

DOI: 10.5846/stxb201402170274

陆禹, 余济云, 陈彩虹, 余宇晨, 罗改改. 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. 生态学报, 2015, 35(19): - .

Lu Y, She J Y, Chen C H, She Y C, Luo G G. Landscape ecological security pattern optimization based on the granularity inverse method: a case study in Xiuying District, Haikou. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): - .

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

陆 禹¹, 余济云^{1,*}, 陈彩虹¹, 余宇晨¹, 罗改改²

1 中南林业科技大学, 长沙 410000

2 华南理工大学, 广州 510641

摘要:景观生态安全格局优化是改善生态环境、促进人与自然和谐发展的有效途径。为给海口市秀英区生态环境建设提供科学依据和景观生态安全格局优化方法改进提供参考, 本文首次提出了粒度反推法和生态阻力面综合构建法, 结合 GIS 技术和最小耗费距离模型探讨了海口市秀英区景观生态安全格局优化途径。结果表明: (1) 400m 粒度生态景观组分是秀英区生态源地选取的合适参照, 秀英区有生态源地 18 块、生态廊道 17 条、生态节点 11 个, 新增生态源地建设的参考规模为 38.5hm², 生态源地的生态服务极限距离为 800m, 需将现有的 11 块非生态景观类型斑块转换为生态景观类型, 总面积 20.26 hm²。(2) 粒度反推法能为生态源地选取提供客观参考, 在生态源地选择方面比传统方法具有更强的理论基础和客观性, 解决了客观选取生态源地的问题。(3) 综合生态阻力面能对生态阻力的实际情况进行较好地模拟。显、隐性生态阻力面之间存在显著差异, 能反映生态系统中潜在的生态薄弱点, 这些生态薄弱点往往是容易被忽略而又需要重点建设的区域。

关键词:景观生态安全格局; 优化; 粒度反推法; 空间分析; 海口市秀英区

Landscape ecological security pattern optimization based on the granularity inverse method: a case study in Xiuying District, Haikou

LU Yu¹, SHE Jiyun^{1,*}, CHEN Caihong¹, SHE Yuchen¹, LUO Gaigai²

1 Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410000, China

2 South China University of Technology, Guangdong 510641, China

Abstract: The Landscape Ecological Security Pattern Optimization Approach (LESPOA) is an effective way of promoting healthier ecosystems and harmonious relationships between people and their surrounding environment. Currently, there are shortcomings to this approach because it lacks objectivity in ecological site selection, and when simulating ecological resistances, it doesn't consider the interactions between these resistances. In order to address these issues, this paper uses the granularity inverse method and the comprehensive construction method of ecological surface resistance, which combines the technology of GIS with a least-cost distance model, to apply the LESPOA in Xiuying district. We aimed to provide a scientific basis for ecological environment construction and a method for improving the LESPOA. The results were: (1) When the granularity of ecological landscape component is 400 m, the ecological landscape component is an appropriate method for selecting ecological sources. According to the above appropriate method, there were 18 ecological sources (8 primary and 10 secondary), 17 ecological corridors, and 11 ecological nodes in Xiuying district. The reference scale of new ecological sources was 38.5 hm². The maximum ecological service distance for whole ecological source structure was about

基金项目:国家林业行业公益性项目(201004032); 海南省林业厅重点科研项目(LK20118478); 湖南省“十二五”重点学科——森林经理学科(034-0014)

收稿日期: 2014-02-17; 修订日期: 2014-06-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shejiyun@126.com

800 m. When the distance between different ecological patches is approximately 200 m, we should enhance the ecological connections between them. Currently, there are 11 non-ecological landscape patches (with a total area of 20.26 hm²) in Xiuying district that need to be converted to ecological landscape patch; (2) The granularity inverse method has a stronger theoretical basis and greater objectivity than traditional methods of ecological source selection, and it also can reflect the connective characteristics of landscape pattern. Therefore, the results from this method can supply more accurate references for ecological construction than traditional methods. (3) The comprehensive ecological resistance surface considers the interaction between resistances and thus can better simulate the physical characteristics of ecological resistances than the traditional ecological resistance surface that just considers land use type. There are significant differences between dominant ecological resistance and recessive ecological resistance, which can reflect potential ecological weak points. Most of the ecological weak points in Xiuying district are woodlands that are surrounded by farmland, unused land, and construction land. Although these ecological weak points can easily be neglected, it is important to focus on enhancing the connections between the weak points and ecological sources in order to restore natural ecologic processes.

Key Words: landscape ecology security pattern; optimize; granularity inverse method; spatial analysis; Xiuying District of Haikou City

在社会发展和城市化进程加快的同时,人与自然的矛盾日益尖锐,生态安全问题严重威胁着人类的生存和发展^[1-3]。景观生态安全格局优化从景观格局的角度模拟生态过程的空间运动来确定对区域生态安全有关键意义的景观格局及空间位置^[4],以改善景观结构、增强生态系统整体连通性,达到维护生态安全和完善生态系统的目的^[5-6],是提升区域生态安全的有效途径^[7-8]。

