

# 基于元胞自动机的黄河三角洲互花米草 种群扩散动态模拟\*

张思青 刘 依 刘怡然 邵冬冬<sup>†</sup> 孙丽敏 郑劭彦  
(北京师范大学环境学院, 100875, 北京)

**摘要** 以黄河三角洲为研究区,重点考虑互花米草无性扩散过程,基于元胞自动机构建互花米草种群扩散模型,模型模拟了2014—2018年互花米草在黄河三角洲的动态入侵扩散过程,并与遥感解译结果进行对比,对模型进行了率定和验证.进一步对2020年互花米草分布范围进行预测,结果显示互花米草将进一步扩张定植于黄河现行入海口南北两岸的低潮滩区域,分布面积将达到4 118.15 hm<sup>2</sup>.模型设置了本地植物与互花米草的不同共存情景,模拟结果表明本地植物对互花米草种群扩散影响较小.本模型能较好地重现互花米草在黄河三角洲的入侵扩散过程,可以用来初步预测互花米草在黄河三角洲的扩张趋势,为黄河三角洲外来物种互花米草的生态防控提供科学建议.

**关键词** 物种入侵;互花米草;黄河三角洲;元胞自动机;遥感解译

中图分类号 S45

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020428

互花米草(*Spartina alterniflora*),隶属于禾本科,米草属.出于保护堤岸、促淤造陆、改良土壤等考虑,米草属植物首次由南京大学于1964年从英国引入我国江苏省<sup>[1]</sup>.此后,我国共引入4种米草属植物,即互花米草、大米草(*Spartina anglica*)、大绳草(*Spartina cynosuroides*)、狐米草(*Spartina patens*),均为多年生盐沼植物.与其他3种米草属植物相比,互花米草植株高大粗壮,耐盐、耐淹,繁殖能力强,对气候、环境有较强的适应性和耐受能力,引种后迅速扩散,目前已广泛分布在我国沿海省份,北至辽宁省,南达广西壮族自治区<sup>[2]</sup>.由于互花米草入侵后对入侵地生物多样性和生态环境造成危害,国家环保总局在2003年将其列入我国第一批外来入侵物种名单<sup>[3]</sup>.

互花米草于1990年左右引入黄河三角洲<sup>[4-5]</sup>,最初主要分布于莱州湾、胶州湾及孤东油田五号桩滩涂<sup>[6]</sup>.引种后,黄河三角洲互花米草分布面积变化剧烈,至2013年,互花米草面积已经将近1 000 hm<sup>2</sup><sup>[1]</sup>.有研究表明,互花米草入侵后,对当地盐沼植被群落分布和鸟类种群数量及物种多样性有一定负面影响<sup>[7-8]</sup>.黄河三角洲自然保护区境内有丰富的鸟类资源,珍稀濒危鸟类众多,若互花米草继续扩张,最终可能对该区域生态格局和物种多样性造成影响.

目前,国内外对于互花米草扩散方式及其入侵

机制已有大量文献报道,互花米草具有有性生殖与无性生殖2种繁殖方式<sup>[9]</sup>.有性生殖产生种子是互花米草在新生境定植、实现种群空间扩散的重要途径,而无性生殖对于种群的更新与维持、局部扩散具有重要意义<sup>[10]</sup>.植物入侵扩散为动态过程,相比于传统的遥感研究,基于扩散机制所建立的空间扩散模型,能动态地模拟入侵植物的空间扩散过程,预测空间分布格局.近年来,有学者应用元胞自动机模型对互花米草扩散过程和机制开展研究.其中:王东辉等<sup>[11]</sup>利用动态元胞自动机模型研究了上海九段沙互花米草种群扩散;孙贤斌等<sup>[12]</sup>改善了元胞自动机模型缺少模拟参数以及精度评价不完善的问题,增加了对实际影响因素的考虑,利用马尔可夫-元胞自动机模型研究了影响盐城互花米草扩张的因素;Ge等<sup>[13]</sup>设置不同的水文、物理和生理参数,采用元胞自动机模型模拟上海崇明东滩的有性扩散过程.而互花米草在黄河三角洲入侵相对较晚,分布面积不及江苏、浙江等地区<sup>[6]</sup>,研究相对较少,基于元胞自动机模型对黄河三角洲互花米草入侵扩散的研究,尚未见报道.

