

苏北浅滩滩涂植被生态特征及其演替

刘向南, 徐 敏

(南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 以苏北浅滩滩涂植被为研究对象, 利用1993年、2002年、2013年3个时相的遥感影像数据, 运用景观生态学方法和RS、GIS技术, 在遥感处理软件ENVI4.7中, 经图像裁剪、配准等图像预处理后, 采用计算机监督分类和人工目视解译相结合的方法进行滩涂植被解译分析. 分析结果表明: ①苏北浅滩滩涂植被主要有芦苇、碱蓬、樟毛和米草; ②景观指数计算结果表明滩涂植被的破碎化程度不断提高, 景观多样性指数下降, 景观内部的异质性增强; ③自然演替规律在滩涂植被的演替过程中越来越弱, 人类活动对滩涂植被景观的影响变得更加重要.

[关键词] 滩涂植被, 生态演替, 景观指数, 遥感

[中图分类号] P748 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2015)03-0107-07

Beach Vegetation Ecological Character in North Jiangsu Shoal of East China and its Succession

Liu Xiangnan, Xu Min

(School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Taking beach vegetation as an example, using remote sensing digitized data from 1993, 2002 and 2013, and applying GIS techniques and methods of landscape ecology, the image was processed using the ENVI Imagine 4.7 image processing software, including clipping, registration. It was classified and interpreted through supervised classification and visual interpretation methods. The result showed us that from the following three aspects. Firstly, the beach vegetation mainly includes phragmites communis, Suaeda salsa, Aeluropus sinensis and Spartina alterniflora. Secondly, the result of landscape index indicated that beach vegetation was broken greatly, diversity index lower and landscape heterogeneity enhanced. Thirdly, in the succession process of beach vegetation, human activities have increased and natural succession law's influence decreased obviously.

Key words: beach vegetation, ecological succession, landscape index, remote sensing

滨海湿地是指发育在海岸带附近并且受海陆交互作用的湿地, 是陆地生态系统和海洋生态系统的过渡地带^[1], 广泛分布于沿海海陆交界、淡咸水交汇地带, 也是地球上生物多样性最丰富、生产力最高、生态系统服务价值最大的生态系统, 在区域生态安全、人类生存环境甚至区域经济发展方面都发挥着重要作用^[2]. 同时, 又是非常脆弱的生态系统, 对人类活动的影响非常敏感.

景观生态学是近十几年来新发展的理论, 自20世纪80年代后期, 逐渐成为世界上资源、环境和生态方面研究的一个热点^[3]. 景观生态学作为一门迅速发展的交叉学科, 其突出格局—过程—尺度—等级的理念已广泛应用于湿地研究^[4]. 景观生态学以整个景观为研究对象在生态系统更高层次上来研究景观中自然资源的异质性、生态系统之间的相互作用以及人类对景观的干扰等. 因此, 它对环境的管理和保护有很高的价值, 特别是对景观异质性明显、生态系统在水平和垂直方向变化较大的海岸带, 其应用前景更为广泛^[5-8].

具有大范围、多时相动态监测功能的遥感技术和具有强大空间信息处理功能的地理信息系统技术, 为应用景观生态学方法揭示湿地景观格局演变、空间变化提供了技术支持^[9]. 遥感技术与地理信息系统技

收稿日期: 2014-12-02.

基金项目: 国家自然科学基金(41373112).

通讯联系人: 徐敏, 教授, 博士生导师, 研究方向: 海洋资源与环境. E-mail: xumin0895@njnu.edu.cn

术的结合能监测大尺度、长周期的景观格局演变,揭示其时空变化规律,目前已广泛应用于盐城国家自然保护区景观变化监测.在经济快速发展和人口迅速增长的压力下,海岸湿地景观变得破碎化,并对丹顶鹤的生境产生重要影响,自然保护区生物多样性出现严重损失^[10].

