

张荣成, 张晓天, 曹浩冰, 等. 潮滩前缘盐沼植被簇团与潮沟系统演变相互作用研究[J]. 海洋学报, 2023, 45(4): 109–120, doi:10.12284/hyxb2023073

Zhang Rongcheng, Zhang Xiaotian, Cao Haobing, et al. Interaction between marginal salt marsh patches and tidal channel evolution on tidal flats[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(4): 109–120, doi:10.12284/hyxb2023073

潮滩前缘盐沼植被簇团与潮沟系统演变相互作用研究

张荣成¹, 张晓天¹, 曹浩冰¹, 李寿千², 陆彦², 陆永军², 周曾^{1,3*}

(1. 河海大学 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 河海大学 江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 潮滩前缘盐沼植被簇团可以通过改变水动力及泥沙运动等过程影响潮沟系统的地形地貌, 而潮沟系统的地形特征也会影响盐沼簇团的生长、扩张与侵蚀, 但对盐沼簇团与潮沟系统地貌演变的相互作用机制尚缺乏认识。针对这一问题, 本文构建了考虑盐沼植被动态演变的潮滩生物动力地貌耦合模型, 模拟了盐沼植被簇团生长扩张与潮沟系统地貌演变过程, 分析了不同初始数量的盐沼植被簇团与潮沟系统的空间格局及形态参数间的双向反馈。结果表明, 潮沟先迅速向海陆两侧延伸, 后发育出大量分汊; 盐沼簇团向周边扩张后未被潮沟切割区域逐渐连成片。少量盐沼簇团能够增加潮沟密度, 促进边缘冲刷式潮沟系统的发育。潮沟的走向受盐沼簇团分布位置及数量的影响, 多个盐沼植被簇团间的水流集中比单个簇团的边缘水流冲刷更易形成潮沟。在盐沼植被簇团与潮沟系统共同发育初期, 潮沟系统发育受盐沼植被簇团的促进作用较大, 后期潮沟内比簇团边缘更易形成水流汇聚, 盐沼簇团的影响逐渐由促进作用转为稳定作用。此外, 潮沟的存在限制了盐沼植被的横向扩散, 切割了盐沼植被簇团, 影响盐沼植被的空间分布格局。本研究揭示了盐沼植被簇团与潮沟系统地貌耦合演化机制, 可为盐沼潮滩生态系统保护修复提供科学依据。

关键词: 潮沟系统; 盐沼植被簇团; 数值模拟; 地貌演变

中图分类号: P737.12

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)04-0109-12

1 引言

潮滩是海陆相互作用的关键区域, 在保护生物多样性、提供海岸防护等方面具有重要生态和社会经济价值^[1-2]。在生态文明建设与海岸带综合保护与利用的背景下, 滨海潮滩湿地保护与修复已成为学术界的关注热点, 对其生物地貌相互作用机制的认知是进行科学保护修复与管理的基础。

盐沼潮滩是指被盐生植物覆盖并有规律地受海水浸涨的陆地^[3], 其演化一直是学术界关注的热点。

盐沼植被具有弱流、固沙、储水等功能^[4-5]。当潮流传播到盐沼区域时, 盐沼植被会极大增加潮流通过时的摩擦阻力^[6]。此外, 盐沼对泥沙运输的影响也不容忽视^[7-9], 盐沼植被减弱了水流挟沙能力且一定程度上抑制了底床悬沙质的再悬浮, 促进了泥沙沉降和滩面物质堆积^[7]。大量现场观测数据表明, 盐沼潮滩内的水体悬沙浓度显著低于无植被生长的光滩区域^[10-12]。取决于当地泥沙供给条件与植被类型等因素, 其海侧前缘时常发育有盐沼簇团(即在潮滩上以斑块状或簇团状集中分布的盐沼植被), 这是盐沼植被影响下盐

收稿日期: 2022-08-07; 修订日期: 2022-10-28。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41976156); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BK20220020); 江苏省优秀青年科学基金项目(BK20200077)。

