

基于景观安全格局的北戴河新区生物多样性保护研究

李 静, 张莹莹, 朱永明

(河北农业大学 国土资源学院, 河北 保定 071001)

摘 要:生物多样性是人类生存的物质基础,对人类发展意义重大。基于景观安全格局理论,借助 ArcGIS 10,Conefor Sensinode 2.2 和 InVEST 2.2.0 软件,识别源地,运用最小累积阻力模型构建最小累积阻力面并将研究区划分为 3 个阻力区:生物多样性保护缓冲区(阻力值 0~8 242.16)、生物多样性保护过渡区(阻力值 8 242.16~20 509.57)、生物多样性保护限制区(阻力值 20 509.57~49 069.63),构建了以生物多样性保护为目的的北戴河新区景观安全格局。结果表明:生物多样性保护核心区占研究区总面积的 13.34%,用地类型包括水体和林地;生物多样性保护缓冲区占研究区总面积的 30.64%,主要用地类型是耕地、建设用地、水体和林地;生物多样性保护过渡区占研究区总面积的 34.41%,主要用地类型是耕地和建设用地;生物多样性保护限制区占研究区总面积的 21.61%,主要用地类型是耕地和建设用地。针对各功能区的用地结构特征提出了相应的生物多样性保护建议。

关键词:环境科学;生物多样性保护;栖息地;景观安全格局;北戴河新区

中图分类号:Q145; X826 文献标识码:A 文章编号:1005-3409(2017)01-0305-06

Research on Biodiversity Conservation of Beidaihe New District
Based on Landscape Security Pattern

LI Jing, ZHANG Yingying, ZHU Yongming

(College of Land and Resources, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001, China)

Abstract: Biodiversity is the material basis of human survival, and it is of great significance to the development of human beings. Based on the theory of landscape security pattern, with the aid of graphics software, such as ArcGIS 10, Conefor Sensinode 2.2 and InVEST 2.2.0, the sources were identified, and minimum cumulative resistance surfaces were constructed by using minimum cumulative resistance model. The study area was divided into 3 resistance areas: the buffer for biodiversity conservation (the resistance value ranged from 0 to 8 242.16), the transition area for biodiversity conservation (the resistance value ranged form 8 242.16 to 20 509.57), and the restricted area for biodiversity conservation (the resistance value ranged from 20 509.57 to 49 069.63). Finally, the landscape security pattern of Beidaihe New District was constructed with the aim of biodiversity conservation. The results show that the proportion of core area for biodiversity conservation in the study area is 13.34%, and the land use types in this area include water and forestland; the proportion of buffer for biodiversity conservation in the study area is 30.64%, and the main land use types in this area are cultivated land, construction land, water and forestland; the proportion of transition area for biodiversity conservation in the study area is 34.41%, and the main land use types in this area are cultivated land and construction land; the proportion of restricted area for biodiversity conservation in the study area is 21.61%, and the main land use types in this area are cultivated land and construction land. According to the characteristics of the land use structure in each functional area, we put forward some suggestions for biodiversity conservation.

Keywords: environmental science; biodiversity conservation; habitat; landscape security pattern; Beidaihe New District

生物多样性是生物及其与环境构成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的综合^[1]。生物多样性对人类发展做出了重要贡献,不仅为人类提供了所需的各项资源,还具有保持水土、改善环境、维持生

态系统平衡的功能^[2],是人类生存的物质基础^[3]。近年来,随着人类活动的加剧,生物多样性受到了威胁,在生物多样性下降的众多原因中,栖息地的消失和破碎化是最主要的原因^[4-5]。因此,合理保护物种栖息地,提高景观连通性,对生物多样性的保护意义重大。景观安全格局理论可为生物多样性的保护提供指导。

我国学者俞孔坚教授发展了美国学者 Forman 教授的景观利用格局优化理论^[6],提出了景观安全格局理论,指出景观安全格局是判别和建立生态基础设施的一种途径,以景观生态学理论和方法为基础,基于景观过程和格局的关系,通过景观过程的分析和模拟,来判别对这些过程的健康与安全具有关键意义的景观格局^[7]。俞孔坚教授提出借助最小累积阻力 (Minimum cumulative resistance, MCR) 模型和 GIS 中的表面扩散技术来实现景观安全格局的构建。景观格局组分包括源地、缓冲带、源间联接、辖射道和战略点 5 项要素^[8]。业界学者们引用这一理论进行了大量的相关研究^[9-12],其中,对于景观生态安全格局“确定源—建立阻力面—根据阻力面判别安全格局”的构建步骤已经基本成熟,而对于“源”的确定,目前的研究大多是考虑斑块自身特征属性,采用直接识别的方法,选取面积较大且生态服务价值较高的斑块。然而源地除了应有良好的自身特征属性外,还当具备良好的外界环境。

