

基于最小累积阻力模型的福建省南平市延平区生态安全格局构建

韩世豪¹, 梅艳国², 叶持跃¹, 张珂¹, 尹秀秀¹

(1. 宁波大学 地理与空间信息技术系, 浙江 宁波 315211; 2. 青岛市环境保护科学研究院, 山东 青岛 266003)

摘要: [目的] 对城市综合生态安全格局进行构建, 为城市总体规划和城市生态规划等专题研究提供科学参考。[方法] 以福建省南平市延平区为研究对象, 在划定生态保护红线的基础上选择生态源地, 以地形坡度、土地覆盖和植被覆盖为阻力因子, 应用最小累积阻力模型, 以生态阻力面直方图分布的突变点 2 983 和 9 268 为界, 分别构筑延平区底线型、缓冲型和理想型生态安全格局。[结果] 延平区生态源地, 即底线型生态格局用地面积为 534.51 km², 占延平区面积的 20.10%; 缓冲型和理想型生态安全格局用地面积分别为 771.17 和 1 592.79 km², 占到延平区的 29.00% 和 59.89%。结合这 3 种不同安全水平的生态安全格局, 进一步明确了生态源地间的 13 条生态廊道和 5 个关键生态节点, 共同组合形成了延平区综合生态安全格局。[结论] 在生态保护红线的基础上, 结合延平区山水型城市的特点, 确定了不同安全水平的生态用地分布格局、生态廊道和关键生态节点, 形成了延平区综合生态安全格局。

关键词: 生态安全格局; 最小累积阻力模型; 生态保护红线; 福建省南平市延平区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2019)02-0192-07

中图分类号: X171

文献参数: 韩世豪, 梅艳国, 叶持跃, 等. 基于最小累积阻力模型的福建省南平市延平区生态安全格局构建[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 192-198. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.02.031; Han Shihao, Mei Yanguo, Ye Chiyue, et al. Construction of ecological security pattern in Yanping District of Nanping City, Fujian Province based on minimum cumulative resistance model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2): 192-198.

Construction of Ecological Security Pattern in Yanping District of Nanping City, Fujian Province Based on Minimum Cumulative Resistance Model

Han Shihao¹, Mei Yanguo², Ye Chiyue¹, Zhang Ke¹, Yin Xiuxiu¹

(1. Geography & Spatial Information Techniques Department, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China; 2. Qingdao Research Academy of Environmental Sciences, Qingdao, Shandong 266003, China)

Abstract: [Objective] The construction of a urban integrated ecological security pattern was studied in order to provide scientific references for special studies such as urban master planning and urban ecological planning. [Methods] Taking Yanping District of Nanping City, Fujian Province as the research object, the ecological source land was selected on the basis of the ecological protection red line. The terrain gradient, land cover and vegetation cover were used as the resistance factors, and the minimum cumulative resistance model was applied to the mutation point of the ecological resistance surface histogram distribution. 2 983 and 9 268 are the boundaries, and the bottom line type, buffer type and ideal ecological security pattern of Yanping District are constructed respectively. [Results] The ecological source area of Yanping District, namely the bottom line ecological pattern, covered an area of 534.51 km², accounting for 20.10% of the Yanping District. The buffered and ideal ecological security pattern covered an area of 771.17 km² and 1 592.79 km² respectively, and accounting for 29.00% and 59.89% of Yanping District. Combining three different levels of safety and ecological security, the 13 ecological corridors and 5 key ecological nodes between the ecological sources were further clarified, and the comprehensive ecological security pattern of Yanping District was formed. [Conclusion] On the basis of the ecological protection red line, combined with the characteristics of

收稿日期: 2018-09-07

修回日期: 2018-09-17

资助项目: 国家科技支撑计划项目“东南沿海地区生态型村镇社区与小康住宅建设技术集成与示范”(2013BAJ10B06-01)。

第一作者: 韩世豪(1989—), 男(汉族), 河南省郑州市人, 硕士研究生, 研究方向为生态评价与生态安全。E-mail: 1239849175@qq.com。

通讯作者: 叶持跃(1965—), 男(汉族), 浙江省宁波市人, 硕士, 副教授, 主要从事环境与旅游规划方面的研究。E-mail: yechiyue@nbu.edu.cn。

Yanping District which is a landscape-type city, the ecological land distribution patterns of different safety levels, ecological corridors and key ecological nodes are determined, and the comprehensive ecological security pattern of Yanping District is formed.

