

基于电路理论的高原山地县域生态网络构建 ——以云南省镇沅县为例

Construction of Ecological Network in Plateau Mountainous Counties Based on Circuit Theory: A Case Study of Zhenyuan County, Yunnan Province

陈文漪 刘敏* 潘悦 张瀚琪 董俊梅

CHEN Wenyi, LIU Min*, PAN Yue, ZHANG Hanqi, DONG Junmei

基金项目: 国家自然科学基金项目 “生态系统服务供需视角下滇中高原湖泊城市群关键绿色基础设施识别与优化” (编号: 52268014); 云南省自然科学基金面上项目 “基于生态系统服务的滇中国土空间自然保护地体系优化研究” (编号: 202401AT070357)

摘要

鉴于高原山地的特殊地理环境及社会经济条件的限制,高原山地区域目前面临着城市快速扩张、生态保护压力大等挑战。以高原山地地区的云南省镇沅彝族哈尼族拉祜族自治县为例,结合生态系统服务功能重要性评估和形态学空间格局分析,从功能性和结构性2个方面综合确定生态源地,并利用电路理论原理构建生态廊道,进一步识别生态夹点和生态障碍点,构建生态网络,最后根据各乡镇发展现状提出针对性建议。结果表明:镇沅县拥有生态源地21个,形成生态廊道38条,共识别出夹点区域23.31 km²以及障碍点区域40.00 km²。生态源地及廊道多分布在镇沅县西部,而东部存在明显的断层现象。最后基于各乡镇发展现状条件与发展愿景,综合构建了镇沅县“四区、一轴、六脉、多廊道、多节点”的生态网络体系,并提出各乡镇未来发展重点及方向。

Abstract

In view of the special geographical environment and socio-economic conditions of the plateau mountainous area, the plateau mountainous area is currently facing challenges such as rapid urban expansion and high pressure on ecological protection. Taking Zhenyuan Yi and Hani and Lahu Autonomous County of Yunnan Province in the plateau mountainous area as a case study, this study integrates ecosystem service importance assessment with morphological spatial pattern analysis to comprehensively identify ecological sources from both functional and structural perspectives, and construct ecological corridors using circuit theory. Furthermore, identify ecological pinch points and ecological obstacle points, build an ecological network, and finally put forward targeted suggestions based on the development status of each township. The results show that Zhenyuan County contains 21 ecological sources and 38 ecological corridors. A total of 23.31 km² of the pinch area and 40.00 km² of the obstacle area are identified. The ecological sources and corridors are mostly distributed in the west of Zhenyuan County, while there are obvious faults in the east. Finally, based on the development status and development vision of each township, the ecological network system of 'four districts, one axis, multiple corridors and multiple nodes' in Zhenyuan County was comprehensively constructed, and the future development focus and direction of each township were proposed.

文章亮点

1) 从功能和结构2个角度构建生态网络,基于生态系统服务功能重要性评价和形态学空间格局分析法综合选取生态源地;2) 运用电路理论模型提取生态廊道,更加全面考虑景观结构的完整性和连通性,避免人为选择的主观性。

关键词

生态网络;生态系统服务功能;电路理论;MSPA;高原山地;乡村振兴

Keywords

Ecological network; Ecosystem service function; Circuit theory; MSPA; Plateau mountains; Rural vitalization

收稿日期: 2024-09-18

修回日期: 2024-10-25

生态安全是国家安全最重要的部分，也是人类社会可持续发展和民生改善的基本要素^[1]。中国作为一个多山国家，山地、高原和丘陵约占国土面积的69%，盆地占19%，平原占12%^[2]。因此，维护高原山地区域的生态安全对于提升我国生态安全水平具有重要意义。但近年来，随着我国人口的快速增长和城市化的不断推进，城市空间占据更多的自然空间，从而导致自然景观不断地消失和破碎化^[3]。同时，高原山地生态系统因其中存在较大的地形高差，受重力作用的影响，稳定性较差，抵抗外界干扰的能力弱，当环境问题对其产生影响时，山地生态系统的结构和功能难以恢复原状^[4]。这容易引发一系列的生态环境问题。

在此背景下，许多学者^[5-6]提出构建生态网络，识别生态保护区，从而破解当前城市发展所遇到的难题。生态网络作为一种多尺度的结构体系，是对以林地、草地、湿地、水体、未利用地等国土生态空间为主要对象的空间布局的规划^[7]，其核心理念在于将分散的栖息地斑块相互连接形成一个综合性的生境网络，从而优化网络空间布局，增强生态系统的服务功能。随着生态网络研究的发展，生态网络的构建模型日趋成熟，形成了“源地识别-廊道构建-生态节点搭建”的基本范式。起初，相关研究多选择自然保护区、风景名胜区所在地，或生物多样性较高的林地作为生态源地^[8]。为了降低主观性对于生态源地识别造成的影响，部分研究开始运用形态学空间格局分析法（Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA）^[9]、构建综合评价指标体系法^[10]和粒度反推法^[11]等选取核心生态源地。不同的自然基质可为人类提供不同种类的效益和资源，因此相关研究将生态系统服务功能评价和形态学空间格局分析法相结合，从功能和结构两大角度综合选取核心生态源地^[12]。廊道构建是生态网络规划中最关键的步骤，方法多样，如最小累积阻力模型^[13]、电路理论模型^[14]以及斑块重力模型^[15]。近年来电路理论被广泛应用于生态网络构

建，通常结合生态夹点和生态障碍点的识别，综合构建生态网络。

镇沅彝族哈尼族拉祜族自治县（以下简称“镇沅县”）地处云南省西南部，是典型的高原山地区域，地质环境复杂多样，具有自然资源约束明显、生态环境敏感的特征^[16]。县域受纵向两大山系切割，形成六大河流纵向延伸、城镇布局纵向拓展的地理空间格局。生物多样性和水土保持是其重要的生态系统服务功能。境内有云南哀牢山国家级自然保护区，是云南省哀牢山-无量山山地生态屏障的重要组成部分。然而，由于镇沅县城镇化水平较低以及产业结构不完善，部分高原山地区域的生态系统服务功能退化较为严重。因此，本研究选取镇沅县为研究区，综合运用生态系统服务功能重要性评价和形态学空间格局分析法识别生态源地，利用电路理论构建生态廊道，识别生态夹点及障碍点，从而全面构建生态网络，并将生态网络构建延伸至乡镇层面，为镇沅县生态网络构建及生态安全保护提供决策依据与科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云南省普洱市镇沅县（100°21′~101°31′E，23°24′~24°22′N）地处哀牢山和无量山之间，中心城区为恩乐镇，全县总面积4 147.58 km²。其中，山地面积占比97.7%，县域平均海拔1 376 m。镇沅县分属于红河、澜沧江两大水系，哀牢山和无量山纵贯县城南北，与六大河流相间，构成镇沅县“五谷五岭”的地貌特征（图1）。普洱市水务局公开信息显示，镇沅县生态基础良好，自然资源丰富，有澜沧江、恩乐河等534条河流，境内有云南哀牢山国家级自然保护区、云南普洱小黑江省级森林公园、大寺箐森林自然公园、淀坑水库森林自然公园、湾河水库森林自然公园以及山神丫口森林自然公园等，总保护面积达169.18 km²。截至2022年，全县地区生产总值（GDP）达938 278万元，全县以工农业为主，常住人口17.22万人，镇沅县下辖4个区，下设21个街道和22个镇。近年来，城镇的快速发展和持续推进的乡村建设导致生态

