

DOI: 10.5846/stxb201904180783

吴未, 刘壮壮, 申立冰. 跨区域视角下苏锡常地区白鹭生境网络优化. 生态学报, 2020, 40(9): 2953-2963.

Wu W, Liu Z Z, Shen L B. Habitat network optimization from across-regional perspective: A case study of the little egret in the Su-Xi-Chang area. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9): 2953-2963.

## 跨区域视角下苏锡常地区白鹭生境网络优化

吴 未<sup>1,2,\*</sup>, 刘壮壮<sup>1</sup>, 申立冰<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 南京农业大学土地管理学院, 南京 210095

<sup>2</sup> 农村土地资源利用与整治国家地方联合工程研究中心, 南京 210095

**摘要:**打破行政界线, 跨区域协同治理生态问题, 是生态文明建设的必然要求。选取快速城镇化地区苏锡常为研究区域, 地区优势物种白鹭为研究对象, 在等量保护成本限定下, 基于跨区域和分区视角, 将保护成本用于生境斑块优化, 通过设定不同的优化情景, 确定新增生境斑块的优化顺序, 计算出各情景下生态保护成本与生态收益提升值, 对比不同优化方案下网络结构指数变化情况, 进而探讨跨区域生境网络优化是否能够更好地实现物种保护的“最大覆盖问题”。结果表明: (1) 新增生境斑块的总量和空间布局都呈现为不均匀分布, 以苏州最多, 无锡次之, 常州最少; 具有“网络连通性较高但保护成本较低”的斑块分布特征与之相同; (2) 根据单位效益成本值大小对生境斑块优化排序, 将保护成本优先用于“网络连通性指数较高而保护成本较低”的生境斑块。在等量保护成本限定下, 跨区域生境网络优化比分区优化的网络连通性指数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别提升了 13.17%、12.97%、13.76%, 实现保护成本的生态效益提升最大化, 更好地解决了物种保护的“最大覆盖问题”。

**关键词:** 土地利用格局优化; 跨区域生境优化; 白鹭生境网络; 最大覆盖问题

## Habitat network optimization from across-regional perspective: A case study of the little egret in the Su-Xi-Chang area

WU Wei<sup>1,2,\*</sup>, LIU Zhuangzhuang<sup>1</sup>, SHEN Libing<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Land Management, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China

<sup>2</sup> National & Local Joint Engineering Research Center for Rural Land Resources use and Consolidation, Nanjing 210095, China

**Abstract:** The breaking down of administrative boundaries, control of ecological issues, and protection of biodiversity through trans-regional intergovernmental cooperation, are inevitable steps in ecological civilization processes. Newly added habitat patches each have an obvious variance on ecological conservation costs and also contribute to habitat network connectivity; the costs spent by each administrative unit on ecological protection and biodiversity conservation are also different. As such, scarce land resource and limited funds may lead to lower ecological conservation efficiency per unit cost in some areas. It is therefore necessary to focus on the issue of cross-regional ecological protection and biodiversity conservation. However, the questions as to whether cross-regional cooperation is effective or not, and how it can be realized require further exploration. In this study, we applied ecological processes and comparative analyses to discuss habitat network optimization of a target species with different scenarios. Specifically, we selected the rapidly urbanizing area of Su-Xi-Chang as a cross-regional perspective case study, and the dominant little egret waterbird as the target species. Furthermore, we discussed the differences of habitat network connectivity under scenarios of equal conservation costs but different spatial-location modes. We designed the optimizing sequence of newly added habitat patches, calculated both its ecological protection cost and the increased ecological benefit value, compared the changes in habitat network connectivity, and

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571176)

收稿日期: 2019-04-18; 网络出版日期: 2020-03-16

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ww@njau.edu.cn

explored how the maximal covering problem of species conservation would be better achieved. Our results indicated that: (1) newly added habitat patches are unevenly distributed in different regions, with the largest in Suzhou, followed by Wuxi, and Changzhou; the patches that have higher network connectivity and lower conservation costs have the same spatial distribution trend. (2) According to the cost-benefit ratio, conservation cost was preferentially used on the patches of a higher network connectivity index but of a lower conservation cost, both in the partition as well as the cross-regional scenarios. Under the same condition of a total limited conservation cost of 182 million RBM, habitat network connectivity indices  $\alpha$ ,  $\beta$ , and  $\gamma$  of the scenario of cross-regional habitat optimization increased by 13.17%, 12.97%, and 13.76% more, respectively, than those of the scenario of partition network optimization. Thus, cross-regional habitat network optimization maximizes ecological benefit under limited conservation costs. As such, it can be concluded that it is a better way to realize the maximal covering problem of biodiversity conservation.

**Key Words:** land use pattern optimization; cross-regional habitat optimization; little egret habitat network; maximal covering problem

生境网络在遏制栖息地丧失、碎片化、破碎化,提高生境质量,促进物种间物质、信息、能量及基因交流,减缓生物多样性丧失,维持生态系统稳定等方面具有重要的作用<sup>[1-3]</sup>。快速城镇化地区土地利用方式转变及对土地利用的狭义观念等因素导致大量生境被破坏,物种迁移受阻明显<sup>[4-6]</sup>,因此加强此类地区生境网络优化研究尤为重要。

生境网络研究涉及到跨界网络构建、评价和优化,但主要集中在较大尺度上生境斑块、廊道及踏脚石等生境网络构成要素的识别与构建<sup>[7-9]</sup>。研究表明跨区域协作有利于陆地生物多样性保护,降低保护过程产生的总成本<sup>[10-12]</sup>,有效实现国家或地区边界的生态系统及生物多样性的整体性保护。但是自然保护区的跨界合作尚存在着一些问题,如 Cisneros 和 Naylor<sup>[13]</sup>在分析了 176 个跨界保护区的基础上得出,仅 8% 达到高水平合作,38% 为一般水平合作,18% 没有任何合作。主要原因是对跨界网络管理行为中的保护成本与生态效益权衡不足。将保护成本和生态效益引入生境网络研究,可提高网络优化方案的经济效益和可操作性,有利于区域生物多样性保护,得到广泛关注<sup>[14-15]</sup>。