本研究基于遥感技术,收集了覆盖黄河三角洲区域2014、2016、2018年的Landsat7 ETM+遥感影像,通过对遥感影像进行预处理、监督分类及分类

\* 国家自然科学基金联合基金资助项目(U1806217)

<sup>†</sup> 通信作者:邵冬冬(1981—),男,副教授,博士.研究方向:湿地水文和生态过程研究. E-mail: ddshao@bnu.edu.cn

收稿日期:2020-07-14

后处理,提取黄河三角洲互花米草的时空分布信息,并基于元胞自动机构建了黄河三角洲互花米草种群扩散模型.采用遥感解译结果进行率定后的元胞自动机模型,可以很好地模拟研究区内的互花米草扩散情况.研究成果有助于加深对黄河三角洲互花米草入侵动态过程的认识,为互花米草入侵的生态管理和控制提供有效工具.

## 1 研究区概况和数据来源

**1.1 研究区概况** 黄河三角洲地处山东省东北部,位于  $118^{\circ}05' \sim 119^{\circ}40' E$ ,  $36^{\circ}35' \sim 38^{\circ}20' N$ ,发育了广阔的滩涂和盐沼湿地<sup>[14]</sup>.自 1990 年前后在孤东采油区北侧五号桩附近引种互花米草以来,互花米草分布面积开始波动增长<sup>[1]</sup>.互花米草于 2008 年出现在河口北岸,于 2011 年扩散至南岸,并在 2011 年后出现了爆发式增长的趋势.2017 年之前,北岸互花米草面积均大于南岸,自 2018 年开始,南岸的面积超过北岸<sup>[1, 15]</sup>.本文的研究区( $37^{\circ}43' \sim 37^{\circ}52' N$ ,  $119^{\circ}07' \sim 119^{\circ}19' E$ )位于 1996 年实施清 8 出汉工程后的黄河现行入海口两侧,此区域的互花米草面积约占黄河三角洲互花米草总面积的 90%<sup>[16]</sup>,且河口区域受上游来水来沙条件与海洋动力因素影响较大,岸线的淤积与侵蚀变化较为明显<sup>[17]</sup>.模拟此处的互花米草扩散过程有利于进一步研究互花米草入侵格局与水文条件变异的关系.

**1.2 数据来源** 研究区于 2008 年左右出现互花米草,分布较为分散<sup>[15]</sup>.至 2013 年,互花米草已大面积定植<sup>[18]</sup>.因此,本研究采用 2014-07-28、2016-05-30、

2018-06-21 的 Landsat7 ETM+卫星影像数据.所有的卫星影像数据均下载于美国地质调查局(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),包括 15 m 分辨率的全色波段和 30 m 分辨率的多光谱波段.各景遥感影像都在互花米草生长旺盛期和少云少雨的情况下获得,这使得区分互花米草与周围物种变得更为容易.使用基于三角插值的方法<sup>[19]</sup>修补 Landsat7 ETM+卫星影像数据缺失的条带部分.

## 2 研究方法

**2.1 遥感影像解译** 在 ENVI5.1 中对遥感影像进行预处理,包括辐射定标、大气校正.辐射定标可以将卫星的载荷观测值转换计算成辐亮度值<sup>[16]</sup>,从而消除传感器本身导致的误差.大气校正可以消除由于大气和光照等造成的辐射误差.本研究采用的是 ENVI5.1 中 FLAASH 大气校正模块.大气校正输入值为辐射定标后的处理结果.

为了提高遥感影像的分辨率,将多光谱波段和全色波段进行融合,像素为  $15 m \times 15 m$ .互花米草存在被海水淹没的情况,因此其生存环境大多湿度较大<sup>[1]</sup>,而光谱信息中的近红波段和中红波段分别对叶绿素含量和水分较为敏感.根据上述特点并参考任广波等<sup>[1]</sup>的方法,对影像数据进行缨帽变换(变换所需系数由卫星传感器确定<sup>[20]</sup>),得到湿度、绿度和亮度 3 个分量,同时选用近红、中红波段作为特征波段,利用最大似然法对研究区进行监督分类,将黄河三角洲的土地利用类型分为互花米草、其他植物、水体和光滩 4 种,结果见图 1.



