

基于 CA 模型的上海九段沙互花米草和 芦苇种群扩散动态*

王东辉^{1,2} 张利权^{1,2**} 管玉娟^{1,2}

(¹ 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; ² 华东师范大学城市生态化过程与生态恢复上海市重点实验室, 上海 200062)

摘要 基于1997年以来上海九段沙栽种芦苇和互花米草种群扩散格局的多年现场调查与遥感解译分析,并结合3S技术,构建了适合滩涂盐沼植物种群动态的元胞自动机(CA)模型。结果表明,该模型能较好地模拟九段沙上芦苇和互花米草种群扩散的格局和趋势,并验证了互花米草和芦苇的空间抢先占有模型以及锋面状连续扩散格局;土著植物芦苇与外来植物互花米草占据相同的生态位,而互花米草的种群扩散速度是芦苇的3~5倍,随着九段沙的不断淤涨,互花米草种群的快速扩展还将持续。构建的CA模型有助于深入研究外来物种扩散格局与其生态学过程之间的相互关系,对湿地生物多样性保护和资源管理具有重要意义。

关键词 九段沙 外来种 互花米草 元胞自动机 盐沼植被 种群动态

文章编号 1001-9332(2007)12-2807-07 中图分类号 Q145 Q149 Q948 文献标识码 A

Population expansion of *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis* at Jiuduansha, Shanghai based on cellular automata model. WANG Dong-hui^{1,2}, ZHANG Li-quan^{1,2}, GUAN Yujian^{1,2}(¹State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; ²Shanghai Key Laboratory of Urbanization Ecological Process and Ecological Restoration, East China Normal University, Shanghai 200062, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2007, 18(12): 2807-2813.

Abstract: Based on the field survey and the interpretation and analysis of satellite images about the population expansion patterns of *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis* at Jiuduansha shoals in 1997-2004, and combined with 3S techniques, a cellular automata (CA) model was built to simulate the population dynamics of plants adaptable to salt marsh. The results showed that the model could well simulate the population expansion pattern and trend of *S. alterniflora* and *P. australis* at Jiuduansha, and strongly supported the hypothesis of space pre-emption and range expansion with simple advancing wave fronts of these two species. The native species *P. australis* shared the same niche with the exotic species *S. alterniflora*, but the range expansion rate of *S. alterniflora* was 2-4 times faster than that of *P. australis*. With the accretion of the Jiuduansha shoals, a rapid range expansion of *S. alterniflora* was predicted to last for a long period in the future. The CA model built in this study could gain valuable insights into the relationships between population expansion pattern and its ecological processes of exotic plant species, and was of significance for wetland biodiversity conservation and resources management.

Key words: Jiuduansha shoals; exotic plant; *Spartina alterniflora*; cellular automata; salt marsh; population dynamics.

* 国家重点基础研究发展规划项目(2004CB720505)和上海市科委重大科技攻关资助项目(06dz12302)。

** 通讯作者。E-mail: lqzhang@sklec.ecnu.edu.cn

2007-01-04 收稿, 2007-09-19 接受。

1 引言

生物入侵对当地生态系统造成的巨大破坏是国内外学者关注的热点^[6,16]。互花米草(*Spartina alterniflora*)隶属禾本科、米草属的多年生草本植物,原产美国大西洋沿岸,适宜生活在潮间带。互花米草根系庞大,植株生长稠密,具有很好的促淤效果,1979年引入我国,用于固滩、护堤等方面,并取得很好的效果^[20]。然而,互花米草在不少地方快速扩散,对当地自然生态系统造成负面影响,同时也给滩涂养殖等带来直接经济损失^[1,3-4]。自20世纪90年代上海引种互花米草以来,其已在上海沿海地区迅速扩散^[8,10],对当地自然生态系统带来负面影响^[2-3,14]。目前对上海地区互花米草的生理生态、种间竞争和扩散机制等方面进行了较多的研究^[3,10,14,25,27],而应用模型对互花米草扩散过程和机制的研究还很少。

