

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第12期 Vol.32 No.12 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 12 期

2012 年 6 月 (半月刊)

目次

- 河口湿地人为干扰度时空动态及景观响应——以大洋河口为例..... 孙永光,赵冬至,吴涛,等 (3645)
- 鄱阳湖南矶湿地优势植物群落及土壤有机质和营养元素分布特征..... 张全军,于秀波,钱建鑫,等 (3656)
- 青岛市湿地生态网络评价与构建..... 傅强,宋军,毛锋,等 (3670)
- 大堤型湖滨带生态系统健康状态驱动因子——以太湖为例..... 叶春,李春华,王秋光,等 (3681)
- 绿色屋顶径流氮磷浓度分布及赋存形态..... 王书敏,何强,张峻华,等 (3691)
- 坡度对农田土壤动物群落结构及多样性的影响..... 何先进,吴鹏飞,崔丽巍,等 (3701)
- 枣园桃蛀果蛾寄生蜂种类及其与寄主的关系..... 姚艳霞,赵文霞,常聚普,等 (3714)
- 基于逻辑斯蒂回归模型的鹭科水鸟栖息地适宜性评价..... 邹丽丽,陈晓翔,何莹,等 (3722)
- 温度、盐度和 pH 对马氏珠母贝稚贝清滤率的联合效应..... 朱晓闻,王辉,刘进,等 (3729)
- 鸡桑药共生模式库区土壤养分变化及流失风险..... 赵丽平,杨贵明,赵同科,等 (3737)
- 黑河中游典型土地利用方式下土壤粒径分布及与有机碳的关系..... 张俊华,李国栋,南忠仁 (3745)
- DEM 栅格分辨率和子流域划分对杏子河流域水文模拟的影响..... 邱临静,郑粉莉,Yin Runsheng (3754)
- 粒度变化对城市热岛空间格局分析的影响..... 郭冠华,陈颖彪,魏建兵,等 (3764)
- 基于景观连接度的森林景观恢复研究——以巩义市为例..... 陈杰,梁国付,丁圣彦 (3773)
- 城市能源利用碳足迹分析——以厦门市为例..... 林剑艺,孟凡鑫,崔胜辉,等 (3782)
- 高寒牧区村域生态足迹——以甘南州合作市为例..... 王录仓,高静 (3795)
- 太湖湖滨带生态系统健康评价..... 李春华,叶春,赵晓峰,等 (3806)
- 秦岭大熊猫栖息地巴山木竹生物量..... 党坤良,陈俊娴,孙飞翔,等 (3816)
- 盐胁迫对盐生植物黄花补血草种子萌发和幼苗生长的影响..... 尤佳,王文瑞,卢金,等 (3825)
- 海南霸王岭山地原始林与伐后林中木质藤本对支持木的选择..... 刘晋仙,陶建平,何泽,等 (3834)
- 闽楠幼树光合特性及生物量分配对光环境的响应..... 王振兴,朱锦懋,王健,等 (3841)
- 基于形态及分子标记的濒危植物夏蜡梅自然居群的遗传变异研究..... 金则新,顾婧婧,李钧敏 (3849)
- 不同径级油松径向生长对气候的响应..... 姜庆彪,赵秀海,高露双,等 (3859)
- 珍稀濒危植物长蕊木兰种群的年龄结构与空间分布..... 袁春明,孟广涛,方向京,等 (3866)
- 巨桉与 5 种木本植物幼树的耗水特性及水分利用效率的比较..... 胡红玲,张健,万雪琴,等 (3873)
- 银木凋落叶腐解过程对小白菜生长和抗性生理的影响..... 黄激激,胡庭兴,张念念,等 (3883)
- 基于氡示踪剂和热扩散技术的栓皮栎水分运输速率与效率研究..... 孙守家,孟平,张劲松,等 (3892)
- 石漠化干旱环境中石生藓类水分吸收特征及其结构适应性..... 张显强,曾建军,湛金吾,等 (3902)
- 含铜有机肥对土壤酶活性和微生物群落代谢的影响..... 陈琳,谷洁,高华,等 (3912)
- 钝叶枥不同性别花的花部形态与传粉特征比较..... 王茜,邓洪平,丁博,等 (3921)
- 我国春玉米潜在种植分布区的气候适宜性..... 何奇瑾,周广胜 (3931)
- 烯效唑干拌种对小麦氮素积累和运转及籽粒蛋白质品质的影响..... 樊高琼,杨恩年,郑亭,等 (3940)

专论与综述

- 中国产业共生发展模式的国际比较及对策..... 石磊,刘果果,郭思平 (3950)

研究简报

- 吉林省镇赉县近 10 年景观格局变化..... 张国坤,卢京花,宋开山,等 (3958)
- 杨树人工林生态系统通量贡献区分析..... 金莹,张志强,方显瑞,等 (3966)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 330 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-06

封面图说:鸳鸯——在分类上属雁形目,鸭科。英文名为 Mandarin Duck(即“中国官鸭”)。鸳指雄鸟,鸯指雌鸟,故鸳鸯属合成词。常常栖息于山地河谷、溪流、湖泊、水田等处,雌雄偶居,以植物性食物为主,也食昆虫等小动物。繁殖期 4—9 月间,雌雄配对后迁至营巢区。巢往往置于树洞中,用干草和绒羽铺垫,每窝产卵 7—12 枚。江西省婺源鸳鸯湖是亚洲最大的野生鸳鸯越冬栖息地。鸳鸯是一种美丽的禽鸟,中国传统文化又赋予它很多美好的寓意,因此,在许多文学艺术作品中经常用以表达爱情。

彩图提供:陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201112061863

傅强, 宋军, 毛锋, 吴永兴, 姚涵, 唐剑波. 青岛市湿地生态网络评价与构建. 生态学报, 2012, 32(12): 3670-3680.

Fu Q, Song J, Mao F, Wu Y X, Yao H, Tang J B. Evaluation and construction of wetland ecological network in Qingdao City. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12): 3670-3680.

青岛市湿地生态网络评价与构建

傅 强^{1,*}, 宋 军^{2,3}, 毛 锋¹, 吴永兴¹, 姚 涵¹, 唐剑波¹

(1. 清华大学 建筑学院, 北京 100084; 2. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 青岛 266100;

3. 青岛市城市规划设计研究院, 青岛 266071)

摘要:在快速城市化背景下,城市社会经济发展与空间扩张不可避免,往往造成栖息地数量、面积、质量锐减、栖息地之间联系破碎等后果。此外,全球气候变化也加剧了栖息地恶化过程。生态网络通过保护恢复重点栖息地及构建栖息地之间物质、信息及能量传播的连接廊道,在整体上维持生态系统的动态平衡。青岛市位于东部沿海经济发达地区,地处海洋与陆地生态系统的交汇处,生态环境极为脆弱,易遭受外力破坏,且难以恢复。选取青岛地区湿地作为研究对象,在 RS、GIS 技术支持下,基于最小成本路径法构建青岛市湿地生态网络,并利用关联长度指数、介数指数对网络的整体结构及斑块重要程度进行评价。结果表明,不同路径成本阈值水平下,网络的连通性有很大差别;核心斑块中,胶州湾湿地、大沽河等具有较高重要程度;歇脚石斑块中,重要程度较高的斑块位于以胶州湾湿地为中心,以胶莱河、潍河河口,白马河、潮河河口及丁字湾为端点的连线上。在青岛市及周边地区划定“一心、二轴、一环”的湿地生态网络控制框架的策略,为青岛市湿地生态系统保护与城市发展空间选择提供科学方法与量化依据。