作者简介: 张荣成(1997—), 女, 山东省泰安市人, 主要从事潮滩生物动力地貌模拟研究。E-mail: rczhang@hhu.edu.cn

* 通信作者: 周曾(1986—), 教授, 主要从事河口海岸地貌学、潮滩系统生物动力过程等方面研究。E-mail: zeng.zhou@hhu.edu.cn

沼滩与光滩的主要过渡地貌形态之一^[7,13-14], 盐沼前缘处的地貌变化最为显著, 这一区域的地形地貌的变化也通常被用来表征区域性淤涨或侵蚀, 具有重要的研究价值。

盐沼潮滩上也通常伴随着潮沟系统的发育, 潮沟大多由潮流冲刷形成, 是潮滩上最活跃的地貌单元之一^[15], 在水文连通、物质循环等方面起着重要作用^[16]。近年来, 国内外许多学者开展了对盐沼植被与潮沟地貌演变相互作用的研究。盐沼植被通过改变水动力过程及泥沙运动等因素影响潮沟系统的地形地貌。盐沼植被对潮沟发育的影响一般在于会减少侵蚀并增加其稳定性^[7], 且潮滩的中等尺度形态发育强烈依赖于盐沼的种类和组成^[17]。盐沼植被可以稳定已存在的潮沟系统^[18], 盐沼滩潮沟长度与植被类型的对应关系较强, 潮沟密度与植被覆盖度呈现显著的负相关关系^[19-20]。也有部分研究表明, 植被可以在潮滩上引发水流集中和岸壁侵蚀^[21], 单个盐沼植被簇团边缘常有潮沟生长, 潮沟头部一直向盐沼植被前缘延伸^[22-24] (图 1), 且米草属植被主导的湿地更有利于潮沟的发育^[25]。野外观测与数值模拟结果表明, 互花米草盐沼潮沟具有密度较大、宽度较小而深度较大、分支较多、溯源侵蚀较为显著等特征。由于互花米草的阻挡作用, 在盐沼外侧的潮水会掏蚀潮滩底部泥沙, 形成显著的边缘冲刷式潮沟; 而在潮沟中潮水漫滩时, 盐沼潮滩内潮水流速降低, 泥沙沉积, 多形成沿岸堤^[26-27]。此外, 潮沟的发育演变也会影响盐沼区植被的分布与扩张。潮沟漫滩的水盐交互可改变潮滩生

境, 是盐沼湿地植被空间格局形成的重要驱动力^[28-30]。盐沼植被陆向扩张的宽度和幅度取决于所在区域潮沟的发育程度^[27], 盐沼植被的种子捕捉量、萌发率和幼苗存活率均与距潮沟的距离有关, 随着远离潮沟区域, 植物定植率降低^[31]。但由于潮沟内水动力增强, 潮沟的存在也会抑制盐沼植被的生长与横向扩张^[24]。

现阶段国内外关于潮滩生物地貌演变已有一定研究, 但多侧重于大片盐沼植被对潮滩-潮沟系统地貌的单向影响^[18,32], 且缺乏对盐沼植被簇团从定植到演化的研究, 尚未形成完整的理论体系, 对于盐沼影响下潮沟系统的演变机理及盐沼植被对地貌变化的响应机制认识仍然不足。因此, 研究盐沼植被簇团与潮沟系统地貌演变的相互作用对进一步支撑完善相关理论具有重要意义。本文以潮流为主导作用的潮滩为例, 建立盐沼潮滩生物动力地貌模型, 分别对无植被生长以及不同分布的盐沼植被簇团影响下的潮沟系统进行分析, 探究盐沼植被与潮沟系统地貌演变的相互作用机制。

