

郑州市国土空间生态修复的关键区域识别

樊凡¹, 田国行¹, 刘贺², 王赫¹, 李华威¹

(1.河南农业大学 风景园林与艺术学院, 河南 郑州 450002; 2.郑州市规划勘测设计研究院, 河南 郑州 450052)

摘要: [目的] 对郑州市国土空间生态修复关键区域识别, 为该市和市域国土空间生态修复规划提供科学参考。[方法] 利用形态学空间格局分析(MSPA)识别生态源地, 通过景观连通性评价与电路理论提取生态廊道、识别生态修复关键区域, 最终构建生态网络安全格局。[结果] 郑州市生态源地共37个, 面积共计983.29 km², 呈现西多东少, 南北呈带状聚拢分布; 提取郑州市85条生态廊道, 廊道长度为0.11~47.92 km, 共计689.50 km, 其中关键生态廊道19条、重要生态廊道29条、一般生态廊道37条; 识别生态夹点55处, 总面积2.78 km², 多集于郑州市西南部, 夹点所处位置阻力较小, 土地类型主要以林地、草地、水体为主; 将累计电流值划分3种等级障碍点, 总面积为1 054.31 km², 占研究区面积的14.16%, 主要位置在登封市与新密市主要交通道路周围的城镇区域; 综合考虑研究区自然与社会现状, 提出“一带, 一环, 两区, 四团, 多点”的生态网络安全格局。[结论] 对识别的生态夹点与障碍点分别提出修复策略: 生态夹点区域生态环境较好, 因此以自然生态维护为主; 生态障碍点区域主要为建设用地, 开发强度较大, 受人类干扰程度较多, 因此以人工和自然修复并重的方式为主。

关键词: 电路理论; 生态网络构建; 国土空间生态修复; 关键区域识别; 郑州市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2024)02-0267-10

中图分类号: X321

文献参数: 樊凡, 田国行, 刘贺, 等. 郑州市国土空间生态修复的关键区域识别[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 267-276. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240008.001; Fan Fan, Tian Guohang, Liu He, et al. Identification of critical areas for ecological restoration of territorial space in Zhengzhou City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 267-276.

Identification of Critical Areas for Ecological Restoration of Territorial Space in Zhengzhou City

Fan Fan¹, Tian Guohang¹, Liu He², Wang He¹, Li Huawei¹

(1.College of Landscape Architecture and Art, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China; 2.Zhengzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute, Zhengzhou, Henan 450052, China)

Abstract: [Objective] The key areas of territorial ecological restoration in Zhengzhou City were identified to provide a scientific reference for the planning of territorial ecological restoration in Zhengzhou City. [Methods] Morphological spatial pattern analysis (MSPA) was used to identify ecological source areas, to extract ecological corridors, and to identify key areas for ecological restoration through landscape connectivity assessment and circuit theory, and finally to construct an ecological network security pattern. [Results] There were a total of 37 ecological source areas in Zhengzhou City, covering a total area of 983.29 km², with a distribution pattern characterized as more in the west and less in the east, with a band-like agglomeration in the north-south direction. A total of 85 ecological corridors were extracted in Zhengzhou City, with lengths ranging from 0.11 to 47.92 km, totaling 689.50 km. Among these, there were 19 key ecological corridors, 29 important ecological corridors, and 37 general ecological corridors. Fifty-five ecological pinch points were identified, with a total area of 2.78 km², mainly concentrated in the southwest part of Zhengzhou City. The

收稿日期: 2023-07-31

修回日期: 2023-11-21

资助项目: 河南农业大学横向科研项目“郑州市国土空间生态修复规划(2021—2035年): 生态环境本底评价专题研究”(30802735); 河南省高等学校学科创新引智基地项目(CXJD2021004); 城乡绿地资源调控与景观生态设计学科创新引智基地项目(GXJD006)

第一作者: 樊凡(1999—), 男(汉族), 河南省商丘市人, 硕士研究生, 研究方向为生态修复与城乡绿地系统规划。Email: 1076429230@qq.com.

通信作者: 李华威(1988—), 男(汉族), 河南省周口市人, 博士, 讲师, 主要从事城市景观生态学、城乡绿地系统规划等方面的研究。Email: huaweili@henau.edu.cn.

locations of these pinch points had less resistance, and the main land use types were forests, grasslands, and water bodies. Three levels of obstacle points were classified based on cumulative current values, with a total area of 1 054.31 km², accounting for 14.16% of the study area. These obstacle points were mainly located in urban areas around major transportation roads in Dengfeng City and Xinmi City. Considering the natural and social status of the study area, a “one belt, one ring, two zones, four groups, and multiple points” ecological network security pattern was proposed. [Conclusion] The following strategies for ecological restoration were proposed for the identified ecological pinch points and obstacle points: the ecological pinch point areas have relatively good ecological environments, so natural ecological maintenance should be the main focus. The obstacle point areas are mainly construction land with high development intensity and human disturbance, therefore both artificial and natural restoration should be given equal importance.

Keywords: circuit theory; ecological network construction; ecological restoration of territorial space; critical area identification; Zhengzhou City

随着城镇化进程加快,在推动区域经济发展的同时,人类活动干扰因素增多,也带来了生态环境破坏等问题^[1]。为了促进国土空间生态环境可持续发展,中共中央、国务院于 2019 年正式印发《关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》^[2],将多种空间规划融合为统一的国土空间规划,实现多规合一,确保国土空间生态安全格局稳定发展^[3]。党的十九届五中全会中明确提出,生态文明是社会文明发展的新形态,国土空间生态修复是生态文明建设的核心任务之一^[4]。国土空间生态修复相关研究与实践已成为当下热点,其主要针对生态功能退化^[5]、生态系统受损和空间格局失衡^[6]的国土空间等问题,可以加快构建国土空间生态安全格局,提高国土空间生态承载能力^[7]。因此,科学地识别国土空间生态修复关键区域和构建生态网络格局是开展工作的首要条件和基础,也是锚固城市生态安全底线的关键和难题^[8]。既有的国土空间生态修复研究主要针对某一特定生态系统类型、小尺度层面单点、单要素和单过程的具体工程项目展开,例如矿山生态修复^[9]、水土流失治理^[10]和河流湖泊生态治理等^[11],只考虑到生态修复的局部效果,缺乏整体空间布局的考虑。目前,基于生态系统完整性和结构的连通性去识别生态廊道、生态“夹点”和生态障碍点的研究仍相对较少。城市生态安全格局是维持城市自然生命系统正常运行,保持经济社会持续健康发展的关键性格局^[12]。目前,“源地确定—阻力面构建—廊道提取”已成为生态安全格局分析的基本范式^[13-14],被广泛应用于生态修复^[3]、生态网络^[15]构建等研究。其中生态源地的识别主要有生境质量^[16]、生态系统服务^[17]和形态学空间格局分析(MSPA)等^[18]方法。MSPA 方法其优点在于为生态源地和廊道选取提供科学准确的依据,避免了主观判断,以空间形态与结构连接对源地进行分类^[19]。

