

黄河三角洲互花米草、碱蓬种群变化及扩散模拟^{*}

陈柯欣^{1,2)} 丛丕福²⁾ 曲丽梅^{2)†} 韩建波²⁾ 韩成伟²⁾

(1)大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 116024, 辽宁大连; (2)国家海洋环境监测中心, 116023, 辽宁大连)

摘要 将卫星遥感、GIS空间分析技术和生物种群扩散模型相结合,利用1996、2006、2016年黄河三角洲滨海湿地3期遥感影像,采用面向对象分类方法、景观转移矩阵、景观重心转移模型分析互花米草和碱蓬动态变化,并利用CA-Markov模型对2026年的演变趋势开展预测模拟。结果表明:1)在时间上,20a来互花米草总面积由1996年的3.45 km²增长到2016年的25.14 km²,碱蓬总面积呈大幅度下降;在空间上,互花米草发生了连通阻断,其重心由胜利油田边缘向河口方向移动,碱蓬重心向陆源方向有一个小幅度后退。2)模拟预测2026年互花米草面积为26.67 km²,碱蓬面积为26.15 km²。3)2种植被在2006—2016年转移变化剧烈,20a来滨海湿地人类活动呈增加的趋势。从预测结果分析看,20a间黄河三角洲河口受重大人工改道、初期的断流、风暴潮等人为和自然灾害的强烈影响,互花米草、碱蓬等滨海湿地植被数量造成短时序变化,导致模拟精度不高。如果不对互花米草加以人为控制,到2026年互花米草面积的激增将对整个黄河三角洲地区生态环境造成显著影响。

关键词 黄河三角洲滨海湿地;遥感;CA-Markov模型;碱蓬;互花米草

中图分类号 Q145; Q149; Q948

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020436

滨海湿地位于海陆的交界处,对维持人类生存环境的生态平衡有着重要意义^[1]。近年来人类活动的加剧,导致滨海湿地遭到严重破坏^[2]。滨海湿地植被作为湿地生态系统中的生产者,是滨海湿地的重要组成部分之一,能为大量动植物提供能量交换和栖息场所。滨海湿地植被主要包括芦苇(*Phragmites australis*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、蔗草(*Scirpus triqueter*)、海草(*Zostera marina L.*)、碱蓬(*Suaeda salsa*)、红树林(*Mangrove*)、互花米草(*Spartina alterniflora*)等种类,空间分布上存在广泛性和不均匀性^[3]。

黄河三角洲滨海湿地地处河、海、陆的交错地带,是我国保存较为完整、典型、年轻的湿地生态系统,区域内拥有着大量的湿地植物资源,以芦苇、碱蓬、互花米草、怪柳、蔗草为主。近年来黄河断流、泥沙减少导致的海岸侵蚀、风暴潮等自然灾害频发,加之人为干扰增多^[4],对潮间带植被分布造成一定的影响。遥感技术的发展为植被的动态监测提供了新技术^[5]。碱蓬和互花米草为黄河三角洲滨海湿地的先锋植被,因此了解其动态变化具有重要意义。碱蓬为一年生藜科植物,主要分布在滨海湿地滩涂重盐碱地区。一般情况下,在3月中下旬碱蓬种子便

开始萌发,4—10月中下旬是生长、开花、结果期,到11月下旬几乎全部干枯死亡^[6]。互花米草是1990年由国外引入的一种多年生草本盐沼植物,适宜在潮间带生长,繁殖速度快,具有较强的侵略性,已经对黄河三角洲植被种群演替过程和物种多样性起到了破坏作用^[7]。国内外学者针对长时序典型湿地植被分布状况和未来变化预测进行了大量研究^[8-12],这些研究主要利用遥感技术结合CA模型、Markov模型、生物物种扩散(CA-Markov)模型等对互花米草、碱蓬、红树林、芦苇等典型湿地植被动态变化趋势进行了研究,其中针对江苏盐城碱蓬、互花米草的分布和扩张研究较多^[9, 12-14];王东辉等^[8]利用CA模型对上海九段沙地区的互花米草和芦苇种群预测,证实了该模型能较好地模拟植被种群的格局和趋势;Mukhopadhyay等^[10]利用CA-Markov模拟对孟加拉孙德尔本斯河口三角洲滨海湿地红树林2005、2025、2055、2105年的演替趋势进行了预测。但到目前为止,仅少数学者针对黄河三角洲互花米草和碱蓬植被的变化趋势进行预测分析^[10]。

