

DOI: 10.5846/stxb201306101647

陈剑阳, 尹海伟, 孔繁花, 么贵鹏. 环太湖复合型生态网络构建. 生态学报, 2015, 35(9): 3113-3123.

Chen J Y, Yin H W, Kong F H, Yao G P. The complex eco-network development around Taihu Lake, China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 3113-3123.

## 环太湖复合型生态网络构建

陈剑阳<sup>1,2</sup>, 尹海伟<sup>1,\*</sup>, 孔繁花<sup>3</sup>, 么贵鹏<sup>4</sup>

1 南京大学城市规划与设计系, 南京 210093

2 北京大学建筑设计及其理论系, 深圳 518055

3 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093

4 江苏省城市规划设计研究院, 南京 210036

**摘要:**生态网络构建的量化研究已在生态规划中发挥了重要作用,但复合型生态网络构建却仍旧停留在理论探索与创新阶段。以环太湖地区为例,基于 RS 和 GIS 软件平台,采用最短路径分析方法模拟研究区潜在的生态廊道;然后叠加景观、游憩图谱网络,进行无标度网络的构建和检测,构建空间效能好的环太湖复合型生态网络图谱,并据此有针对性地提出复合型生态网络结构和框架优化的建议。研究结果表明,环太湖区域的生态网络和景观、游憩网络可以通过图谱分析和无标度网络检测进行整合,构建出空间效能好的复合型生态网络模型,从而指导环湖生态、景观、游憩资源的耦合发展与廊道建设;通过对不同分区的图谱形态和指标分析,具有小世界网络特征的太湖北部的苏州段和无锡段应以保护和连接为重点,南部的湖州段无标度网络特征明显,成长潜力较好,需要进行高质量的规划保护和开发。

**关键词:**城镇化;复合型生态网络;图谱;GIS 和 RS;太湖

## The complex eco-network development around Taihu Lake, China

CHEN Jianyang<sup>1,2</sup>, YIN Haiwei<sup>1,\*</sup>, KONG Fanhua<sup>3</sup>, YAO Guipeng<sup>4</sup>

1 Department of Urban Planning and Design, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2 Department of Architecture Design and Theory, Peking University, Shenzhen 518055, China

3 International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

4 Jiangsu Institute of Urban Planning and Design, Nanjing 210036, China

**Abstract:** Quantitative research on the development of eco-networks provides an important basis for habitat conservation and planning related decision-making; however, related theoretical research about the complexities of eco-networks development still remains in its infancy. Rapid urbanization around Taihu Lake of Jiangsu and Zhejiang Provinces of eastern China has caused serious landscape fragmentation. The current green corridors, which have been merely developed for either ecological conservation or scenic tourism development, have proved inadequate for supporting the need to create an eco-city as well as to provide for sustainable regional development. The eco-city system surrounding Taihu Lake needs to include both physical eco-networks and virtual networks; that is, the entire system needs to include landscaping and provide recreational opportunities, while at the same time consider the less tangible aspects of the system's social and economic characteristics and functions. Thus, a pressing need exists for the development of strategies that consider various aspects of developing a multifaceted eco-network. This paper takes Taihu Lake as an example, using RS and GIS to initially simulate the development of ecological corridors based on the shortest path method. Next, a scale-free and complex network was

**基金项目:**国家自然科学基金(31170444);江苏高校优势学科建设工程资助项目,中央高校基本科研业务费专项资金项目;环湖绿廊实施规划项目

收稿日期:2013-06-10; 网络出版日期:2014-05-22

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

developed by overlapping the graphic maps of ecological networks, landscape networks and recreational networks. This graphic network of layered GIS maps can provide important information to assist land managers in developing and optimizing the area's complex eco-network. The result demonstrates that the GIS-based map and graphics along with the scale-free network provide a good method to guide the development of a complex eco-network. As a result, one can see that an efficient yet complex eco-network is beneficial to the conservation of ecological resources, the landscape and the recreational resources. The results also indicate that the existing complex eco-network along the northern section of Taihu Lake, which is part of the Suzhou and Wuxi districts, has become very fragmented; as a result, additional work is need to provide additional resource protection and natural area interconnection. On the other side of Taihu Lake, the complex eco-network on the southern section in Huzhou District shows great potential for further improvement. The needs of this area should be carefully considered during future planning and development.

**Key Words:** urbanization; complex eco-network; graphic map; GIS and RS; Taihu Lake

学者们普遍认为城市化背景下的生态破碎化过程不可逆,因而更不该在土地利用规划中用功能分区的分割方式加速这种“分离”;反之,应该创造“相互连接的复合体”<sup>[1]</sup>。岛屿生物地理理论与异质(集合)种群理论认为生境斑块面积越大,质量越好,斑块间距离/阻力越小,对物种栖息迁移和物种多样性就越有利。目前,基于生态目标的生态网络构建的理论框架主要为“斑块-廊道-基质”<sup>[2-3]</sup>,其本质是点线面规划<sup>[4-9]</sup>,潜在廊道模拟的技术手段主要有生物模拟法、最小路径法<sup>[10-13]</sup>,并多结合重力模型和图谱理论<sup>[14]</sup>进行情景分析比较。为提高生态网络的效益及可行性,需要通过景观结构指标<sup>[15]</sup>如斑块面积、孤立性,廊道类型、面积,特别是网络网眼密度、网络连接度和网络闭合度<sup>[16]</sup>等来进行定量分析与评价。

然而,人文视角下的生态网络不仅包括生态网络,还包含与之相耦合的外部社会、经济等网络,即复合型生态网络<sup>[17]</sup>。基于复合型生态网络的层次划分理论<sup>[18]</sup>,本文将复合型生态网络划分为生态网络、景观网络和游憩网络3个层次。其中,景观网络是生态节点与半生态节点(保护区、景点等)的景观连接廊道,游憩网络则是生态节点与人文节点(村落、城镇风貌区等)的游憩连接廊道。空间效能(成长性、稳定性)是构建复合型网络构建可行性的重要指标。空间效能高意味着重要斑块应承担更多的生态功能,网络连接形态应该更加有效。相对于小世界网络的扁平网络形态,无标度网络模型形态呈发散状/树状,具有成长性好,集聚效益好的特性,是理想的复合型生态网络形态。本文以环太湖地区为例,基于RS和GIS软件平台,在生态廊道模拟基础上,在图谱上连接景观廊道和游憩廊道,进行无标度网络的构建和检测,提出空间效能好的环太湖复合型生态网络图谱,并据此有针对性地提出复合型生态网络结构和框架优化的建议。