廊道的提取方法主要有最小累计阻力模型(MCR)^[20]、欧式距离、重力模型^[21]和电路理论^[22]。电路理论的优点在于利用电荷的随机游走特性^[23],在整个景观中计算出的有效电阻、电流和电压与生态过程相关联,更能体现迁徙路径的随机性^[24],通过计算廊道中电流的大小和密度识别廊道的重要性和生态“夹点”,弥补了以往构建生态网络所使用的方法忽略了不同物种会选择不同的迁徙廊道,以及不能明确廊道具体范围和关键区域的局限性,为国土空间生态修复关键区域识别提供依据。鉴于此,本研究以郑州市为例,基于 MSPA 方法识别生态源地,结合电路理论,提取生态廊道,识别生态夹点和生态障碍点,精准识别郑州市国土空间生态修复关键区域,构建生态网络格局,并提出相应的修复保护策略,以期对郑州市国土空间生态修复规划提供科学参考,同时为市域国土空间生态修复提供有益借鉴。

1 研究区概况

郑州市地处华北平原南部、黄河中上游,居河南省中部偏北,东接开封,西依洛阳,北邻黄河与新乡、焦作相望,南部与许昌、平顶山接壤,全市区东西长约 135~143 km,南北宽约 70~78 km,市域总面积 7 567 km²,介于东经 112°42′—114°14′,北纬 34°16′—34°58′之间。地势呈阶梯状,从中山—低山—丘陵—平原过渡,山地、丘陵平原之间分界明显。地貌类型多样,西南部登封市境内玉寨峰海拔高程 1 512 m,中部低山丘陵区海拔高程一般为 150~300 m,东部平原地势平坦,海拔高程一般小于 100 m,最低处只有 72 m,境内高低相差 1 440 m,区域性差异明显。郑州市地处中原,属北温带半干旱季风型大陆性气候,一年四季变化分明多年平均气温在 14~14.3 °C 之间,市境内有大小河流 124 条,流域面积较大的河流有 29 条,分属

于黄河和淮河两大水系,其中黄河流域 6 条,淮河流域 23 条。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

采用 2021 年郑州市土地利用数据,来源于欧洲航天局(<http://esa-worldcover.org/en>);数字高程模型(DEM)与遥感影像来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),分辨率为 30 m;遥感影像数据为 2021 年 8 月 Landsat-8/OLI 影像,分辨率为 30 m,利用 ENVI 软件提取植被覆盖度;2021 年道路路网与水系等数据来源于全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/>),为矢量格式;《郑州市生物多样性保护规划》(2019—2035 年)、《郑州市湿地资源保护总体规划(2019—2035 年)》来源于从相关部门收集的专题数据。

2.2 研究方法

2.2.1 基于 MSPA 方法的初步生态源地识别 形态学空间格局分析法(MSPA)技术是将二值栅格图像的像元要素进行分割、腐蚀,划定为 7 种不同景观类型且互不相交的栅格图像格式^[25]。结合郑州市自然生态本底,将林地、草地、水域的自然景观“重分类”为前景,将建设用地、耕地、裸地非生态空间“重分类”为背景,最后利用 Guidos Toolbox 软件,采用八邻域方法,得到了 7 种互不重叠的景观要素^[19]。由于源地斑块的大小与生物多样性的丰富程度呈现正相关的关系^[26],消除破碎化细小斑块对郑州市景观格局的影响,因此选取大于 1 km²的核心区斑块作为初步生态源地。

2.2.2 景观连通性分析与核心生态源地识别 景观连通性是维持生态系统稳定性和整体性的关键,也是衡量景观格局和生态过程的重要指标^[27]。因此,在识别的初步生态源地的基础上,基于 Conefor Sensinode 软件,选取可能连通性指数(Π_c)、斑块重要性指数(d_{PC})两项指标来筛选最终生态源地^[28]。计算公式为:

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

式中: n 代表斑块总数; a_i, a_j 代表斑块 i 和 j 的面积; A 代表景观总面积; nl_{ij} 为斑块 i 和 j 之间的连接数。

$$d_{PC} = \frac{PC - PC_{\text{remove}}}{PC} \times 100\% \quad (2)$$

式中: PC_{remove} 为剔除某一斑块后整体斑块连接度的值, d_{PC} 值越大,代表斑块对维持景观连通性的重要性越高。

2.2.3 阻力面构建 科学地构建生态阻力面更有利于识别生态修复关键区域。不同的自然地貌类型特征影响着物种之间的分布及活动、物质能量与信息交流。同时,人类活动的建设程度也阻碍着物种迁徙与生态源地的良性发展。本研究结合自然本底和城市开发强度两方面,参考已有郑州市研究成果^[29-30],选取土地利用类型作为土地利用的阻力因子,高程、坡度作为地形的阻力因子,植被覆盖度作为生境的阻力因子,距主要道路距离和距水域距离作为人类活动干扰的阻力因子(表 1)。基于层次分析法对各阻力因子进行专家打分,得到 5×5 判断矩阵,并由一致性结果($0.0312 < 0.1$)判定该判断矩阵与一致性检验符合要求,最终确定各阻力因子权重值。鉴于目前对阻力系数的确定并没有形成统一的标准,因此本研究结合郑州市生态环境特征和专家意见,设置阻力值范围为 1~1 000,并根据不同阻力因子的影响程度赋予相对阻力值,其值大小作为相对值考虑,没有绝对真实意义^[31]。

2.2.4 基于电路理论的廊道提取与节点识别

(1) 生态廊道提取。电路理论把生态阻力值作为电路阻力值,把生态流作为随机游走电流,能够更好地反映物种的随机游走特征^[32]。本研究基于电路理论采用 Linkage Mapper 软件提取生态廊道,并利用 Centrality Mapper Tool 功能计算生态廊道的流量中心性,量化分析生态廊道的重要性等级^[33]。

