

# 基于 MCR 模型和 Kriging 的海口市景观格局优化分析

余宇晨,陈彩虹\*,贺 丹,陆 禹

(中南林业科技大学,湖南 长沙 410018)

**摘 要:**以海口市为研究对象,采用最小耗费距离模型和克里格差值法,对海口市景观格局进行了优化研究,以为海口市生态环境建设提供参考。结果表明:1)海口市有生态源地 46 块,北部数量少而规模大、南部数量多而规模小,主要受社会经济活动和地形地貌的影响。2)隐性生态阻力面与显性生态阻力面构建了综合生态阻力面,相比传统方法构建的阻力面,理论上更接近实际状态。隐性生态阻力面与显性生态阻力面的差异能反映生态脆弱局部,这些局部是容易被忽视而又需要重点建设的区域。3)海口市有生态廊道 92 条,其中建设用地生态廊道 21 条,耕地生态廊道 13 条,林地生态廊道 58 条;有生态节点 64 个,其中建设用地生态节点 1 个,耕地生态节点 11 个,林地生态节点 52 个。生态廊道和生态节点的功能因类型差异而不同,在生态建设中需采取科学合理的建设措施。

**关键词:**海口市;最小耗费距离模型;克里格插值法;景观格局优化

**中图分类号:**S718.557      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2016)03-0233-06

## Landscape Pattern Optimization Analysis Based on MCR Model and Kriging in Haikou

SHE Yu-chen, CHEN Cai-hong\*, HE Dan, LU Yu

(Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

**Abstract:** In order to provide scientific basis for ecological environment construction in Haikou, this paper studied the landscape pattern optimization of Haikou. It utilized the minimum cumulative resistance (MCR) model and Kriging interpolation method to explore the way of optimization of landscape ecological pattern in Haikou. The results showed that: 1) Haikou had 46 blocks of ecological sources that were mainly affected by social and economic activities and natural topography and geomorphology. Most blocks were located in southern part with small scale, while large scale blocks with small number were in northern part of Haikou. 2) The comprehensive ecological resistance surface was constituted by dominant and recessive ecological resistance, which was theoretically closer to the actual state compared those built by traditional methods. The potential ecological weak points reflected in dominant and recessive ecological resistance always were the key construction region but they were easily ignored. 3) Haikou had 92 ecological corridors, including 21 ecological corridors of construction land, 13 arable land ecological corridors and 58 forest ecological corridors. There were 64 ecological nodes in Haikou, including one of the construction land ecological node, 11 cultivated ecology nodes and 52 forest ecological nodes. The functions of ecological corridors and ecological nodes differed depending on different types, and reasonable measures should be adopted to carry out ecological construction.

**Key words:** Haikou City; the minimum cumulative resistance model; Kriging; landscape pattern optimization

收稿日期:2015-10-08    修回日期:2016-02-19

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)。

作者简介:余宇晨,男,在读硕士,研究方向:林业遥感和林业调查规划设计。E-mail:sycsupper@qq.com

\*通信作者:陈彩虹,女,教授,研究方向:土地资源管理和林业调查规划设计。E-mail:shejiyun@126.com

景观格局是多种生态过程共同作用的结果<sup>[1-3]</sup>,同时反作用于生态过程<sup>[4]</sup>,合理的景观格局是保障生态过程正常运行的基础。随着经济社会的快速发展,人类无节制的掠夺式发展方式破坏了生态平衡<sup>[5-6]</sup>,如何优化景观格局以实现生态过程良性发展成为生态领域急需解决的重要问题<sup>[7-8]</sup>。景观生态学从生态演替机制的角度提出了控制区域生态过程的“关键局部”的理念<sup>[9]</sup>,认为通过“格局—过程—功能”的方式识别空间中的关键局部<sup>[7]</sup>,进而构建科学合理的景观格局,可以达到保护生态环境和维护生态安全的目的<sup>[10]</sup>。根据景观格局对生态过程的阻碍作用提出的最小耗费距离模型(MCR)<sup>[11-12]</sup>,能较好的表达景观格局对生态流运行的影响,形成了较完善的景观格局优化思路<sup>[13]</sup>。

