

DOI: 10.5846/stxb201607261524

孙万龙,孙志高,田莉萍,胡星云.黄河三角洲潮间带不同类型湿地景观格局变化与趋势预测.生态学报,2017,37(1): - .

Sun W L, Sun Z G, Tian L P, Hu X Y. Variation and prediction of different marsh landscapes in intertidal zone of the Yellow River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(1): - .

黄河三角洲潮间带不同类型湿地景观格局变化与趋势预测

孙万龙^{1,2}, 孙志高^{1,*}, 田莉萍¹, 胡星云¹

1 福建师范大学 地理研究所 湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福州 350007

2 清华大学环境学院, 北京 100049

摘要:以 1979—2013 年 7 期卫星遥感影像(Landsat TM)为数据源,结合野外实地调查,通过建立黄河三角洲潮间带湿地数据库,探讨不同类型湿地的景观格局以及自然与人为因素对景观格局变化的影响,并基于 Markov 模型对未来 20 年三角洲潮间带不同类型湿地的景观格局进行了趋势预测。结果表明,三角洲的潮间带湿地面积在 1979—2013 年间整体呈先降低后增加变化。其中,1979—2010 年的湿地面积持续减少,由 1050.28 km²减少为 575.39 km²,减少率为 45.22%;2010—2013 年的湿地面积略有增加,由 575.39 km²增加为 596.17 km²,增长率为 0.36%。1979—2013 年,潮间带主要湿地景观类型随距海远近均呈明显带状分布,但芦苇湿地面积呈明显降低趋势(减少 273.53 km²,减少率为 79.68%),盐田养殖池面积呈显著增加趋势(增长 12.04 km²,增长率为 1584.21%),而光滩、碱蓬湿地、碱蓬-柽柳湿地和柽柳-芦苇湿地等其它类型湿地面积整体均呈波动减少趋势。未来 20 年,潮间带湿地面积整体将呈降低趋势,其值将由 2010 年的 575.39 km²减少为 2030 年的 546.98 km²,减少率为 6.60%。芦苇湿地面积将继续减少(减少 30.16 km²,减少率为 24.12%),盐田养殖池面积将持续增长(增加 3.71 km²,增长率为 38.61%),而光滩、碱蓬湿地、碱蓬-柽柳湿地和柽柳-芦苇湿地等其它类型湿地面积均将呈小幅波动变化。研究发现,尽管自然与人为驱动力的双重作用决定了 1979—2013 年间潮间带的湿地景观格局及其动态变化,但黄河年输沙量(x_1)、区域 GDP(x_2)和水产品产量(x_3)对潮间带湿地面积变化(y)的影响更为重要($y = 733.192 + 35.317 x_1 - 0.005 x_2 - 4.085 x_3$, $p = 0.0001 < 0.05$),其对过去 30 多年间潮间带湿地面积变化的解释贡献高达 76.7%。随着黄河三角洲高效生态经济区国家战略的实施,为实现潮间带区域的可持续发展,潮间带湿地的保护与生态保育应给予特别重视。

关键词:景观格局;驱动力;潮间带湿地;Markov 预测;黄河三角洲

Variation and prediction of different marsh landscapes in intertidal zone of the Yellow River Delta

SUN Wanlong^{1,2}, SUN Zhigao^{1,*}, TIAN Liping¹, HU Xingyun¹

1 Institute of Geography, Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 School of Environmental, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: Seven Landsat TM images during 1979—2013, combined with a field survey, were used to establish a database of tidal marshes in the Yellow River Delta, to determine the characteristics of landscape pattern in tidal marshes and the impacts of natural and human factors thereon. The trends of landscape patterns in tidal marshes in the future 20 years were also forecast using a Markov model. Results showed that the tidal marsh areas generally decreased from 1050.28 to 575.39 km² with a decrement rate of 45.22% from 1979 to 2010, and increased to 596.17 km² during 2010 to 2013, with an

基金项目:国家自然科学基金项目(41371104)和福建省“闽江学者奖励计划”项目资助

收稿日期:2016-07-26; 修订日期:2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhigaosun@163.com

increment rate of 0.36%. The main landscape pattern showed obvious zonal distribution characteristics from the land to sea, and the landscape types in a seaward direction were *Phragmites australis* marsh, *Suaeda salsa*-*Tamarix chinensis*-*P. australis* marsh, and *S. salsa* marsh and mudflat, respectively. In general, the areas of *P. australis* marsh (PA) decreased significantly, with a decrement rate of 79.68%, whereas those of salt-cultural-pond (SP) and resident district (RD) continued increasing during 1979—2013, and those of other landscape patterns showed varied fluctuations, decreasing overall. In the next 20 years, the areas of tidal marshes are predicted to show a decreasing trend, with a decrement rate of 6.60%. Particularly, the areas of PA are predicted to decrease continuously and those of the SP and RD to increase continuously, whereas those of the other landscapes are predicted to show slight fluctuations. In this study, we found that, although the dual function of natural and human driving forces determined the dynamics of landscape patterns of tidal marshes during 1979—2013, the annual sediment load (x_1), regional GDP (x_2), and output of aquatic products (x_3) were more critical factors affecting the landscape patterns (y) of tidal marshes ($y = 733.192 + 35.317 x_1 - 0.005 x_2 - 4.085 x_3$, $p = 0.0001 < 0.05$), which could explain 76.7% of the variations in tidal marshes over the past 30 years.

Key Words: Landscape pattern; Driving force; Tidal marsh; Markov model; Yellow River Delta

黄河三角洲潮间带是黄河入海河段与渤海相互作用形成的重要生态类型,主要分布于咸淡水的交界地带,是一个高度动态和复杂的生态系统,其在维护区域生态安全及促进经济发展方面均具有重要作用^[1-2]。黄河三角洲潮间带属典型的淤泥质潮滩,其原始性、脆弱性和作为珍惜濒危鸟类重要栖息地的作用在国际上备受关注。在自然与人为因素的共同影响下,黄河三角洲潮间带的湿地景观结构正不断发生着变化^[3-7]。正确认识黄河三角洲潮间带的湿地景观格局及其动态特征,探讨人类活动对湿地景观格局的影响对加强区域生态保护以及实现区域可持续发展具有重要意义。