(2) 生态夹点识别。在已有廊道基础上,在最小成本通道中识别“夹点”,通常可以作为生态网络中“踏脚石”作用的位置^[34-35],用以优先考虑保护这些对研究区连接性具有重要作用的区域,值得被保护的区域。电路理论的分析是通过源地间电流流动,来确定重要的替代路径和夹点区域。基于 Pinchpoint Mapper 工具的“all to one”模式,获取廊道分布电流密度值,采用自然间断点法分为 5 级,提取最高等级区作为生态夹点,根据前人研究进展,廊道宽度并不影响夹点位置与连通性,经过多次尝试选择 20 km 作为廊道成本加权距离^[21,30]。

(3) 生态障碍点识别。生态障碍点是阻碍物种在源地间迁徙的区域,是廊道连接的障碍区域,运用移动窗口搜索法,检测出改进得分高的节点与原始连接相对较高的节点。通道各区域最大改进得分将被显示在通道中,区域得分越高,说明修复该区域可以更好地提高研究区通道的连通性,可选定此类区域作

为生态节点以改善研究区生态廊道。运用 Linkage Mapper 中的 Barrier Mapper 功能识别障碍点,以 50~500 m 的探测半径和 50 m 的步长,结合实际结果

选择 200 m 梯度作为本研究最合理的迭代半径。将生成的障碍区恢复后系数,利用自然断点法分为三级,划分一级障碍点、二级障碍点和三级障碍点。

表 1 各阻力因子阻力值及权重

Table 1 Resistance values and weights of each resistance factors

阻力层	权重	指标	阻力值	阻力层	权重	指标	阻力值
土地覆盖类型	0.31	林地	1	植被覆盖度	0.13	0~0.2	800
		水体	10			0.2~0.4	500
		草地	50			0.4~0.6	300
		耕地	100			0.6~0.8	100
		裸地	500			>0.8	1
		建设用地	1 000				
坡度/(°)	0.04	0~14	1	距道路距离/m	0.15	0~250	800
		14~24	100			250~500	500
		24~33	200			500~1 000	300
		33~43	500			1 000~1 500	100
		>43	1 000			>1 500	1
高程/m	0.12	68~120	1	距水域距离	0.25	0~100	1
		120~240	100			300~800	100
		240~500	200			800~1 500	200
		500~750	300			1 500~2 000	300
		>750	500			>2 000	500

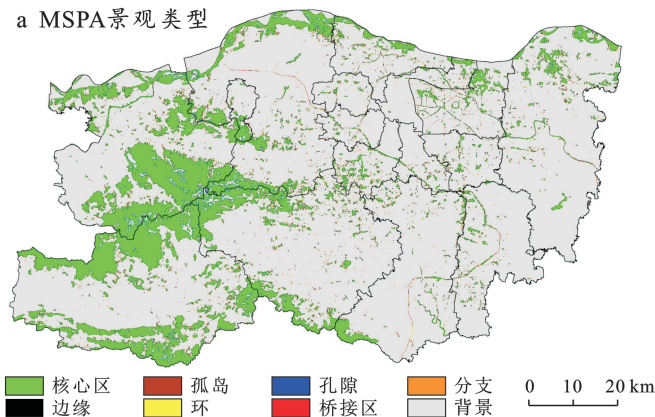
3 结果与分析

3.1 生态源地的分布与分析

根据 MSPA 分析结果和景观类型统计(图 1),郑州市 7 种景观类型总面积为 1 520.11 km²,核心区面积占比最高,为 1 193.32 km²,占有所有景观类型总面

积的 78.50%与郑州市总面积的 15.77%,集中分布在西部林地与北部水域,中部和东部地区建设用地密集,核心区分布较为破碎且分散,景观连通性较差。边缘区作为核心区与外部的过渡带在景观类型中所占比例位于第二,所占比例为 12.90%,其他 5 类景观类型均零星分布,整体景观格局分布较为不均。

a MSPA景观类型



b MSPA景观类型比例

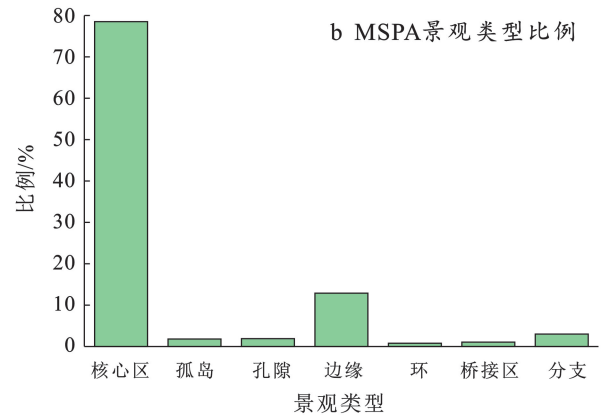


图 1 郑州市景观类型分布的形态学空间格局分析(MSPA)

Fig.1 Morphological spatial pattern analysis (MSPA) on landscape type distribution of Zhengzhou City

根据上述计算结果,得到潜在生态源地 56 个。基于 Conefor 2.6 软件,结合郑州市生态空间与水源涵养地,选择 5 000 m 的距离阈值,0.5 的连接概率,计算郑州市景观连通性指数,将 $d_{PC} \geq 0.2$ 的 37 个斑块作为最终生态源地(图 2)。经统计,生态源地面积

总计 983.29 km²,占研究区总面积的 12.99%,占生态用地的 64.69%。主要分布在西部嵩山文化生态保护区和北部黄河流域郑州段,中部和东部分布极少、景观连通性较差。其中面积最大且贯穿西部的带状核心区斑块为嵩山山脉中段与东段为主体构成,包括箕

山山脉以北的部分地区,是郑州市内生态价值最高的核心区域,面积为 509.12 km²。从整体空间分布来看,由于郑州市面积较大的林地、草地与水体主要分布在巩义、登封和荥阳市北部,主城 9 区土地利用类型基本为建设用地和耕地,生态用地面积较小且破碎化,因此生态源地呈现西多东少,南北呈带状聚拢分布。登封市由于林地和草地分布较多,生态源地面积最大,占生态源地总面积的 35.86%,其次是巩义市、荥阳市、上街区、新密市和郑东新区,其余县区分布较少或没有分布。

