

DOI: 10.5846/stxb201802060321

刘玉斌, 李宝泉, 王玉珏, 陈琳琳, 李晓炜, 侯西勇. 基于生态系统服务价值的莱州湾-黄河三角洲海岸带区域生态连通性评价. 生态学报, 2019, 39(20): 7514-7524.

Liu Y B, Li B Q, Wang Y J, Chen L L, Li X W, Hou X Y. Evaluation of ecological connectivity in the coastal zone of Laizhou Bay-Yellow River Delta based on ecosystem service value. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7514-7524.

# 基于生态系统服务价值的莱州湾-黄河三角洲海岸带区域生态连通性评价

刘玉斌<sup>1,2,3</sup>, 李宝泉<sup>1,3</sup>, 王玉珏<sup>1,3</sup>, 陈琳琳<sup>1,3</sup>, 李晓炜<sup>1,3</sup>, 侯西勇<sup>1,3,\*</sup>

1 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 烟台 264003

**摘要:** 基于最小累积费用模型(MCR)和生态连接度指数(ECI),对莱州湾-黄河三角洲海岸带区域的生态连通性进行综合评价。结果显示:(1)莱州湾-黄河三角洲海岸带区域生态连通性存在明显的陆海梯度变化特征,以海岸滩涂地带为中心向两侧辐射呈条带状递减;(2)2000—2015年生态连通性指数整体呈现明显的下降趋势,下降幅度达12.69%;城市化和交通等基础设施建设使区域人工障碍物集聚化和扩张趋势明显,加剧陆域生态景观的破碎化和孤岛化趋势,从而导致生态系统服务功能退化、生态连通性降低;(3)莱州湾-黄河三角洲海岸带区域生态连通性整体处于较低水平,极低连通性和低连通性分布面积占比最大,较高连通性区域呈现向次一级或更低等级连通性转变的趋势。不同等级生态连通性分布区域的转移变化反映了人类活动和自然因素双重干扰下莱州湾-黄河三角洲海岸带生态系统格局及其物质、能量、生物、信息流等的变化规律。研究将为莱州湾-黄河三角洲生态系统保护与海岸带综合管理提供相关科学参考。

**关键词:** 莱州湾-黄河三角洲; 土地利用; 生态系统服务价值; 生态连通性

## Evaluation of ecological connectivity in the coastal zone of Laizhou Bay-Yellow River Delta based on ecosystem service value

LIU Yubin<sup>1,2,3</sup>, LI Baoquan<sup>1,3</sup>, WANG Yujue<sup>1,3</sup>, CHEN Linlin<sup>1,3</sup>, LI Xiaowei<sup>1,3</sup>, HOU Xiyong<sup>1,3,\*</sup>

1 Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai 264003, China

**Abstract:** The ecological connectivity in the Laizhou Bay-Yellow River Delta coastal zone was evaluated by using the minimum cumulative resistance (MCR) and ecological connectivity index (ECI) methods. The results showed: (1) obvious gradient variation in ecological connectivity in the Laizhou Bay-Yellow River Delta, with the coastal beach zone as the centre and decreasing to both sides; (2) a significant overall downward trend of the connectivity index from 2000 to 2015, decreasing by 12.69%. Infrastructure construction, such as urbanization and transportation, has caused agglomeration and expansion of artificial obstacles, aggravating the trend of fragmentation and islanding of the ecological landscape, resulting in the degradation of ecosystem services and decreasing ecological connectivity; (3) generally low ecological connectivity in the Laizhou Bay-Yellow River Delta, with the areas of extremely low connectivity and low connectivity

基金项目: 中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-STZ-ZDTP-023); 中国科学院烟台海岸带研究所自主部署项目(YICY755021012); 中国科学院地球大数据科学工程专项(XDA19060205); 国家自然科学基金项目(31500389)

收稿日期: 2018-02-06; 网络出版日期: 2019-08-19

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xyhou@yic.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

accounting for the largest proportion while the area of higher connectivity showed a trend toward secondary or lower level connectivity. The transfer and distribution of different levels of ecological connectivity areas reflect the change of ecosystem pattern and material, energy, biology, and information flow in the Laizhou Bay-Yellow River Delta under the dual influence of human activities and natural factors. These results provide relevant scientific reference for ecosystem protection and integrated coastal zone management in Laizhou Bay-Yellow River Delta.

**Key Words:** Laizhou Bay-Yellow River Delta; land use; ecosystem services value; ecological connectivity

在全球气候变化和人类高强度开发的背景下,生态景观格局破碎化及孤岛化,生物多样性减少、生态系统服务价值丧失、生态连通性降低等问题相继产生并日趋严重,特别是海岸带区域表现尤为突出<sup>[1]</sup>。海岸带区域处于陆海交互地带,是全球环境变化的缓冲区,也是人类活动最为频繁的地区,因其独特的位置与环境,成为物质循环、能量流动和物种迁移演变最为活跃的地区之一,其生态系统在调节气候、涵养水源、净化环境、生物多样性维持等方面发挥着不可替代的重要作用<sup>[2]</sup>。然而,不合理的高强度人类活动,使海岸带滨海湿地生态系统的物质循环和能量流动受到严重干扰,原有生态系统组分和有机结构受到破坏,整体生态服务功能和生态连通性无法正常发挥<sup>[3]</sup>,此问题受到越来越多的生态学、环境学、地理学等领域的专家学者的关注<sup>[4]</sup>。

学者对于生态连通性研究多聚焦于陆域,对海岸带区域的陆-海生态连通性的研究鲜有<sup>[5-7]</sup>。陆-海生态连通性是指陆地-潮间带-浅海区域通过水文、生物、地质和地球化学过程的耦合连通<sup>[8-9]</sup>。与陆域相比,海岸带区域受复杂的界面和过程的影响,其生态连通性具有显著的复杂性和动态性,相关研究具有一定的滞后性和复杂性<sup>[9]</sup>。对于海岸带区域生态连通性的研究工作亟待开展,而莱州湾-黄河三角洲海岸带处于河-海-陆交汇处,气候变化和人类活动的影响广泛而深刻,是环境变化的敏感区、环境灾害的多发区、矿产资源的富集区、人类高强度开发区,环境特征的多重界面性和复杂性使其成为关注的焦点区域。该区域拥有世界上独一无二的黄河入海口三角洲湿地,是东北亚环西太平洋鸟类迁徙的重要“中转站”及越冬、栖息和繁殖地,是开展海岸带生态连通性研究的理想场所。因此,本文针对该区域生态连通性的现状和变化特征进行研究,以期对滨海湿地生态系统保护和修复、生物多样性保护、海岸带综合管理等提供信息与决策支持。