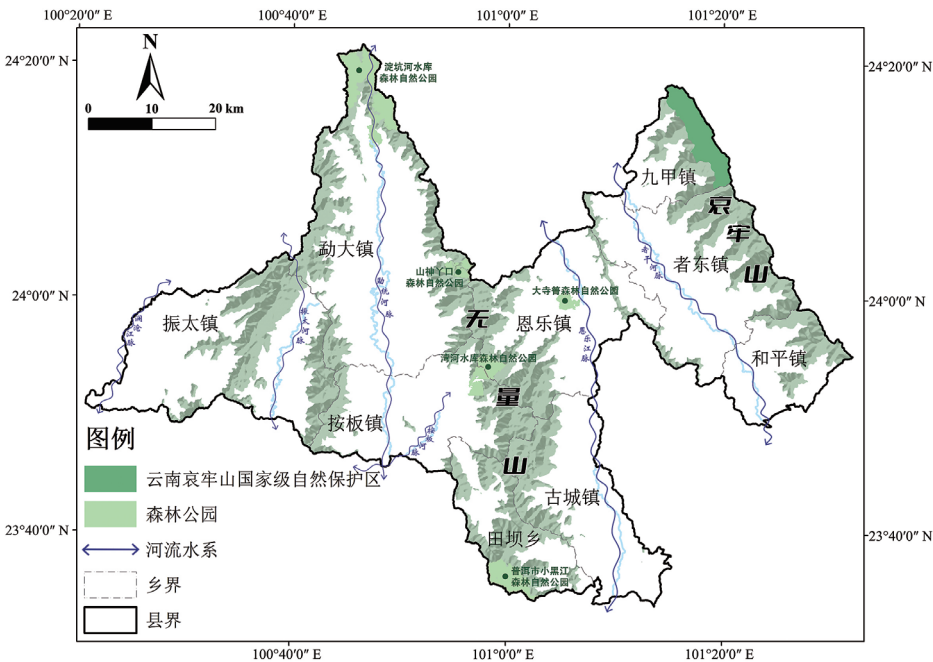


图1 研究区位
Fig.1 Study area

空间减少，部分地区生态功能退化。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源

本次研究采用多个数据集，具体数据来源如表 1 所示。

1.2.2 生态源地选取

本研究从功能源地和结构源地 2 个角度选取县域内具有重要生态保育价值的区域作为生态源地，涵盖林地、草地、水域等多种土地利用类型。

从功能角度出发，本研究基于生态系统服务功能重要性评价来选取源地。就大中尺度区域研究而言，净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 定量评价法在生态系统服务功能的评价方面更具有实用性^[17]。镇沅县是典型的高原山地区域，水土流失问题严重。同时，作为云南哀牢山国家级自然保护区的所在地，该地区物种丰富多样。因此本研究参照《生态保护红线划定技术指南》(环发〔2015〕56号)，采用 NPP 定量评价方法作为指标选取依据^[18]，选取水土保持、水源涵养、生物多样性保护 3 类指标对生态系统服务功能进行评价^[19-20]，并运用自然间断法对评价结果进行分级赋值。在评价过程中赋予水源涵养、水土保持、生物多样性保护功能相同的权重，最后将其叠加处理^[12]，选取功能核心生态源地（表 2）。

表 1 数据来源
Tab.1 Data source

数据名称	数据类型	数据来源
镇沅县 30 m 数字高程地形数据 DEM	栅格数据	BigMap 软件
归一化植被指数遥感数据集	栅格数据	中国科学院资源环境科学与数据中心
镇沅县第三次全国国土调查土地利用数据	栅格数据	镇沅县自然资源局
净初级生产力数据（NPP）集	栅格数据	NASA LP DAAC 网站
气候数据	栅格数据	中国科学院资源环境科学与数据中心
土壤类型数据	栅格数据	HWSD 土壤数据库
镇沅县国土空间规划基础资料	文本数据	镇沅县自然资源局

从结构视角出发，结合 MSPA 和景观连通性选取生态源地。MSPA 是基于形态学原理创建的一种图像处理方法，相较于其他方法能够准确地识别各元素之间的空间关系。本研究将土地利用类型分为林地、草地、水域、耕地、建设用地和未利用地 6 种景观类型，并将林地、水域作为前景，其余用地作为背景，通过 MSPA 分析工具识别出研究区互不重叠的 7 种空间格局，包括核心区、桥接区、环道、支线、边缘、穿孔和孤岛，从而确定研究区核心区。景观连通性是评判该区域的物种是否能顺利实现信息交流和迁移的重要决定因子^[21]。运用软件 Conefor 2.6 分析可能连通性指数 *dPC*，综合核心区面积大小，从而得到研究区结构核心生态源地。最终将同时具有功能核心和结构核心的区域作为镇沅县的核心生态源区。

1.2.3 生态廊道构建

科学构建生态综合阻力面是构建生态廊道的关键。参考相关研究^[22-24]，结合镇沅县具体情况，从自然和人为 2 个因素出发，筛选出生态系统服务功能重要性评价、土地利用、建设用地密度等 8 项指标作为综合阻力面的构成因素，同时将景观阻力值划分为 5 个等级，得到综合阻力因子评价体系。其中，对于研究区生态系统服务功能重要性评价，利用自然断点法将其分为 01~05 五个等级，等级越高阻力值越小。同时，镇沅县内水系发达，因此在构建生态廊道时需考虑水系对动物迁徙，特别是对陆生动物迁徙的阻力^[25]。结合研究区实际情况，运用层次分析法^[26-27]，对相关阻力因子进行权重赋值（表 3）。研究通过 8 阶判断矩阵计算得到 *CI* 值为 0.000，且查表获取 *RI* 值为 1.410，因此计算得到 *CR* 值为 0.000（小于 0.1），这代表本次研究判断矩阵满足一致性检验，计算所得权重具有一致性。

