

基于“山水林田湖草泉”系统的济南市生态安全格局构建

许晓彤, 常军

(山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250358)

摘要: [目的] 构建具有城市特色的生态安全格局, 以为山东省济南市实现生态环境的保护与修复, 以及区域协调发展提供思路, 并为构建“山水林田湖草泉”一体的城市特色生态安全格局提供参考。[方法] 以济南市为研究对象, 基于 InVEST 对生境质量进行评价, 进而从“蓝—绿—泉”3 个角度识别生态源地, 并基于自然地理、人为干扰活动两个方面构建阻力面, 最后使用最小累积阻力模型(MCR)识别生态廊道构建生态安全格局。[结果] 济南市生态源地面积为 1 249.32 km², 占总面积的 12.20%; 生态阻力面呈现“中间高, 南北低, 多团块”的特点; 研究区共有生态廊道 119 条, 总长 1 395.37 km, 形成南连泰山北通黄河的“山河通廊”; 济南市高、中、低生态安全缓冲区占总面积的 40.41%, 构建了“一带、三区、两翼、九点、多廊”的生态安全格局。[结论] 济南市生态源地主要分散于南部山区, 纵横交错的河流起到了沟通物质能量信息的天然廊道作用。

关键词: 生态安全格局; 生境质量; 最小累积阻力模型; 济南市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)01-0208-09

中图分类号: X321, X171.1

文献参数: 许晓彤, 常军. 基于“山水林田湖草泉”系统的济南市生态安全格局构建[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 208-216. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.028; Xu Xiaotong, Chang Jun. Construction of ecological security pattern in Ji'nan City based on a mountain-water-forest-farmland-lake-grass-spring system [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 208-216.

Construction of Ecological Security Pattern in Ji'nan City Based on a Mountain-Water-Forest-Farmland-Lake-Grass-Spring System

Xu Xiaotong, Chang Jun

(College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan, Shandong 250358, China)

Abstract: [Objective] An ecological security pattern with urban characteristics was constructed in order to provide ideas for regional coordinated development of ecological environment protection and restoration of Ji'nan City, Shandong Province, and to provide references for constructing an urban characteristic ecological security pattern for a mountain-water-forest-farmland-lake-grass-spring system. [Methods] Habitat quality was evaluated for Ji'nan City based on the InVEST model, and the ecological sources were identified from the three perspectives of blue-green-spring. A resistance surface was subsequently constructed based on the natural geographical conditions and human disturbance. Finally, the ecological corridors were identified and the ecological security pattern was constructed using the minimum cumulative resistance model (MCR). [Results] The area of the ecological sources in Ji'nan City was 1 249.32 km², accounting for 12.20% of the total area. The ecological resistance surface presented the characteristics of “high in the middle, low in the north and south, and many clusters”. 119 ecological corridors with a total length of 1 395.37 km were identified, and formed a mountain-river corridor connecting Mount Taishan in the south and the Yellow River in the north. The area of the high, medium, and low ecological security buffer zones in Ji'nan City accounted for 40.41% of the total area, and an ecological security pattern of “one belt, three zones, two wings, nine

收稿日期: 2021-05-25

修回日期: 2021-09-26

资助项目: 国家社会科学资助项目“流域农业面源污染影响因子解析与防控体系研究”(18BJY086); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2012DM009)

第一作者: 许晓彤(1998—), 女(汉族), 山东省宁阳县人, 硕士研究生, 研究方向为遥感与 GIS 应用。Email: 2020020744@stu.sdnu.edu.cn.

通信作者: 常军(1978—), 男(汉族), 山东省枣庄市人, 博士后, 副教授, 主要从事遥感与 GIS 应用工作。Email: 110112@sdnu.edu.cn.

points, and multiple corridors” was constructed. [Conclusion] The ecological source areas of Ji’nan City are mainly scattered in the southern mountainous areas. The crisscrossing rivers serve as natural corridors for communicating material and energy information.

Keywords: ecological security pattern; habitat quality; minimum cumulative resistance model; Ji’nan City

随着社会经济发展和城镇化进程加快,人类活动对生态系统的质量和数量产生严重破坏,水土流失、物种减少、森林锐减等生态问题突出,国土空间生态安全遭到显著威胁^[1]。生态空间作为人类生产生活的基础场所,保障其安全成为缓解人类社会发展与生态环境保护之间矛盾的重要解决途径^[2]。构建生态安全格局作为城市生态安全保障的关键环节,同时也是生态系统管理的关键步骤。国家以城市化、农业发展和生态安全三大战略格局为目标的国土开发格局作为生态文明建设的首要任务,其重要性不言而喻^[3]。

生态安全格局源于景观安全格局,将景观空间格局与生态过程进行耦合,既保留了格局与过程相互作用原理,又强调了生态问题的作用机制^[4]。自 20 世纪末以来,生态安全格局这一概念逐渐得到国内外学者的重视,许多学者从理论方法、指标制定、模型构建等方面开展了深入研究,其成果在生物多样性保护^[5]、生态红线划定^[6]、矿区生境治理等^[7]方面得到广泛应用。目前,采用生态源地确定—构建阻力面—生态廊道识别模式对生态安全格局进行构建已成为该研究的基本范式^[8]。生态源地是承担重要生态系统服务关键生态用地^[9]。多数学者将大型水域和林地斑块^[2]、生态红线^[10]、风景区^[11]、重要生态区^[12]作为生态源地。生态阻力面构建是构建生态安全格局的重要一步,反映物种迁移过程及信息能量流动等生态功能受到土地利用方式和人为干扰的程度,已有研究多从土地利用类型以及坡度、高程等角度进行表征,缺少反映人类活动的指标因子。生态廊道是具有保持生态系统稳定的通道,它涉及生态、社会、文化多功能并连接陆域和水域生态源地^[13]。最小累计阻力模型(minimum cumulative resistance, MCR)是定量识别生态廊道最有效的方法,相较于其他模型能很好地模拟景观对空间运动过程的阻碍作用,从而更好地表达景观格局和生态过程之间的相互作用关系^[8],因而得到广泛应用。近年来已有学者对干旱区^[14]、矿区^[7]、火山熔岩湿地^[15]等生态敏感区以及北京市^[16]、雄安新区^[17]、黔中城市群等^[18]重点经济发展城市或城市群进行生态安全格局的构建。例如,冯琰玮等^[19]对内蒙古生态承载力进行评价,将识别的生态优势斑块和自然保护区作为源地,通过 MCR 模型和“三生”用地类型构建、优化生态安全格局;李涛等^[20]以湖南省衡阳市为研究区,基于 InVEST 模型