景观生态安全格局优化的理论方法经过 30a 发展,国外已形成以景观生态规划为主的研究方法,Fomran 提出景观格局能对生态过程进行控制和影响^[9],具有启发意义。20 世纪 90 年代,俞孔坚提出景观生态安全格局理论,认为景观格局中存在着某些关键部位和特定格局类型对控制景观水平生态过程起着关键性的作用^[4],为优化提供了理论基础。近年来,Knaapen 提出的最小耗费距离模型成为景观生态安全格局优化的主要模型之一,能较好模拟景观对空间运动过程的阻碍作用,相比传统的概念模型和数学模型能更好地表达景观格局和生态过程的相互关系^[10-11]。景观生态安全格局优化的关键在于确定并构建对维护或控制区域生态过程有着异常重要意义的空间格局,本质是调整景观空间结构,增强生态系统的整体性和连通性。连通性作为度量景观格局对生物流促进或阻碍程度的指标^[12],对物质和能量的流动、生态过程的相互影响和渗透具有重要意义,是维护生态系统稳定性、可持续性和完整性的重要因素^[13-14]。目前景观生态安全格局优化还存在一些不足,如生态源地选择的客观性不强、生态阻力面构建极少考虑景观类型间的相互影响,这两方面源于不同生态系统的异质性,难以得出适应不同生态系统的统一标准和方法。根据粒度变化引起景观结构的变化^[15]和地统计学能模拟事物之间的相互影响^[16],本文首次提出粒度反推法和生态阻力面综合构建法,为解决上述问题提供有效途径。

秀英区是海口市“西拓”发展战略下未来发展最大的舞台。随着海南省国际旅游岛发展战略的不断深化和海口市城市化进程加快,秀英区境内建设用地不断扩张,景观破碎化程度日益加剧,生态环境遭到破坏,生态安全的保障迫在眉睫。本研究基于粒度反推法和生态阻力面综合构建法,结合 GIS 技术从增强生态系统整体连通性的角度,拟对海口市秀英区的景观生态安全格局进行分析,进而提出优化措施,为景观生态安全格局优化方法的改进和秀英区生态环境建设提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

秀英区地处海南省海口市西北部,介于 19°40′—20°4′N、110°7′—110°20′E,南北部以平原为主,中部为马

鞍岭火山口,地势中间高、四周低,平均海拔 118.5m,总面积 492.01km²,属于热带海洋性季风气候,夏季多台风,太阳辐射强,南渡江从南部流经,水资源丰富,植被以灌木植物群落为主,森林覆盖率 43.27%。秀英区下辖 2 个街道办事处和 6 个乡镇,常住人口约 33 万,北部为主城区,中部、南部以农林业为主,适宜发展热带高效农业和畜牧业。境内林地、水域及草地总面积 242.7km²,占区域面积的 49.33%,但景观破碎化程度较高,生态建设有待加强。

1.2 数据来源及处理

以遥感影像数据、1:10000 地形图和 2010 年二类调查数据为研究基础,二类调查数据的影像信息源为 2008 年 QuickBird 遥感影像数据,分辨率 3m×3m。利用谷歌卫星地图下载器下载秀英区 16 级遥感影像图,比例尺 1:12000,分辨率 4m×4m。遥感影像数据北部拍摄日期为 2013 年 10 月 7 日,中部与南部为 2011 年 12 月 12 日,正好与秀英区北部主城区发展迅速、中南部发展相对缓慢的特点一致,准确度较高。采用北京 54 坐标系配准数据,根据解译标志对二类调查数据进行校对调整和地类合并,得林地、耕地、草地、水域、未利用地和建设用地 6 种土地利用类型^[12]。

1.3 测定指标及研究方法

1) 连通性指标

采用景观组分数(NC)、最大组分斑块数、斑块内聚力指数(COHESION)和连接度指数(CONNECT)表征生态景观连通性^[14]。生态景观指具有较高生态服务价值的景观类型,选取林地、水域和草地作为生态景观类型^[10,17]。

2) 粒度反推法

粒度反推法是以景观生态安全格局优化为目的,用不同粒度表征不同生态源地结构,通过连通性分析确定生态景观组分结构和数量后,再返回原始数据反选生态源地的方法。该方法的思想来自数学反证法,先假设研究区存在不同的生态源地结构,再确定最优生态源地结构。因为生态斑块具有服务范围,该方法认同不相连而相隔很近的生态斑块可以共同构成生态源地,以此指导生态源地建设。在粒度变化的过程中,规模较小且零星分布的生态斑块不断被剔除,相连和相离较近的生态斑块不断合并形成规模扩大的生态景观组分,最后生成不同粒度的实验数据。运行机理如图 1:假如,生态景观组分在粒度 100m 时彼此分离,但在 800m 时形成了一个生态源地,那么这个生态源地则由绿色部分(现有生态斑块)和红色部分(需转换成生态景观类型的斑块)共同组成。