关键词:生态网络;湿地系统;最小成本路径法;关联长度指数;介数指数

Evaluation and construction of wetland ecological network in Qingdao City

FU Qiang^{1,*}, SONG Jun^{2,3}, MAO Feng¹, WU Yongxing¹, YAO Han¹, TANG Jianbo¹

1 School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2 College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China Qingdao 266100, China

3 Qingdao Urban Planning and Design Research Institute, Qingdao 266071, China

Abstract: Urban socio-economic development and spatial urban expansion has led to the loss and fragmentation of habitat. Global climate change adds to the gravity of these effects. An ecological network describes a network of habitats and connecting corridors that is mapped using habitat suitability and land use/land cover data. Connectivity within a habitat network ensures a flow of material, energy and information among the various patches, and allows species' movement from inappropriate to appropriate areas. This ensures the abundance of species reaches a dynamic equilibrium at the network level and also means that the disappearance of species from any particular patch does not change the function of the regional ecosystem network. Thus, management of ecological network is an effective measure to counter the loss of biodiversity caused by reductions in habitat quality and area, as well as habitat fragmentation, in the context of rapid urbanization and climate change. The least cost path method is a way to construct and analyze ecological networks based on landscape spatial structure and dynamic biological processes. Based on the understanding that the characteristic of the matrix is one of the important factors determining the movement of species between patches, the least cost path method gives different cost values to different landscape types, and generates a cost surface to substitute the Euclidean space. Therefore, the dispersal

基金项目:“十二五”科技支撑计划项目(2010BAK67B08);国家自然科学基金项目(51178235)

收稿日期:2011-12-06; 修订日期:2012-03-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fuqiangfio@163.com

paths generated by the least cost method are similar to those of actual species movement. Qingdao city is located in the eastern coastal region of China where the economy is relatively well-developed. The region is also where marine and terrestrial ecosystems meet. In this paper, we propose a wetland ecological network in the Qingdao district based on remote sensing and geographic information systems technology. We evaluate the overall structure of the network and the importance of individual patches using the correlation length index and betweenness centrality index, and use the findings to identify optimal strategies and make recommendations. In this paper, we discuss the following five questions: (1) How to classify landscapes? (2) How to determine the cost value of each landscape type? (3) How to evaluate the importance of each core patch? (4) How to evaluate the importance of stepping stones? (5) What is optimal management strategy for the wetland systems in the study area? The result shows that the network connectivities are very different in terms of threshold levels of path cost. Core patches in Jiao Zhou bay wetlands and Da Gu river have a relatively high degree of importance. Stepping stone patches with a high degree of importance are found in two zones: one comprising Jiao Zhou bay, Jiao Lai river and Wei He river estuary, and the other comprising Jiao Zhou bay and Ding Zi bay. In this paper, we propose a wetland management plan based on an ecological network including one core area, two axes and a ring in Qingdao and its surrounding area, to provide a scientific and quantitative basis for the selection of urban development sites within Qingdao City that simultaneously achieves wetland ecosystem protection. These network construction and evaluation methods can be used for other ecological network analysis.

Key Words: ecological network; wetland system; least cost path method; correlation length index; betweenness centrality index

人类为了自身的发展大肆对自然环境进行改造与破坏,并为此付出了沉重的代价:水资源的污染、海水入侵、土壤侵蚀、生态系统的退化、自然环境美观质量的降低以及人类娱乐休闲场所减少。城市作为人类聚居的主要形式,其高强度的使用与扩张增加了自然生态系统要素之间的隔离^[1]。这种现象在我国经济较发达地区尤为突出。湿地是自然界生物多样性及生态功能最高的生态系统,发挥着补给水源,过滤有毒物质,促进碳和氮循环的重要作用,同时也是众多濒危物种的主要栖息地,被喻为“地球之肾”。由于人类对湿地破坏及不合理的开发利用,造成湿地面积减少、生物多样性丧失、功能和效益衰退。

生态网络是基于物种生境适宜性及土地利用-覆盖现状构建由栖息地及连通廊道构成的网络,栖息地网络化连接保证了物质、能量、信息在各斑块之间流通,可使物种从不适宜地区迁移到适宜地区^[2-3],在网络层面维持物种数量动态平衡,个别廊道或斑块的消失并不会改变区域生态系统整体功能^[4]。因此,生态网络是应对当前快速城市化、全球气候变化^[2,5]背景下栖息地质量下降、范围缩小,以及栖息地之间联系断裂进而导致生物多样性消失的有效措施^[6]。

本文以青岛市域范围为例,基于空间信息技术,利用最小成本路径方法(Least Cost Path Method, LCPM)定量分析模拟与表达湿地斑块及(潜在)连通廊道,构筑利于物种扩散迁移的湿地生态网络,基于图形理论中相关研究方法分析评价生态网络结构,在此基础上给出青岛市域湿地系统网络保护与优化策略。

1 研究区域概况

青岛市位于山东半岛南端,北纬 35°35′—37°09′,东经 119°30′—121°00′区域。东部与南部濒临黄海,总面积 10654 km²,常住人口 871.51 万人。青岛市海拔 0—1132.7 m(崂山主峰),地势东高西低,南北两侧隆起,中间低凹,山地约占全市总面积的 15.5%、丘陵占 25.1%、平原占 37.7%、洼地占 21.7%。青岛市地处北温带季风区域,属温带季风气候,略有海洋性气候特征,年均气温 12.3℃,年均降水量 680.5 mm。青岛市海岸线总长 711 km,近海滩涂面积 37530 hm²。有各类河流 224 条、水库 30 余座。目前青岛市符合国际标准的湿地面积 177760 hm²,约占青岛市国土总面积的 16%。考虑到生态系统的完整性,本文的研究区范围并不与青岛市行政区域重合,而是采用了一个包含青岛市域的矩形区域(图 1)。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文所采用的数据包括:中国 1:25 万土地覆盖遥感调查与监测数据库^[7]提供的 2005 年土地利用数据;中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站^[8]提供的 30 m 分辨率数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 数据并通过 ARCGIS 软件生成了坡度、坡向数据;全球鸟类分布数据^[9]。

2.2 研究方法

2.2.1 基于最小成本路径方法的生态网络构建方法

最小成本路径方法整合以土地利用、地形等空间信息为特征的结构连接与以物种的生物过程、行为信息等为特征的功能连接以构建结构连接与功能连接相关联的生态网络^[10-12]。其生态网络构建的步骤包括:(1)景观分类;(2)确定栖息地斑块;(3)确定成本面;(4)生成最小成本路径。

(1) 研究区景观分类

青岛市域湿地系统中具有较长距离迁徙能力的物种以鸟类为主,基于全球鸟类分布数据空间查找,得到分布于青岛湿地系统的鸟类共计 75 种,其中:国家一级保护动物 2 种,国家二级保护动物 4 种,国家保护的有益或者有重要经济、科学研究价值的陆生野生动物 59 种。通过对每一种物种生境特点分析整理,并考虑数据可获得性与精度,将青岛市域景观分为沼泽滩涂、河流湖泊、海岸、水田、河口、水边草地、海湾、河湖滩地、水边灌丛、水边旱田、平原草地、溪流、山地灌丛、林边水体、水边林地、林地边缘、农田边林地、山地草地、岛屿、旱田及其他共计 21 类(图 1)。

(2) 确定栖息地斑块

以沼泽滩涂、河流湖泊为栖息地景观类型。10 km² 及以上沼泽滩涂、河流湖泊景观斑块作为核心斑块,以 20 hm²—10 km² 沼泽滩涂、河流湖泊景观斑块作为歇脚石斑块。核心斑块可供相关物种长期生存、繁衍,歇脚石斑块提供临时避难与补给场所。核心斑块与歇脚石斑块的分布情况如图 2 所示。