HQ 模块和电路理论构建了城市生态安全格局;王浩等^[21]从生态系统服务重要性和敏感性两个角度识别广东省的生态源地,构建广东省生态安全格局。

济南市由于其独特地质地貌条件形成“清泉石上流”的绮丽风光,成为中国岩溶泉的典型代表^[22]。近年来,济南市在快速推进城市化过程中对生态环境产生一定破坏,环境污染加剧,泉水停涌的危机日益显现,“家家泉水,户户垂杨”的泉城景色已不复存在^[23-24]。资料显示,由于过量开采地下水、地面硬化面积增加、砍伐树木等原因,近 50 a 来济南的泉水补给量已减少约 30%,面临枯水年泉水断流或停喷的威胁^[25]。当前,国内外专家多从泉水来源^[26]、泉流量影响因素^[27]、保泉措施等^[28]方面对济南泉域进行研究,尚未将泉水生态安全与济南生态安全格局构建进行联系。本研究以济南市为研究区域,以“山水林田湖草泉”系统为研究对象,识别生态源地并通过 MCR 模型构建生态廊道,从而构建具有济南市城市特色的生态安全格局,以期对济南市实现生态环境的保护与修复、区域协调发展提供思路。

1 研究区概况

济南市位于山东省的中西部、黄河下游、华北平原东南部,地理位置为北纬 34°46′21″—37°32′13″,东经 116°13′45″—117°58′10″。东与淄博市接壤,西与聊城市、德州市相连,南与泰安市毗邻,北与滨州市相接,是山东省省会、济南都市圈核心城市、中国的历史文化名城,也是重要的交通枢纽。全市下辖 12 个行政区,总面积 10 244 km²,2019 年全市常住人口 8.91×10⁶ 人。济南北依泰山北跨黄河,地势南高北低,最高海拔 1 108.4 m,最低海拔 5 m。济南年平均气温 13.6 ℃,年平均降水量 614.0 mm,降水集中于夏季,属温带季风气候。境内河流较多,有黄河、小清河、徒骇河等,湖泊有大明湖、白云湖、雪野湖等。区域内泉水及泉群众多,以清冽甘美闻名于世,主要风景名胜有趵突泉、五龙潭等。

2 数据及研究方法

2.1 数据来源

本研究涉及的数据主要包括土地利用数据、DEM 数据、人口空间分布公里网格数据、经济社会数据以及基础地理数据。具体数据来源及使用见表 1。

表 1 数据来源及其用途

数据名称	分辨率	时间	来源	用途
土地利用数据	10 m	2017 年	清华大学	计算济南市生境质量,构建土地利用阻力面
DEM 数据	30 m	—	地理空间数据云	地势地貌阻力面构建
人口空间分布网格数据	1 km	2015 年	中国科学院资源环境科学数据中心	构建阻力面
基础地理数据	1:25 万	2010 年	中国科学院数据云	河流、水系、道路等基础数据

2.2 研究方法

2.2.1 生态源地综合识别 参考国际城市与规划学会^[29]在南京市江北新区城市规划设计中提出的“蓝绿”系统的概念,结合济南市“山水林田湖草泉”系统的特点,通过模型法和数据提取等方法,从“蓝、绿、泉”3 个角度选择生态源地。其中,“绿”指以保护绿色生态资源为目标,选取能够对维持陆地生态系统稳定、促进区域可持续发展具有重要作用的生态斑块,通过 InVEST 模型计算得出;“蓝”指河流、湖泊、水库等对城市水资源生态保护起到关键作用的生态要素,“泉”是对维持济南泉水持续喷涌起到重要作用的生态斑块,“蓝”和“泉”的生态源地通过基础地理数据提取得出。

(1) “绿源”识别。近年来济南市快速城镇化过程中将大量的生态用地用于城市建设,特别是林地和耕地被硬化成不透水面,导致生态环境恶化,生物多样性和物质、能量流动受到干扰,生态系统为城市提供生态资源的能力降低。生境质量是衡量区域能够提供生物生存繁衍条件能力高低的重要指标。生态源地是生态系统中具有重要作用的斑块,其本身应具有较高的生境质量,能够为物种生长、发育繁衍提供良好的条件,在协调区域生态安全与可持续发展过程中具有重要作用^[30]。本研究选择生境质量指标对济南市陆地生态环境进行评价进而识别生态源地。InVEST 模型是由美国斯坦福大学开发的、能够权衡区域生态系统服务的开源代码软件,其中的生境质量模块在假设生境质量是连续的前提下,以生境质量的高低代表空间上生物多样性的分布情况^[31-32]。该模型基于土地利用数据、生境质量威胁因子的影响距离、不同生境对威胁因子的敏感性 4 个变量信息生成区域的生境质量地图,并且考虑了人为活动对生态系统的干扰。计算方法如下:

$$D_{ij} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} (\omega_i / \sum_{r=1}^R \omega_r) r_y i_{riy} \beta_x S_{jr} \quad (1)$$

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

式中: D_{ij} 为 LUCC 中 j 类型土地中栅格 i 的生境退化度; R 为选取的威胁因子个数; Y_r 为 r 威胁因子栅格图上的栅格的数量; r_y 为栅格图层 y 上的威胁