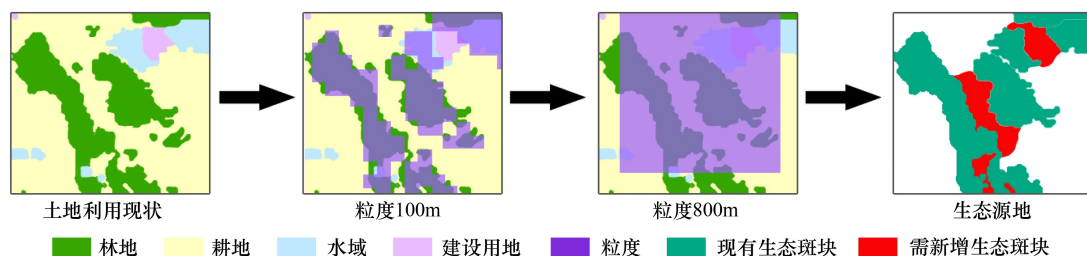


图 1 粒度反推法示意图

Fig.1 The diagram of grain size reverse method

实验数据以各自粒度水平为阈值计算连通性,以使结果归一化。最优生态源地结构即对区域生态过程阻碍程度最小的生态源地结构,其中最小生态源地面积则为新增生态源地规模的参考标准。

3) 生态阻力面综合构建法

景观生态学认为,生态物质和能量在景观间流动需克服一定阻力,这些阻力构成了生态阻力面^[4]。传统构建方法仅考虑土地利用类型,很少考虑物质和能量之间的相互影响,导致生态阻力面与实际情况产生了偏差。基于这种理念,将生态阻力按照可否直观判断分为显性生态阻力和隐性生态阻力。

显性生态阻力可直观判断,隐性生态阻力却不易直接判断,如空气、水的流动,污染物的扩散等,这种交流形式同样伴随着物质和能量的交换。地统计学中的克里格插值法以空间自相关为基础,能反映事物在空间上的相互影响^[16]。在用传统方法构建显性生态阻力面的同时,利用克里格插值法构建隐性生态阻力面,两者加权叠加形成综合生态阻力面,能较好地反映生态阻力的实际状态。阻力面叠加时会遇到加权值问题,这会随区域特性而不同。

4) 最小耗费距离模型

最小耗费距离模型从生态源地、空间距离、景观介面特征等方面反映生态物质和能量在空间中的运动趋势,可构建生态廊道和确定生态节点。公式如下:

$$C_i = f_{\min} \sum (D_{ij} \times R_j) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

其中: D_{ij} 是空间某一点从景观基面 i 到源 j 的实地距离; R_j 是景观 j 对生态流运动的阻碍程度, C_i 是第 i 个景观单元到源的累积耗费值, n 为基本单元总数^[10]。

2 结果

2.1 粒度反推法选取生态源地

(1) 不同粒度数据的生成

利用粒度反推法从不同粒度水平和相同粒度水平生态景观连通性两方面推导最优生态源地结构:不同粒度反映的是生态组分整体结构的变化趋势,相同粒度反映的是生态组分内部连通性的变化趋势。提取秀英区生态景观类型,以 50m、100m、200m、400m、600m、800m、1000m 和 1200m 生成不同粒度栅格图^[17](图 2)。

(2) 不同粒度水平下生态景观连通性

在 fragstats 中计算不同粒度水平下景观组分在各自粒度尺度上的景观组分数(NC)、最大组分斑块数、斑块内聚力指数(COHESION)和连接度指数(CONNECT),得生态景观连通性指数散点图(图 3)。

根据拐点是数据曲线的质变特征点可知:

生态景观组分数随粒度的增加而减少,最大组分斑块数逐渐增多。粒度 400m 时景观组分数开始趋于稳定,达到 600m 后景观组分数稳定在 8 个(图 3-a),说明粒度达到 600m 后生态景观组分很难再合并成更大的生态景观组分。由此可对生态景观组分划分等级,粒度 600m 时 8 个生态景观组分在规模上具有最明显的优势,为一级生态源地;400m 粒度时另外 10 个生态景观组分为二级生态源地,以此类推。研究表明,仅选择一级生态源地会忽略景观格局中某些关键局部^[10],而选择三级生态源地则会导致优化结果过于复杂而重点不突出^[18],因此选择 400m 粒度即二级生态源地较合适。最大组分斑块数在粒度 400m 出现了第一个明显拐点(图 3-b),说明 400m 粒度是生态斑块合并成生态源地过程中发生质变的关键点,该指标应选择 400m 粒度。

斑块内聚力随着粒度的增大而减少,在粒度 600m 后内聚力指数呈稳定下降趋势(图 3-c),表明粒度在 600m 内时区域中生态景观组分之间存在较强的自然连通度,大于 600m 后内聚力下降较快,应选择粒度在 600m 内的生态景观组分结构。

粒度 400m 时生态景观组分的连接度指数最大,大于 400m 后连接度指数急剧下降,在到达 800m 时连接度已降为 0(图 3-d)。说明秀英区在 400m 粒度时生态景观组分之间存在较强的连接度,超过 400m 后连接度急剧减弱,在达到 800m 后生态景观组分之间的联系已相当微弱,因此应选择 400m 粒度为参照。

(3) 相同粒度水平下生态景观连通性

根据土地利用类型得到粒度为 10m 的高精度栅格图,计算不同阈值距离的生态景观组分连接度,并计算各阈值距离生态景观组分连接度与前一级连接度之间的增长率,以反映阈值距离增加对提高整体连接度意义的明显与否(图 4)。

同一粒度水平下连接度会随阈值距离的增加而增强。当阈值距离为 100m 和 400m 时,连接度增加百分率较高,说明生态斑块连接节点的分布密度相对较大。在阈值距离为 400m 后连接度指数的增加速率呈现稳