当前,许多学者已经围绕黄河三角洲的湿地景观格局开展了大量工作,且这些研究已涉及三角洲湿地景观格局动态变化^[8-12]、景观演变驱动力分析^[13-14]、自然驱动下岸线变迁及河口冲淤变化^[15-17]、人类活动对三角洲景观格局变化的影响^[18-19]等方面。尽管当前研究对认识和理解黄河三角洲的湿地景观演变规律以及开展区域湿地保护提供了许多重要基础数据,但这些研究仍多以整个黄河三角洲为研究区域,而对于景观格局变化极为剧烈的潮间带湿地的专门研究还比较缺乏。同时,当前多数研究的时间序列相对较短且缺乏对未来湿地面积变化的趋势预测,而短时间序列的研究又往往难以揭示三角洲湿地(特别是潮间带湿地)景观变化的演变规律。此外,当前对黄河三角洲湿地景观格局变化的驱动力分析多以定性研究为主,对人类活动、黄河水沙等导致岸线变迁因素的定量分析还比较缺乏。鉴于此,本研究以 1979—2013 年间的 7 期 Landsat 卫星遥感影像为数据源,通过图像解译建立较长时间序列的黄河三角洲潮间带湿地景观数据库,探讨潮间带不同类型湿地的景观格局,定量分析影响湿地景观格局的自然与人为驱动力,并基于 Markov 模型对未来 20 年潮间带不同类型湿地的景观格局进行了预测,以期对三角洲潮间带湿地的生态保育与科学管理提供重要科学依据。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区域

本研究所指的黄河三角洲为现代黄河三角洲,其范围是以垦利县鱼洼为顶点,北起挑河口,南至宋春荣沟(图 1),位于东营市和滨州市境内(现代三角洲有 93%位于东营市)^[20],属暖温带季风气候区,具有明显的大陆性季风气候特点。该区年平均气温 12.1℃,无霜期 196 d,≥10℃的年积温约 4300℃,年均蒸发量 1962 mm,年均降水量为 551.6mm,70%的降水集中于 7、8 月,其独特的地理位置和气候特征在世界范围的湿地生态系统中具有较强的代表性。研究区土壤类型主要为隐域性潮土和盐土,植被以盐生植被为主,植物种群组成简单,主要以芦苇(*Phragmites australis*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)和碱蓬(*Suaeda salsa*)为主。

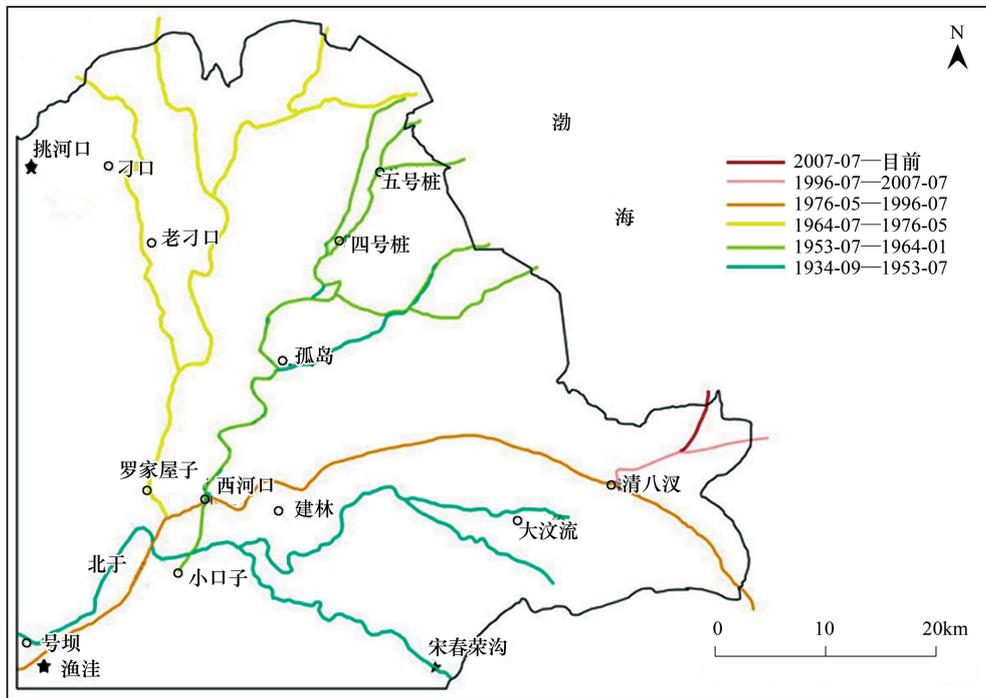


图 1 现代黄河三角洲及黄河尾间河道

Fig.1 Sketch of the modern Yellow River Delta and the tail channel of the Yellow River

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源

本研究所用的遥感数据获取自美国联邦地质调查局(USGS)网站,为1979—2013年(35年)间的7期Landsat影像(表1)。1979—2013年黄河利津水文站年径流量、年输沙量和年降水量数据来源于黄河水利委员会的黄河水沙公报。1992—2013年东营市国民生产总值(GDP)和水产品产量数据来源于东营市统计年鉴。

1.2.2 数据处理

以ENVI 5.0和ArcGIS 10.0为技术平台,对获取的Landsat影像进行几何校正和波段组合,通过目视解译结合实地踏勘的手段对遥感图像进行解译,获得不同时期潮间带湿地的景观格局特征数据库(通过野外现场踏勘检验,遥感影像解译精度均在85%以上)。7期TM影像所使用的坐标系均为高斯-克吕格6度分带的北京1954坐标系。

表 1 研究采用的遥感影像信息

Table 1 Information of remote sensing images used in this study

日期 Date	传感器 Sensor	行列号 Ranks	分辨率 Resolution/m
1979.05.27	MSS	130/034	78
1985.11.25	TM	121/034	30
1992.08.24	TM	121/034	30
2000.09.15	TM	121/034	30
2005.10.23	ETM	121/034	30
2010.09.11	TM	121/034	30
2013.05.30	TM	121/034	30

