类不可以发生转换。

1)主体功能情景。农产品主产区:该区域对保障国家粮食安全具有重要作用,优先考虑耕地保护,参考前人^[20]研究,并结合《云南省国土空间规划(2021—2035年)》^[18]对耕地保有量的约束性要求,设定该区域耕地仅向建设用地转换,同时对Markov转移概率矩阵进行修正,控制未利用地向耕地转换的概率增加70%,其他地类向耕地转换的概率增加20%。重点生态功能区:将自然保护区作为限制因子,结合《云南省国土空间规划(2021—2035年)》^[18],限制林地和水域的转换方向,其他地类向林地和水域转换的概率增加40%^[20]。城市化地区:依据《云南省国土空间规划(2021—2035年)》^[18]中的协调发展需求及城镇开发边界扩展系数等国土空间开发保护指标,并参考已有研究^[21],设置该区域建设用地不向任何

地类转换,其他地类向建设用地转换的概率增加30%。

2)自然发展情景。该情景中土地利用变化沿用现有趋势,不设定转移限制因子,转移概率不变,在对研究区进行土地利用变化模拟的过程中不进行过多干涉。

1.3.2 基于PLUS模型的未來土地利用预测 本研究基于PLUS模型预测目标年的土地利用变化,为后续研究提供数据支撑。根据研究区实际情况选取高程、坡向、坡度、年平均气温、年降水、GDP、人口密度、距水系距离、距道路距离和距居民点距离共10个驱动因素,采用土地扩张策略分析模块(LEAS)的随机森林分类算法获取各地类的发展概率,利用Markov链预测未来土地需求量并设置不同主体功能区各地类邻域权重参数(表2),通过多类随机斑块种子CA模块(CARS)对各地类斑块演化进行模拟,从而预测研究区在自然发展和主体功能情景下2035年土地利用变化情况。以历史土地利用数据作为训练集,预测2020年土地利用格局,通过Kappa系数和整体精度对预测结果进行精度检验,最终农产品主产区、重点生态功能区和城市化地区的Kappa系数分别为0.91、0.91和0.89,总体精度分别为0.94、0.95和0.93,模拟结果精度较高,证明PLUS模型可用于模拟研究区内不同主体功能区的未来土地利用变化情况。

表2 不同主体功能区邻域权重

Table 2 Domain weights of different main functional zones

主体功能区	农产品主产区	重点生态功能区	城市化地区
耕地	0.419	0.695	0.535
林地	0.688	0.954	0.313
草地	0.227	0.168	0.353
水域	0.546	0.887	0.226
建设用地	1.000	1.000	1.000
未利用地	0.020	0.020	0.010

1.3.3 生态源地识别 生态源地是生物种群的主要栖息地和种群维持的核心区域,源地的识别是区域生态网络构建的基础,本研究从生境质量、形态空间格局(MSPA)、景观连通性3个维度出发构建生态源地识别框架,多方面综合识别研究区生态源地并划分重要性等级。主要包括3个部分:

1)生境质量评估 应用InVEST模型Habitat Quality模块评估研究区生境质量^[22],并利用自然断裂点法提取生境质量高值区域,生境质量计算公式为:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^Z}{D_{xj}^Z + K^2} \right) \right] \quad (1)$$

式中: Q_{xj} 为生境质量; H_j 为j类土地利用类型的生境

适宜度; D_{xj} 为j类土地利用类型栅格x的生境退化度; K 为半饱和常数; Z 为归一化常数,取值2.5。

2)形态空间格局分析 基于土地利用数据,利用MSPA分析提取具有景观连通性意义的区域作为核心区^[23],将生境质量高值区域与核心区进行叠加,考虑到研究尺度和信息去冗余化,依据研究区自然保护区面积和叠加斑块面积设置200 km²作为最小阈值,综合选取适用于研究区生态网络构建的核心生态源地。

3)景观连通性分析 景观连通性评价能够量化各个景观要素间的空间连接性与连接程度^[24]。本研究应用Conefor工具计算生态源地斑块重要性指数(dPC),以此评价生态源地的景观连通性并划分生态源地重要性等级。计算公式为:

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i a_j}{1 + nl_{ij}}}{A_L^2} \quad (2)$$

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j P_{ij}^*}{A_L^2} \quad (3)$$

$$dPC = \frac{IIC + PC}{2} \quad (4)$$

式中:dPC为生态源地斑块重要性指数;IIC为斑块连通性;PC为斑块连通潜力; n 为斑块数量; a_i 和 a_j 为斑块*i*、*j*的面积; A_L 为斑块总面积; nl_{ij} 为斑块*i*~*j*的连接数; P_{ij}^* 为斑块*i*、*j*全部路径概率乘积的最大值。0.01<dPC<1.00为一般生态源地,dPC≥1.00为重要生态源地。

1.3.4 阻力面构建 生态阻力面能够量化区域生态过程的阻力水平及景观异质性对物种群落的影响^[25],决定生态源地之间的连通性和生物的流动路径。本研究主要依据高程、坡度和不同情景的土地利用覆被等因素综合构建阻力面,利用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)确定各阻力因子的权重,通过自然断裂点法将阻力值划分为5个等级,阻力值越大说明阻力越大(表3),将各个阻力因素叠加生成阻力面。