海口市是海南省的政治、经济、文化中心,在海南经济社会发展中起着至关重要的作用。随着“海南国际旅游岛”发展战略的不断深化,海口市加快了旅游业的发展步伐,在经济社会发展的同时对生态环境产生了不良后果,威胁着海口市人与自然的协调发展。本研究以海口市为研究对象,根据景观生态学理论,采用 MCR 模型和克里格插值法(Kriging)对海口市景观格局进行优化分析,为海口生态环境建设、完善生态系统提供理论依据。为海口市生态环境维持与生态系统保护提供理论依据

1 材料与方法

1.1 研究区概况

海口市位于海南省北部沿海,是海南省政治、经济、文化中心,地处 19°31'32"—20°05' 07"N、110°07' 59"—110°42' 35"E,东接文昌市,南靠定安县,西临澄迈县,北依琼州海峡,总面积 2 304.84 km<sup>2</sup>。地形地貌以平原为主,最高海拔 222 m,气候为热带海洋性季风气候,全年温度较高,旱雨季明显,7、8 月多台风。年日照时数 2 000 h 以上,太阳辐射强,年均气温 23.8℃,年降雨量 1 664 mm。海南省第 1 大河—南渡江从西南部向东转北流经市域汇入琼州海峡,水资源十分丰富,植被多为南方热带地区常见的野生灌木草丛植物种群。海口市下辖琼山、秀英、龙华、美兰 4 个区,包括 21 个街道办事处和 22 个乡镇,常住人口 204.62 万。

1.2 数据来源及处理

以海口市 2010 年二类调查数据、1:10 000 地形图和 2015 年遥感影像数据为基础数据,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 3 m×3 m。考虑数据的时效性和可得

性,从 Google Earth 下载海口市 19 级遥感影像图(比例尺为 1:1 500,分辨率为 0.54 m×0.54 m),拍摄日期为 2015 年 8 月 5 日。根据实地调查构建遥感影像解译标志,在 Arcgis 中采用北京 54 坐标系配准地形图、遥感影像数据和二类调查数据,根据遥感影像解译标志校对调整二类调查数据,并进行地类合并,得林地、耕地、草地、水域、未利用地和建设用地 6 种<sup>[1]</sup>景观类型。

1.3 研究方法

1.3.1 “源”的识别 “源”是发挥效益又需要保护的 对象,在以改善生态环境为目标的景观格局优化中,“源”是由具有较高生态服务价值的景观类型组成的景观组分,在生态系统中发挥着生态核心的作用。本研究选择海口市最大的森林公园以及面积>10 hm<sup>2</sup> 的连续水域为生态“源”<sup>[14]</sup>。

1.3.2 生态阻力面的构建 传统的生态阻力面是利用 MCR 模型从景观格局的角度进行构建的,其过程仅考虑景观类型的空间位置,忽略了相邻景观之间存在的物质、能量和信息交流。根据生态阻力可否直观判断,可将生态阻力分为显性生态阻力和隐性生态阻力 2 类<sup>[15]</sup>。显性生态阻力可直观判断,如景观类型对物质和能量交换造成最直接的影响;隐性生态阻力不易直接判断,如空气的流动,污染物的扩散等。Kriging 以空间自相关为基础,能反映空间事物之间的相互影响<sup>[16]</sup>,因此,采用 Kriging 构建隐性生态阻力面。景观类型的阻力值参考 R. Costanza<sup>[17]</sup>等的研究成果,确定单位面积景观类型的生态服务价值(表 1)。

表 1 景观类型的生态阻力

Table 1 The ecological resistance of landscape patterns		
景观类型	单位面积生态功能 服务价值/(元·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	阻力值
林地	19 334.0	20
耕地	6 114.3	55
草地	6 406.5	70
水域	40 676.4	1
未利用地	371.4	80
建设用地	-8 852.1	100

根据景观类型的生态功能,将阻力值设定为[1, 100]:单位面积水域的生态功能最高,阻力值设为 1;单位面积建设用地的生态功能最低,阻力值设为 100,其他景观类型根据生态功能将阻力值设为 1 到 100 之间,以此为基础构建生态阻力面。在 Arcgis 空间分析模块中,以生态源地为目标,以景观类型的生态阻力值为代价,运用累积距离成本工具计算海口市各区域到生态源地的累积距离成本,即为生态

