



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

黄河三角洲滨海湿地退化过程的时空变化及预测分析

于淼, 栗云召, 屈凡柱, 周迪, 战超, 王雪宏

引用本文:

于淼, 栗云召, 屈凡柱, 等. 黄河三角洲滨海湿地退化过程的时空变化及预测分析[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 484–492.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0110>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

1984—2015年黄河三角洲人工湿地的演变及主要驱动因子

任玲玲, 栗云召, 于淼, 杨继松, 战超, 周迪

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 493–502 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0111>

黄河三角洲典型地区春季土壤水盐空间分异特征研究——以垦利县为例

王卓然, 赵庚星, 高明秀, 姜曙千, 常春艳, 贾吉超

农业资源与环境学报. 2015(2): 154–161 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0293>

滨海盐渍区土壤盐分遥感反演及动态监测

张素铭, 赵庚星, 王卓然, 肖杨, 郎坤

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 349–358 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0016>

滨海湿地互花米草入侵的生态水文学机制研究进展

栾兆擎, 闫丹丹, 薛媛媛, 史丹, 徐丹丹, 刘彬, 王立波, 安玉亭

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 469–476 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0124>

硬质海岸防护设施的生态效应与对策

解成杰, 谢湉, 刘泽正, 于淑玲, 王青, 崔保山

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 461–468 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0112>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

于 淼, 栗云召, 屈凡柱, 等. 黄河三角洲滨海湿地退化过程的时空变化及预测分析[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 484–492.

YU Miao, LI Yun-zhao, QU Fan-zhu, et al. Spatio-temporal changes and trend prediction of degraded coastal wetlands in the Yellow River Delta[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4): 484–492.



开放科学 OSID

黄河三角洲滨海湿地退化过程的时空变化及预测分析

于 淼¹, 栗云召^{1,2}, 屈凡柱^{3*}, 周 迪^{1,2}, 战 超^{1,2}, 王雪宏^{1,2}

(1. 鲁东大学资源与环境工程学院, 山东 烟台 264025; 2. 鲁东大学滨海生态高等研究院, 山东省高等学校滨海湿地生态修复与保育重点实验室(鲁东大学), 山东 烟台 264025; 3. 滨州学院, 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东 滨州 256600)

摘 要:以 1991、1995、1999、2004、2009 年和 2013 年 Landsat TM/ETM+/OLI 遥感影像作为数据源,从景观和土地利用角度分析黄河三角洲大尺度范围的滨海湿地退化状况,并利用马尔科夫过程模型模拟 2021 年研究区滨海湿地的演变趋势。结果表明:1999—2004 年和 2004—2009 年是黄河三角洲湿地退化较严重的两个时段,退化湿地占自然湿地总面积近 40%,2009 年以后,研究区退化得到一定的缓解。预计至 2021 年,湿地占区域陆地面积的比例将下降至 60%。与 2013 年相比,自然湿地和人工湿地面积占比将分别下降 4.52 个百分点和 3.08 个百分点,草本沼泽、灌丛湿地、森林湿地和盐沼面积将分别减少 32.21、15.76、19.33 km² 和 74.86 km²。由此可见,未来黄河三角洲滨海湿地的生态保护与修复工作仍十分艰巨。

关键词:黄河三角洲;滨海湿地;退化过程;演化预测

中图分类号:P901;P208

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)04-0484-09

doi: 10.13254/j.jare.2019.0110

Spatio-temporal changes and trend prediction of degraded coastal wetlands in the Yellow River Delta

YU Miao¹, LI Yun-zhao^{1,2}, QU Fan-zhu^{3*}, ZHOU Di^{1,2}, ZHAN Chao^{1,2}, WANG Xue-hong^{1,2}

(1. School of Resource and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China; 2. The Institute for Advanced Study of Coastal Ecology, Key Laboratory of Ecological Restoration and Conservation of Coastal Wetlands in Universities of Shandong (Ludong University), Ludong University, Yantai 264025, China; 3. Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256600, China)

Abstract: The Landsat TM/ETM+/OLI remote sensing images as of 1991, 1995, 1999, 2004, 2009, and 2013 were selected as data sources to analyze large scale range coastal wetland degradation in the Yellow River Delta in the view of landscape and land use. The Markov process model was applied to simulate and predict the evolution trends of coastal wetlands of 2021 in the region. Results showed that the most serious wetland degradation in the Yellow River Delta appeared in the two periods of 1999—2004 and 2004—2009. The area proportion of degraded wetlands to the total natural wetlands was nearly 40%. The wetland degradation in the study area had been alleviated to a certain degree since 2009. Up to 2021, the proportion of wetlands to land area would fall to 60%. Compared with 2013, the proportion of natural wetland and constructed wetland would decrease by 4.52 percent point and 3.08 percent point, respectively. The area of marshes, shrub wetlands, forest wetlands, and salt marshes would decline by 32.21, 15.76, 19.33 km² and 74.86 km², respectively. Therefore, the ecological protection and restoration work of coastal wetlands in the Yellow River Delta will be still arduous in the future.

Keywords: Yellow River Delta; coastal wetland; degradation process; evolution prediction

收稿日期:2019-03-04 录用日期:2019-07-15

作者简介:于 淼(1997—),女,吉林长春人,本科生,从事湿地景观生态学研究。E-mail:973054618@qq.com

*通信作者:屈凡柱 E-mail:fanzhuqu@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0505900);山东省黄河三角洲生态环境重点实验室开放基金项目(2016KFJJ03)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2017YFC0505900); Open Foundation of Shandong Provincial Key Laboratory of Ecology and Environment of the Yellow River Delta(2016KFJJ03)

