

基于 MCR 模型的江西省抚州市生态安全格局构建

陈群¹, 刘平辉¹, 朱传民²

(1. 东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013; 2. 江西省数字国土重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: [目的] 开展城市生态安全格局构建和主要生态廊道识别研究, 为城市国土空间规划中生态格局的优化提供科学参考。[方法] 以江西省抚州市为研究区, 选取土地利用因子, 水土保持功能重要性以及生态敏感性等多种因子构建最小累积阻力模型, 依据生物多样性维护功能重要性评价、全域水文分析、生态保护红线以及自然保护地识别生态源地, 依托 MCR 模型和 ArcGIS 中的空间分析工具开展研究。[结果] ① 抚州市整体生态环境良好, 水土保持功能极重要性区所占比例为 49.97%, 主要集中在抚州市中部地区, 以黎川县、乐安县、宜黄县和南丰县为主; 抚州市生态敏感性极重要性区所占比例为 1.39%; ② 生态源地面积 3302.34 km², 所占比例为 17.57%, 以抚州市东部和西南部为主; ③ 以全域的生态要素和地形地貌等为基底, 抚州市呈现出“一轴、两屏、多廊、多节点”的生态安全格局。[结论] 结合生态源地、生态廊道和生态节点, 形成完整、系统的生态保护格局和开敞空间网络体系, 维护抚州市生态安全和生物多样性。

关键词: 生态空间; 生态廊道; 格局优化; MCR 模型; 江西省抚州市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)02-0210-09

中图分类号: X826

文献参数: 陈群, 刘平辉, 朱传民. 基于 MCR 模型的江西省抚州市生态安全格局构建[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 210-218. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220124.001; Chen Qun, Liu Pinghui, Zhu Chuanmin. Construction of an ecological security structure in Fuzhou City of Jiangxi Province based on an MCR model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 210-218.

Construction of an Ecological Security Structure in Fuzhou City of Jiangxi Province Based on an MCR Model

Chen Qun¹, Liu Pinghui¹, Zhu Chuanmin²

(1. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 2. Jiangxi Province Key Lab for Digital Land, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: [Objective] An urban ecological security pattern were constructed to identify the main ecological corridors in order to provide a scientific reference for optimizing the ecological pattern in urban land spatial planning. [Methods] Fuzhou City of Jiangxi Province was used as a research area. A minimum cumulative resistance (MCR) model was constructed by selecting various land use factors, soil and water conservation function importance, and ecological sensitivity. The importance of a biodiversity maintenance function, global hydrological analysis, ecological protection red line, and natural protection were used to identify ecological sources using the MCR model and spatial analysis tools in ArcGIS. [Results] ① The overall ecological environment of Fuzhou City was good. The proportion of areas with extremely important soil and water conservation function was 49.97%, mainly concentrated in the central area of Fuzhou City, mainly Lichuan County, Le'an County, Yihuang County, and Nanfeng County. The proportion of extremely important ecological sensitivity was 1.39%; ② The ecological source area was 3 302.34 km², accounting for 17.57%, mainly in the east and southwest parts of Fuzhou City; ③ Based on the ecological elements and topography of the entire region, Fuzhou City presented an ecological security pattern of “one axis, two screens, multiple corridors, and multiple nodes”. [Conclusion] By combining ecological sources, ecological

收稿日期: 2021-08-28

修回日期: 2021-12-03

资助项目: 江西省高校人文社会科学研究项目“乡村快速发展下的耕地利用转型与调控研究”(JC19101); 抚州市社会科学规划项目(19SK18)

第一作者: 陈群(1996—), 女(汉族), 安徽省六安市人, 硕士研究生, 研究方向为地理学。Email: 798246803@qq.com。

通讯作者: 刘平辉(1969—), 男(汉族), 江西省抚州市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为土地利用规划与土地资源管理。Email: pinghui.liu@126.com。

corridors, and ecological nodes, a complete and systematic ecological protection pattern and an open spatial network system can be formed to maintain the ecological security and biodiversity of Fuzhou City.

Keywords: ecological space; ecological corridor; pattern optimization; MCR model; Fuzhou City of Jiangxi Province

近年来,随着社会发展加快,人类活动对于生态空间格局的整体性和贯通性造成了一定程度的破坏,引发了耕地破坏、林草地损毁、湿地退化等生态环境问题,使区域生态系统平衡遭到破坏,生态网络中重要生态源地逐渐退化或消失。因此,加强对生态廊道及生态空间格局的研究,对于国土空间规划中的三线划定以及区域可持续发展有着重要的支撑作用。20 世纪 70 年代开始,国外学者对于生物多样性保护与生态环境保护等方面进行了较多的探索研究^[1-2],其中最小累计阻力模型(minimal cumulative resistance, MCR)是目前学者们用于生态格局探究的重要方法。MCR 模型是以“源—汇”为理论基础,能够较好地反映景观格局变化对生态过程演变的影响,且该模型能通过阻力面的权重生成最佳路径,用于提取潜在生态廊道。近年来,国内学者们基于 MCR 模型在生态空间格局、城市空间规划、土地利用等诸多领域中进行了尝试和探索。王戈等^[3]在生态格局的识别中以景观生态学理论为指导,构建层级网络用于提取模型框架。苏凯等^[4]利用引力模型和 MCR 模型构建了森林—草地生态网络(FG 生态网络)多场景仿真模型,提取出不同发展策略下的生态网络。当前生态安全格局研究中主要思路是构建“源地—廊道”组合,生态源地的识别是生态空间格局构建的基础。生态空间格局的精准识别对城镇开发边界的划定和国土空间规划中功能分区等具有重要参考意义^[5-9]。抚州市是江西省东部的生态屏障,位于江西省和福建省