种群动态主要研究种群大小或数量在时间和空间上的变化规律及影响机制。与许多复杂的生物学过程一样,入侵种的扩散过程在数字上是难以处理的。元胞自动机(cellular automata, CA)是一种能够表现系统复杂行为的模拟方法,适于研究植物群落的时空动态过程^[15]。CA作为一种动力学模型,可用于处理多变量并模拟复杂的系统,其最大优点是可以把局部小尺度上观测的数据结合到邻域转化规则之中,然后通过计算机模拟来研究在大尺度上系统的动态特征^[12,23]。细胞自动机自产生以来,已被广泛应用于生物学和生态学研究,如流行病传播、森林动态、城市扩张、土地利用变化等^[28],而直接应用于外来物种入侵方面的研究还很少。为此,本研究在上海九段沙互花米草和芦苇种群扩散格局与过程研究的基础上^[8],应用CA模型原理,结合3S技术、现场调查和历史分析,构建了模拟互花米草和芦苇种群扩散的CA模型,重现了互花米草和芦苇自栽种以来的扩散过程,旨在研究大尺度上互花米草扩散格局、机制及其与生境要素和生境中芦苇种群等其他物种之间的动态联系,从而有效地预测互花米草的发展趋势,以期为外来物种的有效管理与控制,以及生物多样性的保护提供理论指导和决策依据。

2 研究地区与研究方法

2.1 自然概况

九段沙位于长江口南北槽分汊河道之间的河口心滩型沙洲,由上沙、中沙和下沙3部分组成,上游与江亚南沙毗邻,下游为长江口南槽口门水域。九段

沙的雏形起自20世纪20年代,至20世纪60年代遂成独立沙体。因承受长江来沙不断在此淤积,九段沙沙洲不断生长,至2004年,0 m以上滩地面积增加至127.3 km², -5 m浅滩面积约为348 km²。2003年3月经上海市人民政府批准,将九段沙连同江亚南沙定为上海市九段沙湿地自然保护区(31°03'—31°17' N, 121°46'—122°15' E)。2005年九段沙湿地自然保护区成为国家级自然保护区,亦是迄今上海面积最大的河口心滩湿地自然保护区之一^[8]。

长江携带的大量泥沙促使九段沙处于不断淤涨之中。滩涂的高程关联着水淹程度、风浪大小、土壤条件和地形冲淤程度,这些因子直接影响着各种潮滩湿地植被的生存条件。滩涂植物群落和生长状况在空间分布上存在明显的梯度分布规律:中潮滩下缘和低潮滩的盐渍藻类带(光滩),高程低于2 m,潮水淹没时间长,无高等植物分布;中潮滩的上半部分和高潮滩为海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)或藨草(*Scirpus triqueter*)带,高程位于2.0~2.9 m;高潮滩上半部分为芦苇(*Phragmites australis*)带,高程一般在2.8 m以上^[26]。这些特征在受人为干扰较少的长江口新生沙洲九段沙的表现尤为突出。海三棱藨草群落是潮滩上的先锋群落,它的出现和生长又为互花米草和芦苇群落创造了条件。

1997年为配合浦东国际机场选址东移,实施了“浦东国际机场东移和九段沙生态工程”,在九段沙的中沙种植了40 hm²芦苇和50 hm²互花米草,在下沙种植了5 hm²互花米草。目前,互花米草已在中沙和下沙形成了大面积的高密度单优群落。

2.2 研究方法

2.2.1 模型构建 CA系统包括元胞、元胞空间、邻居和转换规则4个要素。元胞是CA的最小单位,通过二维栅格来实现。元胞空间是元胞的主要属性,每一个元胞具有八邻域。根据转换规则,元胞可从一个状态转换为另一个状态,其转换规则是基于邻近函数来实现的^[28](图1)。

CA模型不是由严格定义的函数或物理方程确定,只是包含了一些模型构造的规则,元胞自动机是一类模型的总称,满足这些规则的模型都可以看作是CA模型。针对不同应用问题,对模型的元胞空间和转换规则进行细化和具体化,以分析各种复杂问题^[7]。针对互花米草种群扩散动态变化这一复杂的生物学过程,本研究从CA系统的4个基本要素出发,构建了互花米草种群扩散动态CA模型。利用Visual C++软件建立了一个基于栅格的互花米草种

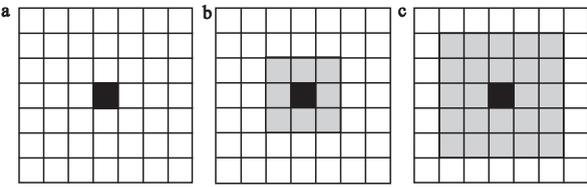


图 1 元胞自动机中 Moore 规则的邻域定义

Fig. 1 Neighborhood definition of Moore rule in a CA model. a) $r=0$; b) $r=1$; c) $r=2$. 黑色为中心元胞, 灰色为邻域元胞. Dark cell was the center cell, and the grey cells were neighbor cells. 不同的扩散速率可以定义邻域半径 $r=0, 1, 2, \dots$ 来实现. Different expansion rate could be realized by defining radius $r=0, 1, 2$.