不同景观类型的分类依据国内外分类标准以及黄河三角洲湿地分类的相关研究成果^[21-22],参照 Ramsar

《湿地公约》中的湿地定义,结合研究区域的实际情况和本研究目的,将三角洲湿地分为非潮间带湿地和潮间带湿地两部分,其中潮间带的景观分类系统确定为光滩(BF)、碱蓬湿地(JP)、碱蓬-柽柳湿地(JP-CL)、柽柳-芦苇湿地(CL-LW)、芦苇湿地(LW)、草甸湿地(GW)、柳林湿地(FW)、河流湿地(RW)、盐田养殖池(SP)和居民工矿用地(RD)10种类型。为便于讨论和分析,行文相关叙述中将草甸湿地(GW)、柳林湿地(FW)、河流湿地(RW)统一概括为其他景观类型(OTM)。在GIS软件ArcView环境中,提取不同时段潮间带湿地向海或向陆发生变化的动态图斑,获得不同时段潮间带湿地的动态数据。在探讨三角洲潮间带不同类型湿地动态变化的驱动力时,运用SPSS 22.0软件对数据进行Pearson相关分析和多元回归分析。

1.2.3 Markov 模型预测

Markov 链模型是应用广泛的一种随机模型,其通过对系统不同状态的初始概率以及状态之间转移概率的研究来确定系统各状态的变化趋势,进而可对未来趋势进行预测。

(1) 初始转移概率确定

以年为单位,把潮间带湿地景观变化分成一系列离散的过程,根据不同景观类型的年平均转化率(即以2000—2010年的不同类型湿地转化面积除以年代间隔10得到平均每年的转化面积占该类湿地面积的百分比)来确定景观单元的转移概率,建立转移概率矩阵^[23-24],即

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \cdots P_{n1} \end{bmatrix}$$

式中, P_{ij} 为景观类型*i*转化为*j*的转移概率。 P 为非负值,且每一行的概率之和为1。

(2) Markov 预测

据Markov随机过程理论,可利用初始状态概率矩阵模拟出某一初始年后若干年乃至稳定时期各湿地类型所占的面积比例。Markov第*n*期转移概率可用下式计算:

$$P_{ij}^n = \sum_{k=0}^{m-1} P_{kj}^{n-1} = \sum_{k=0}^{m-1} P_{ik}^{n-1} \cdot P_{kj}$$

式中, m 表示转移概率矩阵的行列数,而任意第*n*分期的转移概率矩阵等于第1分期转移概率矩阵的*n*次方。根据初始面积百分比矩阵 $A(0)$ 和第*n*分期的转移概率 $P(n)$ 又可计算出第*n*分期末的面积百分比矩阵 $A(n)$,即

$$A(n) = A(n-1) \cdot P^{(1)} = A(0) \cdot P^{(n)}$$

通过将实测值和模拟值进行对比,采用卡方检验来验证Markov预测的可依赖性,即

$$\chi^2 = \sum (Y - Y')^2 / \bar{Y}'$$

式中, Y 为实测值; Y' 为Markov模拟值。

2 结果与分析

2.1 潮间带湿地面积变化特征

1979—2013年,三角洲潮间带的湿地面积整体呈先降低后增加的变化特征(表2)。其中,1979—2010年的潮间带湿地面积持续减少,由1050.28 km²减少为575.39 km²,减少率为45.22%;2010—2013年的潮间带湿地面积略有增加,由575.39 km²增加为596.17 km²,增长率为0.36%。与潮间带湿地面积的变化规律相似,1979—2013年的潮间带湿地面积占三角洲面积的比例亦呈先降低后增加趋势,其中1979年的所占比例最高(34.38%),2010年的所占比例则最低(19.20%)。1979—2013年,潮间带湿地向非潮间带湿地持续转移,净转移面积为419.11 km²。其中,1979—1986年的转移面积最大,为294.88 km²,占全部转移面积的70.36%。潮间带湿地向海域的转移呈淤进-蚀退交替变化特征。其中,1979—1992年的潮间带湿地持续向海域推进,累计淤积面积为70 km²;1992—2010年的潮间带湿地呈净侵蚀状态,累计蚀退面积为128 km²;2010—2013年

的潮间带湿地又呈净淤积状态,累计淤积 23 km²。

表 2 1979—2013 年黄河三角洲潮间带湿地面积变化

Table 2 Changes of tidal marshes in the Yellow River Delta during 1979—2013

年份 Years	潮上带/km ² Supratidal zone	潮间带/km ² Intertidal zone	三角洲/km ² Delta	潮间带占比/% Ratio	海域/km ² Sea	总计*/km ² Total
1979	2004.72	1050.28	3055	34.38	3945	7000
1986	2299.60	810.40	3110	26.06	3890	7000
1992	2347.18	777.82	3125	24.89	3875	7000
2000	2389.89	666.11	3056	21.80	3944	7000
2005	2397.00	614.00	3011	20.39	3989	7000
2010	2421.61	575.39	2997	19.20	4003	7000
2013	2423.83	596.17	3020	19.74	3980	7000

* 在计算潮间带与海域转移过程中取一固定区域进行计算

2.2 潮间带不同湿地类型景观格局

三角洲潮间带的主要湿地景观类型在 1979—2013 年间随距海远近均呈明显带状分布,由近及远依次为光滩、碱蓬湿地、碱蓬-柽柳湿地、柽柳-芦苇湿地和芦苇湿地(图 2)。整体而言,芦苇湿地面积在研究时期呈降低趋势,由 1979 年的 343.27 km²减少为 2013 年的 69.74 km²,年均减少 8.05 km²,所占比例由 32.68%降为 11.70%。碱蓬湿地、碱蓬-柽柳湿地、草甸湿地、柳林湿地以及河流湿地的面积均呈较大波动变化,其范围分别介于 113.12—191.07、110.30—168.19、0.53—3.70、0.51—3.11 和 8.82—36.60 km²。柽柳-芦苇湿地面积除在 1979—1986 年间有所降低外,其它时期介于 28.69—41.14 km²之间。另外,1979—2013 年间的盐田养殖池和居民工矿地面积均呈增加趋势,前者由 0.76 km²增长为 12.8 km²(增长率为 1584.21%),后者则由 0.34 km²增长为 4.76 km²(增长率为 1300.00%)(图 3)。

2.3 潮间带湿地类型景观变化预测

本研究以年为单位,把湿地景观的变化分成一系列离散的过程,根据各景观类型的年平均转化率(即 2000 年到 2010 年的各湿地转化面积除以年代间隔 10 得到平均每年的转化面积占原有该类湿地的面积百分比)来确定景观单元的转移概率,把光滩景观转化为其他景观的转移概率作为第一行,碱蓬群落景观转化为其他景观类型的转移概率作为第二行,依此类推,建立转移概率矩阵(表 3)。

表 3 初始状态下潮滩景观类型转移概率矩阵(n=1)