## 1 研究区概况

本文提出的环太湖地区包括江浙两省太湖沿岸的苏州、无锡、常州、湖州4市辖区以及所属宜兴、长兴、吴江共10个行政片区,面积约为 $1.31 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,其中重点研究区为太湖岸线10 km范围内的滨湖陆生地,面积约为 $2886 \text{ km}^2$ 。研究区内有国家级风景名胜15处、森林公园8处、自然保护区4处、湿地公园5处、度假区5处、历史文化名镇名村11处、特色村落6处、重要城市风貌区15处(图1)。

## 2 数据与研究方法

### 2.1 数据来源

本文所采用的数据主要包括2010年5月24日的TM遥感影像(资料来源:美国地质调查局网站 <http://glovis.usgs.gov/>),条带号119—38、119—39,共两景,太湖景区风景游憩资源现状图(2012年)、太湖风景路规划(2012年)、太湖风景名胜区总体规划(2011年)。



(2)生境斑块适宜性与景观阻力评价 不同景观类型对物种生存、繁衍和迁移的景观阻力不同。通过考察不同土地利用类型的植被覆盖情况和受人为干扰的程度,确定不同生境斑块的景观阻力大小(表2),生成研究区景观阻力图,作为消费面,用以定量表征物种在不同景观中迁移的景观阻力大小。

表 2 不同用地类型景观阻力赋值表

| Table 2 The landscape impedance values table of different land use types |                                                     |                   |                                              |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------|
| 土地利用类型<br>Land use types                                                 | 亚类<br>Subcategories                                 | 赋值<br>Value range | 备注<br>Remark                                 |
| 林地 Forestry                                                              | 面积>100 km <sup>2</sup>                              | 1                 | 林地是区域自然生态系统中的核心组成之一                          |
|                                                                          | 10 km <sup>2</sup> <面积<100 km <sup>2</sup>          | 5                 | 大型林地是野生动物的重要栖息地和繁殖地                          |
|                                                                          | 1 km <sup>2</sup> <面积<10 km <sup>2</sup>            | 10                |                                              |
|                                                                          | 面积<1 km <sup>2</sup>                                | 15                |                                              |
| 水体 Open water                                                            | 小水系、小湖泊(面积<1 km <sup>2</sup> )                      | 300               | 对陆生物种而言,小溪、小水塘是其迁徙与扩散的饮用水源,                  |
|                                                                          | 大水系、中型湖泊(1 km <sup>2</sup> <面积<10 km <sup>2</sup> ) | 600               | 但大水系、运河和大湖泊又是它们迁徙与扩散的重要障碍                    |
|                                                                          | 大湖泊(10 km <sup>2</sup> <面积<100 km <sup>2</sup> )    | 1000              | 对水陆两栖动物,水系、湖泊沿岸的湿地生态系统是其最适                   |
|                                                                          | 超大湖泊(100 km <sup>2</sup> <面积<200 km <sup>2</sup> )  | 2000              | 宜的生境;本文仅考虑陆生物种,水系生态网络不做分析                    |
|                                                                          | 太湖                                                  | 5000              |                                              |
| 农田<br>Agriculture                                                        |                                                     | 50                | 农田是人工半自然生态系统,其与林地和小水系、小水塘等组成的镶嵌结构也是相对稳定的生态系统 |
| 交通用地<br>Transportation                                                   | 高速公路、铁路                                             | 1000              | 线性结构(高等级道路)所导致的生境破碎化与隔离                      |
|                                                                          | 一级公路                                                | 800               | 对生物多样性有着巨大的影响                                |
|                                                                          | 二级公路                                                | 600               |                                              |
| 建设用地<br>Built-up area                                                    | 大城市(面积>100 km <sup>2</sup> )                        | 4000              | 城市是人类活动最集中的地区,其对生境的隔离作用很                     |
|                                                                          | 中等城市(10 km <sup>2</sup> <面积<100 km <sup>2</sup> )   | 2000              | 大;城市区域越大景观阻力也越大                              |
|                                                                          | 乡镇(1 km <sup>2</sup> <面积<10 km <sup>2</sup> )       | 1000              |                                              |
|                                                                          | 村庄(面积<1 km <sup>2</sup> )                           | 600               |                                              |
| 裸地 Bare area                                                             |                                                     | 400               | 裸地大部分为荒废用地或者露天开采用地,景观阻力较大                    |

(3)潜在生态廊道模拟与重要斑块-廊道提取 最小费用路径方法可以确定源和目标之间的最小消耗路径<sup>[22]</sup>。基于 GIS 软件平台,采用 shortest path 命令,生成潜在生态廊道(图2);然后,基于重力模型,采用廊道重要性指数和斑块中心度指数对廊道与斑块的相对重要性进行定量分析与评价(表3)。

廊道重要性指数( $G_{ij}$ ):基于重力模型,构建 15 个斑块间的相互作用矩阵<sup>[23]</sup>,评价斑块间相互作用强度,定量表征绿地廊道的相对重要性。

斑块中心度指数( $A_i$ ):以景观中心度<sup>[24-25]</sup>为原型,表示网络中一个节点对其他节点的综合影响力。一个节点到其他节点的通达性不仅取决于两点之间廊道的距离、阻力,而且取决于两个节点本身的重要性。