## 1 研究区、数据和方法

### 1.1 研究区概况

莱州湾-黄河三角洲位于渤海的南岸和西南岸,是典型的河口三角洲海岸和淤泥质海岸,介于117°32'E—120°43'E,36°25'—38°24'N之间(图1)。其滩涂辽阔,东段为海成堆积沙岸,南段是淤泥质堆积海岸,西段为黄河三角洲堆积沙岸;属暖温带半湿润大陆性季风气候,自然生态系统复杂多样,自然资源丰富<sup>[10-11]</sup>。莱州湾-黄河三角洲区域是黄河三角洲高效生态经济区核心的建设区和山东半岛蓝色经济区的产业集聚区,是国家海洋发展战略和区域协调发展的重要建设区域,也是实现我国区域发展从陆域经济延伸到海洋经济和积极推进陆海统筹重大战略的先行区,在全国处于举足轻重地位。本文研究区的陆域范围以行政边界为标准确定,选取莱州湾-黄河三角洲区域的14个市县区,自西向东包括无棣县、沾化县、河口区、利津县、垦利县、东营市市辖区、广饶县、寿光市、潍坊市市辖区、昌邑市、平度市、莱州市、招远市和龙口市;海域则以-6m等深线来控制边界。

### 1.2 数据来源

从中国沿海土地利用数据<sup>[12,13]</sup>中提取莱州湾-黄河三角洲区域的数据,该数据集将我国海岸带土地利用划分为8个一级类型、24个二级类型<sup>[14]</sup>,目前已建立了2000、2005、2010和2015年的数据产品。本文选用2000年和2015年的土地利用数据,使用24个二级类型层面的信息,同时,为便于讨论,将浅海水域单列,从而将土地利用数据的一级类型重分类为耕地、林地、草地、建设用地、内陆水体(淡水)、滨海湿地(咸水)、浅海

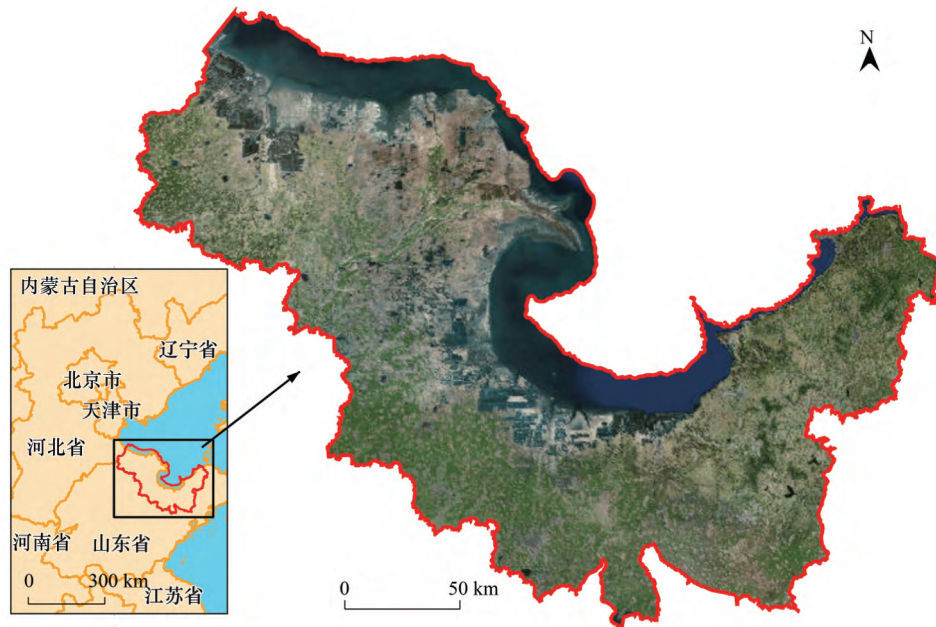


图 1 莱州湾-黄河三角洲区域位置、范围与概貌示意图

Fig.1 The location, scope and outline of Laizhou Bay-Yellow River Delta

水域、人工湿地(盐田养殖)和未利用地 9 大类。2 个年份的土地利用数据构成本文研究的最主要数据源。

### 1.3 研究方法

本文采用最小累积费用距离模型(MCR)进行生态连通性评价,“源”和“阻力面”是其最基本的 2 个概念。“源”指功能的耗费中心,阻力面则是实现某种生态过程需要克服的景观阻力<sup>[15]</sup>。根据国内外相关研究结果,并结合莱州湾-黄河三角洲海岸带区域土地利用的现状特征,确定生态功能源,并计算 9 种土地利用类型的生态系统服务价值,利用生态系统服务价值构建阻力面。以生态功能区为“源”,依据生态系统服务价值构建的阻力面,利用 ArcGIS 软件中 Cost Distance 计算最小累积阻力和综合累积阻力,基于此计算莱州湾-黄河三角洲区域的生态连通性。主要过程如下:

#### 1.3.1 生态系统服务价值估算

生态系统服务是指生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用。生态系统服务有着极高甚至无法计量的价值,与人类福祉关系极其密切。Costanza 等<sup>[16]</sup>提出的生态系统服务价值评估体系是迄今为止应用最为广泛的方法,本文应用该方法估算生态系统服务价值,其公式为:

$$ESV = \sum_{i=1}^n A_i \times VC_i \quad (1)$$

式中,ESV 是生态系统服务总价值; $A_i$ 是研究区  $i$  类土地利用类型的面积( $i=1, 2, 3, \dots, n$ );  $VC_i$ 为生态系统服务功能的价值参数,即单位面积的生态系统服务价值。

参考 Costanza 和千年生态系统服务分类体系,将生态系统服务划分为食物生产、原材料生产、气候调节、水文调节、废物处理、保持土壤、生物多样性、娱乐文化共 8 项。其中气候调节功能还包括气体调节和干扰调节,保持土壤包括土壤形成、营养循环、侵蚀控制 3 项功能,生物多样性包括授粉、生物控制、栖息地、基因(遗传)资源 4 项功能。借鉴相关研究成果<sup>[16-21]</sup>,利用效益转移法(BT, Benefit function transfer)法获得莱州湾-黄河三角洲海岸带区域不同土地利用类型生态系统服务的单价,其中,浅海水域价值为均值,其余土地利用类型直接采用效益转移法;计算过程中,利用居民消费价格指数(CPI, Consumer Price Index)和生产价格指数(PPI, Purchasing Power Parity)转换为 2015 年物价水平<sup>[22]</sup>,如表 1。