Keywords: ecological security pattern; minimum cumulative resistance model; ecological red line; Yanping District of Nanping City in Fujian Province

20 世纪以来,快速的城市化进程已成为人类社会最显著的特征^[1],高强度的城市化进程往往伴随着高强度的土地开发及土地利用方式的快速转变,使原本脆弱的生态环境趋于恶化,生态系统受到的威胁日益严重,进而威胁区域生态安全,生态安全问题正越来越多的受到国内外学者和组织的关注^[2-5]。在我国,党中央、国务院高度重视生态环境保护,生态安全格局被认为是实现区域生态安全、缓解生态保护与经济发展之间矛盾的基本保障和重要空间途径之一^[6-8]。党的十八大报告明确要求“构建科学合理的国土生态安全格局”,习近平总书记也强调“构建科学合理的城镇化推进格局、农业发展格局、生态安全格局,保障国家和区域生态安全,提高生态服务功能”^[9]。生态安全格局理论依据格局与过程的互馈作用,通过构建区域生态安全格局,达到对生态过程的有效调控,从而保障生态功能的充分发挥,实现区域自然资源和绿色基础设施的有效合理配置,确保必要的自然资源的生态和物质福利,最终实现生态安全^[10-11]。目前生态安全格局构建已经得到比较深入的研究,俞孔坚^[12-13]提出了构建生态安全格局三步骤的方法框架:首先,确定物种扩散源的现有自然栖息地(即生态源地);其次,建立阻力面;最后,根据阻力面来判别安全格局。此方法在国内得到较为广泛应用,研究对象主要涉及土地利用^[14]、水体^[15]、生态用地^[16]等,研究区域涵盖自然保护区和风景名胜^[17]、流域^[18]、城市化区域^[19-20]、农牧交错带^[21]等生态系统特征具有显著差异的区域。南平市是福建省生态保护的绿色屏障,也是全省经济最落后的城市,作为一个山区城市,南平市人口密度最高的地带集中在延平区,延平市区人口密集度和北京市核心区人口密度相当^[22],土地利用率高达 94.26%,其山地多而陡峭、平地少的特点极大地限制了城市形态结构的发展。面对经济发展与生态保护的双重需求,延平区生态安全格局构建可以为城市生态规划等提供科学参考,对保障省域生态安全具有重要意义。

1 研究区及数据来源

1.1 研究区概况

南平市延平区位于福建省中部偏北,建溪、西溪汇合处,为闽江干流的源头,介于 26°15′—26°52′N, 117°50′—118°40′E,是闽北政治、经济、文化中心之

一,总面积 2 659.7 km²。地处闽中大谷地最低处,地貌以低山丘陵为主。属中亚热带海洋季风气候,具有夏长冬短、雨季明显、云雾多、湿度大等气候特点,年均气温 19.3 ℃,年降水量 1 669 mm。水资源十分丰富,境内有一江三溪(闽江、建溪、沙溪、富屯溪),七十二支流纵横交织,水电理论蕴藏量居福建省首位。土壤类型有粗骨土、红壤、黄壤、水稻土、紫色土等 5 种,以红壤、水稻土为主。植被以针叶林为主,杉木速生丰产指标居全国之冠,素有“绿色金库”、“森林之窗,本甲全闽”之称,是中国南方三大杉木产区之一,该区森林面积 1.89 × 10⁵ hm²,森林覆盖率达 73.6%,森林蓄积量为 1.79 × 10⁷ m³。

1.2 数据来源

文中涉及的主要数据包括延平区主要水文数据、自然保护区、森林公园、生态公益林等矢量数据。除此之外,还包括下载于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)的 DEM(2009 年,分辨率 30 m)和 2016 年植被数据(NDVI)。土地利用分类参照全国《土地利用现状调查技术规程》,结合延平区实际,在 ArcGIS 中将土地利用归类为林地、耕地、草地、水域、未利用地和建设用地等 6 种类型,最终建立研究区土地利用 2012 年属性数据库。

2 研究方法

2.1 最小累积阻力模型

本文的生态阻力面构建是通过最小累积阻力模型(MCR)计算所得。最小累积阻力模型指物种在从源到目的地运动过程中所需耗费代价的模型,由荷兰生态学家 Knappen^[23]于 1992 年提出,最早应用于对物种扩散过程的研究,后被广泛应用于物种保护和景观格局分析等生态领域^[24],经国内俞孔坚等^[12,25-26]修改用下式表示:

$$MCR = f \min_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \cdot R_i)$$

式中:MCR——最小累积阻力面值; f ——一个未知的负函数,表示最小累积阻力与生态适宜性的负相关关系; \min ——某景观单元对不同的生态源取累积阻力最小值; D_{ij} ——从源 j 到景观单元 i 的空间距离; R_i ——景观单元 i 对运动过程的阻力系数。该模型考虑了 3 个方面的因素,即源、距离和基面阻力特征,反映了物种运动的潜在可能与趋势,通过最小累积阻