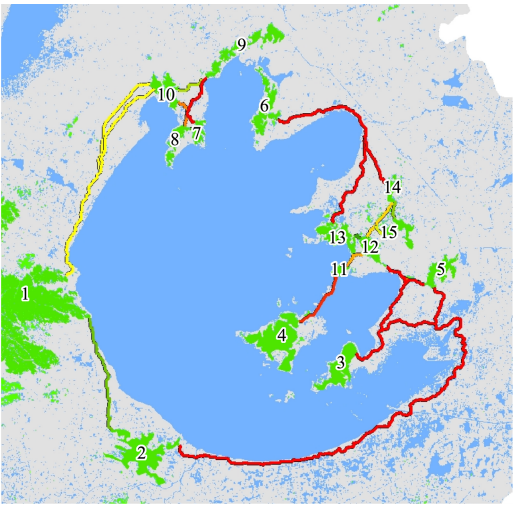


图 2 基于生态目标的廊道模拟图  
Fig.2 The maps of ecological corridors

$$G_{ij} = \frac{(N_i \times N_j)}{(D_{ij})^2} = \frac{\left[ \frac{1}{P_i} \times \ln(S_i) \right] \left[ \frac{1}{P_j} \times \ln(S_j) \right]}{\left( \frac{L_{ab}}{L_{max}} \right)^2} = \frac{(L_{max})^2 \ln(s_i) \times \ln(s_j)}{(L_{ij})^2 p_i \times p_j}$$

$$A_i = \sum_{j=1}^n G_{ij} / n$$

式中,  $G_{ij}$  是点  $i$  和  $j$  之间的相互作用力, 即  $i-j$  廊道的重要性指数;  $N_i$  和  $N_j$  是斑块  $i$  和  $j$  的权重值。  $N$  值可以通过不同绿地景观斑块的阻力值 ( $P_i$ ) 及斑块面积 ( $S_i$ ) 获得。  $D_i$  是从点  $i$  到点  $j$  潜在廊道的标准化的累积阻力。  $L_{ij}$  是点  $i$  到  $j$  潜在廊道的累积阻力值,  $L_{\max}$  是研究区最大累积阻力值。  $A_i$  表示斑块  $i$  作为一个节点在网络中的中心度指数;  $n$  为网络中斑块节点的总个数。

表 3 基于重力模型的绿地斑块中心度 ( $A_i$ ) 与廊道重要性 ( $G_{ij}$ )

Table 3 Degree centrality ( $A_i$ ) & corridor importance ( $G_{ij}$ ) based on the gravity model

| 斑块号<br>No. | 1 | 2      | 3    | 4    | 5     | 6     | 7     | 8       | 9     | 10     | 11   | 12    | 13      | 14     | 15     | 中心度<br>指数 $A_i$<br>Centrality<br>of patches |
|------------|---|--------|------|------|-------|-------|-------|---------|-------|--------|------|-------|---------|--------|--------|---------------------------------------------|
| 1          | 0 | 313.53 | 3.79 | 3.13 | 4.04  | 16.03 | 16.61 | 19.15   | 53.50 | 81.78  | 1.00 | 2.23  | 5.27    | 1.83   | 2.28   | 34.94                                       |
| 2          |   | 0      | 0.46 | 0.32 | 0.46  | 1.23  | 0.90  | 1.05    | 3.02  | 3.79   | 0.09 | 0.21  | 0.49    | 0.17   | 0.21   | 21.73                                       |
| 3          |   |        | 0    | 1.22 | 16.85 | 1.22  | 0.15  | 0.18    | 0.67  | 0.52   | 1.36 | 3.63  | 7.70    | 2.17   | 2.90   | 2.85                                        |
| 4          |   |        |      | 0    | 1.56  | 0.76  | 0.12  | 0.14    | 0.49  | 0.39   | 0.53 | 1.01  | 2.41    | 0.69   | 0.90   | 0.91                                        |
| 5          |   |        |      |      | 0     | 1.67  | 0.17  | 0.20    | 0.78  | 0.59   | 5.10 | 17.95 | 33.16   | 7.86   | 10.89  | 6.75                                        |
| 6          |   |        |      |      |       | 0     | 1.15  | 1.33    | 8.27  | 4.57   | 0.51 | 1.20  | 2.87    | 1.09   | 1.28   | 2.88                                        |
| 7          |   |        |      |      |       |       | 0     | 1308.56 | 12.50 | 41.98  | 0.04 | 0.10  | 0.23    | 0.08   | 0.10   | 92.18                                       |
| 8          |   |        |      |      |       |       |       | 0       | 14.03 | 44.69  | 0.05 | 0.12  | 0.27    | 0.10   | 0.12   | 92.67                                       |
| 9          |   |        |      |      |       |       |       |         | 0     | 158.53 | 0.22 | 0.50  | 1.20    | 0.43   | 0.52   | 16.98                                       |
| 10         |   |        |      |      |       |       |       |         |       | 0      | 0.15 | 0.35  | 0.83    | 0.29   | 0.36   | 22.59                                       |
| 11         |   |        |      |      |       |       |       |         |       |        | 0    | 62.19 | 220.18  | 9.07   | 13.87  | 20.96                                       |
| 12         |   |        |      |      |       |       |       |         |       |        |      | 0     | 1980.72 | 69.51  | 125.14 | 151.99                                      |
| 13         |   |        |      |      |       |       |       |         |       |        |      |       | 0       | 102.80 | 171.95 | 168.67                                      |
| 14         |   |        |      |      |       |       |       |         |       |        |      |       |         | 0      | 260.83 | 30.46                                       |
| 15         |   |        |      |      |       |       |       |         |       |        |      |       |         |        | 0      | 39.42                                       |

## 2.2.2 多目标融合的复合型生态网络构建

(1) 复合型生态网络的节点选择 环太湖地区拥有大量的生态资源、景观资源和游憩资源, 本文根据研究需要, 选取自然保护区、森林公园、湿地公园、风景名胜、历史文化名镇民村等 9 类 69 个景观游憩节点 (表 4)。

