

DOI: 10.5846/stxb201901140109

成文青,陶宇,吴未,欧维新.基于 MSPA-连接度-空间句法的生态保护空间及优先级识别——以苏锡常地区为例.生态学报,2020,40(5): 1789–1798.

Cheng W Q, Tao Y, Wu W, Ou W X. Priority evaluation of ecological protect areas based on MSPA, landscape connectivity, and spatial syntax methods in the Su-Xi-Chang Region. Acta Ecologica Sinica 2020, 40(5): 1789–1798.

基于 MSPA-连接度-空间句法的生态保护空间及优先级识别

——以苏锡常地区为例

成文青¹, 陶宇^{1,2}, 吴未^{1,2}, 欧维新^{1,2,*}

¹ 南京农业大学土地管理学院, 南京 210095

² 农村土地利用与整治国家地方联合工程研究中心, 南京 210095

摘要:随着城市化进程的加快,对生态保护空间(Ecological Protect Area, EPA)进行优先级识别已经成为保护生物多样性,缓解城市生态压力,提高土地利用效率的重要方法之一。以苏锡常地区为例,通过形态空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)确定 EPA,进而采用景观连接度方法对其优先级进行识别,以优先级较高的林地和水域为“源地”,构建 EPA 网络;同时由于景观连接度方法在识别优先级时,未能体现 EPA 对物种决策的非等权重影响,因此本研究引入空间句法进一步对 EPA 进行优先级识别。结果显示:1) 苏锡常地区 EPA 中编号 1、2 的林地以及太湖的优先级最高,是区域网络的 3 个中心,需要优先保护;2) 引入空间句法的优先级识别结果与基于景观连接度的优先级识别结果存在明显差异,后者优先级较高的 8 个 EPA,在引入空间句法后优先级降低 1—2 个等级;后者优先级较低的 4 个 EPA 的优先级则上升了 2 个等级。同时也表明:基于连接度-空间句法的 EPA 优先级识别方法能够反映不同景观要素对物种决策行为的非等权重影响,强化了生态要素的空间配置的生态效应,为明确关键性生态空间,提供了有效的方法补充,对保护生物多样性和维系区域生态安全具有重要意义。

关键词:生态保护空间;网络;优先级;景观连接度;空间句法

Priority evaluation of ecological protect areas based on MSPA, landscape connectivity, and spatial syntax methods in the Su-Xi-Chang Region

CHENG Wenqing¹, TAO Yu^{1,2}, WU Wei^{1,2}, OU Weixin^{1,2,*}

¹ College of Land Management, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

² National & Joint Local Engineering, Research Center for Rural Land Resources Use and Consolidation, Nanjing 210095, China

Abstract: With the acceleration of urbanization processes, priority identification of ecological protect areas (EPAs) has become an important method to protect biodiversity, alleviate urban ecological pressure, and improve land use efficiency. In this study, taking the Su-Xi-Chang region as a case study area, EPAs were identified using the Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA). The priority of EPAs was determined using the landscape connectivity method. High priority areas, such as forests and water bodies, were identified as the “source area” of the EPA network. However, the landscape connectivity method failed to reflect the unequal weight effect of EPAs on species decision making. Therefore, this study introduced a spatial syntax method to further determine the priority of EPAs. The results showed that: 1) forestland No. 1 and 2, and Taihu Lake were identified with the highest priority in the Su-Xi-Chang region. They were the three centers of

基金项目:中国科学院“美丽中国生态文明建设科技工程”专项(XDA23020201);国家自然科学基金项目(41701211, 41571176);教育部高等学校学科创新 111 引智计划(B17024)

收稿日期:2019-01-14; 网络出版日期:2019-12-17

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

<http://www.ecologica.cn>

the EPA network that required prioritized protection; 2) there were remarkable differences between the results of priority recognition using landscape connectivity and the spatial syntax method. For example, the priority of eight EPAs determined using the landscape connectivity method decreased by 1 to 2 levels after combining it with the spatial syntax method. However, the priority of another four EPAs determined using the landscape connectivity method increased by 2 levels after combining it with the spatial syntax method. Therefore, the combined connectivity-spatial syntax method for priority identification of EPAs could reflect an unequal weight influence of different landscape elements on species decision-making behavior and the ecological effect of spatial configuration of ecological elements. The combined method could also provide an effective method for identifying key ecological spaces and is of great significance for protecting biodiversity and maintaining regional ecological security.

Key Words: ecological protect area; network; priority; landscape connectivity; spatial syntax

快速城市化导致城市生态保护空间(Ecological Protect Area, EPA)急剧减少, EPA 之间的连接度降低, 给物种生存带来严重威胁^[1-3]。对 EPA 进行有效地识别, 以提高 EPA 之间的连接度, 已成为保护物种多样性研究的重要内容^[4-7]。现有研究中, 生态保护空间优先级识别方法有: (1) 景观连接度指数法^[8-10], 依据指数高低识别 EPA 优先级; (2) 生态系统服务评估方法, 利用 Guidos Toolbox^[11-14], Zonation^[15-17], Marxan^[18-21] 等软件对不同的生态要素(如碳排放量、水土保持量、气候变化情况等)进行综合分析, 划分 EPA 的优先级。然而, 传统方法大多基于 EPA 对物种迁移决策的影响是等权重的原则, 但物种实际迁移时, EPA 对物种决策的影响是非等权重的^[22-24], 因此一些专家和学者也尝试和探索新的方法如空间句法等, 来弥补这方面的不足。