Langhans 等<sup>[16]</sup>运用成本函数分析法对比了恢复成本与预期生态收益,以瑞士两个相邻的州为例,提出了以淡水生物多样性保护和生态服务提升为目的的河流治理方案。Kark 等<sup>[17]</sup>采用相对成本制定生物多样性影响指标(biodiversity-human impact metric, BHM)分析了地中海盆地生物多样性热点地区脊椎动物的保护成本和生物多样性威胁,发现整个流域的全面协调合作与未协调合作相比,保护成本降低了 45%。Mazor 等<sup>[18]</sup>和 Kark 等<sup>[19]</sup>采用系统保护法对比了地中海海域国家三种合作方案的海洋协调保护效率,发现在实施相同保护目标的情况时,国家合作比单独实施的成本降低了 2/3。与此同时,保护区日常管理费用及前期购置成本表现出明显的规模经济效益<sup>[18, 20-22]</sup>。可见,国外已展开了大量此类研究,对象涉及陆地栖息地保护、淡水保护、海洋资源保护等;采用的方法包括成本函数分析法、多元回归模型、对比分析、系统保护法等。相较而言,国内研究尚处于学习和探索阶段,且只是国家间区域现状的跨界,在国家内部不同行政区间的研究还很少<sup>[23-24]</sup>。

本文以土地资源紧张、快速城镇化地区苏锡常为例,白鹭 2010 年生境网络优化斑块为基础,通过构建生境斑块保护成本与生境网络收益提升体系,对比不同情景下网络结构指数变化情况,探讨跨区域视角下的生境网络保护效率。将经济学与跨界资源管理理论运用到生境网络优化中,试回答跨区域生境网络优化是否可以提高保护效率?即在等量保护成本下如何更好解决物种保护的“最大覆盖问题”,以拓展生境网络优化研究。

## 1 研究区概况

苏锡常地区位于东经 119°08'—121°15'、北纬 30°46'—32°04',江苏省南部太湖之滨,总面积 1.75 万 km<sup>2</sup>,

其中水域面积占 32.5%。该地区以占江苏省约 17%的国土面积和人口,实现了约 40%的 GDP 和地方财政收入。区域内土地利用结构和空间布局变化明显,是城镇化、经济社会发展快速且人为干扰强烈的地区。

区域内地势平坦,河湖众多,北亚热带季风气候,年均降水 1092.4 mm,年均气温 15.3℃。境内物种丰富,鸟类、兽类、两栖爬行类 200 多种,其中鸟类达 170 余种。区域内水网密布,地表水资源丰富,为优势湿地鸟类提供了大量栖息地。主要分布有白鹭、夜鹭、池鹭和牛背鹭 4 种鹭鸟,其中白鹭被列入《濒危野生动植物种国际贸易公约》名单,是太湖地区环境污染指示生物物种<sup>[25]</sup>。研究表明,2000—2010 年期间,区域内适宜地类斑块面积得到增加,但由于大量新增人类干扰,导致生境质量不断下降,生境环境持续恶化<sup>[26]</sup>。

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据来源

数据主要包括中国科学院国际科学数据服务平台 2010 年 TM 遥感数据、1:5 万数字高程 DEM 数据(30 m×30 m)、2010 年苏锡常各区县(市)行政区划图、中国观鸟记录中心 2003—2014 年观测数据、苏锡常 3 市《土地利用总体规划(2006—2020)》及 2010 年苏锡常 3 市土地征收补偿标准。

TM 影像经解译得到土地利用/覆被数据,结合白鹭生境特点及数据精度,将区域内土地划分为水田、旱地、园地、乔木林地、灌木林地、草地、城乡建设用地、交通用地、滩涂沼泽、湖泊水库、河流、沟渠/运河和其他未利用地共 13 类。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 研究思路及主要步骤

跨界资源管理是资源管理的有效方法,为提高自然资源管理的有效性或更好地达到生物多样性保护而进行的跨边界合作管理过程<sup>[23]</sup>。在生物多样性保护研究中,由特定区域保护向景观尺度生态系统保护转变,建立跨界自然保护区以加强物种间交流,降低人为干扰造成物种灭亡的概率,达到维持生境、生物多样性保护的目的<sup>[27]</sup>。跨区域生境网络优化就是,为维护生态系统的原始性及完整性,采用跨越行政边界的理念,对生境网络进行优化,以达到生物多样性保护的目的。

以白鹭 2010 年生境网络识别的新增型和恢复型生境节点为基础<sup>[28]</sup>,分别以跨区域和分区视角对应的生境斑块保护费用为成本、生境网络连接度提升为收益,对比不同情景下的网络结构指数变化情况,得到最佳生境网络优化方案。研究思路及主要步骤包括:(1)根据前期研究成果,识别新增生境斑块;(2)新增生境斑块保护成本及收益提升测算;(3)设定不同情景,测算并对比各方案网络结构指数变化情况。

#### 2.2.2 新增生境斑块识别

将前期研究成果中待优化的 35 个白鹭新增生境节点<sup>[28]</sup>(新增型和恢复型生境节点,图 1)与 2010 年 TM 影像图对比,识别相对应的生境斑块面积及土地利用类型。