1.3.5 生态网络构建 生态廊道是连接生态源地的物理路径,是保持生态系统连通性的重要结构,廊道设计和实施有助于促进生物多样性保护和生态系统服务的稳定性^[26]。本研究基于电路理论,通过Circuitscape和Linkage Mapper工具识别生态源地斑块和阻力栅格来模拟生物在景观中的移动路径,识别电流高流动性区域作为潜在生态廊道,从而在研究区内形成完整的生态网络。

表 3 阻力因子参数
Table 3 Parameters of resistance factors

阻力值	阻力因子					
	土地利用类型	高程/m	坡度/(°)	植被覆盖度/%	距主要道路距离/m	距主要河流距离/m
1	林地、草地	<1 200	<15	>80	>8 000	<1 000
3	水域	1 200~1 800	15~30	60~80	6 000~8 000	1 000~2 000
5	耕地	1 800~2 400	30~45	40~60	4 000~6 000	2 000~3 000
7	未利用地	2 400~3 200	45~60	20~40	2 000~4 000	3 000~4 000
9	建设用地	>3 200	>60	<20	<2 000	4 000~5 000
权重	0.46	0.11	0.11	0.22	0.05	0.05

1.3.6 生态网络评价 参考已有研究^[25],利用网络结构指数对不同情景下研究区生态网络进行分析评价,包括网络闭合指数(α)、网络连接度指数(β)、网络连通率(γ),公式为:

$$\alpha = \frac{L - V + 1}{2V - 5} \tag{5}$$

$$\beta = \frac{L}{V} \tag{6}$$

$$\gamma = \frac{L}{3(V - 2)} \tag{7}$$

式中: V 为生态源地的数量; L 为生态廊道的数量; α 反映网络的可达性; β 反映每个节点的连接度; γ 反映所有节点的连接率。

2 结果与分析

2.1 土地利用结构与情景模拟

2020年云南省土地类型以林地、草地和耕地为主,分别占总面积的57.33%、22.41%和17.63%(图2)。2000—2020年云南省耕地、草地、未利用地面积呈减少趋势,其中草地面积减少最多,为2 802 km²,主要转出方向为林地和耕地,分别占总转出面积的65.12%和30.34%;林地、建设用地、水域呈现增加趋势,其中建设用地面积增幅显著,共增加2 722 km²,转入面积主要来源于耕地,转出较为单一且不活跃。2000—2020年,云南省土地利用变化反映城镇化对耕地、草地和未利用地的侵占,但也反映出云南省在进行经济建设的同时也注重生态环境保护,近年积极推进的退耕还林还湖、生态修复、营造水源涵养林等政策对林地、水体等生态地保护有着重要作用。

云南省现状(2020年)及2种情景模拟下的土地利用空间分布格局整体相似,2035年主体功能情景和自然发展情景下土地利用变化趋势一致,建设用地、林地和水域均呈不同程度增长趋势,而耕地、草地和未利用地则呈不同程度减少趋势,但变化强度及空间组合形式存在显著差异(图3)。主体功能情景下云南省耕地减少81 km²,林地增加2 033.10

km²,草地减少4 574.70 km²,水域增加442.08 km²,建设用地增加2 347.47 km²,未利用地减少166.95 km²,主要以草地减少、林地和建设用地增加为主。对比2种情景各地类变化幅度(表4)可知,主体功能情景下耕地和林地得到有效管控与保护,建设用地区域性扩张力度加强,区域经济发展潜力得到进一步提升,但草地减幅显著增大;自然发展情景下农产品主产区、重点生态保护区和城市化地区的同一地类变化幅度差异并不凸显,主体功能情景下的土地利用变化具有显著的区域特征。

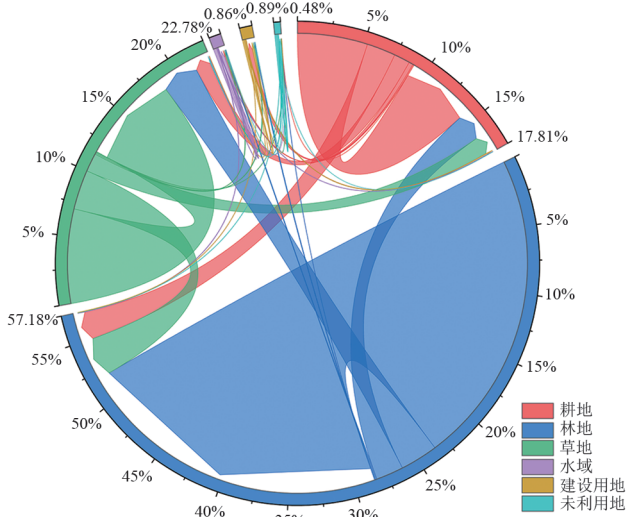


图 2 2000—2020年云南省土地利用弦图
Fig. 2 Land use transfer matrix of Yunnan Province from 2000 to 2020

2.2 生态源地识别

2.2.1 生境质量预测 基于InVEST模型计算现状(2020年)与2035年自然发展情景和主体功能情景下云南省生境质量水平(图4),生境质量指数平均值依次为0.641 9、0.641 8、0.636 7,相较于2020年,2035年2种情景下云南省生境质量均呈下降态势,但变化不显著。空间分布上,生境质量均呈现“西高东低”空间分布格局,其中低值区主要分布在建设用地占比较高区域,高值区主要分布在普洱市和怒江州,该类区域森林覆盖面积较高,生态基底较好。