阻力面。

1.3.3 生态廊道的识别 在生态阻力面的基础上, 利用最短路径分析可得“源”间生态阻力累积值最小的路径, 即为生态廊道。生态廊道的阻力最小, 因而生态流在其中运行速率最高, 有利于生态系统之间的物质和能量交换。从生态廊道的性质考虑, 生态源地应该两两之间存在一条生态廊道<sup>[7]</sup>, 生态廊道以形成环状为最佳。

1.3.4 生态节点的识别 生态节点是分布在生态廊道上的脆弱点, 是景观格局优化中应重点建设的关键位置。对生态阻力面进行水文分析, 提取生态阻力面中潜在的“山脊线”, 即为累积生态阻力最大的路径<sup>[11]</sup>, 与生态廊道的交叉点为生态节点。

1.3.5 MCR 模型 生态流在空间中运动需克服景观的阻力<sup>[9]</sup>, 景观生态服务价值越高, 对生态流运行的阻力越小, 反之越大。采用 MCR 模型模拟景观类型对生态流的阻碍机制, 考虑了源、通过距离和景观基面等因素<sup>[12]</sup>, 公式如下:

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

(1)

式中:  $D_{ij}$  是生态流从景观基面  $i$  到源  $j$  所通过的距离;  $R_i$  是景观  $i$  的阻力值,  $m$  是景观类型数量,  $n$  为基本的单元总数。

1.3.6 Kriging Kriging 是一种以变异函数和结构分析为基础, 在研究范围内对空间变量进行无偏差最优估计的方法。该方法认为空间上连续分布的事物相互之间存在复杂的相互关系, 应该用考虑了相互影响的随机表明进行拟合。Kriging 以属性的空间自相关为基础, 因而插值结果接近自然分布状态, 能反映事物之间的相互影响<sup>[16]</sup>, 利用 Kriging 模拟景观类型之间的生态阻力影响, 构建隐性生态阻力面。

## 2 结果与分析

### 2.1 生态源地

选取海口石山火山群国家地质公园、南渡江、东寨港自然保护区、丁荣水库、风潭水库、东湖水库等作为海口市生态源地, 共有生态源地 46 块。海口市生态源地的空间分布特征为东南至西北方向空间分异明显, 东南部生态源地规模小但数量多, 西北部生态源地规模大但数量少(图 1)。

