

引用格式:张华兵,甄艳,吴菲儿,等. 滨海湿地生境质量演变与互花米草扩张的关系:以江苏盐城国家级珍禽自然保护区为例[J]. 资源科学, 2020, 42(5): 1004-1014. [Zhang H B, Zhen Y, Wu F E, et al. Relationship between habitat quality change and the expansion of *Spartina alterniflora* in the coastal area: Taking Yancheng National Nature Reserve in Jiangsu Province as an example [J]. Resources Science, 2020, 42(5): 1004-1014.] DOI: 10.18402/resci.2020.05.17

滨海湿地生境质量演变与互花米草扩张的关系

——以江苏盐城国家级珍禽自然保护区为例

张华兵^{1,2}, 甄艳³, 吴菲儿^{1,2}, 李玉凤^{2,4}, 张亚楠²

(1. 盐城师范学院城市与规划学院, 盐城 224007; 2. 中国黄海盐城海滨湿地生态环境监测中心, 盐城 224057; 3. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500; 4. 南京师范大学海洋科学与工程学院, 南京 210023)

摘要:盐城滨海湿地是中国黄(渤)海候鸟栖息地的重要组成部分,生境质量是栖息地功能的重要反映,而互花米草扩张已经严重威胁栖息地生境。因此,本文以1983—2017年10期遥感影像为数据源,基于GIS和RS技术,运用InVEST模型,分析了江苏盐城国家级珍禽自然保护区核心区生境质量时空变化与互花米草扩张的关系。结果显示:①1983—2017年,互花米草扩张与时间呈显著正相关性,面积百分比从1.693%增加到24.930%。在时间上,表现出明显的阶段性特征;在空间上,扩张表现出多方向、多变的特征;②受人类活动和互花米草扩张的影响,生境质量表现出明显波动变化:1983—1988年,生境质量指数从0.863上升至0.878,2014年下降至0.740,2017年又上升至0.775。③互花米草湿地面积变化与生境退化指数变化之间存在正相关,与生境质量指数变化之间呈负相关。互花米草扩张致使区域适宜性生境——碱蓬湿地的面积急剧减少,成为区域生境质量退化的重要因素,控制互花米草扩张也将是区域面临的重要问题。研究结果可从景观格局与生境质量关系的视角为滨海湿地栖息地功能提升与可持续管理提供参考。

关键词:生境质量;互花米草;景观结构;滨海湿地;InVEST模型;人类活动;盐城国家级珍禽自然保护区

DOI: 10.18402/resci.2020.05.17

1 引言

生境质量是指环境为个体和种群的持续生存与发展提供适宜条件的能力,是衡量生物多样性水平的重要指标,生境质量事关人类社会与自然生态系统的可持续发展^[1-4]。研究生境质量时空变化及驱动机制,对维护区域生态平衡和生物多样性保护具有重要意义。目前,区域生境质量评价研究可分为两大类型:一是在相对较小空间尺度上,选择生境质量评价指标,设置样带或样方,通过实地调查或采样分析获取数据,并选择一定的数学方法对区

域生境质量进行定量评价^[5-9]。二是在较大空间尺度上,以景观类型为基础,将威胁因子的空间分布与景观格局数据一起整合到生境模型中,构建具有空间显示特征的结构模型,ARIES、MIMES与InVEST等模型都在这方面开展了创造性的研究。国内以InVEST模型的应用最为广泛^[10,11],在流域生物多样性评价、自然保护区生境质量评价、区域生境质量评价及其对土地利用变化响应等方面开展了一系列的研究^[12-16]。

滨海湿地位于海洋和陆地的过渡地带,受到海

收稿日期:2019-11-08;修订日期:2020-01-14

基金项目:国家自然科学基金项目(41771199);NSFC-浙江两化融合联合基金项目(U1609203);江苏省自然科学基金项目(BK20171277);江苏省高校“青蓝工程”资助项目(2019)。

作者简介:张华兵,男,江苏盐城人,博士,副教授,研究方向为湿地景观及遥感/GIS应用。E-mail: jszhibing@163.com

通讯作者:李玉凤,女,江苏扬州人,博士,副教授,研究方向为湿地生态评价与GIS应用。E-mail: pandalee_0826@163.com

2020年5月

陆双重作用,是一个脆弱的边缘地带和生态敏感区^[17,18]。滨海湿地也是一个高度活跃的、动态的开放系统,在人类活动和自然的作用下,景观变化显著,对生态过程与功能产生了诸多影响,严重影响区域生境质量。互花米草(*Spartina alterniflora*)为多年生草本植物,自从在中国沿海地区引种成功,由于其独特的生存和扩散机制,使其成为中国滨海湿地中入侵最严重的外来物种,尤以江苏沿海面积最大,又以盐城滨海湿地分布最为集中^[19]。互花米草快速扩张引起了区域景观结构、生态过程的改变,影响滨海湿地生态系统结构与功能,尤其是对本地物种和栖息地生境等方面已经产生了明显的负面效应^[20-22]。

盐城滨海湿地地处江苏中部沿海,是中国乃至世界上为数不多的、典型的淤泥质原始滨海湿地之一,2019年被列入世界自然遗产名录,成为江苏第一个世界自然遗产地,也是中国第一个滨海湿地类型的自然遗产地。遗产地内基本保持了天然的生态结构与功能^[23],区内有两个国家级自然保护区,即盐城国家级珍禽自然保护区与大丰麋鹿国家级自然保护区,有17个物种被列入IUCN(International Union for Conservation of Nature)物种红色名录,是全球尺度上珍稀濒危候鸟保护重要的自然栖息地。关于盐城候鸟栖息地生境研究一直以来都是学者们关注的焦点问题;Zhang等^[24]运用InVEST模型比较了江苏盐城国家级珍禽自然保护区核心区1983—2011年3个时期的生境质量变化;孙贤斌等^[25]和欧维新等^[26]指出人类活动影响下滨海湿地景观结构与连通性变化对丹顶鹤栖息地适宜性的影响是显著的;刘大伟等^[27]研究了盐城滨海湿地丹顶鹤种群动态变化及其对生境的选择;汪辉等^[28]选取9个生态因子,基于GIS技术,运用因子加权叠加法对自然保护区生态适宜性进行了分析。

“南淤北蚀”“蚀进淤退”是盐城滨海湿地重要的地貌过程特征,为了保护岸滩,在20世纪80年代引种了互花米草,至20世纪90年代形成较大面积群落后迅速扩张,已成为江苏盐城国家级珍禽自然保护区内的优势植被^[19],吸引了国内外学者的关注。前人研究有的从地学的视角,揭示了互花米草