基于电路理论，应用 Linkage Mapper 2.0.0 软件，利用电子的随机流动来模拟生态的流动过程，预测物种迁徙和扩散的概率，通过计算最低累积电阻值构建镇沅县生态廊道。

1.2.4 生态节点识别

研究区生态节点包含生态夹点和生态障碍点。其中，生态夹点指电流高度密集的区域，该斑块的退化或者损失极有可能降低区域生境的连通性，常作为优先保护的栖息地区域。生态障碍点指阻碍物种在栖息斑块之间移动的地方，通

表 2 生态系统服务功能评价方法

Tab.2 Ecosystem service function evaluation method

生态系统服务功能评价指标	计算公式	注释
水源涵养功能	$WR=NPP_{mean} \cdot F_{sic} \cdot F_{pre} \cdot (1-F_{slo})$	NPP_{mean} 为多年（21a）植被净初级生产力平均值（g/cm）； F_{sic} 为土壤渗流因子， $F_{sic}=T_USDA_TEX/13$ ，其中 T_USDA_TEX 为 HWSD 土壤数据库中 USDA 土壤质地分类字段； F_{pre} 为多年（21a）平均降雨量因子（mm），经普通克里格插值后进行归一化； F_{slo} 为坡度（°），由 DEM 数据计算所得，并进行归一化
水土保持功能	$S_{pro}=NPP_{mean} \cdot (1-K) \cdot (1-F_{slo})$	基于 HWSD 土壤数据库计算出土壤可蚀性因子值 K ，经普通克里格插值后进行归一化
生物多样性保护功能	$S_{bio}=NPP_{mean} \cdot F_{pre} \cdot F_{tem} \cdot (1-F_{alt})$	F_{tem} 为多年（21a）平均气温（℃），经普通克里格插值后进行归一化； F_{alt} 为海拔，由 DEM 数据计算所得，并进行归一化

过改善障碍点环境，可以显著提高生态源地之间的连通性。研究利用 Point Mapper 及 Barrier Mapper 插件得到生态夹点及障碍点位置，并结合廊道构建以及障碍点的空间分布构建生态网络结构。

2 结果与分析

2.1 镇沅县生态源地综合识别

2.1.1 生态系统服务功能重要性评价

根据相关模型计算与评估，采用自然断点法将重要性评价结果划分为 5 个等级，1~5 级代表重要性从低到高，分别为一般保护区、较重要区、重点关注区、重要区以及极重要区（图 2）。研究将极重要区识别为生态源地。

表 3 综合阻力因子与权重

Tab.3 Combined resistance factors and weights

类型	阻力因子	权重	阻力赋值				
			1	2	3	4	5
自然因素	生态系统服务功能重要性评价	0.145	05	04	03	02	01
	高程 /m	0.096	[0, 1 300)	[1 300, 1 600)	[1 600, 1 900)	[1 900, 2 200)	≥ 2 200
	坡度 /°	0.086	[0, 5)	[5, 15)	[15, 25)	[25, 35)	≥ 35
	归一化植被指数 (NDVI)	0.131	[0.8, 1.0]	[0.6, 0.8)	[0.4, 0.6)	[0.2, 0.4)	[0, 0.2)
人为因素	土地利用类型	0.147	林地	草地	耕地、水域	建设用地	未利用地
	距水系距离 /m	0.142	[0, 500)	[500, 1 000)	[1 000, 1 500)	[1 500, 2 000)	≥ 2 000
	距道路距离 /m	0.132	≥ 2 000	[1 500, 2 000)	[1 000, 1 500)	[500, 1 000)	[0, 500)
	建设用地占比 /%	0.121	[0, 15)	[15, 30)	[30, 45)	[45, 60)	≥ 60

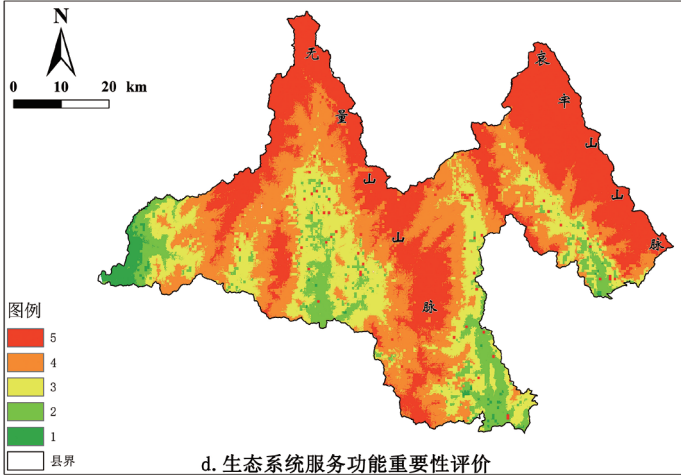
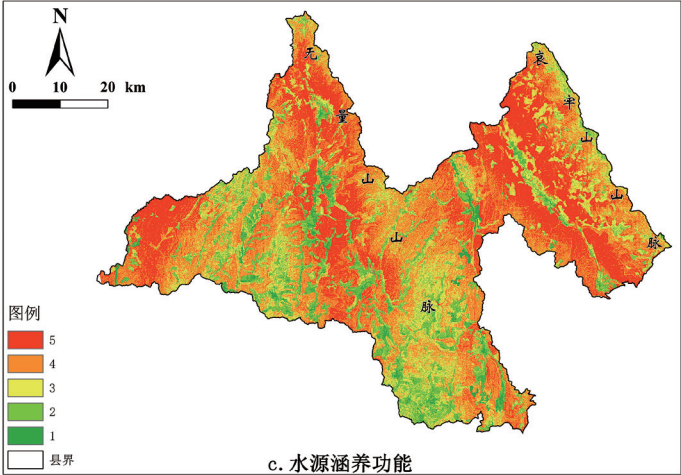
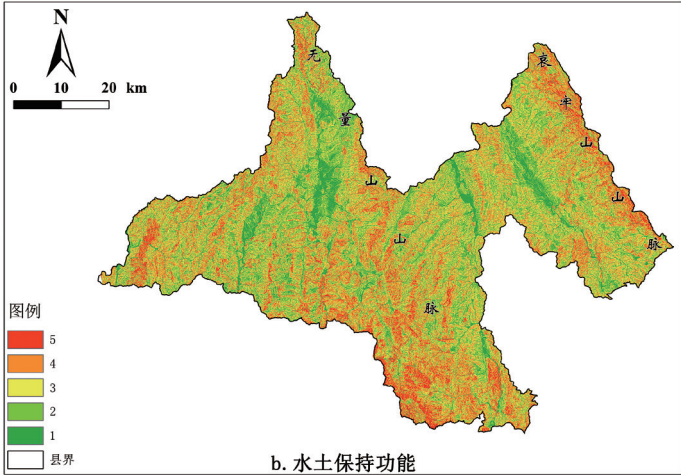
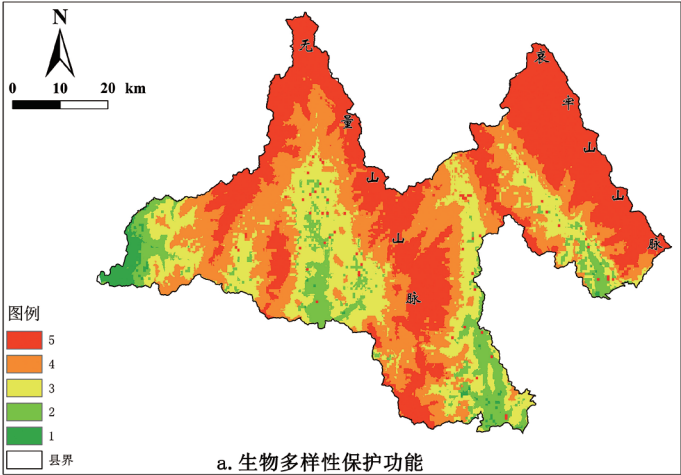