交界处,承担重要的生态调节与保护功能。根据《江西省主体功能区划》,抚州市也是全省重点生态功能区,境内南丰县、黎川县、宜黄县、资溪县、广昌县属于国家重点生态功能区,生态保护意义重大。因此,本研究以抚州市为例,基于 MCR 模型识别城市的生态廊道与生态空间格局,以期对抚州市国土空间规划中生态格局的优化提供科学参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

抚州市位于江西省东部,地处北纬 26°29′—28°30′,东经 115°35′—117°18′之间。其东部地区与福建省三明市为邻,南部是江西省赣州市,西边则是吉安市和宜春市,北毗鹰潭市和南昌市。抚州市国土总面积约 18 800 km²,占江西省总面积的 11.27%。其地势南高北低,东临武夷山脉,西南临雩山山脉,构成北东向斜“川”字型地貌框架。该市 2020 年的森林覆盖率为 66.30%,是江西省重点林区之一,处于武夷山生物多样性保护优先区域和赣东武夷山—怀玉山脉亚热带生物多样性关键区域。

1.2 数据来源

本研究中数据来源及处理方法详见表 1。其中 NDVI 数据以及 DEM 数据来自 NASA 网站,交通数据以及抚州市第三次国土调查阶段性成果来自于抚州市自然资源局,均采用栅格 tif 文件,分辨率为 100×100 m。

表 1 主要数据来源及处理方法

数据名称	数据来源	计算方式	数据年份
NDVI 数据	NASA MOD13Q1 NDVI 数据	mrt 转换工具将 hdf 文件转换为 tif 文件	2014—2018 年
土壤数据	世界土壤数据库	参考双评价指南公式计算	—
高程数据	地理空间数据云	重采样	—
降雨量	中国气象同化驱动数据集	薄盘光滑样条插值	2014—2018 年
植被覆盖	NASA MOD13Q1 NDVI 数据	mrt 转换工具将 hdf 文件转换为 tif 文件	2019 年
交通数据	抚州市自然资源局	交通网络法	2019 年
土地利用数据	抚州市自然资源局	重分类转 tif 文件	2019 年

2 研究方法

2.1 抚州市重要生态源地与生态节点选取

生态源地是生态廊道连通的主要区域,是生态网络和生态格局构建过程中的核心区域。本文依托于

生态保护红线和自然保护地的分布,结合生物多样性维护功能重要性评价结果,考虑景观格局和生态系统的连续性,选取重要的生态源地和生态节点。对抚州市的生物多样性维护功能重要性的评价采用 NPP 定量指标评估方法,以生物多样性维护服务能力指数作

为评估指标,计算公式为

$$S_{\text{bio}} = \text{NPP}_{\text{mean}} \times F_{\text{pre}} \times F_{\text{tem}} \times (1 - F_{\text{alt}}) \quad (1)$$

式中: S_{bio} 为生物多样性维护服务能力指数; NPP_{mean} 为植被净初级生产力平均值; F_{pre} 为平均降水量; F_{tem} 为平均气温; F_{alt} 为海拔因子。

2.2 抚州市阻力面构建

2.2.1 阻力面因子 生态廊道是连接空间分布上较为分散的生态景观单元的支撑^[10-13],可以促进区域内物质的循环流通,对于构建全域全要素的完整生态系统有重要意义。结合抚州市自然地理格局与生态环境要素,以抚州市土地利用因子、水土保持功能重要性评价、生态敏感性、地形地貌、交通网络密度共 5 个方面作为阻力层,细化为 18 个阻力因子。土地利用因子阻力层主要是考虑不同地类对于生态环境的阻力程度不同,其中建设用地对于生态廊道的构建阻力值最大;水土保持重要性和生态敏感性指标则是考虑未来承担水土保持功能的重要区域以及生态敏感性区域对于生态廊道识别的影响,计算方式参考《生态保护红线划定指南》;地形地貌阻力层是考虑起伏度和高程对于动物迁徙途径的选择有一定干预;交通网络密度阻力层则是考虑不同的道路类型会在一定程度上阻断动物的迁徙廊道,例如公路中的高速作为全封闭的快速道路,对于动物的迁徙途径的选择有很大的阻断几率。本文采用层次分析法计算不同阻力层的权重,基于已有文献,将各指标要素的相对重要性进行两两对比,借助软件(和积法)计算指标权重,通过一致性检验。计算公式为:

$$\text{CI} = (m - n) / (n - 1) \quad (2)$$

$$\text{CR} = \text{CI} / \text{RI}$$

式中: m 表示最大特征根; CI 为定义一致性指标; CR 为定义一致性比率, CR 值越小,则说明判断矩阵一致性越好,若 CR 值小于 0.1,则判断矩阵满足一致性检验。