湿地的时空动态变化特征^[20];有的从生态学视角揭示了互花米草种群动态及扩张机制^[20,22];还有研究指出互花米草快速蔓延,改变了盐城滨海湿地景观结构,特别是适宜鸟类觅食、栖息的碱蓬湿地面积急剧减少,引起了栖息地生境质量的改变^[29]。然而,关于区域生境质量与互花米草扩张的耦合关系研究还少有报道。因此,本文选择江苏盐城国家级珍禽自然保护区核心区为案例区,以1983—2017年10期遥感影像为数据源,在运用InVEST模型分析区域生境质量时空变化的基础上,通过线性回归方程分析生境质量与互花米草扩张的关系,揭示生境质量对互花米草扩张的响应特征,可为滨海湿地景观格局优化与生境质量维护提供参考。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究区概况

江苏盐城国家级珍禽自然保护区(以下简称保护区)地处江苏中部沿海地区(图1),位于32°20'N—34°37'N,119°29'E—121°16'E之间,东临黄海,区域海岸线长582 km,湿地面积为4.53×10⁵ hm²,是太平洋西岸、亚洲大陆东缘面积最大的淤泥质滨海湿地。保护区处于亚热带与暖温带的过渡地带,区

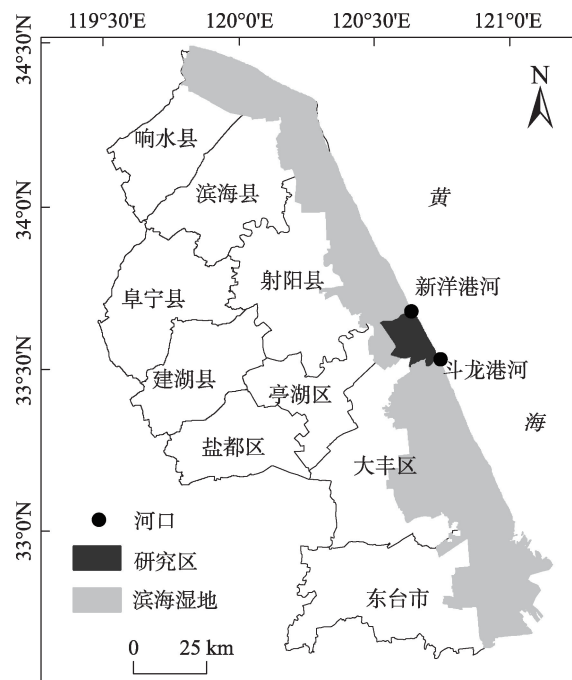


图1 研究区位置

Figure 1 Location of the study area

域年平均气温介于 13.7~14.8 ℃, 年降水量在 900~1100 mm 之间, 季风气候显著。保护区成立于 1983 年, 1992 年升格为国家级自然保护区, 2002 年被列入“拉姆萨尔国际重要湿地”名录。本文以保护区核心区(图 1)为研究区, 核心区南界为斗龙港河, 北界为新洋港河, 西至海堤公路, 为典型的淤泥质滨海湿地, 总面积约 $1.92 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 区内景观类型包括芦苇湿地、互花米草湿地、碱蓬湿地、光滩、河流、养殖池、道路(堤)。

2.2 数据来源与处理

景观数据源为 10 期遥感影像, 分别是 1983 年的 Landsat MSS 影像(云量为 10%), 1988 年和 1997 年的 Landsat TM 影像(云量都为 0.01%), 2000 年、2002 年、2006 年、2009 年、2011 年、2014 年和 2017 年的 Landsat ETM 影像(前 3 期云量分别为 0.03%、2.98%、0.17%, 其余都为 0)。由于 Landsat-7 ETM+ 机载扫描仪校正器发生故障, 致使 2003 年 5 月 21 日以后遥感影像的数据条带丢失, 所以, 2006 年、2009 年、2011 年、2014 年、2017 年等 5 期影像需要在 ENVI 5.0 中进行去条带处理。在 ENVI 5.0 中, 运用 FLASH 模块对所有遥感影像进行大气校正; 选取 60 个特征点进行 GPS 定位, 用于遥感影像的几何校正, 使 RMS 小于 0.5 个像元。运用非监督分类和决策树分类相结合, 进行计算机解译; 然后, 在 ArcGIS 中, 根据实地调查结果, 进行分类改进, 提高解译精度。选择 150 个样本, 每大类至少 20 个样本, 其中包括野外定位的 60 个点, 在 ENVI 5.0 中构建 Confusion Matrix, 进行分类精度检验, 总体精度达到 90% 以上。最后, 在 ArcGIS 中制作完成 10 个时期的系列景观类型图。

2.3 研究方法

InVEST 3.2 模型中的生境质量模块(Habitat Quality)可以有效分析景观变化与生境质量之间的关系, 模型以研究区生物多样性威胁因子空间分布图和景观类型图为基础, 从而生成生境退化空间分异图和生境质量空间分异图。在研究中, 以研究区 1983 年景观类型图为准图, 设置栅格大小为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$; 选择养殖池、河流、道路(堤)和外来入侵物种互花米草为威胁因子, 参照已有文献相同或

者相似威胁因子的权重大小关系^[5,13,30], 以对丹顶鹤越冬地产生的不利影响程度越大, 权重系数越高为原则, 权重分别设置为 0.6、0.4、0.8、0.8。道路影响距离设置为 5 km^[5]; 互花米草影响距离设置为向海陆单侧扩张的最大距离(3 km); 养殖池的影响距离设置为向海洋方向推进的距离, 研究区 1997 年出现养殖池, 2006 年养殖池面积最大, 平均向海推进了约 1 km; 河流上的渔船往来形成了一个线状干扰源, 但是其影响强度要低于道路, 将其类比为次要道路, 影响距离设置为 3 km^[31,32]。具体见公式(1)、(2)^[33]及表 1:

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rxy}} \right) \quad (\text{线性衰退}) \quad (1)$$

$$i_{rxy} = \exp\left(-\left(\frac{2.99}{d_{rxy}}\right)\right) \quad (\text{指数衰退}) \quad (2)$$

式中: i_{rxy} 表示栅格单元 y 中威胁因子 r 对生境栅格单元 x 的影响程度; d_{xy} 表示两个栅格单元 x 、 y 之间的距离; d_{rxy} 表示威胁因子 r 的最大影响距离。