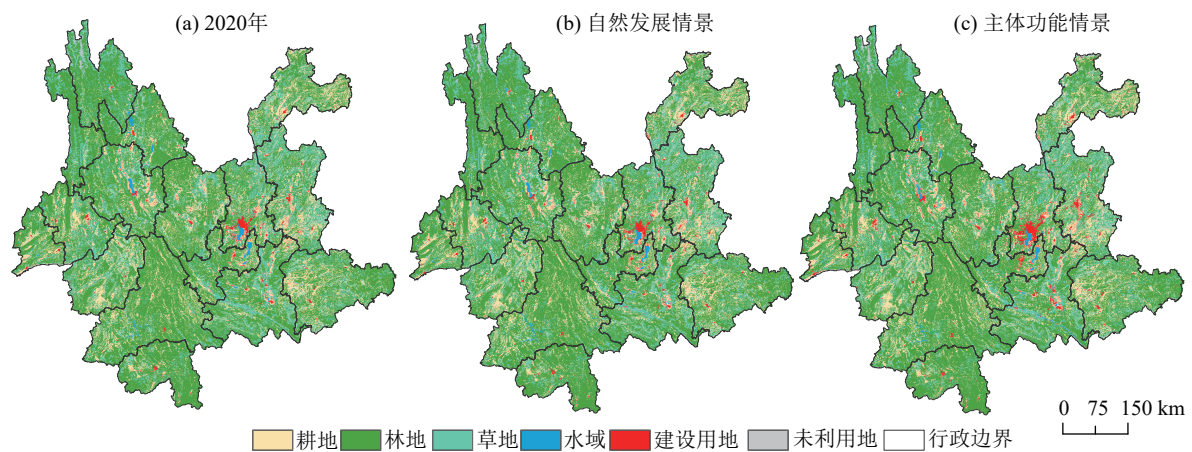


图 3 2020—2035 年不同情景下云南省土地利用空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of land use in Yunnan Province under different scenarios from 2020 to 2035

表 4 2035 年不同情景下土地利用结构及变化

Table 4 Land use structure and change under different scenarios in 2035									km ²
土地利用类型	2035 年自然发展情景				2035 年主体功能情景				
	云南省	农产品主产区	重点生态保护区	城市化地区	云南省	农产品主产区	重点生态保护区	城市化地区	
耕地	66 926.79 (-0.87)	26 228.88 (-0.21)	19 245.06 (-2.56)	21 452.85 (-0.12)	67 431.24 (-0.12)	27 979.11 (6.54)	18 552.96 (-6.07)	20 899.17 (-2.69)	
林地	220 919.58 (0.56)	68 364.27 (0.07)	101 223.18 (1.14)	51 332.13 (0.07)	221 730.30 (0.93)	67 212.63 (-1.62)	103 443.03 (3.36)	51 074.64 (-5.52)	
草地	83 392.01 (-2.90)	30 553.08 (-2.61)	33 140.43 (-2.76)	19 698.50 (-3.58)	81 305.37 (-5.33)	30 504.42 (-2.76)	31 499.46 (-7.57)	19 301.49 (-5.52)	
水体	4 398.39 (16.99)	1 395.45 (45.25)	1 688.76 (13.55)	1 314.18 (0.19)	4 201.74 (11.76)	1 003.23 (4.42)	1 797.21 (20.84)	1 401.30 (6.83)	
建设用地	6 109.93 (28.31)	1 161.00 (8.87)	1 135.35 (26.30)	3 813.58 (36.37)	7 109.37 (49.30)	1 303.20 (22.20)	1 159.83 (29.02)	4 646.34 (66.14)	
未利用地	1 417.14 (-8.73)	94.95 (-4.44)	1262.25 (-9.41)	59.94 (-0.15)	1 385.82 (-10.75)	88.29 (-11.14)	1 249.29 (-10.34)	48.24 (-19.64)	