力的大小可以判定源向外扩张的可能性,反映了空间单元与源的联通性。

2.2 生态源地选择

生态源地是整个生态安全格局构建的基础,其准确性和全面性对格局整体构建至关重要。目前,多数研究将自然保护区和风景名胜区的核心区等直接识别为生态源地,还有学者选用区域内一定面积的林地、耕地、水体等生态斑块作为生态源地^[14,17],这些方法具有一定的便捷性,但也有其固有的缺陷^[1]。生态保护红线在生态空间中具有特殊重要的生态功能,必须受到强制性的严格保护。它既是生态空间中最重要、最核心的部分,也是国土空间的优先控制线、保障生态安全的底线和生命线,因而构成生态安全格局的基本框架。生态保护红线可以视为生态安全的底线格局,但未必是最优格局,以生态保护红线为基本构架,结合最小累积阻力模型,是生态安全格局构建的一种新思路。同时,生态保护红线具有明显的地理边界,合理整合了多部门的生态保护成果,更加全面地关注了多种生态过程,为生态安全格局的构建提供了基础^[27]。根据生态安全的涵义,生态源地需要实现维护现有景观过程的完整性、保证生态系统服务的可持续性和防止生态系统退化带来的各种生态问题等至少三个层次的目标^[20]。生态保护红线完整纳入了区域内对生态过程、生态系统服务功能以及对外界干扰敏感的生态斑块。在生态保护红线的基础上选择生态源地,能够更多地关注生态系统结构、过程与功能,集中解决区域重要生态功能的保护与恢复等生态环境问题,从而构建更加全面系统的生态安全格局^[28]。本文以延平区生态保护红线(福建省新一轮生态保护红线划定工作尚未完成,这里参考此前划定的生态保护红线一级管控区)为基础,选取生态保护红线中集中连片、具有一定面积的生态公益林、水源涵养区和茫荡山国家级自然保护区、沙溪口水库、水口水库(即延平湖)作为生态源地,同时考虑到森林对整个闽江流域水环境安全有着重要意义,故将延平区内 4 个森林公园(即南平凤山森林公园、南平大峰山森林公园、峡阳屏山森林公园和南平市郊森林公园)和“一江三溪”纳入到生态源地中。最终划定的生态源地如图 1 所示。

2.3 阻力面构建

物种在不同景观单元之间进行迁移时会受到阻碍^[29],构建阻力面是计算其在需要克服阻力情况下扩散路径的基础。生态阻力系数 R_i 的确定依赖于基本生态阻力面的构建。由于基面特性差异,生态源地在扩展过程中所受到的阻力是不同的。本文从地形坡度、土地覆盖和植被覆盖 3 个方面构建生态阻力的评价指标体系(表 1)。地形坡度由地形起伏度和坡

度两方面体现,土地覆盖用土地利用类型体现,植被覆盖用植被覆盖指数(NDVI)体现。首先,参照叶玉瑶等人的分级标准^[30],将各项生态阻力因素划分为 5 个等级,在 ArcGIS 中对不同等级分别用 1,3,5,7,9 赋值,各因素权重通过专家打分的方式确定;然后,将赋值后的地形坡度、土地覆盖和植被覆盖转化为栅格数据,通过栅格计算器分别按照 0.3,0.4,0.3 的比重将其合并到 1 个图层(图 2);最后,在上述阻力分级评价基础上,基于基面阻力评价结果,进一步考虑生态源地和距离因素的影响,采用 MCR 模型算法,运用 ArcGIS 中 cost-distance 模块,便可得到一个基于生态源地的综合阻力面,即延平区生态阻力面。

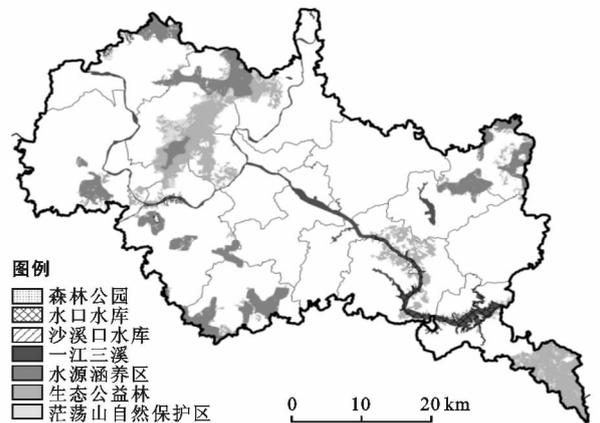


图 1 福建省南平市延平区生态源地布局

2.4 生态廊道和生态节点

构建生态廊道和生物多样性保护网络,是优化生态安全屏障体系的重要保障。生态廊道是具有生物多样性维护、涵养水源、土壤保持、调蓄洪水等多项生态系统服务功能的廊道类型^[31],是生态源地相互联系、进行物质和能量交换的直接通道,是保持生态流、生态过程、生态功能在区域内连通的关键生态组分,能增强生态系统整体连通性。提取关键生态廊道,对于保障生态源地之间的物质和能量流动的畅通,实现区域生态系统功能的完整性具有重要意义^[32]。在 ArcGIS 中,通过生态源地确定生态质心,以综合生态阻力面为权重,利用 MCR 模型可以生成生态廊道,即生态质心之间的最小成本路径。生态节点是指分布在生态空间中,连接邻近生态源地,并对生态流起关键作用的生态组分^[33],是生态安全格局中易受外界干扰的生态脆弱点,是连接生态源地的跳板,对维护区域景观生态结构的整体性、连续性和生态功能的发挥具有战略意义^[34]。将综合生态阻力面作为 DEM 数字高程模型,利用 ArcGIS 中的水文分析模块确定生态阻力面最大成本路径,其与生态廊道的交叉点即为生态节点。