本文采用Landsat系列卫星遥感数据,利用景观类型转移网络、景观重心转移模型分析互花米草和碱蓬种群1996—2016年动态变化,并利用CA-Markov

^{*} 国家重点研发资助项目(2017YFC0505901)

[†] 通信作者:曲丽梅(1973—),女,博士,高级工程师。研究方向:资源环境遥感研究。E-mail: lmqu2016@126.com

收稿日期:2020-07-14

模型对未来 10 a 的扩散趋势进行了模拟, 将遥感数据和生物种群扩散模型结合得出的研究结果, 有助于了解滨海湿地互花米草、碱蓬种群变化和扩散趋势, 对湿地保护管理及湿地景观的规划设计具有参考价值。

1 数据与方法

1.1 研究区 黄河三角洲位于山东省东营市境内,

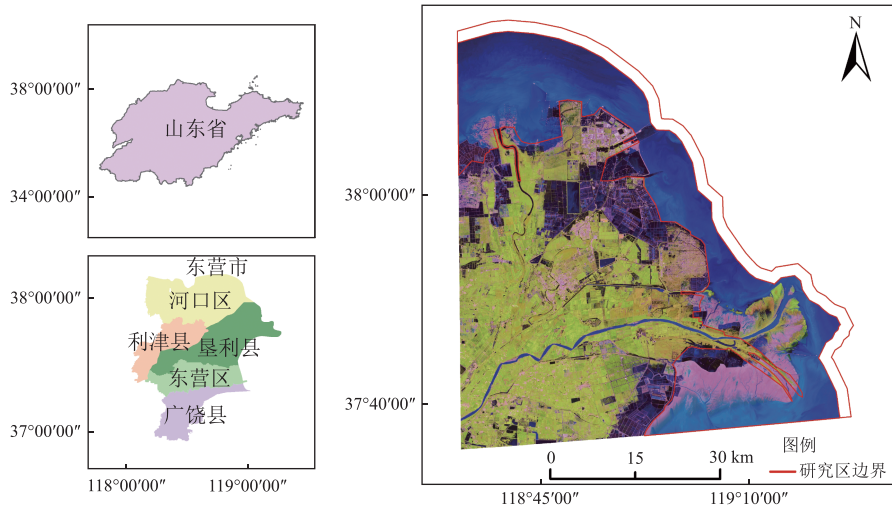


图 1 研究区

1.2 数据源 采用由美国地质调查局官方网站(<http://glovis.usgs.gov/>)下载的 19960920、20061002、20160826 这 3 期植被生长茂盛季 Landsat 系列 TM、OLI 传感器遥感影像, 作为湿地分类的基础数据。选择湿地分类的常用波段 5 (SWIR)、4 (NIR)、3 (Red) 组合进行假彩色合成, 并进行图像增强和影像裁剪。采用 2017 年野外调查数据和 2016 年高分数据 (2 m) 作为辅助数据进行影像识别分类^[6]。

1.3 研究方法

1.3.1 分类体系和分类方法 根据野外实际调查和《国家标准: GB/T 24708—2009 湿地分类》, 利用人工目视解译和面向对象相结合的方法, 先将研究区范围分为自然湿地 (盐沼植被、滩涂、天然水域)、人工湿地 (盐田、养殖塘、库塘)、非湿地 (工矿用地、林地、旱田) 3 大类 9 小类^[6]。其中, 为了凸显黄河三角洲滨海湿地 2 种典型盐沼植被覆盖情况, 在自然湿地中将互花米草、碱蓬作为单独一类进行模拟分析。黄河三角洲逐年都有向海扩张的趋势, 为了满足模拟的需求, 在滨海湿地外的浅海区域加了 1 个 2 km 的缓存区作为海域。最终确定分为互花米草、碱蓬、其他自然湿地、人工湿地、非湿地、海域 6 大类, 并将分类结果进行精度验证。