空间句法能对人类活动与其所处环境之间的关系进行量化分析, 被广泛用于优化城市空间配置的研究^[25-27]。因此部分专家和学者将其应用到景观生态学中, 通过探索动物活动与其所处景观要素之间关系, 优化景观布局。如杨天翔等^[28]通过空间句法反映不同景观元素对物种决策的非等权重影响, 研究鸟类边缘种行为的景观连接度; 同时他们还探索了空间句法在生态网络功能连接度研究方面的优越性^[29]; 此外 Wei 等^[30]通过结合景观连接度和空间句法对浦口地区城市绿色基础设施进行了优先级识别。这表明空间句法在 EPA 优先级识别上的潜力。

本文拟在结合景观生态学中 MSPA 方法、景观连接度识别 EPA 优先级的基础上, 引入空间句法, 试图发现基于景观连接度的 EPA 优先级识别方法在引入空间句法后有何改进, 以为生态空间保护和 EPA 优先级识别提供新的思路和方法。

1 研究区概况

苏锡常地区地处 119°08′—121°15′E, 30°46′—32°04′N 之间, 位于长江三角洲腹心地带, 是长三角地区的一个重要组成部分。自 21 世纪以来, 苏锡常地区经济和城市化快速发展与扩张, 引致区域 EPA 面积急剧下降, 严重威胁区域生态环境、生物多样性保护。如何协调城市经济社会发展与生态空间保护的关系, 已经成为苏锡常地区亟需解决的问题之一。

2 数据与研究方法

2.1 数据来源及处理

本研究采用 2015 年苏锡常土地利用数据, 并根据研究目标和区域实际情况将地类划分为水田、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等 13 种类型。

2.2 研究方法

2.2.1 基于 MSPA 的 EPA 识别

形态空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)能够识别目标像元集与结构要素之间的

空间拓扑关系,并将目标像元集分为核心、斑块、孔隙、边缘、桥接、环道和支线 7 种类型^[31],被广泛用于 EPA 的识别及 EPA 网络研究当中^[14, 31-32]。本研究在进行 MSPA 分析时,将乔木林地、灌木林地归并为林地,将滩涂沼泽、湖泊水库、河流、沟渠/运河归并为水域,两者均作为前景地类,其他地类设置为背景地类,利用 Guidos Toolbox 软件平台对苏锡常地区进行分析,识别出其核心区,并据此明确重要 EPA 的空间分布。

2.2.2 基于景观连接度的 EPA 优先级识别

在 MSPA 识别出的 7 种景观类型中,核心区作为最重要的组成部分,可作为多种生态过程的“源”,对生物多样性保护具有重要意义。因此本研究选择核心区采用基于景观连接度方法进行优先级识别。由于核心区中存在如太湖、漏湖、阳澄湖、长江支流等面积较大的水域,对连接度方法的优先级识别结果会产生较大影响,为了降低这种影响,我们将水域和林地分别进行优先级识别。

景观连接度是 EPA 优先级识别的重要方法之一,包含了结构连接度和功能连接度^[33-35]。本研究采用景观功能连接度中的整体连通性指数(Integral Index of Connectivity, IIC)、可能连通性指数(Probability of Connectivity, PC)和相对重要性指数 *dI* 来综合评判 EPA 优先级。白鹭作为苏锡常地区的优势物种,已被列入《濒危野生动植物种国际贸易公约》^[36],因此在指数计算时,以白鹭为参考,将斑块连通的距离阈值设定为白鹭的最大迁移距离 10 km,连通的概率设定为 0.5,通过 Conerfor Sensinode 2.2 计算指数,根据 dIIC 和 *dPC* 指数归一化结果,划定 EPA 优先级。归一化方法如下:

$$dI = 0.5 \times dIIC + 0.5 \times dPC$$

2.2.3 EPA 网络构建

对 EPA 进行单独保护容易造成“孤岛化保护”的现象,不利于物种长期生存^[37-38]。因此本研究通过构建 EPA 网络增强 EPA 优先级识别的有效性。此外,由于传统 EPA 优先级识别结果中优先级排序前十的 EPA 被认为对生态保护具有重要作用,考虑到研究区域面积较大,本研究分别将连接度方法识别结果中排序前二十的林地和水域 EPA 作为网络“源地”。同时,以白鹭在景观之间的迁移阻力为参考^[39],通过最小成本路径法分别构建林地和水域网络,并将两个网络进行叠加,剔除冗余廊道,构建区域 EPA 网络。

2.2.4 基于空间句法的 EPA 优先级识别

轴线图构建是空间句法研究的基础。在构建轴线图时,我们以廊道的拐点作为断点,将一条廊道切分成多条廊道,并假设划分后的廊道是一条直线,将这些直线作为轴线,构成轴线图。此外,我们将两条轴线的交点处的 EPA 作为踏脚石,并对其优先级进行识别。

在指数选择时,引入空间句法中的整体集合度(Global integration)、连接值(Connect)、选择度(Choice)、以及可达性 *I* (Accessibility, 表示一个节点同时作为目标和通过路径的综合潜力,是对整体集合度和选择度的归一化)指数,其中,可达性 *I* 的计算公式如下:

$$I_i = \frac{\log(\text{Choice}_i + 2)}{\text{Integration}_i}$$

式中 *i* 表示轴线编号。其他指数含义及计算方法见文献^[40-41],具体计算通过 Depthmap 完成。

通过对上述指数计算结果进行分析,制定标准(表 1、表 2)分别对“源地”EPA、踏脚石 EPA 和廊道 EPA 的优先级进行识别。

表 1 “源地”EPA、踏脚石 EPA 优先级识别标准

Table 1 The priority evaluation standard of “source” and step-stones

		通过 EPA 的轴线的最大 <i>I</i> 值 Maximum value of <i>I</i>		
通过 EPA 的轴线数量 Number of axial	≤ 2	2 < <i>I</i> < 3	≥ 3	
	≥ 4	三级	二级	一级
	< 4	四级	三级	二级