2 研究方法

本研究采用数值模拟的方法, 基于开源的 MarshMorpho2D 动力地貌模型进行改进^[32-33], 构建盐沼植被生物动力地貌模型。MarshMorpho2D 模型系统是一套可进行水流、波浪、生态、泥沙输移、床底地貌等各个过程之间相互作用数值模拟的模型, 计算效率非常高。前人基于本模型已开展了一系列研究, 如模拟三角洲系统的地貌变化^[34]、探究潮滩滩面侵蚀^[35] 以及

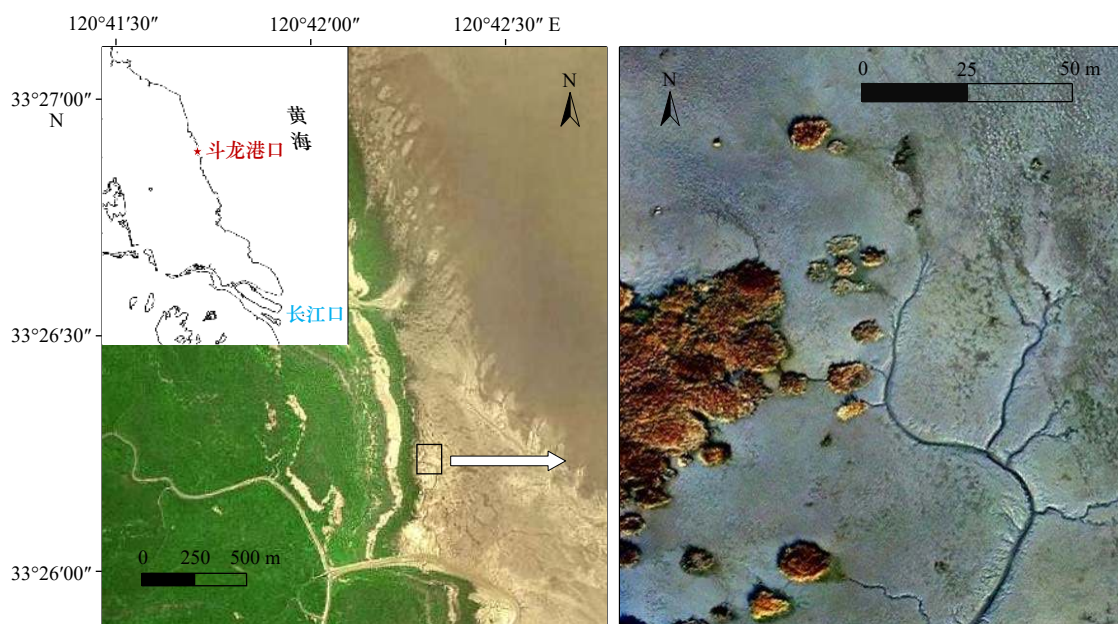


图 1 江苏斗龙港潮滩图(据文献 [23] 修改)

Fig. 1 Doulong Harbor tidal flats, Jiangsu, China (modified from reference [23])

潮滩地貌对海平面上升^[36]、沉积物供应的响应^[36]等。原始的 MarshMorpho2D 模型基于植被分布与滩面高程的关系对盐沼植被进行了较为概化的考虑, 本研究新增加了盐沼植被动态定植、扩散和生长模块^[32], 以下对本模型和相关改进模块进行简要介绍。

2.1 模型介绍

本模型包括潮流模块、泥沙输运与地貌演变模块以及改进的动态植被模块等, 可考虑水-沙-植被-地貌之间的耦合作用。

2.1.1 潮流模块

因为潮滩水深较浅, 潮流多由摩擦主导, 所以前人通常忽略浅水方程中的时间变化项和惯性项^[36-37], 仅考虑摩擦作用, 动量方程考虑水深和底床粗糙度^[38], 通过线性化摩擦项并使用曼宁公式^[38], 将方程简化为

$$U \propto \frac{h^{4/3}}{n^2} \nabla \eta, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (hU) = \frac{r/2 - \max[-r/2, \min(z, r/2)]}{T/2}, \quad (2)$$

