

# 四种河流水系阻力下的黄河三角洲湿地生态网络构建及对比研究

吴晶晶<sup>1,2</sup>, 栗云召<sup>3</sup>, 高猛<sup>1</sup>, 吴晓青<sup>1</sup>, 毕晓丽<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 101400;

3. 鲁东大学资源与环境工程学院, 山东烟台 264000)

**摘要:**构建生态网络是增加景观连通性的有效途径,对提高生态系统整体性和保护关键生境具有重要意义。阻力方面设定是生态网络构建的前提。以黄河三角洲天然湿地为研究对象,采用最小成本路径方法,设置4种河流水系阻力方案,即基础河流水系阻力、河流水系阻力减半、河流水系不设阻力和缩小阻力赋值区间,构建生态网络。并耦合网络分析方法和景观连通性指数,评价生态网络的连通性,探讨4种河流水系阻力设定对黄河三角洲湿地生态网络构建的影响。研究表明,不同的河流水系阻力赋值方案产生的湿地生态网络存在显著差异,阻力赋值大小与赋值区间对构建的生态网络结构产生重要影响;基础河流水系阻力产生的生态网络1和河流水系阻力减半构建的生态网络2的空间分布相对一致,节点、潜在廊道和长度总体变化不大;河流水系不设阻力时,生态网络3的空间分布发生较大改变,节点和潜在廊道长度增加,潜在廊道路径多与河流水系重叠,尤其是在黄河现行河道和黄河故道;缩小河流水系阻力的赋值区间,生态网络4的结构更为复杂,节点数、廊道数量和长度都显著增加。网络结构评估结果进一步表明,4种方案都能生成闭合的网络,当河流水系作为不适宜生境时,随着河流水系阻力的减小,网络闭合度( $\alpha$ 指数)、线点率( $\beta$ 指数)、连接度( $\gamma$ 指数)、成本比(cost ratio)依次增大;缩小了阻力赋值区间,生态网络4的网络连接度、连接数和闭合度都相对最高。随着距离阈值的增大,生态网络的景观连通性提高;当距离阈值小于12 km时,4个生态网络的连通性小幅增加,当距离阈值大于12 km时,生态网络3的景观连通性明显高于其它3个网络。

**关键词:**生态网络;最小成本路径;河流水系阻力;网络结构分析;景观连通性;黄河三角洲

**中图分类号:**X171 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-5948(2018)04-493-09

生态网络是根据景观生态学和岛屿生物地理学原理,通过构建潜在廊道和踏脚石,将破碎的生境斑块进行连接,形成完整的生物栖息地网络,它对增加生物物种迁移扩散、提高景观连接度、促进生态系统中物质、能量的有效流通具有重要意义<sup>[1-5]</sup>。生态网络的构建实现了由点到面的生境保护,使生境从结构连通发展到功能连通,近年来生态网络在国内外得到了广泛应用<sup>[6,7]</sup>。例如,将野生动物保护网络运用到生态网络系统中,对不同的绿地生态网络方案进行评价和优化<sup>[8]</sup>;采用最小路径法,建立由核心区、廊道、连接区和缓冲区构成的

生态网络,以优化自然保护区的稳定性<sup>[9]</sup>;构建和评价了青岛市湿地的生态网络,形成了“一心、二轴、一环”的网络控制框架<sup>[10]</sup>;在地理信息系统平台上,采用最小路径方法,定量表征与模拟了济南市的潜在廊道<sup>[11]</sup>。物种穿过生境斑块的难易程度被称之为景观阻力,不同景观单元对物种的生境适宜性不同,景观的阻力赋值会对生态网络构建结果产生重要影响<sup>[4,5,10-12]</sup>。

河流是黄河三角洲湿地主要的淡水补给水源,为湿地淡水生物群落的生存提供了保证,是三角洲河口新生湿地发育、扩张的根本原因<sup>[13,14]</sup>。近

收稿日期:2017-10-13; 修订日期:2018-06-10

基金项目:国家自然科学基金项目(31670471)和中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-ST-127)资助。

作者简介:吴晶晶(1990-),女,河南省鲁山人,硕士研究生,主要从事地理信息系统、景观生态学和湿地生态学方面的研究。E-mail: jiwu@yic.ac.cn

\*通讯作者:毕晓丽,副研究员。E-mail: xlibi@yic.ac.cn

年来,黄河输水、输沙量的减少直接使三角洲体发育受限、新生湿地减少<sup>[15]</sup>。水资源污染加剧了湿地面积的减少,使湿地生态功能下降<sup>[16]</sup>。河流水系促进了湿地的发展,保持湿地斑块间的水文连通对湿地生物物种栖息定居、迁移、扩散具有重要意义。连通性较好的湿地生境有益于湿地生物的觅食和繁殖,然而对于一些哺乳物种或迁徙能力有限的生物来说,河流水系也是阻止其在更大范围内迁徙、流通的障碍<sup>[16,17]</sup>。在整个生态系统中,河流水系对生物的作用机制是复杂的,它既是形成和维持湿地的主导因素,又是限制部分生物迁移的制约因素。

生态网络的构建需要考虑不同土地利用类型的适宜性,而国内大多数研究者通常依据单一景观阻力面构建生态网络,主观性比较强。目前,针对河流水系的生境适宜性设定不同阻力方案的研究未见报道。