3.2 阻力面特征

将 6 个阻力因子指标利用 ArcGIS 软件重分类功能进行分类(图 3),按照表 1 计算阻力因子指标得到综合阻力面(图 4)。可以看出,阻力值高的区域多集中在郑州市惠济区、高新区、中原区、金水区、二七区、管城区、经开区和郑东新区,这些作为郑州市的主城区区域,城市开发强度大,人类活动较为频繁,生态

环境较差,因此阻力值较高。其余高阻力值区域分布较为零散,个别极高值区域多分布在郑州市主要交通要道。整体阻力值空间分布呈由中部向外部降低趋势,与土地利用类型阻力面较为相似;西部巩义市、登封市和新密市林地密集,生态环境优良,生态阻力值低。

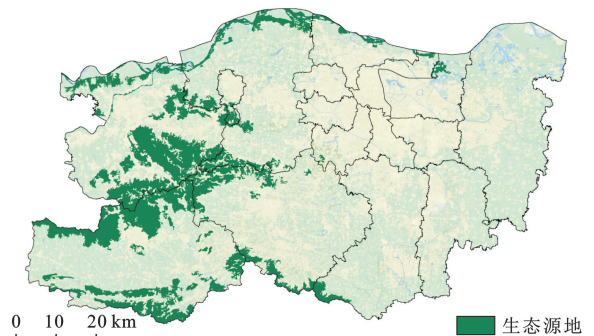
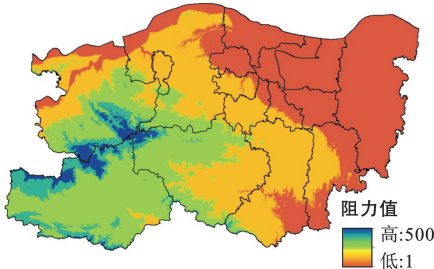


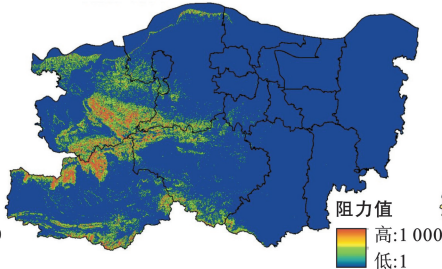
图 2 郑州市生态源地

Fig.2 Ecological sources of Zhengzhou City

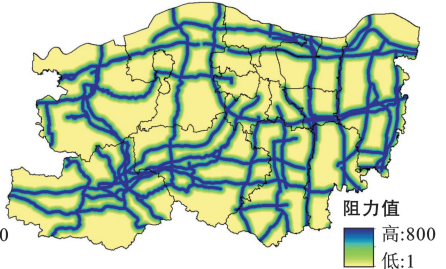
a 高程阻力面



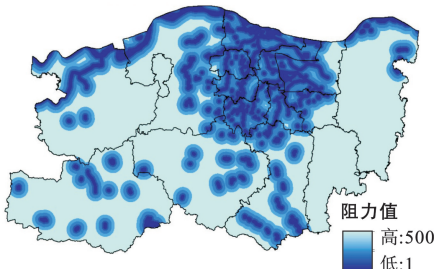
b 坡度阻力面



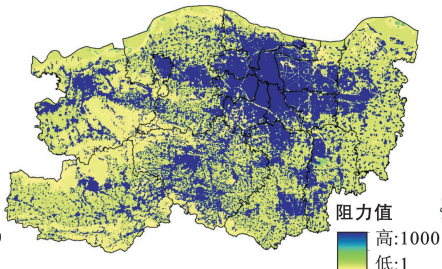
c 距道路距离阻力面



d 距水域距离阻力面



e 土地覆盖类型阻力面



f 植被覆盖度阻力面

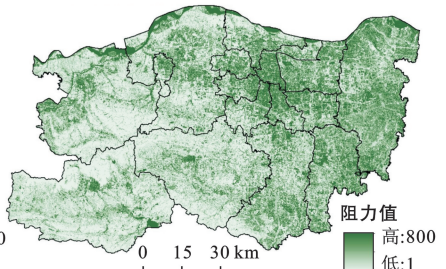


图 3 郑州市阻力面因子分布

Fig.3 Distribution of resistance surface factors in Zhengzhou City

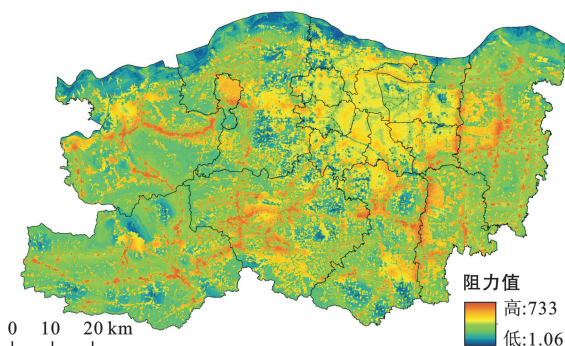


图 4 郑州市综合阻力面

Fig.4 Composite resistance surface in Zhengzhou City

3.3 生态廊道的空间特征

基于 Linkage mapper 工具计算最小成本路径提取生态廊道,对筛选出的 37 个生态源地进行成对计算,得到郑州市 85 条生态廊道,廊道长度为 0.11~47.92 km,共计 689.50 km。将廊道的流量中心性结果按照自然断点法划分为关键生态廊道、重要生态廊道和一般生态廊道 3 个等级^[33](图 5)。其中,关键生态廊道 19 条,长度共计 28.17 km,廊道长度较短,连通性较高;重要生态廊道 29 条,长度共计 118.44 km;一般生态廊道 37 条,长度共计 542.89 km,占总廊道

长度的 78.74%。区域分布特征上,由于大型生态源地主要分布在研究区西部,且源地间相距较短,耗费的成本较低,易于动物迁徙,因此关键生态廊道主要分布在郑州市西部。登封市生态源地分布最多,小型斑块分布在登封市中部,且距离较短;大型斑块分布在登封市南北两侧,距离较远,总体分布格局较为均衡,因此关键生态廊道和一般生态廊道分布最长,分

别为 11.47 和 120.33 km,分别占其廊道类型的 40.72%和 28.77%,该区域生态保护区众多,是物种迁徙的宝贵之地,需优先保护管理关键生态廊道。分布最长的重要生态廊道为巩义市,占其廊道类型的 40.35%。登封市总廊道分布最长,占总廊道长度的 25.37%,其次为新密市和荥阳市,上街区廊道分布最短,长度为 3.3 km。