表 3 土地利用因子阻力值

土地利用类型	耕地	林地	园地	草地	水域	建设用地	其他土地
因子赋值	30	1	10	5	40	100	80

(2) 水土保持功能重要性。水土保持功能重要性评价以水土保持量(潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值)作为评价指标,采用修正的水土流失方程(RUSLE)进行计算,具体计算公式为:

$$A = R \times K \times L \times S \times (1 - C) \quad (3)$$

式中: A 为水土保持量; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; L 表示坡长因子; S 表示坡度因子; C 为植被因子。将综合评价结果分为极重要区、重要区和一般重要区共计 3 个等级。

选取的阻力层以及对应的分类标准体系、指标权重等详见表 2。

(1) 土地利用因子。不同土地利用类型对于生态廊道的连通性具有不同的阻力,根据抚州市第三次国土调查地类进行归并,参考《土地利用现状分类 GB/T21010-2017》,将土地利用类型归并为耕地、林地、园地、草地、水域、建设用地和其他土地,共计 7 大类。以于成龙^[14]构建东北地区生态安全格局的思想为基础,参考严政^[15]对于江西省瑞金市生态格局中阻力因子的赋值,结合抚州市的土地利用构成,根据不同土地利用类型对于对各类土地利用类型因子分别进行赋值,结果详见表 3。

表 2 最小阻力面模型指标体系

阻力层	权重赋值	阻力因子
土地利用因子	0.24	耕地
		林地
		园地
		草地
		水域
		建设用地
		其他土地
水土保持功能重要性	0.27	极重要区
		重要区
		一般重要区
生态敏感性	0.28	极敏感区
		敏感区
		一般敏感区
地形地貌	0.13	起伏度
		DEM 数据
交通网络密度	0.08	城镇村道路用地
		公路用地
		铁路用地

降雨侵蚀力因子 R :通过多年平均年降雨侵蚀力因子反映,计算公式为:

$$R = \left(\sum_{i=1}^{12} P_i \right) / P \quad (4)$$

式中: R 为多年平均年降雨侵蚀力; P 为年均降水量; P_i 为月均降水量; i 为所用降雨资料的年份。

土壤可侵蚀因子 K :主要与土壤质地、有机质含量、土体结构、渗透性等土壤理化性质有关,计算公式为:

$$K = (-0.1383 + 0.51575K_{\text{EPIC}}) \times 0.1317$$

$$K_{\text{EPIC}} = (160.80 - 2.31X_1 + 0.38X_2 + 2.26X_3 + 1.31X_4 + 14.67X_5) / 1000 \quad (5)$$

式中: K_{EPIC} 表示修正前的土壤可蚀性因子; K 表示修正后的土壤可蚀性因子; X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 分别表示细砾(1~3 mm)、细砂(0.05~0.25 mm)、粗粉粒(0.01~0.05 mm)、细粉粒(0.005~0.01 mm)和有机质的百分比含量。

植被因子 C : 水田、湿地、城镇和荒漠参照 N-SPECT 的参数分别赋值为 0, 0, 0.01 和 0.7, 旱地换算公式:

$$C_{\text{旱}} = 0.221 - 0.595 \lg C_1 \quad (6)$$

式中: C 旱为旱地的植被因子; C_1 为植被覆盖度。

(3) 生态敏感性。生态敏感性评价主要是判断未来可能发生生态问题的程度和区域, 根据抚州市的实际情况选择水土流失敏感性评价表征。

$$S = \sqrt[4]{R \cdot K \cdot LS \cdot C} \quad (7)$$

式中: S 表示该地区的生态敏感性; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; LS 为地形起伏度因子; C 为植被覆盖因子。根据评价结果将抚州市全域分为生态极敏感区、敏感区和一般敏感区。

(4) 地形地貌。地形地貌对于生态廊道的连通性具有重要的意义, 根据抚州市的 DEM 数据分级赋值表(表 4)计算, 该市的地形起伏度依据表 5 进行分级, 具体计算公式为:

$$R = H_{\text{max}} - H_{\text{min}} \quad (8)$$

式中: R 表示地形起伏度; H_{max} 代表单位面积内最大高程值; H_{min} 代表单位面积内最小高程值。

表 4 抚州市 DEM 数据分级赋值

高程分类	<200°	200°~600°	600°~800°	>800°
因子赋值	5	30	50	70

表 5 抚州市地形起伏度分级赋值

起伏度分类	0°~20°	20°~100°	>100°
因子赋值	10	30	70

(5) 交通网络密度。提取抚州市公路用地与铁路用地计算线密度, 形成抚州市交通网络密度评价。将抚州市全域路网作为交通网络密度评价过程中的主要因素, 采用线密度分析方法, 其计算公式为:

$$D = L/A \quad (9)$$

式中: D 为交通网络密度; L 为栅格单元领域范围内的公路通车里程总长度, 主要考虑高速公路、国道、省道和县道。

2.2.2 最小累积阻力模型 最小累积阻力模型可以确定起始源和目标源之间的最短路径^[16], 表示生态流从一个生态源地到另一个生态源地克服生态阻力面的最小累积距离。在 GIS 空间分析中, 该模型主要是通过生态源和阻力系数的设置, 来确定各生态源地之间的连接路径。

$$\text{MCR} = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \cdot R_i) \quad (10)$$

式中: MCR 为最小累积阻力模型; f 为反映 MCR 与变量 D_{ij} 和 R_i 之间正比关系的函数; D_{ij} 为生态源从 j 穿过 i 的空间距离; R_i 为物种穿越某景观表面 i 的阻力值。