因子值; ω_r 为威胁因子的权重,通常对生态系统影响越高的威胁因子的权重越接近于 1; i_{riy} 表示生态系统生境栅格 i 与威胁因子 r 栅格的距离; β_x 为威胁因子的可达性; S_{jr} 为生境类型 j 对威胁因子 r 的敏感度; Q_{xj} 为生境类型为 j 的栅格 x 的生境质量指数; H_j 为生境类型 j 的生境适宜性; D_{xj} 为生境类型 j 的栅格 x 的生境胁迫水平; k 为半饱和常数。

如表 2—3 所示,研究选取建设用地、裸地、其他用地作为生态系统的威胁因子,并且考虑在城市建设过程中交通用地会对生境质量产生负面影响,将高速公路、国道、省道共同作为威胁因子。威胁因子的最大影响距离及权重、济南市各生境类型对威胁因子的敏感性等模型参数的确定参考 InVEST 模型用户指导手册以及多位专家学者^[32]的研究。生态源地的破碎化程度对生态系统的物质和能量传递会产生一定影响^[33]。为降低济南市生态源地破碎化程度,将图斑进行聚合,参考康洁铭等^[34]的研究,将高等级生境质量累计面积占总面积的 80% 的区域作为“绿源”。

表 2 济南市各威胁因子的最大影响距离及权重

威胁因子	最大影响距离	威胁因子权重	衰退类型
建设用地	12	1	指数型
裸地	5	0.2	指数型
其他用地	5	0.4	线性
国道	10	0.6	线性
省道	8	0.4	线性
高速	8	0.5	线性

(2) “蓝源”识别。水生态系统是城市生态安全保护的一个重要方面,济南市水生态系统可分为河流、湖泊、水库、泉 4 种类型^[35]。其中,黄河、小清河两大流域共包含 120 条大、中、小型河流。济南市水生态文明建设提出“河湖联通惠民生、五水统筹润泉城”的发展格局,将河流、林地连接构成生态网络,维持城市水生态廊道畅通。参考济南市水生态文明建设成果以及《济南市城市发展战略规划(2018—2050)》^[36],将市域范围内玉符河、大辛河在内的六条河流廊道以及白云湖、玫瑰湖在内的 5 个湖泊作为“蓝源”,同时将水库累计面积占总面积 75% 的卧龙山水库、雪野水库、鹊山水库等纳入蓝色生态空间,构建水源生态网

络。泉水出露也会在周围形成小型湿地,将市域范围内形成公园绿地的趵突泉泉群、五龙潭泉群、珍珠泉泉群、百脉泉泉群等四大泉群范围内的公园绿地作为湿地系统,形成泉水蓝色源地。

表 3 济南市不同生境类型对不同威胁因子的敏感度

土地利用类型	生境适宜性	建设用地	裸地	其他用地	国道	省道	高速
耕地	0.4	1	0.5	0.6	0.7	0.6	0.8
林地	1	1	0.5	0.6	0.8	0.7	0.9
草地	0.7	1	0.8	0.5	0.9	0.7	0.9
灌木林地	0.5	1	0.6	0.5	0.6	0.5	0.7
湿地	0.8	1	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9
水域	0.6	0.8	0.4	0.4	0.6	0.5	0.5

(3)“泉源”识别。济南市天然泉眼共计 800 余处,泉水保护是彰显城市特色、建设城市名片、弘扬泉水文化的重要举措。“保水源、保路径”成为维持泉水生态循环过程的关键方向。重点渗漏带的土地利用、生境质量等对维持泉域生态系统平衡、济南特色资源保护以及防洪排涝等具有重要作用,是“保水源”的核心区域。重点渗漏带是指由于地形地质条件、含水层特性等因素形成的地表水向地下水补给能力强、速度快的区域^[24]。根据管清花等^[37]的研究,重点渗漏带

可根据受到人为干扰的程度划分为 12 处近自然型重点渗漏带和 12 处人为干扰型重点渗漏带。近自然型渗漏带人为干扰较小,基本保持了较好的植被覆盖度、发育完善的构造和裂隙,渗透性强,地下水补给条件较好。人工型重点渗漏带中 7 处处于正在开发建设过程,地面硬化、植被破坏,部分丧失地下水补给能力,5 处已经被建设用地覆盖,地下水补给功能已经完全丧失。生态源地的选择考虑具有良好地下水补给条件的 12 处重点渗漏带,包括玉符河渗漏带、店子—二仙渗漏带、龙洞渗漏带、涝坡—郑家窝坡渗漏带、大涧沟渗漏带、车脚山—太平庄渗漏带、河东—河西渗漏带、泉庐—钱家庄渗漏带等,不再考虑城市建筑部分或完全覆盖并且丧失渗漏补给地下水功能的羊头峪、双龙等 12 处重点渗漏带。

2.2.2 构建阻力面 区域内物质和能量的流动和相互联系需要克服景观的阻碍作用,土地覆被类型、地势地貌和人为活动都会对源地扩张产生负面影响^[8]。参考已有的研究^[12,18]并结合济南的自然和社会经济条件,从自然地理、人为干扰两个方面选取指标构建源地扩张的阻力面(表 4)。各指标因子的权重通过 AHP 法求得,采用加权求和方法构建阻力面并按照从低到高值划分为 6 个等级。

表 4 济南市不同生境类型阻力面影响因子

影响因子	权重	阻力值				
		10	30	50	70	100
土地利用类型	0.328 6	林地、湿地、水域	灌木林地、草地	耕地	裸地	建设用地
人口密度(10^3 人/ km^2)	0.328 6	0~0.5	0.5~1	1~3	3~6	>6
地表起伏度/ $^\circ$	0.171 4	0~10	10~20	20~40	40~60	>60
坡度/ $^\circ$	0.171 4	0~5	5~10	10~15	15~20	>20

2.2.3 生态廊道与生态安全缓冲区识别 1992 年 Knaapen 提出最小累积阻力模型,可以计算从源到目的地克服阻力面障碍所做的功^[38]。本研究采用 MCR 模型定量识别济南市的生态廊道、构建生态安全格局,基本公式(3)如下:

$$\text{MCR} = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \quad (3)$$

式中:MCR 为最小累积阻力值; D_{ij} 为物种从源地 j 到目的地 i 的空间距离; R_i 为目的地 i 的阻力系数; f 为最小累积阻力与生态过程的正相关关系。