生境与威胁因子的距离越近, 对威胁因子的敏感度就越高, 致使生境退化程度也就越高。生境退化指数的计算公式如下:

$$D_{xy} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^R w_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (3)$$

式中: D_{xy} 是景观类型 j 中栅格单元 x 的生境退化指数; R 表示区域威胁因子的个数; Y_r 为威胁因子 r 的栅格单元数; w_r 为威胁因子的权重值; r_y 为栅格单元 y 中威胁因子的个数; β_x 为生态保护水平, 由于选择区域为国家级自然保护区核心区, 执行了最严格的自然保护政策, 所以在此设置为 1; S_{jr} 表示威胁因子的敏感度。不同景观类型对威胁因子的

表 1 生态威胁因子属性表

Table 1 Attribute table of ecological threat factors

威胁因子	最大影响距离	权重	衰退线性相关性
养殖池	1	0.6	0
河流	3	0.4	1
堤、道路	5	0.8	1
互花米草	3	0.8	0

2020年5月

敏感性不同,敏感度越高表示的数值也就越大,将敏感度范围设在0~1之间,若景观类型对威胁因子无敏感度用0表示,若对威胁因子有极高的敏感度则用1表示,设置不同景观类型对威胁因子的敏感度^[5,33],具体见表2。

生境质量指数取决于生境退化指数和生境适宜程度,生境质量指数随生境适宜度的增大而增大,随生境退化指数的增加而减小,公式如下:

$$Q_{xy} = H_j \left(1 - \left(\frac{D_{xy}^z}{D_{xy}^z + k^2} \right) \right) \quad (4)$$

式中: Q_{xy} 指生境质量指数; D_{xy} 含义同公式(3); k 为半饱和系数,在本文中 k 值大小设置为15(栅格的一半,栅格为30 m); z 值一般设置为2.5^[31,33]; H_j 表示生境适宜程度。生境适宜度设置遵循两个原则:一是以珍稀物种丹顶鹤觅食、栖息地的适宜程度为参考;二是与原生态的自然环境相比较。同时参考景观在维护湿地生态中的作用,将生境适宜度最高取1,最低为0。研究区内,芦苇湿地和碱蓬湿地是丹顶鹤越冬最适宜的景观类型^[24],将二者的适宜性设置为1;互花米草湿地虽然不适宜丹顶鹤越冬和觅食,但是具有保滩护岸作用,将其适宜性设置为0.5;光滩在丹顶鹤等越冬鸟类的食物可获得性上要强于互花米草湿地^[25],将其设置为0.8;具体取值见表2。

文中所有参数都是通过讨论研究,制定初步方案,邀请专家对运行结果的可信度进行评估调整。最后,将InVEST 3.2模型运行得到的生境退化程度和生境质量栅格图加载到ArcGIS中,运用ArcGIS

中Reclassify模块进行重分类,统计各分值区间的面积,比较生境退化程度和生境质量时空变化。

3 结果与分析

3.1 互花米草扩张时空特征

对比研究区10年遥感图像解译结果(图2),可以得出:研究区景观类型以养殖池、芦苇湿地、碱蓬湿地、互花米草湿地、光滩为主;1983—2017年,景观结构变化明显,具体表现为芦苇湿地和互花米草湿地的面积在不断增加,碱蓬湿地的面积呈现先增加后迅速减少的态势;养殖池从无到有,至2006年,面积百分比达到最大,至2017年,由于恢复芦苇湿地,养殖池在研究区内基本消失。其中,互花米草湿地已从零星的斑块分布,扩张呈东西数千米宽、南北相连的带状分布,研究区互花米草分布面积由1983年的325 hm²增加至2017年的4786.571 hm²,面积百分比由1.673%增加至24.930%。

根据遥感图像的解译结果,可以将研究区互花米草扩张归纳为3个阶段:第一阶段(1983—1997年)为初始增长阶段,互花米草的面积百分比由1.673%上升至5.506%,年扩张面积145.763 hm²。第二阶段(1997—2011年)为高速增长阶段,互花米草的面积百分比达到23.750%,年扩张面积达251.962 hm²。第三阶段(2011—2017年)停滞增长阶段,互花米草的面积百分比微增至24.930%,年扩张面积为24.190 hm²,扩张速度下降明显。

进一步以时间为自变量,分析互花米草湿地面积变化与时间的关系,二者之间呈显著正相关,相关系数达0.972, $R^2=0.944$,在0.05显著性水平下通过 F 检验,一元线性回归方程 $y=1.535x-3046.5$ 显著。从图3中可以看出,随着时间的进程,互花米草在研究区内扩张的态势是持续的。进一步通过1983—2017年景观类型图的叠加对比发现(图2),互花米草在空间上的扩张方向是变化的:1983—2000年,互花米草向四周扩张;2000—2017年,由于互花米草南北连成带,在整体上扩张以向海陆两个方向为主。但是,研究区北部由于受到侵蚀的影响,目前已基本不向海洋方向扩张,甚至在向陆地方向后退;而南部仍然在向海扩张,但是扩张的速度变缓。

表2 景观类型对威胁因子的敏感度和生境适宜度

Table 2 Sensitivity to threat factors and habitat suitability of different landscape types

景观类型	生境适宜度	养殖池	河流	道路	互花米草
养殖池	0.5	0.0	0.5	0.0	0.5
河流	0.5	0.5	0.0	0.8	0.5
光滩	0.8	0.5	0.3	0.3	0.8
堤、道路	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
芦苇湿地	1.0	0.3	0.6	0.6	0.5
互花米草湿地	0.5	0.5	0.5	0.7	0.0
碱蓬湿地	1.0	0.5	0.8	0.5	0.8