是由于黄河上游携带大量泥沙在入海口处淤积而成, 平均每年向海延伸 2.2 km, 年均造陆约 32.4 km²^[15]。黄河三角洲地势平坦、环境优美、气候适宜, 境内有丰富的物种资源。本文研究范围是现代黄河三角洲范围内的滨海湿地, 现代黄河三角洲以垦利县的渔洼为轴点, 北起挑河口、南至宋春荣沟口。滨海湿地向陆地一侧以多年平均高潮线为界, 向海一侧以 -6 m 等深线为界, 并向海做了 1 个 2 km 的缓存区 (图 1)。

1.3.2 景观类型转移矩阵 景观类型转移矩阵是对湿地类型变化定量化监测的一个较好模拟, 利用转移矩阵可以清楚了解湿地所处的第一个时间段向第二个时间段转移的数量及空间分布变化^[17], 分析 2 种盐沼植被演变规律。

1.3.3 景观重心转移模型 为了了解 20 a 间 2 种盐沼植被湿地类型随着时间推移空间位置的变化趋势, 利用景观重心转移模型^[18]来计算某一时间景观类型重心。坐标计算式为

$$X_T = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{Ti} \times X_{Ti})}{\sum_{i=1}^n C_{Ti}}, \quad Y_T = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{Ti} \times Y_{Ti})}{\sum_{i=1}^n C_{Ti}}, \quad (1)$$

式中: X_T 、 Y_T 分别表示第 T 年某种湿地类型分布重心的经纬度坐标; C_{Ti} 表示该湿地类型第 i 个小斑块的面积; X_{Ti} 、 Y_{Ti} 分别表示该湿地类型第 i 个小斑块的几何中心的地理经纬度坐标; n 表示该湿地类型包含的斑块数量。

1.3.4 CA-Markov 模型 元胞自动机 (cellular automata, CA) 模型具有模拟较为复杂系统空间变化的能力, 因此将其应用于湿地生物种群扩散模拟^[19], 在湿地

方面的应用主要指利用湿地元胞的景观类型和周围邻域的景观类型按照一定的转化规则变化,模拟的关键在于邻域及转化规则的确定. CA 由元胞、状态、邻域和转换规则 4 部分组成,在湿地的变化模拟中,通常把分类栅格影像的像元作为元胞,湿地的类别作为元胞所处的状态,中心像元邻近的像元为元胞邻域,转换规则用来确定元胞最终湿地转化类型^[20].

Markov 模型在湿地上的应用,是指利用湿地处于的某一类型来预测该湿地未来类型的一种分析方法^[21],具体指该湿地 t_n 时刻的类型变化只与前一时刻 t_{n-1} 的类型有关系,而与以前湿地所处的类型无关,这种转换称为无后效性的状态转换,较为符合湿地变化的特性. 该模拟的关键在于确定转移概率 P_{ij} , P_{ij} 计算式^[22]为

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nm} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Markov 模型优点在于该模型在数量上可以进行均衡的模拟,但是对空间分布信息缺乏考量. 将 CA 模型与 Markov 模型结合,则可提升对湿地空间信息和数量信息的模拟,获得更好的模拟结果. 在 IDRISI 软件中,将 CA 与 Markov 模拟有效地结合在一起,形成 CA-Markov 模块,利用转换面积矩阵和转移条件

概率图像确定元胞状态的转移,预测出湿地转移格局的变化^[23]. 湿地景观类型变化较为稳定时,可以取得较好的模拟效果^[10].

首先,利用 1996 与 2006 年滨海湿地分类结果,在 Markov 模块中作为输入生成 Markov 转换面积矩阵;然后,选择 2006 年平均温度、平均湿度、距海岸线距离作为影响因子,利用 MCE(multi-criteria evaluation) 模块将各类影响因子叠加,组合生成转移条件概率图像,在 CA-Markov 模块中将元胞大小设置为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,选择 5×5 的滤波器,设置元胞迭代数为 10 次,得出模拟结果;最后,将模拟结果与 2016 年真实结果对比验证.