本研究以黄河三角洲天然湿地为研究对象,考虑到黄河三角洲高度发达的河流水系网络在湿地生态系统中的复杂作用机制,设定不同的河流水系阻力方案,生成相应的生态网络,综合网络结构指数和景观连通性指数,对所构建的生态网络进行定量评估,以探讨河流水系阻力设定对湿地生态网络构建的作用。

## 1 数据和方法

### 1.1 研究区

黄河三角洲(37°35'N~38°12'N, 118°33'E~119°21'E)位于山东省东北部的渤海之滨。其中,天然湿地面积占湿地总面积的68.4%,人工湿地面积占31.6%<sup>[18]</sup>。研究区内河流纵横交错,形成明显的网状结构,各类型湿地呈斑块状分布。黄河三角洲湿地是东北亚内陆和环西太平洋鸟类迁徙的重要中转站、越冬栖息地和繁殖地,湿地中动植物资源丰富。20世纪80年代以来,黄河三角洲天然湿地面积不断退化,农业开垦、油田开发、人工建筑使该湿地景观破碎化程度加重、动植物种类减少和珍稀物种濒临灭绝<sup>[19,20]</sup>。

### 1.2 数据

本研究利用2013年10月5日Landsat ETM遥感影像数据、1984年黄河三角洲1:5万地形图、黄河三角洲自然保护区用地规划图、河流分布图等专题数据,建立了基础图层数据库,并于2015年8

月对研究区进行实地考察。

在ENVI5.1平台上,对遥感影像进行几何校正和图像增强处理。根据相关图件和实地调查结果,对研究区地物进行目视解译和分类。依据《湿地公约》,进行湿地分类。最终,将黄河三角洲的土地利用类型分为草本沼泽、灌丛湿地、森林湿地、盐沼、积水洼地、河口水域、滩涂、旱地、水田、沟渠、池塘、水库、河流、养殖池、盐田、公路、居民区、工矿区和堤坝共19种类型(图1)。通过与样地比较和实地调查,以保证分类精度达到研究的要求。经检验,本研究的总体解译精度大于80%。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 生态网络构建

选择生境斑块源地。将黄河三角洲土地利用分布图与黄河三角洲自然保护区规划图叠加,依据生境斑块面积、物种多样性分布和景观空间分布格局等<sup>[4-7,21,22]</sup>,选取黄河三角洲自然保护区、面积大于0.3 km<sup>2</sup>的大型湿地斑块作为核心生境源地。

确定景观阻力面。根据河流水系既能促进滨海湿地衍生、为生物物种提供栖息地场所,又能阻碍部分陆生生物迁移的双重作用,结合研究区的物种分布、土地利用类型、专家建议和综合相关文献的阻力赋值情况,提出了4种河流水系阻力方案。将天然湿地阻力值设为1,表示无阻力,将其它类型景观的阻力区间值设为1~1 000,阻力值越大,表示阻力越大。河流水系阻力方案1是根据黄河三角洲湿地成因、生物物种分布情况和河流水系对生物物种迁移的阻力,综合设置基础阻力值;方案2是在方案1的基础上适当缩小河流水系的阻力值,用以做比较分析;方案3仅考虑河流水系对湿地环境的促进作用,因此,河流水系在此无阻力,阻力值为1;方案4是缩小整个土地利用类型的阻力赋值区间。根据以上4种方案,探讨不同河流水系赋值下黄河三角洲生态网络构建结果。

生成最小成本路径。将选取重要斑块源地抽象为点,对每种景观类型赋阻力值,并转化为栅格图像,生成相应的成本阻力面。在ArcGIS10.0软件的Spatial Analyst工具条下,采用Cost path命令,生成由源斑块到目标斑块两两之间的最短路径,去除重复路径,得到黄河三角洲范围内潜在生态廊道组成的生态网络分布<sup>[7,21]</sup>。