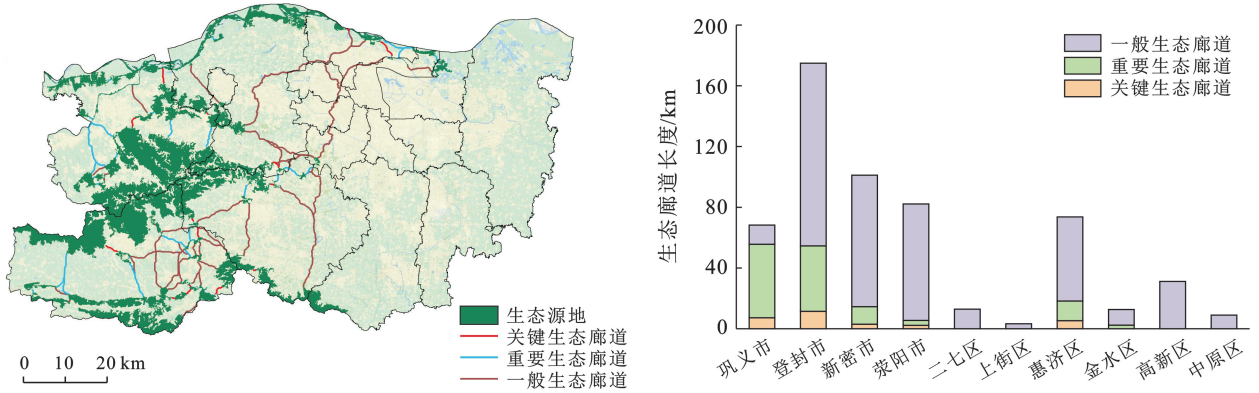


图 5 郑州市生态廊道与区域分布特征

Fig.5 Ecological corridors and regional distribution characteristics in Zhengzhou City

3.4 生态夹点的空间特征

基于电路理论,结合 Circuitscape 软件识别生态夹点,得到研究区累计电流值,提取电流值最高的区域作为生态夹点(图 6),共识别夹点 55 处,总面积 2.78 km²。生态夹点多集于郑州市西南部,其中登封市的夹点数量最多,共计 17 处,均分布于嵩山少林风景区与小红寨、摘星楼景区之间;研究区中部区域廊道较长,物种迁徙所需的阻力较大,因此夹点在研究区中部呈现串珠状布局,起到“踏脚石”的作用,对郑州市的整体连通性起着关键作用。将生态夹点与综合阻力面叠加,生态夹点所处位置阻力较小,易于物种迁徙,需要对这些区域重点保护和管理;叠加土地利用分类与遥感影像,夹点所处的地类主要以林地、草地、水体为主,部分夹点区域植被覆盖率高,在受到一定外界干扰活动时,这些区域反应极其敏感,主要分布在上街区五云山南部的安庄、陈家沟和孙家沟一带以及惠济区大运河湿地周围,这些区域需要加以保护和管理,防止水土流失等自然灾害。

3.5 生态障碍点的空间特征

将累计电流恢复值划分为一级障碍点、二级障碍点和三级障碍点(图 7),总面积为 1 054.31 km²,占研究区面积的 14.16%;一级障碍点面积为 145.76 km²,占障碍点总面积的 13.83%,主要分布在登封市与新密市高速公路、国道、铁路等主要交通道路周围的城镇区域,其中嵩山文化生态保护区的一级障碍点数量

多,面积大,需要加强在嵩山景区周围区域的生态修复;二级障碍点和三级障碍点是一级障碍点的补充,主要出现在源地附近与生态廊道内部,空间结构呈组团式分布,修复难度较大且效果较为缓慢,需制定长期改善和优化方案;与综合阻力面叠加分析,障碍点多分布于阻力值较高的位置,不利于景观格局的连通;与土地利用分类和遥感影像叠加,障碍点所处的地类以建设用地、林地、草地、耕地为主,一级障碍点多分布于建设用地,人类活动干扰较大,物质交流受阻。

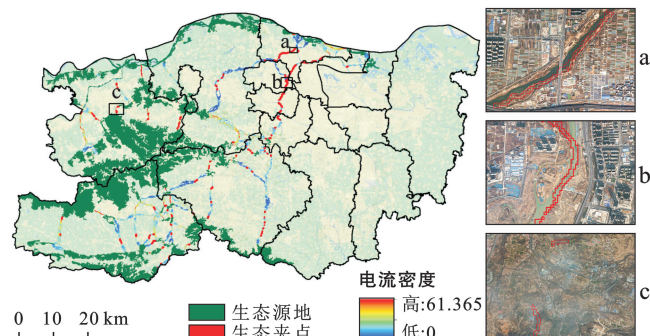


图 6 郑州市生态夹点

Fig.6 Ecological pinchpoints in Zhengzhou City

3.6 国土空间关键区域生态修复策略

基于生态安全格局,结合生态阻力面、生态廊道、生态夹点和生态障碍点等相关概念,并综合考虑郑州市生态本底现状和社会人文经济发展,识别郑州市生态修复的关键区域。在识别过程中发现生态夹点与

一级障碍点存在重合情况,重叠面积共计 0.89 km²,说明这些区域物质能量交流频率较高但阻力值较大,应该优先对这些区域进行生态修复。生态夹点和生态障碍点多位于生态源地附近,大部分位于源地与廊道交汇处。对郑州市关键区域的有效识别与修复,可以保障生态空间稳定性,提高城市生态韧性和生态系统服务能力。