#### 2.2.3 成本测算

实现生态保护目标涉及到成本投入。成本是人们进行生产经营活动或达到一定目的,所耗费一定资源如人力、物力、财力以及其他资源的货币表现。Naidoo 等<sup>[29]</sup>将保护规划的经济成本分为取得、管理、损害赔偿、交易及机会成本等 5 个主要组成部分。Armsworth 等<sup>[20]</sup>根据保护区状况将保护成本分为新增斑块所涉及的成本(购置或者租赁成本及相关交易成本)和管理现有保护区的运营成本(就地保护、生态恢复、监测及执法成本)。考虑到国内保护区实际情况,王昌海等<sup>[30]</sup>将保护成本分为直接成本、间接成本和机会成本 3 大类。由于大多数生物保护缺乏主要成本数据,需要使用易获得的数据替代保护成本。例如利用周边县域农业用地平均价值<sup>[31-32]</sup>或附近生产农产品市场价值的一部分作为保护成本<sup>[33]</sup>,但实际中产生的成本比理论成本具有更大的可变性<sup>[34]</sup>。可见,成本类型、构成及计算非常繁琐,同时使用货币化方式进行计量的研究方法也存在着争议<sup>[30]</sup>。加之,生态效益目前没有统一的市场价值计算方法。因此,目前没有成熟的生境网络保护成本测算体系。

跨区域视角探讨生境网络优化,旨在更好解决物种保护的“最大覆盖问题”,强调新增生境斑块土地利用类型不被转化为其他地类特别是建设用地,不涉及管理成本,因此斑块的保护成本可以简化为土地利用的机会成本或土地交易成本。考虑到数据的可获取性,土地交易成本通常由土地征收补偿标准计算得到。本文直接采用苏锡常地区国土资源部门公布的3市2010年土地补偿标准作为测算依据,得到生境斑块保护成本。保护成本计算表达式为:

$$c = a \times p$$

式中, $c$ 为生境斑块的保护成本; $a$ 为生境斑块对应的地类面积; $p$ 为各地类单位土地面积对应的征收补偿价格。

### 2.2.4 收益测算

依据已有成果<sup>[35-37]</sup>从网络结构和生境质量视角出发,采用综合指数法测算4个指标(新增廊道数、节点度、中介度及生境质量)的综合收益:新增生境斑块迁移廊道数量借助 ArcGIS 10.2 软件实现;节点度和中介度指数由 UCINET 软件实现;生境质量采用 InVEST 3.4.4 中 Habitat Quality 模块实现生境质量等级评价;经极差标准化、等权叠加处理得到综合收益。

表 1 苏锡常地区白鹭生境网络优化收益评价指标及其生态学意义

Table 1 Indicators and their ecological significance for the little egret habitat network optimization in study area

评价指标 Indicators	生态学意义 Ecological significance
廊道数量 Corridors	反映生境斑块间的连通性及物种迁移效率
节点度 Node degree	表示网络结构中与其他一节点相连的连接线的数量
中介度 Betweenness	表示某一斑块处于其他斑块对之间的频度,反映了节点控制穿越网络景观流的能力
生境质量 Habitat quality	反映生存环境支持物种持续发展程度

### 2.2.5 情景设计

在生境网络优化中,针对稀缺的土地资源及有限的生态保护资金,最优目标是在限定的保护成本下,最大限度的完成保护计划,实现生态效益最大化<sup>[31]</sup>,即更好地解决物种保护的“最大覆盖问题”。

根据苏州市 2010 年生态补偿专项资金投入情况,设定区域 GDP 的 0.01% 为白鹭生境斑块保护总成本,根据江苏省统计年鉴(2010),得到苏州总成本 93 百万元,无锡总成本 58 百万元,常州总成本 31 百万元,苏锡常地区总成本 182 百万元。

在各斑块保护成本与生态收益存在差异以及投入总成本限定的条件下,根据生境斑块优化顺序选择不同标准,形成以下 4 种生境网络优化情景。

情景一:最小成本累积——将新增生境斑块按照保护成本高低逐个增设到生境网络中,得到相对应的网络收益提升状况,以较小的资金或土地面积实现生态保护。

情景二:最大收益累积——按照生态收益大小将新增生境斑块逐个增设到生境网络中,并得到相对应的保护成本累积情况,以实现较大的生态效益提升。

情景三:分区视角下的生境网络优化,保护成本为 2010 年各市 GDP 的 0.01%,计算新增生境斑块单位效益成本值(单位效益成本值=成本/收益,表示单位收益所需要的成本),并按照其大小确定各市生境网络优化方案。

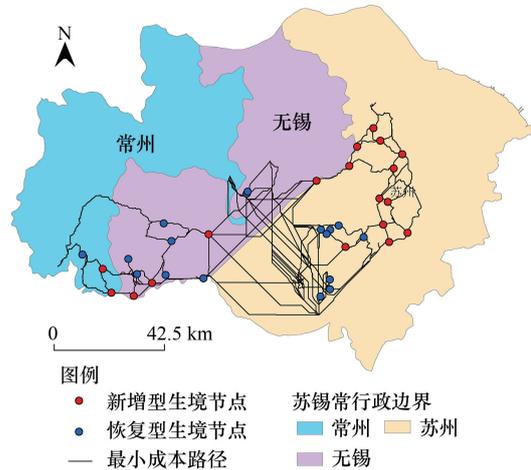


图 1 苏锡常地区 35 个新增生境斑块分布

Fig. 1 Distribution of 35 newly added ecological habitats in study area

情景四:跨区域视角下的生境网络优化,以 2010 年苏锡常三市 GDP 总和的 0.01%为保护成本,依据新增生境斑块单位效益成本值的大小,确定区域内生境网络优化方案。

计算  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  三个网络结构指数<sup>[38-39]</sup>并采取极差标准化处理,对上述四种方案进行比较。

表 2 为网络结构指数的生态学意义。具体计算公式如下:

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

$$\beta = L / V$$

$$\gamma = L / [3(V - 2)]$$

式中, $L$  为网络中的迁移廊道数量; $V$  为网络中的生境节点数量。

表 2 苏锡常白鹭生境网络结构指数及其生态学意义

Table 2 Structural indicators and their ecological significance for the little egret habitat network in study area

网络结构指数 Structural indicators	生态学意义 Ecological significance
$\alpha$	又称环度,是指连接网络中廊道形成闭合回路的程度
$\beta$	又称线点率,反映网络中廊道与节点间关系,衡量网络的通达程度
$\gamma$	又称网络连接度,反映网络中所有廊道间的连接程度

### 3 结果与分析

#### 3.1 新增生境斑块

新增生境地类以乔木林地等筑巢地为主,河流、湖泊、水田等觅食地较少。新增生境斑块以苏州为主,无锡次之,常州最少,呈现不均匀分布。网络连通性较高但保护成本较低的生境斑块苏州分布较多,常州最少。

#### 3.2 生态网络收益(可能连通性)的提升

表 3 为新增生境斑块所对应的新增廊道数、节点度、中介度、生境质量以及综合收益值。2、4、6、10、13、15、16 号综合收益值较高,其中 15 号在常州,16 号在无锡,其余均在苏州。苏州收益值较高的新增生境斑块平均面积 56.86  $\text{hm}^2$ ,而位于无锡和常州的新增生境斑块平均面积都小于 20  $\text{hm}^2$ ,因生境斑块的保护成本与保护面积及地类有关,因此相同收益值下,无锡和常州的单位效益成本值就较低。在新增廊道方面,苏州新增生境斑块廊道较高,无锡和常州较低。

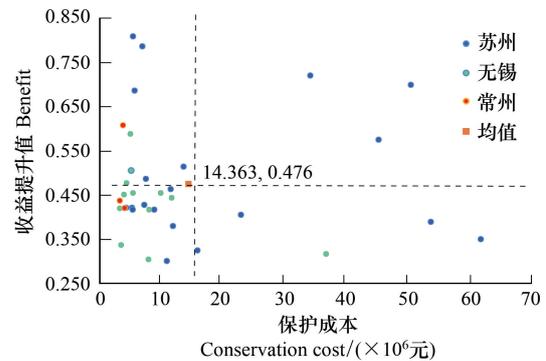


图 2 苏锡常新增生境斑块成本-收益图

Fig.2 Spatial layout of the newly habitat's conservation cost and ecological benefit

表 3 新增生境斑块的地类、所属地区、成本及收益

Table 3 The land use type, region, cost and benefit of the newly added habitats

编号 No.	地类 Type	保护成本 Cost/百万元	所属地区 Region	收益指标 Benefit index				收益值 Benefit
				新增廊道数 No. of new corridors	节点度 Node degree	中介度 Betweenness	生境质量 Habitat quality	
1	湖泊水库	45.15	苏州	3	0.78	0.19	10	0.576
2	湖泊水库	34.11	苏州	4	0.56	0.80	9	0.721
3	河流	38.64	无锡	4	0.33	0.13	4	0.317
4	水田	5.61	苏州	4	0.22	0.86	10	0.687
5	水田	15.80	苏州	3	0.11	0.00	9	0.325
6	水田	6.87	苏州	4	0.56	0.92	10	0.787

续表

编号 No.	地类 Type	保护成本 Cost/百万元	所属地区 Region	收益指标 Benefit index				收益值 Benefit
				新增廊道数 No. of new corridors	节点度 Node degree	中介度 Betweenness	生境质量 Habitat quality	
7	园地	11.48	苏州	5	0.00	0.00	9	0.464
8	水田	7.46	苏州	4	0.67	0.04	7	0.487
9	水田	7.17	苏州	3	0.89	0.49	3	0.428
10	河流	5.35	苏州	4	1.00	1.00	7	0.810
11	湖泊水库	12.83	苏州	3	0.33	0.00	9	0.380
12	水田	10.84	苏州	3	0.67	0.06	4	0.302
13	园地	49.41	苏州	3	0.89	0.72	9	0.700
14	湖泊水库	11.63	无锡	4	0.11	0.00	10	0.444
15	乔木林地	3.74	常州	3	0.56	0.54	10	0.608
16	乔木林地	4.94	无锡	4	0.67	0.02	10	0.589
17	乔木林地	5.09	无锡	3	0.67	0.02	10	0.506
18	乔木林地	3.99	常州	3	0.33	0.02	10	0.421
19	乔木林地	22.84	苏州	2	0.67	0.24	8	0.406
20	乔木林地	61.71	苏州	2	0.67	0.02	8	0.351
21	乔木林地	5.18	苏州	2	0.78	0.05	9	0.422
22	乔木林地	8.81	苏州	2	0.67	0.00	10	0.418
23	乔木林地	4.27	苏州	2	0.78	0.05	9	0.422
24	乔木林地	4.37	无锡	2	0.78	0.04	10	0.455
25	乔木林地	8.87	无锡	2	0.78	0.04	10	0.455
26	乔木林地	5.32	苏州	2	0.67	0.00	10	0.418
27	乔木林地	53.61	苏州	2	0.56	0.00	10	0.390
28	乔木林地	13.54	苏州	2	1.00	0.06	10	0.515
29	湖泊水库	3.24	无锡	2	0.67	0.01	10	0.420
30	乔木林地	3.90	无锡	2	0.78	0.17	9	0.452
31	乔木林地	7.88	无锡	2	0.22	0.00	10	0.305
32	乔木林地	3.45	无锡	2	0.33	0.02	10	0.338
33	乔木林地	4.33	无锡	2	0.89	0.02	10	0.478
34	乔木林地	8.00	无锡	2	0.67	0.00	10	0.418
35	乔木林地	3.26	常州	2	0.67	0.08	10	0.438