图 1 2014—2018 年遥感影像解译结果

## 2.2 互花米草元胞自动机模型

**2.2.1 模型原理** 互花米草的繁殖扩散结果由有性生殖和无性生殖共同决定.无性生殖的后代数远远大于有性生殖,因此认为互花米草能否快速入侵主要取决于其无性生殖的能力<sup>[21]</sup>,故而本研究重点

考虑无性生殖扩散.互花米草有分蘖节成株与根状茎成株 2 种无性生殖方式,2 种方式处于动态平衡.根状茎成株通常远离基株,有利于种群的横向扩展,分蘖节成株可充分利用已占据空间的环境资源.有研究表明,互花米草分蘖成株数量多于根状茎成株<sup>[22]</sup>,

另外, 考虑到分蘖的过程更适于利用元胞及转换规则模拟, 本模型假设互花米草通过分蘖繁殖的方式进行无性生殖, 分蘖体快速向四周的 8 个元胞扩散. 每个元胞均有 2 个状态: 当元胞状态为 1 时, 则该元胞已被互花米草占领; 当元胞状态为 0 时, 则该元胞未被互花米草占领. 当元胞内个体数量超过最大容量时, 分蘖体将全部向四周扩散.

**2.2.2 模型结构与建立** 在元胞自动机模型中, 元胞在时间维度上的变化是离散的. 模型模拟时间间隔为 2 年, 初始年份为 2014 年, 模拟 2014—2018 年间黄河三角洲互花米草无性生殖扩散过程. 其中, 采用 2016 年影像数据对模型进行率定, 2018 年的影像数据进行验证.

模型通过获取元胞初始状态, 对米草的无性生殖扩散进行计算, 进而根据设定的转换规则得出每个元胞在下一时间节点的状态. 具体模型流程见图 2.

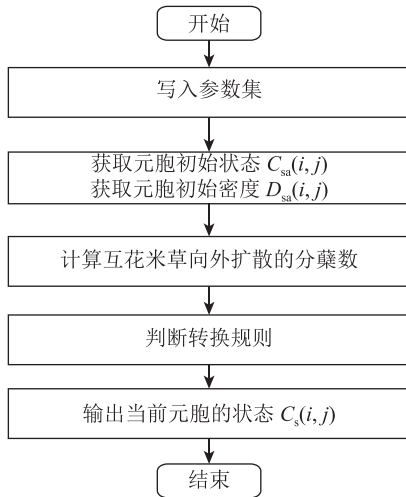


图 2 模型结构流程

互花米草无性分蘖数量和元胞密度的计算参考刘会玉等<sup>[21]</sup>基于互花米草个体的种群扩散模型. 种群统计学特征参数和变量见表 1 和 2.

由表 1 和 2 对参数和变量的定义, 分别列出模型变量的计算式:

$$N_{Tsa} = D_{sa} \times N_{SAT} \times P_{SAT}, \quad (1)$$

$$P(D_{sa}) = \exp(200 + D_{sa}), \quad (2)$$

$$N_{ToutSA} = P(D_{sa}) \times (N_{Tsa} + D_{sa} - (K_{max}/2)), \quad (3)$$

$$N_{TarrSA(t)} = N_{TarrSA(t-1)} + N_{ToutSA}/8, \quad (4)$$

$$D_{sa} = K_{max}/2 + (1 - P(D_{sa})) \times (N_{Tsa} + D_{sa} - K_{max}/2) + N_{TarrSA}. \quad (5)$$

当一个元胞内的互花米草个体数量大于或等于

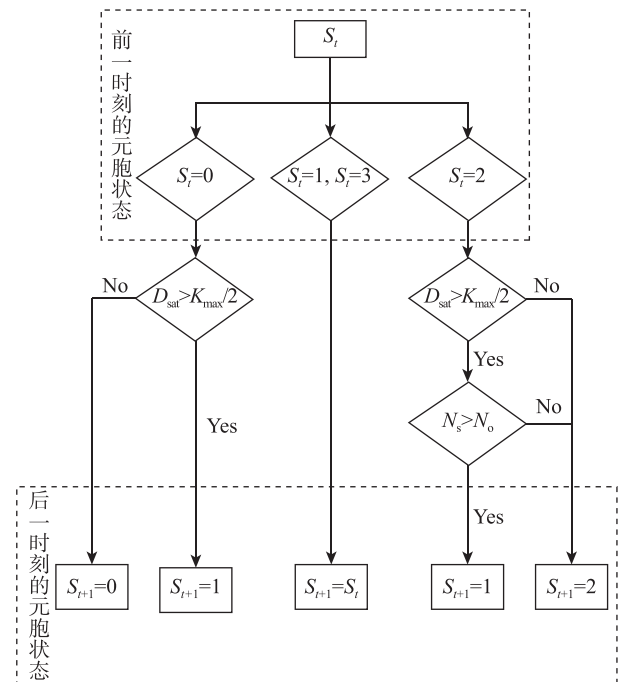
表 1 互花米草个体空间扩散模型参数

参数	定义	率定范围	取值	单位
$N_{SAT}$	互花米草的平均分蘖数	5~250 <sup>[21-22]</sup>	25	个·株 <sup>-1</sup>
$K_{max}$	元胞互花米草的最大容量	50~800 <sup>[21-22]</sup>	200	株·m <sup>-2</sup>
$P_{SAT}$	互花米草分蘖存活率	0.1~0.9	0.8	-