湿地不仅是一种重要的自然资源,也是人类赖以生存的最重要的环境之一,具有巨大的生态价值^[1]。它不仅直接为人类的生产和生活提供原材料,而且还具有调节气候、调蓄洪水以及降解污染等环境调节功能^[2-7]。然而,在全球气候变化及强烈的人类活动影响下,湿地面积不断萎缩、生物多样性丧失,生产力和净化能力下降^[8-11]。尽管世界一些国家采取了一系列的湿地保护与修复措施,但湿地的退化趋势仍难以得到有效遏制^[9-10]。从全球尺度上估计,湿地消失达到50%^[12-13]。过去200年间,美国本土48个州消失的湿地面积占原湿地面积的53%,加利福尼亚州消失的湿地面积甚至高达91%^[14]。1950—1985年期间,荷兰湿地消失了近55%,德国湿地消失了近57%^[15]。亚洲、拉丁美洲、西非的红树林湿地也丧失严重,印度、巴基斯坦和泰国至少有3/4的红树林受到破坏^[16-18]。我国长江中下游湿地在近30年内,因围垦而丧失湖泊湿地面积 $1.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,丧失率达34.16%^[19]。我国71%的湿地都已经受到人类活动的威胁,39%的湿地将受到严重威胁^[20]。

黄河三角洲有着我国最年轻、保存最完整的新生河口湿地生态系统。湿地内丰富的植被和水生生物资源,以及大面积的浅海滩涂和沼泽,为鸟类的繁衍生息、迁徙越冬提供了优良的栖息环境,并使之成为东亚以至全球重要的水禽繁殖与栖息地^[21]。尽管近年来实施了一系列的保护措施和湿地修复工程,但湿地退化的趋势在诸多因素影响下仍未得到有效地遏制,强烈的人类活动加剧了区域滨海湿地系统的生态脆弱性^[22]。例如自1976年,黄河改道清水沟流路以来,北部黄河故道入海口区域缺乏足够的淡水资源供应,许多地方发生海岸侵蚀,湿地植物群落也因此发生逆向演替,表现出明显的退化现象^[23]。研究区内的石油开采、垦殖等也造成大面积的湿地萎缩、植被覆盖率下降、土壤盐碱化等退化现象^[24]。除此之外,由于黄河三角洲滨海湿地位于海陆交错带(海岸带),受到海陆交互影响强烈,气候变化所致的海平面上升能够直接影响湿地的种类、面积、结构和功能^[25]。据推测,如果海平面上升1 m,黄河三角洲海拔4 m以下的区域都将受到海水泛滥侵袭,其面积大约为 $4\,479 \text{ km}^2$ ^[26]。

目前,国际上对于湿地退化标准的界定尚未达成共识。有学者认为应该从湿地面积、组织结构状况、湿地功能、社会价值、物质能量平衡、持续发展能力、外界胁迫压力等方面来制定湿地退化的标准^[27]。也

有学者从生态特征变化的角度出发,认为湿地退化标准可以从五个方面考虑,即湿地面积(生境丧失)、水文条件、水质、非持续性资源利用状况和外来物种入侵^[28]。实际上,除了上述生态特征,湿地处理污水能力、碳收支等功能特征及社会服务、旅游等服务特征也能反映湿地的退化^[29]。但从湿地表面观上看,湿地面积及湿地群落结构作为湿地退化指标少有异议。为此,本研究以现代黄河三角洲滨海湿地为研究对象,尝试从景观和土地利用尺度上判定1991—2013年黄河三角洲湿地的退化情况,并利用马尔科夫过程模型(Markov process model)模拟预测区域滨海湿地2021年的演变趋势。

1 材料与方法

1.1 研究区域

黄河三角洲($118^{\circ}33' \sim 119^{\circ}21' \text{ E}$, $37^{\circ}35' \sim 38^{\circ}12' \text{ N}$)位于我国鲁西北平原东缘黄河入海口处,东临渤海,南依莱州湾。研究区主要是1934年以来形成的以垦利县渔洼为顶点的扇面(现代黄河三角洲),北起挑河口,南到宋春荣沟口,面积约为 $2\,400 \text{ km}^2$ ^[30](图1)。黄河三角洲地区属于暖温带季风气候区,年平均气温 12.1°C ,年均降雨量 551.6 mm ,蒸发量达到 $1\,962 \text{ mm}$,干旱指数高达3.56。天然植被中湿生植物和盐生植物是区域植被的主要建群种和优势种,盐生植被占天然植被的56.5%,沼生和湿生植被占天然植被的21%。土壤以潮土和盐土为主,分别占土壤总面积的44.46%和50.88%。由于其特殊的地理位置和较短的成陆时间,其湿地生态系统具有明显的脆弱性,加之土壤成土历程短,熟化程度低,土壤养分少,地表水分蒸发快,极易造成盐碱化^[31-32]。

1.2 数据源和处理方法

以1991、1995、1999、2004、2009年和2013年共6期Landsat TM/ETM+/OLI遥感影像作为数据源。首先,在ENVI中将配准后的影像,进行影像融合、裁剪、几何校正等预处理。其次,参考历史资料、野外调查资料和东营市土地利用图,利用ArcGIS对上述各期经预处理的影像进行目视解译,最终得到6期黄河三角洲滨海湿地分类结果,确保解译精度在80%以上。根据湿地的退化判定标准,分析黄河三角洲滨海湿地的退化过程及时空变化特征;并结合马尔科夫模型,模拟预测黄河三角洲滨海湿地未来的演变趋势。

1.3 湿地分类和退化判定标准

研究中将黄河三角洲土地利用类型划分为自然



图1 现代黄河三角洲示意图

Figure 1 Location of the modern Yellow River Delta

湿地、人工湿地和非湿地三个大类,其中自然湿地划分为草本沼泽、灌丛湿地、森林湿地、盐沼、滩涂和河流6类;人工湿地划分为养殖池、池塘、水田、盐田、水库、沟渠和积水洼地7类。其中,积水洼地从地类划分上属于自然湿地,但研究区的积水洼地是因养殖池或盐田建设而人工开挖形成的,因此本研究将其划分在人工湿地类别中;非湿地主要包括居民区、工矿区、公路、堤坝和旱田5类。

根据黄河三角洲湿地面积范围及湿地退化情况,考虑到操作的可行性与数据的获取情况,本研究提出了黄河三角洲大尺度范围上湿地(主要指自然湿地)退化的标准:①在地类级别中自然湿地面积减小或被其他地类取代;②在自然湿地类别中生物多样性丰富的植物群落被生物多样性单一的植物群落取代;③有植被覆盖的湿地被无植被覆盖类型取代;④湿地植物群落的平均斑块单元从完整变为破碎。依据此4条标准,将黄河三角洲各地类从高到低划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ7个生态级别(表1)。某区域的湿地生态级别从较高级别演变为较低级别,则判定为湿地发生退化;反之,则判定为湿地发