群扩散动态模型. 其模型构建如下.

1) 地理元胞及状态. 在标准的元胞自动机模型中, 元胞的状态集是一个有限、离散的集合, 每个元胞状态取其中的一个值. 利用 CA 模型模拟互花米草种群时空动态的过程时, 元胞可定义为互花米草分布的区域. 在该定义的基础上, 元胞状态设为 $(0, 1)$, 其中 1 表示已被互花米草占有, 0 表示没有被互花米草占有或被其他植物占有, 如九段沙上的芦苇或海三棱藨草.

2) 元胞空间. 借助空间尺度和栅格模型, 元胞空间可与空间数据库、航空遥感影像、图像等相匹配, 从而完成数据转换等准备工作^[19]. 互花米草种群扩散的时空动态变化既是一个地理过程, 也是一个生物学过程. 因而在模型中, 元胞空间可用模型中的栅格来表示, 栅格大小选择本项研究中采用的 TM 卫星影像空间分辨率 $(30 \text{ m} \times 30 \text{ m})$. 在这个意义转变过程中, 元胞空间同时被赋予了空间尺度的概念.

3) 邻域定义. CA 模型中的邻域概念, 在地理上体现为空间近邻关系, 即地理相邻实体的相互作用. 根据以往研究结果及上海地区滩涂植被的演替规律^[8], 在芦苇和互花米草种群扩散动态模型中, 使用遥感影像解译后设置的特定灰度值来定义滩涂植物不同的生态位(不同的高程). 在模型中, 将潮沟、水体以及高程 2 m 以下的滩涂设置为限制芦苇和互花米草生长的障碍. 同时, 根据以往研究结果以及群落动态中的空间抢占模型^[13], 将芦苇和互花米草群落设置为互为限制的障碍.

上海地区互花米草和芦苇主要是通过无性繁殖向周围适宜空间呈锋面状扩散^[8, 10, 25]. 因此, 建模时把元胞之间的领域定义为 Moore 规则, 即一个元胞相邻的 8 个元胞为该元胞的邻居, 所有元胞的邻居定义是一致的(图 1). 邻域半径为一个栅格元胞, 相当于图像处理中的八邻域. 其邻居定义如下:

$$N_{\text{moore}} = \{V_1 = (V_{ix}, V_{iy}) \mid |V_{ix} - V_{ox}| \leq 1, |V_{iy} - V_{oy}| \leq 1, (V_{ix}, V_{iy}) \in Z^2\}$$

式中: N_{moore} 表示 Moore 规则的邻居定义; V_{ix} 、 V_{iy} 表示邻居元胞的行列坐标值; V_{ox} 、 V_{oy} 表示中心元胞的行列坐标值; Z 表示四方网格的直径^[28].

4) 转换规则. 标准 CA 模型的规则是局部的, 是由空间排列决定的映射函数^[7]. 在植物种群扩散动态中, 元胞动态除受局部个体间的相互影响外, 还受各种区域和更大尺度因素的影响, 因此, 在互花米草扩散动态的 CA 模型中, 本研究建立了较综合的状态转换规则, 以有效地模拟各地理实体的变化过程. 以九段沙的中沙和下沙各年份的淤涨速率为参考(表 1), 不同的种群扩散速率可通过设置不同的转换速率(邻域半径) $r=0, 1, 2, \dots$ 来实现(图 1), 从而可较为准确地模拟其种群的扩散动态.

2.2.2 植被数据来源 1997—2004 年九段沙上芦苇和互花米草种群扩散格局的数据来自黄华梅等^[8]的先期研究.

2.2.3 模型精度评价 应用 ArcGIS 9.0 软件的空间分析功能, 分别对 2000—2004 年各年份的解译图像和模拟图像进行空间叠置分析^[6], 进行中沙和下沙各年份模拟结果的精度评价.