表 4 环湖主要资源节点统计一览表

Table 4 The table of key nodes of landscape sources

| 类型<br>Types         | 序号<br>No. | 名称<br>Name | 类型<br>Types             | 序号<br>No. | 名称<br>Name   | 类型<br>Types                               | 序号<br>No. | 名称<br>Name |
|---------------------|-----------|------------|-------------------------|-----------|--------------|-------------------------------------------|-----------|------------|
| 风景名胜<br>Scenic zone | 1         | 阳羡景区       | 自然保护区<br>Nature reserve | 1         | 宜兴龙池自然保护区    | 历史文化名村<br>Historical and cultural village | 1         | 明月湾古村      |
|                     | 2         | 马山景区       |                         | 2         | 苏州吴中区光福自然保护区 |                                           | 2         | 陆巷古村       |
|                     | 3         | 梅梁湖景区      |                         | 3         | 顾渚山保护区       | 特色村落<br>Characteristic village            | 1         | 太湖渔村       |
|                     | 4         | 锡惠景区       |                         | 4         | 灰岩金钉子保护区     |                                           | 2         | 莘村         |
|                     | 5         | 光福景区       | 湿地公园<br>Wetland Park    | 1         | 无锡蠡湖国家湿地公园   |                                           | 3         | 南库村        |
|                     | 6         | 木渎景区       |                         | 2         | 无锡长广溪国家湿地公园  |                                           | 4         | 隐读村        |
|                     | 7         | 石湖景区       |                         | 3         | 苏州太湖国家湿地公园   |                                           | 5         | 开弦弓村       |
|                     | 8         | 西山景区       |                         | 4         | 苏州太湖湖滨国家湿地公园 |                                           | 6         | 金山村        |

续表

| 类型<br>Types         | 序号<br>No. | 名称<br>Name  | 类型<br>Types                            | 序号<br>No. | 名称<br>Name      | 类型<br>Types     | 序号<br>No. | 名称<br>Name |
|---------------------|-----------|-------------|----------------------------------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------|------------|
| 森林公园<br>Forest park | 9         | 东山景区        | 游憩度假区<br>Holiday resort                | 5         | 吴江震泽省级湿地公园      | 城市风貌区           | 1         | 丹阳市        |
|                     | 10        | 虞山景区        |                                        | 1         | 武进太湖湾游憩度假区      | Urban landscape | 2         | 江阴市        |
|                     | 11        | 碧岩景区        |                                        | 2         | 无锡太湖国家游憩度假区zone |                 | 3         | 张家港市       |
|                     | 12        | 香山景区        |                                        | 3         | 无锡太湖山水城游憩度假区    |                 | 4         | 常熟市        |
|                     | 13        | 霸王潭景区       |                                        | 4         | 苏州太湖国家游憩度假区     |                 | 5         | 无锡市        |
|                     | 14        | 南郊风景区       |                                        | 5         | 湖州太湖省级游憩度假区     |                 | 6         | 溧阳县        |
|                     | 15        | 蠡湖景区        | 历史文化名镇<br>Historical and cultural town | 1         | 丁蜀古镇            |                 | 7         | 昆山市        |
|                     | 1         | 宜兴竹海森林公园    |                                        | 2         | 光福古镇            |                 | 8         | 宜兴市        |
|                     | 2         | 宜兴国家森林公园    |                                        | 3         | 木渎古镇            |                 | 9         | 苏州市        |
|                     | 3         | 苏州大阳山国家森林公园 |                                        | 4         | 同里古镇            |                 | 10        | 吴江县        |
|                     | 4         | 苏州上方山国家森林公园 |                                        | 5         | 角直古镇            |                 | 11        | 长兴县        |
|                     | 5         | 苏州西山国家森林公园  |                                        | 6         | 西山古镇            |                 | 12        | 广德县        |
|                     | 6         | 东吴国家森林公园    |                                        | 7         | 东山古镇            |                 | 13        | 常州市        |
|                     | 7         | 桃花界森林公园     |                                        | 8         | 震泽古镇            |                 | 14        | 嘉兴市        |
|                     | 8         | 梁希森林公园      |                                        | 9         | 南浔古镇            |                 | 15        | 湖州市        |

(2)生态网络图谱分析 将选取的生态源地作为复合型生态网络的中心节点,按照斑块中心度指数将各斑块重要性进行排序,根据图谱理论,将网络简化为斑块节点和廊道连接线,获得研究区的生态网络图谱(第一层次,图3)。在生态网络图谱中,节点中心度越高,在复合型生态网络中的支配和主导地位越高。

(3)复合型生态网络的设计和连接 根据生态节点中心度和规划发展的总体思路,设计生态节点与景观节点的联系廊道,即景观廊道(第二层次,图3),生态节点中心度越高,所需连接的生态、景观、游憩廊道越多,连接度也越高;同理,获取生态节点与城镇风貌节点的连接,即游憩廊道(第三层次,图3)。将生态、景观、游憩廊道叠置可获取研究区的复合型生态网络图谱

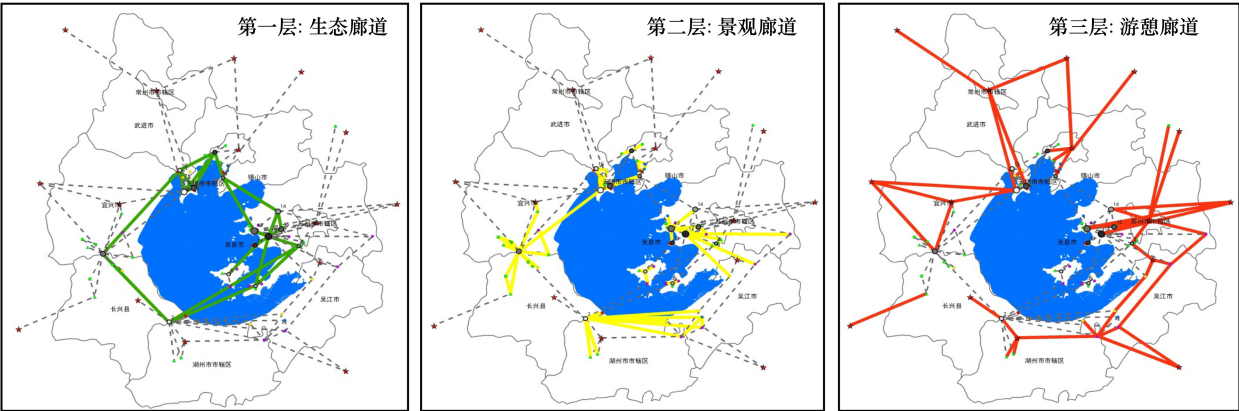


图3 分层廊道图谱  
Fig.3 The graphic maps of different layer corridors

(4)复合型生态网络的评价和检测 对构建的分层图谱,按生态、景观、游憩廊道分别赋值5、3、1,并将各节点所连廊道进行加权求和,得到各节点的连接度;然后,不断调整复合型网络图谱,直至连接度与节点数的拟合曲线符合幂律分布(图4),即为无标度网络(scale-free network)特征的复合型生态网络图谱(图5)。