图 2 研究区生态系统服务功能重要性评价

Fig.2 Evaluation of the importance of ecosystem service functions in the study area

在生态系统服务功能重要性评价中,从面积上来看,5级和4级区域的面积占了全县面积的67.53%,镇沅县的生态系统服务功能整体较强;从空间分布上来看,综合生态系统服务功能的极重要区主要分布在无量山脉及其支脉、哀牢山脉等高海拔地区,这些地区的土地利用类型以林地为主。研究发现,生态系统服务功能重要性区域的面积占比、分布都与生物多样性保护功能重要性区域的保持一致,这表明镇沅县的生物多样性功能是镇沅县生态系统服务功能的主导,而水源涵养和水土保持的主导能力较弱。从整体看,镇沅县综合生态系统服务功能重要性评价呈现出高低交错的空间分布格局。

2.1.2 形态学空间格局分析

将镇沅县2020年土地利用数据导入Guidos中识别出7种空间格局。前景要素林地、水域的面积为3250.18 km²,约占研究区总面积的78.34%,这说明镇沅县生态基础良好。选择面积大于15 km²的核心区,筛选得到28个斑块进行景观连通性分析。最终确定斑块面积大于15 km²且dPC值不小于1的26个核心区。基于dPC指数将26个核心区斑块分为5个等级,1至5级代表连通性由低到高。景观连通性为5级的斑块面积为375.88 km²,占整个研究区面积的9.06%。这些高连通性区域主要分布在研究区中部,即无量山脉所在地,对县域整体的景观连通性发挥着至关重要的作用(图3)。

2.1.3 生态源地的综合提取

等权叠加生态系统服务功能重要性评价和形态学空间格局分析2项评价结果,得出镇沅县生态源地重要性综合评价结果。利用ArcGIS软件中的自然断点法,将结果分为1~5级,选取5级和4级作为镇沅县生态源地(图4)。研究结果表明:镇沅县共有生态源地21个,总面积1291.82 km²,占全县面积的31.15%。这些生态源地大体呈条带状,从南到北贯穿镇沅县,涵盖了无量山、哀牢山等山脉,振太河、恩乐江、者干河流域,以及云南哀牢山国家级自然保护区、大寺箐森林自然公园、山神丫口森林自然公园、淀坑河水库森林自然公园、湾河水库森林自然公园和普洱小黑江省级森林公园,绝大部分土地利用类型为林地。

镇沅县9个乡镇均有生态源地分布,其中,勐大镇、振太镇、恩乐镇和者东镇所涉及的生态源地数量较多。勐大镇的生态源地的面积最大,达到322.74 km²,占生态源地总面积的24.98%,其中的无量山脉和生物多样性极重要区的林地有很高的覆盖度,植被茂密,是众多野生动物的栖息地。因此,推动勐大镇的绿色可持续发展有助于提升镇沅县整体的生物多样性。恩乐镇、者东镇的生态源地占比均超过10%。相比之下,和平镇的生态源地面积最小,仅占比4.02%。由于长期的矿产资源开发活动,该镇的生态源地分布破碎化,无法形成大片且稳定的核心生态源地。因此,在乡级生态网络构建中,应重点关注对破碎化生态源地的修复工作,以提升其连续性和稳定性,从而更有效地保护镇沅县的生态环境。

2.2 镇沅县生态廊道构建

基于镇沅县生态源地空间分布情况,结合筛选的8个生态阻力因子,构建生态综合阻力面(图5)。研究区生态阻力值空间异质性显著,高阻力值地区基本集中在城镇建设密集地带,特别是镇沅县东部的矿产能源开发区。低阻力值地区主要分布在林地覆盖区,包括云南哀牢山国家级自然保护区 and 多个森林公园,这些地区生态环境良好,有利于野生生物活动与迁徙。总的来说,镇沅县的生态阻力格局阻碍了东西向的物种迁徙和交流,在后续网络构建中需加强东西向生态源地之间的联系。

基于电路理论构建生态廊道,镇沅县共有38条生态廊

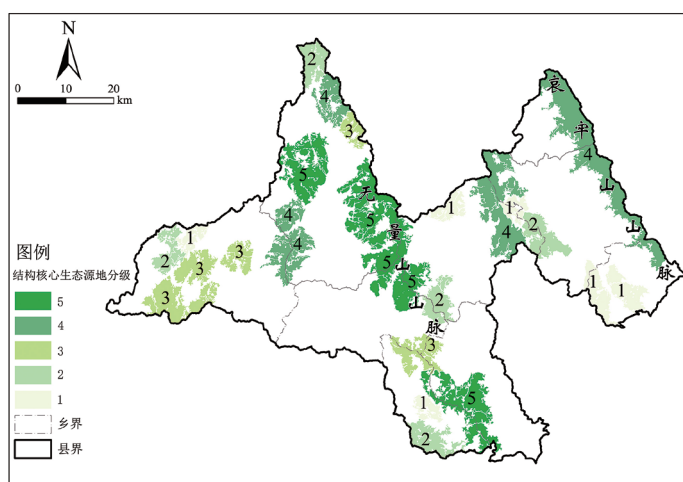


图3 研究区结构核心生态源地分级

Fig.3 The classification of the core ecological source of the structure in the study area