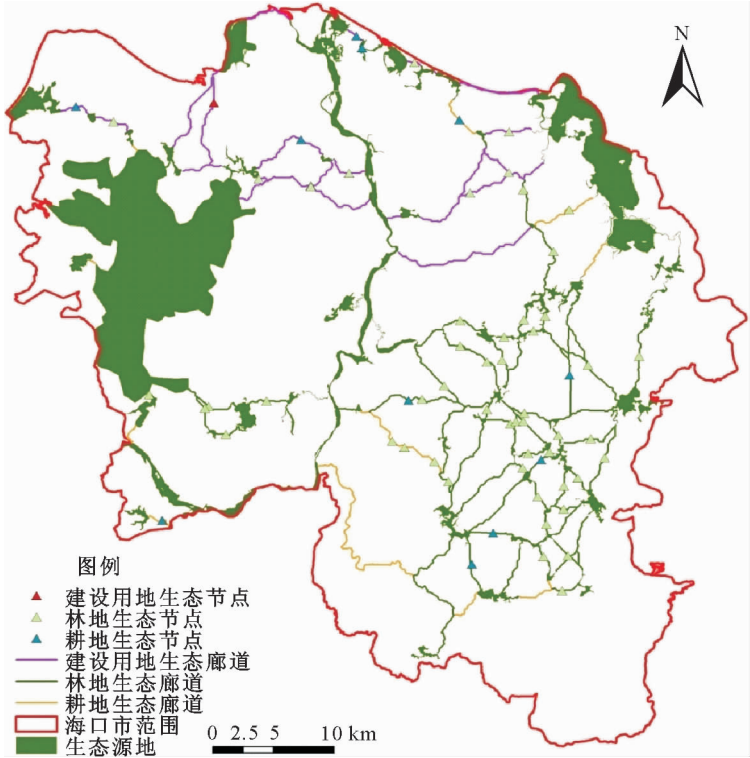


图 1 海口市景观格局优化

Fig. 1 The landscape pattern optimization of Haikou

### 2.2 生态阻力面

以生态源地为目标, 根据景观类型的生态阻力值构建生态阻力面。以传统方法构建显性生态阻力面(图 2a), 以 Kriging 构建隐性生态阻力面(图 2b)。由

于海口市地处热带北缘, 雨热同期, 气候适合动植物生长, 且工厂等污染源较少, 参考之前的研究成果<sup>[15]</sup>, 确定显性生态阻力面取权重值 0.7, 隐性生态阻力面取权重值 0.3, 构建综合生态阻力面(图 2c)。

阻力值较低的区域,在隐性生态阻力面上生态阻力值较高。对比发现,这些区域通常是林地破碎化程度高、农田和农村居民点分布多而分散的区域,生态系统不足以维持自身正常发展,是生态建设的重点区域。

2.3 生态廊道

根据生态源地和综合生态阻力面,海口市有生态廊道 92 条(图 1),总长度 39.38 km。根据海口市景观格局中各生态廊道主要的景观基质和功能特点,将生态廊道分为 3 类,建设用地生态廊道、林地生态廊道和耕地生态廊道。

建设用地生态廊道 21 条,占总数的 22.83%,总长度 11.03 km,主要分布在海口市北部。该区为海口市城市中心区域所在地,建设用地集中分布,城市化程度高,社会经济活动频繁,生态流容易被阻隔,是生态廊道建设的重点;林地生态廊道 58 条,占总数的 63.04%,总长度 22.69 km,主要分布在海口市东南部,该区地形较为复杂,以丘陵为主,森林分布广泛,植被覆盖率较高,生态功能相对完善,生态廊道的建设以保护和丰富生物多样性为主;耕地生态廊道 13 条,占总数的 14.13%,总长度 5.66 km,主要分布在海口市南部,该区为农业发展的主要区域,大量农田分布其间,阻隔了生态流的正常运行。

2.4 生态节点

利用水文分析对综合生态阻力面提取“山脊线”,根据与生态廊道的交叉点确定生态节点。海口市有生态节点 64 个(图 1),根据生态节点分布的景观基质和功能,可分为建设用地生态节点、林地生态节点和耕地生态节点 3 类。其中,建设用地生态节点 1 个,分布在海口市主城区,受人为干扰影响最大,直接影响城区人民生活质量和城市景观,是生态节点建设的重点;森林生态节点 52 个,主要分布在海口市东南部,受人为干扰相对较少,生态建设应以保护为主;耕地生态节点 11 个,分布较为分散,人为干扰主要来自于农业生产活动,限制生产活动和污染物防止是其生态建设的重点。

3 结论与讨论

生态源地是维持区域生态系统正常发展的基础,应重点保护和建设,但由于生态源地往往具有较大的空间范围,受外界干扰也相对强烈,其空间形态与自然条件和人口分布存在相关关系。海口市生态源地空间分布主要受社会经济活动和地形地貌的影响,西北沿海地区为海口市主要城区,建设用地分布广泛,经过规划布局,剔除了破碎的景观类型,生态