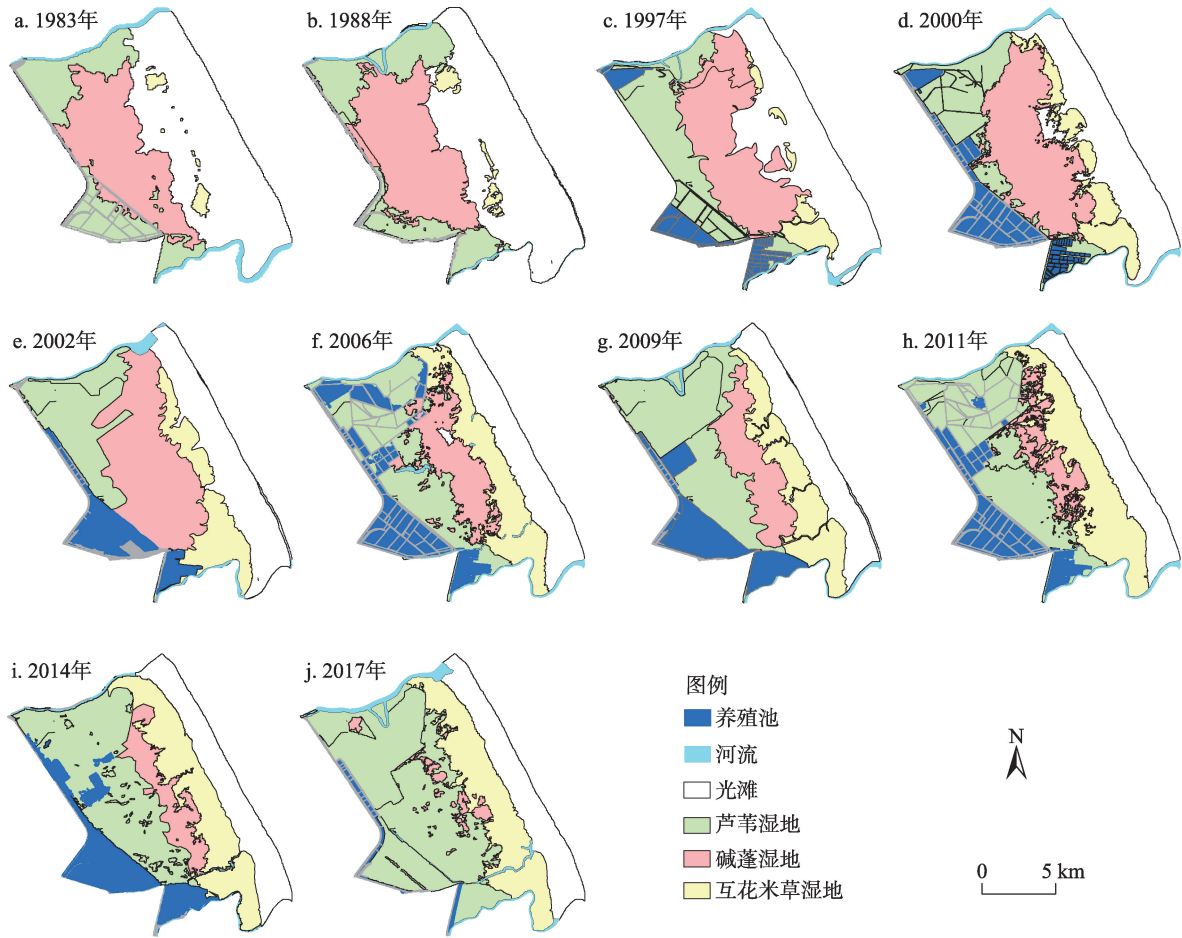


图2 1983—2017年滨海湿地景观变化

Figure 2 Landscape changes in the coastal wetland, 1983-2017

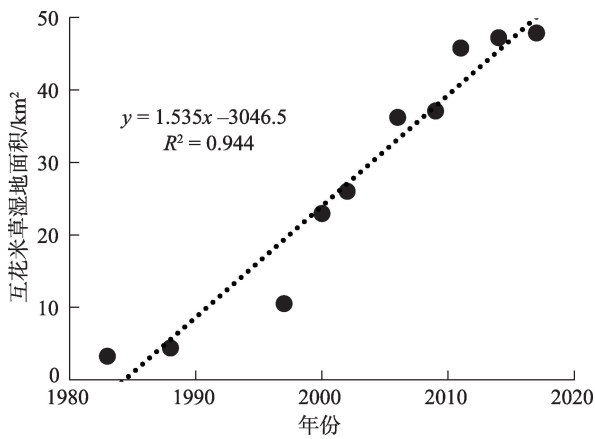


图3 1983—2017年互花米草湿地面积变化

Figure 3 Variation of the area of *Spartina alterniflora* marsh, 1983-2017

3.2 生境质量演变

保护区核心区生境质量整体上存在退化趋势：整体生境质量从1983年、1988年的0.863、0.878下

降至2014年的0.740；2017年整体生境质量又上升至0.775。

在ArcGIS中，按照等距分级的方法，将研究区生境质量指数分为4个区间0.00~0.25、0.25~0.50、0.50~0.75、0.75~1.00，将景观生境质量分为差、较差、良好、优秀4个等级。从图4看出：研究区生境质量整体较高，研究区中生境质量等级为优秀的面积占比最高，生境质量等级为差的面积占比最低。研究区生境质量呈现两极分化态势，差、较差等级面积比例之和总体上处于上升态势，从1988年的4.770%上升至2014年的42.582%；而优秀、良好等级的面积比例之和相应地由1988年的95.230%下降至2014年的57.418%；致使研究区生境质量呈下降态势。至2017年，生境质量等级为优秀的面积百分比又上升至68.931%，而生境质量等级为差和较

2020年5月

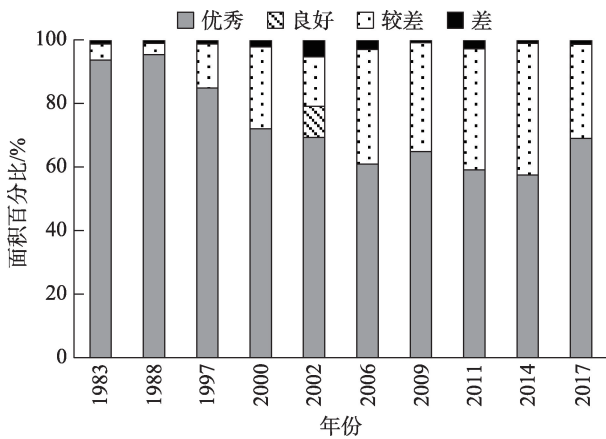


图4 1983—2017年滨海湿地生境质量分级统计图

Figure 4 Habitat quality class statistics in the coastal wetland, 1983-2017

差的面积比之和下降至31.069%,因而,2017年研究区生境质量指数有所回升。

比较研究区生境质量空间分异图(图5),可以

看出:生境质量相对较差的区域主要集中在道路(堤)、河流、养殖池和互花米草分布区。生境质量相对优秀的区域,主要分布在原生态植被分布区,主要包括芦苇湿地、碱蓬湿地和光滩。生境质量明显发生变化的区域主要在养殖池—芦苇湿地、互花米草湿地—碱蓬湿地、互花米草湿地—光滩等景观交错带。交错带典型的表现就是养殖池与互花米草湿地面积变化,二者规模扩大,会使区域生境发生退化,相应较低等级的生境质量面积迅速增加,致使区域生境质量下降。1983年生境退化指数为0.005,生境质量指数较高;2014年生境退化指数最大,达到了0.024,生境质量最低;2017年生境退化指数降低至0.022,生境质量指数又有所上升。