#### 1.3.2 生态网络结构评估

网络结构的评估是网络规划的基础,也是网

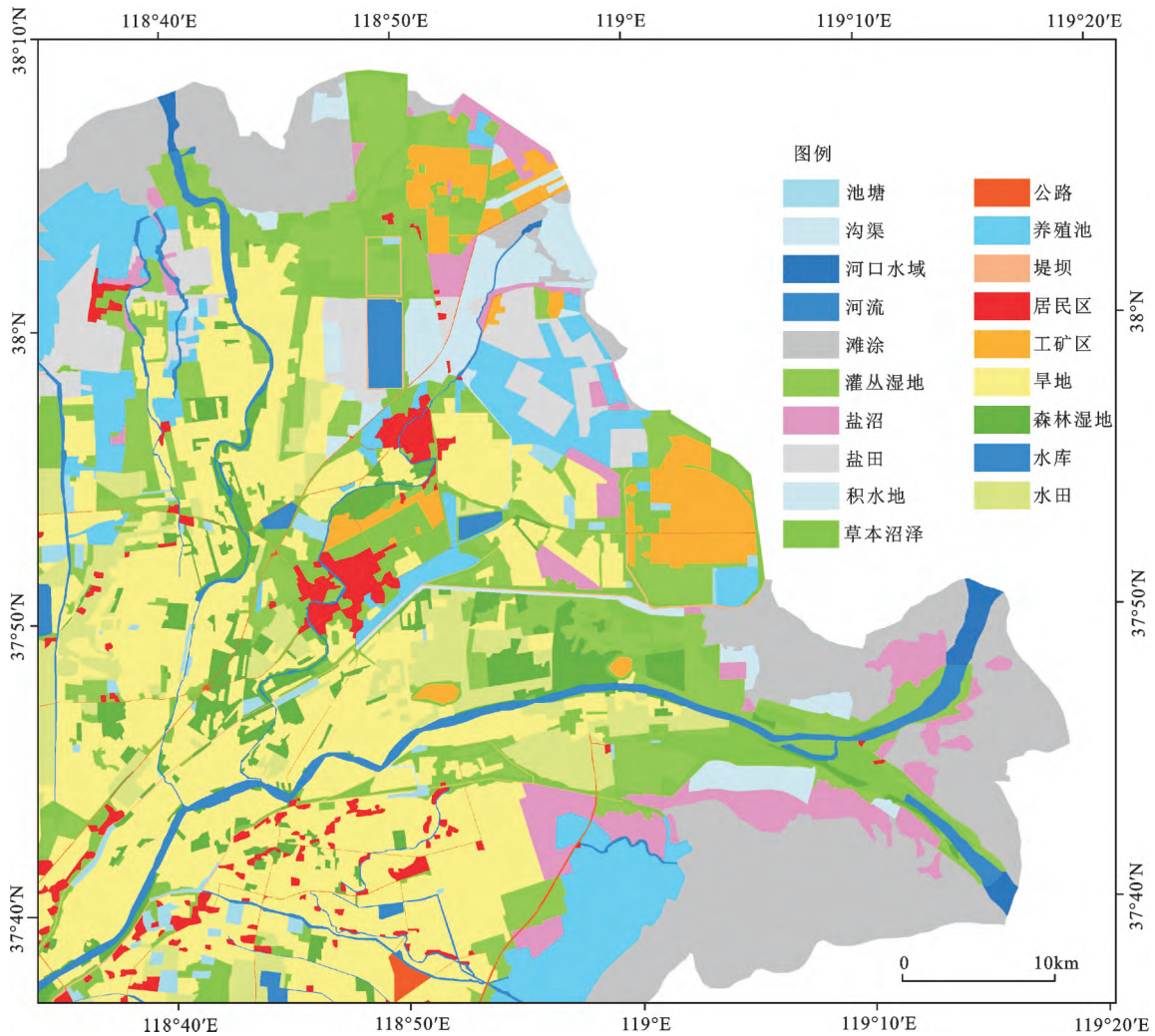


图1 2013年黄河三角洲土地利用分布图

Fig.1 Map of land use of the Yellow River Delta in 2013

络优化的依据。网络结构指数用于定量描述网络的拓扑结构、连通性、复杂性,常见的网络结构指数为网络闭合度( $\alpha$ 指数)、线点率( $\beta$ 指数)、网络连接度( $\gamma$ 指数)和成本比(cost ratio)<sup>[22]</sup>。这4种网络结构指数的计算公式分别为:

$$a = (L - V + 1) / (2V - 5) \quad (1)$$

$$b = L / V \quad (2)$$

$$g = L / 3(V - 2) \quad (3)$$

$$\text{成本比} = 1 - L / V \quad (4)$$

公式(1)~(4)中, $L$ 为廊道数; $V$ 为节点数。

$\alpha$ 指数为网络闭合度的量度,用来描述网络中回路出现的程度。 $\alpha$ 指数越高,生物物种在穿越生态网络时可选的扩散路径越多,从而能够避免干扰和降低被捕食的可能性。

$\beta$ 指数代表了网络中每个节点的平均连线数。当 $\beta < 1$ 时,生态网络为树状结构;当 $\beta = 1$ 时,

生态网络为单一回路;当 $\beta > 1$ 时,生态网络连接水平更复杂。

$\gamma$ 指数用来描述网络中所有节点被连接的程度。

成本比指数用来量化网络的平均消费成本,主要反映网络的有效性。

### 1.3.3 网络连通性指数

景观连通性是描述景观促进或阻碍生物体或某种生态过程在源斑块间运动的程度,反应了景观的功能特性<sup>[1,23,24]</sup>。生态网络连通性的程度可用整体连通性指数(integral index of connectivity, IIC)和可能连通性指数(probability of connectivity, PC)定量评价,整体连通性指数和可能连通性指数的计算公式详见文献[25]。

利用 Conefor Sensinode 2.2 软件,设置不同的斑块连通距离阈值,连通的概率设为0.5,对所构

建的4种生态网络方案的景观连通性进行评价。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同阻力方案下生态网络的生成

选取了黄河三角洲范围内的18块重要的天然湿地生境斑块作为源地(图2),总面积为108 km<sup>2</sup>,约占研究区总面积的35.02%。针对黄河三角洲湿地与河流水系相依存的特征,并尽量减少因阻力方案设置而产生的主观性,更好地实现研究区生态网络的构建与优化,选用上述4种不同的阻力赋值方案(表1),分别生成4种成本阻力面(图3)和相应的4种生态网络(图4)。

### 2.2 4种阻力方案下的生态网络结构评估

如表2和图4所示,4种阻力方案下模拟的生态网络的空间分布存在不同程度的差异。生态网络1~生态网络4中的生态廊道数分别是45条、46条、42条和65条,廊道长度分别为230.19 km、267.94 km、96.84 km和364.77 km。在保证其它土地阻力值不变的情况下,方案1和方案2将河流水系作为不适宜生境类型,只改变河流水系阻力的绝对值大小,生态网络空间分布比较一致,节点数、潜在廊道数和长度总体差别不大,网络路径重合度较高,差异主要表现在4号与8号、16号与17号斑块之间的连接;方案3将河流水系作为适宜生境类型,不设阻力时,生态网络3与生态网络1、生