Table 3 Transition probability matrix of landscapes in tidal marshes under initial state

2000 年	2010 年							
	光滩 BF	碱蓬湿地 JP	碱蓬-柽柳湿地 JP-CL	柽柳-芦苇湿地 CL-LW	芦苇湿地 LW	其他景观类型 OTM	盐田养殖池 SP	居民工矿地 RD
光滩 BF	0.9106	0.0063	0.0028	0.0006	0.0002	0.0100	0.0000	0.0003
碱蓬湿地 JP	0.0216	0.9190	0.0282	0.0126	0.0000	0.0000	0.0005	0.0005
碱蓬-柽柳湿地 JP-CL	0.0108	0.0074	0.9311	0.0031	0.0093	0.0000	0.0025	0.0000
柽柳-芦苇湿地 CL-LW	0.0000	0.0000	0.0000	0.9038	0.0347	0.0088	0.0100	0.0000
芦苇湿地 LW	0.0038	0.0039	0.0249	0.0045	0.9037	0.0025	0.0029	0.0114
其他景观类型 OTM	0.0000	0.0000	0.0001	0.0237	0.0043	0.9207	0.0000	0.0007
盐田养殖池 SP	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.8994	0.0000
居民工矿地 RD	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0298	0.9551

利用 Matlab 计算求出 2013 年各种湿地类型所占的面积百分比,然后利用各景观类型所占的比例乘以总面积得到当期各景观类型的预测面积,将 2013 潮间带各景观类型的 Markov 预测值与实测值进行对比(表 4),并进行 X^2 检验。本研究中, $X^2=0.1348$,查表得 $X^2_{(0.05)}(9)=16.92$,模拟结果与实测结果差异不显著,两者

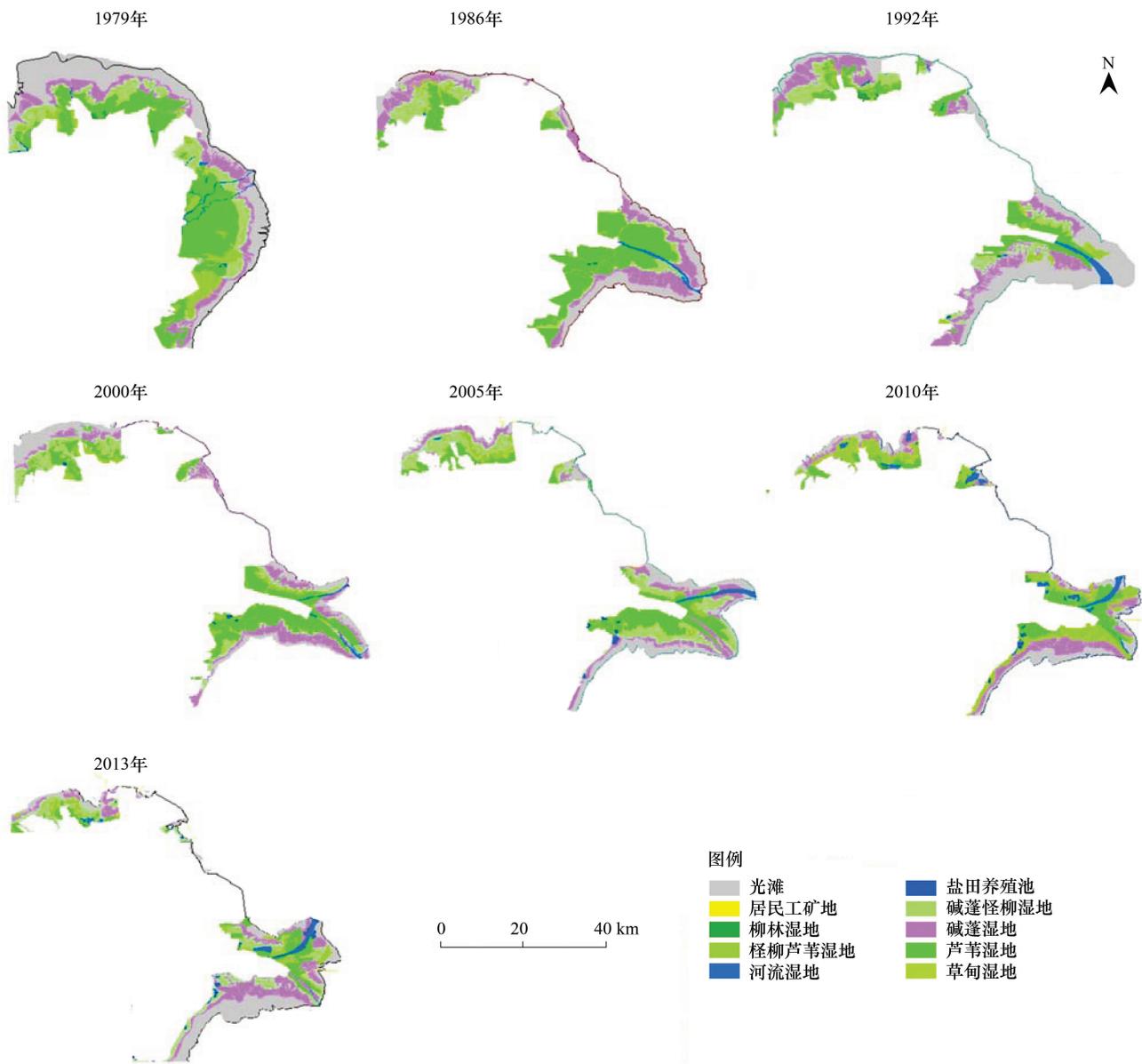


图 2 1979—2013 年黄河三角洲潮间带景观类型分布

Fig.2 Distribution of landscapes in intertidal zone of the Yellow River Delta during 1979—2013

吻合情况良好,说明采用湿地景观类型之间的面积转移矩阵所确定的转移概率,通过 Markov 过程来预测未来景观格局时空变化是可行的。然后计算求出 2010,2015,2020,2025,2030 年各个时期各种湿地类型所占的面积百分比,利用各景观类型所占的比例乘以区域总面积得到当期各景观类型的预测面积。