3 结果与分析

1997—2000 年间, 由于互花米草群落的斑块面积一般较小, 群落较稀疏, 而且仅在种植区有零星分布, 因此难以在卫星影像的空间分辨率范围内被识别. 自 2000 年起, 互花米草群落已基本形成而且以较快速度扩散, 因此选择 1997 年和 2000—2004 年连续时段的 TM 影像来解译分析芦苇和互花米草种群的动态扩散过程(图 2). 经分析计算, 得出 1997—2004 年九段沙各类滩涂植被以及 2 m 等深线以上滩涂面积的时空动态(表 1). 九段沙的上沙由于没有引入互花米草, 目前尚未出现互花米草入侵现象, 而中、下沙由于沙洲淤涨速率不同, 因此分别对中沙和下沙的互花米草和芦苇群落的扩散进行模拟.

3.1 中沙芦苇与互花米草种群扩散动态

由图 2 可知, 九段沙中沙的滩涂面积($>2 \text{ m}$ 等深线, 下同)由 1997 年的 345.46 hm^2 增加到 2002 年的 642.03 hm^2 , 而在 2002—2004 年间, 滩涂面积基本维持在 650 hm^2 左右. 1997 年在九段沙的中沙种植了 40 hm^2 芦苇和 50 hm^2 互花米草, 至 2000 年, 芦苇群落和互花米草群落在种植带的分布和扩