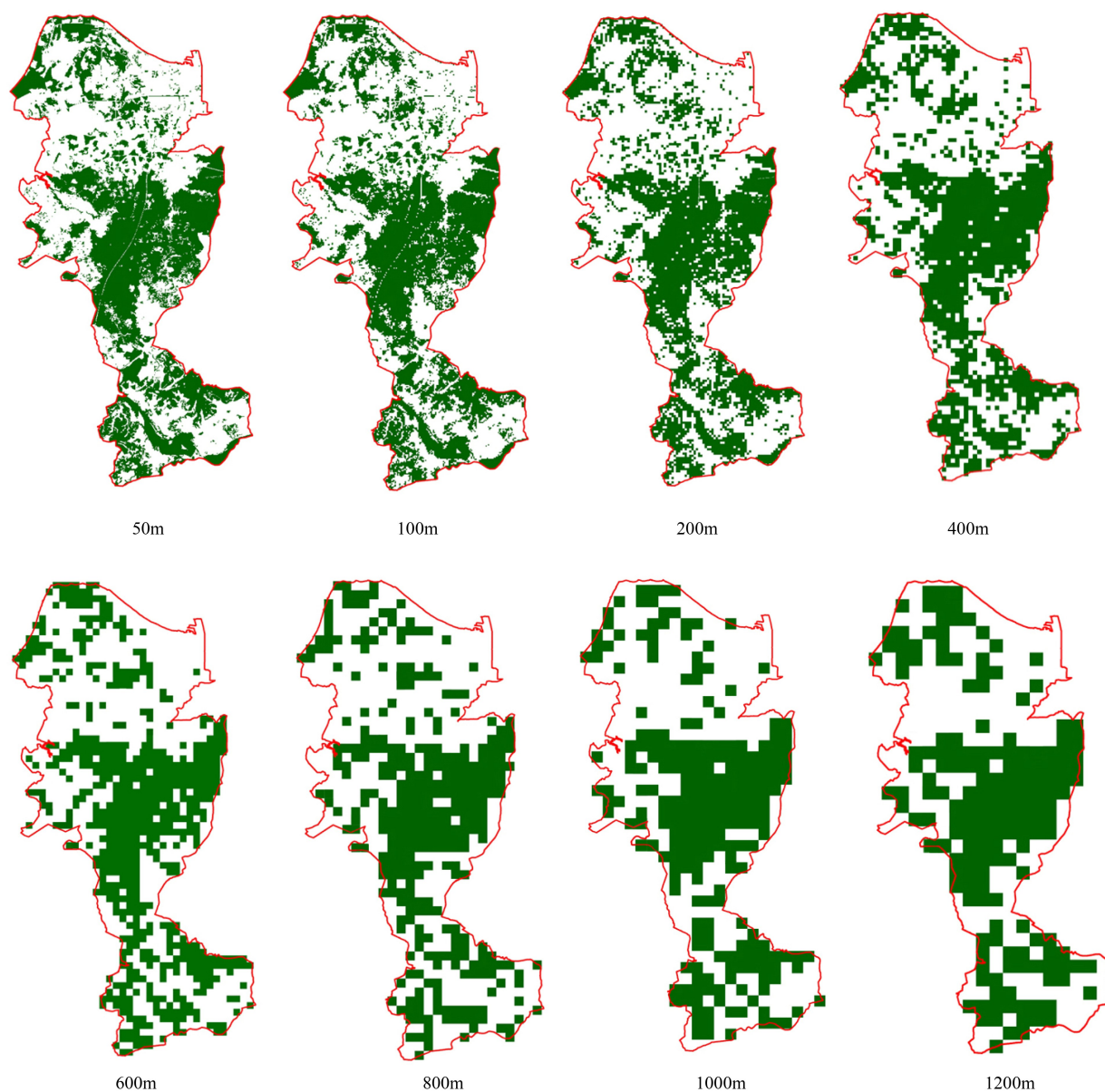


图2 不同粒度栅格图

Fig.2 The raster drawing of different grain size

步下降趋势,说明粒度 400m 后生态景观组分之间连接度增加的意义已经弱化,400m 粒度是生态源地选择的适合参照。

(4) 生态源地的确定

综上所述,5 个判断最优生态源地结构的指标有 4 个指向 400m,1 个指向 600m,粒度 400m 的生态景观组分作为最优生态源地选择的参照较合适,此时秀英区存在生态源地 18 个。将粒度 400m 的栅格图转为矢量数据,选取面积最大的 18 个生态景观组分作为生态源地(图 5-a),得到生态源地分布图(图 5-b)。叠加 400m 粒度栅格图和土地利用现状图,能清楚判断哪些斑块需要将现有非生态景观类型转变为生态景观类型。新增生态斑块由 6 块耕地和 5 块建设用地转变而来,总面积 20.26 hm²。它们将相邻的生态景观组分彼此连接形成更大的生态源地,对改善生态环境发挥着重要作用。