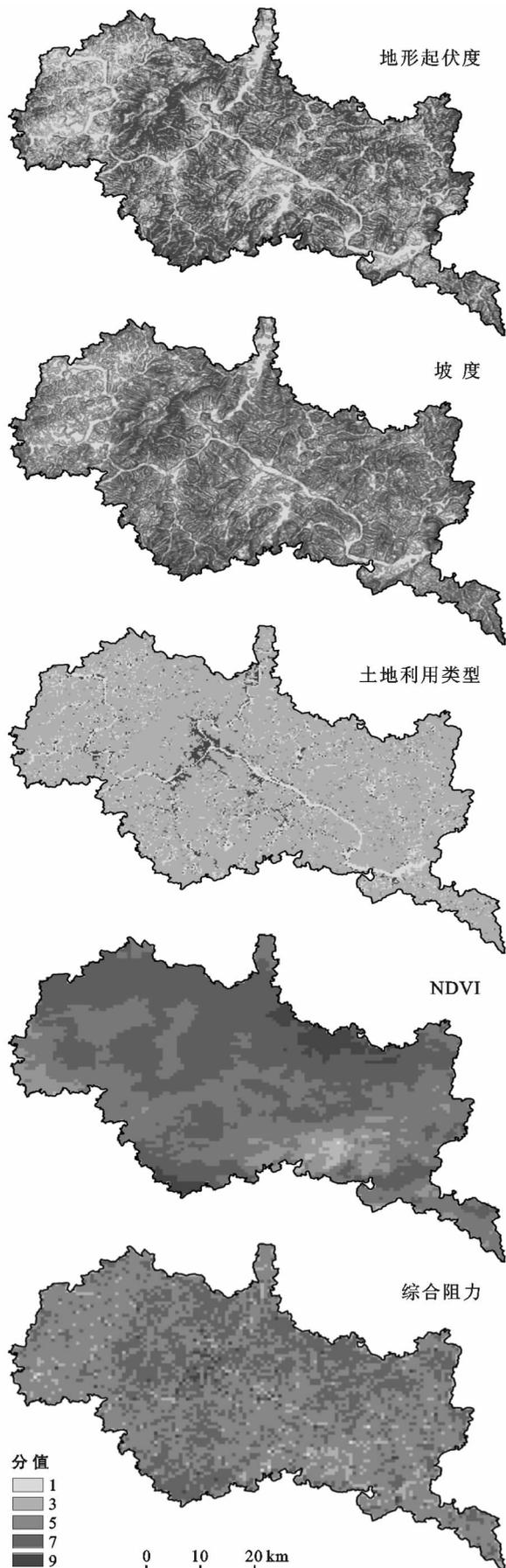


图 2 福建省南平市延平区生态阻力评价结果

3 结果分析

3.1 生态阻力面生成

据前所述,基于延平区生态保护红线选择的生态源地,结合延平区生态阻力评价结果,在 ArcGIS 中通过最小累积阻力模型的计算,得到了延平区生态安全格局的生态阻力面(图 3)。

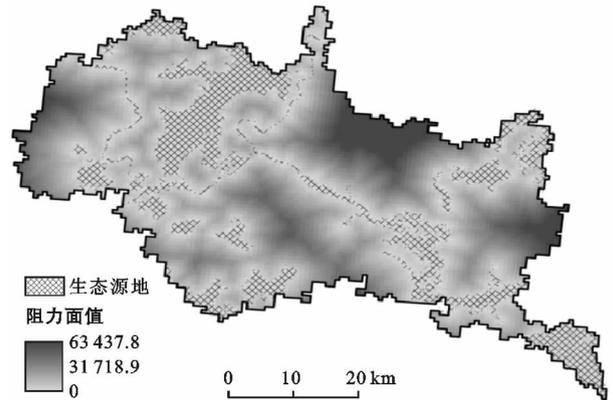


图 3 福建省南平市延平区生态安全格局生态阻力面

根据延平区生态阻力面的空间特征可以判别延平区生态安全格局。从图 3 可以看出,以生态源地为中心,生态阻力值呈现出递增的效果,有一个缓冲区存在。围绕在生态源地的周围区域生态阻力面值都较小,是生态源地往外扩散的低阻力区,可以构成中等安全水平的生态安全格局。除已确定的生态源地外,生态安全格局的其它各组分都可以根据生态阻力面的空间特征来判别。根据前人^[12]研究成果,生态阻力面缓冲区存在一些有效边界,随着缓冲区边界向外围的扩展,生态源地对扩展的阻力随之增加,但这种增加并不是线性的,有时非常平缓而有时则非常陡峭。根据生成的生态阻力面可以构建一种曲线:生态阻力值与面积(栅格数)的关系曲线(图 4),通过这种曲线可以得到某些阶段性的门槛值,根据这些门槛值,在生态阻力面的空间格局上可以确定缓冲区的有效边界,实现缓冲区划分的有效性。