态网络2空间分布有较大差别,但10号、11号、12号、13号、18号斑块之间的连接具有一致性,此外部分的潜在廊道路径与河流水系重叠,尤其是在黄河现行河道和黄河故道;参照方案1,方案4等比例缩小阻力赋值区间,使不同类型土地间适宜性对比减小,生态网络4的构成除了包含生态网络1和生态网络2中的廊道,网络结构更为细化,廊道数量增加。

4种方案生成的生态网络具有不同的景观组成,将潜在廊道宽度设定为500 m,计算4种生态

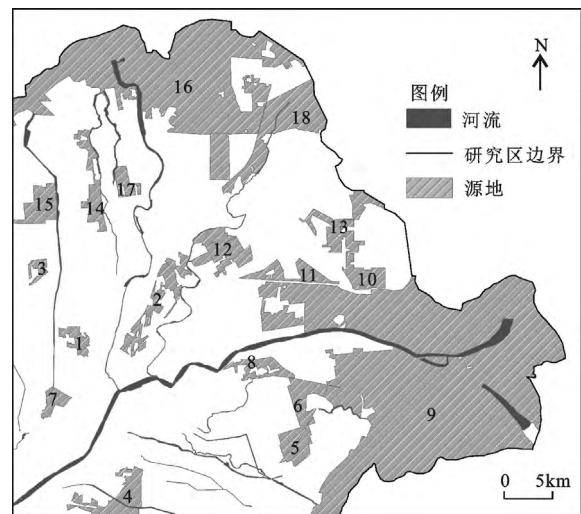


图2 在黄河三角洲选择的18块源地分布图  
Fig.2 Map of 18 identified patches of natural wetlands in the Yellow River Delta

表1 不同土地利用类型的阻力值

Table 1 Resistance values for different land use types

| 土地利用类型 | 亚类                            | 阻力值   |       |       |       |
|--------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|        |                               | 方案1   | 方案2   | 方案3   | 方案4   |
| 天然湿地   | 灌丛湿地、森林湿地、盐沼、草本沼泽、河口水域、积水地、滩涂 | 1     | 1     | 1     | 1     |
|        | 河流                            | 5     | 2     | 1     | 2     |
|        |                               | 200   | 100   | 1     | 20    |
|        | 面积小于1 km <sup>2</sup>         | 700   | 300   | 1     | 70    |
|        | 面积大于10 km <sup>2</sup>        |       |       |       |       |
| 人工湿地   | 旱地                            | 50    | 50    | 50    | 5     |
|        | 水田                            | 30    | 20    | 20    | 3     |
|        | 沟渠、池塘                         | 100   | 30    | 30    | 10    |
|        | 水库                            | 300   | 100   | 100   | 30    |
|        | 养殖池                           | 500   | 300   | 300   | 50    |
|        | 盐田                            | 600   | 600   | 600   | 60    |
| 建设用地   | 堤坝                            | 300   | 300   | 300   | 30    |
|        | 公路                            | 700   | 700   | 700   | 70    |
|        | 工矿区                           | 800   | 800   | 800   | 80    |
|        | 居民区                           | 1 000 | 1 000 | 1 000 | 1 000 |