EPA: 生态保护空间 Ecological protect area; *I*: 可达性 Accessibility

表 2 廊道 EPA 优先级识别标准
Table 2 The priority evaluation standard of corridor

I 值 Value of I	连接值 Connect		
	≤3	2<C<3	≥ 6
≥ 3	三级	二级	一级
< 3	四级	三级	二级

3 结果与分析

3.1 基于 MSPA 方法的 EPA 识别结果

由图 1、表 3 可见,基于 MSPA 方法识别出的苏锡常地区 EPA 总面积为 579868.92 hm²,占苏锡常地区总面积的 32.94%,说明苏锡常地区生态基础良好。其中核心区面积为 463673.13 hm²,分别占 EPA 总面积和研究区总面积的 79.96%、26.34%,是 EPA 的主要类型;桥接区和支线作为连接核心区的重要景观,其面积分别为 7629.50、21582.23 hm²,占 EPA 总面积的比例均低于 3.8%,且在研究区总面积中的占比均不足 1.3%,说明生态核心区彼此之间较为独立;边缘区作为核心区与外围非绿色景观区域之间的过渡区域,其面积占 EPA 总面积和研究区总面积的比例分别为 12.02%、3.69%,可减少外界环境及人为干扰带来的冲击;环岛、孤岛和孔隙则占 EPA 总面积的比例分别为 0.28%、2%、0.69%,占研究区总面积的比例分别为 0.09%、0.66%和 0.23%。

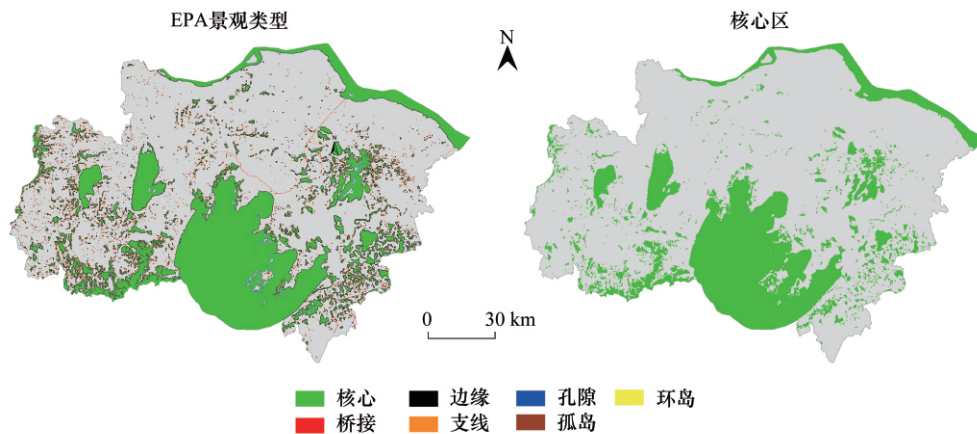


图 1 基于 MSPA 的景观类型图

Fig.1 Landscape type that based on MSPA

MSPA: 形态空间格局分析 Morphological spatial pattern analysis

表 3 基于 MSPA 的 EPA 面积及百分比

Table 3 Area and percentage of EPA that based on MSPA

景观类型 Landscape type	面积 Area/hm ²	占 EPA 总面积的百分比 Percentage of total EPA area /%	占总研究区域总面积的百分比 Percentage of research area /%
核心区 Core	463673.13	79.96	26.34
桥接区 Bridge	7629.50	1.32	0.43
边缘区 Edge	69727.19	12.02	3.96
支线 Branch	21582.23	3.72	1.23
环岛 Loop	1646.40	0.28	0.09
孤岛 Islet	11613.10	2.00	0.66
孔隙 Perforation	3997.37	0.69	0.23
合计 Total	579868.92	100	32.94

3.2 基于连接度的 EPA 优先级识别结果

3.2.1 “源地”EPA 优先级识别及分布

由图 2 可以看出,在苏锡常地区“源地”EPA 中,林地主要分布在苏锡常地区西南部,且分布较为密集;水域中包括太湖(编号 21)、长江(编号 22)、滆湖(编号 23)、阳澄湖(编号 24)、长荡湖(编号 25)等大型湖泊,则分布较为均匀。在“源地”EPA 优先级识别结果中,林地(表 4)和水域(表 5)中都存在一个 dI 极高的 EPA,林地中优先级第一的是位于无锡地区最南部的大型自然文化遗产保护区(编号 1),其 dI 值为 81.80;水域中优先级第一的是编号 21 的太湖, dI 值为 93.52;其次是长江、滆湖、阳澄湖、长荡湖等大型湖泊,说明大型 EPA 对于苏锡常地区生物多样性保护具有重要意义。