从生态阻力面积与生态阻力值直方图分布趋势中可以直观地看出面积与生态阻力值之间存在一些可识别的门槛值,即在这些点附近随着缓冲区范围的扩大或减少,生态阻力值发生急剧性变化。如果将缓冲范围扩展到一定边界之后,所增加的面积的可利用性及其保护意义会急剧下降,则这样的一些门槛值可作为缓冲区划分的依据。在图 4 中的 a 点和 b 点附近生态阻力值发生了较为明显的变化,都发生了从增大到减小的转变,这两点可以作为缓冲区划分的门槛值。图 4 中 a 点和 b 点分布对应的生态阻力值为 2 983,9 268,将这两个值作为有效边界划分生态阻

力面缓冲区可以得到延平区中等安全水平和高安全水平的生态安全格局(图 5)。从图 5 中可以看出,延平区中等安全水平的生态安全格局和高安全水平的

生态安全格局都是距离生态源地一定距离的缓冲区,面积分别达到了 771.17 km², 1 592.79 km², 占到延平区国土面积的 29.00%和 59.89%。

表 1 福建省南平市延平区生态阻力评价指标体系

一级因子	二级因子	等级	赋值	二级权重	一级权重
地形坡度	地形起伏度/m	<20	1	0.5	0.3
		20~40	3		
		40~60	5		
		60~80	7		
		>80	9		
		坡度/(°)	<3		
3~8	3				
8~15	5				
15~25	7				
>25	9				
土地覆盖	土地利用类型	河流、水库、坑塘、内陆滩涂;	1	—	0.4
		园地、果园、茶园、灌木林地、有林地、其他林地;	3		
		旱地、草地、人工牧草地、其他草地、水浇地;	5		
		裸地、荒漠、未利用土地;	7		
		城市、建制镇、村庄、港口码头用地、采矿用地、交通用地、风景名胜及特殊用地	9		
植被覆盖	NDVI	<0.1	9	—	0.3
		0.1~0.2	7		
		0.2~0.3	5		
		0.3~0.4	3		
		>0.4	1		

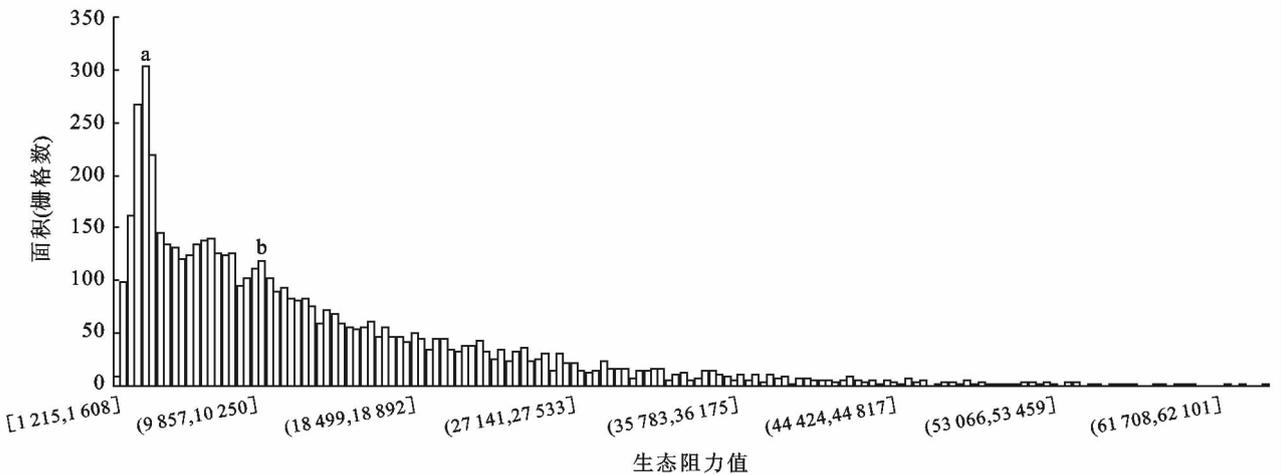


图 4 生态阻力值与栅格数目的关系

基于生态保护红线确立的生态源地面积为 534.51 km², 占到延平区国土面积的 20.10%, 构成了生态安全格局的基本骨架, 是保障生态安全生命线 and 底线。高安全水平生态安全格局用地占延平区的 59.89%, 主要分布在生态源地一定距离的缓冲区内, 延平区地貌为以低山丘陵为主, 呈现出“八山一水

一分田”的空间格局, 森林覆盖率达到 73.6%, 高安全水平生态安全格局是维护延平区生态安全的理想生态安全格局, 可以最大限度地保护生态基础设施和提供生态服务。中等安全水平生态安全格局用地面积介于底线型生态安全格局和理想型生态安全格局之间, 占到延平区的 29.00%, 完整包括了延平

区内所有关键性生态用地,并在此基础上进行了适当扩充,可以作为延平区缓冲型生态安全格局,它们对于维护区域内关键生态工程具有重要意义。缓冲型生态安全格局既保障了延平区生态安全所需的最小