2.2 综合生态阻力面的构建

以生态服务价值衡量景观类型生态服务功能的重要性^[19-20]。水域的生态服务价值最高,对生态流运行

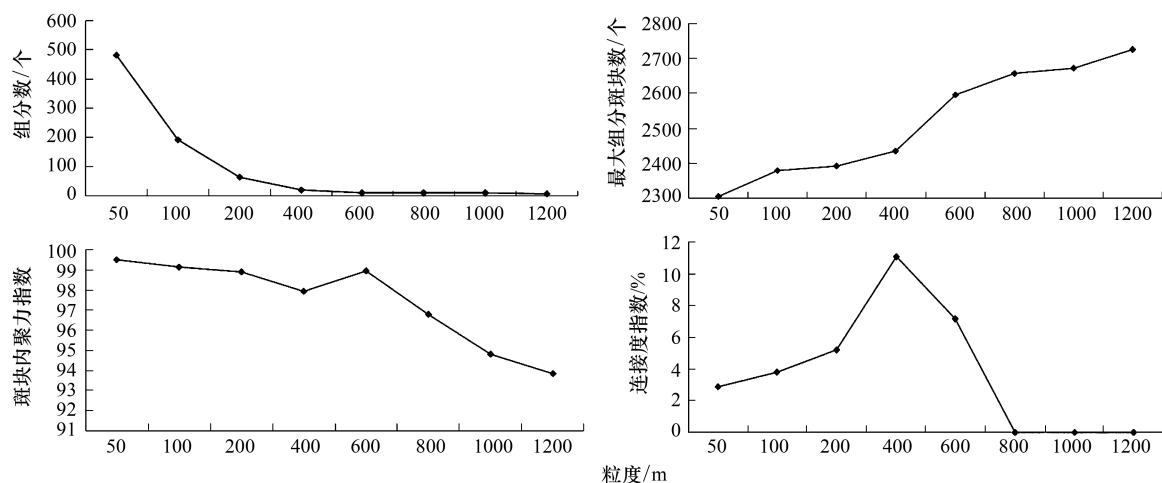


图3 不同粒度生态景观连通性指数

Fig.3 The connectivity index of ecological component of different grain size

的阻力最小,阻力值设为1;建设用地的生态服务价值最低,对生态流运行的阻力最大,阻力值设为100,其他景观类型阻力值取值范围设定为(1,100),见表1^[10]。考虑到秀英区自然条件适合植物生长,污染程度较低,通过咨询7位生态学和林学专家,决定显、隐性生态阻力面权重分别取值0.7和0.3,一致性检验为 $CI=0.0019 < 0.1$,结果较合理。对秀英区的显、隐性生态阻力面加权叠加,得到综合生态阻力面(图6)。

2.3 生态廊道的构建

生态廊道是生态源地相互联系、进行物质和能量交流的直接通道,能增强生态系统整体连通性。依据生态源地确定生态质心,以综合生态阻力面为权重,利用最小耗费距离模型计算生态质心之间的最小成本路径,即生态廊道。根据生态廊道所处环境的特性,将生态廊道分为分布在耕地上的耕地生态廊道和分布在建设用地上的建设用地生态廊道(图7)。秀英区共有生态廊道17条,其中耕地生态廊道14条,占总数的82.35%,建设用地生态廊道3条,占总数的17.65%。

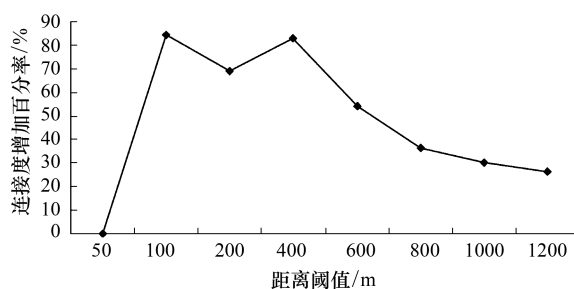


图4 不同阈值距离下生态景观连接度增加百分率

Fig.4 The increasement rate of connectivity index of ecological landscape with different thresholds distance

表1 不同景观类型阻力值

Table 1 The resistance value of different landscape pattern

景观类型 Landscape type	单位面积生态服务功能价值 Ecosystem service function value of per unit area / (元 yuan/hm ² · a)	阻力值 Resistance value
林地 Forest land	19334.0	20
耕地 Farmland	6114.3	55
草地 Grassland	6406.5	70
水域 Water area	40676.4	1
未利用地 Unused land	371.4	80
建设用地 Construction land	-8852.1	100