### 3.3 不同情境下成本与收益对比

情景一:图3为最小成本累积情景下的保护成本与收益提升情况。根据保护成本高低确定生境斑块优化顺序,在总成本182百万元限定下,生境斑块优化顺序为29、35、32、15、30、18、23、33、16、17、21、26、10、24、4、6、9、8、31、34、22、25、12、11、7、14、28号。

情景二:图4为最大收益累积下保护成本与收益提升情况。根据收益提升值大小确定生境斑块优化顺序,在总成本182百万元限定下,生境斑块优化顺序为10、6、2、13、4、15、16、1、28、17、8号。

情景三:图5为分区视角下的生境网络优化。分别在区域内GDP的0.01%限定下,依据单位效益成本值大小确定各区域内生境斑块优化顺序。苏州境内生境斑块优化顺序为10、4、6、23、21、26、8、9、22、7、28号;无锡生境斑块优化顺序为29、16、30、33、17、32、24、34、25、31号;由于常州新增生境斑块较少,且保护成本较低,因此境内新增生境斑块都得到优化(15、35、18号)。

情景四:图6为跨区域视角下的生境网络优化。在总成本182百万元限定下,依据单位效益成本值大小在苏锡常地区内确定生境斑块优化顺序。生境斑块优化顺序为15、10、35、29、4、16、30、6、33、18、17、23、32、

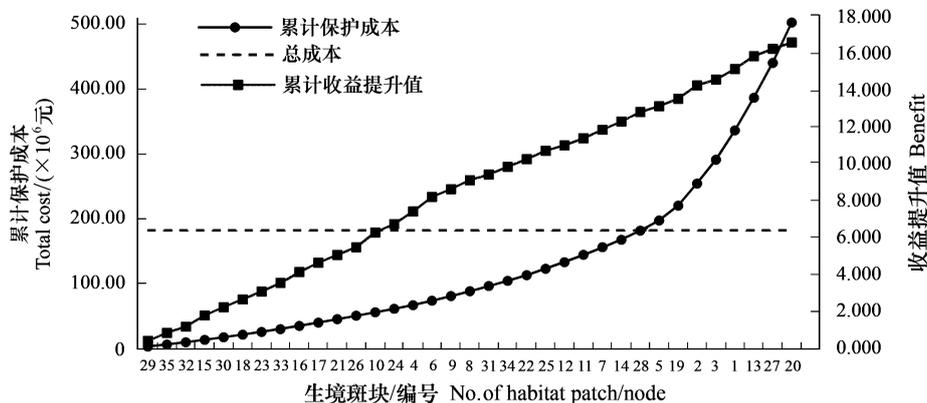


图 3 最小累计成本情景下的保护成本与收益提升曲线

Fig.3 Curves of conservation cost and improved benefit based on minimum cumulative cost

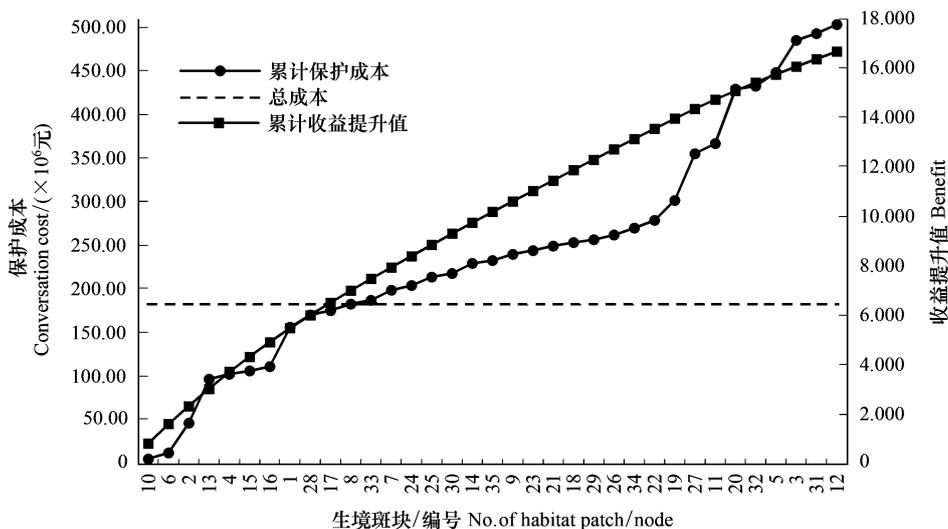


图 4 最大收益累计情景下的保护成本与收益提升曲线

Fig.4 Curves of conservation cost and improved benefit based on maximum benefit accumulation

24、21、26、8、9、34、22、25、7、31、14、28、11、12 号。

基于以上结果,分别计算各情景下总成本、节点数、廊道数、 $\alpha$  指数、 $\beta$  指数及  $\gamma$  指数变化情况(表 4)。由于网络结构指数变化较小,因此对其进行极差标准化处理(表 5)。

表 4 不同情境下网络结构指数变化

Table 4 Habitat network's structural indicators changes in the different scenarios

网络 Network	总成本 Total cost/百万元	节点数/个 Nodes	廊道数/条 Corridors	$\alpha$ 指数 $\alpha$ index	$\beta$ 指数 $\beta$ index	$\gamma$ 指数 $\gamma$ index
现状 Scenario 0	-	58	109	0.468	1.879	0.649
方案一 Scenario 1	181.80	85	109	0.606	2.615	0.739
方案二 Scenario 2	182.65	69	140	0.541	2.029	0.697
方案三 Scenario 3	148.52	83	176	0.584	2.120	0.724
方案四 Scenario 4	181.80	85	184	0.606	2.165	0.739
理想方案 Scenario 5	502.69	93	207	0.635	2.226	0.758