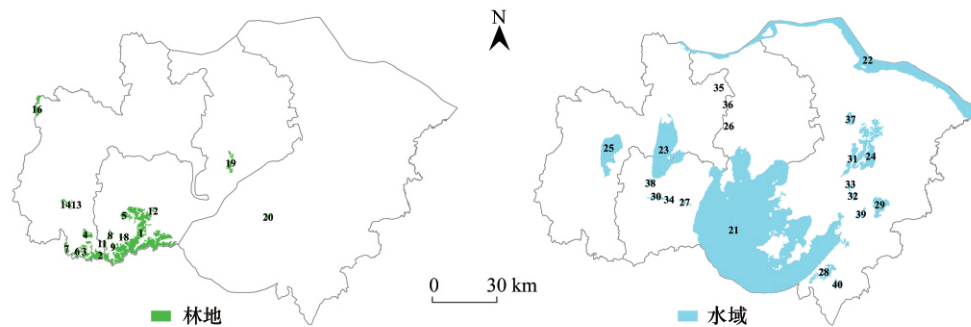


图 2 林地和水域“源地”分布图

Fig.2 Distribution of woodland and waterbody

表 4 林地优先级识别结果

Table 4 Priority evaluation of woodland

编号 Code	优先级识别 Priority evaluation	相对重要性指数 dI Indices of dI		归一化值 Normalized value	编号 Code	优先级识别 Priority evaluation	相对重要性指数 dI Indices of dI		归一化值 Normalized value
		$dIIC$	dPC				$dIIC$	dPC	
1	1	82.48	81.12	81.80	11	11	1.08	1.38	1.23
2	2	12.71	22.00	17.35	12	12	0.79	1.18	0.98
3	3	3.92	7.67	5.80	13	13	0.67	1.15	0.91
4	4	4.03	6.28	5.15	14	14	0.69	1.06	0.87
5	5	3.89	5.58	4.74	15	15	0.70	1.00	0.85
6	6	2.22	4.24	3.23	16	16	0.76	0.90	0.83
7	7	2.30	3.43	2.86	17	17	0.63	1.00	0.81
8	8	2.08	2.91	2.50	18	18	0.71	0.90	0.80
9	9	1.17	1.95	1.56	19	19	0.81	0.77	0.79
10	10	0.80	1.92	1.36	20	20	0.81	0.76	0.78

3.2.2 潜在 EPA 网络构建

由图 3 能够看出,林地网络主要作用于苏锡常地区西南部,编号 16 的 EPA 位于区域最西部,与其他区域距离较远,不利于西部区域生物的迁移和保护。水域网络相较于林地网络更为复杂,分布也较为均匀,能够较好的连通区域内的物种迁移和物质能量的交流。将林地网络和水域网络进行叠加去除冗余廊道,形成最终的苏锡常区域 EPA 网络,并以此为基础构建网络轴线图。

3.3 基于连接度-空间句法 EPA 优先级识别结果

在 EPA 轴线网络中,同一轴线的整体集合度(图 4、图 5)和连接值(图 4、图 5)存在正相关关系,即整体集合度大的轴线连接值也大。选择度与前者存在一定差异,部分轴线虽然集合度和连接值较高,但选择度较低,说明在生物迁移的过程中,相应 EPA 虽然与其他 EPA 联系程度较高^[42],但是被选择的次数较低,更不易

被物种感知并选择。如编号 109 的轴线,整体集合度为 1.8,连接值为 5,但选择度仅为 4。根据网络可达性 I 发现, I 值较高的轴线大多集中在太湖(编号 21)区域,以及无锡南部编号 1 和 2 的林地区域,说明这 3 个区域在 EPA 网络中的可达性最高,是 EPA 网络的中心区域,具有较高的生态价值,对整个区域的生态保护具有重要意义。而长江(编号 22)、常州西部编号为 16 的林地区域所连接的轴线其各个指数值都较低,说明这两个 EPA 的面积虽然较大,连接度优先级识别结果较高,但不易被物种感知,被选择的次数较低,相较于其他 EPA 更不利于物种迁移。

表 5 水域优先级识别结果

Table 5 Priority evaluation of waterbody

编号 Code	优先级识别 Priority evaluation	相对重要性指数 <i>dI</i> Indices of <i>dI</i>		归一化值 Normalized value	编号 Code	优先级识别 Priority evaluation	相对重要性指数 <i>dI</i> Indices of <i>dI</i>		归一化值 Normalized value
		<i>dIIC</i>	<i>dIPC</i>				<i>dIIC</i>	<i>dIPC</i>	
21	1	93.55	93.50	93.52	31	11	0.98	1.78	1.38
22	2	9.32	5.36	7.34	32	12	0.69	2.04	1.37
23	3	5.51	7.93	6.72	33	13	0.17	1.64	0.91
24	4	2.93	4.80	3.86	34	14	0.06	1.75	0.91
25	5	2.18	2.61	2.39	35	15	0.80	0.52	0.66
26	6	2.66	1.89	2.28	36	16	0.81	0.44	0.63
27	7	0.21	3.41	1.81	37	17	0.37	0.65	0.51
28	8	1.22	2.28	1.75	38	18	0.13	0.75	0.44
29	9	1.19	2.00	1.59	39	19	0.33	0.48	0.40
30	10	0.68	2.42	1.55	40	20	0.30	0.44	0.37