3.3 生境质量对互花米草扩张的响应

互花米草作为外来物种,在缺少人为干预的情况下扩张迅速,致使滨海原生湿地景观结构与生态

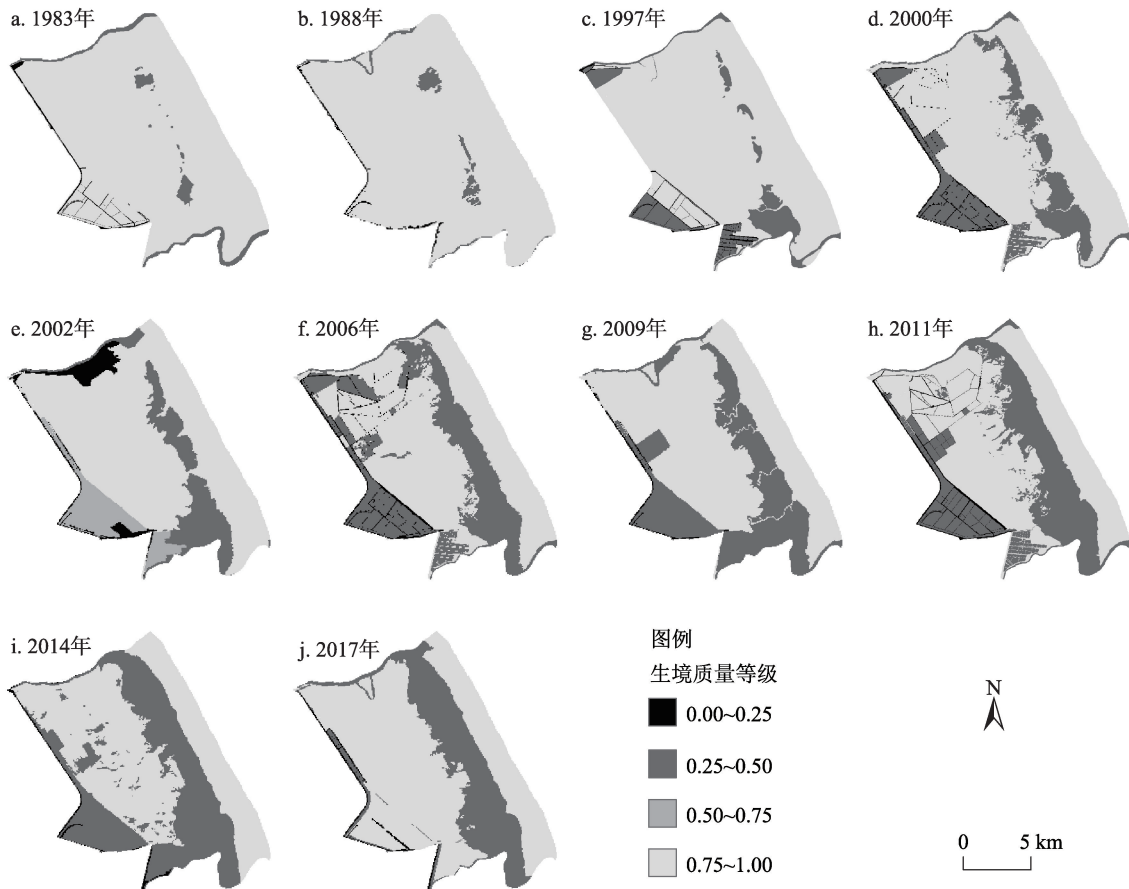


图5 1983—2017年滨海湿地生境质量图

Figure 5 Habitat quality index distribution in the coastal wetland, 1983-2017

过程发生巨大改变,已成为区域主要生态干扰因素之一。通过对互花米草湿地面积变化与生境退化指数、生境质量的相关性分析,得出:①互花米草湿地面积变化与生境退化指数变化之间存在正相关,即随着互花米草湿地面积的扩张,生境退化将越来越严重;两个变量间的相关系数为 0.952, $R^2=0.906$;在 0.05 的显著性水平下通过 F 检验,一元线性回归方程 $y_1=0.0004x+0.006$ (图 6a) 显著。该方程能够解释或者说明互花米草的扩张致使研究区生境退化程度加重。②互花米草湿地面积变化与生境质量指数变化之间呈负相关,相关系数为 -0.928, $R^2=0.862$;在 0.05 的显著性水平下通过 F 检验,一元线性回归方程 $y_2=-0.003x+0.870$ (图 6b) 显著,可以进一步说明,随着互花米草的扩张,研究区生境质量在下降。

在非人类干扰作用下,区域生境质量变化与植被变化密切相关。1983 年研究区成为省级自然保护区,这个时候以原生植被碱蓬群落占据绝对优势,面积百分比为 26.920%,芦苇群落面积百分比为 19.751%,零星地分布着一些斑块状的互花米草群落,原生态保持较好,生境质量指数较高,为 0.863。一直持续到 1997 年,原生植被芦苇和碱蓬处于持续增长中,群落面积百分比分别为 22.371% 和 28.938%,适宜丹顶鹤越冬的本地物种占据绝对优势,生境质量指数一直保持在较高水平,为 0.846。2000 年开始,碱蓬的面积开始萎缩,互花米草扩张成带状,生境质量指数突降至 0.790;至 2006 年,碱蓬的面积百分比快速减少至 15.432%;至 2011 年,碱

蓬的面积萎缩至 9.995%,互花米草面积百分比达到了 23.750%,致使生境质量指数下降至 0.742;至 2017 年,碱蓬的面积只剩下 3.529%,互花米草已发展成为区域的优势群落,并且还处在扩张之中,严重威胁研究区的生境质量。