2.3 抚州市生态廊道识别

基于阻力面和生态源地提取, 在 ArcGIS 中利用空间分析中成本路径等工具识别生态廊道。生态廊道通过连接不同源地, 增加区域景观连通性, 最大化获取生态效益, 是维护区域生态安全的基本架构。本文以确定的路径为中心, 考虑到动物迁徙规模, 按照宽度 800 m 在生成的廊道周围形成缓冲区, 从而识别抚州市的重要生态廊道^[17-19]。

河流水系在空间分布呈现互相连通且广泛分布的特征, 是生态空间以及生态源地连通的重要组成部分, 河流生态廊道能够连接不同地区的生态系统, 为区域内生态系统的循环提供天然依托。抚州市境内水系发达, 水能资源丰富。本文采用 Strahler 河流分级方法基于 DEM 数据对抚州市河网进行分级, 提取抚州市重要流域生态廊道, 对生态廊道进一步进行补充。分级参照 Strahler 河流分级法: 同级的两条河流交汇增加级别, 不同级的两条河流交汇级等于两者中较高者。

3 结果与分析

3.1 抚州市重要生态源地与生态节点选取

抚州市生物多样性维护功能重要性评价结果详见表 6。由表 6 可以看出, 生物多样性维护功能极重要区面积为 6 578.57 km², 占抚州市国土面积的 34.99%, 重要区面积为 5 637.98 km², 占抚州市国土面积的 29.99%, 一般重要区面积为 6 583.93 km², 占抚州市国土面积的 35.02%。抚州市生物多样性维护功能极重要区主要集中在南丰县和宜黄县交界处如军峰山、南城县如麻姑山、资溪县如马头山等山区, 是未来生物多样性保护的重要区域, 要注重生态系统的维护以及动物的保护, 在动物的活跃区域尽量减少人为活动的干扰。其中广昌县生物多样性维护功能极重要区面积为 840.28 km², 所占比例为 52.42%, 主要是分布在青龙湖和抚河源头省级自然保护区等山区。资溪县的极重要区面积为 641.08 km², 所占比例为

51.38%，主要包括马头山国家级自然保护区和大觉山省级森林公园等(图 1)。其中生态源地作为生态网络格局的重要基础，需要考虑景观格局的连续性和景观生态功能。在生物多样性维护功能重要性评价基础上结合自然保护地的空间分布，考虑连片度大于 80 km²，选取面积共计 3 302.34 km²。对选取的生态源地进行识别，包括宜黄县和乐安县交界处的抚州老虎脑自然保护区、华南虎省级自然保护区、资溪县的马头山国家级自然保护区等多个国家级和省级自然保护区；南城县和黎川县交界处的洪门湖国家湿地公园、黎川县境内的岩泉省级森林公园和资溪县大觉山省级森林公园等；广昌县的抚河源头国家湿地公园作为重要水源地，承担重要的水源涵养功能，也是关键的生态源地。选取的生态源地内土地利用类型以林

地和园地为主，生态环境质量较高，具有重要的生态系统服务价值。重要的生态源地内，未来开发和规划中要注意对自然生态环境的保护，降低大规模开发建设等人为活动的影响，避免对动物生存的环境造成干扰。生态节点是生态网络空间格局的重要连接部分，选取 40 个生态节点，面积共计 1 316.40 km²。自然保护地包括自然保护区、森林公园、湿地公园等类型，根据抚州市自然保护地分布情况，选取连片度大于 1 km²的自然保护地作为生态节点，包括 1 个国家级自然保护区，面积 141.03 km²；3 个森林公园，面积为 106.54 km²；7 个国家湿地公园，面积共计 162.04 km²；13 个省级森林公园，面积共计 263.45 km²；9 个省级湿地公园，面积共计 72.26 km²；7 个省级自然保护区，面积共计 571.08 km²。

表 6 抚州市及其各区县生物多样性维护功能重要性评价结果

县(区)名称	极重要区		重要区		一般重要区	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
临川区	283.10	13.32	517.87	24.36	1 324.80	62.32
东乡区	402.63	31.76	287.81	22.70	577.22	45.53
南城县	790.27	46.14	427.05	24.93	495.45	28.93
黎川县	666.07	38.97	557.41	32.61	485.66	28.42
南丰县	625.32	32.69	418.37	21.87	869.13	45.44
崇仁县	363.19	23.89	514.52	33.84	642.56	42.27
乐安县	811.54	33.66	868.45	36.02	731.26	30.33
宜黄县	748.19	38.62	795.42	41.05	393.95	20.33
金溪县	406.90	30.09	351.23	25.97	594.32	43.94
资溪县	641.08	51.38	521.50	41.80	85.12	6.82
广昌县	840.28	52.42	378.35	23.60	384.46	23.98
抚州市	6 578.57	34.99	5 637.98	29.99	6 583.93	35.02



图 1 抚州市生物多样性维护功能重要性评价结果

3.2 抚州市阻力面构建

3.2.1 阻力面因子

(1) 土地利用因子。通过对于抚州市三调数据中地类名称归并细化可以得出，土地利用类型中林地占国土面积的 66.03%，建设用地所占比例为 5.10%，水域所占比例为 4.65%，草地所占比例为 0.51%，其他土地所占比例为 0.38%，耕地所占比例为 17.31%，园地所占比例为 6.02%。