表 2 互花米草个体空间扩散模型变量

变量	定义
$D_{sa}(i, j)$	第 <i>i</i> 行、第 <i>j</i> 列元胞的互花米草密度
$N_{Tsa}(i, j)$	第 <i>i</i> 行、第 <i>j</i> 列元胞的互花米草分蘖数
$N_{ToutSA}(i, j)$	到达第 <i>i</i> 行、第 <i>j</i> 列元胞的互花米草分蘖数
$N_{TarrSA}(i, j)$	第 <i>i</i> 行、第 <i>j</i> 列元胞向外围元胞扩散的分蘖数
$C_s(i, j)$	第 <i>i</i> 行、第 <i>j</i> 列元胞的状态(用0或1表示)
$P(D_{sa})$	元胞在 $D_{sa}$ 密度下的逻辑斯蒂概率密度函数
$C_{sa}(i, j)$	第 <i>i</i> 行、第 <i>j</i> 列元胞的状态(用0、1、2、3、4表示)

元胞的最大容量的 1/2 时, 认为此元胞已被占领; 否则认为未被占领<sup>[21]</sup>. 每一个元胞的进化都是依据转换规则进行的, 此规则只依赖于元胞的状态和有限数量的邻域元胞<sup>[23]</sup>. 当地植物的存在会阻碍互花米草的扩散, 且其扩散可以占据光滩元胞, 而无法占据水体元胞. 具体转换规则见图 3.



$S_t$  代表当前元胞的状态;  $S_t=0$  代表光滩 (即无植物占领)、 $S_t=1$  代表互花米草、 $S_t=2$  代表其他植物、 $S_t=3$  代表水体;  $D_{sa}$  代表当前元胞的互花米草密度;  $K_{max}$  为元胞互花米草最大容量;  $N_s$ 、 $N_0$  分别代表元胞外围 8 个元胞中被米草和其他植物占领的元胞网格数量.

图 3 模型转换规则

**2.2.3 参数率定** 模型以 2014 年黄河三角洲互花米

草空间分布作为输入数据,以 2016 年黄河三角洲互花米草空间分布作为模型参数率定的实际数据.在模型中输入各参数经验范围内(表 1)的不同参数组合,采用试错法依次模拟这些参数组合下的互花米草分布情况,并通过计算 Kappa 系数进行一致性分析.

Kappa 系数的计算式为<sup>[24]</sup>

$$P_o = s/n,$$

$$P_c = (a_1b_1 + a_0b_0)/n^2,$$

$$k = (P_o - P_c)/(1 - P_c),$$

式中  $n$  代表总像元数,  $s$  代表对应元胞相等的像元数,  $a_1$  代表实际像元值为 1 的像元数,  $a_0$  代表实际像元值为 0 的像元数,  $b_1$  代表模拟像元值为 1 的像元数,  $b_0$  代表模拟像元值为 0 的像元数.

Kappa 系数范围为 0~1.00, 可以分为 6 个区间表示不同程度的一致性. Kappa 系数为 0.61~1.00, 说明模型与实际情况高度一致; 为 0.81~1.00 时, 一致性极好; 为 0.61~0.80 时, 一致性很好. Kappa 系数  $\leq$  0.60, 说明模型与实际情况一致性较低; 为 0.41~0.60 时, 一致性较好; 为 0.21~0.40 时, 一般; 为

0~0.20 时, 较差;  $<0$  时很差, 需要对模型做进一步修改. Kappa 系数评价标准见参考文献 [21].

**2.2.4 模型的敏感性分析** 敏感性分析以率定后的模型参数为基准值, 逐一对模型参数进行一定百分比的增减, 通过模拟互花米草扩散过程, 统计模拟的互花米草数量, 与相应互花米草数量基准值进行对比, 进而找出对模拟结果影响最大的参数.

**2.2.5 模型验证** 以 2016 年黄河三角洲互花米草空间分布为输入数据, 以 2018 年黄河三角洲互花米草空间分布作为模型验证数据. 通过 Kappa 系数作为模型模拟精确度的评价指标, 验证模型是否可以较好地模拟黄河三角洲互花米草的入侵扩散过程.