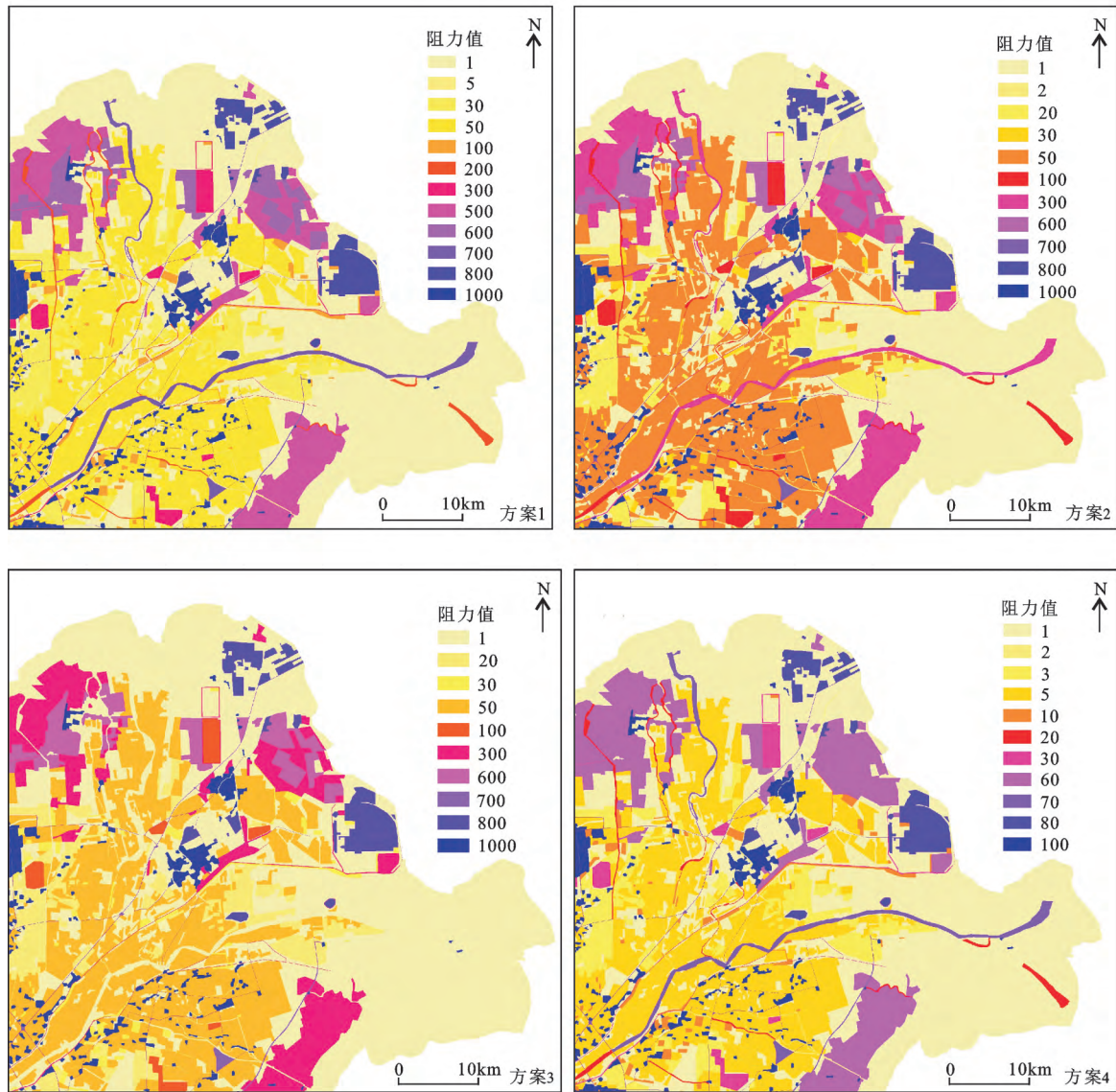


图3 4种方案的成本阻力面空间分布图

Fig.3 The maps of cost resistance surfaces of 4 kinds of plans

网络中所含景观类型组分的面积比例。其中,河流水系和其它类型天然湿地是生态网络中构建潜在廊道最重要的景观类型。在方案1~方案3中,河流水系的阻力依次降低,潜在廊道中河流水系的面积比例依次增大。方案4中,河流水系面积所占比例最小,河流水系廊道面积基本未变,廊道总面积的增加使廊道中河流水系所占的比例减小。此外,本研究除了选取的18个生境节点,生态网络构建中又产生多个新增生境节点。这些新增节点(也称踏脚石)可以作为物种迁移、扩散过程中的暂息地,对于迁移距离较远的物种来说,构建一定数量的踏脚石斑块显得非常重要。

运用网络结构指数对4种生态网络进行评价,结果表明,4种阻力方案都能生成完整的网络结构,但是网络连接特征不同。采用最小成本路径法建立的4种生态网络都形成了封闭的环,方案3、方案1、方案2、方案4的网络闭合度( $\alpha$ 指数)、线点率( $\beta$ 指数)、连接度( $\gamma$ 指数)都依次增大,而方案3、方案2、方案4、方案1成本比却依次减小。采用景观连通性指数,进一步定量评估4种生态网络的功能,结果显示,随着阈值的增大,4个网络结构的整体连通性指数和可能连通性指数都在增大。当距离阈值小于12 km时,4种生态网络整体连通性指数和可能连通性指数差异不大(表3)。方案3将