2 结果和分析

2.1 景观分类 3 期滨海湿地互花米草和碱蓬分类结果如图 2 所示. 利用 2016 年高分数据和野外调查数据,依据地物的分布特征,每一类随机选择 20 个点(去除海域影响),共选择了 100 个均匀分布于研究区内的点,2016 年整体精度达 79.00%,利用 Google Earth 历史影像对 1996 和 2006 年进行精度验证,整体精度分别达 76.77%、78.79%. 人为主导景观类型(非湿地、人工湿地)不断增加(表 1). 在面积上,互花米草一直呈增长趋势(图 2),2006—2016 年增长较快,2016 年达到 25.14 km^2 ;碱蓬的面积呈少量增加后又大量减少的趋势,2006—2016 年期间减少较多. 空间分布上,2 种植物随黄河尾间摆动变化明显.

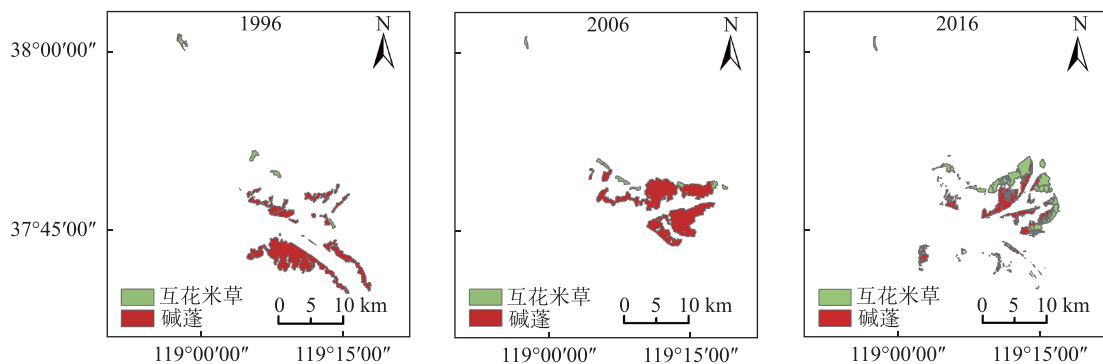


图 2 1996—2016 年分类结果

表 1 1996—2016 年面积统计结果 km^2

类型	1996年	2006年	2016年
互花米草	3.45	4.49	25.14
碱蓬	51.31	59.14	29.17
自然湿地	1293.18	1260.41	1187.58
人工湿地	1.36	26.15	103.56
非湿地	1.22	0.33	5.08

2.2 景观类型转移矩阵 从时间尺度上看转移变

化,景观转移矩阵计算结果如表 2 所示,可以清楚分析互花米草和碱蓬数量随时间转移的变化趋势.

由表 2 可以看出,20 a 来互花米草与碱蓬转移摆动较大. 其中 2006—2016 年变化较为剧烈. 整体上呈现互花米草增加、碱蓬减少的趋势. 1996—2006 年,由其他景观类型转移成互花米草的面积为 4.11 km^2 ,2006—2016 年为 24.64 km^2 ,互花米草大量生长将会对生态环境造成一定的威胁;1996—2006 年,由其他自

然湿地转移成碱蓬的面积为 53.04 km², 接下来的 10 a 内面积减少为 15.58 km²; 1996—2006 年有 45.78 km² 碱蓬发生转出, 2006—2016 年有 45.67 km² 转出; 碱蓬向互花米草转移呈现持续增加趋势, 1996—2006 年转移面积为 0.03 km², 2006—2016 年转移面积为 7.05 km²; 20 a 间互花米草向碱蓬转移一直很少, 表明互花米

草的生长对碱蓬存在严重影响. 自然湿地向人工湿地的转移面积逐年增加, 面积由 23.16 km² 增加到 77.37 km², 表明人类活动对滨海湿地的影响不断增强.

已有的研究表明, 近代以来黄河自然尾间摆动是以人为影响为主, 自然影响为辅造成的^[24].