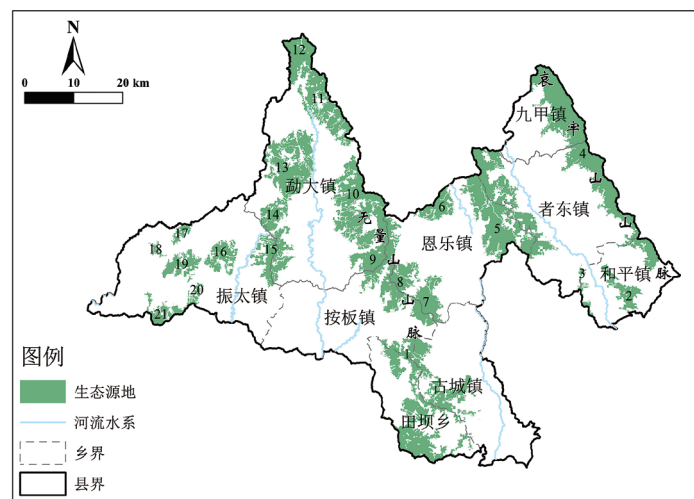


图4 研究区生态源地空间分布

Fig.4 Spatial distribution of ecological sources in the study area

道, 总长度 293.57 km (图 6)。生态廊道在空间分布中呈现“西密东疏”的特征。研究区西部生态源地分布密集, 面积较小, 生态源地之间相互作用力强, 因而该区域的生态廊道较短, 应注意保护周边的林地, 为物种迁徙和交流提供良好的生态环境。研究区东部的生态廊道主要用于连接东部的云南哀牢山国家级自然保护区和中部的省级森林公园, 但部分廊道经过建成区和矿产资源开发区, 易受外界干扰而发生断裂, 后期规划应优先选择在生态廊道易断裂处恢复本土植物群落, 并建立动态监测体系, 构建生态踏脚石, 从而提升生态廊道的稳定性。

在乡镇层面, 由于振太镇的生态源地分布较为破碎化, 其生态廊道的长度最长, 达到了 77.86 km; 且有多段公路穿越振太镇的多数廊道, 严重影响了廊道的连续性, 从而增大了物种迁徙的阻力。因拥有广泛的生态源地分布, 勐大镇

的生态廊道的长度也达到了 58.32 km。而田坝乡和古城镇由于其生态源地整体连通性较好, 并无生态廊道分布。

2.3 镇沅县生态节点识别

基于电路理论模拟生物流在异质景观中迁移运动的过程, 电流密度越大的区域即为生态夹点^[28] (图 7)。通过依次对生态廊道输入电流计算各廊道电流, 重复输入使得所有源地接地, 最后叠加得到累积电流, 累加值较高的区域即为生态夹点。研究区累积电流区面积为 850.73 km², 基于空间统计得出镇沅县生态网络平均电流强度为 0.013 2, 最高强度达到 0.248 2, 这表明廊道生境质量分布不均, 需要提升廊道的整体建设水平。采用自然断点法将研究区累积电流分为 5 级, 5 级区域作为生态夹点。镇沅县生态夹点区域面积为 23.31 km², 占据研究区累计电流区的 2.74% 及县域总面积的 0.56%。生态夹点主要分布在镇沅县西部, 即振太镇、勐大镇和恩乐镇等林区覆盖范围较广的区域, 且其土地利用类型主要为林地和草地。生态夹点对于提升景观整体衔接度十分重要, 未来生态网络建设要将生态夹点建设作为重点, 对其进行严格界定和控制。

采用移动窗口搜索法, 分别以 200 m、300 m、400 m 为搜索半径提取生态障碍点。通过自然断点法将电流流域阻力值分为 5 级, 将阻力值大于 2.064 的区域提取为生态障碍点。障碍点总面积为 40.00 km², 占研究区总面积的 0.96% (图 7)。大部分生态障碍点位于生态源地的边缘或者生态廊道内部。根据遥感影像图进一步对照分析, 这些生态障碍点大多位于建设用地和道路上, 其中部分分布在镇沅县的矿产资源开发区内。随着障碍点阻力值的不断增加, 生态廊道在未来可能面临着被直接切断的风险。因此, 生态障碍点应作为后续修复的重点对象, 通过改善和恢复障碍点的生态环境, 优化生态源地之间的连通性。