研究表明,三角洲潮间带湿地面积在未来 20 年整体将呈降低趋势(图 4),其值将由 2010 年的 575.39 km²减少为 2030 年的 546.98km²,减少率为 6.60%。芦苇湿地面积的变化规律与潮间带湿地面积的变化规律相似,减少率为 24.12%。碱蓬湿地和碱蓬-柽柳湿地的面积将分别介于 110.85—118.41 km²和 102.90—116.69 km²之间,二者虽均呈波动变化,但整体呈小幅降低趋势。柽柳-芦苇湿地面积在研究时期虽波动于 36.27—37.85 km²之间,但整体将呈小幅增长趋势。其他景观类型(OTM)在未来 20 年内整体将呈增长趋势,增长率为 60.26%。盐田养殖池和居民工矿地面积均将呈增长趋势,其中盐田养殖池将由 9.61 km²增长为 13.32 km²,增长率为 38.61%;居民工矿地面积将由 2.88 km²增长为 6.16 km²,增长率为 113.89%,说明人类活动对潮间带湿地的影响程度将会进一步增强。

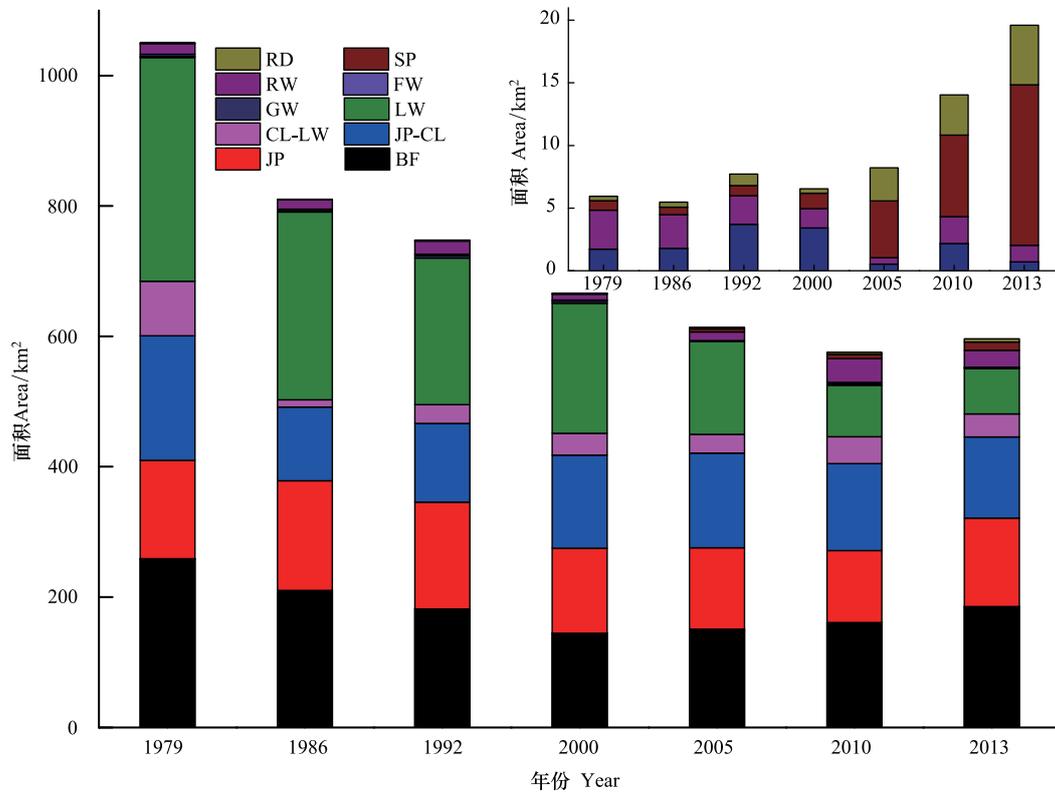


图 3 黄河三角洲潮间带不同景观类型分布特征

Fig.3 Distribution of landscapes in intertidal zone of the Yellow River Delta

表 4 2013 年潮间带湿地面积比例 (%) 的实测值和 Markov 模拟值比较

Table 4 Comparison between measured values (percent of marsh area in intertidal zone) and Markov simulation values in 2013

景观类型 Type	2013 年模拟值 Y' Simulation Value of 2013	2013 年实测值 Y Measured value of 2013	$Y - Y'$	$(Y - Y')^2$
光滩 BF	4.37	4.20	-0.17	0.03
碱蓬湿地 JP	3.03	2.88	-0.15	0.02
碱蓬-柽柳湿地 JP-CL	5.86	5.78	-0.08	0.01
柽柳-芦苇湿地 CL-LW	1.62	1.55	-0.07	0.01
芦苇湿地 LW	3.32	2.83	-0.49	0.24
其他景观类型 OTM	0.84	1.10	0.26	0.07
盐田养殖池 SP	0.76	1.14	0.38	0.14
居民工矿用地 RD	0.23	0.26	0.03	0.00
总和 Total	20.03	19.74	-0.29	0.08

3 讨论

黄河三角洲是中国乃至世界各大河三角洲中海陆变迁最活跃的地区,在黄河携带泥沙入海淤积等自然驱动力作用下,其面积始终处于动态变化之中^[7]。相关分析表明,潮间带湿地面积与年输沙量呈显著正相关($r=0.830, p<0.05$),与年径流量尽管呈一定的正相关($r=0.270$),但未达到显著水平($p>0.05$) (表 4)。另据黄河利津水文站的水沙数据可知,1979—2013 年,黄河年总径流量和年总输沙量均呈先降低后增加的变化趋势。1979—1992 年,黄河入海年均径流量为 260.67 亿 m^3 ,年均输沙量为 5.94 亿 t,此间三角洲潮间带湿地面积的持续增加与该时段入海泥沙量一直维持在较高水平密切相关(图 5)。2000 年前后,黄河出现持续断