江苏滨海湿地是典型的淤泥质海岸湿地,沿海90%以上为平原型淤泥质海岸,有大量细颗粒泥沙淤积,潮滩面积宽广,坡度平缓^[11].潮间带宽度3~6 km左右,最宽达10~30 km,平均坡度0.18‰~0.19‰,该区是暖温带向北亚热带过渡气候区,温度适宜,辽阔的淤泥质潮滩、低波能的环境、适宜的气候,为滩涂植被的形成和发育提供了有利条件,发育有大面积海岸盐沼^[12].苏北浅滩淤泥质滩涂在全国沿海滩涂中具有典型性,其景观生态特征也比较突出,特别是在滩涂围垦和引种米草类新物种的双重影响下,滩涂植被景观发生了显著的变化^[13].海岸盐沼先锋植物群落盐蒿,在海堤内、外均有分布,株高30~40 cm;河口半咸水盐沼主要为芦苇,株高1.5~2.5 m,最高可达4 m,它的出现标志着盐沼发育达到了成熟阶段,已可开垦利用;人工盐沼植被主要是互花米草,互花米草是适宜在高潮带下部至中潮带上部生长的耐盐、耐淹植物,植株高大,常达1 m以上,根系发达,随着引种时间的推移,适宜性不断增长,群落盖度高达90%左右,常以先锋植物群落的形式取代盐蒿群落而发展成宽23 km的植被带^[14-17].

本文利用1993年、2002年和2013年3个时相的遥感影像数据,经过数据裁剪、提取和几何精校正等预处理后,采用监督分类和人工目视解译相结合的方法对苏北浅滩滩涂植被进行解译,利用高分辨率航测数据对分类结果进行验证,并计算相关景观指数.研究表明,近年来,由于自然和人为因素的影响,湿地分布和面积正在悄然地发生变化.因而,利用景观生态学的理论并结合遥感、地理信息系统技术研究苏北浅滩滩涂植被生态特征及其演替,可以从不同的视角发现滩涂植被的生态特征及其演变规律,探讨滩涂植被的功能和作用,改善滩涂植被的科学管理,实现滩涂资源的可持续开发和利用.

1 研究区概况

苏北浅滩地处江苏中南部沿海,位于北纬31°43′~34°29′,东经119°27′~121°56′,标准海岸线长共696.3 km,面积为6.73×10⁵ hm².北起盐城射阳,南至南通启东,涉及南通、盐城两市,启东、海门、通州、如东、海安、东台、大丰、射阳8县(市),是我国最大的海岸湿地.该区位于亚热带向暖温带的过渡地带,季风气候显著,受南北气流和海洋、大陆双重气候的影响,年平均气温介于13.7~14.8℃之间,年降水量为900~1 100 mm,雨量丰沛,南部多于北部.从海洋动力特征来看,研究区海岸属于正规半日潮,沿岸受黄海南部旋转潮波系统影响,潮差从北向南逐渐增大(2~4 m)^[18].潮流在夏季及冬季主要为自北向南的沿岸流、表层离岸流和中层底层的向岸流.潮流进入潮滩时大体与岸线呈20°~30°夹角,近岸潮流与岸线的夹角变大,至高潮位时潮流方向大致与岸线垂直,具有明显往复流的特征,从而使得整个苏北浅滩既有快速淤长岸段,又有强烈侵蚀岸段^[19].基本以射阳河口为界,以北为侵蚀型岸段,以南为淤长型岸段.从景观生态特征分类来看,苏北浅滩淤泥质海岸景观生态沿海堤方向的变化主要表现为滩涂植被带的宽度随海岸的稳定、侵蚀和堆积等动力类型的变化而变化^[20].在堆积性海岸,滩涂植被带宽度较大,在侵蚀性海岸,植被带狭窄,有的甚至缺失.而沿垂直于海堤方向的景观呈带状有规律地分布,景观异质性比较明显^[21].海岸湿地景观分为自然湿地和人工湿地两大类,其中自然湿地包括芦苇湿地、碱蓬湿地、互花米草湿地、光滩、河流湿地等5种类型;人工湿地主要为养殖池、盐田、水田、人工沟渠.总的来说,从景观生态学角度,根据苏北浅滩淤泥质海岸景观在垂直海堤方向滩面高程上基质(Matrix)的物质组成与物种分布特征,及斑块(Patch)特征组合差异,可将江苏淤泥质海岸景观划分为3种基本类型:芦苇带、碱蓬带和米草带.