本研究以秦皇岛市北戴河新区为研究区,借助景观安全格局理论,构建由源地、阻力面、生态廊道和战略点等组分组成的生物多样性保护安全格局,根据各组分的特征提出相应的用地策略,为北戴河新区合理保护物种赖以生存的栖息地,提高景观连通性和异质性,实现生物多样性的有效保护提供借鉴。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

北戴河新区位于秦皇岛市域滨海地区的西侧,地理位置为 119°1′—119°24′E, 39°25′—39°50′N, 总面积 514.79 km²。新区地势平坦,海拔较低,年平均气温 11℃,属暖温带半湿润大陆性季风气候。新区有丰富的动植物资源,植被类型有荒草地、阔叶林、灌木、耕地、经济林、菜地、花圃、苗圃、芦苇地等,动物资源有海生动物和野生动物,其中有多种珍稀动物如文昌鱼、黑嘴鸥、遗鸥、白鹤、丹顶鹤等。此外,还有丰富的湿地资源如七里海泄湖、滦河口湿地等,是各类水生动物和滩涂鸟类的栖息地。丰富的生物资源不仅对改善新区生态环境发挥着重要作用,还形成了得天独厚的旅游资源,为当地带来经济收入。新区产业发

展以旅游度假和农业生产为主,第二产业发展程度较低。近些年来,随着人类活动程度的加剧,生物赖以生存的栖息地遭到一定程度的破坏,生物多样性受到威胁,探寻生物多样性保护途径愈发迫切。

1.2 数据来源

研究所需基础数据包括研究区土地利用现状图 (2013 年)、Landsat 8 OLI 遥感影像图 (2015 年)、行政区划图、植被覆盖度数据和相关社会经济数据。土地利用现状图和行政区划图来源于秦皇岛市国土资源局北戴河新区分局;遥感影像图来源于中国科学院计算机网络信息中心的地理空间数据云平台;植被覆盖度数据由 Landsat 8 OLI 遥感影像图经 ENVI 4.7 和 ArcGIS 10 制图软件处理得到;相关社会经济数据来源于北戴河新区整治规划资料。为使土地利用现状数据较新且与植被覆盖度数据口径一致,本文运用 ENVI 4.7 软件,参照研究区 2013 年土地利用现状图建立解译标志,对 Landsat 8 OLI 遥感影像图 (2015 年)进行解译,获得了研究区 2015 年土地利用现状数据。图件坐标皆统一为 WGS_1984_UTM_Zone_50N 投影坐标。

2 研究方法

本研究以俞孔坚教授提出的景观安全格局理论为指导,通过识别源地—建立阻力面—构建生态廊道—识别战略点的步骤,构建生物多样性保护安全格局。

2.1 源地识别

源是物种扩散和维持的元点^[7],是区域生态功能最强的地带,因此本研究源地的选取只考虑生态用地。研究区生态用地包括耕地、园地、林地、草地和水体 5 大类。本文源地的选取不同于仅考虑斑块自身特征属性直接识别的方法,而是综合考虑斑块自身特征属性和外界环境的影响,选取评价指标对景观斑块质量进行评价来识别源地。基于保护生物多样性的目的,选取了斑块面积、生态系统服务价值 2 项反映斑块自身特征属性的指标,以及生境质量、斑块重要值 2 项反映外界环境影响的指标,采用层次分析法确定权重,构建景观斑块质量评价指标体系 (表 1)。然后运用加权模型,对景观斑块质量进行评价,并将结果划分为 5 个级别 (定义级别数值越小,景观斑块质量越好),选取 1 级斑块作为源地。

对于各项指标的计算,斑块面积的计算在 ArcGIS 10 中进行;生态系统服务价值的评估借鉴谢高地等^[13]制定的中国生态系统单位面积生态服务价值当量表计算;斑块重要值通过可能连通性指数来表现,可能连通性指数反映斑块之间连通性的可能性与