### 3 结果与讨论

**3.1 模型参数率定** 根据试错法并结合他人研究结果<sup>[21, 24]</sup>发现, 当  $K_{max}$  取 200、 $N_{SAT}$  取 25、 $P_{SAT}$  取 0.8 时, Kappa 系数取得最大值 0.788 8, 模拟得到的互花米草所占据的元胞数量为 78 166. 此时, 模拟结果与遥感解译所得的实际分布最为吻合(图 4), 因此选定该参数组合作为模型率定的最终参数取值.

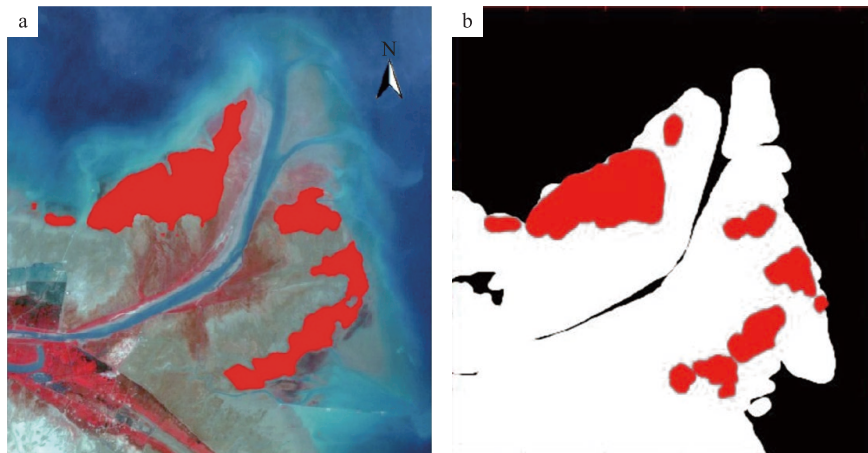


图 4 2016 年互花米草遥感解译 (a) 与模拟结果 (b) 对比

**3.2 敏感性分析结果** 通过对模型参数  $K_{max}$  和  $N_{SAT}$  进行  $\pm 30\%$  的调整,  $P_{SAT}$  进行  $\pm 20\%$  的调整(保证  $P_{SAT}$  处于参数变化范围内), 得到模拟后的互花米草所占元胞数量结果见表 3, 均为 108 177. 其中实际结果是通过 2016 年的遥感影像解译后得出的. 由模拟结果可知, 通过改变  $N_{SAT}$  和  $P_{SAT}$  的值, 对于模型结果没有明显影响, 而改变  $K_{max}$  对模拟结果有比较明显的影响, 所以可以认为  $K_{max}$  是模型的敏感性因素, 对互花米草种群扩散的影响最大.  $K_{max}$  是指元胞互花米草的最大容量, 从生态学角度分析, 它代表了一定空间内互花米草的最大环境容纳量, 决定了互花米草是否向外扩散, 制约其扩散分蘖能力. 互花米草群

落的密度不仅受他疏作用的影响, 同时也受到自疏作用的限制. 当互花米草群落盖度较低时, 植株通过分蘖繁殖的方式, 导致群落内部的盖度上升, 当达到一定的盖度后, 分蘖会被抑制, 进而抑制互花米草的扩散<sup>[25]</sup>. 通过敏感性分析发现, 若元胞的最大容量偏高或偏低时, 均会降低互花米草的扩散能力, 一定程度验证了上述规律.

**3.3 模型验证** 模型验证以 2016 年黄河三角洲互花米草空间实际分布为输入数据, 以 2018 年黄河三角洲互花米草空间分布作为模型验证数据. 将率定好的参数值代入模型, 并以 Kappa 系数作为模型模拟优劣的评价指标. 模型模拟后计算得出的 Kappa

表3 敏感性分析结果

参数	原始值	调整比率/%	模拟参数值	模拟米草所占元胞数量
$K_{\max}$	200	-30	140	73040
		+30	260	77429
$N_{\text{SAT}}$	25	-30	17.5	78166
		+30	32.5	78166
$P_{\text{SAT}}$	0.8	-20	0.64	78166
		+20	0.96	78166

系数为 0.712 4, 表明模型模拟互花米草的空间分布与遥感解译结果具有高度一致性(图 5 和表 4). 因此本模型可以较好地模拟黄河三角洲互花米草的入侵扩散过程.