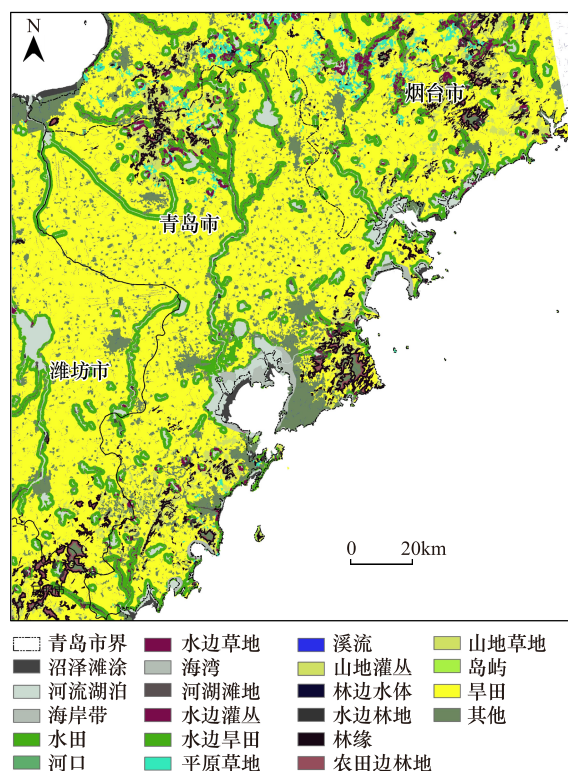


图 1 研究区域与景观类型

Fig. 1 The map of study area and landscape types

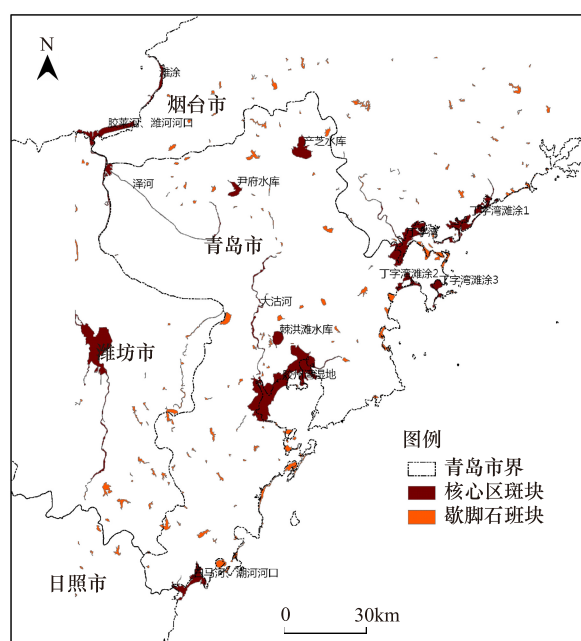


图 2 研究区核心斑块与歇脚石斑块分布图

Fig. 2 The distribution map of core and stepping stones

(3) 确定成本面

对青岛区域湿地的物种生境情况统计整理,依照每一物种对生境的选择情况,对各景观类型赋值(表1)。利用 ARCGIS 的 raster calculator 工具对各景观数据叠加分析,得到研究区域适宜性分析图。再利用 raster calculator 工具将适宜性分析图转换为成本面(图3)。其转换公式如下:

$$\text{成本值}_{\text{pixel}(i)} = \text{适宜性最大值} - \text{适宜值}_{\text{pixel}(i)} \quad (1)$$

表1 景观适宜性值

Table 1 The suitability value of landscapes

景观类型 Landscape type	适宜性 Suitability	景观类型 Landscape type	适宜性 Suitability	景观类型 Landscape type	适宜性 Suitability
沼泽滩涂 Marsh and shoal	100	河湖滩地 River and lake beaches	20	水边林地 Woodland near water	2
河流湖泊 River and lake	83	水边灌丛 Shrub near water	15	林地边缘 Woodland edge	2
海岸 Seacoast	35	水边旱田 dry farming land near water	13	农田边林地 Woodland near farm land	2
水田 Paddy field	33	平原草地 Plain grass land	11	山地草地 Mountainous grass land	2
河口 River estuary	24	溪流 Stream	7	岛屿 Island	2
水边草地 Grassland near river	22	山地灌丛 Mountainous shrub	4	旱田 Dry farming land	2
海湾 gulf	22	林边水体 Water near woodland	4	其他 Other	0

(4) 生成最小成本路径

基于 ARCGIS 软件^[13-14]相关工具,可得到两两斑块间的最小成本连接路径。路径的成本值是其所经过的各像素对应的成本值的累加和。

2.2.2 网络结构评价方法

最小成本路径法提供了生成生态网络的工具,然而它并不能够分析所得网络的结构特点。图形理论为分析网络特性与功能提供了灵活的方法^[15]。图形理论中的网络由一组节点和节点之间的连线构成。用图形表示生态网络时,节点表示栖息地,边表示物种在栖息地之间迁徙的廊道^[16](图4)。

(1) 网络整体结构评价

本文采用关联长度指数^[17]评价研究区域生态网络整体结构。对于给定的路径成本阈值 d ,将成本值小于 d 的路径所构成的网络定义为 N_d 。在这一阈值条件下相互连通的斑块便构成了一个斑块集合。关联长度指数表示了物种在 N_d 中碰到斑块集边界之前所迁移的平均距离。因此,关联长度 C 的值越大,则表示研究区域生态网络连接越紧密^[17],网络的生态功能越强。关联长度由公式2定义:

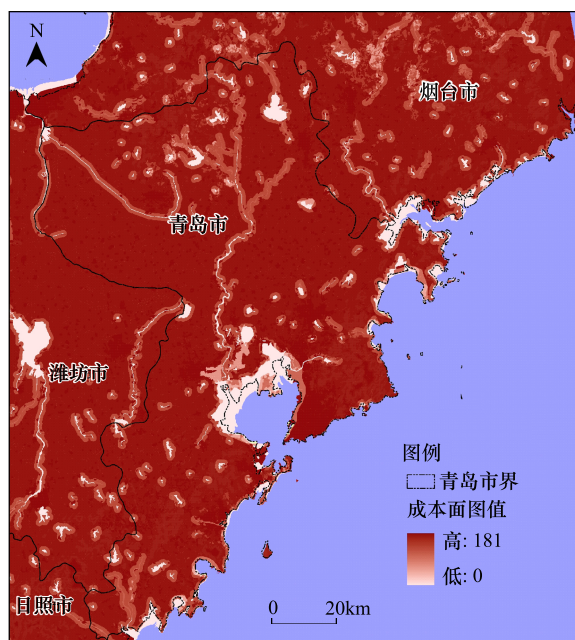


图3 研究区域成本面图

Fig.3 The cost surface of study area

$$C = \frac{\sum_{i=1}^m n_i \cdot R_i}{\sum_{i=1}^m n_i} \quad (2)$$

式中, m 是斑块集合中核心斑块的个数, n_i 是斑块集合 i 中斑块所覆盖的像素个数, R_i 是斑块集 i 的回转半径, 其定义如公式 3 所示

$$R_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} \sqrt{(x_j - \bar{x}_i)^2 + (y_j - \bar{y}_i)^2}}{n_i} \quad (3)$$

式中, $\bar{x}_i$ 和 $\bar{y}_i$ 是斑块集合 i 中核心斑块所有像素坐标 x 和 y 的平均值, x_j 和 y_j 是斑块集合 i 中第 j 个斑块像素的横坐标和纵坐标。