<http://www.ecologica.cn>

表 1 莱州湾-黄河三角洲区域各类土地利用生态服务单价/(元/hm<sup>2</sup>)

Table 1 Summary of monetary values for different land use of the Laizhou Bay-Yellow River Delta

生态服务类型 Ecological service functions	耕地 <sup>[17]</sup> Farmland	林地 <sup>[18]</sup> Forest	草地 <sup>[18]</sup> Grassland	内陆水体 <sup>[17]</sup> Inland freshwaters	滨海湿地 <sup>[18]</sup> Coastal saltwater	浅海水域 <sup>[16, 18-19]</sup> Shallow water	人工湿地 <sup>[20]</sup> Human made wetland	未利用地 <sup>[21]</sup> Unused
食物生产 Food production	559.79	2753.18	10975.88	296.69	10230.04	17316.74	37846.40	15.08
原材料生产 Raw materials	218.32	1666.64	497.23	195.93	6160.12	213.2	0.00	0.00
气候调节 Gas regulation	946.05	1399.61	368.32	1438.67	49870.29	4660.49	0.00	0.00
水文调节 Water regulation	431.04	1758.72	552.48	10507.29	11206.08	246.34	9010.57	45.62
废物处理 Waste treatment	778.11	64.46	690.60	8312.91	1492839.85	0.00	0.00	15.08
保持土壤 Soil formation and conservation	822.90	902.38	405.15	229.51	36592.42	176939.08	0.00	30.41
生物多样性 Biodiversity	570.99	10101.13	11178.46	1920.08	157805.95	1148.40	0.00	517.41
娱乐文化 Recreation	95.17	9115.88	1777.14	2485.47	20193.05	7135.15	5070.21	15.08
总计 Total	4422.37	27762.00	26445.26	25386.55	1784897.80	207659.40	51927.18	638.68

建设用地为 0

### 1.3.2 最小累积费用距离模型

最小累积费用距离模型(MCR)是指模拟生态流从“源”经过具有不同生态服务功能的景观过程中所需要耗费的费用或克服阻力所做的功<sup>[15]</sup>。最小累积费用距离模型被认为是景观水平上进行景观连接度评价的最好工具之一,最早由 Knaapen 等提出,其关键因素包括源地、距离和介质要素,计算公式如下:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=m}^{i=n} D_{ij} \times R_i \quad (2)$$

式中: MCR 为最小累积阻力值;  $f$  表示空间任意点的最小阻力值与其到所有源的距离和景观基质特征的正相关关系;  $D_{ij}$  表示从源  $j$  出发穿过阻力面到达任意点  $i$  的距离;  $R_i$  表示空间点  $i$  到最近源的阻力值。

生态功能区即“源”的确定是陆海生境研究的基础,依据景观生态源和汇的理论,生态功能源应具有一定的空间扩展性和连续性,面积较小的生态用地“孤岛”通常不具备维持区内生物多样性的功能,参考国内外已有研究确定适用的最小面积限制阈值<sup>[23-25]</sup>,如表 2。

表 2 莱州湾-黄河三角洲区域生态功能区划分

Table 2 Division of ecological functional zones of the Laizhou Bay-Yellow River Delta coastal zone

生态功能区 Ecological functional area	判别标准 Discriminant standard	土地利用类型 Land use type	编码 Coding
水生态区 Water ecological zone	100 hm <sup>2</sup>	浅海水域、河渠、湖泊、水库坑塘、河口水域等	$R_1$
滨海湿地生态区 Coastal wetland ecological zone	30 hm <sup>2</sup>	河口三角洲湿地、滩涂	$R_2$
林地生态区 Forest ecological zone	40 hm <sup>2</sup>	有林地、疏林地、灌丛林地、其他林地	$R_3$
草地生态区 Grassland ecological zone	60 hm <sup>2</sup>	高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地	$R_4$

阻力面很大程度上表征了生态流从“源”经过具有不同生态系统服务功能的景观过程中所需克服的阻力。生态系统服务价值是衡量生态系统功能的重要指标,其高低可表征生态系统间物质、能量、信息流运动的难易程度。利用生态系统服务价值构建阻力面能大大克服人为赋值构建阻力面的主观性,更好地反映生态系统间生物流的状态,公式如下<sup>[26]</sup>:

$$CV_i = (ESV_{\max} - ESV_i) / (ESV_{\max} - ESV_{\min}) \quad (3)$$

<http://www.ecologica.cn>

式中:  $CV_i$  表示  $i$  像元的阻力系数值,  $ESV_i$  为第  $i$  个像元生态系统服务价值,  $ESV_{\max}$ 、 $ESV_{\min}$  分别是给定区域内生态系统服务价值的最大值和最小值。

### 1.3.3 生态连接度指数

生态连接度指数 (ECI) 用于描述不同景观斑块在物质、能量、物种的流动迁移以及生态结构、过程、功能间的有机联系。以区域生态功能分区斑块为“源”, 相对生态系统服务价值强度为阻力面计算综合累积费用阻力面, 进而计算生态连接度<sup>[23-27]</sup>, 公式如下:

$$d_i = \sum_{r=1}^m d_{ri} \quad (4)$$

$$ECI_i = 10 - 9 \frac{\ln(1 + (d_i - d_{\min}))^b}{\ln(1 + (d_{\max} - d_{\min}))^a} \quad (5)$$

式中  $d_i$  指第  $i$  个像元到各生态功能区的总耗费距离;  $d_{ri}$  指第  $i$  个像元到第  $r$  种生态类型区的耗费距离;  $d_{\max}$ 、 $d_{\min}$  是给定区域像元到各生态功能区总耗费距离  $d_i$  的最大值和最小值, 为使得不同时期的 ECI 具有可比性, 最大值取多时期最大值;  $a$ 、 $b$  均为正整数,  $b \ll a$ , 参考相关文献<sup>[23-27]</sup> 取  $a=b=1$ ;  $ECI_i$  为第  $i$  个像元的生态连接度指数。