生态安全缓冲区作为生态源地与城镇建设开发区的过渡带,对保护生态源地起着至关重要的作用。根据相关研究^[18,32]以及济南市实际情况,将济南市最小累积阻力面按照自然断点法划分为其他区域、高水平缓冲区、中水平缓冲区、低水平缓冲区。

3 结果与分析

3.1 生态源地提取

3.1.1 “绿源”识别结果与分析 基于 InVEST 模型得到济南市生境质量评价结果(图 1a),栅格值范围在 0~1 之间,值越高代表生境质量越好,维持生物多样性的功能越强。参考郝月等^[32]的分类标准,将生境质量等间距分为低、较低、中等、较高和高 5 个等级,0~2 为低等级,该范围的区域生态系统功能遭到严重破坏,受到人为干扰较大,难以满足生物多样性和生态系统可持续发展的要求,0.8~1 范围内生态系统能够为区域提供良好的生态资源,生态功能稳定。

通过 ArcGIS 10.5 的面积制表功能,得到济南市不同等级生境质量的面积和比例,结果如表 4 所示。济南市平均生境质量为 0.433,总体生境质量在中等

级以下,面积为 8 401.58 km²,全市较低等级生境质量面积最大,占总面积的 62.79%,较高和高等级分别占 5.55%,12.44%。分别统计各区各乡镇的生境质量,生境质量最高的区县为历城区,平均值达到 0.53,生态系统能够满足一般的城市服务需求;生境质量最低的是槐荫区,处于较低等级,由于该区域内建设用地面积较大,人类活动对生境质量产生的负面影响较高。从各区县不同等级生境所占比例来看,历城区的高等级生境质量最高,占区域的 29.04%,其次为历下区,占区域面积的 20.12%。从空间上看(图 1b),济南市生境质量呈“盆地型”分布,南部各区县生境质量较高,其中西营街道平均生境质量为 0.844,最低的是工人新村南村街道,历下区、天桥区、市中区、槐荫区和历城区五区交界处各乡镇、街道的生境质量均小于

0.3,生态系统服务能力较低。济南市生境质量南高中低的原因主要是南部为泰山余脉,森林覆盖广泛,这些区域的生态用地受人为活动威胁较小,生态系统服务功能稳定;中间为济南市主城区,大部分为不透水面,绿化面积较小且呈零星分布,城市道路密度较大,成为生态系统功能的重要威胁因子。

表 4 济南市不同等级生境质量面积及其比例

生境质量等级	面积/km ²	百分比/%
低	1 593.86	15.56
较低	6 432.47	62.79
中	375.25	3.66
较高	568.24	5.55
高	1 274.62	12.44

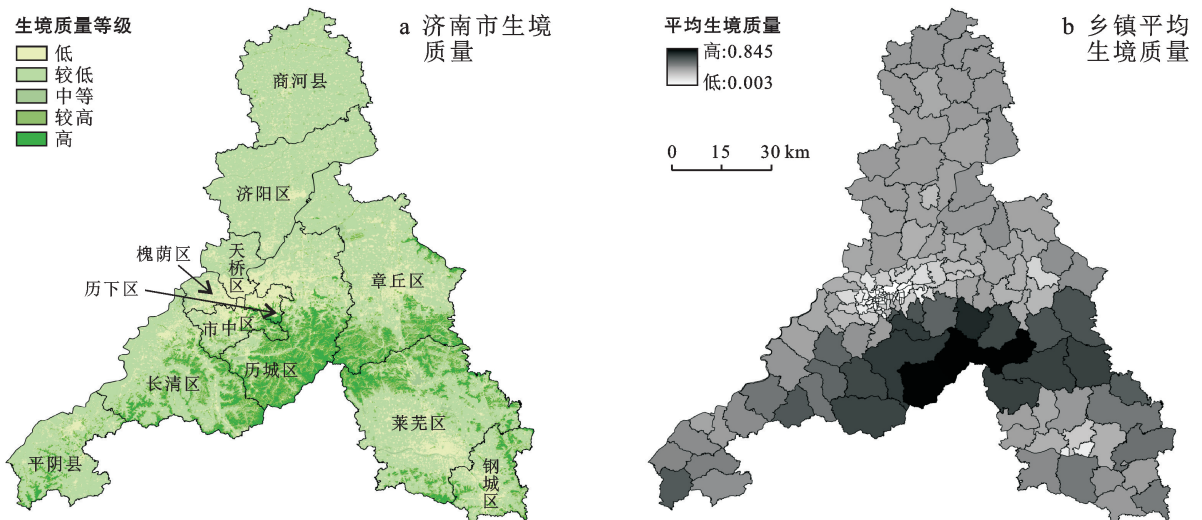


图 1 济南市生境质量评价结果及各乡镇平均生境质量评价结果

“绿源”识别结果如图 2a 所示。“绿源”总面积为 977.81 km²,各地类面积及比例如表 5 所示。其中 90.07%的土地利用类型为林地,多数分布在南部山区,呈现出连片分布的特点,并且生态源地之间的连通性较好,部分分布在平阴县南部、莱芜区北部和钢城区北部。山前平原区以耕地为主,人为活动对生境质量产生较大影响,未能识别出生态源地。草地、灌木林地和耕地分别占总面积的 4.20%,2.92%和 2.61%。“绿源”包括了济南市柳埠自然保护区、药乡国家森林公园、子房洞景区等一级生态控制线内的区域,表明识别结果较为合理。

3.1.2 “蓝源”及“泉源”识别结果与分析 本研究将黄河、小清河、嬴汶河、大汶河、徒骇河、秀江河、西八漏河等主要河流作为河流生态源地,主要分布在济南市中部、东北部;识别出面积累计占总面积 80%以上