表 2 1976—2016 年互花米草和碱蓬面积转移矩阵

km²

年份	2006					总计	
	互花米草	碱蓬	自然湿地*	人工湿地	非湿地		
1996	互花米草	0.38	0.57	2.49	0.01	0	3.45
	碱蓬	0.03	5.53	43.28	2.48	0	51.31
	自然湿地*	4.08	53.04	1 212.63	23.16	0.27	1 293.18
	人工湿地	0.01	0	1.03	0.32	0	1.36
	非湿地	0	0	0.98	0.18	0.06	1.22
	总计	4.49	59.14	1 260.41	26.15	0.33	
年份	2016					总计	
	互花米草	碱蓬	自然湿地*	人工湿地	非湿地		
2006	互花米草	0.50	0.12	3.87	0	0	4.49
	碱蓬	7.05	13.47	38.17	0.44	0.01	59.14
	自然湿地*	17.54	15.58	1 145.05	77.37	4.87	1 260.41
	人工湿地	0	0	0.29	25.72	0.13	26.15
	非湿地	0.05	0	0.20	0.03	0.06	0.33
	总计	25.14	29.17	1 187.58	103.56	5.08	

注: *为除了互花米草和碱蓬的其他自然湿地, 保留2位小数.

2.3 景观重心转移模型 从空间尺度上看重心转移变化情况如图 3 所示. 由图 3-a、b 可以看出, 2 种植物的分布都集中分布于河口处, 这是由于人为干扰(堤坝等)对 2 种植物的扩散起到了阻隔作用, 使得互花米草和碱蓬无法向一千二方向继续扩散连通. 空间上, 以陆向河口方向为正方向, 呈现了互花米草淤积和碱蓬后退的趋势. 互花米草重心从孤东采油厂向东南方向一直趋向于黄河口附近, 黄河三角洲河口处属于河海陆交接处, 生态脆弱性高, 物种资源丰富, 如果不加以控制将对河口处其他动植物生存环境和整体生态平衡造成严重影响. 碱蓬重心随河口摆动变化明显, 2006—2016 年有一个小幅度后退(图 3-b), 碱蓬是盐碱地的重要指示指标, 是大量珍贵鸟类和浮游生物的栖息场所, 如果碱蓬面积大量减少, 将会对该地区生物多样性造成严重影响.

2.4 CA-Markov 模拟结果 利用 1996 和 2006 年湿地分类结果, 模拟 2016 年的滨海湿地变化情况, 结果如图 4-a 所示, 模拟的 6 类总体精度达到了 87.02%.

以 2006 和 2016 年的实际滨海分类结果为基础, 用相同的方法对 2026 年景观分类结果进行预测, 如图 4-b

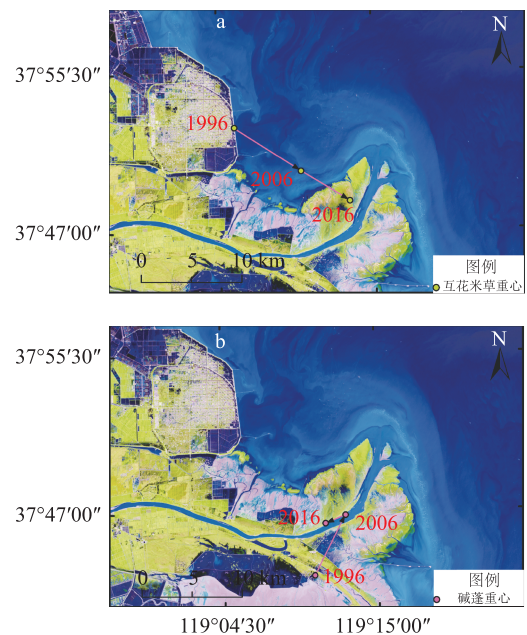


图 3 互花米草 (a) 和碱蓬 (b) 的重心转移

所示,其中互花米草面积为 26.67 km²,碱蓬为 26.15 km²。1996—2026 年的统计结果如图 5 所示:互花米草面积呈持续增长趋势,共增加了 23.22 km²,2026 年互花米草面积是 1996 年的 7 倍以上,表明互花米草抗干扰能力大,同时具有较强的繁殖能力;碱蓬面积呈波动趋势,2026 年较 1996 年减少了 25.16 km²,表明碱蓬相对于互花米草的抗干扰能力小,同时随外界干扰变化浮动较大。