### 3.4 模型应用

**3.4.1 2020 年黄河三角洲互花米草空间分布预测** 输入 2018 年黄河三角洲地区互花米草实际分布, 保持各参数不变, 预测模拟 2020 年黄河三角洲地区互花米草分布(图 6). 模拟结果显示, 被互花米草占据的元胞总数为 183 029 个, 总面积达 4 118.15  $\text{hm}^2$ , 占研究区总面积的 14.09%.

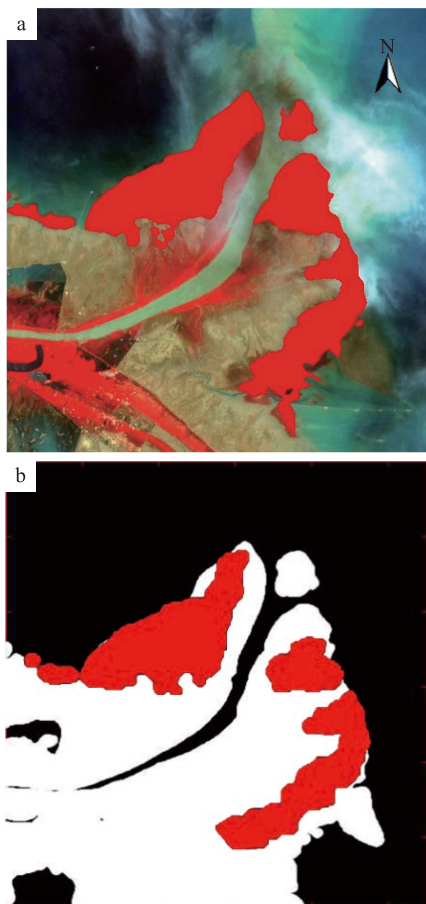


图5 2018年互花米草遥感解译(a)与模拟结果(b)对比

表4 2018年互花米草实际与模拟对比

参数	实际	模拟
总像元数	1 299 100	1 299 100
对应像元值相等的像元数		1 223 877
状态为1的像元数	175 228	115 161
状态为0的像元数	1 123 872	1 183 939
Kappa系数		0.712 4
一致性		很好



图6 2020年互花米草预测模拟结果

**3.4.2 本地植物对互花米草扩散的影响** 为了探究黄河三角洲地区与互花米草共存的本地植物对其种群扩散的影响, 模拟了移除其他植物时互花米草的入侵扩散过程, 并通过比较移除前后模拟效果的变化, 来确定本地植物对入侵种扩张的影响. 由表 5 可知, 在不考虑其他植物的影响下, 不同时期的 Kappa 系数分别为 0.768 7 和 0.689 9, 模拟结果依旧具有很好的 consistency. 对比考虑其他植物影响的情况, Kappa 系数变化率为 -2.55% 和 -3.16%. 说明黄河三角洲地区本地植物对互花米草扩散有影响, 但影响程度较小.

**3.5 讨论** 应用该模型对黄河三角洲互花米草空间分布进行预测, 模拟结果显示, 2020 年互花米草分布范围进一步扩张, 主要定植于黄河现行入海口南北两岸的低潮滩区域, 预计分布面积将达到 4 118.15  $\text{hm}^2$ . 互花米草作为一种能够适应恶劣盐沼环境的外来物种, 一旦入侵到芦苇或盐地碱蓬等本地群落时, 将会竞争取代本地种<sup>[18, 21]</sup>. 本研究通过比较模型在考虑和未考虑与互花米草共存的本地植物影响的不同情景模拟结果发现, 如果不考虑本地植物与互花米草的种间影响, 将会导致模型模拟准确性下降. 但由于其准确性下降幅度较小, 说明本地植物对互花米草种群扩散影响较小, 互花米草具有强大的入侵扩散能力, 具有很大的竞争优势.