4 讨论

(1) 研究区内,因其适宜的气候、地貌、水文条件以及互花米草超强的种间竞争能力,使其能够迅速扩张,对景观结构与格局产生一系列的影响。随着互花米草的引种,滨海湿地上的先锋群落逐渐由碱蓬变为互花米草,如今互花米草已成为区域的优势群落,致使滨海湿地景观演替序列呈现“两增一减”的特征:滨海湿地出现了光滩→互花米草湿地的演替序列,互花米草与碱蓬形成交错带之后出现了碱蓬湿地→互花米草湿地的演替序列;而光滩→碱蓬湿地的演替序列逐渐消失。从陆到海,研究区景观空间格局逐渐由芦苇湿地、碱蓬湿地、互花米草湿地、光滩组成的 4 个条带演变为只有芦苇湿地、互花米草湿地和光滩的 3 个条带。

互花米草扩张致使研究区的植被结构、地貌格局、水文过程发生改变,引起了生态系统服务功能变化。互花米草植被高度往往达到 1.5 m 以上,盖度在 90%~100%,很难作为鸟类的栖息和繁殖地。互花米草促淤功能抬升了互花米草湿地的高程,对潮流起到了阻挡作用,降低了碱蓬湿地的潮侵频率,抑制了原生植被碱蓬的生长,碱蓬湿地面积百分比已经由 1988 年的 28.938% 减少至 2017 年 3.529%,面临着消失的危险。互花米草扩张导致区

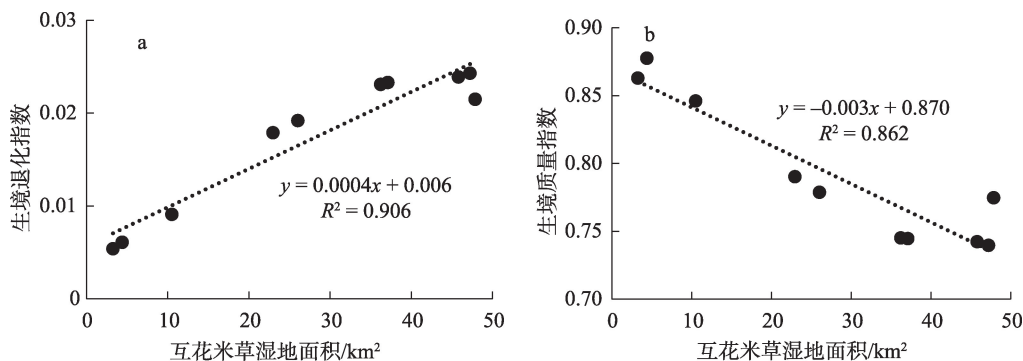


图6 生境退化指数(a)、生境质量指数(b)与互花米草扩张的相关分析

Figure 6 Correlation analysis between habitat degradation index (a), habitat quality index (b) and *Spartina alterniflora* expansion

2020年5月

域内逐渐形成了相对比较单一的植物群落,生境结构趋于简单,鸟类栖息地生境的多样性遭到破坏,鸟类的适宜性生境数量下降,致使鸟类群落结构也随之变得简单,尤其是对依赖碱蓬群落繁殖和栖息的鸟类产生了不利影响。

(2)随着互花米草的扩张,研究区生境质量下降趋势明显。互花米草向陆地方向扩张的态势,将持续威胁区域适宜性生境类型。因此,控制互花米草扩张、恢复碱蓬湿地,提升区域生境质量已成为研究区面临的重要课题。一方面,保护区的特殊性,使其不可能通过大规模人工围堰的方式快速去除互花米草,因而在短期内尚难以实现对互花米草的控制。另一方面,控制互花米草扩张,不是简单的消除,应该保持适度规模,以发挥互花米草应有的“保滩护岸”功能。同时,也要探索互花米草资源化途径,以发挥互花米草的综合效益,“长三角典型河口湿地生态恢复与产业化技术”等国家重点研发计划项目已在互花米草资源化方面开展了实践研究。

(3)研究区生境质量,受互花米草扩张影响外,还受到人类活动与环保政策的影响。1996年,江苏开始了以“百万亩滩涂开发”为标志的“海上苏东”战略,1997年养殖池面积明显增加,到2006年养殖池面积最大,这一阶段区域生境质量下降速度快。2009年,《江苏沿海地区发展规划》上升为国家战略,在空间上进一步明确了生态保护范围,对重要生态功能区进行了重新划定;明确提出要积极开展生态修复。保护区作为最重要的生态功能区,积极开展了生态修复实践。因此,2009—2014年,研究区生境质量指数下降幅度明显减小。2017年,研究区执行了严格的“退渔还湿”政策,西南部约3000 hm²的养殖池全部恢复为湿地,使得研究区2017年生境质量指数有所回升。研究区生境质量变化是人类活动、外来物种入侵、自然过程相互作用的结果。辨识不同因子对生境变化的影响程度,以及因子之间的相互作用关系,有助于全面理解区域生境质量变化的机理,还需要进一步研究。

(4)研究中运用常见的InVEST模型对江苏盐

城国家级珍禽自然保护区的生境质量进行评估,主要借助于遥感图像、经验公式等,通过模型数据库获得生境质量评价结果。因此,遥感图像的解译精度、经验及指标选择等人为的不确定性都可能对评价结果产生一定的误差。但是,在同一个标准下不会影响研究区生境质量的整体变化态势。另外,基于InVEST模型的生境质量评估是局限于现象层面的,从机理上对区域生境质量变化原因的探讨相对缺乏。江苏盐城国家级珍禽自然保护区核心区生境质量时空差异是水文、地貌、土壤、植被等诸多生态过程在不同时空尺度上相互耦合的结果,需要通过机制模型,开展多过程与多尺度的时空耦合动态机制研究。因此,未来研究应从辨析“格局—过程—质量”关系入手,揭示生境质量时空动态的响应机制,从而促进滨海湿地资源的合理开发与保护。

5 结论

本文以江苏盐城国家级珍禽自然保护区核心区为研究对象,在分析互花米草扩张态势与生境质量时空变化的基础上,采用线性回归模型,揭示互花米草扩张与生境质量的定量关系。主要研究结论如下:

(1)江苏盐城国家级珍禽自然保护区核心区内,互花米草扩张与时间呈正相关,相关系数为0.972,互花米草湿地面积已接近区域面积的1/4。互花米草扩张具有明显的阶段性特征,在经历了快速扩张后,扩张速度整体上变缓;扩张方向也将由双向扩张转变为向陆地单向扩张为主。

(2)研究区1983—1988年,生境质量指数由0.863上升至0.878;1988—2014年,生境质量指数下降至0.740;至2017年,又上升至0.775。研究区生境质量变化总体上呈波动下降趋势。