(2) 水土保持功能重要性。水土保持功能是针对区域内水土资源进行保护，从而体现出的生态环境功能和社会经济功能。抚州市水土保持功能重要性评价过程中考虑降雨量、土壤侵蚀程度、坡长坡度和植被覆盖类型 5 个方面，其最终评价结果受地形因素的影响较大。由表 7 可知，抚州市水土保持功能极重要区面积共计 9 394.42 km²，所占比例为 49.97%。其中乐安县极重要区面积为 1 356.23 km²，宜黄县水

水土保持功能极重要区面积为 1 168.72 km²,广昌县水土保持功能极重要区面积为 1 074.22 km²,均位于抚州市前列,是未来承担抚州市水土保持功能的重点区县。水土保持功能是维护区域性水土资源,防止水土流失,抚州市水土保持功能重要区面积为 5 643.75 km²,所占

比例为 30.02%;一般重要区面积为 3 762.31 km²,所占比例为 20.01%。从地形分布分析,水土保持功能极重要区主要集中在抚河两侧,在未来需要加强对抚河两侧水土资源的保护,也是未来水土保持规划中需要重点关注的区域。

表 7 抚州市及其各区县水土保持功能重要性评价结果

县(区)名称	极重要区		重要区		一般重要区	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
临川区	546.38	25.70	803.25	37.79	776.12	36.51
东乡区	499.54	39.41	539.78	42.58	228.35	18.01
南城县	984.01	57.45	415.5	24.26	313.27	18.29
黎川县	854.34	49.99	534.04	31.25	320.76	18.77
南丰县	866.15	45.28	391.69	20.48	654.98	34.24
崇仁县	632.03	41.57	548.13	36.05	340.11	22.37
乐安县	1 356.23	56.25	672.87	27.91	382.15	15.85
宜黄县	1 168.72	60.32	551.35	28.46	217.48	11.22
金溪县	545.57	40.34	521.21	38.54	285.67	21.12
资溪县	867.23	69.51	336.54	26.97	43.94	3.52
广昌县	1 074.22	67.01	329.39	20.55	199.48	12.44
抚州市	9 394.42	49.97	5 643.75	30.02	3 762.31	20.01