## 2 结果与分析

### 2.1 生态系统服务价值时空变化特征

#### 2.1.1 时间变化特征

莱州湾-黄河三角洲生态系统服务价值如表 3 所示, 2000—2015 年, 莱州湾-黄河三角洲生态系统服务价值下降显著, 滨海湿地生态系统服务价值损失最大。2000 年生态系统服务总价值为 4692.59 亿元, 到 2015 年下降为 3011.93 亿元, 15 年间减少了 1680.66 亿元, 降幅高达 35.82%。不同土地类型所提供的生态系统服务价值不同, 其中, 滨海湿地的生态系统服务价值占比最大, 高达 65% 以上, 除人工湿地外, 其余各土地类型的生态系统服务价值都在减少。滨海湿地生态服务价值减少 1704.75 亿元, 降幅最大, 达 45.85%; 草地、浅海水域生态服务功能价值总量减少较多, 为 16.63、15.83 亿元, 耕地、林地和未利用地生态系统服务价值总量损失较小, 为 1.10、1.15、0.18 亿元, 其中未利用地的降幅最大, 达 30.51%; 人工湿地价值量增加了 62.58 亿元, 增幅高达 94.13%。城镇扩张、工矿交通建设用地、盐田及养殖区域扩张, 导致滩涂、河口三角洲湿地、耕地、林草地等被侵占, 是造成生态系统服务价值减少的主要原因。

表 3 莱州湾-黄河三角洲生态服务价值变化

Table 3 The change of ecological service value in the Laizhou Bay-Yellow River Delta

土地利用类型 Land use type	2000 年价值 / (10 <sup>8</sup> 元) 2000 value	2015 年价值 / (10 <sup>8</sup> 元) 2015 value	变化量 / (10 <sup>8</sup> 元) Change	变化率 / % Rate of change
耕地 Farmland	63.26	62.16	-1.10	-1.74
林地 Forest	17.99	16.84	-1.15	-6.39
草地 Grassland	55.82	39.19	-16.63	-29.79
建设用地 Built-up	0.00	0.00	0.00	0.00
内陆水体 Inland freshwaters	32.20	28.6	-3.60	-11.18
滨海湿地 Coastal saltwater	3718.09	2013.34	-1704.75	-45.85
浅海水域 Shallow water	738.16	722.33	-15.83	-2.14
人工湿地 Human made	66.48	129.06	62.58	94.13
未利用地 Unused	0.59	0.41	-0.18	-30.51
总计 Total	4692.59	3011.93	-1680.66	-35.82

#### 2.1.2 空间分布特征

由图 2、图 3 可知: 2000 年和 2015 年莱州湾-黄河三角洲海岸带生态系统服务价值空间分布呈现一定的

规律性,存在明显的陆海梯度变化特征,整体上以海岸滩涂地带为中心向两侧辐射呈条带状递减,2015年单位面积生态系统服务价值远低于2000年。生态系统服务价值高值区主要分布于莱州湾-黄河三角洲沿海滩涂湿地区域,受人为干扰较少的黄河三角洲自然保护区最为突出,高值区呈块状或孤岛状为生态环境较好的地区;低值区主要集中于人类高强度开发区,如城镇建设、工矿交通、养殖围垦等。

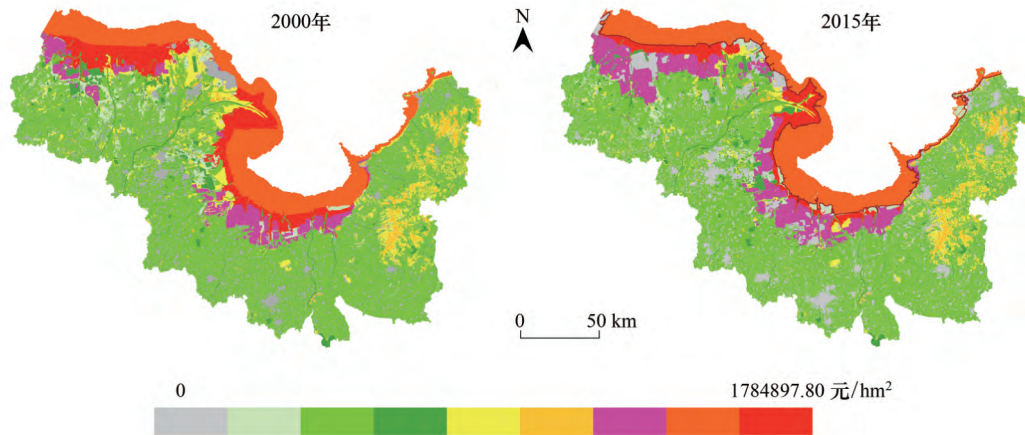


图2 莱州湾-黄河三角洲生态系统服务价值空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecosystem services in the Laizhou bay-Yellow River Delta

2000—2015年莱州湾-黄河三角洲海岸带生态系统服务价值既有上升区,也有下降区,整体上下降区分布更广,上升区小而分散(图4)。从空间分布来看,莱州湾-黄河三角洲海岸带生态系统服务价值表现出沿海滩涂地区变化幅度大于内陆地区的特征,变化剧烈地区主要集中于沿海20km范围内。与2000年相比,2015年莱州湾-黄河三角洲生态系统服务价值骤降,下降幅度最大的区域主要集中于沿海滩涂地带,尤其是黄河三角洲滨海湿地和莱州湾沿岸滨海湿地降幅非常显著;生态系统服务价值上升幅度最大区域主要集中于生态环境改善地区和新生湿地地区,黄河三角洲新生湿地为最典型区域。

## 2.2 生态连通性时空变化特征

### 2.2.1 空间分布特征

莱州湾-黄河三角洲海岸带区域生态连通性变化呈明显陆海梯度特征(图5),整体上以海岸滩涂地带为中心向外辐射呈带状递减。由于生态系统物质、能量、生物信息流经过具有不同生态服务功能景观的过程中所需克服的阻力不同,经过自然景观的阻力显著小于人为景观,连通性空间分布存在显著差异。连通性高值区集中于人为干扰少、生态系统服务价值高的海岸带滩涂或三角洲湿地地区,低值区多集中于人为干扰活动剧烈的地区,例如,城镇用地、农村居民点、工矿用地、交通用地等建设用地地区。