斑块之间的距离有关^[14],借助 Conefor Inputs for ArcGIS 10 插件模块、Conefor Sensinode 2.2 软件与 ArcGIS 10 软件共同完成;生境质量的计算借助 InVEST-Biodiversity 模型来实现,InVEST-Biodiversity 模型通过分析生境斑块受周围环境的威胁程度来实现生境质量的评估^[15],该模型中所需各项威胁数据参考相关文献^[16-19]并结合研究区实际得到(表 2、表 3、表 4)。对于各指标的分级,斑块面积按照 0~1,1~2,2~3,3~5,5 km² 以上的标准划分,其他指标采用自然间断点分级法来划分。

表 1 北戴河新区景观斑块质量评价指标体系与权重

指标名称	权重
斑块面积	0.1411
生态系统服务价值	0.4547
生境质量	0.2631
斑块重要值	0.1411

表 2 北戴河新区生境威胁因子影响程度与最大影响距离

威胁因子	相对影响程度	最大影响距离/km
高速公路	0.5	0.75
铁路	0.4	0.50
主要公路	0.6	0.50
其他建设用地	0.7	2.00
工矿用地	1	3

表 3 北戴河新区生境类型对各威胁因子的敏感度

生境类型	威胁因子				
	高速公路	铁路	主要公路	其他建设用地	工矿用地
耕地	0.5	0.4	0.6	0.8	0.7
园地	0.4	0.3	0.5	0.7	0.6
林地	0.7	0.6	0.8	1	0.9
草地	0.6	0.5	0.7	0.9	0.8
水体	0.8	0.7	0.9	1	0.9

表 4 北戴河新区不同法律保护区威胁可达程度

保护区类型	威胁可达程度
国家级自然保护区	0.15
市级林场	0.25
其他	1

2.2 阻力面建立

(1) 综合阻力面建立。基于保护生物多样性的目的,研究选取土地利用类型、植被覆盖度、到居民点距离和到主干道距离 4 项阻力因子构建综合阻力面。首先将各因子统一为 30 m×30 m 的栅格数据,然后运用 ArcGIS 10 的重分类功能,将各因子划分为 7 个级别,对各级别赋予相应的相对阻力系数。相对阻力系数的确定依据保护生物多样性的相对难易程度而定,保护越容易,阻力值越小,反之,阻力值越大。各阻力因子的权重与相对阻力系数见表 5。最后,对 4 项阻力因子加权叠加得到综合阻力面。

表 5 各阻力因子的权重与相对阻力系数

阻力因子	权重	分级	相对阻力系数
土地利用类型	0.35	耕地	5
		园地	3
		林地	1
		草地	4
		水体	2
		建设用地	7
		其他土地	6
植被覆盖度	0.3	0~10%	7
		10%~20%	6
		20%~40%	5
		40%~50%	4
		50%~60%	3
		60%~80%	2
		80%~100%	1
		0~245.36 m	7
		245.36~613.49 m	6
		613.49~1202.44 m	5
到居民点距离	0.2	1202.44~2061.32 m	4
		2061.32~3042.90 m	3
		3042.90~4171.72 m	2
		4171.72~6282.12 m	1
		0~996.30 m	7
		996.30~2402.85 m	6
		2402.85~4161.04 m	5
到主干道距离	0.15	4161.04~6270.86 m	4
		6270.86~8615.11 m	3
		8615.11~11135.17 m	2
		11135.17~15003.18 m	1

(2) 最小累积阻力面建立。最小累积阻力面的建立借鉴最小累积阻力(MCR)模型。物种从源出发到达空间某一点,会经过具有不同阻力的景观基面,最小累积阻力模型反映物种在这一扩散过程中克服的最小阻力或耗费的最小费用。最小累积阻力模型由俞孔坚教授根据 Knaapen 等^[20]的模型和地理信息系统里面的成本距离模型发展而来,公式如下:

$$MCR=f_{\min}\sum_{j=n}^{i=m}(D_{ij}\cdot R_i)\quad(i\geqslant 1,j\geqslant 1)$$