展良好(表2)。

1.4 湿地退化趋势预测

马尔科夫过程模型是预测土地利用变换和情景分析的有效方法之一,适用于较短时间的趋势分析与预测。国内外已有学者对马尔科夫模型进行改进、检验并开展土地利用变化模拟预测^[33-34]。其方法是同一区域两期不同的湿地分类图进行土地利用变化分析,得到土地利用变化概率矩阵(P)和变化结果,然后用马尔科夫过程模型将环境因子和土地利用变化概率矩阵耦合,对湿地未来演变进行预测。

马尔科夫过程模型公式:

$$X(k+1) = X(k) \times P \quad (1)$$

式中: $X(k)$ 表示趋势分析与预测对象在 $t=k$ 时刻的状态向量; $X(k+1)$ 表示趋势分析与预测对象在 $t=k+1$ 时刻的状态向量; P 表示两时刻间的转移概率矩阵。

为了检验马尔科夫过程模型在滨海湿地演化预测中的可信度,本研究以2009年的滨海湿地分布数据为模拟起始数据(即 $t=k$ 时刻的数据),利用2004—2009年的湿地土地利用变化转化概率矩阵为转移概率矩阵(P),通过马尔科夫模型计算,得到黄河三角

洲滨海湿地 2013 年的模拟分布结果。然后将模拟结果与 2013 年黄河三角洲滨海湿地真实结果进行对比,分析模拟的精度;通过反复修改模型的参数来调整预测结果,直至预测结果达到期望的精度要求(70% 以上)。

基于调试的模型参数,以 2013 年的湿地分类数据作为模拟起始数据,2009—2013 年的湿地土地利用变化转化概率矩阵为转移概率矩阵(P),通过模型模拟得到黄河三角洲滨海湿地 2021 年的湿地分布。

表 1 黄河三角洲各地类生态级别

Table 1 Ecological level of each land type in the Yellow River Delta

自然湿地 Natural wetlands		人工湿地 Artificial wetlands		非湿地 Non-wetlands	
类别 Type	级别 Level	类别 Type	级别 Level	类别 Type	级别 Level
草本沼泽	I	积水洼地	VI	居民区	VII
灌丛湿地	II	养殖池	VII	工矿区	VII
森林湿地	I	池塘	VII	公路	VII
盐沼	III	水田	VII	堤坝	VII
滩涂	IV	盐田	VII	旱田	VII
河流	V	水库	VII		
		沟渠	VII		

2 结果与分析

2.1 不同时段退化湿地空间分布

1991—2013 年 5 个时段的退化滨海湿地空间分布见图 2,结果表明:黄河三角洲滨海湿地在各时段内的分布状况存在一定的差异。退化湿地总体上主要分布在黄河三角洲的北部、中部及东部废弃河口区,发展良好的湿地主要存在于黄河现道入海口处。从不同时段来看,1991—1995 年,除了三角洲东南部清水沟流路入海口附近及三角洲中部孤岛镇附近的

表 2 两个相邻时间段湿地退化判断矩阵

Table 2 The judgement matrix of wetland changes during adjacent period of time

生态级别 Level	I	II	III	IV	V	VI	VII
I	不变	退化	退化	退化	退化	退化	退化
II	良好	不变	退化	退化	退化	退化	退化
III	良好	良好	不变	退化	退化	退化	退化
IV	良好	良好	良好	不变	退化	退化	退化
V	良好	良好	良好	良好	不变	退化	退化
VI	良好	良好	良好	良好	良好	不变	退化
VII	良好	良好	良好	良好	良好	良好	不变