2000年近海地区生态连通性指数值较高的区域大体呈“2”状分布,但在东营港及其毗邻区域存在间断,2015年其空间的连续性进一步被削弱;高值区呈现“孤岛”状分布,而且连通性指数下降幅度最大,到2015年最高连通性区域几乎消失。这主要由于近海地区大规模经济的开发和建设活动,如港口建设、城镇建设、工矿交通、养殖围垦等侵占滨海湿地,导致近海湿地生态破碎化及孤岛化日趋严重,生态系统退化、生物多样性减

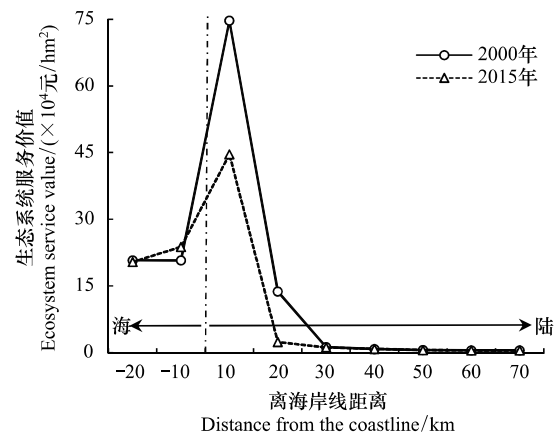


图3 莱州湾-黄河三角洲生态系统服务价值的海陆梯度特征

Fig.3 Land and sea gradient characteristics of ecosystem service value in the Laizhou Bay-Yellow River Delta



少、生态系统服务价值丧失等一系列问题相继产生;近海海岸带地区的人类高强度开发,阻碍了生态系统间的物质、能量、生物信息流的交互和流通,使得近海生态连通性大大降低。2000年内陆区域生态连通性呈连续的“C”形,到2015年这种“C”形呈明显的扩张趋势,连通性低值区面积增加最大。快速城市化过程和交通等基础设施的建设使区域人工障碍集聚化、扩张现象明显,加剧莱州湾-黄河三角洲区域生态景观的破碎化和孤岛化趋势,从而导致生态系统服务功能退化、生态连通性降低。

通过计算单位时间内生态连通性指数的变化幅度,反映莱州湾-黄河三角洲生态连通性的动态变化速率情况,结果如图6所示。分析可知,该区域生态连通性变化最显著的地区呈“块状”或“孤岛状”分布,多集中于黄河三角洲国家级自然保护区和沿海滩涂地区,绝大部分区域连通性呈下降趋势,仅有少部分地区连通性呈上升趋势,自然景观连通性下降幅度远大于人文景观。生态连通性增长的区域集中于新生滩涂湿地和植树造林、

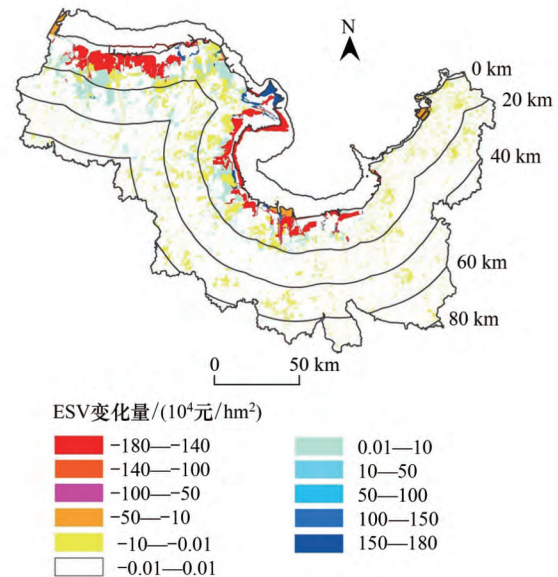


图4 莱州湾-黄河三角洲生态系统服务价值空间变化分布

Fig.4 Spatial change distribution of ecosystem services in the Laizhou Bay-Yellow River Delta

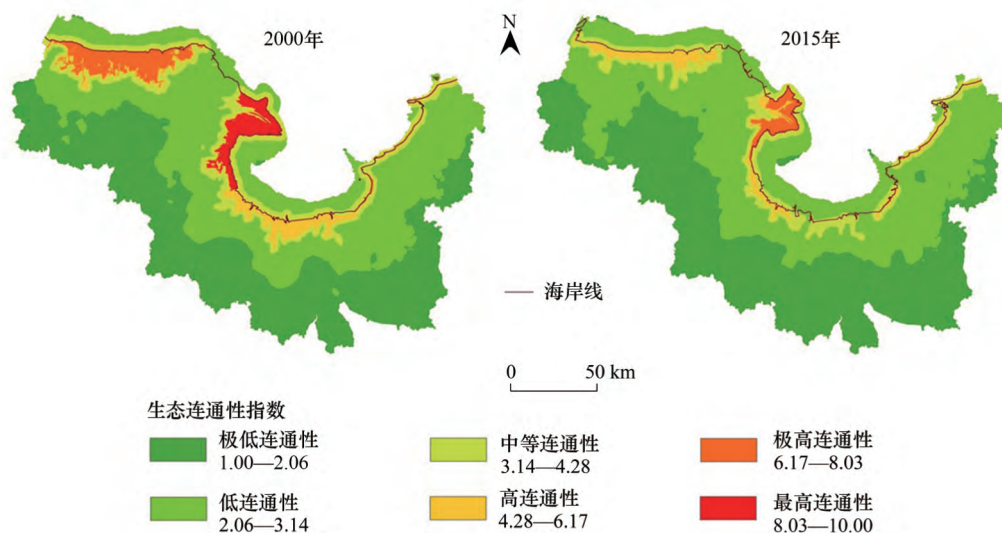


图5 莱州湾-黄河三角洲海岸带区域生态连通性分级图

Fig.5 Ecological connectivity classification map of the Laizhou Bay-Yellow River Delta

水库修建等生境改善区域,连通性增幅最大区域为黄河入海口附近的新生滩涂湿地,其余增幅较小的地区呈零星的“孤岛”状分布;生态连通性降低的区域集中于黄河故道附近的自然湿地和沿海的滩涂湿地,黄河故道地区生态连通性动态变化最为剧烈,生态连通性下降幅度最大。可见,由于人为因素和自然因素的双重作用,导致黄河三角洲生态连通性动态变化。