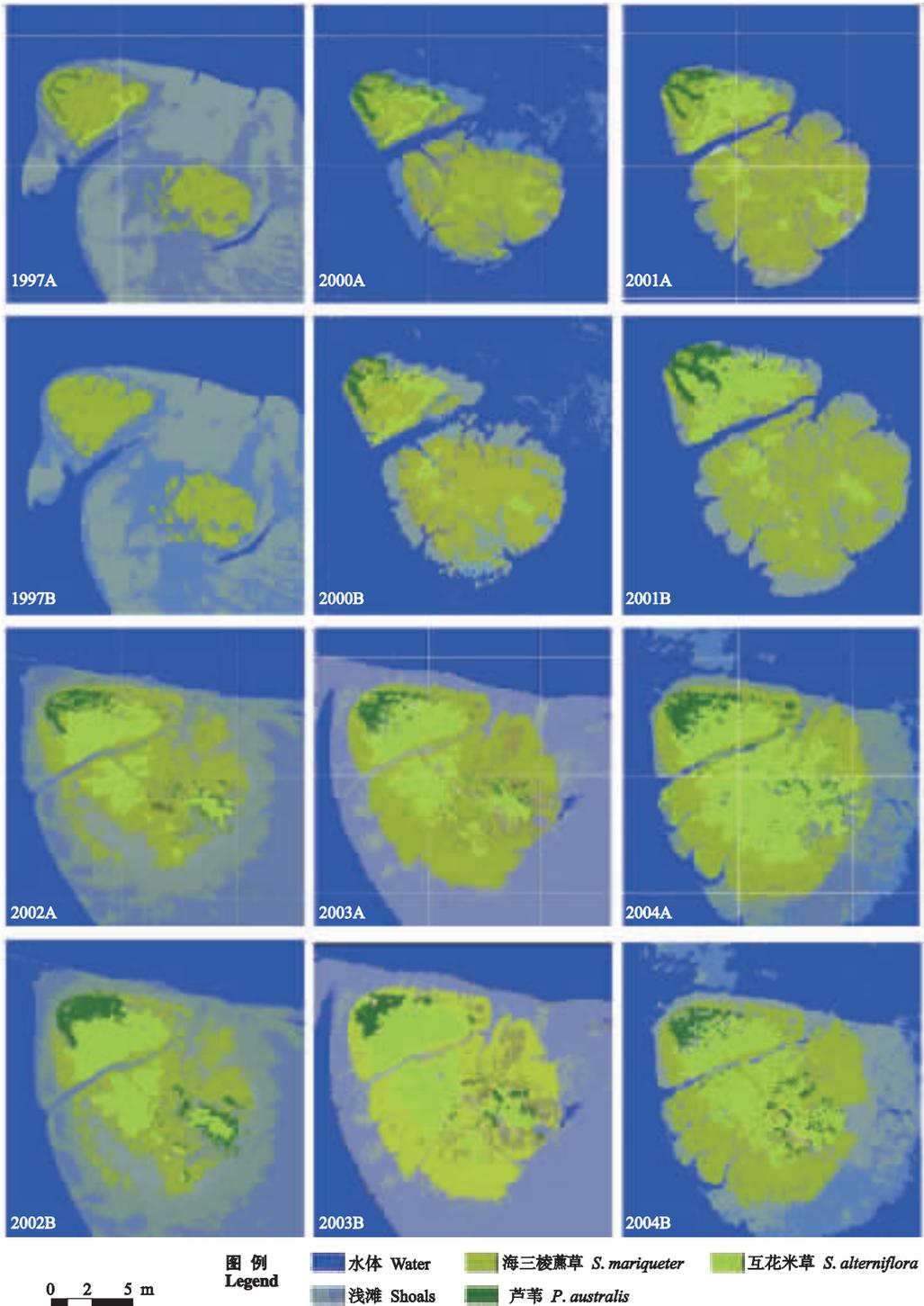


图 2 九段沙芦苇和互花米草种群扩散动态各年份遥感影像解译结果(A)与同年 CA 模型模拟结果(B)

Fig. 2 Satellite image classification (A) and CA model simulation (B) in the different years for population expansion of *P. australis* and *S. alterniflora* at Jiuduansha shoals.

散情况已从卫星影像上可清楚地识别出来,并开始向中沙海三棱藨草群落区扩散(图 2)。中沙互花米草群落经过 1997—2000 年的滞缓期后,2001 年进入快速扩张期,2002—2004 年处于稳定期,面积基本维持在 230 hm² 左右。根据中沙各年份的淤涨速率(表 1)和试运行模型,将 1997—2000、2000—2001、2001—

2002、2002—2003 和 2003—2004 年互花米草群落和芦苇群落的年扩散速率(r)分别设置为 1、3、3、1、1 和 1、1、1、1、1,其模拟结果如图 2 所示。

由表 2 可知,CA 模型的模拟精度在 70% ~ 75%。在宏观上,该模型较好地模拟了互花米草和芦苇群落在九段沙中沙扩散的时空格局。

表 1 九段沙滩涂植物群落及 2 m 等深线以上滩涂面积的时空动态

Tab. 1 Spatial-temporal dynamics of plant communities and intertidal zone (2 m) at Jiuduansha shoals

区域 Area	TM 影像日期 Date of TM image	互花米草 <i>S. alterniflora</i>		芦苇 <i>P. australis</i>		>2 m 等深线滩涂面积 Intertidal zone (> 2 m)	
		面积 Area (hm^2)	年增长率 Annual increase rate (%)	面积 Area (hm^2)	年增长率 Annual increase rate (%)	面积 Area (hm^2)	年增长率 Annual increase rate (%)
中沙	1997. 10. 20	50. 00	-	40. 00	-	345. 46	-
Middle shoal	2000. 05. 24	73. 06	15. 37	60. 30	16. 92	357. 86	1. 20
中沙	2001. 07. 26	162. 22	61. 01	83. 43	19. 18	424. 13	18. 51
	2002. 11. 11	221. 27	36. 40	70. 15	-15. 92	642. 03	51. 37
	2003. 08. 02	244. 94	10. 70	87. 98	25. 41	621. 57	-3. 19
	2004. 07. 19	234. 22	-4. 38	151. 66	72. 38	675. 23	8. 63
下沙	1997. 10. 20	5. 00	-	0	-	255. 08	-
Lower shoal	2000. 05. 24	28. 55	157. 00	0	-	770. 18	67. 31
下沙	2001. 07. 26	120. 49	161. 00	4. 18	-	1122. 22	22. 85
	2002. 11. 11	155. 79	29. 30	35. 91	759. 00	1132. 83	0. 95
	2003. 08. 02	224. 68	44. 22	36. 98	2. 98	1574. 79	39. 01
	2004. 07. 19	780. 17	247. 24	69. 38	87. 61	1822. 53	15. 73

- 无数据 Without data.