2.4 县域尺度生态网络构建

研究根据镇沅县生态系统服务功能重要性评价、生态源

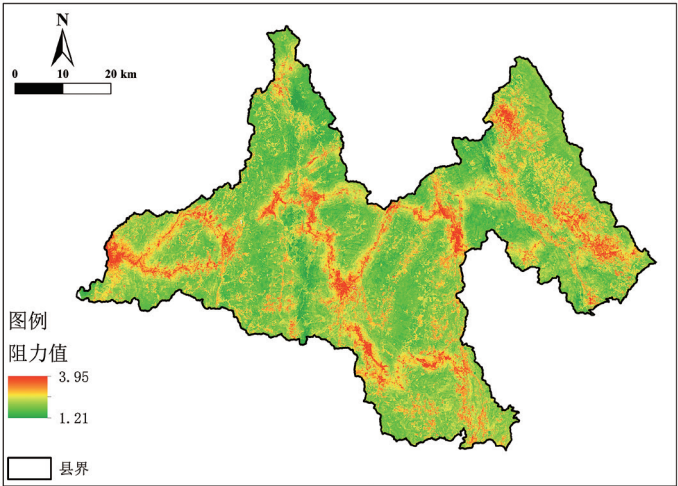


图 5 研究区阻力面构建
Fig.5 Construction of resistance surface in research area

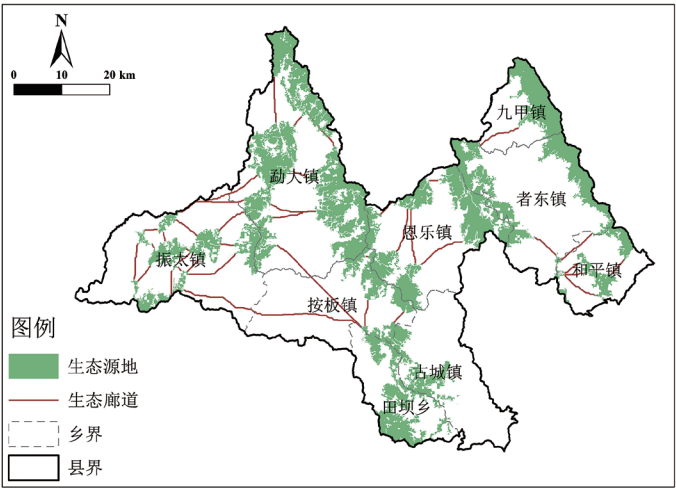


图 6 研究区生态廊道分布
Fig. 6 Distribution of ecological corridors in the study area

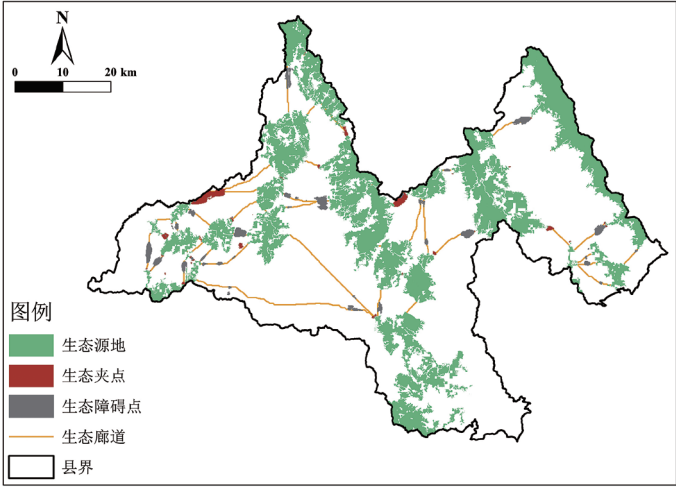


图 7 研究区生态节点分布
Fig.7 Distribution of ecological nodes in the study area

地的位置和数量,结合生态廊道的分布以及镇沅县“五谷五岭”的地貌特征,构建“四区、一轴、六脉、多廊道、多节点”的生态网络结构(图8)。

镇沅县的无量山和哀牢山林地分布广泛,是维持生物多样性的的重要源地,生境质量高,生态阻力低,适合生物栖息,可作为生物多样性功能保持区。西部的澜沧江流域和中部的红河流域,因其水源涵养功能和水土保持功能的评价价值较高,可作为镇沅县水土保持功能区。此区域应建立长效严格的生态源地保护机制,防止水土流失。“一轴”是连接镇沅县东部和西部的重要通道,串联了研究区内多数生态源地及生态夹点,也是连接哀牢山和无量山的重要廊道,对于筑牢镇沅县生态安全屏障具有重要意义。“一轴”建设应限制廊道沿线的开发建设活动强度,设置一定宽度的建设缓冲区,保证廊道的连通性。“六脉”包括研究区内六大河流廊道,包括澜沧江、恩乐江、者干河、勐统河、按板河和振太河,六大河流作为连接着生态源地和支流水系的生态廊道,担负着水源安全、鱼类生物多样性保育等生态服务功能。“多廊道”和“多节点”指筛选构建的生态廊道和累积电流值高的生态踏脚石,它们作为提高生态廊道连通性的关键节点,是县域生态网络建设的优先目标。

研究结合生态网络构建与各乡镇发展现状,提出各乡镇相应的生态发展措施(表4)。根据生态网络的分布特点,勐大镇因生态源地及廊道数量众多,具有重要的生态保育功能,其未来应加大对生态源地和廊道的保护力度;振太镇的生态源地分布较为破碎化,该镇应重点关注生态踏脚石的建设,提升生态廊道的稳定性和增强其抗干扰能力;按板镇、古城镇和田坝乡也需加强对生态源地的保护,增加生态廊道数量以提高连通性;恩乐镇作为镇沅县的县城所在地,应重点保护其东部的大片生态源地,同时应防止城区建设范围无序扩张对生态源地造成破坏;九甲镇、者东镇以及和平镇作为镇沅县矿产能源开发区,应以生态修复为主导策略,减少矿产资源开发对哀牢山生态源地带来的影响。以乡镇建设为出发点,明确各乡镇在生态网络构建方面的重点目标,将生态网络建设纳入乡镇规划,是贯彻落实县域生态网络建设的关键所在。