2 研究方法

2.1 数据来源与预处理

本文采用研究区1993年、2002年和2013年3个不同时相的遥感影像为数据源(表1).影像选择在气候条件较稳定且植被生长旺季的6月、8月,植被光谱信息丰富,基本无云覆盖,质量良好,易于判读;同时选择

较低潮位的数据,有利于近海滩涂植被的识别.使用ENVI4.7和ArcGis10.0软件对影像进行预处理,主要包括大气校正、投影变换、几何精校正和影像裁剪.采用6S(Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum)模型对遥感影像进行大气校正.本次配准基准影像使用已经进行过精确配准的“江苏及三角洲ETM镶嵌影像”,地图采用UTM51度投影带,WGS-84坐标系.通过对各个时期的影像分别选取18~20个易于识别的同名地物点作为地面控制点,均方根误差控制在0.5个像元精度之内进行影像的校正.由于研究区地处苏北平原,地形变化缓和,因此采用二阶多项式进行几何精校正,以避免图像边缘产生较大畸变,并按双线性内插法进行重采样(30 m).同时根据岸线和水边线通过目视解译和实地调查相结合的方法,在ArcGis10中通过空间分析工具提取出岸线之外的滩涂范围,以便提高解译的准确性和目的性.

表1 遥感影像基础信息

Table 1 Essential information of remote sensing images

序号	成像时间	影像类型	影像行列号	空间分辨率
1	1993-06-07	Landsat5 TM	119-37	30 m
2	2002-08-30	Landsat7 ETM+	119-37	30 m
3	2013-08-12	HJ1A CCD2	448-77	30 m

2.2 滩涂植被解译

首先,利用野外样区调查数据和江苏海岸带土地类型图数据与遥感影像对照,对苏北浅滩滩涂植被进行目视解译,确定各种植被类型的解译标志.另外,为了突出所需提取的植被信息,需要对图像进行增强处理.遥感影像的4、3、2波段标准假彩色合成,可以较好地突出滩涂植被的生长状态和分布状况,裸露滩涂为青灰色,水体为蓝色,滩涂植被则是不同程度的红色.由于滩涂植被在被解译区域中光谱信息比较单纯,与之相混淆的其他地面信息少,因此,在遥感影像分辨率范围内,滩涂植被信息可准确提取出来,其波谱特征的变化主要表现在滩涂植被种类间的再分类上.对研究区滩涂植被类别进行判断,根据影像数据自身的特征和实地样方监测数据确定分类依据,对影像进行特征判断,初步将植被类别分为:芦苇带、碱蓬带、米草带和獐毛带4大类,利用最大似然分类法对研究区进行植被分类与解译.由于光学遥感存在着同物异谱和异物同谱现象,使得计算机监督分类存在一定的误分现象,所以必须在计算机监督分类的基础上,通过目视解译修正,并辅以实地考证.在直接采用兴趣区域(ROI)工具结合目视解译分类以后,结合实地调查的植被状态和以往的资料数据,根据植被的生长习性和植株自身的特点,对分类有误的像素进行人工重新赋值,将同物异谱、异物同谱现象进行有效的剔除更正.最终滩涂植被解译结果如表2所示.

表2 不同时相的滩涂植被面积和斑块数

Table 2 Area of beach vegetation and number of patches in different times

年份	芦苇		碱蓬		米草		獐毛	
	面积/km ²	斑块数/个	面积/km ²	斑块数/个	面积/km ²	斑块数/个	面积/km ²	斑块数/个
1993	62.91	31	101.88	29	160.60	53	46.68	12
2002	54.39	28	70.48	23	150.75	37	20	9
2013	61.98	47	40.57	20	120.39	55	10	7

2.3 分类精度评价

对分类结果进行评价,确定分类的可靠性和精度.有两种方式用于精度验证:混淆矩阵和ROC曲线,本次分类选择混淆矩阵验证分类的精度和可靠性.根据高分辨率影像及实测数据选择验证区域,采用混淆矩阵方法,通过分层随机采样法,对所有的分类影像和经过修正后的分类结果进行评价,对分类结果进行精度验证.分析评价显示,初步分类影像精度在80%左右,而经过实地考察,数据修正处理后的最终分类结果精度可达到90%以上,能较好满足相关部门对植被分类的精度要求.