表 2 九段沙中沙 (A) 和下沙 (B) CA 模型的精度评价

Tab. 2 Accuracy evaluation of the CA model for middle shoal (A) and lower shoal (B) of Jiuduansha

模拟年份 Simulation year	互花米草扩散速率 Expansion rate of <i>S. alterniflora</i>		芦苇扩散速率 Expansion rate of <i>P. australis</i>		模拟精度 Simulation accuracy (%)	
	A	B	A	B	A	B
1997—2000	1	1	1	0	71. 5	37
2000—2001	3	4	1	0	67. 5	57
2001—2002	3	4	1	1	75. 0	71
2002—2003	1	4	1	1	73. 0	67
2003—2004	1	5	1	1	70. 0	57

3.2 下沙芦苇与互花米草种群扩散动态

九段沙下沙为持续快速淤涨的沙洲,其滩涂面积由 1997 年的 255.08 hm^2 增加到 2004 年的 1 822.53 hm^2 . 1997 年在下沙种植互花米草 5 hm^2 , 由于当时下沙滩涂的高程仅为 2 m, 因此互花米草的返青成活率很低, 难以在卫星影像的空间分辨率范围内被识别. 至 2000 年, 下沙的海三棱藨草群落区中出现了互花米草群落的稀疏斑块, 说明随着滩涂的不断淤高, 下沙的互花米草已完成了定居阶段, 逐渐开始扩散, 并于 2001 年进入快速扩张期. 同时, 随着自然演替过程, 芦苇群落也出现于下沙, 并逐渐向海三棱藨草群落区缓慢扩散(图 2). 根据下沙各年份的淤涨速率(表 1)和试运行模型, 将 1997—2000、2000—2001、2001—2002、2002—2003 和 2003—2004 年互花米草群落和芦苇群落的年扩散速率分别设置为 1、4、4、4、5 和 0、0、1、1、1, 其模拟结果如图 2 所示.

由表 2 可以看出 2000 年在下沙海三棱藨草群落区出现了互花米草群落斑块以后, 模型模拟的精

度在 57% ~ 71% 之间. 在宏观上, 该模型也能较好地模拟互花米草和芦苇群落在九段沙下沙扩散的时空格局.

4 讨 论

景观生态学的核心问题是研究空间格局与生态学过程之间的相互关系, 而空间模型是景观生态学研究的有效手段之一^[5, 23]. 本研究在上海九段沙滩涂植被遥感解译和多年现场调查分析的基础上^[8], 建立了互花米草种群扩散 CA 模型, 深入研究了互花米草和芦苇种群扩散的空间格局与生态学过程的相互关系. 研究结果表明, 基于 CA 的种群扩散模型能够很好地描述外来物种互花米草与土著种芦苇种群在长江口河口淤涨型沙洲的种群动态、扩散模式及扩散速度, 可以在不同程度上把一些重要生态学过程融合到模型的规则和参数中, 从而使其成为研究空间格局与生态学过程相互作用的一种有效途径.

九段沙是长江口快速发育的河口湿地生态系统, 受人为干扰较少, 是研究外来物种互花米草与土著种芦苇种群动态的理想区域. 海三棱藨草群落是潮滩上的先锋群落, 它的出现和生长又为互花米草和芦苇群落的生长创造了立地条件^[26]. 互花米草和芦苇群落的扩散与滩涂的淤涨存在密切关系. 只有滩涂的不断淤涨, 才可能为互花米草和芦苇种群提供新的空间生态位, 而当滩涂面积达到稳定时, 互花米草和芦苇种群由于没有可扩张的空间生态位, 其群落的面积也将保持稳定. 模型中, 通过把不同高程和滩涂植被设置为特定灰度值来定义滩涂植物的生

态位,进而把这一重要生态学过程融合到模型的规则和参数中,为定量描述这两物种的空间扩散过程提供了可能。

种群空间格局和群落空间结构是群落中各种过程相互作用的产物。关于群落动态最有代表性的经验模型主要有4种:镶嵌循环模型、随意游走模型、同资源种团比例模型和空间抢先占有模型^[13]。互花米草和芦苇种群的扩散符合空间抢先占有模型,经验模型可定性描述种群动态的有关格局和过程,通过将芦苇和互花米草种群设置为互为限制的障碍,基于CA的种群扩散模型则可定量地描述这两物种的扩散格局和生态学过程。