### 2.2.2 时间变化特征

2000—2015年间,莱州湾-黄河三角洲海岸带区域生态连通性指数整体呈现明显的下降趋势,降幅达12.69%。该区域生态连通性空间分布特征如图5,不同等级区域之间的相互转移特征如表4,2000年和2015年生态连通性中较低连通性分布面积占比最大,极低连通性分布面积所占比重分别为39.35%、43.34%,低连

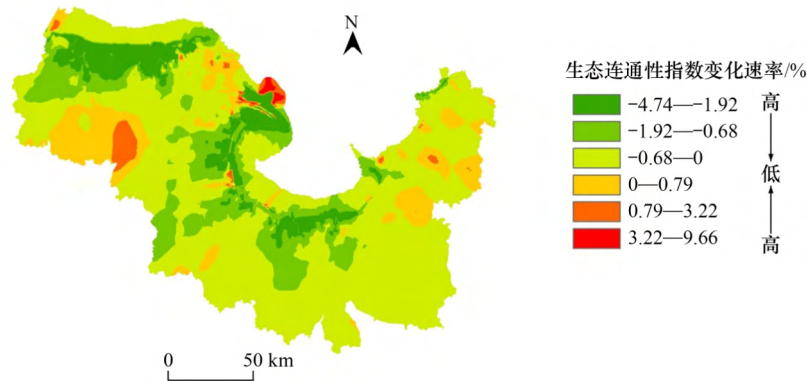


图 6 莱州湾-黄河三角洲生态连通性指数动态变化速率

Fig.6 Change rate of ecological connectivity index in Laizhou Bay-Yellow River Delta

通性分布面积比重为 41.09%、43.78%; 中等连通性分布面积占比较大, 分别为 9.13%、8.07%; 较高连通性分布面积所占比重很小, 高连通性为 4.58%、3.42% 极高连通性为 3.47%、1.35% 最高连通性 2000 年为 2.37% 而 2015 年仅为 0.04%。2015 年极低和低水平连通性分布面积大大增加, 中等连通性分布面积水平变化幅度较小, 较高连通性分布面积(高、极高、最高连通性)下降显著, 生态连通性整体处于较低水平。从不同连通性等级转移变化分析来看, 2000—2015 年的低连通性区域主要转为极低连通性, 中等连通性区域变为低连通性, 高连通性区域转移变化较为复杂, 主要转变为中低连通性, 极高连通性区域主要向中高连通性转变, 最高连通性区域减少显著, 主要转为中高连通性和极高连通性。不同连通性转移变化反映出人类活动和自然因素双重干扰下海岸带土地利用的变化特征及其影响下物质、能量、生物信息流的变化规律。

表 4 2000—2015 年间生态连通性不同等级区域面积转移矩阵/hm<sup>2</sup>

Table 4 Area transfer matrix of different levels of ecological connectivity from 2000 to 2015

2000	2015						合计 Total	占比/% Proportion
	极低连通性 Extremely low	低连通性 Low	中等连通性 Medium	高连通性 High	极高连通性 Very high	最高连通性 Highest		
极低连通性 Extremely low	1072872.65	51370.51	0.00	0.00	0.00	0.00	1124243.16	39.35
低连通性 Low	165199.43	995615.28	10366.74	1627.74	1156.68	0.00	1173965.87	41.09
中等连通性 Medium	152.91	138112.73	112782.86	5948.71	3964.86	0.00	260962.07	9.13
高连通性 High	3.06	36974.52	64198.58	27211.57	2482.72	93.47	130963.92	4.58
极高连通性 Very high	0.00	24186.96	27020.25	46961.91	1026.99	65.61	99261.72	3.47
最高连通性 Highest	0.00	4590.54	16216.29	16053.66	29849.22	1083.34	67793.05	2.37
合计 Total	1238228.05	1250850.54	230584.72	97803.59	38480.47	1242.42	2857189.79	
占比 Proportion/%	43.34	43.78	8.07	3.42	1.35	0.04		100

### 2.2.3 不同土地利用类型生态连通性数值变化特征

莱州湾-黄河三角洲海岸带区域不同土地利用内部生态连通性结构分析显示(表 5), 不同年份的同种土地利用的生态连通性结构既有相似性也具有一定的差别, 相同年份不同土地利用类型的生态连通性结构差异性显著。绝大多数土地利用类型中, 低连通性和极低连通性区域占比最大。2000 年和 2015 年耕地中极低连通性区域所占比重最大, 极低连通性均达 60% 以上, 2015 年极低连通性区域比重上升最大, 其他呈现相反趋势。林地中低连通性区域比重最大, 均高达 70% 以上, 与林地类似, 草地中的低连通性区域占比也最大, 均达 50% 以上。建设用地极低连通性比重最大, 低连通性次之, 极低连通性均 50% 以上, 低连通性均在 35% 以上, 高连通性区域微乎其微。滨海湿地区域, 其中、高连通性和极高连通性比重较大, 与 2000 年相比, 2015 年滨海湿地连通性下降显著, 2000 年极高连通性占比最大, 为 45.36%, 高、最高连通性次之, 分别占比 21.55%、



32.43% 2015 年高连通性区域占比最大为 53.35% ,中等、极高连通性次之 ,分别为 11.35%、33.39% ,最高连通性区域比例下由 32.43% 减至 1.06% ,降幅最大。人工湿地和未利用地 ,其极低、低、中等连通性区域所占比重较大。总的来说 ,莱州湾-黄河三角洲海岸带较高连通性区域呈现向次一级或更低等级连通性转变的趋势。

表 5 2000 和 2015 年不同土地利用类型不同生态连通性等级面积比例 / %

Table 5 Different land use types of different ecological connectivity grade area ratio in 2000 and 2015

土地利用类型 Land use type	极低连通性 Extremely low		低连通性 Low		中等连通性 Medium		高连通性 High		极高连通性 Very high		最高连通性 Highest	
	2000	2015	2000	2015	2000	2015	2000	2015	2000	2015	2000	2015
	耕地 Farmland	60.46	64.99	36.72	33.61	2.47	1.33	0.34	0.07	0.01	0.00	0.00
林地 Forest	19.53	19.47	71.9	72.83	4.08	4.32	3.95	3.00	0.51	0.36	0.03	0.02
草地 Grassland	21.76	30.47	54.8	55.26	15.96	10.38	6.88	3.82	0.58	0.07	0.02	0.00
建设用地 Built-up	56.57	54.75	38.95	39.11	3.31	5.61	1.14	0.52	0.03	0.01	0.00	0.00
内陆水体 Inland freshwaters	28.11	36.58	47.28	49.71	14.13	9.61	9.67	4.08	0.79	0.02	0.02	0.00
滨海湿地 Coastal saltwater	0.00	0.00	0.02	0.85	0.64	11.35	21.55	53.35	45.36	33.39	32.43	1.06
浅海水域 Shallow water	0.62	2.02	62.82	70.72	28.08	22.88	8.01	4.25	0.45	0.12	0.02	0.01
人工湿地 Human made	0.13	1.09	51.6	73.16	36.97	23.25	11.23	2.49	0.07	0.01	0.00	0.00
未利用地 Unused	29.49	33.56	47.17	43.64	16.22	20.03	6.81	2.76	0.28	0.01	0.03	0.00