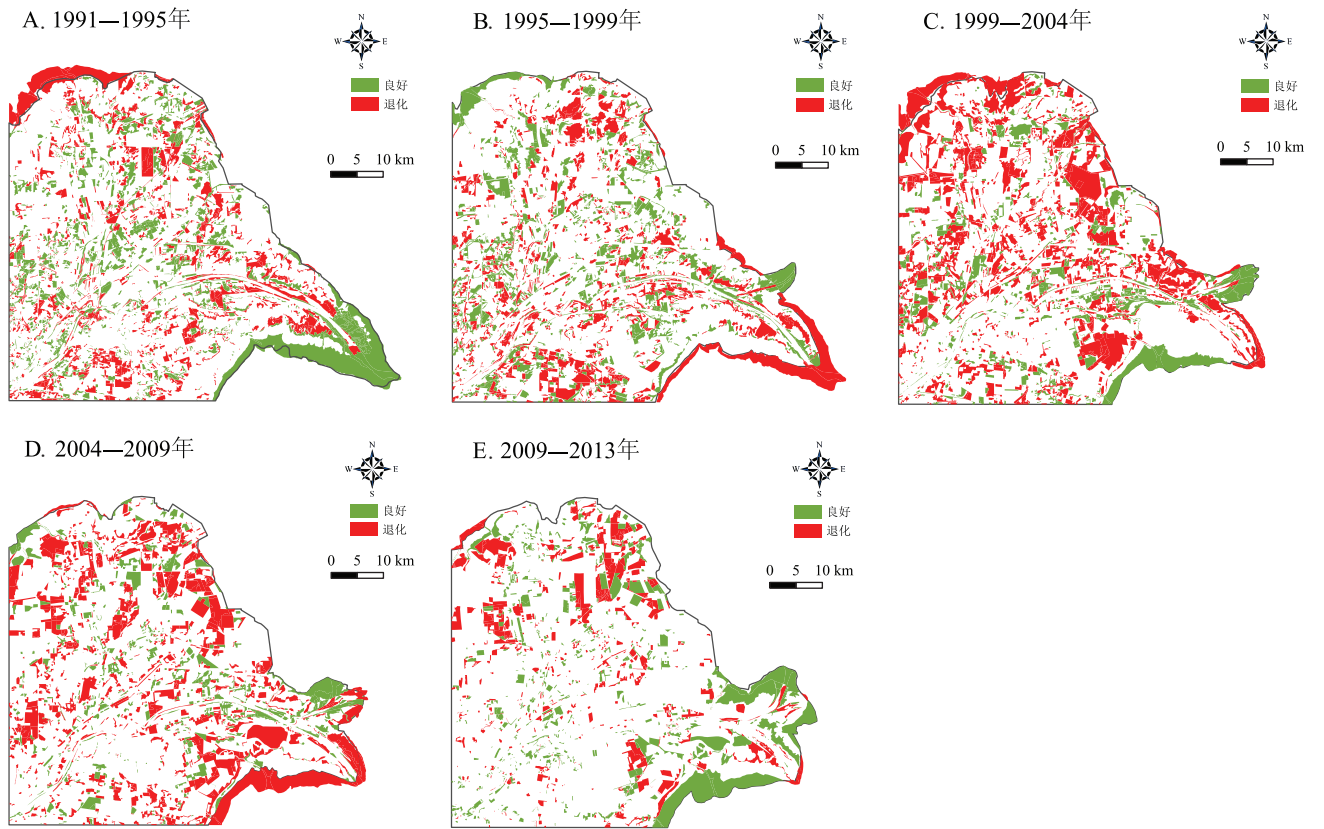


图 2 1991—2013 年不同时段黄河三角洲退化滨海湿地的空间分布

Figure 2 Spatial distribution of degraded coastal wetland of the Yellow River Delta during different periods from 1991 to 2013

湿地发展良好外,湿地退化现象几乎遍布整个三角洲,主要分布在三角洲北部刁口河口、挑河口、孤北水库、神仙沟口、小岛河南部和黄河三角洲自然保护区大汶流及黄河口管理站的部分区域(图2A)。

1995—1999年,退化湿地分布比较集中,主要分布于孤北水库北部的保护区、东南部潮滩和小岛河以南三个区域。此外,在挑河口、三角洲东部新冲积形成的小沙嘴处和黄河故道西侧区域,湿地呈良性发展(图2B)。

1999—2009年,湿地退化现象十分明显,遍布整个黄河三角洲。其中,1999—2004年黄河以北的湿地退化分布极广;而在黄河河道以南,湿地退化主要发生在东南部的大汶流管理站以西。具有良好发展势头的湿地较少,只分布于东南部黄河现道清八汊入海处及南部滨海区域(图2C)。2004—2009年黄河以南的清水沟流路除河口附近的湿地以外都发生了退化,发育良好的湿地零星分布,主要集中于清八汊北部和挑河口(图2D)。

2009—2013年,湿地的发育变化有所改变,退化得到了有效缓解。退化湿地不再遍布整个三角洲,仅集中于三角洲的西北部 and 北部。在东南部黄河三角洲自然保护区内,湿地呈良性发展,内陆几乎无大片的湿地发生退化(图2E)。

2.2 不同时段退化湿地面积变化

总体上看,研究时段内黄河三角洲湿地的退化现象分布范围广、变动大。20世纪90年代,研究区湿地退化面积约500 km²,占自然湿地总面积的25%左右。1999—2004年和2004—2009年是三角洲湿地退化最严重的时段。每个阶段发生退化的湿地面积均超过

700 km²,约占自然湿地总面积的近40%。2009年后,湿地的发育情况有所好转,发生退化的湿地面积为309.48 km²,占2009年自然湿地的21.3%(图3A)。

发展态势良好的湿地面积变化结果表明:2009年以前,发展良好的湿地面积持续萎缩,从1991—1995年的467.46 km²减小至2004—2009年的253.94 km²,占自然湿地的面积比例从23.41%下降为14.52%。2009—2013年,湿地发展势头有所好转,发展良好的湿地面积达到383.65 km²,占自然湿地总面积的26.41%(图3B)。因此,从整个黄河三角洲来看,2009年之后,自然湿地的状况开始逐渐向好的趋势发展。

2.3 黄河三角洲滨海湿地发展趋势预测

模型预测的2013年地表覆被结果(图4A)与实际状况(图4B)对比可知,从整体上来看,两者的地类分布情况类似,预测结果可信。但是在某些由于人为活动突然加强所造成的地表覆被改变的区域还无法做到准确预测,如东营港西侧大片工矿区。此外,在滨海区域,由潮汐作用所造成的潮间带的大幅变化,模型也无法准确预测。这仍然是该模型乃至岸线提取、湿地解译与制图的难点之一。从各地类的模拟结果与实际对比(表3)来看,除积水洼地和公路外,人工湿地和非湿地中各地类的预测精度均超过70%。在所有地类中,积水洼地和公路预测精度最低,分别为47.31%和63.51%,这两种地类几乎完全由人类活动所支配,而人类活动的突变性与弱规律性是造成这两种地类预测结果精度低的主要原因。自然湿地各地类模拟精度较高,其中草本沼泽、灌丛湿地和森林湿地的预测精度都在80%以上,最低的滩涂湿地达

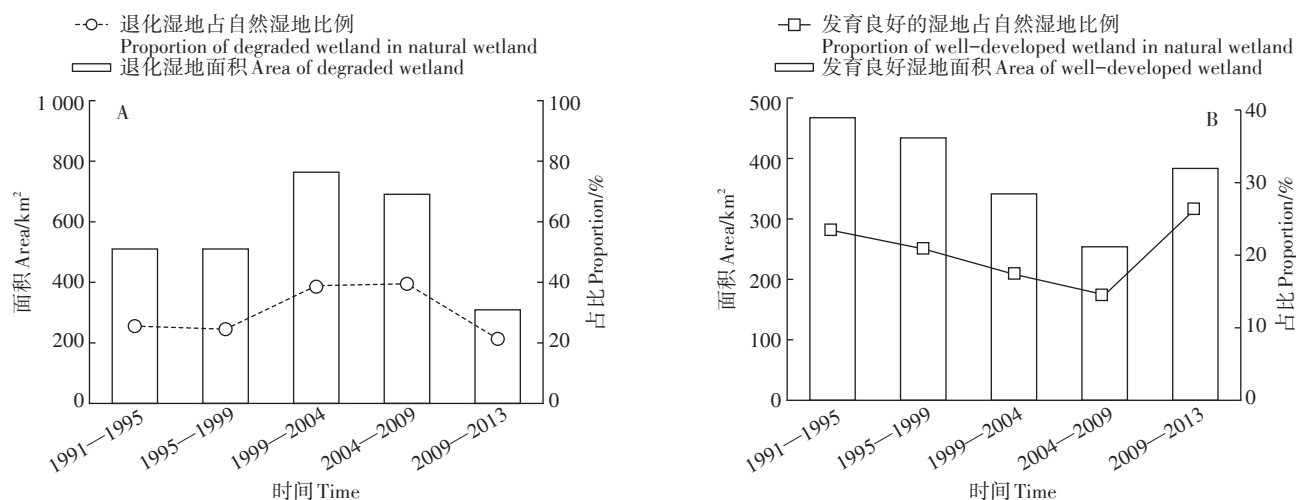


图3 1991—2013年退化湿地(A)与发育良好的湿地(B)的面积及其占自然湿地面积比例变化

Figure 3 Area and proportion change of degraded wetland (A) and well-developed wetland (B) from 1991 to 2013