生态用地,也对未来城市发展可能带来的环境影响预留了缓冲区域,可以作为延平区“满意生态安全格局”,是同时实现城市空间精明保护与精明增长的基础(图 5)。

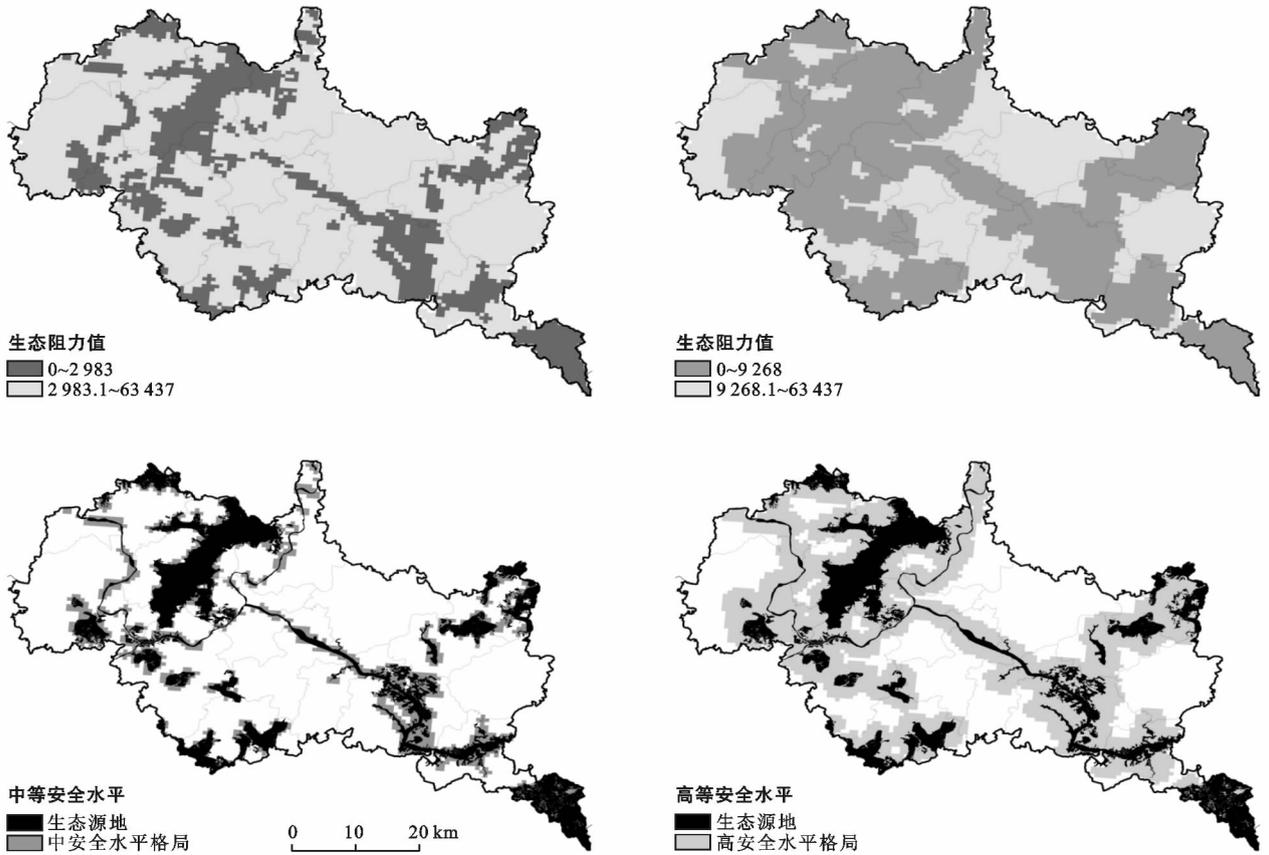


图 5 福建省南平市延平区不同水平生态安全格局分布

3.2 生态廊道和生态节点构建

基于生态源地和构建的生态阻力面,根据前文所述方法,共得到 13 条生态廊道和 5 个生态节点,生态廊道的长度共计 54.84 km。生态廊道并不是生态源地间的最短路径,是加权费用相对较小的路径,且连接各生态源地形成几个环状廊道布局。结合构建的延平区底线型、缓冲型和理想型生态安全格局,将其与生态廊道和生态节点组合在一起,可以构筑起延平区具有高中低三种安全水平的综合生态安全格局(图 6),这些生态安全格局的构建将对延平区生态安全保障有着潜在的决定性作用。生态安全格局的构建,有助于科学引导人类进行合理的开发建设活动,加强对关键生态敏感区域进行重点保护,为城市生态规划和城市空间布局提供科学参考,解决城市扩张和生态环境破坏之间的矛盾,用最少的环境代价来实现最有效的发展,实现城市的精明发展,为发展留下尽可能大的空间。

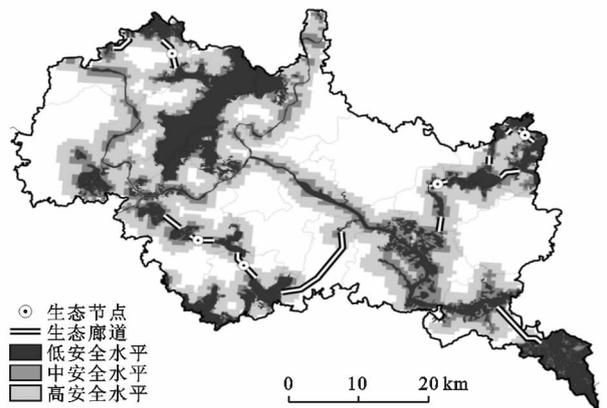


图 6 福建省南平市延平区综合生态安全格局

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 在生态保护红线的基础上,结合延平区山水型城市的特点,将延平区自然保护区、森林公园、生态