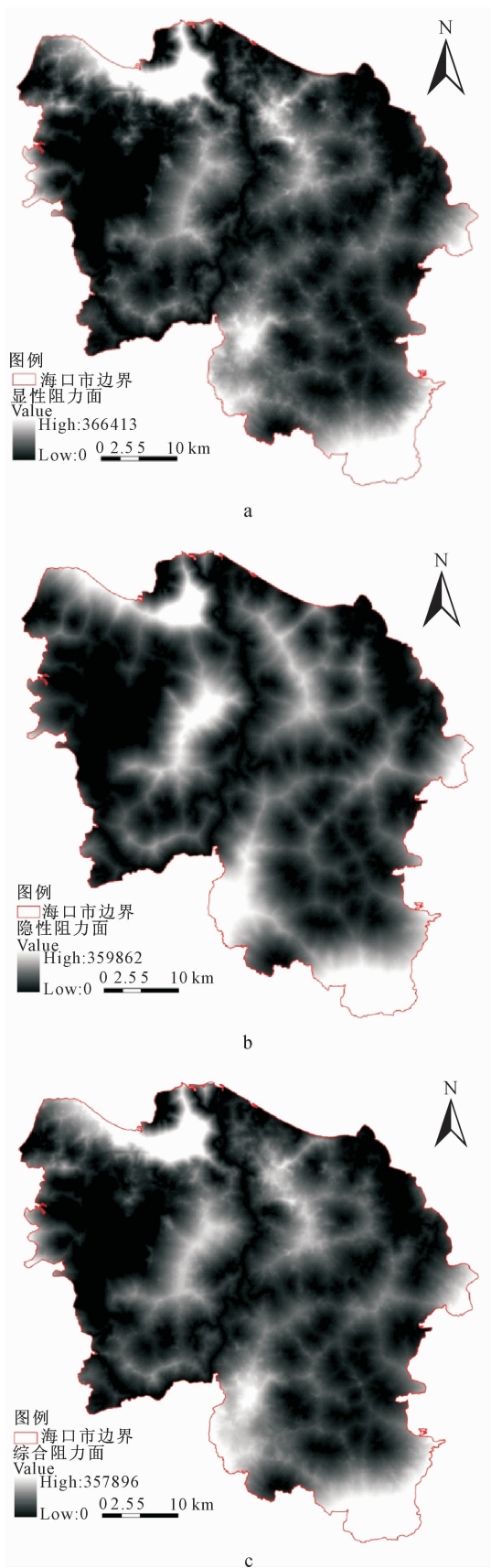


图 2 阻力面的构建

Fig. 2 The structure of resistance surface

从局部来看,隐性生态阻力面与显性生态阻力面之间存在明显差异,某些显性生态阻力面上生态

源地保留了相当的规模,但数量较少;东南部为海口市主要的农业发展区,人口分布相对分散,区域发展缺乏规划管理,加之地形地貌的限制,生态源地数量较多,但规模较小。由于生态源地功能发挥的程度往往取决于规模而不是数量,因此海口市西北部生态源地建设应以保护现有生态源地为主,东南部则应在现有生态源地的基础上扩大生态源地规模,提高生态效益。从生态系统来看,稳定性是系统功能发挥的重要影响因素,因此应保证生态源地的规模并丰富生物多样性,为生态源地设置隔离外界干扰的缓冲带,以增强生态源地的稳定性。

利用 Kriging 构建隐性生态阻力面,相比显性生态阻力面阻力值的过度较平缓,这是由于景观斑块之间考虑了阻力值的相互影响,从而强化了阻力值的平滑过度,这与空间事物之间的影响方式是一致的。因此,由显性生态阻力面和隐性生态阻力面构建的综合生态阻力面更接近生态系统的实际情况,更能反映空间中的生态脆弱局部。隐性生态阻力面与显性生态阻力面加权叠加构建了综合生态阻力面,考虑了景观类型阻力之间物质、能量和信息的交流方式,比仅考虑景观格局的传统生态阻力面更接近生态系统的实际状态。

生态廊道的主要功能是增强生态系统的整体连通性,不同的生态廊道类型在生态系统中产生的作用却不尽相同,相适应的建设措施也不一样。建设用地生态廊道是连接人类社会与自然的桥梁,对改善生活质量发挥着重要作用,是景观格局优化的关键,由于受人为干扰最为强烈,建设用地生态廊道应重点建设。建设用地生态廊道应选择与生态源地相同的基质建设,保证足够的宽度和生物多样性,并在外围设置一定宽度的缓冲带,减少人为干扰,维持生态廊道的稳定。耕地本身具有一定的生态服务功能,其对生态环境的影响主要来自农药、化肥等使用产生的污染。耕地生态廊道穿越农田将分散的生态源地连接,并能防止农业产生的污染物进入生态源地,对保障和改善农业生态系统意义重大。生态建设中耕地生态廊道与农业生产区域之间应设置隔离带,重点防治农业生产产生的污染物进入耕地生态廊道。森林与生态源地的生态功能相近,生态效益显著。林地生态廊道将森林与生态源地连接起来,扩大了物质能量转换面,有利于生态功能的发挥,对构建并完善区域生态功能体系发挥意义重大。在生态建设过程中,由于林地生态廊道建设投资小、见效快、管理简单,应优先建设,保障基本生态功能的发挥。