外来物种的扩散方式主要表现为跳跃式扩散和锋面状连续扩散^[17-18]。加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)、胜红蓼(*Ageratum conyzoides*)、三叶鬼针草(*Bidens pilosa*)、小白酒草(*Koeleria integrifolia*)、一年蓬(*Erigeron annuus*)等入侵植物的种子产量高,易于传播,主要表现为跳跃式扩散^[9,24]。而紫茎泽兰(*Eupatorium adenophorum*)、飞机草(*Chromolaena odorata*)、凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)和肿柄菊(*Tithonia diversifolia*)等入侵植物^[21-22],不但能以种子进行跳跃式扩散,还可通过无性克隆繁殖进行锋面状连续扩散,因而一旦入侵成功,其控制和治理的难度很大。通过Moore邻域定义,验证了上海地区互花米草种群扩散主要是通过其极强的无性繁殖能力呈锋面状连续扩散。在淤涨型滩涂上,一旦出现新的空间生态位(即逐渐淤高的海三棱藨草带),互花米草和芦苇都会呈锋面状向其扩散。互花米草在潮间带具有较土著植物芦苇更强的竞争优势和更广的生态幅,是其能成功入侵的关键因素^[1]。

本研究结果表明,互花米草种群的扩散速度是芦苇种群的3~5倍,互花米草极强的扩散能力是其能够占据有利生境的基础。九段沙新生河口三角洲快速发育的特点为互花米草种群的快速增长提供了适宜生境,可以预见,随着九段沙不断淤涨,互花米草种群的快速扩展期还会持续。互花米草在潮间带湿地的快速扩散,已威胁到上海地区的生物多样性^[3,10]。目前,针对互花米草入侵的生物学和生态学特性,许多学者已提出了各种治理方法,包括物理(机械)、化学和生物控制方法。本研究建立的互花米草种群扩散的CA模型可为上海地区互花米草的控制和管理提供理论指导和决策依据。上海地区互花米草入侵和扩散是以可扩张的空间生态位为基

础,因此,控制和管理的重点应在淤涨型的滩涂。为控制互花米草入侵和蔓延,可在互花米草扩散的外围设置隔离带,以阻止其峰面状连续扩散。同时,可依据空间抢先占有模型,应用生物替代方法,种植芦苇或其它土著物种,防止互花米草入侵,以恢复潮滩生态系统的生物多样性。

参考文献

- [1] Callaway JC, Josselyn MN. 1992. The introduction and spread of smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) in south San Francisco Bay. *Estuaries*, **15**: 218-226
- [2] Chen Z-Y (陈中义), Li B (李博), Chen J-K (陈家宽). 2005. Some growth characteristics and relative competitive ability of invasive *Spartina alterniflora* and native *Scirpus mariqueter*. *Biodiversity Science* (生物多样性), **13**(2): 130-136 (in Chinese)
- [3] Chen ZY, Li B, Zhong Y, et al. 2004. Local competitive effects of introduced *Spartina alterniflora* on *Scirpus mariqueter* at Dongtan of Chongming Island, the Yangtze River estuary and their potential ecological consequences. *Hydrobiologia*, **528**: 99-106
- [4] Daehler CC, Strong DR. 1996. Status, prediction and prevention of introduced cordgrass *Spartina* spp. invasions in Pacific estuaries, USA. *Biological Conservation*, **78**: 51-58
- [5] Fu B-J (傅伯杰). 2001. The Principle and Application of Landscape Ecology. Beijing: Science Press (in Chinese)
- [6] Gewin V. 2005. Industry lured by the gains of going green. *Nature*, **436**: 173
- [7] Han L-L (韩玲玲), He Z-W (何政伟), Tang J-X (唐菊兴), et al. 2003. A study on dynamic simulation of urban growth and land value increment based on CA model. *Geography and Geo-Information Science* (地理与地理信息科学), **19**(2): 32-35 (in Chinese)
- [8] Huang H-M (黄华梅), Zhang L-Q (张利权). 2006. Remote sensing analysis of range expansion of *Spartina Alterniflora* at Jiuduansha shoals in Shanghai, China. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **31**(1): 75-82 (in Chinese)
- [9] Jin L (金樑), Wang X-J (王晓娟), Gao L (高雷), et al. 2005. Control methods of *Eichhornia crassipes* in Shanghai based on its life cycle and reproduce strategy. *Ecology and Environment* (生态环境), **14**(4): 498-502 (in Chinese)
- [10] Li H-P (李贺鹏), Zhang L-Q (张利权), Wang D-H (王东辉). 2006. Distribution of an exotic plant *Spartina alterniflora* in Shanghai. *Biodiversity Science* (生物多样性), **14**(2): 114-120 (in Chinese)
- [11] Li S-J (李书娟), Zeng H (曾辉), Xia J (夏洁), et al. 2004. Current situation and some intending problems of landscape spatial dynamic model. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **15**(4): 701-706 (in Chinese)
- [12] Liu Y-H (刘迎湖), Xie L (谢利), Luo S-M (骆世