式中: f_{\min} 是一个正函数系数,反映空间中任一点的最小阻力与其所有源的距离和景观基面特征的正相关关系,min 表示被评价的斑块对于不同的源取累积阻力最小值; D_{ij} 为物种从源 j 到某景观 i 所穿越的空间距离; R_i 为景观 i 对该物种运动的阻力系数;从源到空间某一点不仅仅有一条路径, $(D_{ij}\cdot R_i)$ 表示物种从源到空间某一点经过的某一路径的相对易达程度; $\sum_{j=n}^{i=m}(D_{ij}\cdot R_i)$ 为景观 i 与源 j 之间所穿越所有单元的距离和阻力的累积。

最小累积阻力面的建立借助 ArcGIS 10 空间分析模块的成本距离工具,在源地和综合阻力面确立的基础上,按照公式(1)的原理进行运算。

2.3 生态廊道构建和战略点识别

生态廊道是具有景观异质性的线性景观单元^[21],增加生态廊道能够为物种的空间移动提供更多的路径。在 MCR 中,生态廊道为各个源地相联系的最低耗费路径,借助 ArcGIS 10 的距离分析工具获得。

战略点为环绕相邻源的等阻力线的相切点^[22],对物种扩散起着关键作用。

3 结果与分析

3.1 源地识别结果

根据 2.1 介绍的各评价指标的处理方法与源地识别方法,得到各评价指标的分级结果以及综合评价结果和源地识别结果(图 1)。经统计,北戴河新区源地面积为 68.66 km²,占研究区总面积的 13.34%。源地区域生态功能最强,实现生物多样性保护所耗费的成本最小,应当作为生物多样性的核心保护区。

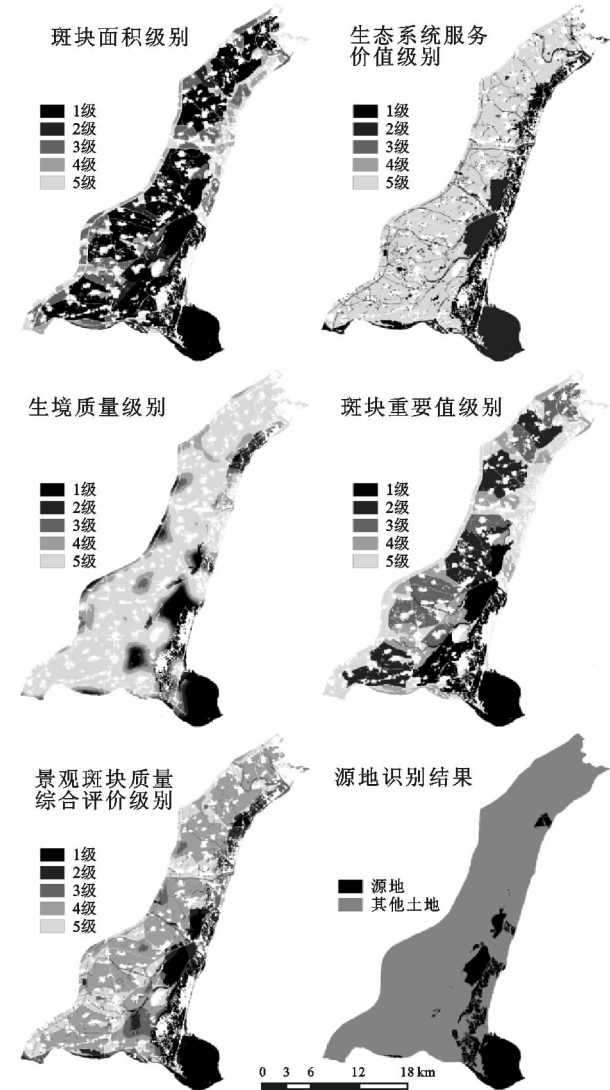


图 1 北戴河新区斑块面积、生态系统服务价值、生境质量、斑块重要值、景观斑块质量综合评价级别和源地识别结果

3.2 阻力面建立结果

依据 2.2 所述阻力面的建立方法,得到北戴河新区生物多样性保护各单因子阻力面、综合阻力面和最小累积阻力面(图 2)。采用自然间断点分级法将最小累积阻力面分为 3 个阻力区间:阻力值为 0~8 242.16 的为累积阻力 I 级区,包围着源地,对于降低外界环境对源地的干扰有重要作用,有利于保护源地生态流的稳定运行,是生物多样性保护的缓冲区;阻力值为 8 242.16~20 509.57 的为累积阻力 II 级区,沿 I 级区外围呈半环状分布,到达源地的耗费成本加大,对源地的保护意义下降,可作为生物多样性保护的过渡区;阻力值为 20 509.57~49 069.63 的为累积阻力 III 级区,是累积阻力 I 级区和累积阻力 II 级区以外的区域,阻力值最高,到达源地的耗费成本最大,生态功能最弱,不适合生物多样性的发展,为生物多样性保护的限制区。