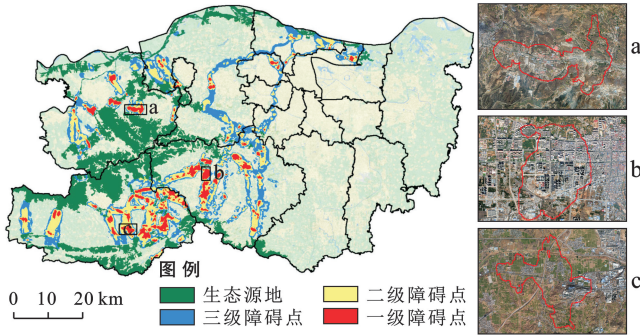


图 7 郑州市生态障碍点

Fig.7 Points of ecological barriers in Zhengzhou City

3.6.1 生态安全格局的确立与优化 基于上述分析结果,结合《郑州市国土空间总体规划(2021—2035年)》《河南省市县级国土空间生态修复规划编制指南》(试行),提出“一带,一环,两区,四团,多点”的网络格局(图 8)。一带是指郑州市北部黄河生态文化保护带,该带是黄河流域的关键节点和黄河文化的代表城市,也是黄河文明重要的展示窗口;一环是指由西部山区屏障至主城区的生态廊道所形成的城市山水生态环;两区分别指嵩山文化生态保护区和中心城区核心发展区,嵩山山脉作为自然保护地体系,确保自然景观与生物多样性得到有效保护,主城区作为核心发展区,通过组团城镇构建的蓝绿廊道网络,构成复合生态空间;四团是指障碍点汇集处,需要重点修复与整治;多点是指生态网络中的夹点区域,夹点作为生态网络中节点的位置,需要有针对性地采取修复工程,确保生态网络连通性更顺畅。

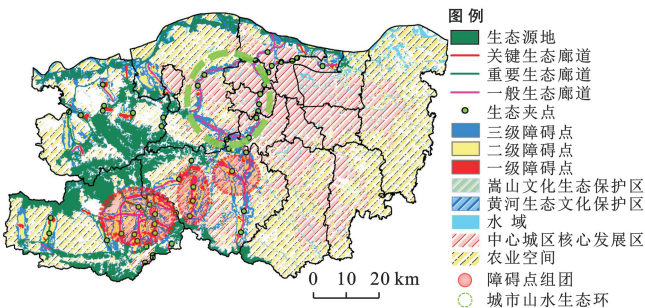


图 8 郑州市生态安全格局

Fig.8 Ecological network pattern of Zhengzhou City

3.6.2 优先保护区域生态修复策略 嵩山文化生态保护区和黄河生态文化保护带自然景观、生态本底优越,因此该区域内的夹点以生态维护为主:加大嵩山国家森林公园自然生态系统功能的修复,提高森林质量,增加林木多样性,提升森林生态系统水源涵养和水土保持功能。建立黄河流域保护区,开展河岸治理,加大黄河防护林建设力度,通过实施各种修复措施,提高防护林质量。实施农田防护、坡耕地整治等工程,改善土壤生态环境。中心城区核心发展区的夹点通过增加口袋公园、社区公园等,增加整体景观连通性。对生态夹点建立缓冲区,防止过多的人为干扰。采取植被恢复,小流域综合治理等措施,增加其生态空间的稳定性。

3.6.3 廊道连接障碍区域生态修复策略 由于生态障碍点主要为建设用地,受人类干扰较多,因此该区域内以人工和自然修复并重的措施。嵩山文化生态保护区内的障碍点集中分布,该区域内城市开发强度不高,建设用地以农村宅基地为主,因此在修复时建议依托乡村振兴战略,通过打造特色农业,推进社会经济建设活动引导生态效益的发挥。黄河生态文化保护带的障碍点以生态治理为主,建设河流两岸的绿植缓冲带和隔离带,维持水源涵养生态空间。中心城区核心发展区的障碍点通过调整建设用地局部布局,改善绿地结构布局,增加点状绿地,实行见缝插绿,缓解城市内涝,提高城市生态系统韧性。

4 结论

(1) 郑州市生态源地面积 983.29 km²,占郑州市总面积的 15.77%,类型以林地为主,说明林地在郑州市生态网络格局中至关重要;源地主要分布在郑州市北部黄河流域和西部山地、丘陵地带,中部和东部分布较少、源地连通性较弱;郑州市综合生态阻力中低值区面积占比较大,主城区与外围城镇两极分化,道路对阻力面的分割效应较为明显。

(2) 基于电路理论提取郑州市生态廊道 85 条,关键廊道和重要廊道主要分布在巩义和分登封,一般廊道主要分布在郑州市中部区域。识别生态夹点 55 处,总面积 2.78 km²,类型主要以林地、草地、水体为主;由于登封市地理环境优美、山脉众多,因此夹点分布最多;将识别的生态障碍点划分 3 个等级,总面积为 1 054.31 km²,地类类型主要为建设用地、耕地、林地和草地;主要分布在登封市与新密市高速公路和国道周围的城镇区域和综合阻力值较高的区域。

(3) 结合郑州市地理环境特征与社会人文因素,提出“一带,一环,两区,四团,多点”生态网络安全格

局,并提出修复策略;生态夹点区域生态本底优越,应加强水土涵养林和河流保护区的建设;生态障碍点区域建设用地占比较多,应发展乡村特色农业振兴经济的同时带来生态效益。

本研究对提取的不同等级的生态廊道宽度设置尚未涉及,后续仍有待进一步研究;生态夹点和障碍点的阈值设定结合实际情况进行调整。此外,为了更准确地识别和诊断国土空间生态修复问题,未来研究应考虑郑州市生态环境质量时空变化及其驱动因素的研究。

参考文献(References)