### 3 结果分析

#### 3.1 基于生态目标的生态网络构建

基于最小费用路径方法共生成 105 条潜在的生态廊道,并根据重力模型,采用廊道重要性指数,提取了 22 条重要的生态廊道,主要分布在太湖的东岸;通过斑块中心度指数对生境斑块的中心度进行的定量评价表明,斑块 13、12 拥有最高的中心度,其次为斑块 8 和 7,再次为斑块 15 和 1,这些斑块对生态网络具有重要的支配与主导作用。

#### 3.2 多目标融合的复合型生态网络构建

由图 3、图 5 可见,在构建的复合型生态网络中,包括生态廊道 22 条,景观廊道 62 条、游憩廊道 44 条,共计 128 条廊道,共同串联了 15 个生态节点(生态层次)、54 个景观节点(景观层次)和 15 个城市节点(游憩层

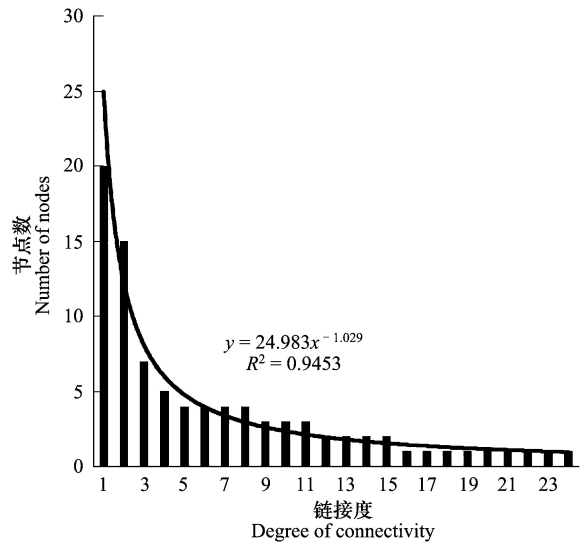


图 4 无标度网络幂律分布检测图

Fig.4 The Power-law distribution test of scale-free network

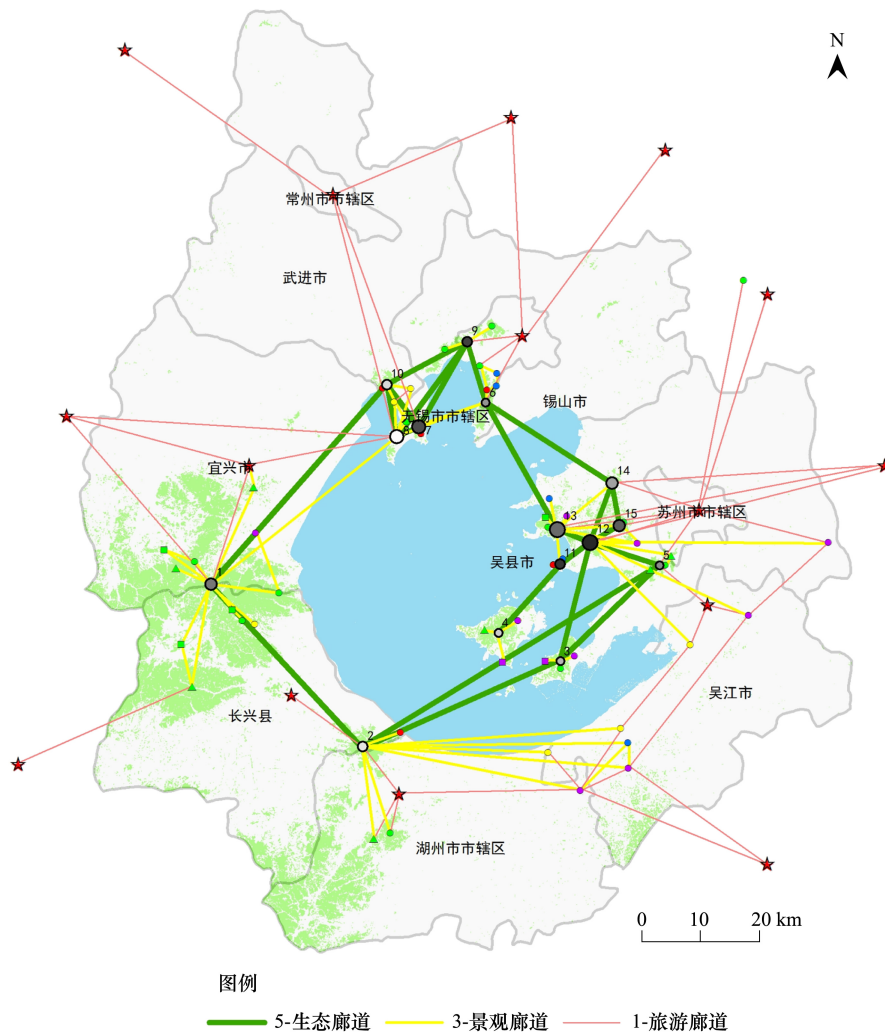


图 5 多目标融合的复合型生态网络图谱

Fig.5 Complex Eco-network simulation based on multi-targets

次)。由图 4 可见,多目标融合的复合型生态网络图谱的幂函数拟合曲线为  $y = 24.983x^{-1.029}$ , 相关系数  $R^2 = 0.9453$ , 可认为该网络系统节点数与连接度的宏观统计特征符合幂律分布, 为无标度网络, 集聚效益较好, 成长性强。另外, 从复合型生态网络的分区形态和分布来看, 复合型网络主要节点和廊道主要集中在环太湖的无锡段和苏州段。该区域与城市连接紧密, 节点密集, 呈现一定的小世界网络(网络状, 节点数与连接度为泊松分布)特征, 说明该区段的复合型生态网络具有较高的稳定性, 自我修复能力较高, 但受建设用地等因素限制影响, 成长性较弱; 而宜兴段和湖州段主要节点和廊道多集中于宜南山山区和云峰山山区, 并且呈现较强的无标度网络(发散状, 节点数与连接度为幂律分布)特征, 说明此区段的复合型网络由生态中心主导发展, 成长集聚效益较好, 空间效能好, 发展潜力较大。