的 30 个大中型水库,水库源地以南部山区、莱芜区、钢城区为主要分布地;玉清湖、大明湖、鹊山龙湖、华山湖、白云湖五大湖泊为湖泊源地。将趵突泉泉群、五龙潭泉群、珍珠泉泉群、百脉泉泉群等四大泉群范围内的公园绿地作为泉水蓝色源地(图 2b)。重点渗漏带作为保泉的核心区域对保障泉水持续喷涌具有重要作用,12 个“泉源”主要分布在南部山区北侧(图 3)。

表 5 济南市“绿源”内各地类面积及比例

土地利用类型	面积/km ²	比例/%
耕地	25.49	2.61
林地	880.71	90.07
草地	41.1	4.20
灌木林地	28.55	2.92
水域	0.35	0.04
湿地	1.61	0.16

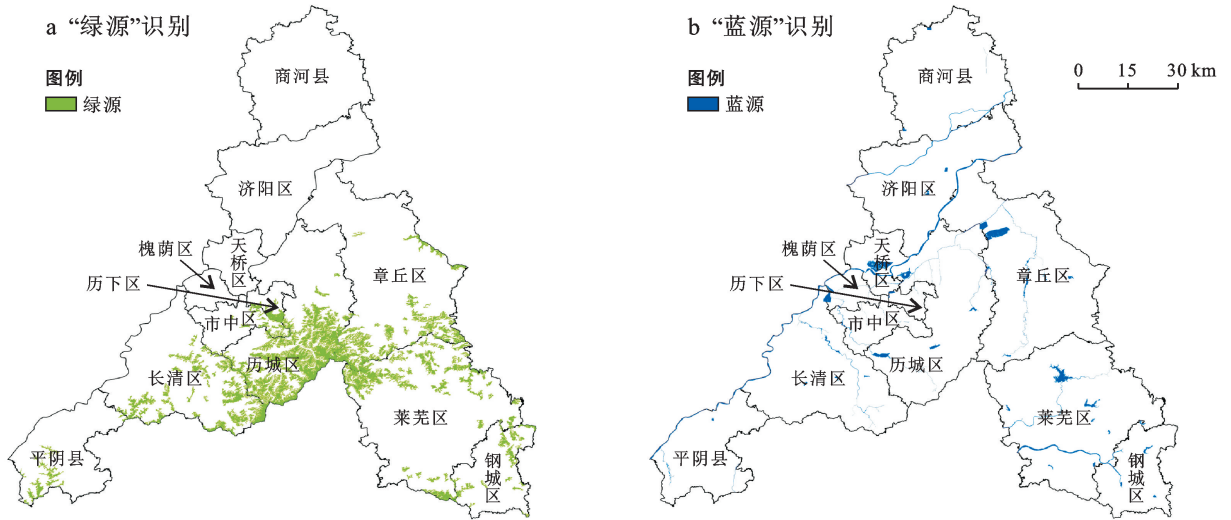
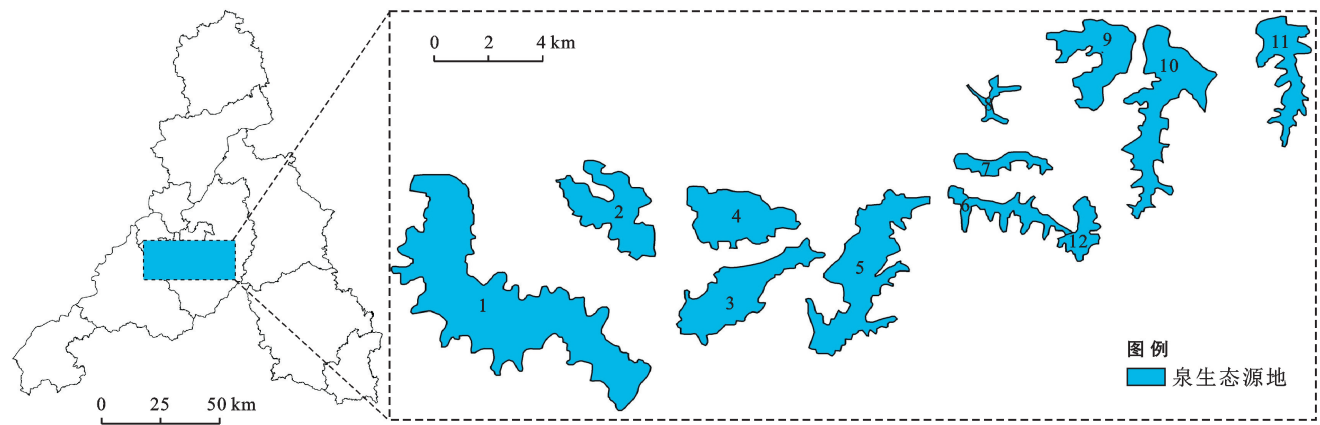


图 2 济南市“绿源”识别结果(a)和“蓝源”识别结果(b)



注:1 为玉符河渗漏带;2 为邵而—展村渗漏带;3 为店于一二仙渗漏带;4 为大涧沟渗漏带;5 为泉庐—钱家庄渗漏带;6 为涝坡—郑家窝渗漏带;7 为矿村渗漏带;8 为龙洞渗漏带;9 为车脚—太平庄渗漏带;10 为河东—河西渗漏带;11 为冶河—蟠龙渗漏带;12 为侯家—义和渗漏带。

图 3 济南市“泉源”识别结果

3.1.3 生态源地综合识别结果与分析 将“蓝、绿、泉”源地叠加,获得济南市总生态源地(图 4),总面积为 1 249.32 km²,占济南市总面积的 12.20%。其中,历城区分布面积为 397.50 km²,占总面积 31.82%,其次为莱芜区,占总面积的 231.09%。商河县仅有 7.54 km²的生态源地,占 0.60%。

3.2 阻力面构建结果与分析

从自然地理、人为干扰两个方面构建的源地扩张的阻力面阻力值位于 10~100 之间,按照自然断点法将数据分为低、较低、一般、较高、高 5 个等级,结果如图 5 所示。济南市阻力面呈现出“中间高,南北低,多团块”的特点,即从中心城区向南北降低的趋势。济南市主城区以及莱芜区、章丘区、钢城区等区县中心城区建设用地较为集中,并且人口密集,物质流和能量流受到的阻力较高。低阻力区域集中分布在南部山区,以林地、草地、耕地等为主,人类活动频率较低,