注:括号内数据为面积变化百分比,% ;+表示增加,-表示减少。

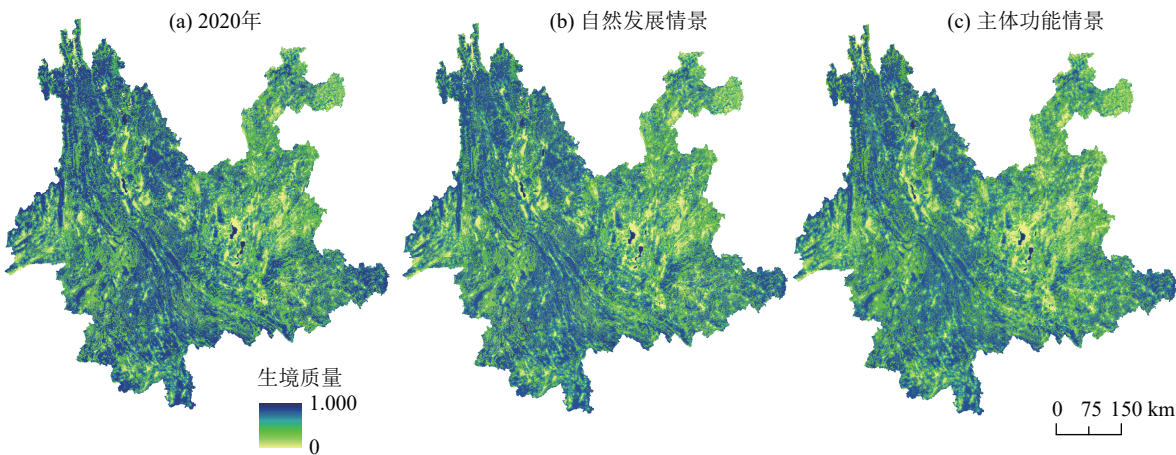


图 4 云南省不同情景生境质量

Fig. 4 Habitat quality of different scenarios in Yunnan Province

2.2.2 基于 MSPA 的综合生态源地识别 云南省 别 55、58 个生态源地,总面积分别为 55 028.52、2020 年共识别 54 个生态源地,总面积为 54 580.32 km², 54 038.79 km²。其空间布局相似,西部密集,东部稀疏,在西北部高山峡谷区、中西部湖盆高原区和南部

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

边境带地区呈现显著的集聚特征。基于 Conefor 软件计算斑块重要性指数(dPC)并划分生态源地重要性等级,重要生态源地占总源地面积比例依次为91.13%、90.55%和90.76%,均超过90%,多分布于西北部 and 西南部地区,景观类型以林地为主,植被覆盖度高,生

态基底好,具备优越的生物栖息条件,景观连通程度和斑块重要性高;一般生态源地面积相对较少,主要分布在中部和东南部地区,受云南省中部地区较高的开发强度和东南部地区显著的喀斯特地貌特征影响,该类区域林相结构较差,景观联通性较低(图5)。

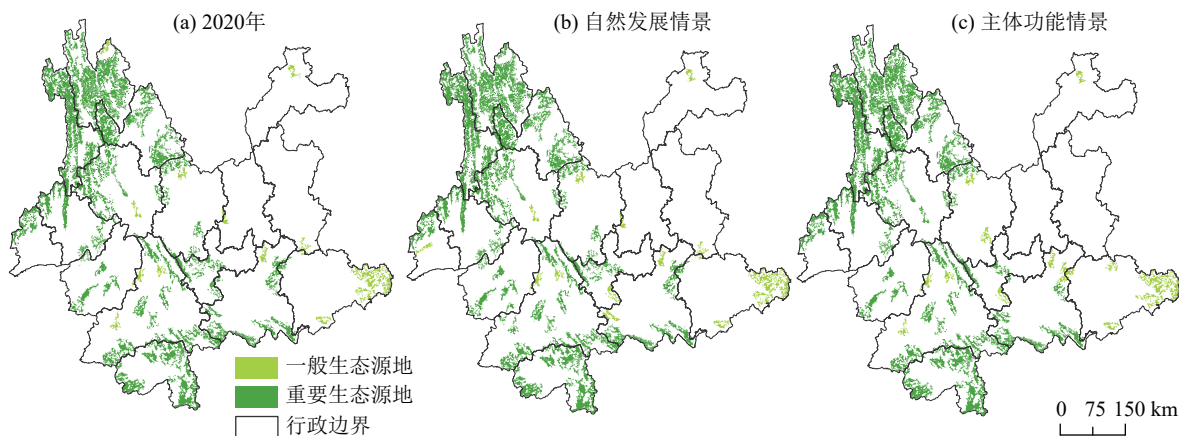


图5 云南省不同情景生态源地分布

Fig. 5 Distribution of ecological sources under different scenarios in Yunnan Province

2.3 阻力面构建

由图6可知,云南省生态阻力呈现“中部高,四周低”的特征。阻力高值区主要分布于滇中城市群地区,该区域是云南省经济核心区,较高的开发强度和显著的人为干扰不利于物种迁徙和物质能量流动,导致了较强的生态阻力。阻力低值区主要分布于植

被覆盖率高、生态条件优越的自然山体,其受人为干扰较少,生物活动受阻碍程度低。2020年生态阻力面平均值为1.84,2035年自然发展情景和主体功能情景生态阻力面平均值分别为1.67和1.64,表明2种情景模拟下2035年云南省生态系统的连通性和物种迁移能力均微幅降低。