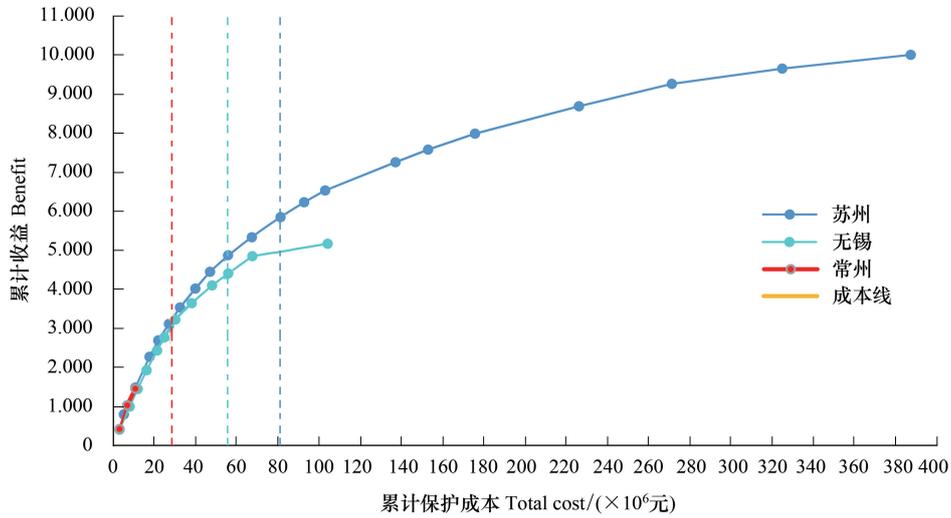


图 5 苏锡常三市生境斑块优化成本与收益情况

Fig.5 Curves of cost and benefit of newly added habitats optimization in study area

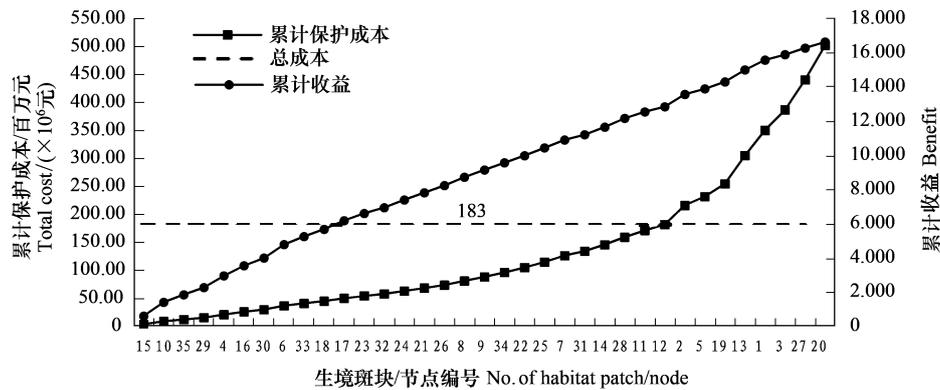


图 6 跨区域生境斑块优化成本与收益情况

Fig.6 Curves of cost and benefit of newly added habitats optimization in Su-Xi-Chang area

表 5 不同情景下网络结构指数标准化

Table 5 Standardized structural indicators of habitat networks in the different scenarios

网络 Network	$\alpha$ 指数标准化 Standardized $\alpha$ index	$\beta$ 指数标准化 Standardized $\beta$ index	$\gamma$ 指数标准化 Standardized $\gamma$ index
现状 Scenario 0	0	0	0
方案一 Scenario 1	82.63%	82.42%	82.57%
方案二 Scenario 2	43.71%	43.23%	44.04%
方案三 Scenario 3	69.46%	69.45%	68.81%
方案四 Scenario 4	82.63%	82.42%	82.57%
理想方案 Scenario 5	1	1	1

通过网络指数对比得出,以上 4 种优化方案在网络连通性方面都有所提升,其中方案四为最佳方案:(1)方案四是依据单位效益成本值升序对生境斑块优化排序;当区域内生境斑块差异明显且给定的保护成本较低时,方案四优于方案一。(2)方案二是依据生态效益提升值降序排序的,忽略了对保护成本影响的考量。(3)方案四与方案三相比,增加了 11 和 12 号 2 个斑块,是由常州剩余保护成本转移所致,网络结构指数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$

值分别提升了13.17%、12.97%、13.76%。跨区域生境优化形成的效果与分区优化效果相比,没有达到预期的显著性,主要是因为苏州生境斑块面积大且单位面积保护成本高,当保护成本出现转移时,虽然会引起斑块优化次序产生变化,但无法导致优化生境斑块的置换。换言之,文中的剩余保护成本转移体量偏小,无法对苏州生境斑块产生显著置换。因此,在保护总成本限定的情况下,方案四更好地实现了物种保护的“最大覆盖问题”。

#### 4 结论与讨论

本文研究结果表明:(1)从苏锡常三市生境节点的成本-收益散点图可以看出,生境质量较高且成本较低的斑块分布以苏州最多,无锡次之,常州最少,呈现不均匀状况。(2)在保护成本为区域GDP的0.01%限定下,跨区域生境网络优化与分区生境网络优化相比,网络结构指数 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 值分别提升了13.17%、12.97%、13.76%。即在等量保护成本的情况下,生境网络连通性在跨区域视角下得到了提升。与其他跨区域生态保护研究结果相比<sup>[17-18]</sup>,研究对象没有涉及到保护区内全部生境斑块,仅考虑了新增生境斑块;保护物种没有考虑到区域内大多数物种,仅考察了一种目标物种;保护成本只涉及新增生境斑块取得成本,没有考虑到生境斑块的管理、损害赔偿、交易及机会成本等,影响到生态效益提升的显著性。