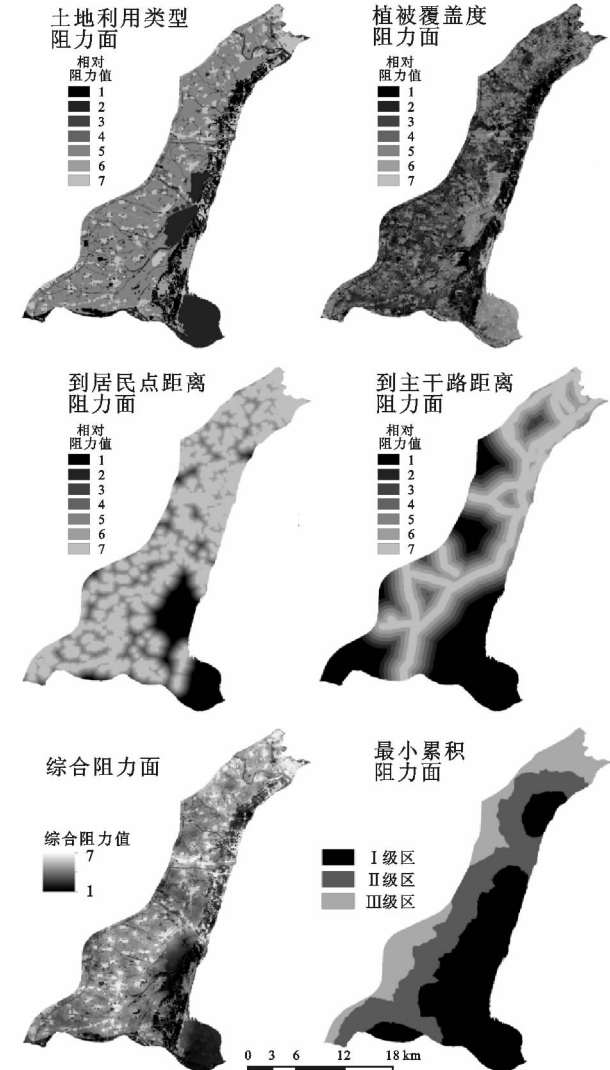


图 2 北戴河新区土地利用类型、植被覆盖度、到居民点距离、到主干路距离单因子阻力面、综合阻力面和最小累积阻力面

3.3 生态廊道和战略点识别结果

根据 2.3 所述生态廊道和战略点的识别方法,得到北戴河新区生物多样性保护的生态廊道和战略点分布图(图 3)。

生态廊道能够提高区域的景观连通性,损失最小的人类利益获取最大的生态效益^[23]。由图 3 可见,从一个“源”出发至少有一条生态廊道与其相邻“源”相联系,为物种扩散迁移提供必要通道。每条生态廊道上有一个战略点,是保障生态流运行的关键部位。



图 3 北戴河新区生态廊道和战略点分布

3.4 北戴河新区生物多样性保护建议

将上述各景观组分叠加,得到研究区生物多样性保护的景观安全格局(图 4)。针对不同生物多样性保护功能区的土地利用特征,提出相应的用地布局优化措施,以促进生物多样性的有效保护。不同功能区的土地利用结构见图 5。

经统计,生物多样性保护核心区的面积为 68.66 km²,占研究区总面积的 13.34%。该区内土地利用类型包括水体和林地 2 类,水体占该区总面积的 67.18%,林地占该区总面积的 32.83%,2 类用地类型主要分布在国有林场、渤海林场和滦河口水系。林地和水体是北戴河新区动植物物种的最重要栖息地,此区更是世界珍稀物种文昌鱼和黑嘴鸥的栖息地。该区栖息地保存完整与否对整个区域的生物多样性有至关重要的影响,应当对该区域进行重点管护,禁止一切有损生态环境的开发建设活动,若非必要的科研活动,原则上当禁止任何团体或个人进入该区域。