(2) 斑块重要程度评价

① 核心斑块评价方法

核心斑块的评价思路是分别移去其中一个核心斑块及与其连接的路径, 对比前后网络的连接指数变动情况, 变动越大, 说明该斑块在网络中的作用越明显。用 C_k 表示去掉核心斑块 k 后的网络的关联长度指数。则基于关联长度指数的核心斑块 k 的重要程度 I_{CK} 可表示为如下公式:

$$I_{CK} = \frac{C - C_K}{C} \quad (4)$$

② 歇脚石斑块评价方法

歇脚石斑块的评价思路是计算歇脚石斑块在核心斑块间网络连线上出现的频率。采用介数指数 (Betweenness Centrality Index, BCI)^[18-20] 测定核心斑块之间歇脚石斑块的重要程度。其计算公式如下:

$$C_B(v) = \sum_{s,t \in CV, s \neq t} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}} \quad (5)$$

式中, v 为进行评测的歇脚石节点, CV 是核心节点集, $\sigma_{st}(v)$ 是指核心节点 s 到核心节点 t 之间所有路径中通过歇脚石节点 v 的路径。 σ_{st} 是指核心节点 s 到核心节点 t 之间所有路径。

3 结果与分析

3.1 不同连接路径成本阈值下的生态网络

3.1.1 基于最小成本路径法的生态网络

采用 ARCGIS 软件提供的 Distance 工具对各栖息地斑块进行一对一的连接路径分析。在生成的所有路径中, 按成本值以 1000 为间隔, 得到成本阈值分别为 5000—20000 的生态网络 (图 5)。

3.1.2 基于核心斑块连接的网络结构图

以核心斑块作为节点, 分析不同成本阈值下节点连接情况, 得到研究区阈值为 5000—20000 的核心斑块节点网络结构图 (图 6)。

3.2 生态网络的结构分析

3.2.1 网络整体结构分析

计算不同阈值水平网络的关联长度指数 (表 2)。随着阈值增大, 关联长度总体上也呈现增大的趋势。其中 N_{8000} — N_{9000} 、 N_{13000} — N_{14000} 网络的连通性发生较大的变化, 说明网络阈值变化与网络连通性的变化并非线

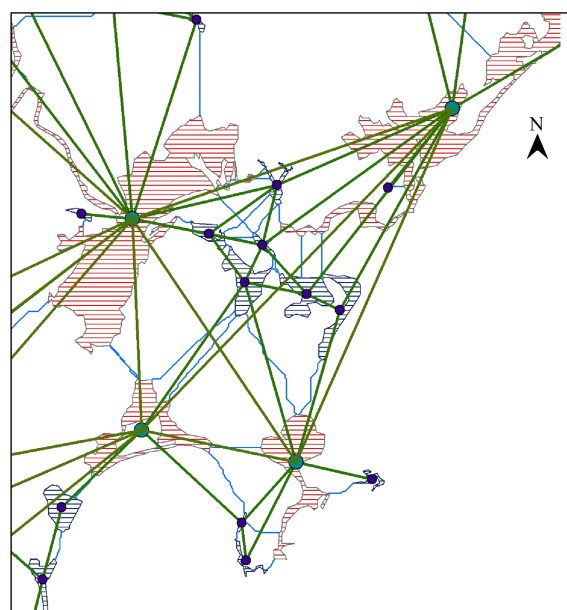


图 4 生态网络与图形转换示意图

Fig. 4 The Schematic diagram of ecological network and graph conversion

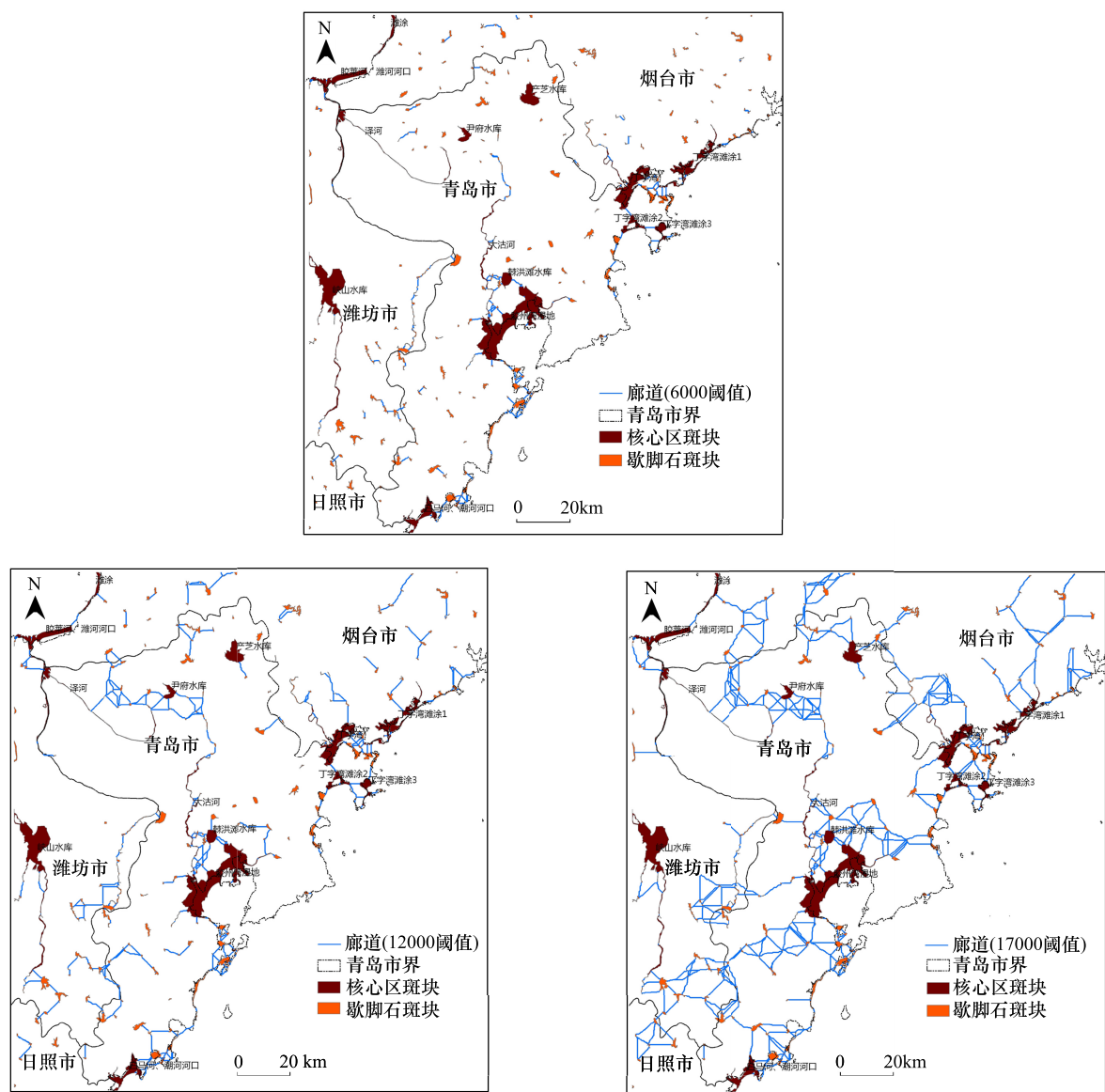


图5 基于最小成本路径方法生成的生态网络

Fig. 5 The ecological network generated by least cost path method

性关系。根据此特性对网络结构优化可大幅节约各方面成本。在 17000 阈值后关联长度保持不变,说明 N_{17000} 中核心节点都有到达其他核心节点的边,即此时的网络形成连通图。继续增大阈值,只会使得核心节点之间连通更加紧密,使物种迁徙扩散可选择路径变多,但并不能扩大物种的迁徙扩散范围。

3.2.2 核心斑块重要程度评价

基于公式 4 求斑块在各阈值网络的重要程度(表 3)。其中,胶莱河、潍河河口、泽河、尹府水库、大沽河、胶州湾湿地总体上表现出较高的重要程度,这些核心斑块也构成了由胶州湾到莱州湾纵贯青岛地区北部大通道的重要节点。峡山水库在高连接网络(阈