(3)互花米草湿地面积与生境退化程度呈正相关,相关系数为0.952;与生境质量呈负相关,相关系数为-0.928。以上表明,随着互花米草湿地面积的增加,区域生境质量下降,降低了鸟类适宜性生境面积,严重威胁鸟类的栖息地生境。而盐城滨海湿地已成为重要的世界自然遗产地,栖息地地位更加凸显,控制互花米草扩张、提升区域生境质量已成为研究区亟待解决的课题。

参考文献(References):

- [1] 彭建, 徐飞雄. 不同网格尺度下的黄山市生境质量差异分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(6): 887-897. [Peng J, Xu F X. Effect of grid size on habitat quality assessment: A case study of Huangshan City[J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(6): 887-897.]
- [2] Johnson M D. Measuring habitat quality: A review[J]. The Condor, 2007, 109(3): 489-504.
- [3] 谢余初, 巩杰, 张素欣, 等. 基于遥感和InVEST模型的白龙江流域景观生物多样性时空格局研究[J]. 地理科学, 2018, 38(6): 979-986. [Xie Y C, Gong J, Zhang S X, et al. Spatiotemporal change of landscape biodiversity based on InVEST model and remote sensing technology in the Bailong River Watershed[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(6): 979-986.]
- [4] Vanhorne B. Density as a misleading indicator of habitat quality[J]. Journal of Wildlife Management, 1983, 47(4): 893-901.
- [5] 吴健生, 曹祺文, 石淑芹, 等. 基于土地利用变化的京津冀生境质量时空演变[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3457-3466. [Wu J S, Cao Q W, Shi S Q, et al. Spatio-temporal variability of habitat quality in Beijing-Tianjin-Hebei Area based on land use change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(11): 3457-3466.]
- [6] 陈淼, 苏晓磊, 黄慧敏, 等. 三峡库区河流生境质量评价[J]. 生态学报, 2019, 39(1): 192-201. [Chen M, Su X L, Huang H M, et al. Assessment of river habitat quality in the Three Gorges Reservoir Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1): 192-201.]
- [7] 王强, 庞旭, 李秀明, 等. 水电梯级开发对河流生境质量及纵向连通性影响评价: 以五布河和藻渡河为例[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5508-5516. [Wang Q, Pang X, Li X M, et al. Assessment method for the influence of hydroelectric dams on the physical habitat quality and longitudinal connectivity of rivers: A case study of the Wubu and Zaodu rivers[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5508-5516.]
- [8] 雷呈, 黄琪, 倪才英, 等. 袁河流域河流生境质量评价及其影响因素分析[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2019, 43(4): 425-432. [Lei C, Huang Q, Ni C Y, et al. The analysis on habitat quality assessment and related factors in Yuanhe River Basin[J]. Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science Edition), 2019, 43(4): 425-432.]
- [9] 孙永涛, 张金池. 长江口北支湿地自然保护区生态评价[J]. 湿地科学与管理, 2011, 7(1): 25-28. [Sun Y T, Zhang J C. The ecological evaluation of north branch of Changjiang Estuary Wetland Nature Reserve[J]. Wetland Science & Management, 2011, 7(1): 25-28.]
- [10] Bhagabati N K, Ricketts T, Sulityawan T B S, et al. Ecosystem services reinforce Sumatran tiger conservation in land use plans[J]. Biological Conservation, 2014, 169: 147-156.
- [11] Terrado M, Sabater S, Chaplinkramer B, et al. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning[J]. Science of the Total Environment, 2016, 540: 63-70.
- [12] Gong J, Xie Y C, Cao E J, et al. Integration of InVEST-habitat quality model with landscape pattern indexes to assess mountain plant biodiversity change: A case study of Bailongjiang Watershed in Gansu Province[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(7): 1193-1210.
- [13] 何建华, 王春晓, 刘殿锋, 等. 大城市边缘区土地利用变化对生境质量的影响评价: 基于生态网络视角[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(4): 903-916. [He J H, Wang C X, Liu D F, et al. Evaluating the impact of land use change on habitat quality in metropolitan fringe areas from a perspective of ecological network[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(4): 903-916.]
- [14] 张影, 谢余初, 齐姗姗, 等. 基于InVEST模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征[J]. 资源科学, 2016, 38(8): 1585-1593. [Zhang Y, Xie Y C, Qi S S, et al. Carbon storage and spatial distribution characteristics in the Bailongjiang Watershed in Gansu based on InVEST model[J]. Resources Science, 2016, 38(8): 1585-1593.]
- [15] 郝月, 张娜, 杜亚娟, 等. 基于生境质量的唐县生态安全格局构建[J]. 应用生态学报, 2019, 30(3): 1015-1024. [Hao Y, Zhang N, Du Y J, et al. Construction of ecological security pattern based on habitat quality in Tang County, Hebei, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(3): 1015-1024.]
- [16] 顾羊羊, 黄贤峰, 邹长新, 等. 沅江源自然保护区生境质量变化遥感监测[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(6): 764-772. [Gu Y Y, Huang X F, Zou C X, et al. Monitoring habitat quality changes in Yuanjiangyuan Nature Reserve based on landsat images[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(6): 764-772.]
- [17] 牛文元. 生态环境脆弱带ECOTONE的基础判断[J]. 生态学报, 1989, 9(2): 97-105. [Niu W Y. The discriminatory index with regard to the weakness, overlapness, and breadth of ECOTONE[J]. Acta Ecologica Sinica, 1989, 9(2): 97-105.]
- [18] 杜国云, 王庆, 王秋贤, 等. 莱州湾东海岸带陆海相互作用研究进展[J]. 海洋科学, 2007, 31(3): 66-71. [Du G Y, Wang Q, Wang Q X, et al. Research advances on the marine-land interaction in east coast of Laizhou Bay[J]. Marine Sciences, 2007, 31(3): 66-71.]
- [19] Liu J E, Zhou H X, Qin P, et al. Effects of *Spartina alterniflora* salt marshes on organic carbon acquisition in intertidal zones of Jiangsu Province, China[J]. Ecological Engineering, 2007, 30(3): 240-