生物多样性保护缓冲区的面积为 157.71 km²,占研究区总面积的 30.64%。该区内土地利用类型主要是耕地、建设用地、水体和林地,其中耕地达到该区总面积的 44.60%,其他 3 类用地类型所占比例相

差不大。耕地主要分布在该区西部区域;建设用地沿河流分布,主要是农村居民点和小部分旅游建设用地;水体和林地主要分布在东部的国有林场和渤海林场,是动植物物种的栖息地。该区紧紧环绕生物多样性保护核心区,其生态系统的稳定与否直接影响生物多样性保护核心区的环境质量,因此,应当力求维护该区的生态系统稳定性,树立起连接生物多样性保护核心区和生物多样性保护过渡区的生态屏障,以减少人类活动对核心区的干扰。该区不应再新增建设用地,并通过相关土地整治措施尽可能地缩减现有建设用地的规模,合理规划旅游建设用地并控制游客容量,适当扩大林地和水体的规模,尤其要注意加强国有林场和渤海林场林地的连通性,为物种提供良好的栖息场所。

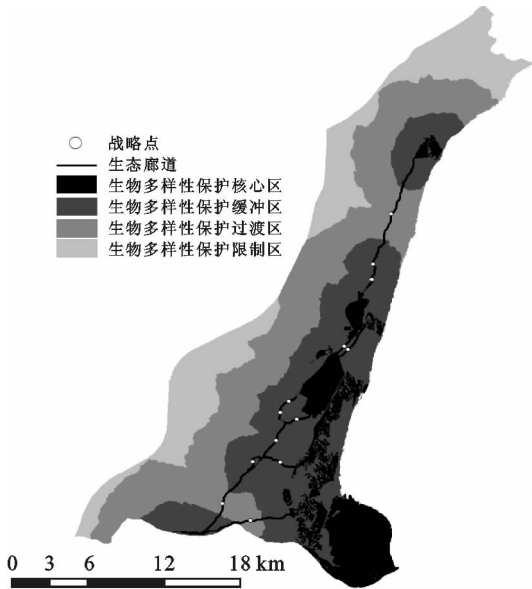


图 4 北戴河新区生物多样性保护安全格局

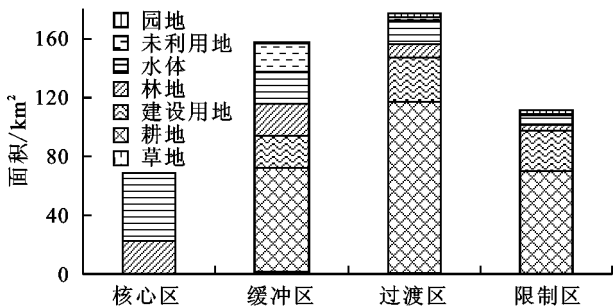


图 5 北戴河新区各生物多样性保护功能区不同用地类型的面积

生物多样性保护过渡区的面积为 177.15 km²,占研究区总面积的 34.41%。该区内土地利用类型主要是耕地和建设用地,其中耕地占该区总面积的 65.49%,建设用地占 17.30%,耕地和建设用地的比例较生物多样性保护缓冲区耕地和建设用地的比例都有所增大。耕地贯穿该区并集中连片分布,建设用地散落于耕地周边靠近河流的区域,主要是农村居民

点用地。该区是生物多样性保护缓冲区和生物多样性保护限制区的过渡地带,对物种的扩散迁移阻力相对较高,对人为干扰的敏感性低于生物多样性保护核心区和缓冲区。该区应当保障现有生态用地的数量不再减少,质量不再降低。该区的水体主要是河流,要注意河流的防洪、防污工作,河流两岸要选取乡土植物种植绿化带,既利于保持水土,又可增加景观异质性,为生物多样性创造良好的栖息环境。东部的东沙河和减河附近有一部分林地分布,但受建设用地的影响,斑块比较破碎,应当对其进行生态恢复,降低破碎程度,打造绿色栖息地,促进物种的扩散。