表 2 网络整体结构评价

Table 2 Structure evaluation of the overall network			
阈值	关联长度	阈值	关联长度
Threshold value	Correlation length	Threshold value	Correlation length
5000	10045.8	13000	29457.87
6000	10786.95	14000	52149.54
7000	10786.95	15000	52149.54
8000	10786.95	16000	52149.54
9000	23353.03	17000	55403.47
10000	25569.48	18000	55403.47
11000	25569.48	19000	55403.47
12000	29457.87	20000	55403.47

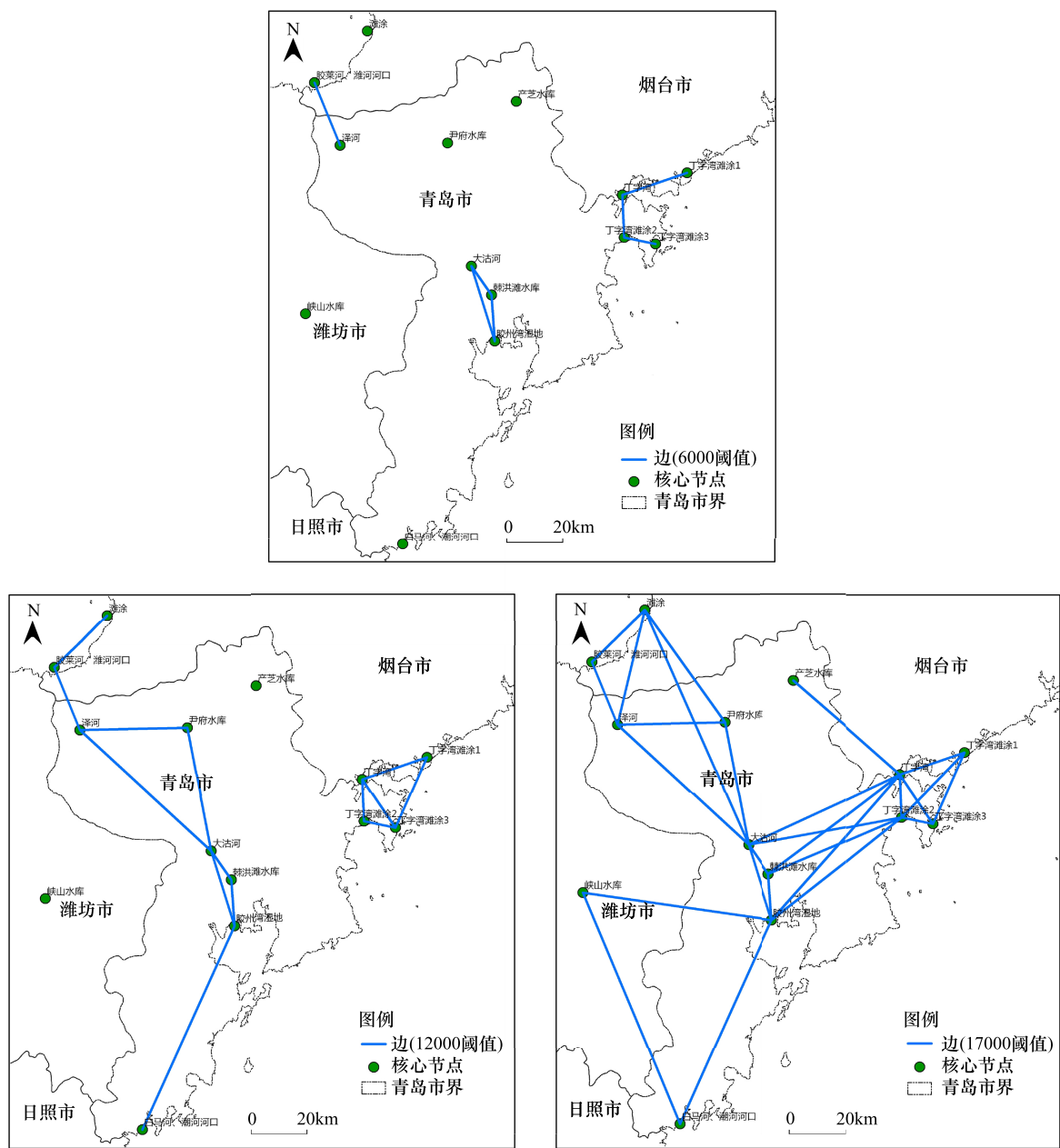


图 6 核心斑块间连接结构图

Fig. 6 The connection graph of core patches

值大于 14000) 中表现出较高的重要程度, 峡山水库、胶州湾湿地、白马河、潮河河口构成的青岛南部及周边地区湿地网络将有效扩大湿地物种的迁徙空间。

表 3 核心斑块重要程度评价

Table 3 Importance evaluation of core patches

	核心斑块的重要程度 Ick/% Correlation length importance of patch k						
	N ₅₀₀₀	N ₆₀₀₀	N ₉₀₀₀	N ₁₀₀₀₀	N ₁₂₀₀₀	N ₁₄₀₀₀	N ₁₇₀₀₀
莱州湾滩涂 Laizhou bay shoals	0	0	0	8.67	7.75	3.83	3.44
产芝水库 Chanzhi reservoir	0	0	0	0	0	0	5.87
胶莱河、潍河河口 Jialai River and Wei river estuary	4.92	4.58	32.26	38.13	33.29	15.9	10.62

续表

	核心斑块的重要程度 Ick/% Correlation length importance of patch k						
	N ₅₀₀₀	N ₆₀₀₀	N ₉₀₀₀	N ₁₀₀₀₀	N ₁₂₀₀₀	N ₁₄₀₀₀	N ₁₇₀₀₀
丁字湾滩涂 1 Dingzi bay shoals1	12.84	12.37	5.71	5.22	4.53	12.05	11.1
尹府水库 Yinfu reservoir	0	0	53.81	56.08	4.03	1.94	1.69
丁字湾 Dingzi bay	12.84	17.32	3.65	3.33	2.89	12.76	11.58
泽河 Ze river	4.92	4.58	49.67	52.32	44.6	21.23	4.87
丁字湾滩涂 2 Dingzi bay shoals2	0	6.87	1.43	1.31	1.14	28.65	2.1
大沽河 Dagu river	8.86	4.08	51.56	54.09	44.15	21.18	0
丁字湾滩涂 3 Dingzi bay shoals3	0	3.56	1.65	1.5	1.3	2.66	2.47
峡山水库 Xiashan reservoir	0	0	0	0	0	20.19	19.3
棘洪滩水库 Jihongtan reservoir	4.32	4.02	1.06	1.22	1.02	0.44	0.51
胶州湾湿地 Jiaozhou bay wetland	7.38	6.87	34.74	37.63	45.87	35.32	12.06
白马河、潮河河口 Baima River and Chao river estuary	0	0	0	0	13.2	8.47	8.43

3.2.3 歇脚石斑块重要程度评价

基于 ARCGIS 软件的二次开发工具,按照公式 5,计算 N₁₇₀₀₀(图 7) 中各歇脚石节点的介数指数。利用 ARCGIS 软件的 Natural Breaks(Jenks)分类方法,将歇脚石节点按介数指数大小分为 5 个级别(图 8)。