本文在稀缺土地资源及有限生态保护资金情况下,通过跨区域生境网络优化,讨论了解决物种保护的“最大覆盖问题”,即在给定相同成本下,以较少土地面积达到最大保护目标。需要注意,当跨区域合作出现“搭便车效应”时,容易出现地区保护资金或保护区域面积减少的窘境<sup>[38]</sup>。另外,地区参与对保护成效很重要<sup>[39-40]</sup>。某些情况下,大规模自上而下或集中决策会在当地群体或个体中产生对抗和冷漠,例如人们更希望在本区域保留当地物种,而不乐意本地区的濒危物种在其他地区受到保护乃至繁衍<sup>[40]</sup>。

跨区域生境网络优化属于跨区域生态保护的一个方面,但目前跨区域生态保护研究主要集中在水资源及大气治理<sup>[41-42]</sup>,涉及到生物多样性保护的相关研究还很少,且现行生态保护措施由于缺乏顶层设计、统一规划及实行属地管理原则等原因,导致生态保护地建设和管理发展过程中长期存在着一些突出问题<sup>[43]</sup>。此外,还可以在更大尺度上建立跨区域协同生物多样性保护机制<sup>[23, 44-45]</sup>,如从国家层面推动京津冀、长三角、珠三角等不同行政区间合作,通过利益驱动机制、激励机制和协调机制,协调地区间生态保护成本与利益共享,实现生态保护的最终目的,既符合国家公园体制改革要求,又推动了生态文明建设在社会发展进程中的贯彻实施。

推动跨行政区生态治理合作,需要进一步优化既有动力机制,形成关联互动的利益关系网络。除涉及到多个行政单位、资金以及土地供给外,根据国外成功经验,还需要在法律法规制定、跨区域管理机构建立、治理标准制定以及管理机构运作模式等方面予以充足准备<sup>[46-47]</sup>,上述问题如能得到较好解决,将推动跨区域生态治理与保护走向常态化,形成区域生态治理与保护及可持续化发展的长效机制。

#### 参考文献 (References):

- [1] Jongman R H G. Nature conservation planning in Europe: developing ecological networks. *Landscape and Urban Planning*, 1995, 32(3): 169-183.
- [2] Jones-Walters L. Pan-European ecological networks. *Journal for Nature Conservation*, 2007, 15(4): 262-264.
- [3] Jongman R H G. Landscape planning for biological diversity in Europe. *Landscape Research*, 2002, 27(2): 187-195.
- [4] 欧阳志云, 刘建国, 肖寒, 谭迎春, 张和民. 卧龙自然保护区大熊猫生境评价. *生态学报*, 2001, 21(11): 1869-1874.
- [5] 吴健生, 曹祺文, 石淑芹, 黄秀兰, 卢志强. 基于土地利用变化的京津冀生境质量时空演变. *应用生态学报*, 2015, 26(11): 3457-3466.
- [6] Liu T, Liu H, Qi Y J. Construction land expansion and cultivated land protection in urbanizing China: insights from national land surveys, 1996-2006. *Habitat International*, 2015, 46: 13-22.
- [7] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, da Fonseca G A B, Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, 403(6772): 853-858.
- [8] Trisurat Y. Transboundary biodiversity conservation of the PhaTaem protected forest complex: a bioregional approach. *Applied Geography*, 2006, 26