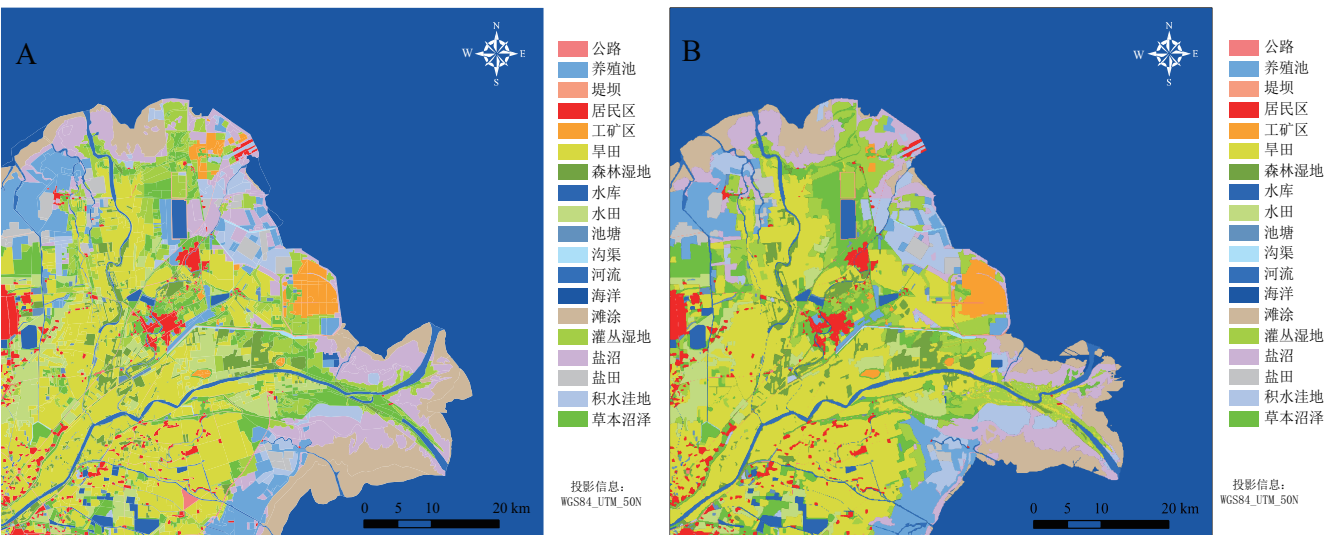


图4 2013年黄河三角洲地表覆被类型的预测图(A)与真实图(B)对比

Figure 4 Comparison of predicting land type(A) and actual land type(B) in 2013

表3 黄河三角洲各地类面积2013年预测值与真实值比较

Table 3 Comparison of area of predicting land types and actual land types in 2013

类型 Classifi- cation	类别 Type	预测值 Predictive value/km ²	真实值 Actual value/km ²	变化率 Change rate/%	预测精度 Precision/%
自然 湿地	草本沼泽	261.87	295.25	11.31	88.69
	灌丛湿地	306.97	260.94	-17.64	82.36
	森林湿地	101.18	120.51	16.04	83.96
	盐沼	260.53	327.30	20.40	79.60
	滩涂	211.13	282.47	25.25	74.75
	河流	101.41	103.84	2.34	97.66
	积水洼地	145.99	95.61	-52.69	47.31
人工 湿地	养殖池	176.82	223.39	20.85	79.15
	池塘	19.80	24.00	17.51	82.49
	水田	135.26	183.06	26.11	73.89
	盐田	47.13	66.43	29.06	70.94
	水库	54.28	54.86	1.07	98.93
	沟渠	8.00	8.47	5.51	94.49
	居民区	103.33	111.67	7.47	92.53
非湿地	工矿区	50.95	67.02	23.98	76.02
	公路	11.11	17.49	36.49	63.51
	堤坝	12.21	11.53	-5.87	94.13
	旱田	935.09	815.43	-14.67	85.33

到74.75%。总体而言,采用马尔科夫过程模型对湿地演变的预测结果是可信的。

模拟预测的黄河三角洲2021年的地表覆被结果如图5所示。与2013年实际情况(图4B)相比,黄河三角洲的洲体变化主要发生在三角洲东南部的沙嘴

上。在沙嘴的东部和南部均表现出蚀退现象;而在沙嘴北部,尽管黄河河道仍然向海中延伸,但新生成的土地并不大。在内陆,旱地的扩张十分明显,甚至占去了黄河三角洲自然保护区大汶流与黄河口管理站内的大片草本沼泽与灌丛湿地。积水洼地、养殖池与盐田的分布仍在扩张。在黄河三角洲的中北部(仙河镇以北),尽管海岸附近的湿地退化尚不能缓解,但整体上自然湿地的发育情况趋向好转。

从地类的组成结构来看,湿地占区域陆地面积的比例已下降到60%。其中,自然湿地占40.82%,比2013年减少4.52个百分点;人工湿地面积占比为19.29%,比2013年低3.08个百分点;非湿地面积占比为39.89%(图6A)。从湿地的组成结构来看,各类湿地面积占比趋于均匀,草本沼泽的面积占比最高,为15.11%;其次为盐沼,面积占比为14.50%;随后依次为灌丛湿地(14.08%)、滩涂(10.30%)、养殖池(10.16%)、积水洼地(9.02%)和水田(7.77%)(图6B)。