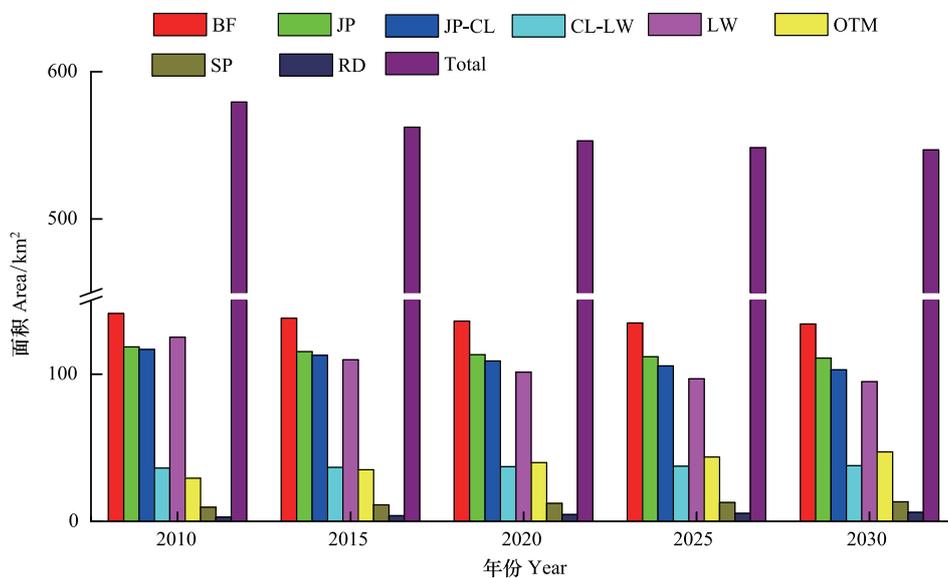


图4 黄河三角洲潮间带不同景观类型未来20年变化特征

Fig.4 Variations of different landscapes in intertidal zone of the Yellow River Delta in future 20 years

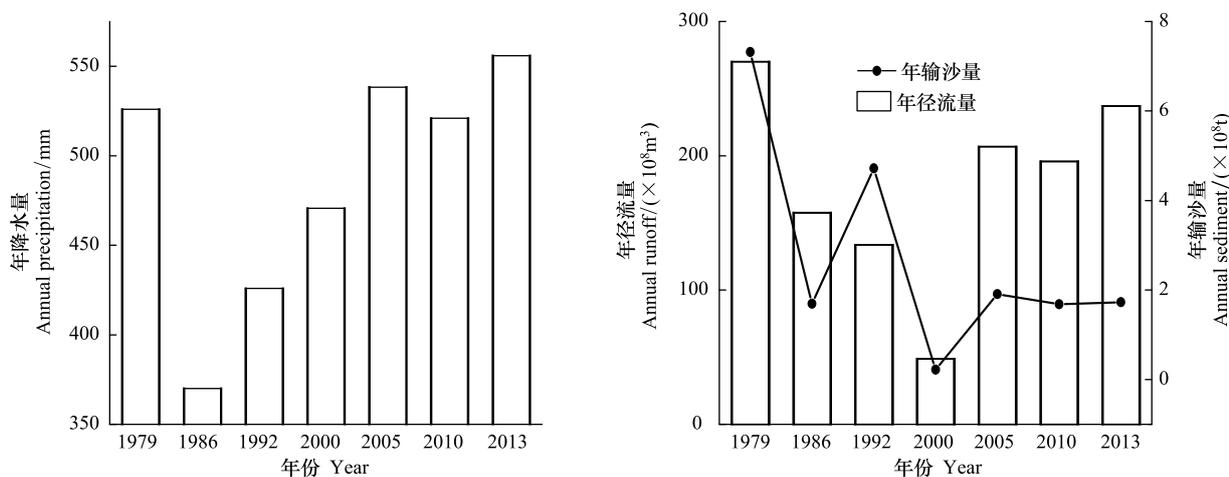


图5 研究区域年降水量、径流量和输沙量变化

Fig.5 Changes of annual precipitation, runoff and sediment loading in the study region

流,入海泥沙量锐减,其年径流量由1992年的133.54亿 m^3 骤减至2000年的48.58亿 m^3 (减少63.62%),年输沙量由1992年的4.72亿t减少为2000年的0.22亿t(减少95.34%),直接导致了潮间带湿地面积在1992—2000年间减少69 km^2 。2002年起实施的调水调沙工程极大增加了黄河的水沙输运能力,其年径流量和年输沙量分别由2000年的48.58亿 m^3 和0.22亿t增加为2013年的236.90亿 m^3 和1.73亿t,此量级入海泥沙的淤积作用基本可抵消海侵蚀作用,最终导致此时段潮间带湿地面积减少速率放缓并于2010—2013年间呈小幅增长趋势。有研究表明,进入黄河三角洲的河流径流量保持在200—300亿 m^3 、输沙量保持在5—8亿t是维持河口湿地景观格局稳定的适宜径流过程和输沙过程^[25],这与本研究中潮间带湿地面积随黄河入海水沙量的变化而减少或增加的结论相一致。另据该区多年降水数据,1979—2013年黄河三角洲的年降水量呈较大波动变化,其值介于370.00—559.90mm之间,多年平均降水量为486.79mm。其中,1986年的降水量最低,此时的潮间带湿地面积虽较1979年存在很大幅度减少但仍处于较高水平;1986—2013年,该区的降水量整体呈增加趋势,但其与该时段湿地面积的变化缺乏同步性。相关分析表明,该区域降水量的变化与潮间带湿

地面积变化之间并无显著相关性(表 5),原因在于黄河流域面积大,区域降水对整个流域入海径流量的影响较小有关。就潮间带湿地景观格局而言,土壤水盐条件和理化性质在很大程度上决定了潮间带不同湿地植被的分布,而黄河年总输沙量、年总径流量等自然因素直接决定了潮间带湿地土壤的水盐条件和理化性质。已有研究表明,黄河三角洲潮间带湿地的盐分含量和海拔均呈现出明显的空间分异,其在垂直于岸线方向上的分布代表了盐生植被的演替序列,从而导致了潮间带湿地植被随距海远近表现为明显的带状分布^[26-27]。这与本研究得出的不同研究时期随距海远近不同,光滩、碱蓬湿地、碱蓬-柽柳湿地、柽柳-芦苇湿地和芦苇湿地呈明显带状分布的研究结果相一致。李兴东对黄河三角洲植物群落与环境因子之间对应关系的研究表明,植被的动态变化与土壤水盐及有机质含量的动态变化显著相关,而水盐动态是植被演替的重要制约因素^[28]。吴志芬等对该区盐生植被与土壤盐分的定量研究表明,盐生植被的类型、空间分布、植株所含化学成分、生物累积强度以及演替等与土壤含盐量密切相关^[29]。因此,伴随着潮间带淤积或侵蚀过程,其湿地植被类型随土壤水盐条件的变化而产生不同的演替进程,进而形成不同的景观格局。相关分析亦表明,年输沙量与光滩面积呈显著正相关($r=0.798$),与潮间带其他景观类型虽存在一定的相关性,但并未达到显著水平($p<0.05$)(表 5)。另外,年径流量和年降水量对潮间带景观格局的分布亦具有一定影响,但其影响程度并未达到显著水平($p<0.05$)(表 5)。