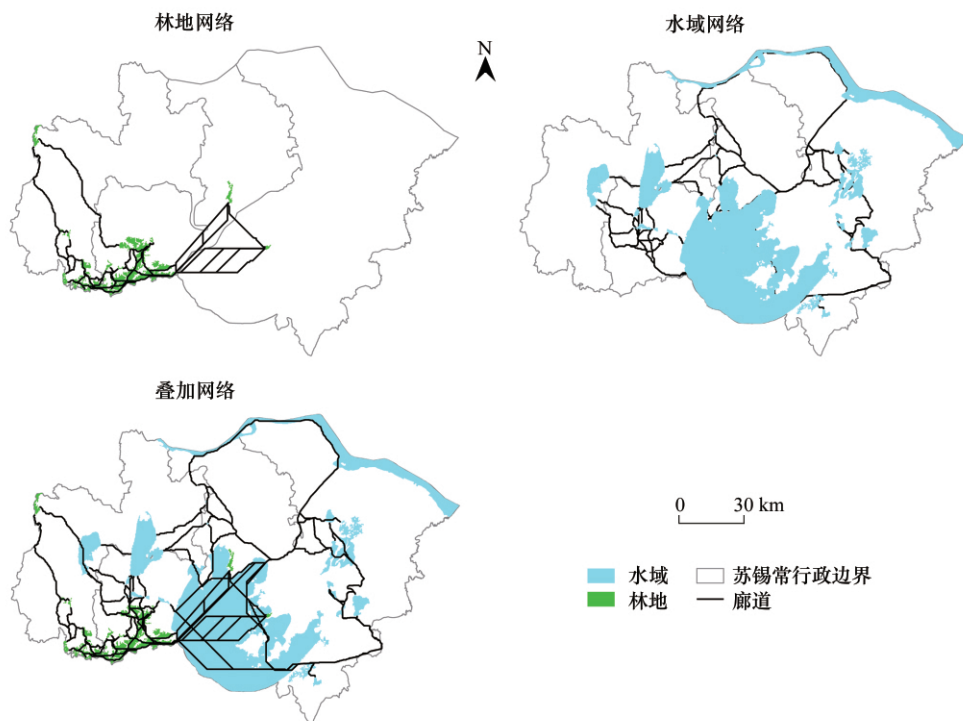


图 3 潜在 EPA 网络图

Fig.3 Potential network in Su-Xi-Chang region

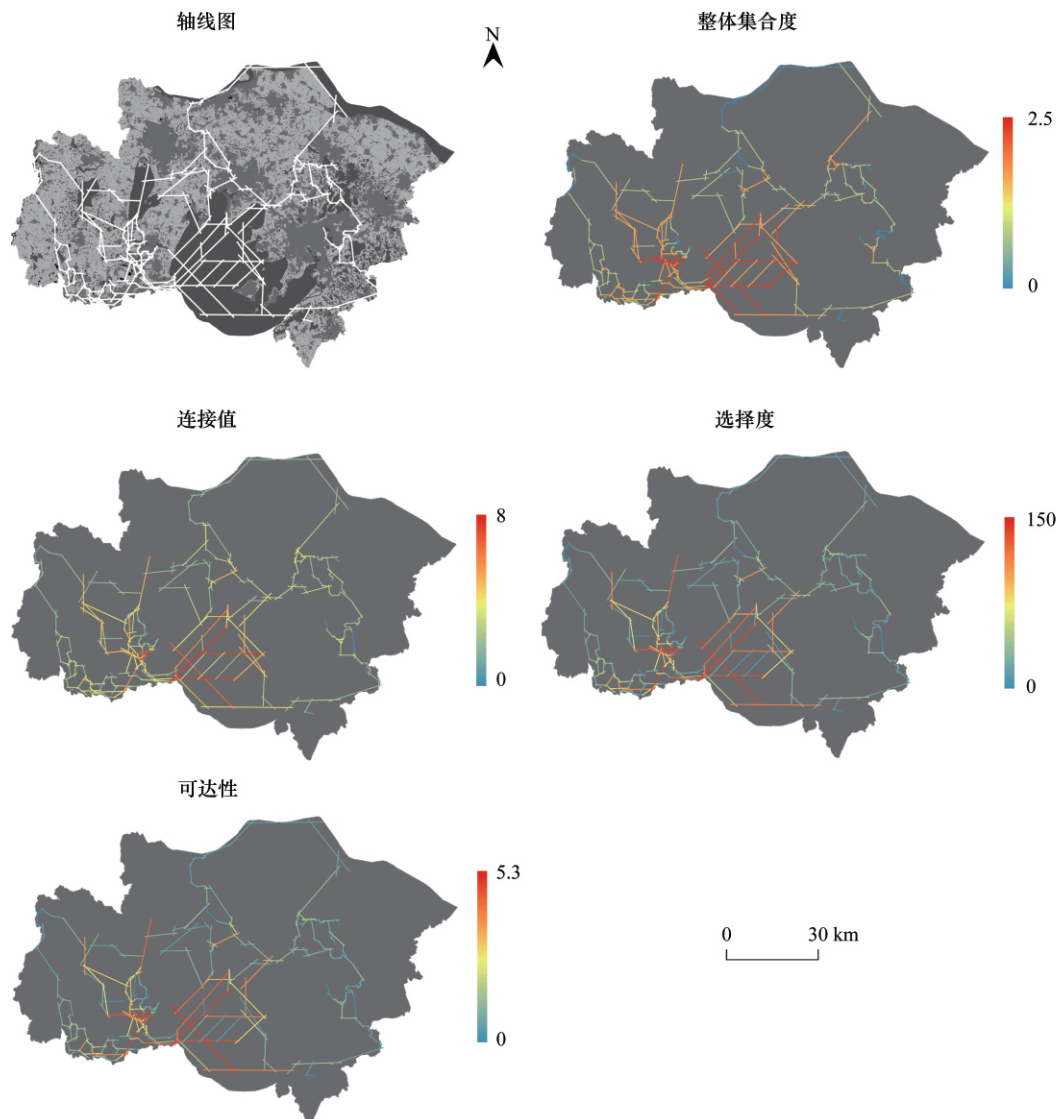


图 4 基于空间句法的轴线优先级指数空间分布图

Fig.4 Axial map and priority indices based on space syntax

3.4 EPA 识别结果分析

由图 6 和表 6 可以看出, EPA 网络中一级 EPA 和四级 EPA 主要分布在苏锡常地区南部和西部, 数量分别排第二和第一; 二级 EPA 主要分布在苏锡常地区中部, 距离建设用地较近; 三级 EPA 数量最少, 主要分布在苏锡常地区东部的苏州; 四级 EPA 的数量最多。