至2021年,整个自然湿地面积约为1 182.38 km²,比2013年的1 390.31 km²减少207.93 km²;人工湿地面积约为558.50 km²,比2013年的655.82 km²减少97.32 km²。自然湿地中草本沼泽、灌丛湿地、森林湿地和盐沼面积分别为263.04、245.18、101.18 km²和252.44 km²,与2013年相比,分别减少了32.21、15.76、19.33 km²和74.86 km²。

3 讨论

引起湿地退化的原因很多,如生产垦殖、环境污

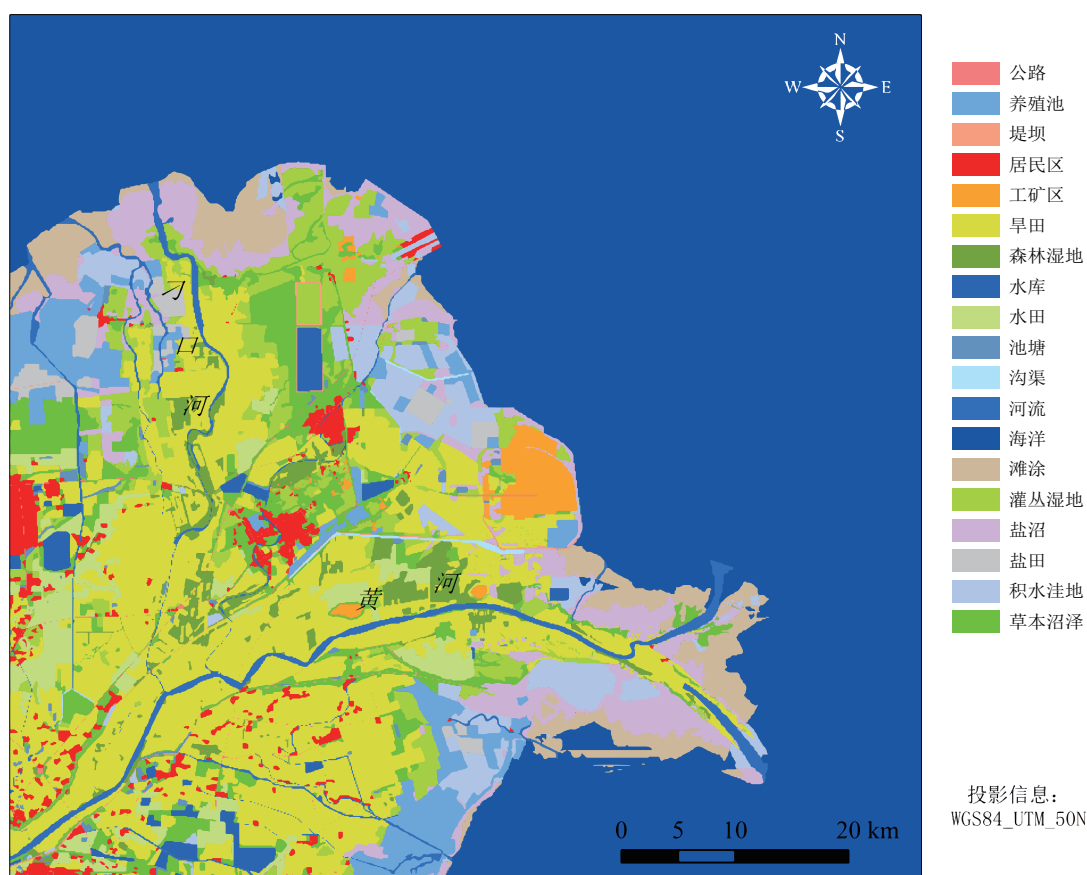


图5 黄河三角洲2021年的地表覆被预测结果

Figure 5 The prediction results of land covering of the Yellow River Delta in 2021

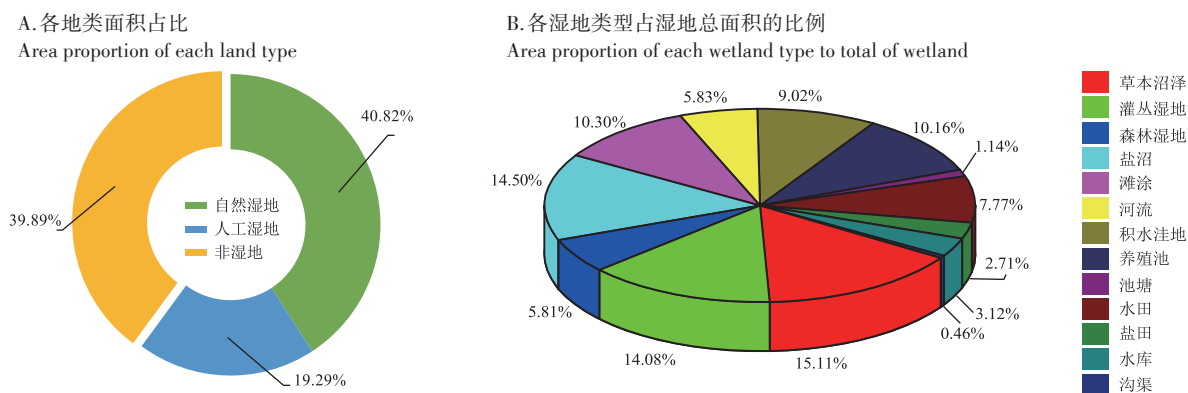


图6 2021年黄河三角洲各地类面积占比预测结果

Figure 6 The prediction results of area proportion of land types in the Yellow River Delta in 2021

染、气候变化、水沙环境变化等^[8,10-11,17,32],总体上可归纳为自然因素和人为因素两大类,但自然因素和人为因素也不是孤立的,而是彼此影响、息息相关。黄河三角洲滨海湿地处于海陆交汇处,受黄河和渤海的双重影响^[35]。当黄河淡水补给充足时,淡水和半咸水湿地生态系统发育,咸水湿地生态系统受到限制;反之,半咸水和咸水湿地生态系统发育,淡水湿地生态系统

受到限制。同时,黄河每年携带的泥沙在河口沉积,形成的新生土地是滨海湿地面积扩张的重要原因,而海水侵蚀、风暴潮及黄河废弃故道水沙减少是滨海湿地退化及面积萎缩的重要原因^[32,35]。从20世纪90年代到21世纪初,由于不合理的引水及自然原因,黄河曾经历流量显著减少与断流的过程^[35-37],这造成黄河三角洲湿地淡水资源匮乏,缺水严重,淡水湿地大片