### 3.3 多层次复合型网络的结构框架

节点与廊道的有机整合对提供生态功能和景观连接性至关重要<sup>[26]</sup>。以复合型生态网络图谱为依据, 结合研究区生态、景观、游憩资源的空间分布, 规划提出“一心四核, 两横三纵”的复合型生态网络框架结构(图 6)。“一心”: 指太湖生态核心, 是环太湖地区生态和景观系统的基石, 保护它是整个复合系统稳定性的前提; “四核”: 马山绿核、光福绿核、宜南山绿核、南郊绿核, 中心度高, 连接数多, 将作为重要的生态核心和景观构建区域; “两横”: 太湖北岸生态廊道, 连接太湖沿岸最重要的苏南城市群以及两大绿核的重要轴带, 小世界网络特征明显, 生境较破碎, 要注意保护和修复生态网络; 太湖南岸生态廊道更具无标度网络特征, 成长性好, 是

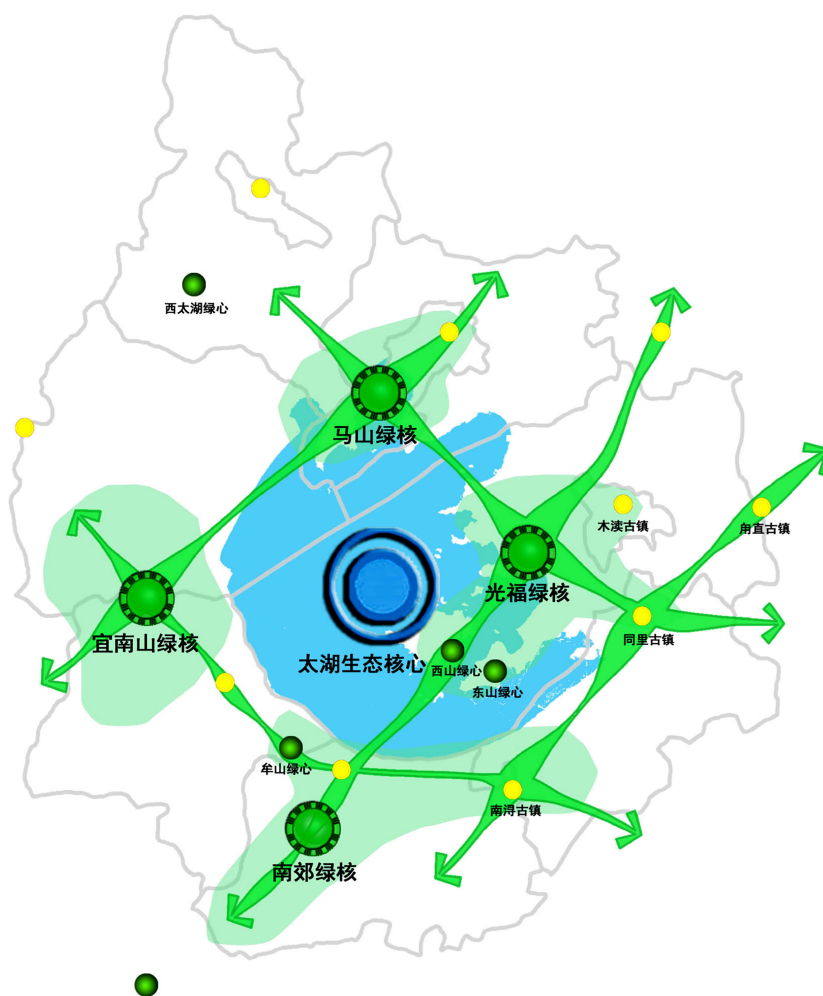


图 6 复合型生态网络框架图

Fig.6 The map of complex eco-network framework

未来生态休闲以及生态旅游成长性最好的地区;“三纵”:宜南生态廊道,光福—南郊景观廊道,古镇人文廊道,是生态功能、景观功能、人文游憩功能的空间载体,表征着太湖的复合型层次功能。

#### 4 网络优化的对策与建议

##### 4.1 生态断裂点的修复与暂栖地的建设

通过将生态网络与土地利用类型图的叠加分析,建议修复环太湖生态网络中存在的 16 个主要生态断裂点(图 7)。城市用地的开发建设特别是交通用地<sup>[21]</sup>对生态空间切割严重,需要在规划中加以控制引导,预留好生态廊道。机动车道阻碍了生物通道内物种的正常流动,使得物种迁移时难以跨越生态断裂点,造成野生动物因车辆撞击造成的死亡率将升高<sup>[27]</sup>。目前已有许多学者呼吁在建设高等级道路时应考虑提供野生动物通道,如野生动物的地下通道、隧道、天桥等措施。另外,在研究区规划了 10 个主要的暂栖地(图 7),这些斑块主要是廊道与廊道的交汇处,可作为动物迁徙过程中的踏脚石,在空间和时序上都应优先进行建设,以提高生态网络连接的质量和有效性。