综合连接度和空间句法两种方法的 EPA 优先级识别结果(表 6)可知, 苏锡常地区一级 EPA 全部由“源地”组成, 其数量最少, 但面积最大, 占整个地区 EPA 面积的 73.10%, 是 EPA 网络最主要的组成部分; 二级 EPA 和三级 EPA 在整个 EPA 网络中面积占比较低, 但优先级却较高; 而四级 EPA 虽然面积占比高, 优先级却较低。同时通过对比发现, 编号 4, 5, 7, 8, 9, 22, 28, 29 的 EPA 在连接度优先级识别结果中排序较高, 但结合空间句法后优先级降为四级, 编号 10, 30, 38 的 EPA 通过在连接度优先级识别结果中排序较低, 但结合空间句法后优先级升为二级, 而编号 37 的 EPA 优先级升为为三级。说明相较于景观连接度对 EPA 等权重的计算原则, 空间句法能够体现 EPA 对物种决策的非等权重影响^[28], 进而导致识别结果的差异, 是对景观连接度研究方法的有效补充。

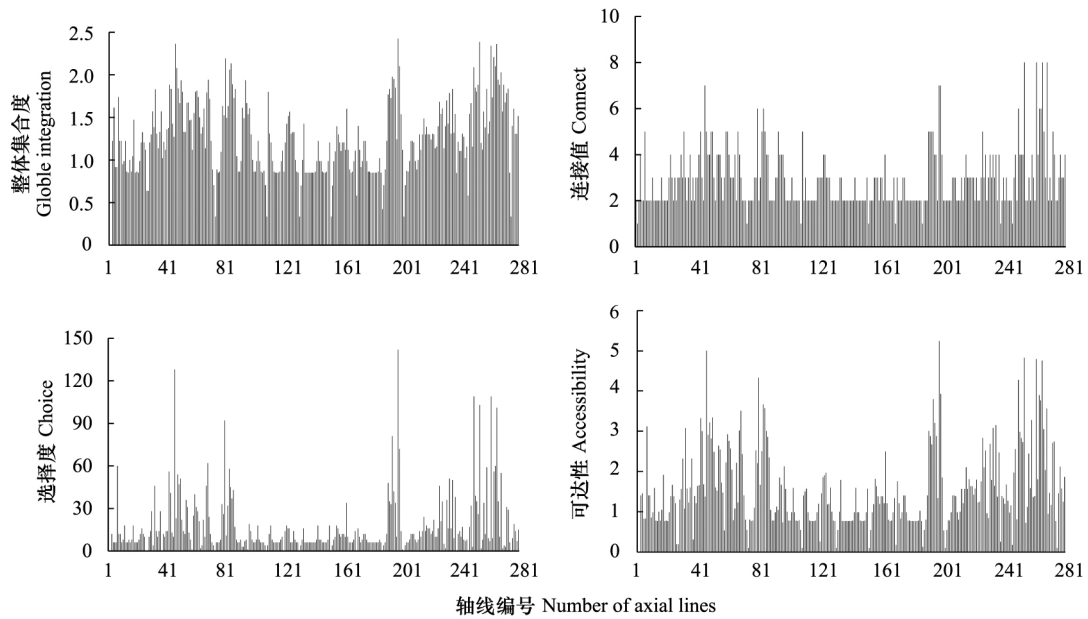


图 5 基于空间句法的轴线优先级指数值分布图
 Fig.5 Value of each axial based on space syntax

4 结论与讨论

本研究通过 MSPA 方法对苏锡常地区 EPA 进行初步识别,在采用传统的连接度方法对 EPA 优先级进行识别的基础上,引入拓扑学中的空间句法,通过量化物种与 EPA 配置之间的关系,实现 EPA 非等权重原则下的优先级识别。结果表明: 1) 苏锡常地区 EPA 主要由面积较大的斑块组成,其中太湖和编号为 1、2 的 EPA 可达性较高,是研究区域生态保护空间网络的中心,需要重点加以保护; 2) 引入空间句法的优先级识别与基于景观连接度的优先级识别的结果存在明显差异,在引入空间句法后优先级降低 1—2 个等级; 后者优先级较低的 4 个 EPA 的优先级则上升了 2 个等级。这是因为连接度理论是基于景观对物种决策行为影响的等权重原则进行识别,但在实际的物种迁移过程中,景观对物种感知和移动行为在不同距离和方向上的影响是非等权重的^[28],而空间句法则弥补了这一不足。同时 3) 本研究通过在轴线的相交处设立踏脚石,并对踏脚石 EPA 的优先级进行识别,能够完善 EPA 网络整体连接度,增强物种在廊道中迁移时对 EPA 要素的感知,为 EPA 网络优化和保护提供有效参考。综上所述,通过结合连接度和空间句法识别出的 EPA 优先级相较于单一的连接度方法更为科学准确,提升了其现实指导价值。