丧失与退化;此时段内,黄河三角洲的农田开垦及油田开采等活动也较多,这是引起湿地退化的另一个原因;此外,黄河1996年经人为改道从清水沟流路改为清八汊入海,河口在清水沟入海口东北部形成新沙嘴,并发育出新的湿地,而原清水沟东南河道流路因淡水供给被切断而不断蚀退,湿地退化。21世纪初的10年,正逢黄河三角洲产业结构的大调整;同时,黄河全流域水资源统一配给及调水调沙工程的实施,保证了黄河三角洲淡水资源的稳定供给^[38]。此时段内,黄河三角洲大片湿地覆被变化剧烈,湿地退化明显^[35]。主要原因来自人为因素,如:滨海滩涂被盐田和养殖池占用,内陆湿地被水田、藕池等人工湿地替代等。此时段内,湿地的面积虽然降幅小,但湿地等级降低明显,生态功能衰退较快^[22,32,39];2010年之后,随着区域湿地综合保护治理及退耕还湿等工程的实施,黄河三角洲滨海湿地退化现象趋于好转,特别是黄河水利委员会批准的向三角洲北部黄河故道区调水,使黄河三角洲北部区域湿地退化得到了缓解。但黄河近年输沙量减少,新生湿地面积增长率减缓,以及互花米草等外来物种的大肆扩张,也对黄河三角洲滨海湿地演变的影响愈加强烈^[40]。

就未来黄河三角洲滨海湿地的演变趋势来看,湿地面积将缓慢下降。其中,自然湿地面积降幅大于人工湿地,致使较低等级湿地的占比将上升,湿地的生态功能将衰退,湿地退化的趋势仍将持续。未来黄河三角洲湿地生态功能的变化将是区域的研究热点,湿地保护工作任重而道远。

4 结论

(1)1991—2013年,退化湿地总体上主要分布在黄河三角洲的北部、中部及东部废弃河口区,发展良好的湿地主要存在于黄河现道入海口处,不同时段研究区湿地退化的面积变动大。其中,1999—2004年和2004—2009年是黄河三角洲湿地退化较严重的时段,退化湿地占自然湿地总面积近40%。2009—2013年,退化得到一定的缓解,但退化湿地面积仍占自然湿地的21.3%。

(2)马尔科夫过程模型对湿地演变的预测结果具有较高的可信度,尤其对人类干扰较小的湿地类型模拟精度高。模拟结果表明:至2021年,黄河三角洲湿地面积占区域陆地面积的比例将下降到60%;与2013年相比,自然湿地和人工湿地面积占比将分别下降4.52个百分点和3.08个百分点;草本沼泽、灌丛

湿地、森林湿地和盐沼等主要湿地类型面积将分别减少32.21、15.76、19.33 km²和74.86 km²。

参考文献:

- [1] Costanza R, D'Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *World Environment*, 1999, 387(1):3-15.
- [2] Brusati E D, Dubowy P J, Lacher T E. Comparing ecological functions of natural and created wetlands for shorebirds in Texas[J]. *Waterbirds*, 2001, 24(3):371-380.
- [3] Chabrierie O, Poudevigne I, Bureau F, et al. Biodiversity and ecosystem functions in wetlands: A case study in the estuary of the Seine River, France[J]. *Estuaries*, 2001, 24(6):1088-1096.
- [4] Koskiaho J, Puustinen M. Function and potential of constructed wetlands for the control of N and P transport from agriculture and peat production in boreal climate[J]. *Journal of Environmental Science & Health Part A: Toxic/hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2005, 40(6/7):1265-1279.
- [5] Borin M, Malagoli M. Ecology, functioning and management of wetland systems[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, 22(4):2357-2359.
- [6] Zhao Y Y, Fang Y. Ecological functions of different shrublands in the chenier coastal wetlands, China[J]. *Journal of Coastal Research*, 2017, 80:24-29.
- [7] Lane C R, Leibowitz S G, Autrey B C, et al. Hydrological, physical, and chemical functions and connectivity of non-floodplain wetlands to downstream waters: A review[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2018, 54(2):346-371.
- [8] Liu D, Cao C, Chen W, et al. Monitoring and predicting the degradation of a semi-arid wetland due to climate change and water abstraction in the Ordos *Larus relictus* national nature reserve, China[J]. *Geomatics Natural Hazards & Risk*, 2017, 8(2):367-383.
- [9] Alobaid S, Samraoui B, Thomas J, et al. An overview of wetlands of Saudi Arabia: Values, threats, and perspectives[J]. *Ambio*, 2017, 46(1):1-11.
- [10] Limaye R B, Kumaran K P N, Padmalal D. Mangrove habitat dynamics in response to Holocene sea level and climate changes along southwest coast of India[J]. *Quaternary International*, 2014, 325(4):116-125.
- [11] Li B, Yu Z, Liang Z, et al. Effects of climate variations and human activities on runoff in the Zoige alpine wetland in the eastern edge of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 19(5):1026-1035.
- [12] Bildstein K L, Bancroft G T, Dugan P J, et al. Approaches to the conservation of coastal wetlands in the western hemisphere[J]. *Wilson Bulletin*, 1991, 103(2):218-254.
- [13] Dugan P. Wetlands in danger: A world conservation Atlas[M]. New York:Oxford University Press, 1993.
- [14] Dahl T E. Wetlands losses in the united states 1780's to 1980's[M]. US Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, 1990.
- [15] Ramachandra V T, Rajinikanth R, Ranjini V G. Economic valuation of wetlands[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2005, 26(2):439-447.