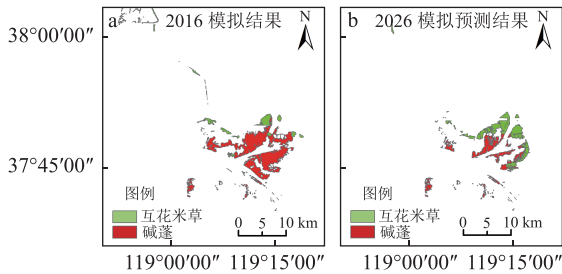


图 4 2016 年模拟 (a) 及 2026 预测模拟 (b) 结果

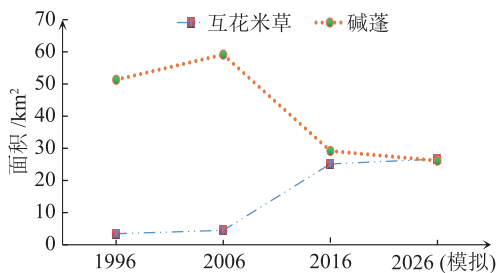


图 5 1996—2026 年典型植被的统计结果

3 讨论

本研究整合了 RS、GIS 空间分析技术和生物种群扩散模型,分析互花米草和碱蓬动态变化和预测模拟。由 1996—2016 年景观分类结果和转移矩阵看出,碱蓬和互花米草 2 种典型盐沼植物的分布随黄河尾间摆动变化明显,其面积在 1996—2006 年变化较为稳定,而在 2006—2016 年的变化比较剧烈。

对互花米草面积提取时,不同影像的潮位差异对互花米草淹没面积不同,在不同时相间也存在解译的差异。由于受数据的可获取性、无云等特征的影响,影像主要选择在植被生长季节的 8—10 月份。下一步会采用航拍技术,在特征潮位时间进行互花米草的提取,进一步提高面积精度。

植物与植物之间存在着共生、协作、竞争等相互作用,这些作用主导着植物群落的建立,不同植物也呈现不同的响应形式和机制^[25-26]。已有研究从 2 个物种间转移变化来看,互花米草主要通过影响碱蓬的生境使其不适宜继续生长,进而实现其扩张侵占目的。互花米草种群对外部环境变化的适应能

力较强,同时还具有促淤功能,使得淤积处的高程增加,到达碱蓬种群的水量变小,使得碱蓬种群生长发育受到影响,最终导致互花米草侵占了碱蓬用地^[27]。也有学者从生物和非生物环境因子角度,对江苏盐城湿地互花米草与碱蓬等植被的相互影响关系进行了研究,研究表明碱蓬滩中互花米草主要通过实生苗入侵新生境,并对外扩张,通过互花米草分蘖苗维持种群的稳定,而且碱蓬滩斑块处的含水量、盐度适合互花米草的生存、扩张^[28]。

针对黄河三角洲湿地 2 种植被的面积变化过程,分析可能存在的原因:1)自然因素。互花米草和碱蓬是 2 种典型的潮间带生长植被类型,土壤水分、盐度、潮沟发育成为影响植被演替过程的主要因素^[29-33]。黄河上游泥沙不断向河口处淤积,导致向海延伸造陆进程不断加快,为湿地植被创造了良好的生态环境,对盐沼植被的生长和繁殖起到了促进作用。2)人为因素。由于黄河三角洲滨海湿地区域堤坝和油田的频繁修建等人类活动,对该区域景观的连通性起到了阻碍作用,生态环境受到影响,直接导致滨海湿地植被演替过程发生了变化^[34]。其中包括 1996 年黄河的人为改道、油田和人工堤坝的修建等对植被演变起到了阻隔作用,使得互花米草和碱蓬无法向一千二方向继续扩散连通,同时自然湿地向人工湿地的转移面积呈增加趋势,均对植被的时空分布产生了负面的影响。因此需要对河口处的互花米草扩散加以适度的人工干预。对碱蓬的过度干扰(库塘的开发等)则弊大于利。此外,受到自然因素和人为调控的双重影响,20 a 来黄河尾间的改道波动较大,这将直接导致土壤中水分、盐度发生变化,对盐沼植被数量和空间分布造成影响^[35]。

4 结论

本文对黄河三角洲湿地 2 种典型植被动态变化进行了分析和预测,结果如下:

1) 1996—2016 年黄河三角洲湿地范围内,人为主导景观增多,互花米草数量增加,碱蓬数量减少,以陆向河口方向为正方向,空间上呈互花米草淤近和碱蓬后退的趋势。油田和人工堤坝的修建对植被演变起到了阻隔作用,使得互花米草和碱蓬无法向一千二方向继续扩散连通,并转向河口方向,2 种植被的分布趋势同时也随黄河尾间摆动变化。