建设用地生态节点的作用是保护生态廊道以免

受人为干扰而遭到破坏。由于该类生态节点与人类主要活动区相邻,一方面受人为干扰最大,另一方面对改善周边区域的人居生活质量的效果最直接,因而该生态节点应兼顾生态和景观,可在设立禁止活动区的基础上扩大规模,打造成提升城市品质的生态公园。耕地生态节点保护耕地生态廊道免受农业生产活动的干扰,建设时应重点考虑生态基质,既要保证耕地生态廊道的稳定性,采用与之相融的组成结构,又应考虑对农业污染的抗性,保障生态过程的正常发展。林地生态节点主要是强化林地生态廊道生态功能的发挥,增强森林与生态源地的联系,促进生态过程正常运行。林地生态节点提高了森林生态系统的稳定性,维持了区域生态安全,可通过丰富生物多样性,增强林地景观层次建设,加强林地管制,减少人为干扰进行建设。

景观格局优化的传统方法是概念模型和数字模型,能从数量上对景观格局提出优化方案<sup>[1]</sup>,却不能充分考虑区域景观特征以实现景观格局空间优化指导。最小耗费距离模型从模拟生态过程的角度出发,以维护生态安全为目的,提出生态廊道和生态节点的空间位置,其实质是将区域中分散的生态源地连成整体并促进生态流高速正常运行,从而提高生态系统的稳定性,促进生态环境良性发展。这种从景观格局实际情况出发,突出生态环境中控制生态演替关键局部的研究思路及方法值得借鉴<sup>[11]</sup>,相比传统景观格局优化方法具有更强的现实指导意义。

景观格局优化的关键是选择合理的生态源地和构建模拟真实的阻力面,进而确定生态廊道和生态节点。在优化的关键问题上目前已达成一定共识,但优化过程还存在诸多问题有待解决。景观格局优化的可靠性由生态源地结构的科学性决定,目前生态源地的选择多由主观经验判断,生态源地通常为生态服务价值最高的具有一定规模的水域,其他景观类型考虑较少,优化结果与实际情况之间存在一定出入;阻力的影响因子众多,目前的研究多从景观类型和地理特征出发,气候条件、经济社会发展情况及人为干扰程度等对生态演替具有影响的因子涉及极少,对生态过程模拟造成了一定偏差;生态廊道和生态节点的研究仅限于空间位置的确定,对生态廊道的宽度研究较少,生态节点的形状、规模及内部组成结构<sup>[15]</sup>的研究还未涉及。在景观格局优化过程中这些问题普遍存在,是今后景观格局优化领域的研究方向,这些问题的解决将极大提高优化措施的可靠性和实用性,促进生态系统正常高效发展。

本研究表明,选择大面积水域为生态源地,组成了海口市生态系统的核心。海口市生态源地的空间



分布特征与自然、社会经济条件之间存在相关性,主要反映在生态源地的空间形态、规模和数量上。由于建设条件和生态功能发挥的程度不同,不同的生态源地应采取相应的措施进行建设,在重点保护的基础上提高稳定性。2)在景观类型的基础上考虑生态阻力之间的相互影响,构建了海口市的综合生态阻力面,综合生态阻力面结合了显、隐性生态阻力面的优势,能更准确地反映生态流运行的实际情况。由于隐性生态阻力面客观地反映出局部生态系统的潜在发展势态,因而与显性生态阻力面相比较能指示海口市的生态脆弱局部。3)基于生态源地和综合生态阻力面,利用 MCR 模型和水文分析得海口市生态廊道 92 条和生态节点 64 个。生态廊道和生态节点类型不同,其生态功能和在生态系统中的作用各异,应从周围环境和人为干扰的角度详细分析,有针对性地采取科学合理的建设措施,提高生态环境优化效率。