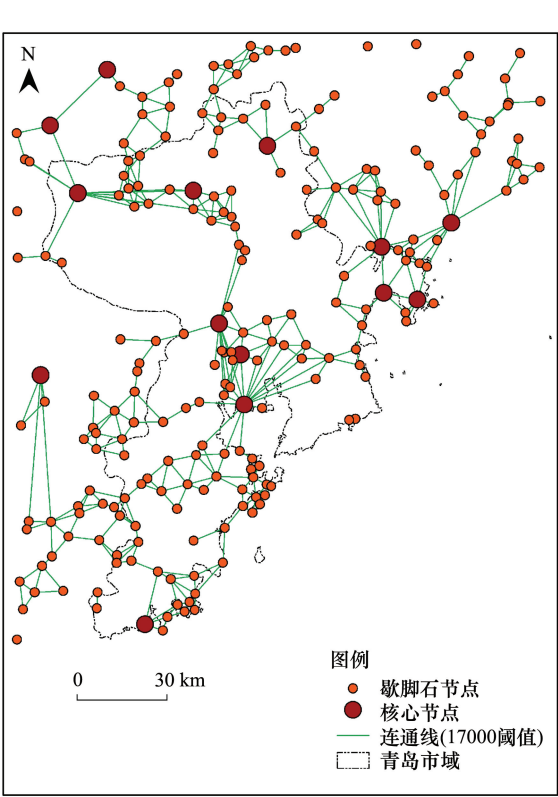


图 7 N₁₇₀₀₀ 核心节点与歇脚石节点连接图

Fig. 7 The connection graph of core vertices and stepping stone vertices in N₁₇₀₀₀

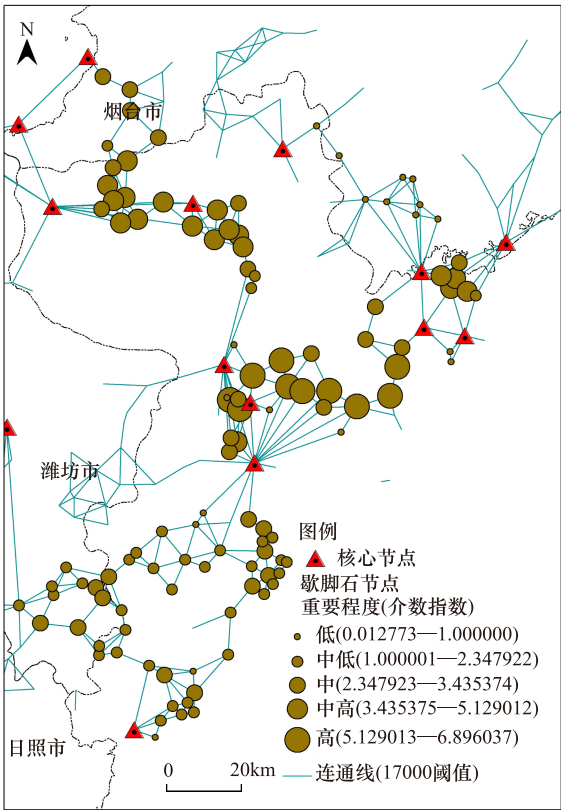


图 8 N₁₇₀₀₀ 歇脚石节点重要程度评价图

Fig. 8 The importance evaluation map of stepping stones in N₁₇₀₀₀

3.3 湿地网络保护与构建策略

3.3.1 核心斑块保护策略

胶州湾湿地在空间上位于中心位置,且在核心斑块重要程度评价中显示了很高的重要程度。针对青岛市

目前实施的“环湾保护、拥湾发展”战略可能带来的湾区人口膨胀、城市扩张导致的胶州湾湿地面积减少的问题,建议应特别重视胶州湾湿地本身的生态环境价值以及其在整个区域生态系统中的核心作用。划定生态控制线等控制措施保护现存区域,积极恢复由于城市及工业破坏污染的区域。真正做到保护优先,可持续发展。大沽河、泽河 2 个线状核心区域与胶州湾湿地一起,构成了贯通胶州湾与莱州湾的湿地系统主轴。针对大沽河流域环境治理与生态保护的《大沽河流域保护与空间利用总体规划》已经出台。建议以“环湾保护”、“大沽河治理”为契机,从生态网络角度构筑青岛地区湿地生态系统。

3.3.2 歇脚石斑块保护策略

重要程度较高的歇脚石斑块主要分布于:(1)大沽河中段北侧-尹府水库-泽河-胶莱河-潍河河口一线:主要分布有黄山水库、黄同水库、北墅水库、高格庄水库、双庙水库等较大型水体;(2)胶州湾-棘洪滩水库-丁字湾一线:主要分布有挪城水库、宋化泉水库、崂山水库、王圈水库、白沙河、墨水河等较大型水体及众多盐田、沿海滩涂;(3)胶州湾-白马河、潮河河口一线:由于这一线路距离长,且其间无较大面积的核心斑块,因此,其中的歇脚石斑块扮演更加重要的角色,通过图 8 可以看到,这一地区形成了由 3 条边构成的环状结构,分别是:由胶州湾经小珠山水库、山洲水库、铁山水库、郭家村水库至三里庄水库;由三里庄水库经青墩子水库、吉利河水库、陡崖子水库至白马河、潮河河口;以及由胶州湾经黄岛区、胶南市沿海滩涂和海湾至白马河、潮河河口。通过合理规划与恢复,可将通过黄岛区、胶南市沿海滩涂和海湾作为重点,将条件好的歇脚石斑块整合,营建核心斑块,加强这一区域的网络联系。

3.3.3 构建区域生态网络控制框架

部分具有重要价值的节点并不在青岛行政区范围内,为了构建完整健康的生态网络,需要在区域层面加强市际合作。随着国务院对于《山东半岛蓝色经济区发展规划》的批复,半岛地区区域协调发展势在必行,应该抓住这一契机,不但促进区域经济一体化,同时也应在区域层面考虑构建生态系统网络。基于生态网络的理论与方法,构建区域层面的生态空间格局,为区域与城市可持续发展划定生态框架。本文在青岛地区湿地系统分析基础上,提出构建一心(胶州湾湿地)、二轴(胶州湾湿地-三里庄水库、潍河河口;胶州湾湿地-丁字湾)、一环(胶州湾湿地-峡山水库-白马河、潮河河口-胶州湾湿地)的湿地生态网络控制框架(图 9)。根据控制框架完善区域城市发展形态,建立更加符合湿地生态健康要求的区域城镇体系与交通体系。

4 讨论与结论

景观成本值确定方法上,以往研究主要基于专家打分,根据土地利用/覆盖情况对每一景观赋单一值^[14,21],通过物理环境、生物环境以及人类活动干扰等因素不同权重叠加得到^[12,22-23]。或是对各类景观赋几组不同的成本值,从而得到几组成本面,对每一组成本面分别进行最小成本路径的分析^[24-26]。本文则是在统计分析研究区相关物种生境基础上,结合土地利用/覆盖、地形、空间关系等要素,确定不同景观类型并赋以相应的成本值。以期在一定程度上降低阻力值确定的主观性。

网络的构建方法上,不同的物种对栖息地大小、生境特点和质量,以及栖息地间迁移扩散的行为各不相同。要准确确定每一物种的迁徙能力是十分困难的^[27-28],提供基于不同阈值的分析结果可为决策分析提供选择^[29]。因此,本文根据路径成本值确定不同等级的阈值,基于各阈值构建相应的生态网络,每一等级网络对应保护一定迁徙扩散能力的物种。同时,可以通过核心斑块扩大、构建歇脚石斑块缓冲区、恢复部分歇脚石