公益林、水源涵养区、水库、河流水系等 6 种生态用地类型选为生态源地,并将其作为延平区底线型生态安全格局,作为保障延平区基本生态安全所需的最小生态用地,面积为 534.51 km²,占到延平区的 20.10%。

(2) 基于选择的生态源地,从地形坡度、土地覆盖和植被覆盖等 3 个方面构建生态阻力的评价指标体系,基于最小累积阻力模型,生成延平区生态阻力面。然后根据生态阻力面直方图分布趋势得到 2 983 和 9 268 两个门槛值,以此为有效边界划分生态阻力面缓冲区,得到延平区缓冲型和理想型生态安全格局,面积分别为 771.17 和 1 592.79 km²,占到延平区面积的 29.00% 和 59.89%,并将缓冲型生态安全格局作为延平区的“满意生态安全格局”。

(3) 结合底线型、缓冲型和理想型生态安全格局的构建,确定了不同安全水平的生态用地空间分布格局,进一步明确了生态源地间 13 条共计 54.84 km 的生态廊道和 5 个关键生态节点,组合形成了延平区综合生态安全格局。

4.2 讨论

(1) 作为山水型城市,山清水秀、环境优美是延平最大的特色,最大优势在生态、责任在生态、出路也在生态。生态安全格局作为缓解城市发展和生态环境破坏以及耕地面积减少之间矛盾和保障区域生态安全的有效途径之一,通过这个格局可以定义城市的发展空间,这也是“反规划”的核心思想^[10]。本文以生态保护红线为基本构架进行生态源地选择,结合最小累积阻力模型,通过生态阻力值直方图分布趋势分析得到两个突变点,以此为界构筑了延平区不同安全水平的生态安全格局,对于延平区指导城镇建设空间布局、合理配置区域自然资源和绿色基础设施建设、充分发挥其生态优势具有重要作用。

(2) 本文基于的最小累积阻力模型是一种理想化的计算模型,而且在计算过程中只考虑了生态源地位置、距离和基面阻力特征,在构建生态阻力评价指标体系时仅从地形坡度、土地覆盖、植被覆盖等三方面因素着手,在因子等级划分和权重确定时主要通过借鉴前人研究和专家打分的方式获得。但还有很多其他因素也会对生态阻力面结果造成影响,例如生态源地本身的组成和结果、驱动力因素的存在等等,都有待于完善和进一步深入研究。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] Naveh Z. From biodiversity to ecodiversity: A landscape-ecology approach to conservation and restoration [J]. *Restoration Ecology*, 2010, 2(3): 180-189.
- [3] Bloom D E, Canning D, Fink G. Urbanization and the wealth of nations[J]. *Science*, 2008, 319(5864): 772-775.
- [4] Mundia C N, Murayama Y. Modeling spatial processes of urban growth in African cities: A case study of Nairobi City[J]. *Urban Geography*, 2010, 31(2): 259-272.
- [5] 蒋艳灵,刘春腊,周长青,等. 中国生态城市理论研究现状与实践问题思考[J]. 地理研究, 2015, 34(12): 2222-2237.
- [6] 崔胜辉,洪华生,黄云凤,等. 生态安全研究进展[J]. 生态学报, 2005, 25(4): 861-868.
- [7] 李月辉,胡志斌,高琼,等. 沈阳市城市空间扩展的生态安全格局[J]. 生态学杂志, 2007, 26(6): 875-881.
- [8] 欧定华,夏建国,张莉,等. 区域生态安全格局规划研究进展及规划技术流程探讨[J]. 生态环境学报, 2015, 24(1): 163-173.
- [9] 习近平. 在主持十八届中央政治局第六次集体学习时的讲话要点[R]. 北京: 新华社, 2013.
- [10] 俞孔坚,王思思,李迪华. 区域生态安全格局: 北京案例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [11] 陈星,周成虎. 生态安全: 国内外研究综述[J]. 地理科学进展, 2005, 24(6): 8-20.
- [12] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 8-15.
- [13] Yu Kongjian. Security patterns and surface model in landscape ecological planning[J]. *Landscape and Urban Planning*, 1996, 36(1): 1-17.
- [14] 蒙古军,朱利凯,杨倩,等. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建[J]. 生态学报, 2012, 32(21): 6755-6766.
- [15] 彭建,赵会娟,刘焱序,等. 区域水安全格局构建: 研究进展及概念框架[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3137-3145.
- [16] 周锐,王新军,苏海龙,等. 平顶山新区生态用地的识别与安全格局构建[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 2003-2012.
- [17] 李晖,易娜,姚文璟,等. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 5928-5936.
- [18] 潘竟虎,刘晓. 疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建[J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 791-799.
- [19] 俞孔坚,王思思,李迪华,等. 北京市生态安全格局及城市增长预警[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1189-1204.
- [20] 吴健生,张理卿,彭建,等. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 4125-4133.
- [21] 李晶,蒙古军,毛熙彦. 基于最小累积阻力模型的农牧交错带土地利用生态安全格局构建: 以鄂尔多斯市准格尔旗为例[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2013, 49(4): 707-715.
- [22] 张兰兰. 夹缝中求生的第二新城: 评说南平市延平新城总体规划[J]. 中华建设, 2015(6): 30-33.
- [23] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning[J]. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 10-16.