虽然坡度较陡,但综合阻力小,对周边的物种扩散较为有利。

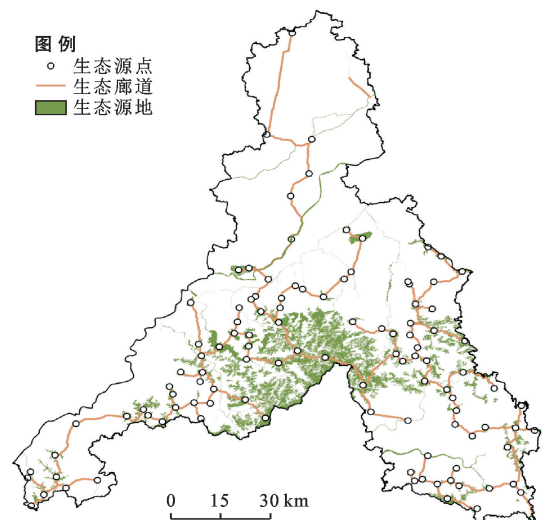


图 4 济南市生态廊道识别结果

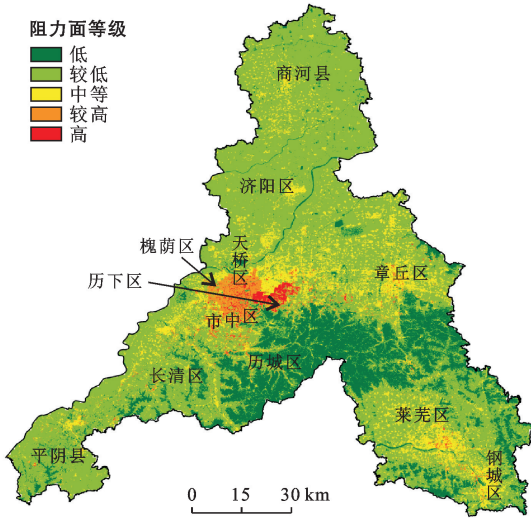


图 5 济南市阻力面分布

3.3 生态廊道识别结果与分析

研究共识别出生态源点 111 个。通过 Cost-Distance 工具提取的生态廊道共有 119 条,全长 1 395.37 km,最长生态廊道 187.92 km,最短为 0.97 km。空间上西部地区生态廊道呈西南向东北走向分布,东部为东南—西北走向,南部呈东西分布,连通了东南西北四方的生态源地。分布广泛的河流构成天然廊道,其中黄河面积宽分布长,在研究区起到了重要、稳定的物质能量信息流动带的作用,小清河沟通了南北走向的韩仓河、巨野河、大辛河等,形成环状的廊道网络;南部山区由于生态源地广布成为“绿源”、“泉源”廊道的聚集区,各生态源地之间的廊道通过水库、河流连通,且由于源地分布面积较广,各生态源地连通性好,廊道较为稀疏;章丘区生态源地较为分散,廊道以陆地廊道为主;长清区、平阴县、莱芜区和钢城区廊道由河流与陆地共同构成,河流协调了物质能量流动功能,为生物迁移起到较好的桥梁作用。

整体上济南市形成了联通南泰山北黄河的“山河通廊”,稠密的河网有效提高各生态用地的连通性。生态廊道的宽度受到物种种类、生态环境等有关因素的影响,济南市适合物种迁移的陆地生态廊道宽度设置为 12~30 m^[39]。

3.4 生态安全缓冲区识别结果与分析

济南市生态安全缓冲区结果如图 6 所示。高、中、低水平安全缓冲区面积分别为 1 495.5, 1 382.19, 1 262.87 km²,占济南市总面积的 40.42%。其中高水平安全缓冲区为生态源地重要保护区,具有重要的生态保护价值,应禁止进行任何开发建设活动,保障区域内泉水渗漏、生物多样性保护等生态系统服务功能不受人类活动的影响。

城市发展建设、人们生活与济南的泉水特色息息相关,生态泉城建设应重点关注泉水生态环境,为避免城市建设蚕食重点渗漏带,政府应评估该区域的建设活动,保障泉水与城市可持续发展。中水平安全缓冲区为一般保护区,限制该区域城镇开发活动,尽量避免天然岩溶地质环境破坏,影响大气降水渗入,同时应注意一般保护区内生境质量较高的斑块,鼓励进行植被修复、山体绿化等生态保护活动。低水平安全缓冲区为建设缓冲区,在该区域可以进行建设活动,但需要注意建设的规模和强度,科学合理进行规划,保证生态系统功能不受影响。