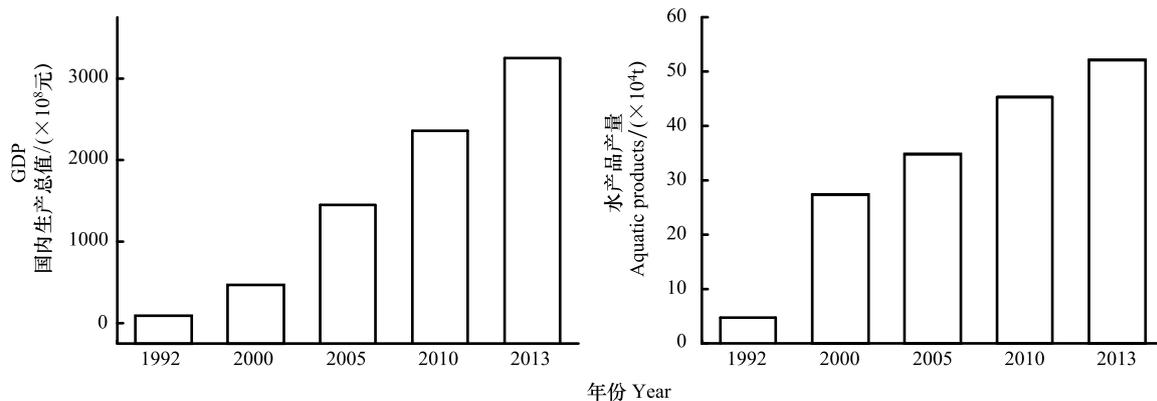


图 6 研究区域 GDP 和水产品年产量变化

Fig.6 Changes of GDP and annual output of aquatic production in the study region

表 5 湿地面积与自然/人为因素相关分析

Table 5 Correlation coefficients between wetland areas and natural /or human factors

	TM	BF	JP	LW	SP	RD	AR	AS	AP	GDP	OAP
TM	1	0.889 **	0.673	0.931 **	-0.634	-0.700	0.270	0.830 *	-0.280	-0.736	-0.851 *
BF		1	0.606	0.716	-0.257	-0.344	0.586	0.798 *	-0.110	-0.389	-0.618
JP			1	0.740	-0.518	-0.579	-0.062	0.456	-0.721	-0.679	-0.836 *
LW				1	-0.830 *	-0.886 **	-0.025	0.618	-0.531	-0.911 **	-0.949 **
SP					1	0.970 **	0.427	-0.342	0.664	0.973 **	0.871 *
RD						1	0.448	-0.334	0.671	0.978 **	0.883 **
AR							1	0.543	0.567	0.365	0.127
AS								1	0.074	-0.427	-0.601
AP									1	0.690	0.694
GDP										1	0.944 **
OAP											1

TM: 潮滩面积 Tidal Marsh; AR: 年径流量 Annual Runoff; AS: 年输沙量 Annual Sediment; AP: 年降水量 Annual precipitation; GDP: 地区生产总值 Gross Domestic Product; OAP: 水产品产量 Output of Aquatic Products; BF, JP, LW, SP, RD 见 1.2.2 说明; * $p<0.05$; ** $p<0.01$ 。

潮间带湿地景观格局的变化除受淤积和侵蚀等自然因素的影响外,人类活动的影响也极为深刻。位于黄

河三角洲的东营市(占现代三角洲面积的93%)^[20]是一座社会经济迅速发展的新兴城市,依赖于独特的地理位置和丰富的油气资源,其GDP增速在山东省乃至全国均遥遥领先。随着社会经济的飞速发展,其对土地的需求也急速增加。1979—1986年,依据行政规划东营市从惠民地区调整出并成立地级市,故未能查到其相关年份的GDP。但在该时期内,潮间带面积由1050.28 km²减少为810.40 km²,年均减少率为3.26%,远高于其它时期的年均减少率(0.98%),这可能与此时段潮间带湿地的大面积开发与利用有关。1992—2013年,东营市的GDP和水产品产量呈持续迅速增长趋势(图6)。其中,GDP由1992年的87.00亿元增长为2013年的3250.20亿元,年均增长1.78倍;水产品产量则由1992年的4.75万t增长为2013年的52.09万t,年均增长0.52倍。尽管如此,该时期潮间带湿地面积的减少速度呈减缓趋势并在2010—2013年出现小幅增加,这主要与此间潮间带湿地的生态保育、科学管理水平提高以及调水调沙工程的长期实施有关。相关分析表明,潮间带湿地面积与水产品产量呈显著负相关($r = -0.851, p < 0.05$),其与GDP尽管呈一定的负相关($r = -0.736$),但并未达到显著水平($p > 0.05$)。就潮间带不同湿地类型的景观格局而言,人类活动的增加极大减少了芦苇湿地面积,同时显著增加了盐田养殖池和居民工矿地的面积。相关分析表明,芦苇湿地面积与GDP、水产品产量均呈极显著负相关($r_1 = -0.911, r_2 = -0.949, p < 0.01$),而盐田养殖池和居民工矿地面积均与GDP均呈极显著正相关($r_1 = 0.973, r_2 = 0.978, p < 0.01$),与水产品产量均呈显著正相关($r_1 = 0.871, r_2 = 0.883, p < 0.05$)。另外,芦苇湿地与盐田养殖场和居民工矿地之间亦呈显著负相关($r_1 = -0.830, r_2 = -0.886, p < 0.05$)(表4)。可见,人类活动对于光滩、碱蓬湿地等离人类社会较远的湿地景观虽存在一定影响,但其之间的相关性未达到显著水平($p > 0.05$)。将与潮间带湿地面积变化密切相关的变量进行多元线性回归分析发现,尽管自然与人为驱动力的双重作用决定了1979—2013年间潮间带湿地面积的动态变化,但黄河年输沙量(x_1)、区域GDP(x_2)和水产品产量(x_3)对潮间带湿地景观格局(y)的影响更为重要($y = 733.192 + 35.317x_1 - 0.005x_2 - 4.085x_3, p = 0.0001 < 0.05$),其对潮间带湿地面积动态变化的解释贡献高达76.7%。