- [M]. 北京:科学出版社,1984.
- [10] 罗贤,何大明,季璇,等. 近 50 年怒江流域中上游枯季径流变化及其对气候变化的响应[J]. 地理科学,2016,36(1):107-113.
- [11] 杜军,翁海卿,袁雷,等. 近 40 年西藏怒江河谷盆地的气候特征及变化趋势[J]. 地理学报,2009,64(5):581-591.
- [12] 周刊社,杜军,袁雷,等. 西藏怒江流域高寒草甸气候生产潜力对气候变化的响应[J]. 草业学报,2010,64(5):17-24.
- [13] 刘冬英,沈燕舟,王政祥. 怒江流域水资源特性分析[J]. 人民长江,2008,39(17):64-66.
- [14] Huffman G J, Adler R F, Bolvin D T, et al. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007,8(1):38-55.
- [15] 谢红霞,刘旭星,隋兵,等. TRMM 降雨数据在湖南省长株潭地区的适用性[J]. 水土保持通报,2017,37(3):295-301.
- [16] 齐文文,张百平,庞宇,等. 基于 TRMM 数据的青藏高原降水的空间和季节分布特征[J]. 地理科学,2013,33(8):999-1005.
- [17] 程珂,朱祯,李铭,等. TRMM3B43 降水产品在西藏地区的精度检验和应用[J]. 水利水电技术,2014,45(1):44-46.
- [18] Mu Qiaozhen, Heinsch F A, Zhao Maosheng, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. Remote sensing of Environment, 2007,111(4):519-536.
- [19] Mu Qiaozhen, Zhao Maosheng, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 2011,115(8):1781-1800.
- [20] 吴桂平,刘元波,赵晓松,等. 基于 MOD16 产品的鄱阳湖流域地表蒸散量时空分布特征[J]. 地理研究,2013,32(4):617-627.
- [21] 贺添,邵全琴. 基于 MOD16 产品的我国 2001—2010 年蒸散发时空格局变化分析[J]. 地球信息科学学报,2014,16(6):979-988.
- [22] 赫晓慧,梁冰洁,郭恒亮,等. 基于 MOD16 的北洛河流域蒸散发空间格局演变研究[J]. 水土保持通报,2017,37(1):177-182.
- [23] 宋璐璐. 青藏高原蒸散发时空变化特征研究[D]. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所,2013.
- [24] 杨大文,杨汉波,雷慧闽. 流域水文学[M]. 北京:清华大学出版社,2014.
- [25] 刘国纬. 西藏高原的水文特征[J]. 水利学报,1992(5):1-8.
- [26] 杜军,房世波,唐小萍,等. 1981—2010 年西藏怒江流域潜在蒸发量的时空变化[J]. 气候变化研究进展,2012,8(1):35-42.

(上接第 198 页)

- [24] Pain G, Baudry J, Burel F. Land Pop: un outil d'étude de la structure spatiale des populations animales fragmentées [J]. Revue Internationale de Géomatique, 2000,10:89-106.
- [25] 陈利顶,傅伯杰,徐建英,等. 基于“源—汇”生态过程的景观格局识别方法:景观空间负荷对比指数[J]. 生态学报,2003,23(11):2406-2413.
- [26] 黎晓亚,马克明,傅伯杰,等. 区域生态安全格局:设计原则与方法[J]. 生态学报,2004,24(5):1055-1062.
- [27] 林勇,樊景凤,温泉,等. 生态红线划分的理论和技术[J]. 生态学报,2016,36(5):1244-1252.
- [28] 徐德琳,邹长新,徐梦佳,等. 基于生态保护红线的生态安全格局构建[J]. 生物多样性,2015,23(6):740-746.
- [29] 王洁,李锋,钱谊,等. 基于生态服务的城乡景观生态安全格局的构建[J]. 环境科学与技术,2012,35(11):199-204.
- [30] 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.
- [31] 朱强,俞孔坚,李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度[J]. 生态学报,2005,25(9):2406-2412.
- [32] 李卫锋,王仰麟,彭建,等. 深圳市景观格局演变及其驱动因素分析[J]. 应用生态学报,2004,15(8):1403-1410.
- [33] 乌尼图,岳德鹏,张亦超,等. 基于 3S 技术的城乡区域生态节点的识别与分析[J]. 环境科学与技术,2014,37(2):184-189.
- [34] 陆禹,余济云,陈彩虹,等. 基于粒度反推法的景观生态安全格局优化:以海口市秀英区为例[J]. 生态学报,2015,35(19):6384-6393.