式中, $U = (U_x, U_y)$ 为平均水深流速及平均潮流流速(单位: m/s), 忽略涨落潮方向; h 为潮汐平均水深(单位: m), 忽略潮内变化; n 为曼宁糙率系数, 根据是否有植被生长设为 n_0 或 n_b ; η 为水位值(单位: m); T 为潮汐周期(单位: s); r 为潮差(单位: m); z 为相对于平均海平面(MSL)的底床高程(单位: m)。

一个潮周期内流速分布为 $u = U_p \sin(t2\pi/T)$, U_p 为最大流速, 则

$$|U| = \frac{1}{T} \int_0^T u dt. \quad (3)$$

则由潮流引起的底部切应力为

$$\tau_c = \rho g n^2 h^{1/3} u^2, \quad (4)$$

式中, g 为重力加速度(单位: m/s²); ρ 为水的密度(单位: kg/m³)。

2.1.2 泥沙输运与地貌演变模块

因为潮滩多由细颗粒泥沙组成, 所以在计算沉积物输运时考虑悬移质主导。悬沙输运假定以潮汐扩散为主^[38]。假设泥沙浓度场处于稳定状态, 质量平衡为

$$\nabla \cdot [(K + K_0) h \nabla c_H] = D - E, \quad (5)$$

$$K_i = \frac{k U_i^2 T}{2} \quad (i = x, y), \quad (6)$$

式中, $K = (K_x, K_y)$ 为潮汐扩散系数(单位: m²/s); K_0 为水平紊流扩散系数(单位: m²/s), 可在无潮流情况下考虑泥沙的输运; D 为泥沙的沉积通量(单位: kg/(m²·s)); E 为泥沙的侵蚀通量(单位: kg/(m²·s)); c_H 为底床淹没期间的平均悬沙浓度(单位: kg/m³); 潮汐扩散系数 K_i 根据混合长度理论计算^[39]; k 为无量纲系数, 设置为 1。

床面演化方程为

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{D - E}{\rho_s}, \quad (7)$$

式中, ρ_s 为沉积物密度(单位: kg/m³)。

2.1.3 动态植被模块

盐沼动态植被模块使用前人提出的植被净增长公式^[18, 21, 32, 40]:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{dP_{\text{growth}}}{dt} + \frac{dP_{\text{diff},x}}{dt} + \frac{dP_{\text{diff},y}}{dt} - \left(\frac{dP_{\text{inund}}}{dt} + \frac{dP_{\text{flow}}}{dt} \right), \quad (8)$$

式中, P 为盐沼总茎密度(单位: 株/m²); P_x 为盐沼茎密度(单位: 株/m²), 此处 x 可代指生长(growth)、扩散(diff)、淹没(inund)、潮流切应力(flow)。

植被生长由植被密度定义, 植被密度达到能确保为每个网格单元内的植被提供足够的资源的指定最大承载能力时停止生长。植被生长公式为

$$dP_{\text{growth}} = rP(1 - B) \times dt, \quad (9)$$

式中, r 为植被密度的增长率(单位: step⁻¹); P 为植被密度(单位: 株/m²); $B = P/K$, 为参数化后的植被生物量^[41], 是无量纲系数, 取值区间为 0~1, K 为每个网格单元对植被的最大承载密度(单位: 株/m²)。

植被扩散公式为

$$dP_{\text{diff},x} = D \left(\frac{P_{x-1} - 2P + P_{x+1}}{dx^2} \right) \times dt, \quad (10)$$

$$dP_{\text{diff},y} = D \left(\frac{P_{y-1} - 2P + P_{y+1}}{dy^2} \right) \times dt, \quad (11)$$

式中, D 为植被扩散系数(单位: m²/step); P_{x-1} 、 P_{x+1} 、 P_{y-1} 、 P_{y+1} 表示附近网格的植被密度(单位: 株/m²)。