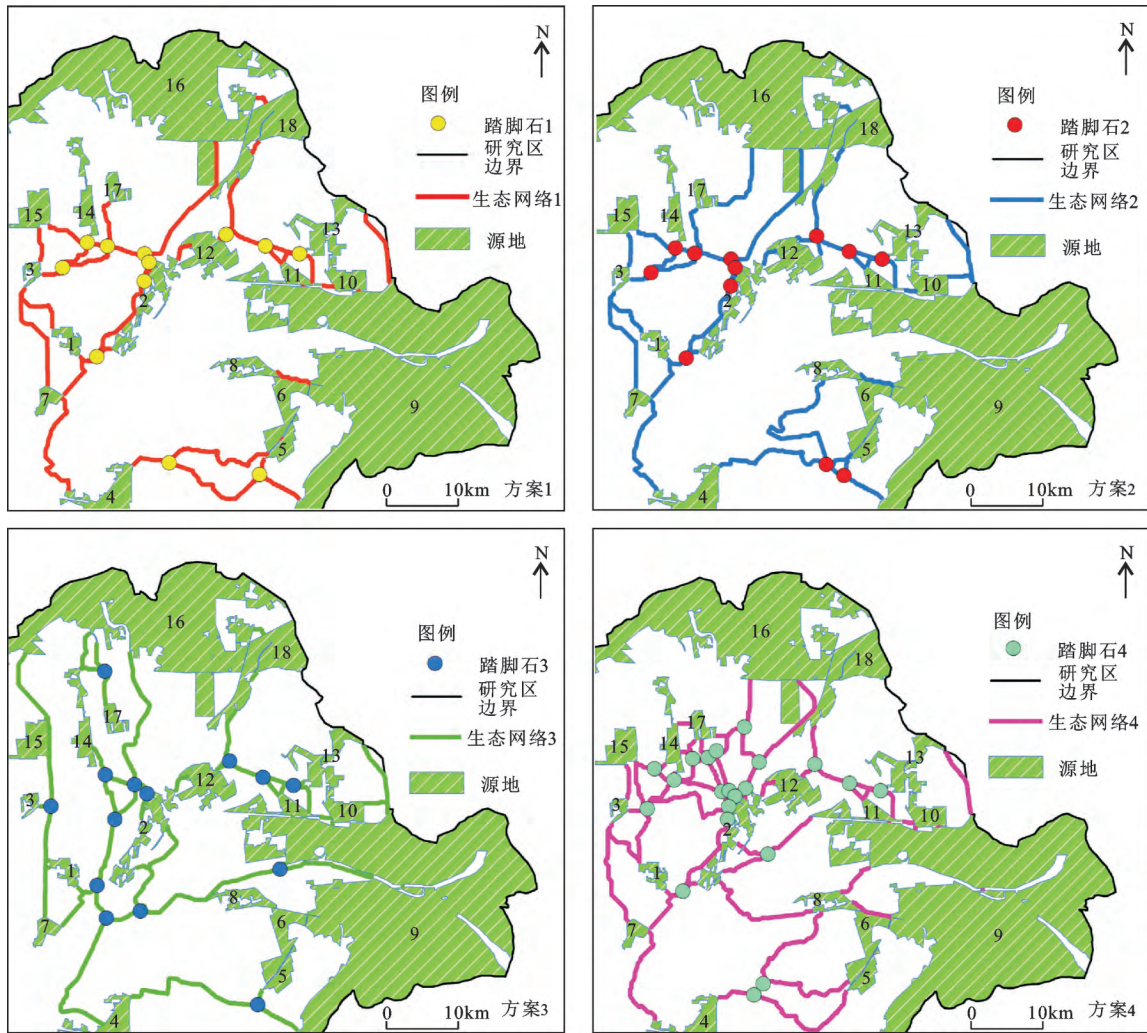


图4 采用最小成本路径法生成的生态网络图

Fig.4 Maps of ecological networks using least cost path method

表2 生态网络结构指标

Table 2 Indexes of ecological networks structure

| 指标             | 方案1      | 方案2      | 方案3      | 方案4      |
|----------------|----------|----------|----------|----------|
| $\alpha$ 指数    | 0.291    | 0.309    | 0.211    | 0.370    |
| $\beta$ 指数     | 1.500    | 1.533    | 1.355    | 1.667    |
| $\gamma$ 指数    | 0.536    | 0.548    | 0.483    | 0.570    |
| 成本比            | 0.803    | 0.828    | 0.859    | 0.822    |
| 节点数(个)         | 30(新增12) | 30(新增12) | 32(新增14) | 39(新增21) |
| 廊道数量(条)        | 45       | 46       | 42       | 65       |
| 廊道总长度(km)      | 230.19   | 267.94   | 296.84   | 364.77   |
| 廊道其它类型湿地面积比(%) | 64.00    | 52.99    | 40.08    | 62.44    |
| 廊道河流水系面积比(%)   | 19.80    | 29.26    | 45.85    | 16.76    |

河流水系作为适宜生境,不设阻力,在距离阈值大于12 km后,生态网络景观连通性明显高于其它3种方案。相对于方案1,方案4缩小了赋值区间后,随着距离阈值的持续增加,其生态网络的景观

连通性也表现出明显优势。

### 3 讨论

构建和优化生态网络对区域生态环境和生物

表3 4种生态网络的景观连通性指数  
Table 3 Landscape connectivity indexes of 4 kinds of ecological networks

| 指数      | 类别    | 距离阈值(km)  |           |           |           |           |           |
|---------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|         |       | 8         | 12        | 16        | 20        | 24        | 28        |
| 整体连通性指数 | 生态网络1 | 0.042 258 | 0.042 314 | 0.042 509 | 0.043 263 | 0.048 336 | 0.048 409 |
|         | 生态网络2 | 0.042 258 | 0.042 307 | 0.042 454 | 0.043 243 | 0.048 334 | 0.048 406 |
|         | 生态网络3 | 0.042 240 | 0.042 259 | 0.042 397 | 0.048 750 | 0.060 503 | 0.061 072 |
|         | 生态网络4 | 0.042 270 | 0.042 369 | 0.042 822 | 0.043 220 | 0.060 320 | 0.066 751 |
| 可能连通性指数 | 生态网络1 | 0.043 495 | 0.044 950 | 0.046 521 | 0.048 172 | 0.049 904 | 0.051 708 |
|         | 生态网络2 | 0.043 491 | 0.044 966 | 0.045 620 | 0.048 307 | 0.050 129 | 0.052 032 |
|         | 生态网络3 | 0.044 894 | 0.048 382 | 0.052 415 | 0.056 561 | 0.060 567 | 0.064 313 |
|         | 生态网络4 | 0.045 341 | 0.049 669 | 0.055 209 | 0.055 620 | 0.064 070 | 0.068 185 |

多样性保护具有重要意义。生态网络的构建,需要考虑不同土地类型的适宜性。因此,本研究以黄河三角洲天然湿地为例,设定不同的阻力方案,构建生态网络,并耦合网络分析法和景观连通性分析法分析生态网络结果的差异,探讨河流水系阻力设定对研究区生态网络构建的影响。不同景观阻力的确定必须考虑研究范围内的关键生态特点,从生物保护多样性出发,结合特定的生物过程。在以往的研究中,景观阻力设置单一,本研究以天然湿地为主要研究对象,将河流作为黄河三角洲湿地成因和影响生物物种迁移的关键因素,确定4种不同的阻力方案,进行对比分析,以期将阻力值确定的不确定性程度降到最低。