表 5 移除本地植物影响前后模拟结果对比

年份	移除影响前		移除影响后		Kappa系数变化率/%
	Kappa系数	互花米草占据的元胞数	Kappa系数	互花米草占据的元胞数	
2014—2016	0.788 8	78 166	0.768 7	73 040	-2.55
2016—2018	0.712 4	115 161	0.689 9	108 177	-3.16

本文构建的模型中只考虑了互花米草的无性生殖过程, 主要是因为互花米草的无性生殖是其快速扩张的基础<sup>[12]</sup>. 而同时互花米草也具有很强的有性生殖能力<sup>[25]</sup>, 其所产生的实生苗对种群远距离定居和开拓新生境具有重要作用<sup>[10]</sup>. 有研究通过模型模拟发现, 互花米草在单一繁殖模式下的种群扩张速度要远小于混合繁殖模式<sup>[21]</sup>, 因此忽略有性生殖会对黄河三角洲互花米草的扩散模拟造成一定影响, 在模拟结果中体现为模拟的互花米草扩散密度比实际情况要少. 除此之外, 此模型模拟结果与遥感解译结果在空间分布方面存在的差异, 主要是由于盐沼植物的局地空间分布受到众多因素的影响, 如淹水、泥沙沉积、植食等自然因素<sup>[26]</sup>, 同时还人为扰动的影响<sup>[27]</sup>, 导致模拟的互花米草空间分布格局与实际情况相比有所差异.

元胞自动机模型主要基于规则的推演, 而未涉及具体物理过程. 目前, 已有模型将水沙、地貌演化过程与生态学过程耦合, 模拟植被的动态变化及其与环境的相互作用<sup>[28-29]</sup>. 但这种基于过程的模型对于支撑模型运行的输入数据要求较高, 计算成本也相对较高. 元胞自动机模型建立过程简单, 适用性较广, 对模型数据要求和计算成本都相对较低, 可在对模拟对象的实际变化过程研究不够深入时, 初步模拟对象变化的趋势, 为后续深入研究提供基础和借鉴.

## 4 结论

本文以互花米草典型扩散研究区黄河三角洲为例, 考虑了互花米草无性分蘖扩散过程, 基于元胞自动机模型, 并结合遥感技术, 模拟了 2014—2018 年黄河三角洲互花米草的种群扩张动态. 根据模型参数变化范围内不同参数取值组合, 采用试错法依次模拟不同参数值组合并利用 Kappa 系数进行一致性分析, 率定得到模型各参数值. 根据参数敏感性分析得到互花米草无性扩散的模拟结果主要取决于元胞的最大容量  $K_{\max}$ ; 使用率定所得的参数值来模拟 2018 年黄河三角洲地区互花米草种群分布, 得到的模拟结果与遥感解译结果高度一致, 表明本模型可以较好地模拟互花米草的扩张动态.

本模型对于黄河三角洲地区的互花米草种群扩

散有着较好的模拟效果, 可以用来预测未来互花米草的扩张趋势, 进而对黄河三角洲地区进行互花米草的生态防控提供参考和帮助. 本研究是在一种较为理想的情况下模拟了互花米草的种群扩散, 为了更为准确地反映其他生物和非生物因素对于互花米草扩散的影响, 未来的研究可以在此模型的基础上进行修改与完善, 增加模型的实用性和准确性.

## 5 参考文献

- [1] 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
- [2] 左平, 刘长安, 赵书河, 等. 米草属植物在中国海岸带的分布现状[J]. 海洋学报(中文版), 2009, 31(5): 101
- [3] 关于发布中国第一批外来入侵物种名单的通知[A]. 中华人民共和国国务院公报, 2003(23): 40
- [4] 于祥, 田家怡, 李建庆, 等. 黄河三角洲外来入侵物种米草的分布面积与扩展速度[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(6): 684
- [5] 张帆, 刘长安, 姜洋. 滩涂盐沼湿地退化机制研究[J]. 海洋开发与管理, 2008(8): 99
- [6] 刘明月. 中国滨海湿地互花米草入侵遥感监测及变化分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018
- [7] 王卿. 长江口盐沼植物群落分布动态及互花米草入侵的影响[D]. 上海: 复旦大学, 2007
- [8] 陈潘, 张燕, 朱晓静, 等. 互花米草入侵对鸟类的生态影响[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2282
- [9] DAEHLER C C, STRONG D R. Status, prediction and prevention of introduced cordgrass *Spartina spp.* invasions in Pacific estuaries, USA[J]. Biological Conservation, 1996, 78(1): 51
- [10] 肖德荣. 长江河口盐沼湿地外来物种互花米草扩散方式与机理研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010
- [11] 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(12): 2807
- [12] 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
- [13] GE Z M, ZHANG L Q, YUAN L. Spatiotemporal dynamics of salt marsh vegetation regulated by plant invasion and abiotic processes in the Yangtze Estuary: observations with a modeling approach[J]. Springer Journal, 2015, 38(1): 310
- [14] 王开荣. 黄河调水调沙对河口及其三角洲的影响和评