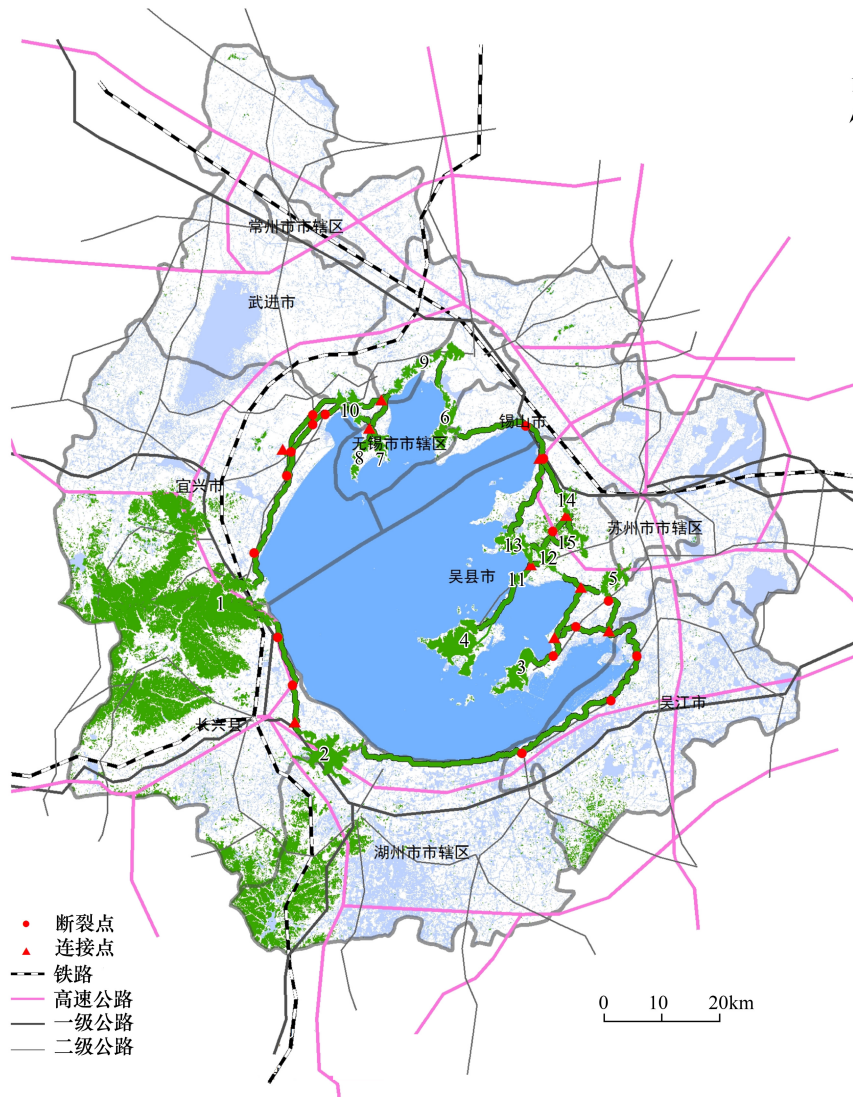


图 7 生态断裂点和暂栖地规划图

Fig.7 The planned eco-break-point and stepping-stones

##### 4.2 因地制宜进行分类规划与管理

在宜兴和吴江沿岸用地类型中,农田所占比例高,生态网络的稳定性较低,应以保护为主,但也应结合景

观和游憩目标,将农田景观溶解入城市,作为有机组成部分<sup>[28]</sup>;在太湖的东岸、北岸,核心斑块多被周边的城市建设用地包围,受到的胁迫作用较强,应加强核心斑块的保护和斑块间的生态廊道建设,并同时提高景观与游憩节点的连接性和可达性,构建稳定的复合型生态网络。

复合型生态网络构建的最大难度在于如何实现不同层次的网络耦合。从生态的角度出发,存在建设和保护的优先权和等级。通常认为:生态廊道>景观廊道>游憩廊道。另外,在功能协调方面(表5),专属功能要充分明确,保证相互之间不造成干扰<sup>[29]</sup>。

表5 复合型生态网络功能表  
Table 5 Complex eco-network functions

| 网络层次<br>Layers of network | 物种栖息<br>Species habitat | 物种迁移<br>Species migration | 环境提升<br>Environment improvement | 休闲游憩<br>Leisure recreation | 旅游服务<br>Tourism service | 开发建设<br>Develop construction |
|---------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------------|
| 生态网络 Ecological network   | √                       | √                         | √                               | √                          | ×                       | ×                            |
| 景观网络 Landscape network    | ×                       | ×                         | √                               | √                          | √                       | ×                            |
| 游憩网络 Recreational network | ×                       | ×                         | ×                               | √                          | √                       | √                            |

## 5 结论与讨论

复合型生态网络对于经济发达地区生态网络、景观网络和游憩网络的融合发展具有重要意义。本文以环太湖地区为例,基于RS和GIS软件平台,采用最小费用路径和节点数与连接度幂律检测方法,构建了研究区多层次多目标的复合型生态网络图谱。研究表明:保护重要的生境斑块是整个复合型生态网络稳定性的核心与关键;在环太湖地区构建具有良好成长性的复合型生态网络是可行的,但北岸和南岸的图谱差异显著,结合研究区实际情况进行分区设计也是重要而必要的。

本文在生态目标导向的生态网络构建的同时,增加了对社会经济属性方面的思考,同时将复合型生态网络图谱的无标度网络测度的结论和幂律分布指数计算的结果进行关联分析,综合评价研究区内所模拟的复合型生态网络的效能(稳定性和成长性)<sup>[30]</sup>,提供了一套复合型生态网络构建的定量分析方法和思路,是新时期复合型生态网络构建的有益探索。

诚然,无标度网络相对小世界网络来说,并非具有绝对优越性,而是具体现状下的相对优化手段。无标度网络虽然成长性较高,但是稳定性相对较弱,一旦中心节点(本文中为重要的生境斑块)被破坏或者功能下降,整个网络系统将面临巨大的安全风险(图8);同时,复合型生态网络图谱的构建过程中存在的多路径、多情景和多方案,主观影响较大,且在图谱的幂律分布中存在“异图同谱”的现象。因此,本文虽然提出了复合型生态网络的构建思路与框架,但景观和游憩网络是具有社会经济属性的虚拟网络,如果要更为具体的落实到空间上,需要更深入的分析与研究,如进行不同网络层次所对应的景观阻力和消费面的构建,多因子评价体系的构建,景观与游憩节点的交通可达性等。