空间句法为 EPA 优先级识别方法提供了有益的补充,但其研究结果受到轴线图构建结果的影响较大,且在相关研究中多以“最长最少”的原则进行轴线图构建,主观性较强,如何构建客观准确且具有明确生态学含义的轴线图等研究还有待深化。此外,在计算句法指数过程中,拓扑步数的选择也会对各个指数的值也会产生影响,相关研究中多将人类的空间感知拓扑步数设置为 3,即人类最多能够感知到 3 条街道以内的空间,或默认拓扑步数为 n,即人类能够感知空间内的所有街道,而如何准确的设置物种的空间感知拓扑步数也有待探索。

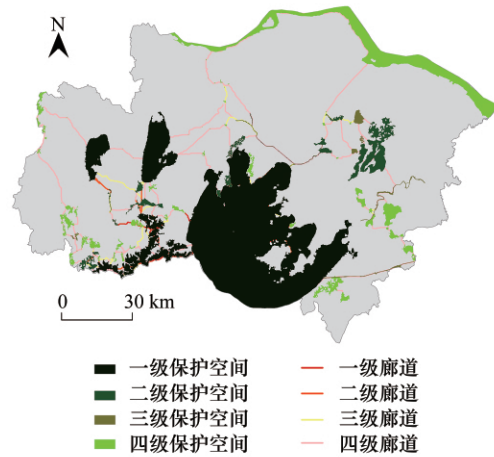


图 6 EPA 网络要素优先级识别结果
 Fig.6 Priority evaluate result of EPA network elements

表 6 EPA 面积属性表

Table 6 Properties of EPA area

生态保护空间等级 Level of EPA	总面积 Total area/hm ²	数量 Number/个		平均面积 Average area/hm ²	占总保护空间的百分比 Percentage of EPA/%
		源地 Source	踏脚石 Step-stone		
一级保护空间 Level 1 of EPA	298160.01	5	0	59632.00	73.10
二级保护空间 Level 2 of EPA	28205.94	7	10	1659.17	6.92
三级保护空间 Level 3 of EPA	5259.30	8	6	751.33	1.29
四级保护空间 Level 4 of EPA	76260.87	20	38	1173.24	18.70

空间句法自被提出以来已被广泛用于城市、村落空间配置分析、城市轨道交通、人文景观设计和优化、以及广场空间改造和室内空间设计等诸多方面,其核心思想是通过轴线模型量化研究人类活动与环境要素配置的关系^[27]。在假设其同样适用于研究“景观-物种”关系的前提下,部分专家和学者探索如何将其用于量化研究景观要素配置与物种迁移行为之间的关系,并据此对生物多样性和 EPA 进行保护^[28-30]。这在一定程度上表明,空间句法有助于深化对景观连接度、“格局-过程关系”等景观生态学理论方法的理解和认识。将其应用到区域 EPA 优先级识别实践中,将有利于提高生态保护效率,对生物多样性保护和地区生态安全具有重要现实意义。

参考文献 (References):

- [1] Liu J Y , Zhuang D F , Luo D , Xiao X. Land-cover classification of China: integrated analysis of AVHRR imagery and geophysical data. *International Journal of Remote Sensing* , 2003 , 24(12) : 2485–2500.
- [2] Crooks K R , Sanjayan M. *Connectivity Conservation*. Cambridge , UK: Cambridge University Press , 2006.
- [3] Pereira M , Segurado P , Neves N. Using spatial network structure in landscape management and planning: a case study with pond turtles. *Landscape and Urban Planning* , 2011 , 100(1/2) : 67–76.
- [4] Taylor P D , Fahrig L , Henein K , Merriam G. Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos* , 1993 , 68(3) : 571–573.
- [5] Moilanen A , Nieminen M. Simple connectivity measures in spatial ecology. *Ecology* , 2002 , 83(4) : 1131–1145.
- [6] Nawaz M A , Martin J , Swenson J E. Identifying key habitats to conserve the threatened brown bear in the Himalaya. *Biological Conservation* , 2014 , 170: 198–206.
- [7] Liu S L , Yin Y J , Li J R , Cheng F Y , Dong S K , Zhang Y Q. Using cross-scale landscape connectivity indices to identify key habitat resource patches for Asian elephants in Xishuangbanna , China. *Landscape and Urban Planning* , 2018 , 171: 80–87.
- [8] Pascual-Hortal L , Saura S. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. *Landscape Ecology* , 2006 , 21(7) : 959–967.
- [9] Saura S , Rubio L. A common currency for the different ways in which patches and links can contribute to habitat availability and connectivity in the landscape. *Ecography* , 2010 , 33(3) : 523–537.
- [10] Li W W , Clauzel C , Dai Y C , Wu G S , Giraudoux P , Li L. Improving landscape connectivity for the Yunnan snub-nosed monkey through cropland reforestation using graph theory. *Journal for Nature Conservation* , 2017 , 38: 46–55.
- [11] Vogt P , Ferrari J R , Lookingbill T R , Gardner R H , Riitters K H , Ostapowicz K. Mapping functional connectivity. *Ecological Indicators* , 2009 , 9(1) : 64–71.
- [12] Wickham J D , Riitters K H , Wade T G , Vogt P. A national assessment of green infrastructure and change for the conterminous United States using morphological image processing. *Landscape and Urban Planning* , 2010 , 94(3/4) : 186–195.
- [13] 许峰,尹海伟,孔繁花,徐建刚. 基于 MSPA 与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建. *生态学报* , 2015 , 35(19) : 6425–6434.
- [14] Hernando A , Velázquez J , Valbuena R , Legrand M , García-Abril A. Influence of the resolution of forest cover maps in evaluating fragmentation and connectivity to assess habitat conservation status. *Ecological Indicators* , 2017 , 79: 295–302.
- [15] Moilanen A , Anderson B J , Eigenbrod F , Heinemeyer A , Roy D B , Gillings S , Armsworth P R , Gaston K J , Thomas C D. Balancing alternative land uses in conservation prioritization. *Ecological Applications* , 2011 , 21(5) : 1419–1426.
- [16] Liang J , He X Y , Zeng G M , Zhong M Z , Gao X , Li X , Li X D , Wu H P , Feng C T , Xing W L , Fang Y L , Mo D. Integrating priority areas and ecological corridors into national network for conservation planning in China. *Science of the Total Environment* , 2018 , 626: 22–29.