2.4 景观指数选择与计算

对植被分类结果验证后,应用地理信息系统处理软件ArcGis10.0,经数据合成和要素转绘等步骤,得到苏北浅滩滩涂植被类型现状分布图,并统计各区域、各类型滩涂植被的面积以及苏北浅滩滩涂植被总面积.同时,利用ArcGIS10.0的空间分析和统计功能计算景观类型转移矩阵,最后输出景观制图结果.利用FRAGSTATS3.3软件,选择相应的参数后进行输出,进行景观破碎度指数、景观多样性指数的计

算,获得苏北浅滩滩涂植被不同时段景观格局指数汇总表,研究不同时段滩涂植被的景观格局特征和演替规律.

湿地景观动态指景观在结构单元和功能方面随时间的变化,包括景观结构单元的组成成份、多样性、形状和空间格局的变化,以及由此导致的能量、物质和生物在分布与运动方面的差异.景观格局指数是指能够高度浓缩景观格局信息、反映其结构组成和空间配置特征的定量指标^[22].本文选取下面几个较为常用的、生态学意义比较明确的景观指数,分析苏北浅滩滩涂植被的生态特征和演替规律.

(1)景观破碎度指数:是指景观被分割的破碎程度,反映了景观空间结构的复杂性,在一定程度上可以反映人类活动对景观格局的影响.目前通常使用斑块数和斑块密度两项指标来研究景观的破碎度性质.

斑块数 N :景观要素的斑块总数.

斑块密度 C :指景观中包括全部异质景观要素斑块的单位面积斑块数,

$$C=N/A,$$

式中: A 是景观要素的总面积(单位: km^2),斑块密度的数值越大,破碎化程度则越高.

(2)景观多样性指数:是指景观元素在结构、功能以及随时间变化方面的多样性,是一个景观水平上的指标,反映了景观的异质性.目前较多采用Shannon-Weaver公式计算:

$$H=-\sum_{k=1}^m P_k \times \ln(P_k),$$

式中: P_k 为斑块类型 k 在景观中所占面积的比例; m 为景观中斑块类型总数.

多样性指数的大小取决于两个方面的信息:斑块类型的多少和各斑块类型所占的比例.根据信息熵理论,当景观由单一类型构成时,景观是均质的,不存在多样性,其指数值为0;当景观由两种以上的类型构成,且各景观类型所占的比例相等时(即对于给定的 m , $P_k=1/m$),景观的多样性指数最高,即 $H_{\max}=\ln(m)$;当各景观类型所占的比例差异增大时,类型多样性指数下降.相关指数计算结果如表3所示.

表3 不同时相的滩涂植被指数
Table 3 Index of beach vegetation in different times

年份	景观破碎度指数				景观多样性指数
	芦苇	碱蓬	米草	獐毛	
1993	0.083	0.077	0.142	0.032	-1.278
2002	0.094	0.077	0.125	0.030	-1.179
2013	0.201	0.085	0.236	0.030	-1.133

(3)景观转移矩阵:转移矩阵模型来源于系统分析中对系统状态与形态转移的定量描述,能全面、具体地描述景观的结构特征及景观类型之间的变化量与方向.对3个不同时相的滩涂植被,在ArcGis10.0中的ArcToolbox下,通过数据融合、叠置分析和空间查询,计算景观转移矩阵,并完成相关面积和分布的统计分析结果如表4所示.