3 结论

本研究以生态基础良好的镇沅县作为评价对象,从功能和结构2个角度,基于生态系统服务功能重要性评价和MSPA分析综合选取生态源地,同时结合电路理论模型提取

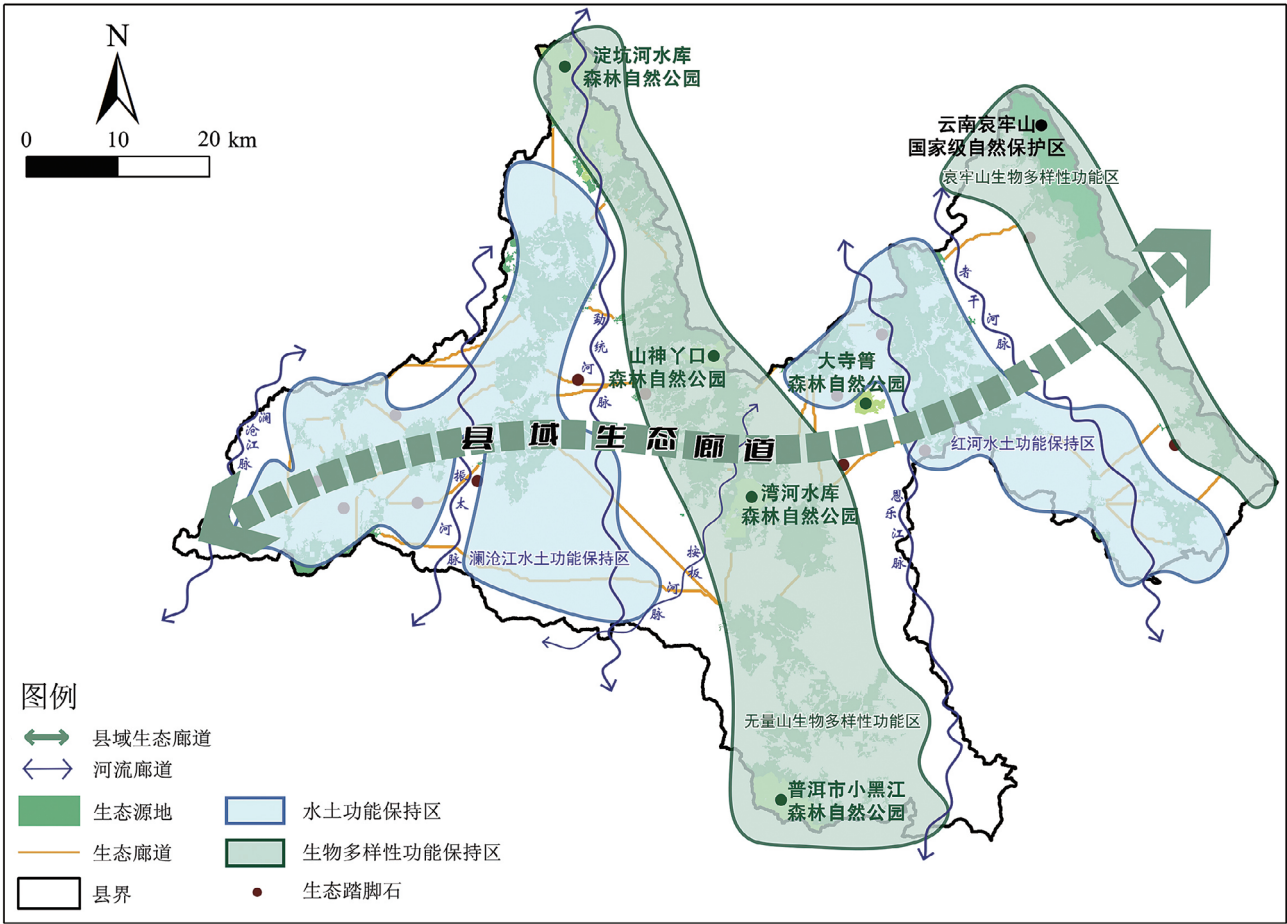


图8 研究区县域生态网络体系
Fig.8 Study area and county ecological network system

表 4 基于生态网络构建的各乡镇未来发展重点及方向

Tab.4 The future development priorities and directions of each township based on the ecological network

地区	乡镇	生态提升方向	发展重点
澜沧江水土功能保持区	勐大镇	加强生态源地的保护，提高生境质量，维持良好的自然生态基底	加强勐大镇生态源地保护建设，推动生态环境的高质量发展
	振太镇		重点推进振太镇生态踏脚石建设，提高生态廊道的连通性
	田坝乡		控制矿产业开发对田坝乡生态源地的影响，可结合古茶树资源，与按板镇共同构建“盐井文化”旅游区
无量山生物多样性功能区	按板镇	完善与补充生态网络，重点保护无量山生态源地，增加生态源地数量，提高区域的生态网络连通性	增强按板镇的生态治理能力，推进绿色基础设施的建设，结合按板的盐井文化，打造以盐井文化为主导的生态宜居小镇
	古城镇		结合古城镇特有红色文化，深化文旅融合，同时保护区域可持续发展的绿色生态基底
红河水土功能保持区	恩乐镇	作为县城的所在地，重点控制城镇化发展对生态网络构建所带来的影响，同时保护其东部大片的生态源地	加强县城周边的林地屏障的构建，提升人居环境，打造绿色现代化宜居城市
	九甲镇		促进九甲镇的生态绿色资源转化，结合野生古茶树群落旅游资源优势，打造茶旅康养特色
哀牢山生物多样性功能区	者东镇	重点保护哀牢山生态源地，同时控制矿产开发区范围，加强景观生态修复，提高该区域的廊道连通性	重点推进者东镇生态廊道建设，提升哀牢山生态源地的连通性，同时可结合“苦聪文化”打造乡村特色旅游
	和平镇		加强和平镇生态源地建设，推动生态环境高质量发展，展现自然森林生态景观风貌

生态廊道并识别重要生态节点，综合构建镇沅县生态网络，最后根据各乡镇的特色定位明确其发展重点，促进各乡镇的协同发展。得出结论如下：

- 1) 镇沅县的生态系统服务功能极重要区和重要区面积占了全县面积的 67.53%，极重要区主要分布在无量山脉及其支脉、哀牢山脉等高海拔地区，土地利用类型以林地为主。
- 2) 由 MSPA 分析可知，前景要素面积为 3 250.18 km²，占研究区总面积的 78.34%，表明镇沅县生态基础良好。位于研究区中部的高连通性区域是无量山脉所在地，对县域整体的景观连通性发挥着至关重要的作用。
- 3) 通过生态系统服务功能重要性评价和 MSPA 分析，共识别出 21 个生态源地，总面积 1291.82 km²。生态源地主要涵盖林地、水域等用地类型，包含无量山和哀牢山两大山脉。运用电路理论模型，研究区共提取 38 条生态廊道，总长度 293.57 km，廊道呈现出“西密东疏”的分布格局；识别出 23.31 km² 的生态夹点区域以及 40.00 km² 的生态障碍点区域，主要分布于振太镇和恩乐镇。夹点区域的土地利用类型以林地和草地为主，障碍点的主要土地利用类型为建设用地。
- 4) 考虑到镇沅县作为高原山地区域中发展相对滞后的地区，依据其现实情况和规划需求，构建“四区、一轴、六

脉、多廊道、多节点”的县域生态网络结构，并结合各乡镇发展规划，将生态网络建设从县域传导至乡镇。

相较于仅从 MSPA 的角度筛选生态源地的方法，本研究将生态系统服务功能评价与 MSPA 分析相结合，综合评估水土保持、水源涵养和生物多样性保护 3 项生态系统服务功能，从功能和结构 2 个角度对生态源地进行综合选取，提高了生态源地选取的全面性。同时运用电路理论模型提取生态廊道，更加全面地考虑景观结构的完整性和连通性，避免了人为选择的主观性。此外，本研究还在生态网络构建中考虑到茶叶等特色产业在镇沅县的经济和生态价值，建议镇沅县未来通过量化茶叶等特色产品的供给功能，合理规划相关种植园的面积和分布，避免过度开发导致其他生态服务功能的衰退，促进生态保护与经济发展的协同发展。

本研究仅从县域层面构建生态网络结构，仍存在局限性。生态网络作为复杂且动态平衡的系统，与周边地区的生态交流过程十分频繁。为了加强区域层面生态源地之间的联系与沟通，并推动生态系统的保护工作，未来研究应当结合更大尺度的城镇群，综合构建多尺度生态网络，推动实现国土空间的可持续发展目标。