- [1] 李士达.城镇化进程中生态环境治理存在的问题与对策研究[J].环境与发展,2017,29(9):222-225.
Li Shida. Study on the problems and countermeasures of ecological environment management in the process of urbanization [J]. Environment and Development, 2017,29(9):222.
- [2] 宋明洁,卢新海,潘方杰.基于地理设计的智慧国土空间规划框架构建:以县级国土空间总体规划为例[J].自然资源学报,2022,37(11):2990-3004.
Song Mingjie, Lu Xinhai, Pan Fangjie. A Geodesign framework for smart territory spatial planning: A case study for county-level comprehensive territory spatial planning [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(11):2990-3004.
- [3] 秦钦兰,尹海伟,朱梓铭,等.柳州市国土空间生态修复区划策略研究[J].规划师,2020,36(14):56-62.
Qin Qinlan, Yin Haiwei, Zhu Ziming, et al. Zoning strategy of ecological restoration in Liuzhou national land-space plan [J]. Planners, 2020,36(14):56-62.
- [4] 彭建,吕丹娜,董建权,等.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[J].自然资源学报,2020,35(1):3-13.
Peng Jian, Lyu Danna, Dong Jianquan, et al. Processes coupling and spatial integration: Characterizing ecological restoration of territorial space in view of landscape ecology [J]. Journal of Natural Resources, 2020,35(1):3-13.
- [5] 刘新卫,黎明,吴悠,等.国土空间生态修复规划:内涵体系、编制逻辑与实施路径[J].中国土地科学,2023,37(3):11-19.
Liu Xinwei, Li Ming, Wu You, et al. Territorial ecological restoration planning: Connotation system, compilation logic and implementation path [J]. China Land Science, 2023,37(3):11-19.
- [6] 张英男,龙花楼.面向城乡融合发展的县域国土空间规划:理论认知与实践探索[J].中国土地科学,2023,37(2):1-10.
Zhang Yingnan, Long Hualou. Theory and practice of county-level territorial space planning under the context of urban-rural integrated development [J]. China Land Science, 2023,37(2):1-10.
- [7] 高世昌.国土空间生态修复的理论与方法[J].中国土地,2018(12):40-43.
Gao Shichang. Theory and methods of land spatial ecological restoration [J]. China Land, 2018(12):40-43.
- [8] 付凤杰,刘珍环,刘海.基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别:以贺州市为例[J].生态学报,2021,41(9):3406-3414.
Fu Fengjie, Liu Zhenhuan, Liu Hai. Identifying key areas of ecosystem restoration for territorial space based on ecological security pattern: A case study in Hezhou City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(9):3406-3414.
- [9] 白中科,周伟,王金满,等.再论矿区生态系统恢复重建[J].中国土地科学,2018,32(11):1-9.
Bai Zhongke, Zhou Wei, Wang Jinman, et al. Rethink on ecosystem restoration and rehabilitation of mining areas [J]. China Land Science, 2018,32(11):1-9.
- [10] 姜德文.山水林田湖草系统治理之水土保持要义[J].地学前缘,2021,28(4):42-47.
Jiang Dewen. Essentials for soil and water conservation in ecosystem management [J]. Earth Science Frontiers, 2021,28(4):42-47.
- [11] 魏静,王欢元,孙增慧,等.富平石川河的生态修复[J].生态学杂志,2019,38(8):2545-2552.
Wei Jing, Wang Huanyuan, Sun Zenghui, et al. Ecological restoration of Shichuan River in Fuping [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019,38(8):2545-2552.
- [12] 吴健生,马洪坤,彭建.基于“功能节点—关键廊道”的城市生态安全格局构建:以深圳市为例[J].地理科学进展,2018,37(12):1663-1671.
Wu Jiansheng, Ma Hongkun, Peng Jian. Improving urban ecological security pattern based on functional nodes-key corridors: A case study of Shenzhen City [J]. Progress in Geography, 2018,37(12):1663-1671.
- [13] 陈昕,彭建,刘焱序,等.基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建[J].地理研究,2017,36(3):471-484.
Chen Xin, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Constructing ecological security patterns in Yunfu city based on the framework of importance-sensitivity-connectivity [J]. Geographical Research, 2017,36(3):471-484.
- [14] 黄木易,岳文泽,冯少茹,等.基于 MCR 模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化[J].自然资源学报,2019,34(4):771-784.
Huang Muye, Yue Wenzhe, Feng Shaoru, et al. Analysis of spatial heterogeneity of ecological security based on MCR model and ecological pattern optimization in the Yuexi County of the Dabie Mountain Area [J].

- Journal of Natural Resources, 2019, 34(4): 771-784.
- [15] 李萱, 龚苑红, 覃盟琳, 等. 海岸带城市蓝绿空间碳汇基础设施网络分析: 以广西北部湾为例[J/OL]. 广西科学, 1-14. [2023-12-30]. <https://doi.org/10.13656/j.cnki.gxkx.20230519.001>.
- Li Xuan, Gong Yuanhong, Tan Mengli, et al. Carbon sink infrastructure network analysis of blue-green space in coastal cities—a case study of Guangxi Beibu Gulf [J/OL]. Guangxi Science, 1-14. [2023-12-30]. <https://doi.org/10.13656/j.cnki.gxkx.20230519.001>.
- [16] 耿建伟, 余坤勇, 谢祯, 等. 基于生境质量模型的福州市绿色基础设施网络优化研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2023, 43(2): 118-125.
- Geng Jianwei, Yu Kunyong, Xie Zhen, et al. Habitat-quality-model based optimization of green infrastructure network in Fuzhou [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2023, 43(2): 118-125.
- [17] 王晨旭, 刘焱序, 于超月, 等. 面向居民生态福祉的国土空间生态网络构建: 以临沂市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(21): 8650-8663.
- Wang Chenxu, Liu Yanxu, Yu Chaoyue, et al. Construction of terrestrial ecological network for the improvement of residents' ecological benefits: A case study of Linyi City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(21): 8650-8663.
- [18] Ye Hui, Yang Zhaoping, Xu Xiaoliang. Ecological corridors analysis based on MSPA and MCR model: A case study of the Tomur World Natural Heritage Region [J]. Sustainability, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020, 12(3): 959.
- [19] 廖剑威, 闫淑君, 叶佳伟, 等. 基于 MSPA-Linkage Mapper 的福州滨海长乐区生态网络构建与优化[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(5): 243-251.
- Liao Jianwei, Yan Shujun, Ye Jiawei, et al. Construction and optimization of ecological network based on MSPA-linkage mapper in the Changle district, Fuzhou [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(5): 243-251.
- [20] 张亚丽, 尹伟特, 胡希军, 等. 基于 MSPA 与 MCR 模型的资源节约型生态网络构建: 以福建省东山岛为例[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(5): 254-261.
- Zhang Yali, Yin Weite, Hu Xijun, et al. The construction of resource-saving ecological network based on MSPA and MCR model: A case study of Dongshan Island in Fujian Province [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(5): 254-261.
- [21] 魏家星, 宋轶, 王云才, 等. 基于空间优先级的快速城市化地区绿色基础设施网络构建: 以南京市浦口区为例[J]. 生态学报, 2019, 39(4): 1178-1188.
- Wei Jiaying, Song Yi, Wang Yuncai, et al. Urban green infrastructure building for sustainability in areas of rapid urbanization based on evaluating spatial priority: A case study of Pukou in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(4): 1178-1188.
- [22] 汪勇政, 李久林, 顾康康, 等. 基于形态学空间格局分析法的城市绿色基础设施网络格局优化: 以合肥市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 2022-2032.
- Wang Yongzheng, Li Jiulin, Gu Kangkang, et al. Optimization of urban green infrastructure network layout based on MSPA-CIRCUIT: Case of Hefei [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 2022-2032.
- [23] 马驰骋, 杨东峰, 李康康. 国土空间视角下高原寒地县域绿色基础设施网络构建: 以西藏索县为例[J]. 西部人居环境学刊, 2022, 37(6): 59-65.
- Ma Chicheng, Yang Dongfeng, Li Kangkang. Construction of green infrastructure network in cold plateau counties from the perspective of territorial space: Taking Suo County, Tibet as an example [J]. Journal of Human Settlements in West China, 2022, 37(6): 59-65.
- [24] 闫王玉, 孙彦伟, 刘敏. 基于生态安全格局的上海国土空间生态修复关键区域识别与修复策略[J]. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3369-3378.
- Yan Yuyu, Sun Yanwei, Liu Min. Identification and restoration strategy of key areas for territorial space ecological restoration in Shanghai, China based on ecological security pattern [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12): 3369-3378.
- [25] 王越, 林箐. 基于 MSPA 的城市绿地生态网络规划思路的转变与规划方法探究[J]. 中国园林, 2017, 33(5): 68-73.
- Wang Yue, Lin Qing. The transformation of planning ideas and the exploration of planning methods of urban green space ecological network based on MSPA [J]. Chinese Landscape Architecture, 2017, 33(5): 68-73.
- [26] 刘世梁, 侯笑云, 尹艺洁, 等. 景观生态网络研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(12): 3947-3956.
- Liu Shiliang, Hou Xiaoyun, Yin Yijie, et al. Research progress on landscape ecological networks [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(12): 3947-3956.
- [27] An Yi, Liu Shiliang, Sun Yongxiu, et al. Construction and optimization of an ecological network based on morphological spatial pattern analysis and circuit theory [J]. Landscape Ecology, 2021, 36(7): 2059-2076.
- [28] 田硕娟, 张文君, 何灵, 等. 基于 Linkage Mapper 与复杂网络的成都市生态网络构建与优化[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(3): 176-184.
- Tian Shuojuan, Zhang Wenjun, He Ling, et al. Construction and optimization of Chengdu ecological network based on linkage mapper and complex network [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023,