采用最小成本路径的生态网络构建方法,阻力面设定是其关键要素。然而,不同专家对土地适宜性评价的结果可能存在差异。本研究在阻力设定上,考虑了河流水系对黄河三角洲湿地成因和生物物种迁移的影响,分别将河流水系作为适宜生境和不适宜生境,同时改变阻力赋值大小和赋值区间。例如:为了保护佛罗里达生物多样性,构建了生态保护网络,模拟了16种赋值方案,通过对比分析,得出最优的构建方案<sup>[26]</sup>。研究表明,阻力赋值大小虽然使网络连接模拟产生了差异,但影响不大。这一结论与模拟保护猞猁(*Eurasian lynx*)野生动物生态网络的结论<sup>[27]</sup>基本一致。在本研究中,赋值区间对生态网络模拟结果影响较大,这一模拟结果与关于阻力赋值对景观连接影响的研究结果<sup>[28]</sup>完全一致。

在生态网络构建与评价方法上,采用耦合网络分析和景观连通性分析方法,运用多个指数分析构建的生态网络的特征,评价其网络结构的合

理性。网络分析指数能够直接评价各生态网络的闭合度、连接度、复杂性和成本问题。景观连通性指数可以评价生态网络的功能特性,整体连通性指数和可能连通性指数的数值越高,景观连通性就越好。将两者结合,可以从结构和功能上定量评价生态网络的特征,使生态网络的构建不仅具有理论意义,更具有实践性。

不同的生物物种对于同一生境斑块具有不同的生境适宜性。本研究的阻力赋值重点考虑了河流水系在湿地生态过程中的作用,未从具体生物物种出发,仅仅探讨了理论上河流水系阻力设定对网络构建的影响,仍然存在一定主观性。同时,在利用连通性指数评估生态网络连通程度时,仅将距离阈值设为500 m,存在一定的局限性。例如,在研究黑河中游生态用地的景观连接性时,便设置了多个距离阈值<sup>[29]</sup>。

## 4 结论

采用最小成本路径法构建的生态网络,由于河流水系阻力设定的不同,其模拟的潜在廊道的空间位置存在不同程度的差异。将河流水系作为不适宜生境类型,当只改变水系阻力的绝对值大小时,生态网络1和生态网络2的空间分布比较一致,节点数、潜在廊道数量和长度总体差别不大,网络路径重合度较高;将河流水系作为适宜生境类型而不设阻力时,与生态网络1和生态网络2相比,生态网络3的空间分布产生较大变化,潜在廊道路径多与河流水系重叠,尤其是在黄河现行河道和黄河故道;改变河流水系阻力赋值区间,不同类型土地间适宜性的对比减小,生态网络4除了包含生态网络1和生态网络2的廊道外,网络结构更

为细化,廊道数量增加。

网络结构指数评价结果表明,将河流水系作为不适宜生境类型,方案1和方案2的水系阻力值依次降低,网络连接度、连接数、闭合度、成本比依次增加;方案3中,将河流水系作为适宜生境类型,网络连接度、连接数、闭合度降低、成本比却都高于上述两个方案;缩小阻力赋值区间,方案4的网络连接度、连接数、闭合度都最高。

随着阈值的增大,整体连通性指数和可能连通性指数也增大,尤其是将河流水系不设阻力构建的生态网络3,当距离阈值大于12 km时,连通性指数明显增加,并高于其它3种生态网络。这说明在黄河三角洲地区,河流水系会对大尺度的生态过程产生重要影响。当距离阈值小于12 km时,4种生态网络的整体连通性指数和可能连通性指数的距离阈值增幅不大。这说明黄河三角洲景观破碎化较严重,源地与目标地之间的成本距离较大。