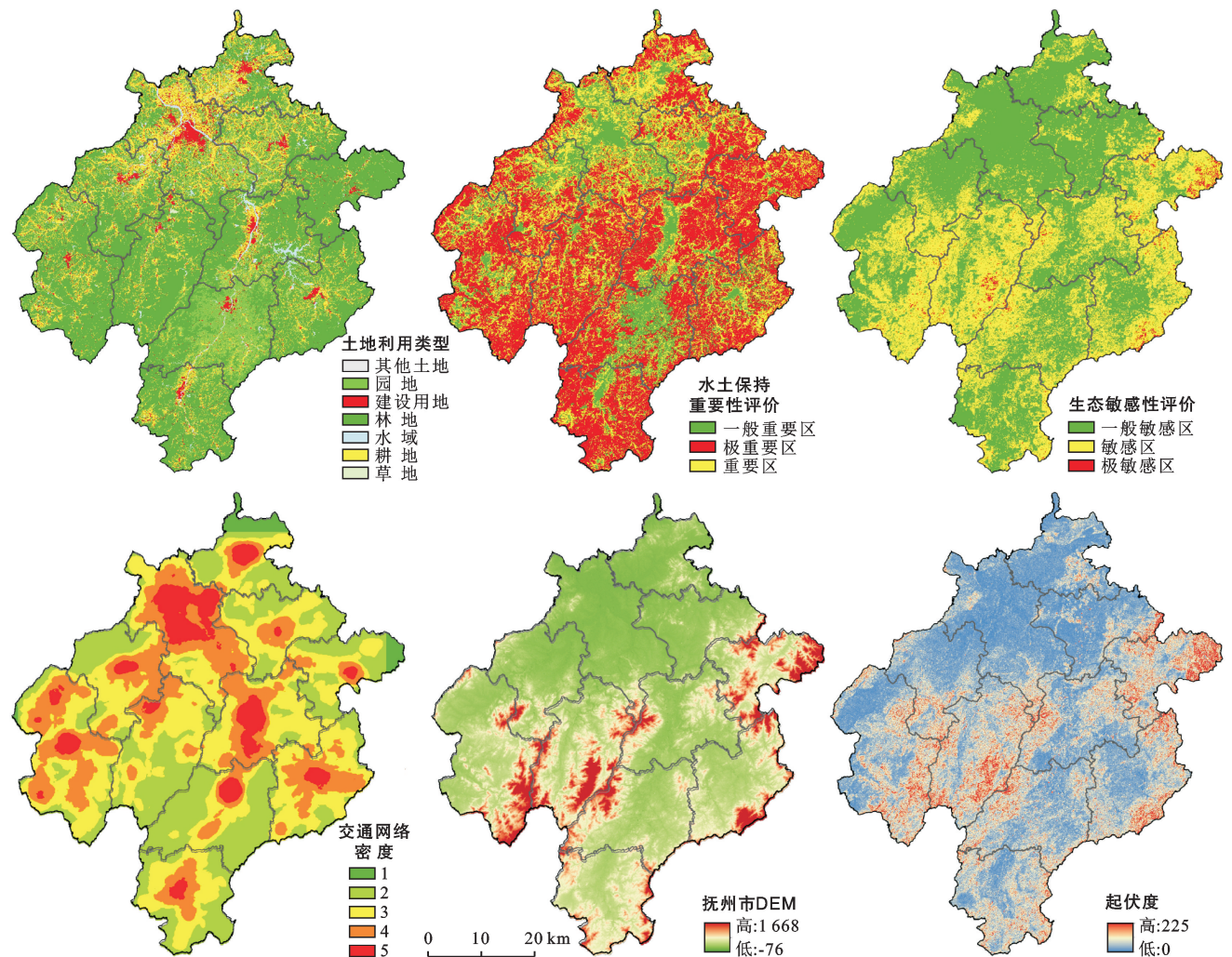


图 2 抚州市各阻力因子分布

(3) 生态敏感性。通过对抚州市的生态敏感性进行分析,抚州市全域地形起伏度和植被覆盖度在空间上的异质性较为明显,其地形起伏度大于 200 m 的地区较少。

抚州市生态环境状况较好,植被覆盖度较高,主要集中在 0.4~0.8 之间。降水侵蚀力对抚州市生态敏感性有一定的影响,但其在空间上的异质性不明

显。由表 8 可知,抚州市生态极敏感区面积为 9.37 km²,所占比例为 1.37%;生态敏感区面积为 7 811.07 km²,所占比例为 41.55%;生态敏感一般区面积为 10 732.40 km²,所占比例为 57.08%。市域内生态功能情况良好,未来发生生态问题的可能性较低。其中资溪县的生态极敏感区的面积为 79.59 km²,生态敏感性程度高于其他区县。

表 8 抚州市及其各区县生态敏感性评价结果

县(区)名称	极敏感区		敏感区		一般敏感区	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
临川区	4.94	0.23	312.36	14.69	1 808.45	85.07
东乡区	0.15	0.01	246.96	19.48	1 020.56	80.51
南城县	10.02	0.59	776.64	45.34	926.12	54.07
黎川县	45.76	2.68	925.22	54.13	738.15	43.19
南丰县	10.90	0.57	891.47	46.61	1010.44	52.83
崇仁县	5.69	0.37	531.08	34.93	983.50	64.69
乐安县	21.99	0.91	1 152.65	47.80	1 236.61	51.29
宜黄县	59.60	3.08	1 287.43	66.45	590.53	30.48
金溪县	9.00	0.67	265.00	19.59	1 078.46	79.74
资溪县	79.59	6.38	798.12	63.97	370.00	29.65
广昌县	9.37	0.58	624.14	38.93	969.58	60.48
抚州市	257.01	1.37	7 811.07	41.55	10 732.40	57.08

(4) 地形地貌。利用 DEM 数据对抚州市地形地貌进行空间分析。分析结果表明,抚州市北部地势较为平坦,南部主要是以丘陵山地为主,以军峰山和资溪县马头山为代表。起伏度较高地区主要分布在资溪县、乐安县和宜黄县等,抚州市坡度等级多集中于 3°~15°之间,中等、较高和高等级坡度条件总面积所占比例为 76.15%。其中,等级高的面积为 3 521.89 km²,所占比例为 19.26%;等级较高的面积为 5 881.99 km²,所占比例为 32.17%;等级中等的面积为 4 520.26 km²,所占比例为 24.72%;等级较低的面积 3 143.18 km²,所占比例为 17.19%;等级低的面积为 1 217.37 km²,所占比例为 6.66%。抚州市高程介于 1~1 688 m 之间,高海拔地区位于乐安县东南侧、宜黄县东南侧、资溪县东侧及抚州市行政区边界上。海拔较低且高程较平均的区域分布在宜黄县以北的崇仁县、临川区、金溪县、东乡区。

(5) 交通网络密度。由表 9 可知,根据抚州市交通网络密度评价结果由低至高分 1—5 级,抚州市全域交通网络密度为 5 级的面积为 441.71 km²,所占比例为 2.35%,主要位于临川区和各区县的中心城

区,其中临川区和东乡区作为抚州市重点发展区域,拥有抚州站和抚州东站两个火车站,人口聚集和经济的快速发展使得道路密集,其交通网络密度高于其他区域。各区县的交通网络密度基本是以中心城区为原点向周围按距离逐步递减,距离中心城区越近,交通网络密度越高。抚州市整体交通网络密度等级以 2—3 级为主,其中 2 级面积为 7 056.80 km²,所占比例为 37.54%;3 级面积为 4 856.60 km²,所占比例为 25.84%。其中临川区、东乡区和南城区的交通便捷程度高于其他区县。

3.2.2 最小累积阻力模型 基于图 2 中各项阻力因子,构建抚州市生态阻力面。生态阻力值高的区域主要集中于各个区县的中心城区,中心城区的建设用地分布集聚,交通密度大,不利于生态廊道的连通性,对物种的迁徙有较大的阻力。抚州市北部生态阻力大于其他区域,北部是临川区和东乡区,整体土地开发强度大。部分阻力面在整个抚州市零星分布。生态阻力面强度小的地区主要是林地以及山地等植被覆盖度高、水系丰富区域,人为活动强度低,有利于不同生态源地之间的连通性。