每个网格内的植被在淹水超过临界淹水高度一定时间后或底床切应力超过侵蚀植被的临界切应力时, 植被死亡。植被死亡控制方程为

$$dP_{\text{inund}} = C_{\text{inund}} (H - H_{\text{cr,p}}), \quad (12)$$

$$dP_{\text{flow}} = C_{\tau} (\tau - \tau_{\text{cr,p}}), \quad (13)$$

式中, C_{inund} 为受淹没影响的植被死亡系数(单位: (株·m⁻²)/m); H 为植被淹没高度(单位: m); $H_{\text{cr,p}}$ 为植被临界淹没高度(单位: m); C_{τ} 为受潮流切应力影响的植被死亡系数(单位: (株·m⁻²)/(N·m⁻²)); τ 为底床切应力(单位: N/m²); $\tau_{\text{cr,p}}$ 为临界底床切应力(单位: N/m²)。

在每个植被时间步长之后, 动力地貌模型记录了每个网格单元中高度、植被密度、阻力系数、底床糙率和植被相对覆盖度的变化。

2.2 模型建立

本模型选取 5 km×5 km 的矩形计算区域, 网格大小设置为 4 m×4 m。初始底面高程参考江苏海岸潮滩实际剖面形态^[42], 设置从 -5 m (平均海平面下) 至

1.5 m(平均海平面以上)的缓坡(图 2b)。盐沼植被定植需要低淹水、低扰动、切应力小等适当的“机会窗口”^[43-46],因此将不同数量的初始盐沼植被簇团设置在初始高程为 1~1.5 m 内的适当位置(图 2c 至图 2f)。

由于模型网格设置,初始盐沼植被簇团大小为 4 m×4 m。对于各个算例的盐沼植被簇团情况,未改变盐沼植被簇团的初始大小及生长、扩散等植被参数,使潮沟形态参数具有可比性。

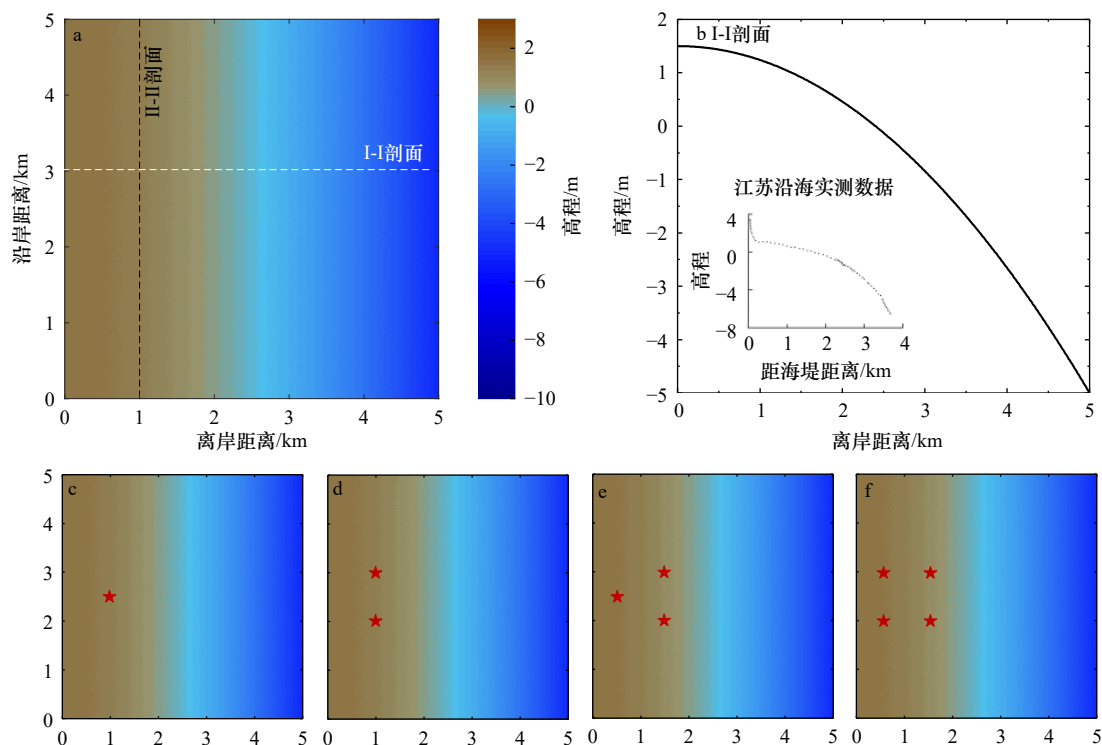


图 2 初始地形设置及盐沼植被簇团分布(据文献[42]修改)