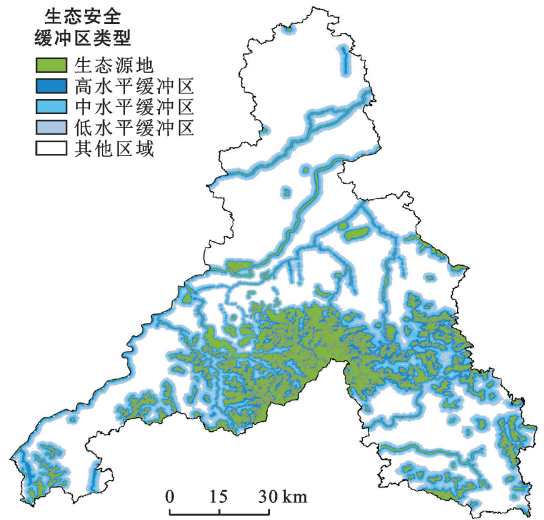


图 6 济南市生态安全缓冲区分区

3.5 济南市生态安全格局

通过 InVEST 模型、基础地理数据提取等方法,提取济南市生态源地、生态廊道的空间分布形态,根据《济南市城市发展战略规划(2018—2050)》、水生态文明建设成果,将研究区湿地生态区、泉水景观区和生态保护区作为重要分区,构建济南市生态安全格局。济南市整体上呈现“一带、三区、两翼、九点、多廊”的格局(图 7)。“一带”是指黄河生态保护带,贯穿济南市,保障区域的水资源环境,与沿岸湿地共同构成生态景观带,成为济南的“生态脊”。“三区”指济南南部生态保护区、城市泉水景观区、沿河湿地生态区。其中,南部生态保护区包含城市大部分绿源和泉源,保护城市生物多样性和泉水生态安全;泉水景观区以天然河流廊道为主,通过水库湖泊连接小清河、黄河与南部“绿源”,提供泉水观景功能;沿河湿地生态区主要以黄河北岸形成的湿地为主,提供滞蓄洪水、景观游览功能。“两翼”指长清区、平阴县和莱芜区、钢城区,生态廊道连接“绿源”和“蓝源”。“九点”指环绕中心城区的卧虎山、锦绣川、狼猫山、杜张 4 座

水库和玉清湖、大明湖、鹊山龙湖、华山湖、白云湖 5 个湖泊及毗邻的相关湿地等。“多廊”指城市的天然河流廊道和潜在生态廊道,主要河流廊道包括德惠新河、徒骇河、小清河、玉符河、北大沙河、大辛河、韩仓河、巨野河、绣川河、大汶河,潜在生态廊道以识别出南部山区以及各区县的“绿源”、“蓝源”连接廊道为主。

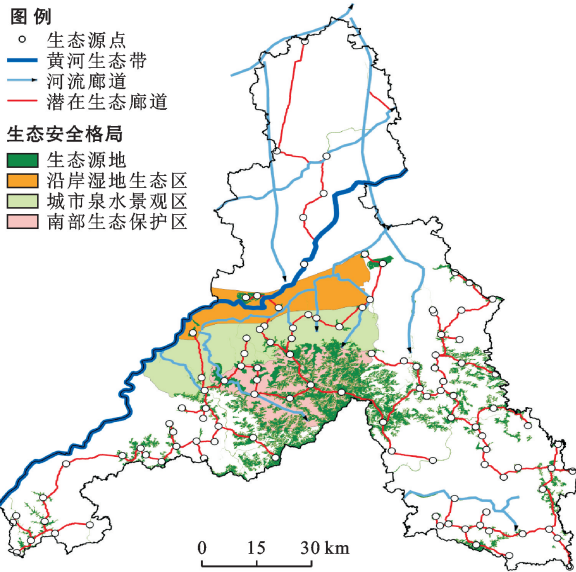


图 7 济南市生态安全格局

4 讨论与结论

4.1 结论

本文选取济南市作为研究对象,基于生态学理论以及泉水相关知识,从“山水林田湖草泉”系统出发选取生态源地,基于 MCR 模型识别研究区生态廊道,构建济南市“一带、三区、两翼、九点、多廊”的生态安全格局。

(1) 通过生境质量评价以及生态保护需求,识别出济南生态源地共 1 249.32 km²,“绿源”主要分布在南部泰山余脉,“蓝源”以区域内主要河流、湖泊、大中型水库和四大泉群的绿地为主,“泉源”分布在南部山区北部。

(2) 研究区阻力面以主城区为中心向四面降低,各区县城区呈现小范围的阻力高值区,研究表明人类活动对物种迁移影响最大。

(3) 济南市构建了“一带、三区、两翼、九点、多廊”的点一线一面生态安全格局。生态源点共 111 个,为生态源地的斑块几何中心,生态廊道共有 119 条,全长 1 395.37 km,黄河天然廊道从研究区西南部延伸到东北部,距离较长,联通了济南市北部与南部生态斑块,成为区域重要廊道。

4.2 讨论

(1) 本研究基于“蓝—绿—泉”系统识别济南市

生态源地,避免了主观干扰,并且考虑了济南泉城特色,有利于缓解城市发展与生态安全、泉水保护之间的矛盾。本文采用了 InVEST 模型提取生态源地,受到模型和数据精度的影响,最终结果可能会存在一定的局限性;其次,生态系统不完全行政边界的制约,周边区域的物质、能量流动也会对生态安全产生影响,因此在今后研究中应重点关注行政单元周边各要素的相互作用。

(2) 根据《济南市发展战略规划(2018—2050)》内容,未来将形成轨道支撑的多中心组团式结构,老城、长清以及雪野等发展片区按照规划内容将会与生态源地部分重叠。其中老城发展片区主要影响保泉核心区域—重点渗漏带,包括人工型渗漏带和近自然型渗漏带,泉水的喷涌受到一定威胁;雪野和长清等发展片区对部分林地产生一定影响,生态环境可能会遭到一定破坏;城市轨道交通的发展也会占用部分生态用地,影响正常的生态系统服务功能。因此,在城市发展过程中要注意对生态源地的保护,特别是重点渗漏带区域,建设用地尽量避开生态源地以及生态廊道,为物种生存及迁徙提供良好的条件。以城市生态系统安全为底线,基于生态安全格局进行城市规划,构建城市与自然和谐发展格局,以实现“蓝绿交织,清新明亮,泉城共融”的济南城市布局。

(3) 生态安全格局构建不仅为济南 2019 年行政区划调整后生态规划工作提供参考借鉴,也可政策实施等工作提供指导建议。根据本文研究结论,南部山区作为城市的生态源地集聚区对城市安全至关重要,因此济南市政府相关部门在进行生态环境保护时,要结合城市特色,落实《济南南部山区保护与发展规划》,贯彻“南控”方针,以“蓝天工程”、大环境绿化工程为重点提高森林覆盖率、涵养城市水源,构建“山水林田湖草泉”一体的现代化生态济南。

[参 考 文 献]

- [1] 彭建,李冰,董建权,等.论国土空间生态修复基本逻辑[J].中国土地科学,2020,34(5):18-26.
- [2] 赵伟,邹欣怡,蒲海霞.成渝地区双城经济圈生态安全格局构建[J].中国环境科学,2021,41(5):2423-2433.
- [3] 樊杰.我国国土空间开发保护格局优化配置理论创新与“十三五”规划的应对策略[J].中国科学院院刊,2016,31(1):1-12.
- [4] 马克明,傅伯杰,黎晓亚,等.区域生态安全格局:概念与理论基础[J].生态学报,2004,24(4):761-768.
- [5] Yu Kongjian. Security patterns and surface model in landscape ecological planning [J]. Landscape and Urban Planning, 1996,36(1):1-17.