- 明), *et al.* 2006. Allelopathy of invasive weeds: A simulation study with cellular automata model. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **17**(2): 229–232 (in Chinese)
- [13] Liu Z-G (刘振国), Li Z-Q (李镇清), Dong M (董鸣). 2005. Model analysis of plant community dynamics. *Biodiversity Science* (生物多样性), **13**(3): 269–277 (in Chinese)
- [14] Ma ZJ, Li B, Jing K, *et al.* 2004. Are artificial wetlands good alternatives to natural wetlands for waterbirds? – A case study on Chongming Island, China. *Biodiversity and Conservation*, **13**: 333–350
- [15] Marco DE, Paez SA, Cannas SA. 2002. Species invasiveness in biological invasions: A modelling approach. *Biological Invasions*, **4**: 193–205
- [16] Mooney H, Cropper A, Reid A. 2005. Confronting the human dilemma. *Nature*, **434**: 561–562
- [17] Sakai AK, Allendorf FW, Holt JS, *et al.* 2001. The population biology of invasive species. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **32**: 305–332
- [18] Shi G-R (史刚荣), Ma C-C (马成仓). 2006. Biological characteristics of alien plants successful invasion. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **17**(4): 727–732 (in Chinese)
- [19] Sun Z-L (孙战利). 1999. Spatial complexity analysis and a geographically model based on cellular automata (GEOCA). *Geo-Information Science* (地球信息科学), **1**(2): 32–37 (in Chinese)
- [20] Tang T-G (唐廷贵), Zhang W-J (张万钧). 2003. A discussion of ecological engineering benefits of *Spartina* spp. and its ecological invasion. *Engineering Science* (中国工程科学), **5**(3): 15–20 (in Chinese)
- [21] Wang J-F (王俊峰), Feng Y-L (冯玉龙), Liang H-Z (梁红柱). 2004. Acclimation of photosynthetic characteristics to growth light intensity in *Eupatorium adenophorum* Spreng. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **15**(8): 1373–1377 (in Chinese)
- [22] Wang M-L (王满莲), Feng Y-L (冯玉龙), Li X (李新). 2006. Effects of soil phosphorus level on morphological and photosynthetic characteristics of *Ageratina adenophora* and *Chromolaena odorata*. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **17**(4): 602–606 (in Chinese)
- [23] Wu J-G (邬建国). 2000. Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy. Beijing: Higher Education Press (in Chinese)
- [24] Xu C-D (徐成东), Dong X-D (董晓东), Lu S-G (陆树刚). 2006. Invasive plants in Honghe River Basin of Yunnan Province, China. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **25**(2): 194–200 (in Chinese)
- [25] Zhang D (张东), Yang M-M (杨明明), Li J-X (李俊祥), *et al.* 2006. Vegetative dispersal ability of *Spartina alterniflora* in Eastern End of Chongming Island. *Journal of East China Normal University* (Natural Science) (华东师范大学学报·自然科学版), (2): 131–135 (in Chinese)
- [26] Zhang L-Q (张利权), Yong X-K (雍学葵). 1992. Studies on phenology and spatial distribution pattern of *Scirpus mariqueter* population. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica* (植物生态与地植物学学报), **16**(1): 43–51 (in Chinese)
- [27] Zhao G-Q (赵广崎), Zhang L-Q (张利权), Liang X (梁霞). 2005. A comparison of photosynthetic characteristics between an invasive plant *Spartina alterniflora* and an indigenous plant *Phragmites australis*. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **25**(7): 1604–1611 (in Chinese)
- [28] Zhou C-H (周成虎), Sun Z-L (孙战利), Xie Y-C (谢一春). 1999. The Geographical Cellular Automata Study. Beijing: Science Press (in Chinese)

作者简介 王东辉,男,1980年生,硕士研究生.主要从事景观生态学研究,发表论文2篇. E-mail: greatwdh@163.com

责任编辑 杨弘