3 结果与分析

3.1 滩涂植被景观结构变化

苏北浅滩滩涂植被,1993年的景观构成中,芦苇面积占16.91%,主要分布在各个入海河口处和靠近陆地已经围垦但尚未开发利用的大面积围塘,盐地碱蓬的面积占27.38%,其中盐城珍禽保护区核心区分布面积最广,其他滩涂分布零散,面积较少,米草的分布面积达到了43.16%,基本上占到了苏北浅滩滩涂植被总面积的一半,其中主要包括大米草和互花米草,基本上分布在浅滩的最边缘地带,且呈带状分布,獐毛等茅草的分布面积占12.55%,其中主要分布在和芦苇及碱蓬的混生地带,在潮上带部分;2002年的滩涂植被景观结构构成中,芦苇面积占18.40%,和1993年相比,面积变化不大,依然主要分布在河口和围塘附近,盐地碱蓬的面积占23.84%,相较1993年,面积有所较少,且不断向海方向迁移,向陆一侧则逐渐被其他植被代替,米草的面积则上升到50.99%,已经占据了苏北浅滩滩涂植被总面积的一半,且米草植被

带的宽度明显增加,这一时期的米草带大部分由互花米草组成,大米草分布较稀疏、零散,獐毛等茅草类植被的分布面积则下降到 6.77%;2013 年滩涂植被景观的构成中,芦苇面积占 13.61%,相较 2002 年,面积有所下降,主要是由于江苏沿海大面积的围垦开发活动,对芦苇造成了大面积的破坏,盐地碱蓬的面积则继续下降,只占 10.42%,基本上只在盐城珍禽保护区的核心区分布,其他滩涂基本上没有分布,而米草的分布面积则达到了 71.68%,面积大幅上升,獐毛则零星分布,面积只占 4.29%。从斑块数量和景观破碎度指数来看,芦苇、米草的斑块数不断增加,景观破碎度指数也逐渐增大,景观破碎化的趋势很明显,而碱蓬和獐毛由于分布面积的逐年减少,斑块数则明显减少,景观破碎化指数基本保持不变,破碎化程度不明显。

表 4 不同时相的滩涂植被景观转移矩阵

Table 4 Landscape transition matrix of beach vegetation in different times

景观类型			景观类型		
1993	2002	转移面积/km ²	2002	2013	转移面积/km ²
碱蓬	碱蓬	55.301	碱蓬	碱蓬	20.004
	芦苇	1.821		芦苇	15.095
	米草	30.063		米草	12.209
	獐毛	6.236		獐毛	4.651
芦苇	碱蓬	7.960	芦苇	碱蓬	1.576
	芦苇	40.905		芦苇	27.589
	米草	0.298		米草	4.549
	獐毛	1.560		獐毛	1.587
米草	碱蓬	5.911	米草	碱蓬	16.879
	芦苇	8.662		芦苇	16.066
	米草	101.295		米草	94.813
	獐毛	0.785		獐毛	0.562
獐毛	碱蓬	2.248	獐毛	碱蓬	1.487
	芦苇	3.434		芦苇	1.276
	米草	20.431		米草	8.681
	獐毛	12.675		獐毛	4.651

3.2 苏北浅滩滩涂植被的演替

3.2.1 滩涂植被的自然演替特征

滩涂植被生态特点与滩面潮汐动力条件等环境因素决定了植被类型的分布位置,随着滩面环境条件的改变,滩涂植被类型也发生相应的改变。在自然淤长的淤泥质海岸,由于滩面不断淤高与向外延伸,潮侵率降低,土壤盐度相对降低,适宜原植被生长的生境被改变,原植被向外迁移,适宜新生境的植被入侵,从而发生滩涂植被类型整体向海迁移延伸的现象,即光滩逐渐被互花米草滩代替,互花米草滩逐渐被盐蒿滩代替,盐蒿滩逐渐被茅草滩代替。在侵蚀的淤泥质海岸,滩涂植被生态各类型的宽度逐渐缩小,甚至可使某景观生态类型缺失,部分地区出现逆向演替现象,即由于滩面被侵蚀降低,本来适合互花米草生长的滩面变得更低,成为光滩,而原来适合盐蒿生长的滩面变为互花米草滩,茅草滩变为盐蒿滩。在稳定性淤泥质海岸,滩涂景观生态类型也基本保持稳定^[23,24]。滩涂景观生态的自然演替是按照一定的规律进行的,其演替速度往往是缓慢的。人类活动改变了景观生态的自然演替过程。近些年来,江苏淤泥质海岸滩涂景观生态的演替在滩涂围垦和引进互花米草植被的人为影响下发生了巨大的改变。