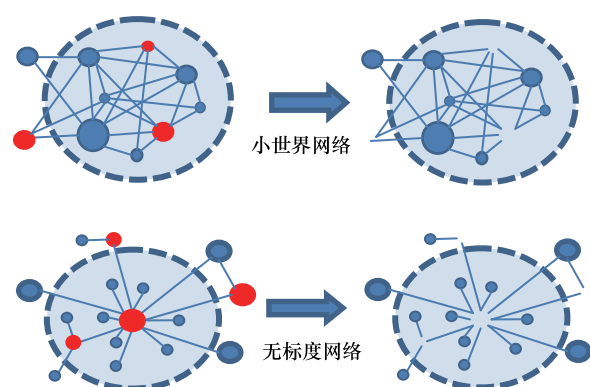


图8 两种网络模型的风险模拟图  
Fig.8 Risk simulation of network models

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Jongman R H G. Landscape planning for biological diversity in Europe. Landscape Research, 2002, 27(2): 187-195.
- [ 2 ] Forman R T T, Godron M. Patches and structural components for a landscape ecology. BioScience, 1981, 31(10): 733-740.

- [ 3 ] Vincent P. From theory into practice a cautionary tale of island biogeography. *Area*, 1981, 13(2): 115-118.
- [ 4 ] 王鹏. 城市绿地生态网络规划研究——以上海市为例 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [ 5 ] 张庆费. 城市绿地系统生物多样性保护的策略探讨. *城市环境与城市生态*, 1999, 12(3): 36-38.
- [ 6 ] 宗跃光, 周尚意, 彭萍, 等. 道路生态学研究进展. *生态学报*, 2003, 23(11): 2396—2405.
- [ 7 ] 吴承照, 刘滨谊. 游憩与景观生态理论研究——在绍兴市中心城绿地系统规划中的综合应用. *城市规划汇刊*, 2000, (1): 71-80.
- [ 8 ] 马志宇. 基于景观生态学原理的城市生态网络构建研究——以常州市为例 [D]. 苏州: 苏州科技学院, 2007.
- [ 9 ] 俞孔坚, 韩西丽, 朱强. 解决城市生态环境问题的生态基础设施途径. *自然资源学报*, 2007, 22(5): 808-816.
- [ 10 ] Sklar F H, Costanza R. The development of dynamic spatial models for landscape ecology: a review and prognosis // Turner M G, Gardne R H, eds. *Quantitative Methods in Landscape Ecology: the Analysis and Interpretation of Landscape Heterogeneity*. New York: Springer-Verlag, 1991, 82: 239-239.
- [ 11 ] Linehan J, Gross M, Finn J. Greenway planning: developing a landscape ecological network approach. *Landscape and Urban Planning*, 1995, 33(1): 179-193.
- [ 12 ] 王海珍, 张利权. 基于 GIS、景观格局和网络分析法的厦门本岛生态网络规划. *植物生态学报*, 2005, 29(1): 144-152.
- [ 13 ] 孔繁花, 尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建. *生态学报*, 2008, 28(4): 1711-1719.
- [ 14 ] Harris L D, Scheck J. From implications to applications; the dispersal corridor principle applied to the conservation of biological diversity // Saunders D A, Hobbs R J, eds. *Nature Conservation 2: the Role of Corridors*. Surrey Beatty and Sons, Chipping Norton, New South Wales. 1991, 2: 189-220.
- [ 15 ] Cook E A. Landscape structure indices for assessing urban ecological networks. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 58(2/4): 269-280.
- [ 16 ] Kong F H, Yin H W, Nakagoshi N, Zong Y G. Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 95(1/2): 16-27.
- [ 17 ] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, 4(1): 1-9.
- [ 18 ] 李力, 宗跃光, 胡道生. 复合生态网络体系在生态城乡规划中的应用——以常州新北区生态规划为例. *城市发展研究*, 2011, 18(7): 67-73.
- [ 19 ] 杜士强, 于德永. 城市生态基础设施及其构建原则. *生态学杂志*, 2010, 29(8): 1646-1654.
- [ 20 ] 许文雯, 孙翔, 朱晓东, 宗跃光, 李杨帆. 基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别. *生态学报*, 2012, 32(4): 1264-1272.
- [ 21 ] 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.
- [ 22 ] Goodwin B J, Fahrig L. Effect of landscape structure on the movement behaviour of a specialized goldenrod beetle, *Trirhabda borealis*. *Canadian Journal of Zoology*, 2002, 80(1): 24-35.
- [ 23 ] Kong F H, Yin H W, Nakagoshi N. Using GIS and landscape metrics in the hedonic price modeling of the amenity value of urban green space: A case study in Jinan City, China. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 79(3): 240-252.
- [ 24 ] 熊建新. 滨湖地区城市生态网络构建的完整性与优化对策——以西洞庭湖区常德市为例. *经济地理*, 2008, 28(5): 752-755.
- [ 25 ] 郭微, 俞龙生, 孙延军, 陈平. 佛山市顺德中心城区城市绿地生态网络规划. *生态学杂志*, 2012, 31(4): 1022-1027.
- [ 26 ] Benedict M A, McMahon E T. Green infrastructure: smart conservation for the 21st century. *Renewable Resources Journal*, 2002, 20(3): 12-17.
- [ 27 ] Hootner T S. *Regional Landscape Analysis and Reserve Design to Conserve Florida's Biodiversity* [D]. Gainesville: University of Florida, 2003.
- [ 28 ] 俞孔坚, 李迪华, 潮洛蒙. 城市生态基础设施建设的十大景观战略. *规划师*, 2001, 17(6): 9-13, 17-17.
- [ 29 ] 李娜. 苏州环太湖游憩带的开发研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2008.
- [ 30 ] 李中才, 徐俊艳, 吴昌友, 张漪. 生态网络分析方法研究综述. *生态学报*, 2011, 31(18): 5396-5405.