表9 抚州市及其各区县交通网络密度评价结果

县(区)名称	1级		2级		3级		4级		5级	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
崇仁县	133.12	8.76	648.25	42.65	477.76	31.43	260.98	17.17	0.00	0.00
东乡区	62.90	4.96	421.82	33.30	322.54	25.46	375.81	29.66	83.81	6.62
广昌县	458.05	28.58	658.29	41.08	329.66	20.57	156.44	9.76	0.00	0.00
金溪县	100.32	7.42	344.80	25.50	683.73	50.56	223.38	16.52	0.00	0.00
乐安县	249.79	10.36	740.86	30.73	1 018.92	42.27	400.92	16.63	0.00	0.00
黎川县	303.50	17.76	1 008.88	59.05	272.93	15.97	123.32	7.22	0.00	0.00
临川区	58.07	2.73	426.97	20.09	654.67	30.80	692.46	32.58	293.13	13.79
南城县	96.66	5.64	790.50	46.15	509.40	29.74	255.79	14.93	60.43	3.53
南丰县	953.29	49.84	592.69	30.99	235.06	12.29	127.27	6.65	4.35	0.23
宜黄县	766.96	39.59	922.25	47.60	207.94	10.73	40.28	2.08	0.00	0.00
资溪县	595.37	47.73	501.48	40.21	144.01	11.55	6.39	0.51	0.00	0.00
总计	3 778.04	20.10	7 056.80	37.54	4 856.60	25.84	2 663.04	14.17	441.71	2.35

3.3 抚州市生态廊道识别与生态格局构建

基于阻力面和生态源地提取,在 ArcGIS 中利用空间分析中成本路径等工具识别生态廊道,生态廊道通过连接不同源地,增加区域景观连通性,最大化获取生态效益,是维护区域生态安全的基本架构。以确定的路径为中心,并把宽度控制在 800 m 以内形成缓冲带,形成重要生态廊道。抚州市境内河流水系发达,水能资源丰富。根据抚州市 DEM 数据进行分析,在进行填洼等一系列水文分析之后得到抚州市流量以及流向情况,同时采用 Strahler 河流分级方法对抚州市河网进行分级,提取抚州市重要流域生态廊道。抚河流域生态轴贯穿整个抚州市,同时以宝塘水生态廊道、临水生态廊道、东乡水生态廊道、黎滩河生态廊道、崇仁水生态廊道、资福水生态廊道等连通各地生态空间。以全域的生态要素和地形地貌等为基底,抚州市呈现出“一轴、两屏、多廊、多节点”生态格局^[20](图 3)。“一轴”即抚州流域生态轴,河流是生态廊道形成的天然依托,对区域内部的气候调节以及物质循环起到重要的流通作用。抚河作为抚州市境内贯穿南北的天然通道,通过流域生态廊道连接各个生态源地和生态节点,对抚州市境内整体的生态环境起到重要调节作用。因此在未来规划中,要注意抚河流域周围生态环境的保护,减少大规模的建设开发和无序采砂等人类活动,做好河道的清理和水质的清洁。“两屏”即东部武夷山生态安全屏障和西部雩山生态安全屏障;是维持抚州市境内生态环境维护的天然屏障,可以降低周边地区生态环境变化对抚州市的影响。在生态屏障内需要注意具有生态调节功能的林地和园地等面积不减少,减少乱砍乱伐以及建设占用等破坏生态环境的行为,发挥其生态安全屏障的作用。“多廊”指基于自然保护地和生态红线等生态保

护重要区识别的生态廊道以及抚州市重要流域廊道,这是连接各个生态节点和生态源地之间的重要纽带,在未来规划中,各类路网应当尽量避开生态廊道,或者是在建设中采取高架和涵洞等方式,尽量为动物迁徙留出通道,保护廊道的稳定性,从而保证各个生态源地和生态节点之间的连通性。“多节点”指重要生态节点,主要为森林公园、湿地公园、自然保护区等小规模的重要生态斑块。通过“一轴、两屏、多廊、多节点”生态格局,整个抚州市形成完整、系统的生态保护格局和开敞空间网络体系,对维护生态安全和生物多样性,构建连续的绿色空间网络具有重要意义^[21-23]。