2) 基于现有的变化趋势,利用 CA-Markov 模型对 2026 年进行种群扩散预测。结果表明互花米草呈持续高速增长趋势,碱蓬则呈波动趋势,但总体上碱蓬明显减少。

3) 人为和自然因素都对 2 种植被动态变化有影

响, 研究区范围内人为因素影响增加。

从互花米草和碱蓬动态及扩散模拟研究可知, 为确保黄河三角洲滨海湿地健康发展, 需要加强对碱蓬保护, 同时采取适当的人工干预控制互花米草的蔓延, 防止其无序急剧扩散造成生态灾害。此外, 在模拟过程中, 对短时序人为侵占植被用地和风暴潮等自然灾害造成的影响, 有待后续进一步研究。

5 参考文献

- [1] 孙培立. 辽宁省滨海湿地资源类型及时空演变的驱动力分析[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2007
- [2] CUI B S, HE Q, GU B H, et al. China's Coastal Wetlands: understanding environmental changes and human impacts for management and conservation[J]. *Wetlands*, 2016, 36 (Sup1): 1
- [3] 关道明. 中国滨海湿地[M]. 北京: 海洋出版社, 2012
- [4] 韩广轩, 宋维民, 李培广, 等. 长期生态学研究为滨海湿地保护提供科技支撑[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(2): 218
- [5] MUTANGA O, DUBE T, AHMED F. Progress in remote sensing: vegetation monitoring in South Africa[J]. *South African Geographical Journal*, 2016, 98(3): 1
- [6] 宋百敏. 黄河三角洲盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)种群生态学研究[D]. 济南: 山东大学, 2002.
- [7] 李晓敏, 张杰, 马毅, 等. 基于无人机高光谱的外来入侵种互花米草遥感监测方法研究: 以黄河三角洲为研究区[J]. *海洋科学*, 2017, 41(4): 98
- [8] 王东辉, 张利权, 管玉娟. 基于CA模型的上海九段沙互花米草和芦苇种群扩散动态[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2807
- [9] 孙贤斌, 刘红玉. 基于Markov-CA模型互花米草扩张影响因素与强度辨识[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(1): 38
- [10] MUKHOPADHYAY A, MONDAL P, BARIK J, et al. Changes in mangrove species assemblages and future prediction of the Bangladesh Sundarbans using Markov chain model and cellular automata[J]. *Environmental Science Processes & Impacts*, 2015, 17(6): 1111
- [11] 孙万龙, 孙志高, 田莉萍, 等. 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[J]. *生态学报*, 2017, 37(1): 215
- [12] 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): 1
- [13] HAN S, ZHEN Y, LI Y F, ZHANG H B. Influence of artificial cofferdam and spartina alterniflora expansion on evolution of suaeda salsa Marsh in Yancheng Coastal Wetland of East China[J]. *Asian Agricultural Research*, 2018, 10(4): 76
- [14] 吴亚茜, 肖向明, 陈帮乾, 等. 近30年来盐城潮间带湿地盐沼植被物候遥感监测[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(16): 264
- [15] 陈家宽. 上海九段沙湿地自然保护区科学考察集[M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [16] CONG P, CHEN K, QU L, et al. Dynamic changes in the wetland landscape pattern of the Yellow River Delta from 1976 to 2016 based on satellite data[J]. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(3): 372
- [17] 张继, 龙爱华, 於嘉闻, 等. 基于GIS与RS下的1990—2015年塔里木河流域LUCC及景观格局时空分析[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(12): 18
- [18] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. *地理科学进展*, 1999, 18(1): 83
- [19] GUAN Y. The salt marsh vegetation dynamics analysis with GeoCA-wetland-landscape[C]// The 18th International Conference on Geoinformatics, GIScience in Change, Geoinformatics 2010. Beijing: Peking University, 2010
- [20] 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
- [21] 赵建军, 张洪岩, 乔志和, 等. 基于CA-Markov模型的向海湿地土地覆被变化动态模拟研究[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(12): 2178
- [22] 王方雄, 王博, 杜研, 等. 基于GIS/RS的旅顺滨海湿地景观格局时空动态变化研究[J]. *海洋开发与管理*, 2014, 31(2): 84
- [23] 刘洁, 李宏, 马勇刚. 基于CA-Markov模型的中亚典型城市土地利用变化预测分析[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(3): 51
- [24] 宗秀影. 黄河三角洲湿地格局与变化分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2009
- [25] 阮俊潮, 戴文红, 李文兵, 等. 滨海湿地优势植物芦苇和互花米草的生态响应与效应研究进展[J]. *杭州师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 18(5): 490
- [26] 孔祥龙. 黄河三角洲植物群落种间相互作用研究[D]. 济南: 山东大学, 2016
- [27] 张华兵, 刘红玉, 侯明行. 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): 4767
- [28] 陈正勇. 互花米草与江苏海滨土著植物相对竞争力研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2011
- [29] 张绪良, 叶思源, 印萍, 等. 黄河三角洲自然湿地植被的特征及演化[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(1): 292
- [30] 张天举, 刘加珍, 陈永金. 黄河三角洲湿地不同植物群落土壤盐分分布特征[J]. *浙江农业学报*, 2018, 30(11): 1915
- [31] 王大伟, 白军红, 赵庆庆, 等. 黄河三角洲不同类型湿地土壤盐分的剖面分异特征[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 438
- [32] 骆梦, 王青, 邱冬冬, 等. 黄河三角洲典型潮沟系统水文连通特征及其生态效应[J]. *北京师范大学学报(自然科学)*