Fig. 2 Initial landform setting and distribution of salt marsh vegetation patches (modified from reference [42])

红色五角星处为簇团具体位置

The red five-pointed star is the specific location of the patches

模型参数根据江苏沿海潮滩情况及模型限制来设置。水动力只考虑潮流,周期为 12.5 h,潮差为 4 m;底床沉积物仅设置黏土,临界起动切应力为 0.2 Pa;海边界设置悬沙浓度为 40 mg/L。模型的具体参数选取见表 1。

3 结果与分析

3.1 潮沟系统发育过程

为研究植被对潮沟系统发育过程的影响,设置了无植被的潮滩和有 2 个初始盐沼植被簇团影响的潮滩两种工况,对 100、300、500 个时间步长(n)后的潮滩-潮沟系统地貌演变过程进行分析(图 3,绿色部分为植被覆盖区域)。100 个时间步长后潮滩已有部分大尺度顺直潮沟发育,随着时间的推移,潮沟以同时向海、向陆延伸的方式迅速发育,一些规模较大的潮沟出现大量潮沟分支,潮沟密度显著增加,但主潮沟位置已基本稳定,部分小潮沟消亡。同时,在潮沟发育初期,潮沟侧重于向陆侧纵向延伸,仅在部分初始

盐沼植被簇团边缘有少量潮沟分支生成(图 3d);300 个时间步长后,无植被生长的潮滩共有 20 条潮沟发育,有植被生长的潮滩潮沟数量为 26,增加了 30%;纵向地貌稳定后,在盐沼植被簇团未生长区域主潮沟向两侧发育出大量潮沟,有植被生长的潮滩比无植被生长潮滩的潮沟数量增加 15.4%。可以看出,由于植被对水流的阻挡作用及簇团边缘的水流汇聚作用,盐沼植被簇团的存在不仅影响了盐沼区潮沟的位置和走向(图 3i 至图 3iv),也显著增加了潮沟的数量,使潮沟更易分叉,促进了潮沟系统的发育。此外,这种促进作用在潮沟发育初期更显著,随着时间的增加,潮沟内比簇团边缘更易形成水流汇聚,此时地形引导的侵蚀占主导地位,盐沼簇团对水流的阻挡和改道不足以造成沟槽侵蚀,且由于其弱流、固沙等生物特性,对潮沟的影响逐渐由促进作用转为稳定作用。

分别取有 2 个盐沼植被簇团覆盖的潮滩经历 100、300、500 个时间步长后的垂直于岸线 3 km 处(I-I 剖面)及距离陆边界 1 km 处(II-II 剖面)断面的局部沿