- [6] 俞孔坚.生态安全格局与国土空间开发格局优化[J].景观设计学,2016,4(5):6-9.
- [7] 李恒凯,刘玉婷,李芹,等.基于MCR模型的南方稀土矿区生态安全格局分析[J].地理科学,2020,40(6):989-998.
- [8] 彭建,赵会娟,刘焱序,等.区域生态安全格局构建研究进展与展望[J].地理研究,2017,36(3):407-419.
- [9] 彭建,汪安,刘焱序,等.城市生态用地需求测算研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(2):333-346.
- [10] 杨姗姗,邹长新,沈渭寿,等.基于生态红线划分的生态安全格局构建:以江西省为例[J].生态学杂志,2016,35(1):250-258.
- [11] 张玉虎,于长青,塔西甫拉提·特依拜,等.风景区生态安全格局构建方法研究:以北京妙峰山风景区为例[J].干旱区研究,2008,25(3):420-425.
- [12] 陈德权,兰泽英,李玮麒.基于最小累积阻力模型的广东省陆域生态安全格局构建[J].生态与农村环境学报,2019,35(7):826-835.
- [13] 郑好,高吉喜,谢高地,等.生态廊道[J].生态与农村环境学报,2019,35(2):137-144.
- [14] 冯琰玮,甄江红,马晨阳.干旱区城市生态安全格局优化研究:以内蒙古呼和浩特市为例[J].水土保持研究,2020,27(4):336-341.
- [15] 吴庭天,陈宗铸,雷金睿,等.琼北火山熔岩湿地生态安全格局研究[J].生态学报,2020,40(23):8816-8825.
- [16] 于超月,王晨旭,冯喆,等.北京市生态安全格局保护紧迫性分级[J].北京大学学报(自然科学版),2020,56(6):1047-1055.
- [17] 彭建,李慧蕾,刘焱序,等.雄安新区生态安全格局识别与优化策略[J].地理学报,2018,73(4):701-710.
- [18] 王媛,周长威.黔中城市群景观生态安全格局构建[J].生态与农村环境学报,2019,35(9):1111-1117.
- [19] 冯琰玮,甄江红,马晨阳.内蒙古生态承载力评价及生态安全格局优化[J].地理研究,2021,40(4):1096-1110.
- [20] 李涛,巩雅博,戈健宅,等.基于电路理论的城市景观生态安全格局构建:以湖南省衡阳市为例[J].应用生态学报,2021,32(7):2555-2564.
- [21] 王浩,马星,杜勇.基于生态系统服务重要性和生态敏感性的广东省生态安全格局构建[J].生态学报,2021,41(5):1705-1715.
- [22] 王家乐.济南岩溶水系统多级次循环模式分析及识别方法研究[D].湖北 武汉:中国地质大学,2016.
- [23] 孔繁花,尹海伟.济南城市绿地生态网络构建[J].生态学报,2008,28(4):1711-1719.
- [24] 朱昕虹,宋丽,迟海龙.凸显“泉城”地域特色的生态保护与修复行动:济南保泉生态控制线划定与管控规划[J].规划师,2018,34(4):69-74.
- [25] 迟海龙,朱昕虹,宋丽.基于“保泉”理念的济南市生态资源评估及修复策略研究[J].建筑与文化,2019(1):217-219.
- [26] 刘莉莉,宋苏林,崔春梅.济南泉水的成因及保泉对策研究[J].山东水利,2013(5):17-18.
- [27] 周娟,邢立亭,滕朝霞,等.制约济南岩溶大泉持续喷涌的主因素阈值研究[J].华东师范大学学报(自然科学版),2015,2015(3):146-156.
- [28] 党明德,王晓军,陆敏.对济南泉水的来源路径及其保泉问题的研究[J].山东经济战略研究,2003(4):35-40.
- [29] 毛克庭,张彦.基于“蓝绿”系统的城市生态系统规划方法探讨:以南京市江北新区总体规划为例[C]//中国城市规划学会.城乡治理与规划改革:2014中国城市规划年会论文集(07城市生态规划).中国城市规划学会:中国城市规划学会,2014:7.
- [30] 王军,严有龙,王金满,等.闽江流域生境质量时空演变特征与预测研究[J].生态学报,2021,41(14):5837-5848.
- [31] 沈钦炜,林美玲,莫惠萍,等.佛山市生态网络构建及优化[J].应用生态学报,2021,32(9):3288-3298.
- [32] 郝月,张娜,杜亚娟,等.基于生境质量的唐县生态安全格局构建[J].应用生态学报,2019,30(3):1015-1024.
- [33] 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.
- [34] 康洁铭,刘雨,朱晓伟,等.胶东半岛生态安全格局识别与优化布局[J].生态与农村环境学报,2020,36(8):1015-1025.
- [35] 应征.济南市水福利指数研究[D].山东 济南:山东财经大学,2014.
- [36] 济南市自然资源和规划局.彰显城市特色,建设美丽宜居泉城—《济南城市发展战略规划(2018-2050)》解读系列之三[EB/OL].(2019-04-03)[2021-09-02].http://nrc.jinan.gov.cn/art_43830_3510948.html.
- [37] 管清花,刘彩虹,陈学群,等.济南泉域重点渗漏带植被覆盖空间异质性[J].东北林业大学学报,2020,48(9):8-14,25.
- [38] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning [J]. Landscape and Urban Planning, 1992,23(1):1-16.
- [39] 王琳,张祖陆.济南市南部山区生态恢复与重建途径探讨[J].地理与地理信息科学,2003,19(3):71-75.