2020年5月

- 249.
- [20] 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. [Liu C Y, Zhang S Q, Jiang H X, et al. Spatiotemporal dynamics and landscape pattern of alien species *Spartina alterniflora* in Yancheng coastal wetlands of Jiangsu Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(4): 901-908.]
- [21] 彭少麟, 向言词. 植物外来种入侵及其对生态系统的影响[J]. 生态学报, 1999, 19(4): 560-568. [Peng S L, Xiang Y C. The invasion of exotic plants and effects of ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(4): 560-568.]
- [22] 王娟, 刘红玉, 李玉凤, 等. 入侵种互花米草空间扩张模式识别与景观变化模拟[J]. 生态学报, 2018, 38(15): 5413-5422. [Wang J, Liu H Y, Li Y F, et al. Recognition of spatial expansion patterns of invasive *Spartina alterniflora* and simulation of the resulting landscape changes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): 5413-5422.]
- [23] 刘青松, 李杨帆, 朱晓东. 江苏盐城自然保护区滨海湿地生态系统的特征与健康设计[J]. 海洋学报, 2003, 25(3): 143-148. [Liu Q S, Li Y F, Zhu X D. Characteristics of coastal wetland ecosystem and their healthy design: A case study from Yancheng Nature Reserve, Jiangsu Province, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 25(3): 143-148.]
- [24] Zhang H B, Wu F E, Zhang Y N, et al. Spatial and temporal changes of habitat quality in Jiangsu Yancheng Wetland National Nature Reserve: Rare birds of China[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17(2): 4807-4821.
- [25] 孙贤斌, 刘红玉. 江苏盐城海滨区域丹顶鹤适宜越冬生境变化[J]. 生态学杂志, 2011, 30(4): 694-699. [Sun X B, Liu H Y. Temporal changes of *Grus japonensis* suitable wintering habitat in coastal zone of Yancheng, Jiangsu[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(4): 694-699.]
- [26] 欧维新, 逢谦, 甘玉婷婷. 盐城海滨湿地资源利用变化及其对丹顶鹤越冬生境的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(7): 30-36. [Ou W X, Pang Q, Gan Y T T. Wetland use change and its impact on wintering habitats of Red-Crowned Crane in Yancheng coastal wetland[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(7): 30-36.]
- [27] 刘大伟, 张亚兰, 孙勇, 等. 江苏盐城滨海湿地越冬丹顶鹤种群动态变化与生境选择[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(3): 473-477. [Liu D W, Zhang Y L, Sun Y, et al. Population dynamics and habitat selection of overwintering Red-Crowned Crane in coastal wetland of Yancheng, Jiangsu Province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016, 32(3): 473-477.]
- [28] 汪辉, 梁会民, 徐银龙, 等. 盐城珍禽湿地生态适宜性分析与功能区划[J]. 林业科技开发, 2015, 29(4): 145-149. [Wang H, Liang H M, Xu Y L, et al. Ecological suitability analysis and functional zoning in Yancheng wetlands rare birds[J]. China Forestry Science and Technology, 2015, 29(4): 145-149.]
- [29] Wang J, Liu H Y, Li Y F, et al. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on quality of the Red-Crowned Crane (*Grus japonensis*) wintering habitat[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(21): 21546-21555.
- [30] 陈妍, 乔飞, 江磊. 基于 InVEST 模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的影响研究: 以北京为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 553-562. [Chen Y, Qiao F, Jiang L. Effects of land use pattern change on regional scale habitat quality based on InVEST model: A case study in Beijing[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2016, 52(3): 553-562.]
- [31] 韩会庆, 苏志华, 罗绪强, 等. 2000-2010年草海自然保护区生境质量变化[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(5): 158-163. [Han H Q, Su Z H, Luo X Q, et al. Habitat quality change in Caohai Nature Reserve from 2000 to 2010[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2016, 36(5): 158-163.]
- [32] 黄贤峰, 杨永菊, 武艺, 等. 1990-2017年喀斯特自然保护区土地利用变化对生境质量的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 345-351. [Huang X F, Yang Y J, Wu Y, et al. Land use change and its impact on habitat quality in Karst Nature Reserve from 1990 to 2017[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 345-351.]
- [33] Sharp R, Chaplin-Kramer R, Wood S, et al. InVEST 3.2.0 User's Guide: Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs[M]. Stanford: The Natural Capital Project, 2017.

Relationship between habitat quality change and the expansion of *Spartina alterniflora* in the coastal area: Taking Yancheng National Nature Reserve in Jiangsu Province as an example

ZHANG Huabing^{1,2}, ZHEN Yan³, WU Feier^{1,2}, LI Yufeng^{2,4}, ZHANG Yanan²

(1. School of Urban and Planning, Yancheng Teachers University, Yancheng 224007, China; 2. Ecological and Environmental Monitoring Centre for Yancheng Coastal Wetland, Yancheng 224057, China; 3. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 4. School of Ocean Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The Yancheng coastal wetland is an important part of migratory bird habitat along the coast of the Yellow Sea-Bohai Sea of China. Habitat quality is an important reflection of habitat function, while the expansion of *Spartina alterniflora* has seriously threatened the migratory bird habitat. Therefore, based on the remote sensing images of 10 time periods from 1983 to 2017 and employing image processing and GIS technologies, the relationship between the spatial-temporal variation of habitat quality and the expansion of *Spartina alterniflora* in the core area of the Yancheng National Nature Reserve was analyzed by using the InVEST model. The results are as follows: (1) From 1983 to 2017, there was a significant positive correlation between the expansion of *Spartina alterniflora* and time, and the percentage of the area of *Spartina alterniflora* marsh increased from 1.693% to 24.930%. It clearly went through several stages in time, and the expansion of *Spartina alterniflora* showed multi-directional and spatially variable characteristics. (2) Under the influence of human activities and the expansion of *Spartina alterniflora*, migratory bird habitat quality showed obvious fluctuations: From 1983 to 1988, habitat quality index value increased from 0.863 to 0.878, then decreased to 0.740 in 2014 and increased again to 0.775 in 2017. (3) There was a positive correlation between the areal change of *Spartina alterniflora* marsh and the change of the index of habitat degradation, and a negative correlation between the areal change of *Spartina alterniflora* marsh and the change of the index of habitat quality. The expansion of *Spartina alterniflora* led to the dramatic decrease in area of the *Suaeda salsa* marsh, which is a regionally suitability habitat, and this became an important factor in the degradation of regional habitat quality. Therefore, controlling the expansion of *Spartina alterniflora* is an important problem faced by the region. The results can provide reference for the improvement of habitat and sustainable management of coastal wetland from the perspective of the relationship between landscape pattern and habitat quality.

Key words: habitat quality; *Spartina alterniflora*; landscape structure; coastal wetland; InVEST model; human activities; Yancheng National Nature Reserve