注：图片均为作者自绘，底图审图号为 GS（2024）0650。

参考文献:

- [1] 潘竟虎, 王云. 基于 CVOR 和电路理论的讨赖河流域生态安全评价及生态格局优化[J]. 生态学报, 2021, 41 (7): 2582-2895.
- [2] 张洪, 李中元, 李彦. 基于生态安全的山地城镇土地可持续利用模式研究——以云南大理市为例[J]. 地理研究, 2019, 38 (11): 2681-2694.
- [3] ZHOU Y, NING L, BAI X. Spatial and temporal changes of human disturbances and their effects on landscape patterns in the Jiangsu coastal zone, China[J]. Ecol Indic, 2018, 93: 111-122.
- [4] 苏悦, 刘洪, 杨武年, 等. 高原山地区域生态脆弱性研究——以四川省康定市为例[J]. 自然资源遥感, 2024, 36 (3): 206-215.
- [5] 刘滨谊, 王鹏. 绿地生态网络规划的发展历程与中国研究前沿[J]. 中国园林, 2010, 26 (3): 1-5.
- [6] 许峰, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于 MSPA 与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建[J]. 生态学报, 2015, 35 (19): 6425-6434.
- [7] 申佳可, 王云才. 景观生态网络规划: 由空间结构优先转向生态系统服务提升的生态空间体系构建[J]. 风景园林, 2020, 27 (10): 37-42.
- [8] HE D, DENG X, JIN G, et al. Ecological efficiency of grass-based livestock husbandry under the background of rural revitalization: An empirical study of agro-pastoral ecotone[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 848134.
- [9] 马银, 郑敏睿, 郑新奇, 等. 基于 CA-Markov 和 MSPA 的绿色基础设施预测与时空演变分析——以京津冀城市群为例[J]. 生态学报, 2023, 43 (16): 6785-6797.
- [10] 张玥, 许端阳, 李霞, 等. 中-老交通走廊核心区生态廊道构建与关键节点识别[J]. 生态学报, 2020, 40 (6): 1933-1943.
- [11] 胡雅慧, 于强, 岳德鹏, 等. 基于最优粒度的翁牛特旗景观格局优化[J]. 农业机械学报, 2020, 51 (9): 217-225.
- [12] SHUAI N, HU Y, GAO M, et al. Construction and optimization of ecological networks in karst regions based on multi-scale nesting: A case study in Guangxi Hechi, China[J]. Ecological Informatics, 2023, 74: 101963.
- [13] 刘学, 杨春艳, 高艳妮, 等. 厦门市生态安全格局识别与生态管控区分级管控[J]. 生态学报, 2023, 43 (13): 5357-5369.
- [14] 覃彬桂, 林伊琳, 赵俊三, 等. 基于 InVEST 模型和电路理论的昆明市国土空间生态修复关键区域识别[J]. 中国环境科学, 2023, 43 (2): 809-820.
- [15] KONG F, YIN H, NAKAGOSHI N, et al. Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling[J]. Landscape Urban Planning, 2009, 95 (1): 16-27.
- [16] 虞涵, 吴映梅, 李琛, 等. 滇中高原山地城市群土地利用及生境质量的时空演变与多情景模拟[J]. 应用生态学报, 2024, 35 (10): 2842-2852.
- [17] 李恒凯, 李淑芳, 郑春燕, 等. 基于生态系统服务功能的东江流域关键性生态空间识别[J]. 农业工程学报, 2022, 38 (3): 257-266, 323.
- [18] 符素华, 张志兰, 蒋光毅, 等. 三峡库区水土流失综合治理优先小流域识别方法[J]. 水土保持学报, 2020, 34 (3): 79-83, 197.
- [19] 戚宝正, 杨海镇, 周华坤, 等. 基于 GIS 的青藏高原生态服务功能定量评价[J]. 生态科学, 2023, 42 (1): 187-196.
- [20] 李辉, 王福海, 罗胤晨. 基于 NPP 的重庆市“一圈两群”生态系统服务重要性评价及其机理研究[J]. 生态科学, 2021, 40 (3): 64-73.
- [21] 刘一丁, 何政伟, 陈俊华, 等. 基于 MSPA 与 MCR 模型的生态网络构建方法研究——以南充市为例[J]. 西南农业学报, 2021, 34 (2): 354-363.
- [22] GUO H, LIU J, CHEN C. Construction of an Ecological Network of Natural Reserves in Lancang River Basin, Yunnan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43 (2): 193-201.
- [23] 杜佳衡, 王影雪, 潘悦, 等. 高原河谷县域景观生态风险评价与生态安全格局构建: 以云南省大理州永平县为例[J]. 生态学杂志, 2024, 43 (5): 1509-1520.
- [24] 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[J]. 生态学报, 2024, (11): 1-12.
- [25] 王玉莹, 金晓斌, 沈春竹, 等. 东部发达区生态安全格局构建: 以苏南地区为例[J]. 生态学报, 2019, 39 (7): 2298-2310.
- [26] 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]. 环境科学, 2024: 1-14.
- [27] 杨迈, 郑毅, 李晓琳, 等. 洱河流域生态网络构建与分析[J]. 湿地科学, 2024, 22 (2): 254-263.
- [28] 朱捷, 苏杰, 尹海伟, 等. 基于源地综合识别与多尺度嵌套的徐州生态网络构建[J]. 自然资源学报, 2020, 35 (8): 1986-2001.

作者简介:

陈文漪 / 2000 年生 / 女 / 四川绵阳人 / 昆明理工大学建筑与城市规划学院 (昆明 650500) / 在读硕士研究生 / 专业方向为大地景观规划与生态修复

(* 通信作者) 刘敏 / 1987 年生 / 女 / 湖南娄底人 / 博士 / 昆明理工大学建筑与城市规划学院 (昆明 650500) / 副教授 / 研究方向为绿色基础设施理论、绿色空间优化、生态规划设计、生态修复 / E-mail: minliu facp@kust.edu.cn

潘悦 / 2000 年生 / 女 / 云南昭通人 / 西南林业大学园林学院 (昆明 650201) / 在读博士研究生 / 专业方向为绿色空间、景观生态规划

张瀚琪 / 2000 年生 / 女 / 云南文山州人 / 昆明理工大学建筑与城市规划学院 (昆明 650500) / 在读硕士研究生 / 专业方向为大地景观规划与生态修复

董俊梅 / 1996 年生 / 女 / 云南保山人 / 昆明理工大学建筑与城市规划学院 (昆明 650500) / 在读硕士研究生 / 专业方向为大地景观规划与生态修复