从不同土地利用类型面积的数值变化看(表 6) ,自然景观面积总体减少 ,人工景观面积总体增加 ,其中人工湿地面积增加最多 ,城乡建设用地和工矿交通用地次之 ,滨海湿地、草地、耕地、未利用地面积减少显著 ,林地、浅海水域面积略有减少。不同土地利用类型连通性等级的面积变化不同 ,耕地极低连通性面积增加最多 ,中、低连通性面积减少明显;林地在低连通性面积减少最多;草地中、低连通性面积减少显著;建设用地在低连通性和极低连通性等级面积大幅增加 ,尤其极低连通性区面积增加最为显著;滨海湿地其极高、最高连通性面积降幅较大 ,中、高连通性面积有所增加;人工湿地用地其中、低连通性和极低连通性面积增加 ,高连通性面积减少;未利用地在所有等级连通性面积均减少 ,低连通性面积减少最多。2015 年极低连通性和低连通性面积增长明显 ,相比 2000 年 ,低连通性区域面积增加最大 ,增加 113984.87hm<sup>2</sup> ,极低连通性新增 76884.67hm<sup>2</sup>;中等连通性区域减少 30377.35hm<sup>2</sup> ,高连通性减少 33160.34hm<sup>2</sup> ,极高连通性区域面积减少 60781.25hm<sup>2</sup> ,最高连通性减少最多 ,减少 66550.6hm<sup>2</sup>。

表 6 2000—2015 年不同土地利用类型不同等级生态连通性分布面积的变化 /hm<sup>2</sup>

Table 6 Changes of distribution area of ecological connectivity for different types of land use types from 2000 to 2015

土地利用类型 Land use type	极低连通性 Extremely low	低连通性 Low	中等连通性 Medium	高连通性 High	极高连通性 Very high	最高连通性 Highest	合计 Total
耕地 Farmland	48726.08	-52816.47	-16580.10	-3895.13	-182.49	-18.37	-24766.48
林地 Forest	-842.22	-2421.49	-21.23	-739.24	-115.07	-5.97	-4145.22
草地 Grassland	-771.04	-33788.50	-18303.94	-8859.22	-1125.12	-47.24	-62895.06
建设用地 Built-up	59617.38	46120.91	12056.78	-869.89	-45.73	-2.60	116876.85
内陆水体 Inland freshwaters	5565.31	-3961.41	-7090.70	-7677.99	-982.90	-28.59	-14176.28
滨海湿地 Coastal saltwater	0.00	910.50	11460.24	15302.86	-56824.39	-66358.93	-95509.72
浅海水域 Shallow water	4837.13	22694.31	-20229.63	-13689.22	-1180.18	-56.43	-7624.02
人工湿地 Human made	2548.04	115767.53	10453.91	-8190.00	-72.43	-4.31	120502.74
未利用地 Unused	-5695.81	-15620.71	-2122.68	-4542.51	-252.94	-28.16	-28262.81
合计 Total	113984.87	76884.67	-30377.35	-33160.34	-60781.25	-66550.6	0

### 3 结论

莱州湾-黄河三角洲海岸带区域生态连通性空间分布呈现一定的规律性 ,存在明显的陆海梯度变化特征 ,

整体上以海岸滩涂地带为中心向两侧辐射呈条带状递减。连通性高值区集中于人为干扰少生态系统服务价值高的海岸带滩涂或三角洲湿地区域, 低值区多集中于人为干扰活动剧烈的地区, 如 城镇用地、农村居民点、工矿用地、交通用地等建设用地区域。

生态连通性变化最为显著的地区呈“块状”或“孤岛”状分布。增长区域集中于新生滩涂湿地和植树造林、水库修建等生境改善区域, 黄河入海口新生滩涂湿增幅最大, 其余增幅较小的地区呈零星的“孤岛”状分布; 降低区域集中于黄河故道附近的自然湿地和沿海的滩涂湿地, 黄河故道地区生态连通性动态变化最为剧烈, 下降幅度最大。

莱州湾-黄河三角洲海岸带区域生态连通性整体处于较低水平, 极低连通性和低连通性分布面积的占比最大。2000—2015 年间, 生态连通性指数整体呈现明显的下降趋势, 降幅达 12.69%; 极低和低水平连通性区域比例均有所增加, 中等连通性分布面积变化幅度较小, 极高连通性分布面积下降显著; 从不同连通性等级面积转移变化分析来看, 较高连通性区域向中低连通性转换, 转移变化部分主要向次一级或更低等级连通性转变。不同连通性转移变化反映出人类活动和自然因素双重干扰下的莱州湾-黄河三角洲海岸带土地利用变化及其物质、能量、生物信息流的变化规律。

#### 4 讨论

海岸带生态系统是自然环境和人类社会相互作用最频繁、最活跃的地带, 作为人类经济社会活动高度密集区和海陆物质能量交互区, 在全球气候变化及人类活动加剧的背景下, 海岸带生态环境面临诸多严峻挑战, 生态脆弱性突出, 给海岸带生态环境和经济社会的可持续发展带来了空前的压力。莱州湾-黄河三角洲是我国海岸带区域资源开发利用以及经济社会发展的典型和缩影, 大规模围填海、产业发展、快速城市化过程和交通等基础设施的建设使区域人工障碍物集聚化、扩张现象明显, 引起莱州湾-黄河三角洲区域的生态环境退化和生态系统的严重失衡, 不仅对多时空尺度下的生物多样性和生态系统服务造成威胁, 还对陆海生态连通性造成了不可逆转的扰乱与毁坏。