3.2.2 人类活动对滩涂植被演替的影响

3.2.2.1 围垦开发活动

随着社会、经济的发展,人口的急剧膨胀,人类对土地的需求越来越多。对江苏来说,沿海滩涂的围垦一直是保持江苏土地动态平衡的重要方法^[25]。江苏的滩涂围垦一般都是在淤长型的淤泥质海岸进行,围垦范围往往涉及茅草滩和盐蒿滩甚至其他滩地,这样使得滩涂植被缺失部分景观类型。由于海堤的存在,改变了原始滩面的沉积动力条件,再加上淤长型海岸泥沙充足,虽然在刚围海堤外的滩面高程较低,但淤长速度很快,其外侧滩面也相应淤高。滩面的植被类型随滩面高程和潮汐频率变化发生改变,经过一段时

间,从海堤向外,又出现茅草滩-盐蒿滩-互花米草滩-光滩的景观生态序列.从滩涂围垦对江苏淤泥质滩涂景观生态影响的整体来看,一方面围垦活动破坏了原有的滩涂植被景观,使得滩涂植被面积大大减少,另一方面围垦活动改变了岸滩的潮汐动力条件,加快了潮滩的淤长速度,从而加快了滩涂植被类型的演替速度.自1950年以来,江苏省已经围垦沿海滩涂达2 463.6 km².垦区海堤在20世纪五六十年代多在平均高潮位以上,主要是在白茅-大穗结缕草草甸上进行,部分涉及到盐蒿群落^[1].随着对土地的迫切需求,围垦速度加快,外堤高程逐渐降低,堤外盐沼湿地面积越来越少,景观生态的类型有逐渐减少的趋势,各类型的宽度也越来越狭窄越窄,例如在东台市三仓垦区海堤外的部分地区已经缺失茅草滩,有茅草的地方其宽度也只有几十米宽,而在围垦之前这里的茅草滩的宽度达2 km.

3.2.2.2 互花米草的引种

为了保护海堤和促淤造陆,我国于1979年从美国引种了互花米草.互花米草是适宜在海滩高潮带下部至中潮带上部广阔滩面生长的耐盐、耐淹的多年生草本植物.由于互花米草能在更低的滩面生长,在引种互花米草之前,江苏淤泥质滩涂的先锋植被是盐蒿,互花米草引种后,成了更先锋的植被,在光滩靠近盐蒿滩的滩地开始生长互花米草,成为新的淤泥质滩涂植被景观类型,同时增加了滩涂植被带的宽度,扩大了江苏海岸滩涂植被的面积.互花米草植被群落密度大,植株高,阻挡滩面潮流速度作用明显,互花米草的生长可以促进滩面泥沙的淤积,加速滩涂面积的增长,从而加快滩涂植被类型向外的自然演替过程.互花米草的引种,在一定程度上缓解了因围垦而导致的沿海滩涂植被面积减少的进程,对维持江苏淤泥质海岸潮间带的生态平衡起到了积极的保护作用^[26].

关于苏北浅滩淤泥质滩涂植被的研究近年来较多,从景观生态学角度认识江苏淤泥质滩涂植被是研究沿海滩涂植被的重要基础,可以从不同角度分析苏北浅滩滩涂植被的内在特征及其演替规律,为更好地保护滩涂植被,促进沿海滩涂的生物多样性以及科学合理地开发淤泥质滩涂资源奠定基础^[27].

[参考文献]