随着《黄河三角洲高效生态经济区发展规划》国家重大战略的实施,黄河三角洲地区必将迎来新一轮的经济高速发展,而伴随而来的城镇化和人口增长势必会继续对潮间带湿地的保育带来巨大压力和挑战。同时,由于黄河调水调沙工程十多年的成功实施以及黄河流域生态保护水平的提高,导致黄河泥沙的入海通量在未来很长一段时期内将稳定在当前水平,很难再有大量级的泥沙入海,而这同样会减缓三角洲的淤积速率。因此,预测三角洲潮间带湿地面积在未来20年整体将呈降低趋势的结论是可靠的。就潮间带的景观格局而言,由于人类活动的影响程度将会进一步增强,盐田养殖池和居民工矿地面积将会呈持续增长趋势,芦苇湿地面积将会继续减少,进而可能导致离人类社会更远的碱蓬湿地和碱蓬-柽柳湿地的面积亦将呈降低趋势。可见,随着黄河三角洲高效生态经济区国家战略的实施,为实现区域(特别是潮间带区域)的可持续发展,潮间带湿地的保护与生态保育应给予特别重视。

参考文献(References):

- [1] Mitsch W J, Gosselink J G. Wetlands. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [2] 侯明行, 刘红玉, 张华兵, 王聪, 谭清梅. 地形因子对盐城滨海湿地景观分布与演变的影响. 生态学报, 2013, 33(12): 3765-3773.
- [3] Yu H, He Z W, Kong B, Weng Z Y, Shi Z M. The spatial relationship between human activities and C, N, P, S in soil based on landscape geochemical interpretation. Environmental Geochemistry and Health, 2016, 38(2): 381-398.
- [4] Wang Y Z, Hong W, Wu C Z, He D J, Lin S W, Fan H L. Application of landscape ecology to the research on wetlands. Journal of Forestry Research, 2008, 19(2): 164-170.
- [5] 王海梅, 李政海, 韩国栋, 韩经纬. 黄河三角洲土地利用及景观格局的动态分析. 水土保持通报, 2007, 27(1): 81-85.
- [6] 李元芳, 黄云麟, 李拴科. 近代黄河三角洲海岸滩地地貌及其沉积的初步分析. 海洋学报, 1991, 13(5): 662-671.
- [7] 邓伟, 白军红. 典型湿地系统格局演变与水生态过程——以黄淮海地区为例. 北京: 科学出版社, 2012: 105-105.
- [8] 白军红, 欧阳华, 杨志峰, 崔保山, 崔丽娟, 王庆改. 湿地景观格局变化研究进展. 地理科学进展, 2005, 24(4): 36-45.
- [9] 吴大千. 黄河三角洲植被覆盖分布特征及其动态变化研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [10] 宗秀影, 刘高焕, 乔玉良, 林松. 黄河三角洲湿地景观格局动态变化分析. 地球信息科学学报, 2009, 11(1): 91-97.

- [11] 杨伟. 现代黄河三角洲海岸线变迁及滩涂演化. 海洋地质前沿, 2012, 28(7): 17-23.
- [12] 汪小钦, 王钦敏, 励惠国, 刘高焕. 黄河三角洲土地利用/覆盖变化驱动力分析. 资源科学, 2007, 29(5): 175-181.
- [13] 栗云召, 于君宝, 韩广轩, 王雪宏, 王永丽, 管博. 黄河三角洲自然湿地动态演变及其驱动因子. 生态学杂志, 2011, 30(7): 1535-1541.
- [14] 赵庚星, 张万清, 李玉环, 陈乐增. GIS 支持下的黄河口近期淤、蚀动态研究. 地理科学, 1999, 19(5): 442-445.
- [15] 何庆成, 张波, 李采. 基于 RS、GIS 集成技术的黄河三角洲海岸线变迁研究. 中国地质, 2006, 33(5): 1118-1123.
- [16] Yu J B, Fu Y Q, Li Y Z, Han G, Wang Y, Zhou D, Sun W, Gao Y, Meixner F X. Effects of water discharge and sediment load on evolution of modern Yellow River Delta, China, over the period from 1976 to 2009. Biogeosciences, 2011, 8(9): 4107-4130.
- [17] 崔承琦, 李师汤, 孙小霞, 施建堂, 范德江. 黄河三角洲海岸岸线和潮水沟体系发育及其分维研究——黄河三角洲潮滩海岸时空谱系研究Ⅲ. 海洋通报, 2001, 20(6): 60-70.
- [18] 陈菁, 傅新, 刘高焕. 黄河三角洲景观变化中人为影响力的时空分异. 水土保持学报, 2010, 24(1): 134-138, 144-144.
- [19] Gu D Q, Zhang Y Z, Fu J, Zhang X L. The landscape pattern characteristics of coastal wetlands in Jiaozhou Bay under the impact of human activities. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 124(1-3): 361-370.
- [20] 张晓龙. 现代黄河三角洲滨海湿地环境演变及退化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [21] 刘永学, 张忍顺, 李满春. 江苏淤泥质潮滩地物信息遥感提取方法研究. 海洋科学进展, 2004, 22(2): 210-214.
- [22] 郭笃发. 黄河三角洲滨海湿地土地覆被和景观格局的变化. 生态学杂志, 2005, 24(8): 907-912.
- [23] 史悦, 孙洪祥. 概率论与随机过程. 北京: 北京邮电大学出版社, 2010: 1-226.
- [24] 唐焕文, 贺明峰. 数学模型引论(第三版). 北京: 高等教育出版社, 2005: 238-239.
- [25] 杨中华, 王卫东, 马浩录. 遥感监测调水调沙对黄河河口尾间的影响. 水利水运工程学报, 2006, (3): 65-68.
- [26] 邢尚军, 郗金标, 张建锋, 宋玉民, 马丙尧. 黄河三角洲植被基本特征及其主要类型. 东北林业大学学报, 2003, 31(6): 85-86.
- [27] 王红, 宫鹏, 刘高焕. 黄河三角洲多尺度土壤盐分的空间分异. 地理研究, 2006, 25(4): 649-658.
- [28] 李兴东. 典范分析法在黄河三角洲莱州湾滨海区盐生植物群落研究中的应用. 植物生态学与地植物学报, 1988, 12(4): 300-305.
- [29] 吴志芬, 赵善伦, 张学雷. 黄河三角洲盐生植被与土壤盐分的相关性研究. 植物生态学报, 1994, 18(2): 184-193.