- 38(3):176-184.
- [29] 王冬梦.基于空间优先级的郑州市绿色基础设施网络分析与优化研究[D].河南 郑州:河南农业大学,2023.
Wang Dongmeng. Analysis and optimization of green infrastructure network in Zhengzhou based on spatial priority [D]. Zhengzhou, Henan: Henan Agricultural University, 2023.
- [30] 霍锦庚,时振钦,朱文博,等.郑州大都市区生态网络构建及格局优化[J].应用生态学报,2023,34(3):742-750.
Huo Jingeng, Shi Zhenqin, Zhu Wenbo, et al. Construction and pattern optimization of ecological network in Zhengzhou metropolitan area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(3):742-750.
- [31] 刘曼舒.国土空间规划背景下郑州市城市增长边界划定[D].河南 郑州:河南农业大学,2020.
Liu Manshu. Delineation of urban growth boundaries in Zhengzhou under the background of national spatial planning [D]. Zhengzhou, Henan: Henan Agricultural University, 2020.
- [32] 韦宝婧,苏杰,胡希军,等.基于“HY-LM”的生态廊道与生态节点综合识别研究[J].生态学报,2022,42(7):2995-3009.
Wei Baojing, Su Jie, Hu Xijun, et al. Comprehensive i-
- dentification of eco-corridors and eco-nodes based on principle of hydrological analysis and Linkage Mapper [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(7):2995-3009.
- [33] 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.
Qin Bingui, Lin Yilin, Zhao Junsan, et al. Identification of key areas for the ecological restoration of territorial space in Kunming based on the InVEST model and circuit theory [J]. China Environmental Science, 2023,43(2):809-820.
- [34] 吴映梅,李琛,高彬斌,等.高原湖泊城市生态安全格局构建:以大理市为例[J].生态学报,2023,43(19):8153-8166.
Wu Yingmei, Li Chen, Gao Binpin, et al. Construction of urban ecological security pattern in highland lakes cities: The case of Dali City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(19):8153-8166.
- [35] 宋利利,秦明周.整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J].应用生态学报,2016,27(10):3344-3352.
Song Lili, Qin Mingzhou. Identification of ecological corridors and its importance by integrating circuit theory [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016,27(10):3344-3352.

(上接第 49 页)

- [17] 王海峰,吴永祥,丁新建,等.风沙环境下高速公路路基风压及沙粒沉积分析研究[J].科技风,2022(31):70-72.
Wang Haifeng, Wu Yongxiang, Ding Xinjian, et al. Highway roadbed sand environment wind and sand deposition analysis research [J]. Technology Wind, 2022(31):70-72.
- [18] 江兴旺,张婷,王琳,等.沙漠戈壁地区高等级公路风沙防治研究[J].公路,2015,60(4):251-254.
Jiang Xingwang, Zhang Ting, Wang Lin, et al. Study on the prevention and control of wind-blown sand in high-grade highways in desert Gobi area [J]. Highway, 2015,60(4):251-254.
- [19] 袁媛,刘宽河.沙害对公路路基高度的影响[J].内蒙古公路与运输,2004(3):1-4.
Yuan Yuan, Liu Kuanhe. Effect of sand damage on the height of highway subgrade [J]. Highways and Transportation in Inner Mongolia, 2004(3):1-4.

(上接第 118 页)

- [36] Chow T L, Rees H W. Effects of coarse-fragment content and size on soil erosion under simulated rainfall [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1995,75(2):227-232.
- [37] Sekucia F, Dlapa P, Kollár J, et al. Land-use impact on porosity and water retention of soils rich in rock fragments [J]. Catena, 2020,195:104807.
- [38] Hlaváčíková H, Novák V, Holko L. On the role of rock fragments and initial soil water content in the potential subsurface runoff formation [J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2015,63(1):71-81.
- [39] Poesen J, De Luna E, Franca A, et al. Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content [J]. Catena, 1999,36(4):315-329.
- [40] 宋月君,黄炎和,杨洁,等.赣中第四纪红壤区马尾松林下水土流失特征及防治成效分析[J].干旱区资源与环境,2018,32(4):119-125.
Song Yuejun, Huang Yanhe, Yang Jie, et al. The characteristics of soil and water loss in *Pinus massoniana* forest in red soil region of Jiangxi Province and the effect of soil and water conservation [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018,32(4):119-125.