## 参考文献

- [1] Taylor P D, Fahrig L, Henein K, *et al.* Connectivity is a vital element of landscape structure[J]. *Oikos*, 1993, **68**(3): 571-573.
- [2] Cook E A. Urban landscape networks: an ecological planning framework[J]. *Landscape Research*, 1991, **16**(3): 7-15.
- [3] Kong Fanhua, Yin Haiwei, Nakagoshi N, *et al.* Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling[J]. *Landscape Urban Planning*, 2010, **95**: 16-27.
- [4] 张蕾, 苏里, 汪景宽, 等. 基于景观生态学的鞍山市生态网络构建[J]. *生态学杂志*, 2014, **33**(5): 1337-1343.
- [5] 池源, 石洪华, 丰爱平. 海岛景观生态网络构建——以崇明岛为例[J]. *海洋环境科学*, 2015, **34**(3): 433-440.
- [6] Jongman R H G. Nature conservation planning in Europe: developing ecological networks[J]. *Landscape and Urban Planning*, 1995, **32**: 169-183.
- [7] 谢慧玮, 周年兴, 关键. 江苏省自然遗产地生态网络构建[J]. *生态学报*, 2014, **34**(22): 6692-6700.
- [8] Linehan J, Gross M, Finn J. Greenway planning: developing a landscape ecological network approach[J]. *Landscape and Urban Planning*, 1995, **33**(1): 179-193.
- [9] Gurrutxaga M, Lozano P J, Barrio G. GIS-based approach for incorporating the connectivity of ecological networks into regional planning[J]. *Journal for Nature Conservation*, 2010, **18**(4): 318-326.
- [10] 傅强, 宋军, 毛锋, 等. 青岛市湿地生态网络评价与构建[J]. *生态学报*, 2012, **32**(12): 3670-3680.
- [11] 孔繁花, 尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建[J]. *生态学报*, 2008, **28**(4): 1711-1720.
- [12] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 等. 湖南省城市群生态网络构建与优化[J]. *生态学报*, 2011, **31**(10): 2863-2874.
- [13] 赵欣胜, 崔保山, 杨志峰. 黄河流域典型湿地生态环境需水量研究[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(5): 567-572.
- [14] 周方文, 马田田, 李晓文, 等. 黄河三角洲滨海湿地生态系统服务模拟及评估[J]. *湿地科学*, 2015, **13**(6): 667-674.
- [15] 连煜, 王新功, 黄翀, 等. 基于生态水文学的黄河口湿地生态需水评价[J]. *地理学报*, 2008, **63**(5): 451-461.
- [16] 李胜男, 王根绪, 邓伟, 等. 水沙变化对黄河三角洲湿地景观格局演变的影响[J]. *水科学进展*, 2009, **20**(3): 325-331.
- [17] 崔保山, 蔡燕子, 谢湑, 等. 湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势[J]. *北京师范大学学报*, 2016, **52**(6): 738-746.
- [18] 张绪良, 肖滋民, 徐宗军, 等. 黄河三角洲滨海湿地的生物多样性特征及保护对策[J]. *湿地科学*, 2011, **9**(2): 125-131.
- [19] 李政海, 王海梅, 刘书润, 等. 黄河三角洲生物多样性分析[J]. *生态环境*, 2006, **15**(3): 577-582.
- [20] 孙志高, 牟晓杰, 陈小兵, 等. 黄河三角洲湿地保护与恢复的现状、问题与建议[J]. *湿地科学*, 2011, **9**(2): 107-115.
- [21] 卿凤婷, 彭羽. 基于RS和GIS的北京市顺义区生态网络构建与优化[J]. *应用与环境生物学报*, 2016, **22**(6): 1074-1081.
- [22] 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[J]. *植物生态学报*, 2005, **29**(1): 144-152.
- [23] Saura S, Pascual-Hortal L. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: comparison with existing indices and application to a case study[J]. *Landscape Urban Planning*, 2007, **83**(2): 91-103.
- [24] 吴昌广, 周志翔, 王鹏程, 等. 景观连接度的概念、度量及其应用[J]. *生态学报*, 2010, **30**(7): 1903-1910.
- [25] Baranyi G, Saura S, Podani J, *et al.* Contribution of habitat patches to network connectivity: Redundancy and uniqueness of topological indices[J]. *Ecological Indicators*, 2011, **115**: 1301-1310.
- [26] Hoctor T S. Regional landscape analysis and reserve design to conserve Florida's biodiversity[D]. Gainesville: University of Florida, 2003.
- [27] Schadt S, Knauer F, Kaczensky P, *et al.* Rule-based assessment of suitable habitat and patch connectivity for the *Eurasian lynx* [J]. *Ecological Application*, 2002, **12**(5): 1469-1483.
- [28] 陈春娣, 吴胜军, Meurk C D, 等. 阻力赋值对景观连接模拟的影响[J]. *生态学报*, 2015, **35**(22): 7367-7376.
- [29] 蒙古军, 王晓东, 尤南山, 等. 黑河中游生态用地景观连接性动态变化及距离阈值[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(6): 1715-1726.



## Construction of Wetland Ecological Networks under Four Kinds of Resistance of Rivers in the Yellow River Delta and Their Comparison

WU Jingjing<sup>1,2</sup>, LI Yunzhao<sup>3</sup>, GAO Meng<sup>1</sup>, WU Xiaoqing<sup>1</sup>, BI Xiaoli<sup>1</sup>

(1. *Yantai Institute of Coastal Zone Research Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, P.R.China;*

*2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, P.R.China;* 3. *Faculty of Resources and*

*Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264000, Shandong, P.R.China)*

**Abstract:** Ecological network is an efficient tool to increase the landscape connectivity which plays important roles in maintain of ecosystem integrity and protection of key habitats. Resistance surface is one of the most important features of ecological network, determining the effectiveness of ecological network construction. The main objective of this paper was to analyze how water resistance surface can influence the connectivity of potential wetland ecological corridors in a typical coastal wetland of the Yellow River Delta. Four water resistance surface schemes were designed based on the values of water resistance cost, respectively: (1) a basic cost value, according to the current references; (2) half of the basic value, (3) the minimum cost value, and (4) decreasing of the cost interval. The cost distances and potential wetland ecological corridor for these four schemes were generated based on the least cost path method. The structure features and landscape connectivity characteristics of these networks of the four different schemes were evaluated using both network constructive indices and landscape connectivity indices. The results showed significant differences among the four potential wetland corridors. Both water cost and the cost interval had affected the ecological corridors significantly. When the value of water cost was decreased by half, the pattern of network 2 was similar with that of the network 1 which based on the referenced value. The number of nodes, the pattern of the potential corridors and their total length have changed slightly. However, when the cost value was the minimum, the number of nodes and the length of potential corridors had increased greatly. The potential corridors have overlapped with the real river networks, especially in the Yellow River tail channel and old channels. In addition, when the cost interval was decreased, the structure of network 4 became complex and the number of nodes, length of potential corridors have also increased. The assessment results of network connectivity also showed that the four designations were able to generate the closed networks and the landscape connectivity indices have increased due to the increasing of threshold values. In particular, when the threshold values were larger than 12 km, the landscape connectivity of network of the third scheme was the highest. The results also showed that the density of new nodes was more intensive in inland areas than that in other parts of the delta, indicating a more fragmented landscape pattern. Consequently, the connection between these wetland habitats should be strengthened. This research could give scientific suggestions for protection and management of the wetlands in the Yellow River Delta.

**Keywords:** ecological network; the least cost path; river resistance; network structure analysis; landscape connectivity; the Yellow River Delta