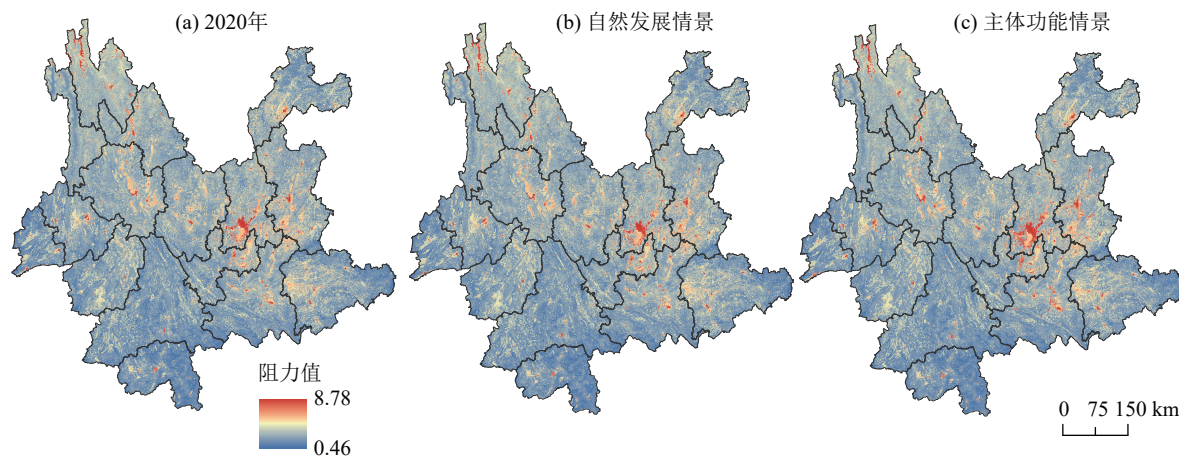


图6 云南省不同情景生态阻力面

Fig. 6 Ecological resistance surfaces of different scenarios in Yunnan Province

2.4 生态安全网络构建

基于 Linkage Mapper 提取出云南省各情景下的生态廊道(图7)。2020年云南省生态廊道共125条,总长度为6 695.42 km,廊道数量呈现从西南向东北递减的趋势。西北部和西南部地区生态源地数量多且分布密集,源地之间连接紧密,生态廊道较短;东北部和东南部地区生态源地较少且分散度较高,导致生态廊道较长,且路网分布密集,廊道易发生断

裂,增加生物迁徙和扩散的难度。

2035年自然发展情景和主体功能情景下生态廊道的空间分布特征有明显差异。自然发展情景下生态廊道共113条,总长度为6 402.14 km,与2020年比较廊道数量减少12条,总长度减少293.42 km,生态网络连通性下降;主体功能情景下,生态廊道共133条,总长7 257.48 km,较2020年廊道数量增加8条,总长度增加562.03 km。与自然发展情景比较,主体功能

情景下生态网络空间布局和现状(2020年)相似度更高,且生态网络覆盖范围增加,整体连通性较优。

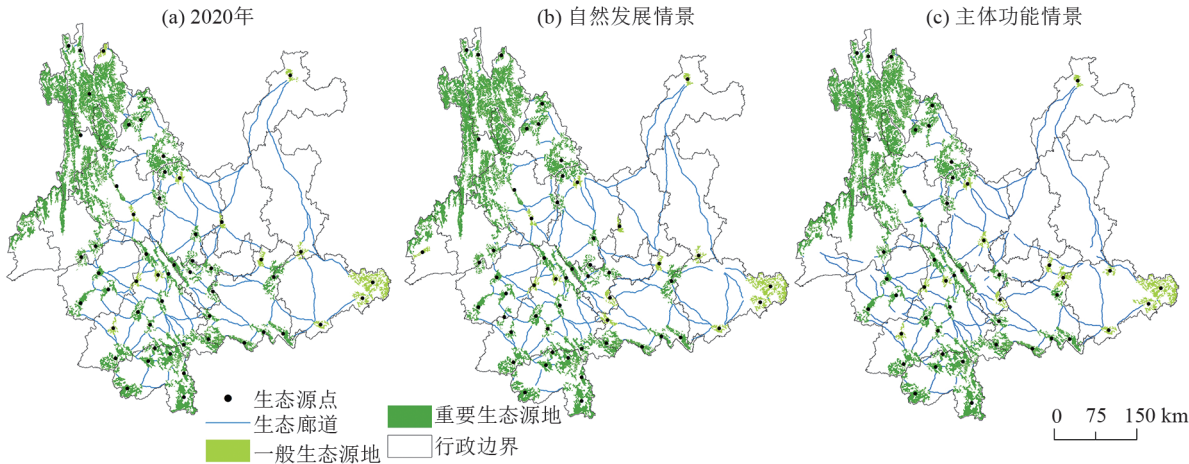


图7 不同情景生态网络识别

Fig.7 Identification of ecological networks under different scenarios

2.5 生态网络结构评价

通过计算 α 、 β 和 γ 3个生态网络结构指数来评价各情景下生态网络结构的闭合度、连接度和连通度(表5)。现状(2020年)、2035年自然发展情景和主体功能情景下的 α 指数依次为0.70、0.56、0.94,表明主体功能情景下生态网络覆盖范围较广,生物活动范围将增大,生物多样性将得到提高; β 指数依次为2.32、2.06、2.77,表明主体功能情景下源地与源地之间联系较强,生物流动与能量交换时受到的阻力较低,同时生态网络整体也将变得更加复杂; γ 指数依次为0.80、0.71、0.96,表明主体功能情景下生态网络整体连接性较高,景观连通性较强。对比发现,2035年主体功能情景下云南省生态网络闭合度、连接度和连通度均得到优化,且优于自然发展情景,说明该情景下的未来生态网络布局较为理想。

表5 网络结构指数

Table 5 Network structure indices

情景	α	β	γ
2020年	0.70	2.32	0.80
自然发展情景	0.56	2.06	0.71
主体功能情景	0.94	2.77	0.96

3 讨论

3.1 基于主体功能定位的生态网络构建

本研究基于主体功能区视角对未来生态网络构建提供了一种新思路。在主体功能区战略要求下,区域功能定位是土地利用转变的重要牵引力,主体功能情景下的土地利用演变及生态网络格局模拟预测更符合区域未来发展态势,能更具科学性、准确性地展现未来国土空间生态环境和布局协调程度,为后续的生态网络布局优化研究和国土空间管控政策