- 学版), 2018, 54(1): 17
- [33] 于小娟, 薛振山, 张仲胜, 等. 潮沟对黄河三角洲湿地典型景观格局的影响[J]. 自然资源学报, 2019, 34(12): 2504
- [34] 盖振宇. 人类活动影响下的黄河三角洲滨海湿地变化研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2011.
- [35] 刘玉斌. 黄河改道对三角洲湿地演变的影响研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2017

Simulation of dynamic changes and diffusion of typical vegetation populations in coastal wetlands in the Yellow River Delta

CHEN Kexin^{1,2)} CONG Pifu²⁾ QU Limei^{2)†} HAN Jianbo²⁾ HAN Chengwei²⁾

(1) State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, 116024, Dalian, Liaoning, China;

2) National Marine Environmental Monitoring Center, 116023, Dalian, Liaoning, China)

Abstract Satellite remote sensing, GIS spatial analysis and biological population diffusion were combined to understand temporal and spatial dynamic changes and development trends of typical wetland vegetation in the Yellow River Delta. Remote sensing images of coastal wetlands in the Yellow River Delta in 1996, 2006, and 2016 were used for object-oriented classification, landscape type transfer matrix, and Land Use Gravity Transfer to outline dynamic changes. CA-Markov model in IDRISI 17.0 was used to forecast changes in coastal wetland in 2026. Forecasting and analysis of future changes in *Spartina alterniflora* and *Suaeda salsa* were shown. *Spartina alterniflora* was found to increase from 3.45 km² in 1996 to 25.14 km² in 2016, whereas *Suaeda salsa* decreased significantly. Oilfield development on the Yellow River was found to have produced a *Spartina alterniflora* connectivity block, center of *Spartina alterniflora* gravity had moved from edge of Shengli Oilfield to estuary. The center of *Suaeda salsa* gravity had receded slightly inland. Forecast for 2026 indicated that *Spartina alterniflora* would reach 26.67 km² and *Suaeda salsa* 26.15 km². From 2006 to 2016, *Spartina alterniflora* and *Suaeda salsa* had changed dramatically. Human activities in coastal wetlands have increased over 20 years. Strong influences by natural disasters (diversions, cutoffs, storm surges and others) in the Yellow River Delta estuary in the 20 year period had seriously impacted the growth environment of *Spartina alterniflora* and *Suaeda salsa*, resulting in low accuracy of individual prediction. If this growth trend is not put under control, swelling of *Spartina alterniflora* in 2026 will likely negatively impact the ecological environment in the Yellow River Delta.

Keywords Yellow River Delta coastal wetland; remote sensing; CA-Markov model; *Suaeda salsa*; *Spartina alterniflora*