2.4 生态节点的确定

生态节点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

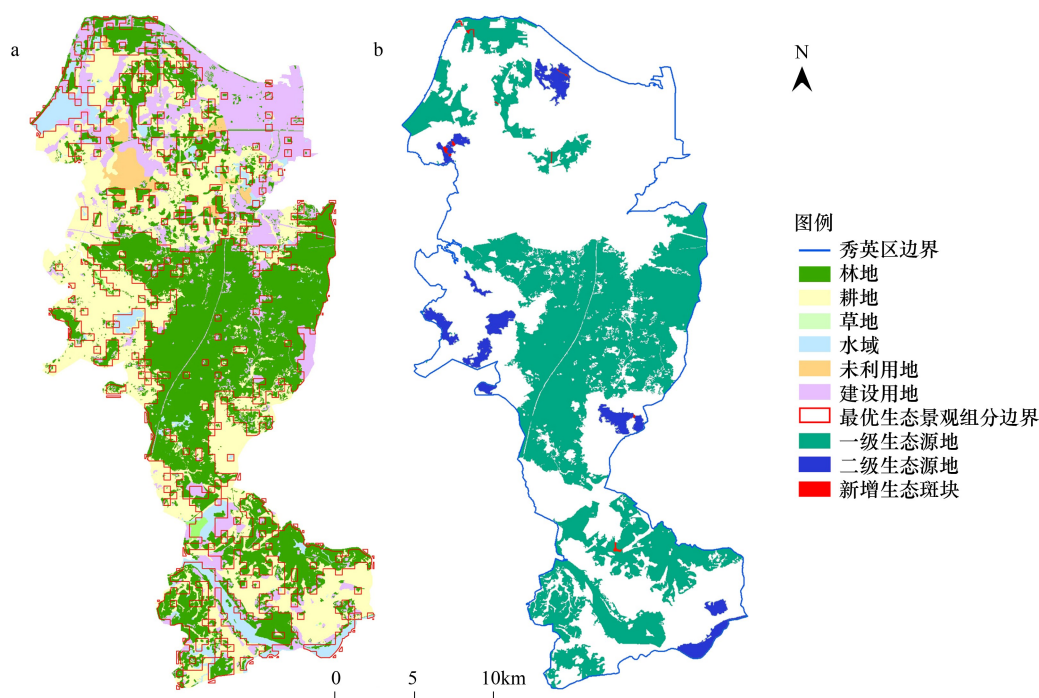


图5 生态源地的选择

Fig.5 The choice of ecological source

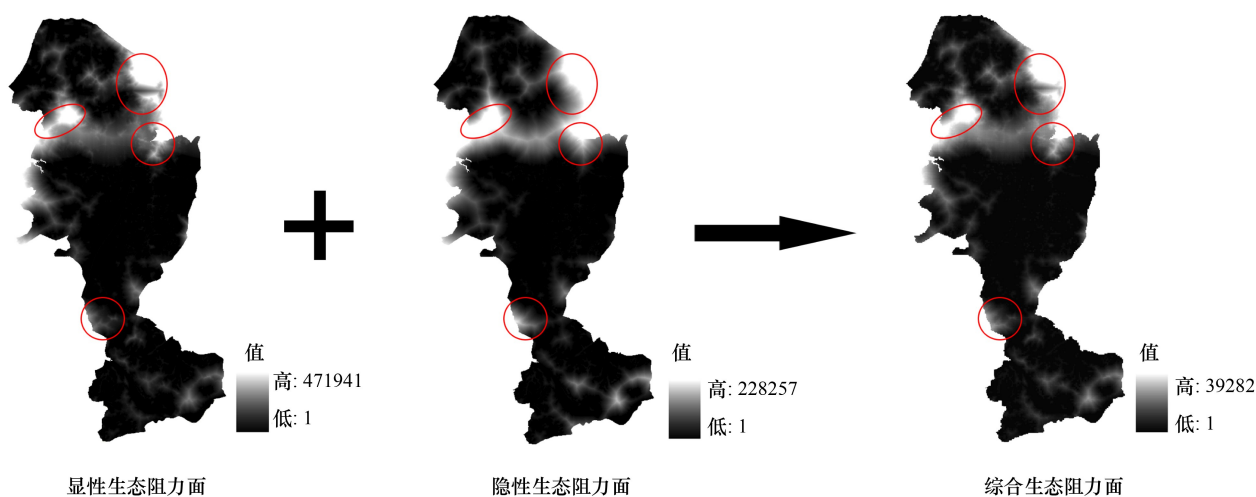


图6 综合阻力面计算过程

Fig.6 The process of comprehensive resistance surface

结构的整体性、连续性和生态功能的发挥具有战略意义。将综合生态阻力面(分辨率为 $50\text{m} \times 50\text{m}$)作为 DEM 数字高程模型,利用水文分析提取山脊线,即为生态阻力面最大成本路径,其与生态廊道的交叉点为生态节点^[18]。根据生态廊道的特性,将生态节点分为耕地生态节点和建设用地生态节点(图 7)。秀英区共有生态节点 11 个,其中耕地生态节点 8 个,占总数的 72.73%,建设用地生态节点 3 个,占总数的 27.27%。

3 讨论

3.1 景观生态安全格局优化方法的探讨

景观格局优化首要应解决的关键问题是怎样的景观空间结构才是最优^[21]。景观生态安全格局优化通过

选择生态源地、构建生态廊道和生态节点来调整景观空间结构和增强生态系统整体连通性的方法是值得借鉴的,但选择景观空间结构的过程具有主观性,是否是最优结构也难以判断。生态源地是生态景观空间结构的基础,构建最优生态景观空间结构依赖于最合理的生态源地。粒度反推法从连通性的角度首次分析出最优生态源地结构,相比传统方法在生态源地选择方面优势明显,其选择的生态源地结构理论上对生态过程阻碍作用最小,分析过程能反映景观组分连通性特征,结果更客观合理,现实指导意义更强。本研究表明粒度反推法将粒度、景观空间结构和连通性结合起来判断最优生态源地结构是可行的,相比其他方法能得到更多反映实际情况的结论。从运行机理看,粒度的可变性使得粒度反推法能够分析不同大小的生态系统,尤其在景观类型较多、景观破碎化程度高、研究范围较大的情况下效果明显,因此适用于城市规划和区域尺度的生态环境规划领域。