- [17] Verhagen W, van Teeffelen A J A, Verburg P H. Shifting spatial priorities for ecosystem services in Europe following land use change. *Ecological Indicators*, 2018, 89: 397–410.
- [18] Boon P Y, Beger M. The effect of contrasting threat mitigation objectives on spatial conservation priorities. *Marine Policy*, 2016, 68: 23–29.
- [19] Watts M E, Ball I R, Stewart R S, Klein C J, Wilson K, Steinback C, Lourival R, Kircher L, Possingham H P. Marxan with zones: software for optimal conservation based land- and sea-use zoning. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(12): 1513–1521.
- [20] Christensen V, Ferdaña Z, Steenbeek J. Spatial optimization of protected area placement incorporating ecological, social and economical criteria. *Ecological Modelling*, 2009, 220(19): 2583–2593.
- [21] Lanzas M, Hermoso V, de-Miguel S, Bota G, Brotons L. Designing a network of green infrastructure to enhance the conservation value of protected areas and maintain ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 541–550.
- [22] Bélisle M. Measuring landscape connectivity: the challenge of behavioral landscape ecology. *Ecology*, 2005, 86(8): 1988–1995.
- [23] Lima S L, Zollner P A. Towards a behavioral ecology of ecological landscapes. *Trends in Ecology & Evolution*, 1996, 11(3): 131–135.
- [24] 沈一, 陈涛. 城市景观生态绿地系统网络规划的研究. *四川建筑*, 2004, 24(6): 11–12. Omer I, Kaplan N. Using space syntax and agent-based approaches for modeling pedestrian volume at the urban scale. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2017, 64: 57–67.
- [25] 吴志军, 田逢军. 基于空间句法的城市游憩空间形态特征分析——以南昌市主城区为例. *经济地理*, 2012, 32(6): 156–161.
- [26] Monokrousou K, Giannopoulou M. Interpreting and predicting pedestrian movement in public space through space syntax analysis. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2016, 223: 509–514.
- [27] 杨天翔, 张伟倩, 樊正球, 王祥荣, 王寿兵. 基于鸟类边缘种行为的景观连接度研究——空间句法的反规划应用. *生态学报*, 2013, 33(16): 5035–5046.
- [28] Yang T X, Jing D, Wang S B. Applying and exploring a new modeling approach of functional connectivity regarding ecological network: a case study on the dynamic lines of space syntax. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 126–137.
- [29] Wei J X, Qian J, Tao Y, Hu F, Ou W X. Evaluating spatial priority of urban green infrastructure for urban sustainability in areas of rapid urbanization: a case study of Pukou in China. *Sustainability*, 2018, 10(2): 327.
- [30] Soille P, Vogt P. Morphological segmentation of binary patterns. *Pattern Recognition Letters*, 2009, 30(4): 456–459.
- [31] Rosot M A D, Maran J C, Luz N B D, Garrastazú M C, de Oliveira Y M M, Francison L, Clerici N, Vogt P, de Freitas J V. Riparian forest corridors: a prioritization analysis to the landscape sample units of the Brazilian national forest inventory. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 501–511.
- [32] 贾振毅, 陈春娣, 童笑笑, 吴胜军, 周文佐. 三峡沿库城镇生态网络构建与优化——以重庆开州新城为例. *生态学杂志*, 2017, 36(3): 782–791.
- [33] 古璠, 黄义雄, 陈传明, 程栋梁, 郭佳蕾. 福建省自然保护区生态网络的构建与优化. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 1013–1020.
- [34] 齐珂, 樊正球. 基于图论的景观连接度量化方法应用研究——以福建省闽清县自然森林为例. *生态学报*, 2016, 36(23): 7580–7593.
- [35] 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.
- [36] MacArthur R H, Wilson E O. *The Theory of Island Biogeography*. Princeton: Princeton University Press, 1967.
- [37] Boardman R. *International Organisation and the Conservation of Nature*. London: Macmillan, 1981.
- [38] 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.
- [39] 段进, 比尔·希列尔, 史蒂文·瑞德, 叶珉, 江斌. *空间句法与城市规划*. 南京: 东南大学出版社, 2007.
- [40] 刘承良, 余瑞林, 段德忠. 基于空间句法的武汉城市圈城乡道路网通达性演化分析. *地理科学*, 2015, 35(6): 698–707.
- [41] 陶伟, 陈红叶, 林杰勇. 句法视角下广州传统村落空间形态及认知研究. *地理学报*, 2013, 68(2): 209–218.