生物多样性保护限制区的面积为 111.27 km²,占研究区总面积的 21.61%。该区内土地利用类型主要是耕地和建设用地,其中耕地占该区总面积的 62.69%,建设用地占 24.60%,耕地的比例较生物多样性保护过渡区有所下降,建设用地的比例有所上升。耕地贯穿该区,但破碎化程度较大,建设用地密度大,除了农村居民点用地外,还有较大面积的城镇建设用地和旅游设施用地,主要位于北部区域。该区实现生物多样性保护的阻力大,对人为干扰的敏感性低下,不适于物种栖息地的坐落,可发展对生态干扰较大的人类活动,如将大型旅游设施、商务中心等安排在此区。

生态廊道打通了生物多样性保护核心区之间的通道,增加了景观异质性,促进了物种的扩散迁移,构建生态廊道是实现生物多样性保护的重要渠道,应当重视生态廊道的建设。依据实际情况,可打造河流生态廊道和林地生态廊道。河流生态廊道要注意水质的保持,林地生态廊道要尽可能选取乡土植物,并区别于周边植被类型,以增加景观异质性,为更多种生物提供适合的廊道,推进生物多样性的保护。

连接生态廊道的战略点也是生物多样性保护的重要区域。应当降低人类活动对战略点附近生态环境的不良干扰,禁止在战略点周边安排生产建设。重构遭到破坏的战略点,重构时尽量打造林地等自然环境而非耕地等人文环境。北戴河新区有几处战略点的现状用地类型是耕地(如团林乡南部、茹荷镇中北和东北部的几处战略点),应逐步培育其为林地或水体。

4 结论

(1) 识别了研究区源地,源地占研究区总面积的 13.34%。综合考虑斑块自身特征属性和外界环境的影响,通过景观斑块质量评价对源地进行了识别。源地面积为 68.66 km²,占研究区总面积的 13.34%。

综合考虑斑块自身特征属性和外界环境的影响来识别源地,比直接识别更能相对准确地确定出生态功能最强、最需要保护的区域。

(2) 构建了研究区生物多样性保护安全格局并提出了生物多样性保护建议。构建了包括生物多样性保护核心区(源地)、生物多样性保护缓冲区(累积阻力Ⅰ级区)、生物多样性保护过渡区(累积阻力Ⅱ级区)、生物多样性保护限制区(累积阻力Ⅲ级区)、战略点和生态廊道的生物多样性保护安全格局,并针对格局内各组分的特征提出了相应的生物多样性保护建议。

由于本研究区是滨海平原地形,因而所选取的生物多样性保护阻力因子是针对滨海平原特征所选。其他地形区域如山地地区景观安全格局的构建可借鉴本文所述研究方法,但阻力因子的选取当有所区别,比如坡度、高程等也是影响景观安全格局的重要阻力因子。

参考文献:

- [1] 蒋志刚,马克平,韩兴国. 保护生物学[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,1997.
- [2] 李延梅,牛栋,张志强,等. 国际生物多样性研究科学计划与热点述评[J]. 生态学报,2009,29(4):2115-2123.
- [3] Hammond R A, Hudson M D. Environmental management of UK golf courses for biodiversity: attitudes and actions[J]. Landscape and Urban Planning, 2007, 83(2):127-136.
- [4] 俞孔坚,李迪华,段铁武. 生物多样性保护的景观规划途径[J]. 生物多样性,1998,6(3):205-212.
- [5] Tilman D, Fargione J, Wolff B, et al. Forecasting agriculturally driven global environmental change[J]. Science, 2001,292(5515):281-284.
- [6] Forman R T T. Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions[M]. Washington DC: Island Press, 2014.
- [7] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999(1):8-15.
- [8] Yu K. Security patterns in landscape planning: With a case in South China[D]. Cambridge: Harvard University, 1995.
- [9] 黄国平. 景观安全格局理论在风景区规划中的应用: 以湖南省武陵源风景名胜为例[D]. 北京: 北京大学, 2002.
- [10] 郭明,肖笃宁,李新. 黑河流域酒泉绿洲景观生态安全格局分析[J]. 生态学报, 2006,26(2):457-466.
- [11] 俞孔坚,王思思,李迪华,等. 北京市生态安全格局及城市增长预警[J]. 生态学报, 2009,29(3):1189-1204.
- [12] 李明阳,汪辉,张密芳,等. 基于景观安全格局的湿地公园生态适应性分区优化研究[J]. 西南林业大学学报, 2015,35(5):52-57.