生态阻力面是一系列复杂生态过程共同作用的结果^[22],不仅受景观类型的影响,还受自然条件、人为干扰和其他生态流的影响^[11]。本研究在考虑景观类型的同时,还从生态流动和人为干扰两方面考虑生态阻力间的相互作用,提出了生态阻力面综合构建法。生态阻力面综合构建法继承了传统方法,并利用克里格插值法首次对生态阻力间的相互影响进行了模拟,理论上更接近生态阻力实际情况。结果表明显、隐性生态阻力面之间存在明显差异,这与一些学者的设想是一致的^[11,22]。显性生态阻力面仅考虑景观类型的形状和边界,阻力值分布与景观类型一致;隐性生态阻力面考虑了周围环境的影响,阻力值过度更平缓,其分布与景观类型出现了差异,这些差异局部往往是容易被忽略而又需要重点建设的区域。本研究中显性和隐性生态阻力面的差异在局部区域尤为突出(图 6),这些区域多为被耕地、未利用地和建设用地包围的林地,景观规模不足,受环境影响大,难以维系自身生态系统,应加强生态建设,增强与生态源地的联系,保障正常的生态过程。目前国内外对显、隐性生态阻力面叠加权重值的研究还未涉及,本文仅以专家打分法表达两种生态阻力面结合的新理念,下一步研究将寻找更客观的方法确定权重,构建评价体系是可行的方法之一。

3.2 秀英区景观生态安全格局优化的综合探讨

景观生态安全格局优化在物种保护、土地利用规划和景观生态规划方面的应用较广泛^[23],主要内容是整体景观结构调整,未涉及景观类型本身的连通特性分析。粒度反推法能反映景观空间结构随粒度变化的连接特性。根据连接度公式^[12],800m 为秀英区生态景观组分连接状态的临界距离(图 4-d),即整体而言,生态源地的最大服务半径约为 800m,在生态建设中应尽可能确保区域处在生态源地的服务半径内。阈值距离 200m 时生态景观组分连接度增加速率有所下降(图 4),说明生态功能节点的分布密度相对降低^[12],应注重间隔距离为 200m 的生态斑块之间的生态建设,增强生态斑块间的连接度。

生态源地空间分布特征为整体分散、局部集中,大致分为南北两部分(图 5-b),南部生态源地规模较大,北部生态源地规模较小。主要是因为北部为城镇开发区,受人为干扰大,建设用地和农田面积广且布局分散,加之长期受海风影响,生态脆弱性较高^[24],生态源地受到阻隔和限制。最大生态源地占生态源地总面积的 56.70%,为马鞍岭火山口森林公园,处在区域中心地带,同时最大生态源地往往对区域生态安全和生态过程

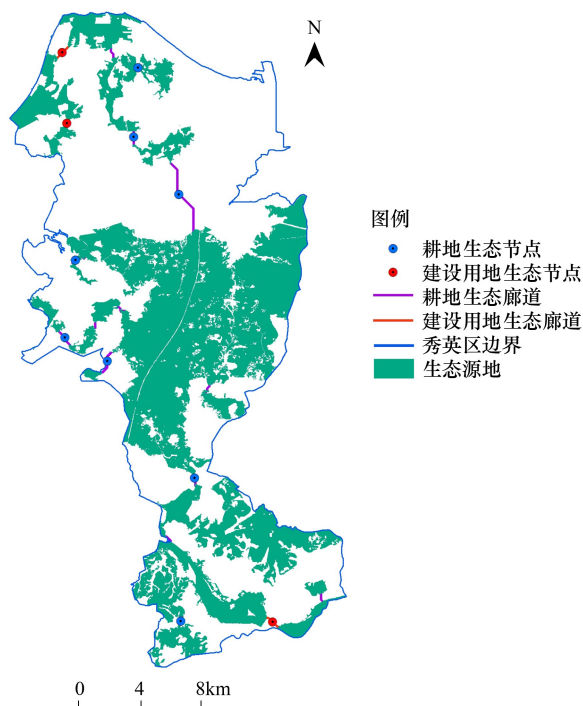


图 7 秀英区景观生态节点

Fig.7 The eco-node of landscape pattern in Xiuying district

起主导作用,应重点保护和建设,并采取缓冲带等强化措施,促进其生态服务功能的发挥;最小生态源地面积为 38.5 hm^2 ,说明当生态源地规模达到 38.50 hm^2 时,将对秀英区生态系统产生显著影响,新增生态源地建设规模应以此为参考。东北部中心城区无生态源地,反映出秀英区城市规划不合理,中心城区是新增生态源地的优先选择区,应调整用地结构形成生态源地和生态廊道完善区域生态系统。根据生态源地做 800m 缓冲得生态服务区,面积 400.47km^2 ,占秀英区的 81.39% ,说明秀英区大部分区域处于生态服务范围内,目前生态环境状况较好。