- 价[J]. 泥沙研究, 2005(6): 31
- [15] REN G B, WANG J J, WANG A D, et al. Monitoring the invasion of smooth cordgrass *Spartina alterniflora* within the Modern Yellow River Delta Using Remote Sensing[J]. Journal of Coastal Research, 2019: 135
- [16] 杨俊芳, 马毅, 任广波, 等. 基于国产高分卫星遥感数据的现代黄河三角洲入侵植物互花米草监测方法[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(4): 596
- [17] 彭俊, 陈沈良, 李谷祺, 等. 黄河三角洲岸线及现行河口区水下地形演变[J]. 地理学报, 2012, 67(3): 368
- [18] 马旭, 王安东, 付守强, 等. 黄河口互花米草对日本鳗草 *Zostera japonica* 的入侵生态效应[J]. 环境生态学, 2020, 2(4): 65
- [19] 李泠璐, 李嘉璇, 成功. 基于Landsat数据的洱海蓝藻动态变化监测[J]. 水资源研究, 2016, 5(2): 167
- [20] HUANG H M, ZHANG L Q. A study of the population dynamics of *Spartina alterniflora* at Jiuduansha shoals, Shanghai, China[J]. Ecological Engineering, 2007, 29(2): 164
- [21] 刘会玉, 林振山, 齐相贞, 等. 基于个体的空间显性模型和遥感技术模拟入侵植物扩张机制[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7794
- [22] 马俊改. 互花米草在滨海滩涂的无性繁殖与生态适应性研究[D]. 天津: 南开大学, 2011
- [23] HUANG H M, ZHANG L Q, GUAN Y J, et al. A cellular automata model for population expansion of *Spartina alterniflora* at Jiuduansha Shoals, Shanghai, China[J]. Estuarine Coastal And Shelf Science, 2008, 77(1): 47
- [24] 罗丹. 上海崇明东滩入侵植物互花米草扩散模拟技术[D]. 北京: 北京师范大学, 2017
- [25] 王东辉. 上海九段沙互花米草种群扩散动态CA模型研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007
- [26] LEVIN L A, TALLEY T S. Influences of vegetation and abiotic environmental factors on salt marsh invertebrates[M]. Dordrecht: Springer, 2000
- [27] CHI Y, WANG E, WANG J. Identifying the anthropogenic influence on the spatial distribution of plant diversity in an estuarine island through multiple gradients[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 21: 16
- [28] SCHWARZ C, YE Q H, VAN DER WAL D, et al. Impacts of salt marsh plants on tidal channel initiation and inheritance[J]. Journal of Geophysical Research-Earth Surface, 2014, 119(2): 385
- [29] BEST U S N, VAN DER WEGEN M, DIJKSTRA J, et al. Do salt marshes survive sea level rise? Modelling wave action, morphodynamics and vegetation dynamics[J]. Environmental Modelling & Software, 2018, 109: 152

## Cellular automata simulation of population expansion dynamics of *Spartina alterniflora* in the Yellow River Delta

ZHANG Siqing LIU Yi LIU Yiran SHAO Dongdong<sup>†</sup> SUN Limin ZHENG Shaoyan

( School of Environment, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China )

**Abstract** *Spartina alterniflora*, a major invasive species in coastal Chinese wetland, is widely distributed in the eastern coast of China, seriously threatening local ecosystem. The population expansion dynamics of *S. alterniflora* was therefore simulated for the prevention and control of *S. alterniflora* invasion. A sexual *S. alterniflora* expansion was considered, population expansion was established based on cellular automata. Dynamic invasion and expansion from 2014 to 2018 was simulated and compared to remote sensing interpretation results for model calibration and verification. Distribution range of *S. alterniflora* in 2020 was predicted, further expansion and settlement in the low tidal flat area on both sides of the Yellow River estuary was found, with a total distribution area of 4118.15 hm<sup>2</sup>. Simulation of different scenarios with and without influence of coexistent native plants revealed little influence of native plants on population expansion of *S. alterniflora*. This model could therefore reproduce the invasion and expansion process, predict the expansion trend, and provide scientific suggestions for the ecological control of the alien species *S. alterniflora* in the Yellow River Delta.

**Keywords** species invasion; *Spartina alterniflora*; Yellow River Delta; cellular automata; remote sensing interpretation