莱州湾-黄河三角洲区域生态连通性问题日益凸显, 已成为当前亟待解决的关键问题之一。因此, 当前及未来时期, 需关注海岸带区域生态连通性问题, 建议如下: 统筹莱州湾-黄河三角洲经济社会和生态环境的协调发展, 加强环境监测, 合理利用生物资源, 建立海岸带生态系统保护和持续利用新模式, 解决该区域社会经济的发展 and 生态环境保护日益凸显的矛盾; 加大生态连通性科研投入, 开展多时空尺度生境间生态联系研究和生态连通性实验性研究; 建设具有弹性的生态保护网络, 将生态连通性纳入陆海生态系统管理研究中; 定期对区域生态连通性进行评估, 从而全面把握变化趋势, 采取更合理的措施。

本文基于生态服务价值评估莱州湾-黄河三角洲海岸带区域生态连通性, 其阻力面构建基于生态服务价值, 一定程度上减少人为赋值的主观性。生境源既考虑陆地, 也考虑浅海水域, 其计算的生态连通性指数, 可有效地识别生态连通性高值、低值区, 结果能综合反映该区域生境中物质能量信息的流通难易程度, 从宏观角度揭示区域生态连接度规律。由于海岸带区域处于复杂动态变化之中, 物质流、生物信息流交互流过程复杂, 在未来研究中, 将进一步考虑高程、湿地景观带自身演变等因素对连通性的影响, 从微观角度分析其相互作用机制, 探索宏观与微观相结合下的生态连通性问题, 关注景观格局与多个生态过程之间相互作用机制方面的连通性问题。

#### 参考文献(References):

- [1] 徐彩瑶, 濮励杰, 朱明. 沿海滩涂围垦对生态环境的影响研究进展. 生态学报, 2018, 38(3): 1148-1162.
- [2] 骆永明. 中国海岸带可持续发展中的生态环境问题与海岸科学发展. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1133-1142.
- [3] 靳宇弯, 杨薇, 孙涛, 李铭. 围填海活动对黄河三角洲滨海湿地生态系统的影响评估. 湿地科学, 2015, 13(6): 682-689.
- [4] 于贵瑞, 于秀波. 近年来生态学研究热点透视——基于“中国生态大讲堂”100 期主题演讲的总结. 地理科学进展, 2014, 33(7): 925-930.

- [5] 李慧,李丽,吴巩胜,周跃,李雯雯,梅泽文. 基于电路理论的滇金丝猴生境景观连通性分析. 生态学报, 2018, 38(6): 2221-2228.
- [6] 刘世梁,杨珏婕,安晨,邱扬,王军. 基于景观连接度的土地整理生态效应评价. 生态学杂志, 2012, 31(3): 689-695.
- [7] 穆博,李华威, Mayer A L, 何瑞珍, 田国行. 基于遥感和图论的绿地空间演变和连通性研究——以郑州为例. 生态学报, 2017, 37(14): 4883-4895.
- [8] 杨红生. 海岸带生态农牧场新模式构建设想与途径——以黄河三角洲为例. 中国科学院院刊, 2017, 32(10): 1111-1117.
- [9] 杜建国,叶观琼,周秋麟,陈彬,胡文佳,郑新庆. 近海海洋生态连通性研究进展. 生态学报, 2015, 35(21): 6923-6933.
- [10] 吴珊珊. 莱州湾南岸滨海湿地的景观格局变化及其生态脆弱性评价[D]. 济南: 山东师范大学, 2009.
- [11] 张绪良,张朝晖,徐宗军,谷东起,郑伟. 莱州湾南岸滨海湿地的景观格局变化及累积环境效应. 生态学杂志, 2009, 28(12): 2437-2443.
- [12] 侯西勇,徐新良,毋亭,李晓炜. 中国沿海湿地变化特征及情景分析. 湿地科学, 2016, 14(5): 597-606.
- [13] Di X H, Hou X Y, Wang Y D, Wu L. Spatial-temporal characteristics of land use intensity of coastal zone in China during 2000—2010. Chinese Geographical Science, 2015, 25(1): 51-61.
- [14] 邱向红,侯西勇,吴莉. 中国海岸带土地利用遥感分类系统研究. 资源科学, 2014, 36(3): 463-472.
- [15] 吴昌广,周志翔,王鹏程,肖文发,滕明君,彭丽. 基于最小费用模型的景观连接度评价. 应用生态学报, 2009, 20(8): 2042-2048.
- [16] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Van Den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [17] 谢高地,甄霖,鲁春霞,肖玉,陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
- [18] De Groot, Brander L, van der Ploeg S, Costanza R, Bernard F, Braat L, Christie M, Crossman N, Ghermandi A, Hein L, Hussain S, Kumar P, McVittie A, Portela R, Rodriguez L C, Ten Brink P, Van Beukering P. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. Ecosystem Services, 2012, 1(1): 50-61.
- [19] 张朝晖,吕吉斌,叶属峰,朱明远. 桑沟湾海洋生态系统的服务价值. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2540-2547.
- [20] 李琳. 基于 3S 技术的现代黄河三角洲湿地生态服务功能价值评估研究[D]. 泰安: 山东科技大学, 2011.
- [21] 刘庆,李伟,陆兆华. 基于遥感与 GIS 的黄河三角洲绿色空间生态服务价值评估. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1838-1843.
- [22] 李晓炜,侯西勇,邱向红,苏红帆. 从生态系统服务角度探究土地利用变化引起的生态失衡——以莱州湾海岸带为例. 地理科学, 2016, 36(8): 1197-1204.
- [23] Marulli J, Mallarach J M. A GIS methodology for assessing ecological connectivity: application to the Barcelona Metropolitan Area. Landscape and Urban Planning, 2005, 71(2/4): 243-262.
- [24] 谢鹏飞,赵筱青,张龙飞. 大面积人工园林种植区生态连接度研究——以澜沧县为例. 云南地理环境研究, 2015, 27(4): 71-78.
- [25] 张利,陈亚恒,门明新,许皞. 基于 GIS 的区域生态连接度评价方法及应用. 农业工程学报, 2014, 30(8): 218-226.
- [26] Wang J, Yan S C, Guo Y Q, Li J R, Sun G Q. The effects of land consolidation on the ecological connectivity based on ecosystem service value: A case study of Da'an land consolidation project in Jilin province. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(5): 603-616.
- [27] 武剑锋,曾辉,刘雅琴. 深圳地区景观生态连接度评估. 生态学报, 2008, 28(4): 1691-1701.