不同生态廊道和生态节点发挥的作用不同。秀英区最长生态廊道属于耕地生态廊道,长 5251m ,将南北生态源地群连接起来,起着连接整个生态系统的作用,对改善生态系统具有至关重要的意义;建设用地生态廊道是人类社会与自然环境交流和物质能量交换的大动脉^[10],对人与自然和谐发展具有推动作用,也是建设重点。生态廊道建设应保证宽度,建立适宜的缓冲带,以减少外界环境干扰,并根据生态源地采用相应景观基质,以确保相容性和稳定性。生态节点中有 4 个需要重点建设;最长生态廊道上的耕地生态节点极大保障了该生态廊道的连续性和稳定性,一方面要以生态源地的标准建设,设置缓冲带禁止人为干扰,另一方面应丰富生物多样性,形成稳定的生态子系统;3 个建设用地生态节点能改善人居环境、提高生活质量,应加大建设力度。

4 结论

(1)粒度为 400m 的生态景观组分是秀英区生态源地选取的合适参照。按此参照秀英区有生态源地 18 个(一级生态源地 8 个、二级生态源地 10 个),生态廊道 17 条,生态节点 11 个;最小生态源地面积 38.5hm^2 ,为新增生态源地建设的参考规模;整体而言,生态源地的服务极限距离为 800m ,为生态建设提供了尺度参数;秀英区需将现有的 11 块非生态景观类型斑块转换为生态景观类型,总面积 20.26 hm^2 。

(2)粒度反推法通过粒度与连通性相结合选出了秀英区连通性最强的生态景观组分结构,即最优生态源地结构,能为生态源地的选取提供客观参考。粒度反推法在生态源地选择方面比传统方法具有更强的理论基础和客观性,通过景观连通特性分析解决了客观选取生态源地的问题,并能反映景观连接特性,取得了较为满意的效果。

(3)显、隐性生态阻力面加权叠加生成了秀英区的综合生态阻力面,综合生态阻力面兼顾景观类型和生态阻力的相互影响,能对生态阻力的实际情况进行较好的模拟。显、隐性生态阻力面之间存在显著差异,能反映生态系统中潜在的生态薄弱点,这些生态薄弱点往往是容易被忽略而又需要重点建设的区域。

参考文献(References):

- [1] 蒙古军,朱利凯,杨倩,毛熙彦.鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建.生态学报,2012,32(21):6755-6766.
- [2] 苏泳娴,张虹鸥,陈修治,黄光庆,叶玉瑶,吴旗韬,黄宁生,匡耀求.佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案.生态学报,2013,33(5):1524-1534.
- [3] 王洁,李锋,钱谊,殷春雪.基于生态服务的城乡景观生态安全格局的构建.环境科学与技术,2012,35(11):199-205.
- [4] 俞孔坚.生物保护的景观生态安全格局.生态学报,1999,19(1):8-15.
- [5] 郭明,肖笃宁,李新.黑河流域酒泉绿洲景观生态安全格局分析.生态学报,2006,26(2):457-466.
- [6] Barnthouse L W. The role of models in ecological risk assessment: a 1990's perspective. Environmental Toxicology and Chemistry, 1992, 11(12): 1751-1760.
- [7] 李绥,石铁矛,付士磊,周乐,刘森,王伟.南充城市扩展中的景观生态安全格局.应用生态学报,2011,22(3):734-740.
- [8] Turner M G. Spatial and temporal analysis of landscape patterns. Landscape Ecology, 1990, 4(1): 21-30.
- [9] Forman R T T. Some general principles of landscape and regional ecology. Landscape Ecology, 1995, 10(3): 133-142.
- [10] 刘杰,叶晶,杨婉,郭怀成,于书霞.基于 GIS 的滇池流域景观格局优化.自然资源学报,2012,27(5):801-808.
- [11] 赵筱青,和春兰.外来树种桉树引种的景观生态安全格局.生态学报,2013,33(6):1860-1871.
- [12] 郑新奇,付梅臣.景观格局空间分析技术及其应用.北京:科学出版社,2010.

- [13] Collinge S K. Spatial arrangement of habitat patches and corridors; clues from ecological field experiments. *Landscape and Urban Planning*, 1998, 42(2): 157-168.
- [14] 富伟, 刘世梁, 崔保山, 张兆苓. 景观生态学中生态连接度研究进展. *生态学报*, 2009, 29(11): 6174-6182.
- [15] 申卫军, 鄢建国, 林永标, 任海, 李勤奋. 空间粒度变化对景观格局分析的影响. *生态学报*, 2003, 23(12): 2506-2519.
- [16] 汤国安, 杨昕. *ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程*. 北京: 科学出版社, 2011.
- [17] 姜磊, 岳德鹏, 曹睿, 任慧君. 北京市朝阳区景观连接度距离阈值研究. *林业调查规划*, 2012, 37(2): 18-22, 32-32.
- [18] 任慧君. 区域生态安全格局评价与构建研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [19] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [20] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.
- [21] 仇恒佳. 环太湖地区景观格局变化与优化设计研究——以苏州市吴中区为例 [D]. 南京: 南京农业大学, 2005.
- [22] 李晖, 易娜, 姚文璟, 王思琪, 李志英, 杨树华. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划. *生态学报*, 2011, 31(20): 5928-5936.
- [23] 韩文权, 常禹, 胡远满, 李秀珍, 布仁仓. 景观格局优化研究进展. *生态学杂志*, 2005, 24(12): 1487-1492.
- [24] 邱彭华, 徐颂军, 谢跟踪, 唐本安, 毕华, 余龙师. 基于景观格局和生态敏感性的海南西部地区生态脆弱性分析. *生态学报*, 2007, 27(4): 1257-1264.