制定提供理论支撑和应用参考。

在多情景模拟方面,相较于其他常见的土地利用情景模拟(自然发展情景、耕地保护情景、生态保护情景和经济发展情景),基于主体功能定位的情景模拟兼顾生态保护、经济发展和耕地保护要求,更符合区域农业、生态、城镇空间协调发展的规划目标。在土地利用变化方面,自然发展情景和主体功能情景下均呈现建设用地、水域和林地扩张,其他地类面积减少的土地利用变化趋势,与林志等^[27]研究结果基本一致,并且2种预测情景均出现因土地利用演变引起生态环境质量一定程度降低的现象,与周豹等^[12]研究相契合,但2种预测情景的地类变化强度及空间组合形式存在显著差异,与梁毅东等^[21]的研究结果一致。在生态网络构建方面,《云南省国土空间规划(2021—2035年)》^[18]中规划“三屏两带六廊多点”的生态安全格局,本研究于2020年时间节点选取的核心生态源地与“三屏”(青藏高原东南缘生态屏障、哀牢山—无量山生态屏障和南部边境生态屏障)相契合,提取的生态廊道与“六廊”(6条主要生态廊道)存在一定程度的吻合,研究结果具有一定合理性。相较于自然发展情景,主体功能情景下构建的2035年生态网络格局与立足于现状资源禀赋和经济社会发展实际构建的2020年生态网络格局更加吻合,反映出基于主体功能战略背景的生态网络构建方法具有一定科学性。

3.2 省域生态网络建设展望

结合云南省实际情况,对本研究构建的2020年及2035年不同情景生态网络进行梳理和分析,针对未来生态网络建设提出的建议为:1)建立生态源地保护机制,维护生态廊道稳定性。云南省

生态源地空间分布不均,出现局部集聚现象,在进行生态网络建设时应以大型生态源地聚集带为保护重点,通过建立自然保护区、创建国家公园等手段建立长效的生态源地保护机制,同时在过长廊道间增补生态源地,提升生态廊道的稳定性,促进区域生态源地分布平衡。2)结合主体功能定位优化生态网络格局。落实主体功能战略,在立足资源禀赋和经济社会发展实际的前提下制定更具针对性的区域生态空间治理措施和调控细则,优化生态网络布局,完善廊道间的配置,提升生态系统质量和稳定性。

3.3 研究的局限性和展望

本研究创新性地提出基于主体功能战略开展生态网络构建的方法,但受限于数据的可获取性,模型预测时缺乏生态保护红线、永久基本农田等政策因素作为约束条件,使预测结果存在一定的局限性。生态廊道是具有一定的宽度的物种迁徙的通道,目前对于生态廊道宽度尚未有统一标准,因缺乏详细的生物资料,未对生态廊道的界定进行深入研究,后续研究应整合空间异质性和生物种群特性,探讨不同廊道宽度变化对生态网络格局的影响,提升生态网络分析的精确性和适用性。

4 结 论

1)2035年主体功能情景和自然发展情景下土地利用变化趋势一致,但变化强度及空间组合形式存在显著差异。相比较2种情景,主体功能情景下耕地、林地得到有效管控,建设用地区域性扩张力度加强,更能满足云南省农业、生态、城镇空间协调发展需求。

2)2020年共识别54个生态源地,总面积为54 580.32 km²,2035年自然发展情景和主体功能情景下分别识别55、58个生态源地,总面积分别为55 028.52、54 038.79 km²,均呈现“西部多、东部少”的空间分布格局,在西北部高山峡谷区、中西部湖盆高原区、南部边境带地区有显著的集聚特征,整体重要生态源地占比均超过90%。

3)2020年构建生态廊道数为125条,总长度为6 695.42 m,2035年自然发展情景和主体功能情景构建的生态廊道数分别为113、133条,总长度分别为6 402.14、7 257.48 km²,廊道密度呈现从西南向东北递减的趋势。与自然发展情景比较,主体功能情景下的生态网络空间布局与现状(2020年)相似度更高,覆盖范围更广,整体连通性更优。

4)相较于2020年和2035年自然发展情景,2035年主体功能情景下生态网络结构指数 α 、 β 和 γ 值均

较优,说明该情景下生态网络的复杂程度较高,源地间连通性较强、生物流动与能量交换所受阻力较低,反映出主体功能情景下的生态网络布局较为理想。

参考文献:

- [1] 徐爽,朱永明.基于土地利用功能最大化的多情景土地利用优化研究[J].中国农业资源与区划,2022,43(11): 90-100.
XU S, ZHU Y M. Study on multi-scenario land use optimization based on maximization of land use function[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(11): 90-100.
- [2] BROGGIO I S, SILVA-JUNIOR C H, NASCIMENTO M T, et al. Quantifying landscape fragmentation and forest carbon dynamics over 35 years in the Brazilian Atlantic Forest [J]. Environmental Research Letters, 2024, 19(3): e034047.
- [3] 魏雷哈冰,时鹏,魏勇,等.窟野河流域生态系统服务功能变化及其驱动因素分析[J].水土保持学报,2024,38(4):222-235.
WEI L, SHI P, WEI Y, et al. Analysis of ecosystem service function changes and their driving factors in the Kuye river basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 222-235.
- [4] KONG F H, YIN H W, NAKAGOSHI N, et al. Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling[J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 95(1/2): 16-27.
- [5] GAO J, GONG J, LI Y, et al. Ecological network assessment in dynamic landscapes: Multi-scenario simulation and conservation priority analysis [J]. Land Use Policy, 2024, 139: e107059.
- [6] 王晓峰,朱梦娜,张欣蓉,等.基于“源地-阻力-廊道”的三江源区生态安全格局构建[J].生态学报,2024,44(11):4609-4623.
WANG X F, ZHU M N, ZHANG X R, et al. Ecological security pattern construction of the three-river source region based on source-resistance-corridor[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 4609-4623.
- [7] 黄杰,黄义忠.基于InVEST-MSPA的文山州区域生态网络构建[J].环境监测管理与技术,2024,36(5):41-46.
HUANG J, HUANG Y Z. Construction of regional ecological network in Wenshan prefecture based on InVEST-MSPA[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2024, 36(5): 41-46.
- [8] 王浩阳,牛文浩,宋曼,等.基于LUCC及其ESV响应的陕西省生态网络构建与空间优化[J].资源科学,2023,45(7):1380-1395.
WANG H Y, NIU W H, SONG M, et al. Construction

- and spatial optimization of ecological network in Shaanxi Province based on LUCC and its ESV response [J]. *Resources Science*, 2023, 45(7): 1380-1395.
- [9] 杨欣,肖豪立,王艺霏.长江中游城市群生态网络构建、优化与协同治理[J].*水土保持学报*,2024,38(1):300-309.
YANG X, XIAO H L, WANG Y F. Construction, optimization and synergistic governance of the ecological network of urban agglomeration in the middle reaches of Yangtze River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(1): 300-309.
- [10] 王崑,马春旭,郑伊含,等.基于MSPA模型和生态保护重要性评价的市域生态空间网络构建及优化[J].*水土保持通报*,2023,43(4):220-228.
WANG K, MA C X, ZHENG Y H, et al. Construction and optimization of urban ecological space network based on MSPA model and ecological protection importance evaluation [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(4): 220-228.
- [11] LUO J L, ZHU L, FU H. Construction of wetland ecological network based on MSPA-conefor-MCR: A case study of Haikou City [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 166: e112329.
- [12] 周豹,赵俊三,陈国平,等.多情景模拟下滇东南喀斯特地区生态系统服务评估与网络优化[J/OL].*环境科学*, 1-14 [2024-10-28]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202406123>.
ZHOU B, ZHAO J S, CHEN G P, et al. Ecosystem services assessment and network optimization under multiple scenario simulations in the Karst area of Southeast Yunnan [J/OL]. *Environmental Science*, 1-14 [2024-10-28]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202406123>.
- [13] LI S N, ZHAO X Q, PU J W, et al. Optimize and control territorial spatial functional areas to improve the ecological stability and total environment in Karst areas of Southwest China [J]. *Land Use Policy*, 2021, 100: e104940.
- [14] 杨子韬,田莉.基于PLUS模拟未来土地利用变化的可持续发展评估:以江西省为例[J].*地理科学*,2024,44(10):1826-1836.
YANG Z T, TIAN L. Sustainability assessment based on PLUS simulation of future land use change: A case study of Jiangxi Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2024, 44(10): 1826-1836.
- [15] 汪勇政,梁哲,余浩然,等.基于PLUS模型的汾河流域景观生态风险时空分异及多情景模拟[J].*生态科学*, 2024,43(1):35-45.
WANG Y Z, LIANG Z, YU H R, et al. Spatial-temporal differentiation and multi-scenario simulation of landscape ecological risk assessment in Fenhe River Basin based on PLUS model [J]. *Ecological Science*, 2024, 43(1): 35-45.
- [16] 邹珮雯,徐昉.生态安全格局构建及景观生态风险预测:以赛罕乌拉国家级自然保护区为例[J].*生态学报*, 2023,43(23):9981-9993.
ZOU P W, XU F. Ecological security pattern construction and landscape ecological risk prediction: A case study of Saihanwula National Nature Reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(23): 9981-9993.
- [17] 薄立明,尹力,魏伟,等.主体功能区视角下山东省国土空间格局演变及驱动因素分析[J].*地理与地理信息科学*,2024,40(1):37-46.
BO L M, YIN L, WEI W, et al. Evolution characteristics and influencing factors of territorial spatial pattern in Shandong from the perspective of major function oriented zoning [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2024, 40(1): 37-46.
- [18] 云南省自然资源厅.云南省国土空间规划(2021—2035年)[EB/OL].(2024-10-24)[2024-11-04].https://dnr.yn.gov.cn/html/2024/shenpigongshi_1024/4047969.html.2024-10-24.
Yunnan Provincial Natural Resources Department. Yunnan Province Land and Space Planning (2021-2035) [EB/OL]. (2024-10-24) [2024-11-04]. https://dnr.yn.gov.cn/html/2024/shenpigongshi_1024/4047969.html.2024-10-24.
- [19] 周小平,李理,梁颖,等.主体功能区视角下长三角地区国土空间格局时空演变及其碳排放效应分析[J].*农业工程学报*,2023,39(17):236-244.
ZHOU X P, LI L, LIANG Y, et al. Spatiotemporal evolution of territorial spatial patterns and carbon emissions in the Yangtze River Delta from the perspective of main functional zones [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(17): 236-244.
- [20] 勾容,苏维词,黄贤凤.基于景观生态安全评价的贵州省生态安全网络构建及多情景模拟[J/OL].*环境科学*, 1-22 [2024-10-28]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202406286>.
GOU R, SU W C, HUANG X F. Construction of ecological security network and multi-scenario simulation in Guizhou Province based on landscape ecological security assessment [J/OL]. *Environmental Science*, 1-22 [2024-10-28]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202406286>.
- [21] 梁毅东,张述清,朱大明,等.主体功能视角下耦合马尔可夫链和PLUS模型的城镇开发边界划定研究[J].*地球信息科学学报*,2024,26(7):1702-1716.
LIANG Y D, ZHANG S Q, ZHU D M, et al. Research on urban development boundary delineation using coupled Markov chain and PLUS models from the perspective of main functions [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2024, 26(7): 1702-1716.