- 中国生态农业学报, 2014, 22(4): 447-455.
- [7] Jabarin A S, Epplin F M. Impacts of land fragmentation on the cost of producing wheat in the rain-fed region of northern Jordan[J]. *Agricultural Economics*, 1994, 11(2/3): 191-196.
- [8] Wadud A, White B. Farm household efficiency in Bangladesh: a comparison of stochastic frontier and DEA methods[J]. *Applied Economics*, 2000, 32(13): 1665-1673.
- [9] 许庆, 田士超, 邵挺, 等. 土地细碎化与农民收入: 来自中国的实证研究[J]. *农业技术经济*, 2007(6): 67-72.
- [10] 王秀清, 苏旭霞. 农用地细碎化对农业生产的影响: 以山东省莱西市为例[J]. *农业技术经济*, 2002(2): 2-7.
- [11] 南峰, 李有利, 史兴民, 等. 新疆玛纳斯河流量波动与气候变化之间的关系[J]. *水土保持研究*, 2003, 10(3): 59-61.
- [12] 黄思琴, 陈英, 张仁陟, 等. 基于景观指数的耕地细碎化与农业经济水平的空间相关性分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2015(3): 238-244.
- [13] 孙美琴, 赵成义, 施枫芝, 等. 近 20 a 塔里木河干流区土地利用变化特征[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(1): 16-21.
- [14] Caves D W, Diewert W E. The economic theory of index numbers and the measurement of input, output, and productivity[J]. *Econometrica*, 1982, 50(6): 1393-1414.
- [15] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429-444.
- [16] 邓宗兵. 中国农业全要素生产率增长及影响因素研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [17] 张宁, 陆文聪. 中国农村劳动力素质对农业效率影响的实证分析[J]. *农业技术经济*, 2006(2): 74-80.
- [18] 赵芝俊, 张社梅. 近 20 年中国农业技术进步贡献率的变动趋势[J]. *中国农村经济*, 2006(3): 4-12.
- [19] Coelli T. A guide to DEAP version 2.1: a data envelopment analysis (computer) program[Z]. Australia: University of New England, 1996.
- [20] 张荣天, 焦华富. 中国省际耕地利用效率时空格局分异与机制分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(2): 277-287.
- [21] 李庆东, 王秋兵, 钱凤魁, 等. 农户耕地经营细碎化分析: 以辽宁省昌图县为例[J]. *广东农业科学*, 2010, 37(6): 230-232.
- [22] 李功奎, 钟甫宁. 农地细碎化、劳动力利用与农民收入: 基于江苏省欠发达地区的实证研究[J]. *中国农村经济*, 2006(4): 42-48.
- [23] 马永宏. 小型灌区农田水利渠道设计与施工分析[J]. *科技创新与应用*, 2016(1): 149-150.

~~~~~

(上接第 310 页)

- [13] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
- [14] 熊春妮, 魏虹, 兰明娟. 重庆市都市区绿地景观的连通性[J]. *生态学报*, 2008, 28(5): 2237-2244.
- [15] Heather Tallis, Taylor Ricketts, Anne Guerry, et al. InVEST 2.2.0 User's Guide[Z]. Stanford: The Natural Capital Project, 2011.
- [16] 吴健生, 张理卿, 彭建, 等. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别[J]. *生态学报*, 2013, 33(13): 4125-4133.
- [17] 吴季秋. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的海南八门湾海湾生态综合评价[D]. 海口: 海南大学, 2012.
- [18] 刘志伟. 基于 InVEST 的湿地景观格局变化生态响应分析: 以杭州湾南岸地区为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [19] 唐蜜. 县域生态系统非木材林产品产品服务功能评估研究: 以四川省宝兴县为例[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2010.
- [20] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning[J]. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1-16.
- [21] 傅伯杰, 陈利项, 马克明, 等. 景观生态学原理及应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- [22] 申彦舟. 县域景观生态安全格局研究[D]. 太原: 山西大学, 2013.
- [23] Yu K. Ecological security patterns in landscapes and GIS application[J]. *Geographic Information Sciences*, 1995, 1(2): 88-102.