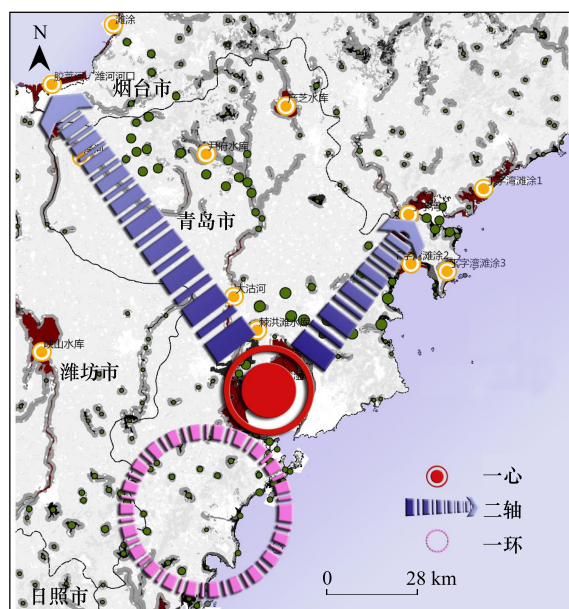


图 9 湿地生态网络控制框架

Fig. 9 The control framework of wetland ecological network

斑块的方法缩小路径的成本值,进而在阈值等级不变的情况下使生态网络连通性提高。高阈值等级的网络路径为斑块选址缩小了范围。这为生态保护、城市规划的编制和实施提供了基础数据支持。

图形理论提供了生态网络结构评价的相关方法。关联长度指数综合了斑块大小与路径特性,评价不同等级网络物种迁徙的范围的大小,其物理意义更加容易解释。但关联长度指数在网络形成连通图后便不再发生变化,此时网络内部结构的完善情况无法通过相关指数进行评价。从研究区域的实际情况看,现有核心斑块尚未有效连接,因此,现阶段利用关联长度指数对生态网络进行评价是合适的。

歇脚石斑块对于物种迁移起到了非常重要的作用^[30-32]。由于歇脚石斑块能够为物种扩散提供暂时栖息地,提供躲避捕食者、自然或人为干扰的逃生场所,为能在面积较小斑块生存的物种提供生境^[33],起到了增强核心斑块间连接的作用。介数指数可量化评价歇脚石斑块在核心斑块连接中所起的作用,进而确定歇脚石斑块的重要程度。在当前快速城市化的背景下,由于歇脚石斑块面积、质量等原因,并没有受到足够的重视,往往成为城市建设用地最先侵占的区域。通过对歇脚石斑块重要程度的评价,为城市用地选择与生态保护提供依据,有效调和发展与保护存在的矛盾。此外,歇脚石斑块在保护和恢复的成本上相对于大型核心斑块是较低的,通过对重要歇脚石斑块的保护与恢复,可以快速有效的增加生态网络的连接。

最小成本路径在实现方法与空间表达上具有优势,然而也存在如下问题:(1)成本面确定的困难;(2)路径长度具体度量单位无法准确确定;(3)斑块与斑块间的路径只有一条最短路径。解决上述问题还需要大量的实证研究的支持,一方面可提供各物种生境特点的详细基础数据;另一方面还可以与最小成本路径方法生成的模拟路径进行对比分析。此外最小成本路径方法在实现工具上也需作相应改进。

References:

- [1] Prugh L R, Hodges K E, Sinclair A R, Brashares J S. Effect of habitat area and isolation on fragmented animal populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(52): 20770-20775.
- [2] Opdam P, Wascher D. Climate change meets habitat fragmentation: linking landscape and biogeographical scale levels in research and conservation. *Biological Conservation*, 2004, 117(3): 285-297.
- [3] Thomas C D, Cameron A, Green R E, Bakkenes M, Beaumont L J, Collingham Y C, Erasmus B F N, Siqueira M F D, Grainger A, Hannah L, Hughes L, Huntley B, van Jaarsveld A S, Midgley G F, Miles L, Ortega-Huerta M A, Peterson A T, Phillips O L, Williams S E. Extinction risk from climate change. *Nature*, 2004, 427(6970): 145-148.
- [4] Opdam P, Steingröver E, van Rooij S. Ecological networks: a spatial concept for multi-actor planning of sustainable landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 75(3/4): 322-332.
- [5] Pearson R G, Dawson T P. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography*, 2003, 12(5): 361-371.
- [6] Jongman R H G, Bouwma I M, Griffioen A, Jones-Walters L, van Doorn A M. The pan European ecological network: PEEN. *Landscape Ecology*, 2011, 26(3): 311-326.
- [9] BirdLife International and NatureServe. Bird species distribution maps of the world. BirdLife International, Cambridge, UK and NatureServe, Arlington, USA, 2011.
- [10] Rouget M, Cowling R M, Lombard A T, Knight A T, Graham I H K. Designing large-scale conservation corridors for pattern and process. *Conservation Biology*, 2006, 20(2): 549-561.
- [11] Beier P, Majka D R, Spencer W D. Forks in the road: choices in procedures for designing wildland linkages. *Conservation Biology*, 2008, 22(4): 836-851.
- [13] Adriaenssens F, Chardon J P, Blust G D, Swinnen E, Villalba S, Gulinck H, Matthysen E. The application of 'least-cost' modelling as a functional landscape model. *Landscape and Urban Planning*, 2003, 64(4): 233-247.
- [14] Watts K, Eycott A E, Handley P, Ray D, Humphrey J W, Quine C P. Targeting and evaluating biodiversity conservation action within fragmented landscapes: an approach based on generic focal species and least-cost networks. *Landscape Ecology*, 2010, 25(9): 1305-1318.
- [15] Laita A, Kotiaho J S, Mönkkönen M. Graph-theoretic connectivity measures: what do they tell us about connectivity?. *Landscape Ecology*, 2011, 26(7): 951-967.
- [16] Fall A, Fortin M J, Manseau M, O'Brien D. Spatial graphs: principles and applications for habitat connectivity. *Ecosystems*, 2007, 10(3):

448-461.

- [17] Keitt T H, D L Urban, Milne B T. Detecting critical scales in fragmented landscapes. *Conservation Ecology* [online] 1(1): 4, 1997. Available from the Internet. URL: <http://www.consecol.org/vol1/iss1/art4>
- [18] Freeman L C. A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, 1977, 40(1): 35-41.
- [19] Bodin Ö, Norberg J. A network approach for analyzing spatially structured populations in fragmented landscape. *Landscape Ecology*, 2007, 22(1): 31-44.
- [20] Minor E S, Urban D L. Graph theory as a proxy for spatially explicit population models in conservation planning. *Ecological Applications*, 2007, 17(6): 1771-1782.
- [21] Gurrutxaga M, Lozano P J, del Barrio G. GIS-based approach for incorporating the connectivity of ecological networks into regional planning. *Journal for Nature Conservation*, 2010, 18(4): 318-326.
- [22] Li H L, Li D H, Li T, Qiao Q, Yang J, Zhang H M. Application of least-cost path model to identify a giant panda dispersal corridor network after the Wenchuan earthquake-case study of Wolong Nature Reserve in China. *Ecological Modelling*, 2010, 221(6): 944-952.
- [23] LaRue M A, Nielsen C K. Modelling potential dispersal corridors for cougars in midwestern North America using least-cost path methods. *Ecological Modelling*, 2008, 212(3/4): 372-381.
- [24] Driessen K, Adriaenssens F, Rondinini C, Doncaster C P, Matthysen E. Evaluating least-cost model predictions with empirical dispersal data: a case-study using radiotracking data of hedgehogs (*Erinaceus europaeus*). *Ecological Modelling*, 2007, 209(2/4): 314-322.
- [25] Chardon J P, Adriaenssens F, Matthysen E. Incorporating landscape elements into a connectivity measure: a case study for the Speckled wood butterfly (*Pararge aegeria* L.). *Landscape Ecology*, 2003, 18(6): 561-573.
- [26] Sutcliffe O L, Bakkestuen V, Fry G, Stabbeborg O E. Modelling the benefits of farmland restoration: methodology and application to butterfly movement. *Landscape and Urban Planning*, 2003, 63(1): 15-31.
- [27] Bowman J, Jaeger J A G, Fahrig L. Dispersal distance of mammals is proportional to home range size. *Ecology*, 2002, 83(7): 2049-2055.
- [28] Bunn A G, Urban D L, Keitt T H. Landscape connectivity: a conservation application of graph theory. *Journal of Environmental Management*, 2000, 59(4): 265-278.
- [29] Galpern P, Manseau M, Fall A. Patch-based graphs of landscape connectivity: a guide to construction, analysis and application for conservation. *Biological Conservation*, 2011, 144(1): 44-55.
- [30] Tischendorf L, Fahrig L. On the usage and measurement of landscape connectivity. *Oikos*, 2000, 90(1): 7-19.
- [31] Tischendorf L, Fahrig L. On the use of connectivity measures in spatial ecology. A reply. *Oikos*, 2001, 95(1): 152-155.
- [32] Schadt S, Knauer F, Kaczensky P, Revilla E, Wiegand T, Trepl L. Rule-based assessment of suitable habitat and patch connectivity for Eurasian Lynx in Germany. *Ecological Applications*, 2002, 12(5): 1469-1483.
- [33] Forman R T T. *Land Mosaics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995: 47-47.