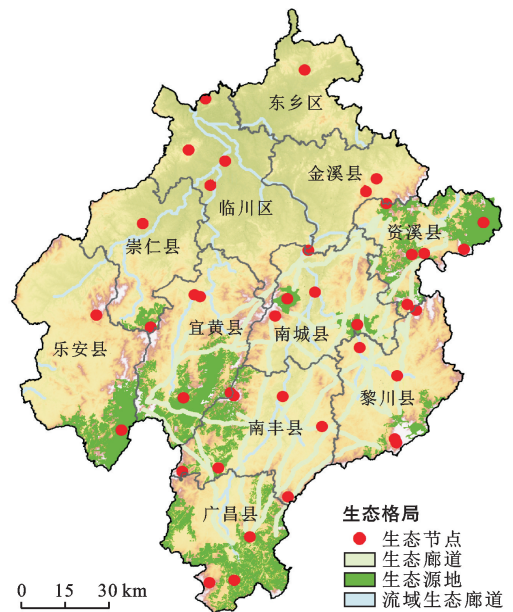


图3 抚州市生态格局

4 结论

(1) 江西省抚州市整体生态环境较好,水土保持

功能极重要性区占49.97%，主要集中在抚州市中部地区，以黎川县、乐安县、宜黄县和南丰县为主。生态敏感性极重要区仅占1.39%。生态脆弱区主要是集中在宜黄县、南丰县、乐安县等山区地形起伏度较大且植被覆盖度较好的区域。抚州市整体水系发达，境内拥有水系繁多，构成以抚河流域为主，多水系连通全域的水系格局，以河流为生态廊道的依托，抚河流域生态轴贯穿整个抚州市，以宝塘水生态廊道、临水生态廊道、东乡水生态廊道、黎滩河生态廊道、崇仁水生态廊道、资福水生态廊道等连通各地生态空间。因此建议在下一步市县国土空间规划以及主体功能区分区时，抚州市可以承担江西省生态环境协调的重要生态功能。

(2) 以全域的生态要素和地形地貌等为基底，抚州市呈现出“一轴、两屏、多廊、多节点”生态安全格局。“一轴”即抚州流域生态轴；“两屏”即东部武夷山生态安全屏障和南西部雩山生态安全屏障；“多廊”指基于自然保护地和生态红线等生态保护重要区构建的生态廊道以及抚州市重要流域廊道；“多节点”是指重要生态节点，形成完整、系统的生态保护格局和开敞空间网络体系，维护生态安全和生物多样性，构建连续的绿色空间网络。

[参 考 文 献]

- [1] Phillips P, Clark M M, Baral S, et al. Comparison of methods for estimating omnidirectional landscape connectivity [J]. *Landscape Ecology*, 2021, 36:1647-1661.
- [2] Mosomtai G, Azrag A, Babin R, et al, et al. Functional land cover scale for three insect pests with contrasting dispersal strategies in a fragmented coffee-based landscape in Central Kenya [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 319:107558.
- [3] 王戈, 于强, Yang Di, 等. 包头市层级生态网络构建方法研究[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(9):235-242.
- [4] 苏凯, 于强, Yang Di, 等. 基于多场景模型的沙漠—绿洲交错带林草生态网络模拟[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(9):243-253.
- [5] 杨管丛, 朱江, 詹浩, 等. 国土空间规划分区划定与管控研究: 以东莞水乡功能区为例[J]. *南方建筑*, 2021(2):9-17.
- [6] 李红举, 宇振荣, 梁军, 等. 统一山水林田湖草生态保护修复标准体系研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(23):8771-8779.
- [7] 李珍. 新时代国土综合整治与生态修复研究初探: 以临猗县为例[J]. *华北自然资源*, 2021(3):131-132.
- [8] 刘彦利. 新时期国土空间规划功能定位与实施初探[J]. *华北自然资源*, 2021(3):123-124.
- [9] 翟紫含, 张杰, 周旭. 粤港澳大湾区山水林田湖草生态保护修复相关问题思考[J]. *中国土地*, 2020(12):26-29.
- [10] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 等. 北京市生态安全格局及城市增长前景[J]. *生态学报*, 2009, 29(3):1189-1204.
- [11] 张艺璇, 位宏, 那嘉明, 等. 基于MCR模型的城市生态安全格局构建: 以甘肃省平凉市为例[J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 2021, 44(3):54-62.
- [12] 高阳, 刘悦忻, 钱建利, 等. 基于多源数据综合观测的生态安全格局构建: 以江西省万年县为例[J]. *资源科学*, 2020, 42(10):2010-2021.
- [13] 吴金华, 刘思雨, 白帅. 基于景观生态安全的神木市生态廊道识别与优化[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(4):1120-1127.
- [14] 于成龙, 刘丹, 冯锐, 等. 基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建[J]. *生态学报*, 2021, 41(1):290-301.
- [15] 严政, 王壮壮, 周成杰, 等. 基于生态保护重要性的江西省瑞金市生态安全格局构建[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(1):260-266.
- [16] 刘孝富, 舒俭民, 张林波. 最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性评价中的应用: 以厦门为例[J]. *生态学报*, 2010, 30(2):421-428.
- [17] 田北辰, 李沛权, 黄千杜. 基于鸟类视角的城市生态廊道构建方法研究综述[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(8):3010-3022.
- [18] 李谦, 戴靓, 朱青, 等. 基于最小阻力模型的土地整治中生态连通性变化及其优化研究[J]. *地理科学*, 2014, 34(6):733-739.
- [19] 叶玉瑶, 苏泳娴, 张虹鸥, 等. 生态阻力面模型构建及其在城市扩展模拟中的应用[J]. *地理学报*, 2014, 69(4):485-496.
- [20] 刘歆, 角媛梅, 王梅, 等. 基于图论的哈尼梯田区河渠网络关键节点和廊道评价[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(1):287-294.
- [21] 裴燕如, 武英达, 于强, 等. 荒漠绿洲区潜在生态网络增边优化鲁棒性分析[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(2):172-179.
- [22] 王贝, 刘纯青. 基于MSPA与MCR的生态网络构建与优化: 以吉安市吉州区为例[J]. *环境保护科学*, 2021, 47(5):37-43.
- [23] 陈瑶瑶, 罗志军, 齐松, 等. 基于生态敏感性与生态网络的南昌市生态安全格局构建[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4):342-349.