参考文献:

[1] 刘杰,叶晶,杨婉,等. 基于 GIS 的滇池流域景观格局优化[J]. 自然资源学报,2012,27(5):801-808.  
LIU J, YE J, YANG W, *et al.* A GIS-based landscape pattern optimization approach for Lake Dianchi Watershed[J]. Journal of Natural Resources,2012,27(5):801-808. (in Chinese)

[2] YOU W B, HE D J, WU L Y, *et al.* Temporal-spatial differentiation and its change in the landscape ecological security of Wuyishan Scenery District[J]. Acta Ecologica Sinica,2011,31(21):6317-6327.

[3] 刘敏,厉悦,杨晓杰,等. 扎龙自然保护区景观格局变化及其驱动机制[J]. 西北林学院学报,2010,25(5):157-162.  
LIU M, L Y, YANG X J, *et al.* Change of landscape pattern and its driving mechanism in Zhalong Nature Reserve [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(5): 157-162. (in Chinese)

[4] 孙恺,杨延征,赵鹏祥,等. 基于遥感技术的西安城市景观格局时空演变及分析[J]. 西北林学院学报,2015,30(2):180-185.  
SUN K, YANG Y Z, ZHAO P X, *et al.* Spatial temporal evolution of landscape pattern in Xian based on 3S technology [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(2): 180-185. (in Chinese)

[5] 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.  
MENG J J, ZHU L K, YANG Q, *et al.* Building ecological security pattern based on land use;a case study of Ordos,Northern China[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(21):6755-6766. (in Chinese)

[6] 黎良财,杨胜天,李耀强,等. 珠江上游融江流域森林景观格局现状及分析[J]. 西北林学院学报,2012,27(5):26-31.  
LI L C, YANG S T, LI Y Q, *et al.* An analysis on landscape

patterns of Rongjiang Watershed in the Pearl River Upstream [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(5): 26-31. (in Chinese)

[7] 苏泳娴,张虹鸥,陈修治,等. 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案[J]. 生态学报,2013,33(5):1524-1534.  
SUN Y X, ZHANG H O, CHEN X Z, *et al.* The ecological security patterns and construction land expansion simulation in Gaoming[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1524-1534. (in Chinese)

[8] 李绥,石铁矛,付士磊,等. 南充城市扩展中的景观生态安全格局[J]. 应用生态学报,2011,22(3):734-740.  
LI S, SHI T M, FU S L, *et al.* Landscape ecological security pattern during urban expansion of Nanchong City[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 734-740. (in Chinese)

[9] 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.  
YU K J. Landscape ecological security patterns in biological conservation[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(1): 8-15. (in Chinese)

[10] 富伟,刘世梁,崔保山,等. 景观生态学中生态连接度研究进展[J]. 生态学报,2009,29(11):6174-6182.  
FU W, LIU S L, CUI B S, *et al.* A review on ecological connectivity in landscape ecology [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6174-6182. (in Chinese)

[11] 赵筱青,和春兰. 外来树种桉树引种的景观生态安全格局[J]. 生态学报,2013,33(6):1860-1871.  
ZHAO X Q, HE C L. Landscape ecological security pattern associated with the introduction of exotic tree species Eucalyptus[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1860-1871. (in Chinese)

[12] 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.  
LI H, YI N, YAO W J, *et al.* Shangrila county ecological land use planning based on landscape security pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 5928-5936. (in Chinese)

[13] TURNER M G. Spatial and temporal analysis of landscape patterns[J]. Landscape Ecology, 1990, 4(1): 21-30.

[14] 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.

[15] 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.  
LU Y, SHE J Y, CHEN C H, *et al.* Landscape ecological security pattern optimization based on the granularity inverse method;a case study in Xiuying District, Haikou[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6384-6393. (in Chinese)

[16] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京:科学出版社,2011:363-369.

[17] COSTANZA R, ARGE R, GROOT R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1987, 387: 253-260.