- [1] 沈永明,张忍顺,杨劲松,等.江苏沿海滩涂互花米草及坝田工程促淤试验研究[J].农业工程学报,2006,22(4):42-47.
- [2] 刘春悦,张树清,江红星,等.江苏盐城滨海湿地外来种互花米草的时空动态及景观格局[J].应用生态学报,2009,20(4):901-908.
- [3] 张忍顺,沈永明,陆丽云,等.江苏沿海互花米草盐沼的形成过程[J].海洋与湖沼,2005,36(4):358-366.
- [4] 沈永明,刘咏梅,陈全站,等.江苏沿海互花米草盐沼扩展过程的遥感分析[J].植物资源与环境学报,2002,11(2):33-38.
- [5] 李加林,张忍顺.互花米草海滩生态系统服务功能及其生态经济价值的评估——以江苏为例[J].海洋科学,2003,27(10):68-72.
- [6] 李加林,杨晓平,童亿勤,等.互花米草入侵对潮滩生态系统服务功能的影响及其管理[J].海洋通报,2005,24(5):33-38.
- [7] 王爱军,高抒,贾建军,等.互花米草对江苏潮滩沉积和地貌演化的影响[J].海洋学报:中文版,2006,28(1):92-99.
- [8] 朱晓佳,钦佩.外来种互花米草及米草生态工程[J].海洋科学,2003,27(12):14-19.
- [9] 陈洪全,张忍顺,王艳红,等.互花米草生境与滩涂围垦的响应——以海州湾顶区为例[J].自然资源学报,2006,21(2):280-287.
- [10] 仇乐,刘金娥,陈建琴,等.互花米草扩张对江苏海滨湿地大型底栖动物的影响[J].海洋科学,2010,34(8):50-55.
- [11] 李加林.基于MODIS的沿海带状植被NDVI/EVI季节变化研究——以江苏沿海互花米草盐沼为例[J].海洋通报,2006,25(6):91-96.
- [12] 刘永学,李满春,张忍顺,等.江苏沿海互花米草盐沼动态变化及影响因素研究[J].湿地科学,2004,2(2):116-121.
- [13] 徐伟伟,王国祥,刘金娥,等.苏北海滨湿地互花米草地上生物量动态[J].海洋科学进展,2012,30(1):132-140.
- [14] 沈永明.江苏沿海互花米草盐沼湿地的经济、生态功能[J].生态经济,2001(9):72-73,86.
- [15] 孙贤斌,刘红玉.基于生态功能评价的湿地景观格局优化及其效应——以江苏盐城海滨湿地为例[J].生态学报,2010,30(5):1 157-1 166.
- [16] 张华兵,刘红玉,郝敬锋,等.自然和人工管理驱动下盐城海滨湿地景观格局演变特征与空间差异[J].生态学报,

- 2012,32(1):101-110.
- [17] 孙贤斌,刘红玉.人为干扰对盐城自然保护区核心区景观演变的影响[J].生态与农村环境学报,2011,27(3):48-52.
- [18] 张华兵,刘红玉,侯明行,等.人工管理和自然驱动下盐城海滨湿地互花米草沼泽演变及空间差异[J].生态学报,2013,33(15):4 767-4 775.
- [19] 刘红玉,李兆富,李晓民,等.湿地景观破碎化对东方白鹤栖息地的影响——以三江平原东北部区域为例[J].自然资源学报,2007,22(5):817-823.
- [20] 张华兵,刘红玉,李玉凤,等.自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究[J].环境科学,2013,34(2):540-546.
- [21] 张华兵,刘红玉,郝敬锋等.江苏省盐城海岸湿地景观时空演变特征研究[J].水土保持通报,2012,32(6):226-229.
- [22] 傅伯杰.景观生态学原理[M].北京:科学出版社,2011:35-65.
- [23] 孙贤斌,刘红玉.江苏盐城市海滨土地利用对景观生态风险的影响[J].国土资源遥感,2011(3):140-145.
- [24] 李玉凤,刘红玉,孙贤斌,等.基于水文地貌分类的滨海湿地生态功能评价——以盐城滨海湿地为例[J].生态学报,2010,30(7):1 718-1 724.
- [25] 张华兵,刘红玉.盐城海滨湿地景观变化的生态环境效应分析[J].水土保持研究,2011,18(6):256-259.
- [26] 张华兵,刘红玉.侵蚀型与淤长型海岸湿地景观时空演变特征及差异研究[J].盐城师范学院学报:人文社会科学版,2011,31(3):11-15.
- [27] 侯明行,刘红玉,张华兵,等.地形因子对盐城滨海湿地景观分布与演变的影响[J].生态学报,2013,33(12):3 765-3 773.

[责任编辑:丁 蓉]