- [16] Lopez-angarita J, Roberts C M, Tilley A, et al. Mangroves and people: Lessons from a history of use and abuse in four Latin American countries[J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 368: 151-162.
- [17] Ellison A M, Farnsworth E J. Anthropogenic disturbance of Caribbean mangrove ecosystems: Past impacts, present trends, and future predictions[J]. *Biotropica*, 1996, 28 (4): 549-565.
- [18] 李晓兵. 国际土地利用——土地覆盖变化的环境影响研究[J]. 地球科学进展, 1999, 14(4): 82-87.
LI Xiao-bing. International research on environmental consequence of land use/cover change[J]. *Advances in Earth Science*, 1999, 14(4): 82-87.
- [19] 陆健健. 中国湿地[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1990.
LU Jian-jian. Wetlands in China[M]. Shanghai: East China Normal University Press, 1990.
- [20] 马敬能, 吕晓平. 中国生物多样性保护综述[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998.
MA Jing-neng, LÜ Xiao-ping. A summarize of biodiversity protection in China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1998.
- [21] Yan Y, Cui B, He W. Changes in water birds habitat suitability following wetland restoration in the Yellow River Delta, China[J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2012, 40 (10): 1076-1084.
- [22] Wang M J, Qi S Z, Zhang X X. Wetland loss and degradation in the Yellow River Delta, Shandong Province of China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 67 (1): 185-188.
- [23] Guan B, Yu J B, Cao D, et al. The ecological restoration of heavily degraded saline wetland in the Yellow River Delta[J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2013, 41 (7): 690-696.
- [24] 于君宝, 阚兴艳, 王雪宏, 等. 黄河三角洲石油污染对湿地芦苇和碱蓬幼苗生长影响的模拟研究[J]. 地理科学, 2012, 32(10): 1254-1261.
YU Jun-bao, KAN Xing-yan, WANG Xue-hong, et al. Simulative study on effects of petroleum contamination on seedling growth of *Phragmites australis* and *Suaeda salsa* in coastal wetland of Yellow River Delta[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32 (10): 1254-1261.
- [25] Blankespoor B, Dasgupta S, Laplante B. Sea-level rise and coastal wetlands[J]. *Ambio*, 2014, 43 (8): 996-1005.
- [26] 刘亚岚, 任玉环, 陈涛, 等. 基于“北京一号”小卫星数据的密云水库流域植被覆盖度估算方法比较[J]. 遥感技术与应用, 2007 (5): 581-585, 575.
LIU Ya-lan, REN Yu-huan, CHEN Tao, et al. Comparisons of estimating methods of vegetation fraction based on “BJ-1” microsatellite imagery[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007 (5): 581-585, 575.
- [27] 张晓龙, 李培英. 湿地退化标准的探讨[J]. 湿地科学, 2004, 2(1): 36-41.
ZHANG Xiao-long, LI Pei-ying. Discussion on standard of wetland degradation[J]. *Wetland science*, 2004, 2(1): 36-41.
- [28] O'connell M J. Detecting, measuring and reversing changes to wetlands[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2003, 11(6): 397-401.
- [29] Kansime F, Saunders M J, Loiselle S A. Functioning and dynamics of wetland vegetation of Lake Victoria: An overview[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2007, 15(6): 443-451.
- [30] 于君宝, 周迪, 韩广轩, 等. 黄河三角洲滨海湿地营养元素生物地球化学过程[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
YU Jun-bao, ZHOU Di, HAN Guang-xuan, et al. Biogeochemical processes of nutrient elements in coastal wetland of the Yellow River Delta[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [31] Cui B S, Yang Q C, Yang Z F, et al. Evaluating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(7): 1090-1103.
- [32] 张晓龙, 李培英, 刘乐军, 等. 中国滨海湿地退化[M]. 青岛: 海洋出版社, 2010.
ZHANG Xiao-long, LI Pei-ying, LIU Le-jun, et al. Degradation of coastal wetlands in China[M]. Qingdao: China Ocean Press, 2010.
- [33] 井云清, 张飞, 张月. 基于CA-Markov模型的艾比湖湿地自然保护区土地利用/覆被变化及预测[J]. 应用生态学报, 2016, 27 (11): 3649-3658.
JING Yun-qing, ZHANG Fei, ZHANG Yue. Change and prediction of the land use/cover in Ebinur Lake wetland nature reserve based on CA-Markov model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27 (11): 3649-3658.
- [34] 肖翔, 李扬帆, 朱晓东. 基于土地利用驱动力的马尔科夫模型及其应用[J]. 土壤, 2011, 43(5): 822-827.
XIAO Xiang, LI Yang-fan, ZHU Xiao-dong. Markov model based on driving forces of land use change and its application[J]. *Soils*, 2011, 43 (5): 822-827.
- [35] 栗云召. 黄河三角洲滨海湿地的演变过程与驱动机制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
LI Yun-zhao. Evolution process and its driving mechanism of coastal wetlands in the Yellow River Delta[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [36] 张晓龙, 李培英. 现代黄河三角洲的海岸侵蚀及其环境影响[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(5): 475-479.
ZHANG Xiao-long, LI Pei-ying. Coastal erosion and its environmental effect in the modern Yellow River Delta[J]. *Marine Environmental Science*, 2008, 27(5): 475-479.
- [37] 刘杜娟. 中国沿海地区海水入侵现状与分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2004, 15(1): 31-36.
LIU Du-juan. The situation and analysis of salinity intrusion in coastal areas, China[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2004, 15(1): 31-36.
- [38] 龙跃, 吴晓, 毕乃双, 等. 黄河调水调沙影响下的现行三角洲叶瓣冲淤演化格局[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(3): 7-11.
LONG Yue, WU Xiao, BI Nai-shuang, et al. Evolution of active Yellow River (Huanghe) Delta under the water and sediment regulation scheme (WSRS)[J]. *Marine Geology Frontier*, 2017, 33(3): 7-11.
- [39] 王永丽, 于君宝, 董洪芳, 等. 黄河三角洲滨海湿地的景观格局空间演变分析[J]. 地理科学, 2012, 32(6): 717-724.
WANG Yong-li, YU Jun-bao, DONG Hong-fang, et al. Spatial evolution of landscape pattern of coastal wetlands in Yellow River Delta[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(6): 717-724.
- [40] 任广波, 刘艳芬, 马毅, 等. 现代黄河三角洲互花米草遥感监测与变迁分析[J]. 激光生物学报, 2014, 23(6): 596-603, 608.
REN Guang-bo, LIU Yan-fen, MA Yi, et al. *Spartina alterniflora* monitoring and change analysis in Yellow River Delta by remote sensing technology[J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2014(6): 596-603, 608.