- (3/4): 260-275.
- [ 9 ] Biondi E, Casavecchia S, Pesaresi S, Zivkovic L. Natura 2000 and the Pan-European Ecological Network: a new methodology for data integration. *Biodiversity and Conservation*, 2012, 21(7): 1741-1754.
- [ 10 ] Strange N, Rahbek C, Jepsen J K, Lund M P. Using farmland prices to evaluate cost-efficiency of national versus regional reserve selection in Denmark. *Biological Conservation*, 2006, 128(4): 455-466.
- [ 11 ] Bladt J, Strange N, Abildtrup J, Svenning J C, Skov F. Conservation efficiency of geopolitical coordination in the EU. *Journal for Nature Conservation*, 2009, 17(2): 72-86.
- [ 12 ] Moilanen A, Anderson B J, Arponen A, Pouzols F M, Thomas C D. Edge artefacts and lost performance in national versus continental conservation priority areas. *Diversity and Distributions*, 2013, 19(2): 171-183.
- [ 13 ] Cisneros J A, Naylor V J. Uniting La Frontera: the ongoing efforts to establish a transboundary park. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 1999, 41(3): 12-20.
- [ 14 ] Drechsler M. Trade-offs in the design of cost-effective habitat networks when conservation costs are variable in space and time. *Biological Conservation*, 2011, 144(1): 479-489.
- [ 15 ] 王宜成. 最优化设计连续的自然保护区. *生态学报*, 2011, 31(17): 5033-5041.
- [ 16 ] Langhans S D, Hermoso V, Linke S, Bunn S E, Possingham H P. Cost-effective river rehabilitation planning: optimizing for morphological benefits at large spatial scales. *Journal of Environmental Management*, 2014, 132: 296-303.
- [ 17 ] Kark S, Levin N, Grantham H S, Possingham H P. Between-country collaboration and consideration of costs increase conservation planning efficiency in the Mediterranean Basin. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(36): 15368-15373.
- [ 18 ] Mazor T, Possingham H P, Kark S. Collaboration among countries in marine conservation can achieve substantial efficiencies. *Diversity and Distributions*, 2013, 19(11): 1380-1393.
- [ 19 ] Kark S, Tulloch A, Gordon A, Mazor T, Bunnefeld N, Levin N. Cross-boundary collaboration: key to the conservation puzzle. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2015, 12: 12-24.
- [ 20 ] Armsworth P R, Cantú-Salazar L, Parnell M, Davies Z G, Stoneman R. Management costs for small protected areas and economies of scale in habitat conservation. *Biological Conservation*, 2011, 144(1): 423-429.
- [ 21 ] Kim T, Cho S H, Larson E R, Armsworth P R. Protected area acquisition costs show economies of scale with area. *Ecological Economics*, 2014, 107: 122-132.
- [ 22 ] Cho S H, Kim T, Larson E R, Armsworth P R. Economies of scale in forestland acquisition costs for nature conservation. *Forest Policy and Economics*, 2017, 75: 73-82.
- [ 23 ] 石龙宇, 李杜, 陈蕾, 赵洋. 跨界自然保护区——实现生物多样性保护的新手段. *生态学报*, 2012, 32(21): 6892-6900.
- [ 24 ] 王伟, 田瑜, 常明, 李俊生. 跨界保护区网络构建研究进展. *生态学报*, 2014, 34(6): 1391-1400.
- [ 25 ] 阮禄章, 张迎梅, 赵东芹, 董元华, Mauro F. 白鹭作为无锡太湖地区环境污染指示生物的研究. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 263-268.
- [ 26 ] 吴未, 张敏, 许丽萍, 欧名豪. 土地利用变化对生境网络的影响——以苏锡常地区白鹭为例. *生态学报*, 2015, 35(14): 4897-4906.
- [ 27 ] Busch J. Gains from configuration: the transboundary protected area as a conservation tool. *Ecological Economics*, 2008, 67(3): 394-404.
- [ 28 ] 吴未, 张敏, 许丽萍, 欧名豪. 基于不同网络构建方法的生境网络优化研究——以苏锡常地区白鹭为例. *生态学报*, 2016, 36(3): 844-853.
- [ 29 ] Naidoo R, Balmford A, Ferraro P J, Polasky S, Ricketts T H, Rouget M. Integrating economic costs into conservation planning. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21(12): 681-687.
- [ 30 ] 王昌海, 温亚利, 李强, 司开创, 胡崇德. 秦岭自然保护区群保护成本计量研究. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(3): 130-136.
- [ 31 ] Ando A, Camm J, Polasky S, Solow A. Species distributions, land values, and efficient conservation. *Science*, 1998, 279(5359): 2126-2128.
- [ 32 ] Strange N, Jacobsen J B, Thorsen B J, Tarp P. Value for money: protecting endangered species on Danish heathland. *Environmental Management*, 2007, 40(5): 761-774.
- [ 33 ] Carwardine J, Wilson K A, Ceballos G, Ehrlich P R, Naidoo R, Iwamura T, Hajkovic SA, Possingham H P. Cost-effective priorities for global mammal conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(32): 11446-11450.
- [ 34 ] Davies Z G, Kareiva P, Armsworth P R. Temporal patterns in the size of conservation land transactions. *Conservation Letters*, 2010, 3(1): 29-37.
- [ 35 ] Baranyi G, Saura S, Podani J, Jordán F. Contribution of habitat patches to network connectivity: redundancy and uniqueness of topological indices. *Ecological Indicators*, 2011, 11(5): 1301-1310.
- [ 36 ] 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.
- [ 37 ] 吴健生, 张理卿, 彭建, 冯喆, 刘洪萌, 赫胜彬. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别. *生态学报*, 2013, 33(13): 4125-4133.

- [38] Kareiva P, Marvier M. Conserving biodiversity coldspots; recent calls to direct conservation funding to the world's biodiversity hotspots may be bad investment advice. *American Scientist*, 2003, 91(4): 344-351.
- [39] Rodríguez JP, Taber AB, Daszak P, Sukumar R, Valladares-Padua C, Padua S, Aguirre LF, Medellín RA, Acosta M, Aguirre AA, Bonacic C, Bordino P, Bruschini J, Buchori D, González S, Mathew T, Méndez M, Mugica L, Pacheco LF, Dobson AP, Pearl M. Globalization of conservation; a view from the south. *Science*, 2007, 317(5839): 755-756.
- [40] Dinerstein E, Scarano F R, Chaudhary P, Mittermeier P, Mittermeier R A, Gascon C, Rajaobelina L, Supriatna J, da Silva J M C, Rodriguez C M, Zhi L, Brandon K, Rodríguez J R, Taber A B, Daszak P, Sukumar R, Valladares-Padua C, Padua S, Aguirre L F, Medellín R A, Acosta M, Aguirre A A, Bonacic C, Bordino P, Bruschini J, Buchori D, González S, Mathew T, Méndez M, Mugica L, Dobson A P, Pearl M. Global and local conservation priorities. *Science*, 2007, 318(5855): 1377-1382.
- [41] 郭施宏, 齐晔. 京津冀区域大气污染协同治理模式构建——基于府际关系理论视角. *中国特色社会主义研究*, 2016, (3): 81-85.
- [42] 王书明, 周寒. 竞争、合作与生态文明建设合作制度的建构——结合环渤海区域水污染治理的思考. *哈尔滨工业大学学报: 社会科学版*, 2015, 17(6): 103-108.
- [43] 朱彦鹏, 李博炎, 蔚东英, 李俊生. 关于我国建立国家公园体制的思考与建议. *环境与可持续发展*, 2017, 42(2): 9-12.
- [44] 陈盼, 施晓清. 基于文献网络分析的生态文明研究评述. *生态学报*, 2019, 39(10): 3787-3795.
- [45] Tang L N, Gui L M, Shao G F, Wang L Y, Shi L Y. Practice and research progress on ecosystem conservation in transboundary areas. *Chinese Geographical Science*, 2016, 26(1): 109-116.
- [46] Thieme M L, Rudolph J, Higgins J, Takats J A. Protected areas and freshwater conservation: a survey of protected area managers in the Tennessee and Cumberland River Basins, USA. *Journal of Environmental Management*, 2012, 109: 189-199.
- [47] 熊永兰, 张志强, 尉永平. 国际典型流域管理规划的新特点及其启示. *生态经济*, 2014, 30(2): 45-48.