(下转第190页)

- 2001 to 2100[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2022, 58(5): 641-649.
- [22] 张计深, 陈笑蝶, 彭守璋. 2001—2100年中国温度变化趋势及时空差异研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(12): 112-124.
- ZHANG J S, CHEN X D, PENG S Z. Trend and spatiotemporal differences of annual mean temperature in China from 2001 to 2100[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2022, 44(12): 112-124.
- [23] WANG B, CHEN Y L, LI Y, et al. Differential effects of altered precipitation regimes on soil carbon cycles in arid versus humid terrestrial ecosystems [J]. Global Change Biology, 2021, 27(24): 6348-6362.
- [24] LUO W X, KIM H S, ZHAO X H, et al. New forest biomass carbon stock estimates in northeast Asia based on multisource data[J]. Global Change Biology, 2020, 26(12): 7045-7066.
- [25] 戴尔阜, 黄宇, 吴卓, 等. 内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系[J]. 地理学报, 2016, 71(1): 21-34.
- DAI E F, HUANG Y, WU Z, et al. Spatial-temporal features of carbon source-sink and its relationship with climate factors in Inner Mongolia grassland ecosystem [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(1): 21-34.
- [26] TANG G P, BECKAGE B, SMITH B. Potential future dynamics of carbon fluxes and pools in New England forests and their climatic sensitivities: A model-based study [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2014, 28(3): 286-299.
- [27] 吕超群, 孙书存. 陆地生态系统碳密度格局研究概述[J]. 植物生态学报, 2004, 28(5): 692-703.
- LÜ C Q, SUN S C. A review on the distribution patterns of carbon density in terrestrial ecosystems [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004, 28(5): 692-703.
- [28] PENDALL E, OSANAI Y, WILLIAMS A L, et al. Soil carbon storage under simulated climate change is mediated by plant functional type [J]. Global Change Biology, 2011, 17(1): 505-514.
- [29] CAREY J C, TANG J W, TEMPLER P H, et al. Temperature response of soil respiration largely unaltered with experimental warming [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(48): 13797-13802.
- [30] LÜ T, PENG S Z, LIU B, et al. Planting suitability of China's main grain crops under future climate change [J]. Field Crops Research, 2023, 302: e109112.
- (上接第 181 页)
- [22] 冀泳帆, 贾鲁净, 杨联安, 等. 耦合 InVEST-PLUS 模型的榆林市生境质量时空演变及预测分析[J]. 水土保持学报, 2023, 37(1): 123-132.
- JI Y F, JIA L J, YANG L A, et al. Spatio-temporal evolution and prediction analysis of habitat quality in Yulin City coupled with InVEST-PLUS model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1): 123-132.
- [23] 马彩依, 曹洪涛, 崔铁军, 等. 京津冀 2000—2021 年地表水面面积时空变化及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 309-320.
- MA C Y, CAO H T, CUI T J, et al. Spatiotemporal variation of surface water area in Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2000 to 2021 and its influencing factors [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 309-320.
- [24] 谢名睿, 危小建, 赵莉, 等. 南昌市生态用地景观结构与网络连通性多情景模拟[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 202-211.
- XIE M R, WEI X J, ZHAO L, et al. Multi scenario simulation of landscape structure and network connectivity of ecological land in Nanchang City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 202-211.
- [25] 曾黎, 杨庆媛, 杨人豪, 等. 三峡库区生态屏障区景观格局优化: 以重庆市江津区为例[J]. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1364-1373.
- ZENG L, YANG Q Y, YANG R H, et al. Landscape pattern optimization for ecological barrier in the Three Gorges Reservoir Area: A case study in Jiangjin, Chongqing [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(5): 1364-1373.
- [26] 费勇强, 黄爱民, 罗义, 等. 基于 Maxent 模型与电路理论的大熊猫栖息地内废弃矿山生态修复研究[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(2): 622-632.
- FEI Y Q, HUANG A M, LUO Y, et al. Ecological restoration of abandoned mines within giant panda habitat based on Maxent model and circuit theory [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(2): 622-632.
- [27] 林志, 李石华, 易邦进, 等. 多情景视角下云南省“三生”空间变化模拟与效应评价[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 220-230.
- LIN Z, LI S H, YI B J, et al. Multiple scenario perspective of production-living-ecological space change simulation and effect evaluation in Yunnan Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 220-230.