参考文献:

- [7] 地球系统科学数据共享网. [2011-07-20]. <http://www.geodata.cn>
- [8] 中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据服务平台. [2011-07-01]. <http://datamirror.csdb.cn>
- [12] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 王红扬, 周艳妮, 秦正茂. 湖南省城市群生态网络构建与优化. *生态学报*, 2011, 31(10): 2863-2874.

CONTENTS

Temporal and spatial dynamic changes and landscape pattern response of Hemeroby in Dayang estuary of Liaoning Province, China	SUN Yongguang, ZHAO Dongzhi, WU Tao, et al (3645)
Distribution characteristics of plant communities and soil organic matter and main nutrients in the Poyang Lake Nanji Wetland	ZHANG Qianjun, YU Xiubo, QIAN Jianxin, et al (3656)
Evaluation and construction of wetland ecological network in Qingdao City	FU Qiang, SONG Jun, MAO Feng, et al (3670)
Driving forces analysis for ecosystem health status of littoral zone with dikes: a case study of Lake Taihu	YE Chun, LI Chunhua, WANG Qiuguang, et al (3681)
The concentrations distribution and composition of nitrogen and phosphorus in stormwater runoff from green roofs	WANG Shumin, HE Qiang, ZHANG Junhua, et al (3691)
Effects of slope gradient on the community structures and diversities of soil fauna	HE Xianjin, WU Pengfei, CUI Liwei, et al (3701)
Investigation of populations of parasitic wasps parasitizing <i>Carposina sasakii</i> Matsumura (Lepidoptera: Carposinidae) in jujube orchards in China, with respect to the wasp-host relationship	YAO Yanxia, ZHAO Wenxia, CHANG Jupu, et al (3714)
Assessment of ardeidae waterfowl habitat suitability based on a binary logistic regression model	ZOU Lili, CHEN Xiaoxiang, HE Ying, et al (3722)
Combined effects of temperature, salinity and pH on the clearance rate of juveniles of <i>Pinctada martensii</i> (Dunker)	ZHU Xiaowen, WANG Hui, LIU Jin, et al (3729)
Soil nutrient dynamics and loss risks in a chicken-forage mulberry-medicinal plant intercropping system	ZHAO Liping, YANG Guiming, ZHAO Tongke, et al (3737)
Soil particle size distribution and its relationship with soil organic carbons under different land uses in the middle of Heihe river	ZHANG Junhua, LI Guodong, NAN Zhongren (3745)
Effects of DEM resolution and watershed subdivision on hydrological simulation in the Xingzihe watershed	QIU Linjing, ZHENG Fenli, YIN Runsheng (3754)
Impacts of grid sizes on urban heat island pattern analysis	GUO Guanhua, CHEN Yingbiao, WEI Jianbing, et al (3764)
Landscape connectivity analysis for the forest landscape restoration: a case study of Gongyi City	CHEN Jie, LIANG Guofu, DING Shengyan (3773)
Carbon footprint analysis on urban energy use: a case study of Xiamen, China	LIN Jianyi, MENG Fanxin, CUI Shenghui, et al (3782)
The ecological footprint of alpine pastures at the village-level: a case study of Hezuo in Gannan Autonomous Prefecture, China	WANG Lucang, GAO Jing (3795)
The ecosystem health assessment of the littoral zone of Lake Taihu	LI Chunhua, YE Chun, ZHAO Xiaofeng, et al (3806)
The biomass of <i>Bashania fargesii</i> in giant pandas habitat in Qinling Mountains	DANG Kunliang, CHEN Junxian, SUN Feixiang, et al (3816)
Effects of salinity on seed germination and seedling growth in halophyte <i>Limonium aureum</i> (L.) Hill	YOU Jia, WANG Wenrui, LU Jin, et al (3825)
Liana-host tree associations in the tropical montane primary forest and post-harvest forest of Bawangling, Hainan Island, China	LIU Jinxian, TAO Jianping, HE Zeet al (3834)
The response of photosynthetic characters and biomass allocation of <i>P. bournei</i> young trees to different light regimes	WANG Zhenxing, ZHU Jinmao, WANG Jian, et al (3841)
Genetic variation among populations of the endangered <i>Sinocalycanthus chinensis</i> based on morphological traits and ISSR profiles	JIN Zexin, GU Jingjing, LI Junmin (3849)
Growth response to climate in Chinese pine as a function of tree diameter	JIANG Qingbiao, ZHAO Xiuhai, GAO Lushuang, et al (3859)
Age structure and spatial distribution of the rare and endangered plant <i>Alcimandra cathartii</i>	YUAN Chunming, MENG Guangtao, FANG Xiangjing, et al (3866)
The water consumption and water use efficiency of the seedlings of <i>Eucalyptus grandis</i> and other five tree species in Sichuan Province	HU Hongling, ZHANG Jian, WAN Xueqin, et al (3873)
Effects of leaf litter of <i>Cinnamomum septentrionale</i> on growth and resistance physiology of <i>Brassica rapa</i> in the decomposition process of litter	HUANG Weiwei, HU Tingxing, ZHANG Niannian, et al (3883)
Water transport velocity and efficiency in <i>Quercus variabilis</i> detected with deuterium tracer and thermal dissipation technique	SUN Shoujia, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (3892)
The saxicolous moss's features of absorbing water and its structural adaptability in the heterogeneous environment with rock desertification	ZHANG Xianqiang, ZENG Jianjun, CHEN Jinwu, et al (3902)
Effects of organic materials containing copper on soil enzyme activity and microbial community	CHEN Lin, GU Jie, GAO Hua, et al (3912)
Comparison of floral morphology and pollination characteristics between the sexes in <i>Eurya obtusifolia</i>	WANG Qian, DENG Hongping, DING Bo, et al (3921)
Climatic suitability of potential spring maize cultivation distribution in China	HE Qijin, ZHOU Guangsheng (3931)
Effects of uniconazole dry seed dressing on nitrogen accumulation and translocation and kernel protein quality in wheat	FAN Gaoqiong, YANG Ennian, ZHENG Ting, et al (3940)
Review and Monograph	
International comparison and policy recommendation on the development model of industrial symbiosis in China	SHI Lei, LIU Guoguo, GUO Siping (3950)
Scientific Note	
The Change of landscape pattern in Zhenlai Xian, Jilin Province in recent ten years	ZHANG Guokun, LU Jinghua, SONG Kaishan, et al (3958)
Footprint analysis of turbulent flux over a poplar plantation in Northern China	JIN Ying, ZHANG Zhiqiang, FANG Xianrui, et al (3966)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 32 卷 第 12 期 (2012 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 12 (June, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元