表 1 模型参数汇总
Table 1 Summary of model parameters

模型参数	取值	单位	取值依据	
水动力参数	无植被滩面曼宁系数 n_0	0.02	无量纲	Mariotti ^[33]
	有植被滩面曼宁系数 n_B	0.08	无量纲	Mariotti ^[33]
	潮差	4	m	江苏沿海实地资料
	潮周期	12.5	h	江苏沿海实地资料
泥沙参数	沉积物密度	2 650	kg/m ³	Mariotti ^[33]
	沉降速度	0.2	mm/s	Mariotti ^[33]
	临界起动切应力	0.2	N/m ²	Mariotti ^[33]
	临界沉降切应力	1 000	N/m ²	Mariotti ^[33]
	中值粒径 D_{50}	5	μm	Mariotti ^[33]
植被参数	生长速度 r	1	step ⁻¹	Best等 ^[32]
	最大植被密度承载力 K	1 200	株/m ²	Best等 ^[32]
	植被扩散系数 D	0.5	m ² /step	Best等 ^[32]
	受潮流切应力影响的植被死亡系数 C_r	30	(株·m ⁻²)/(N·m ⁻²)	Best等 ^[32]
	植被死亡临界切应力 $\tau_{cr,p}$	0.26	N/m ²	Best等 ^[32]
	受淹没影响的植被死亡系数 C_{inund}	2 000	(株·m ⁻²)/m	Temmerman等 ^[21]
	植被临界淹没高度 $H_{cr,p}$	0.1	m	Temmerman等 ^[21]

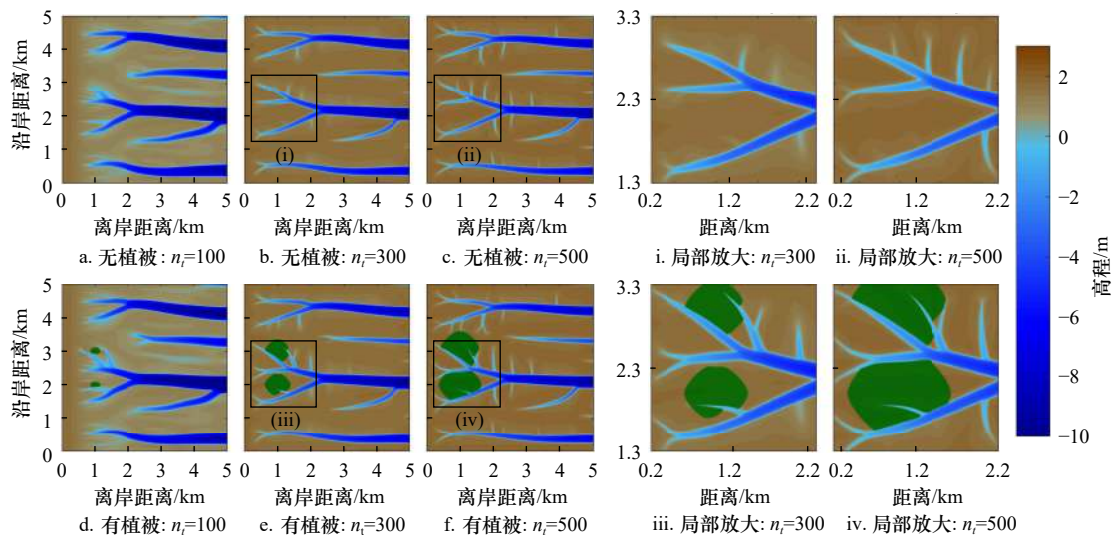


图 3 潮沟系统及盐沼植被簇团发育过程对比

Fig. 3 Comparison of the development process of tidal channel system and salt marsh vegetation patches

以盐沼植被簇团数量等于 2 为例, 绿色部分为植被覆盖区域

Number of vegetation patches is 2, the green area is covered by the vegetation

程高程和生物量进行对比(图 4)。随着时间的增加, 由于海边界处持续有来沙, 整体潮滩滩面抬高至 2 m 左右, 根据野外实测数据及前人的数值模拟结果^[47-49], 此淤积速度在合理范围内。100 个时间步长时, 潮滩发育尚不成熟, 在沿岸方向表现的较为明显, 滩面凹

凸不平, 0.5 m 内的高程起伏波动较多, 在有植被生长区域这种现象更为显著, 高程起伏最高可达 2.13 m, 说明盐沼潮滩受盐沼植被影响较大。300 个时间步长后, 受潮流和泥沙等地貌因子以及盐沼植被等生态因子的影响, 泥沙的沉积作用显著, 潮滩滩面平均高

程抬高约 0.9 m, 大部分潮滩的小冲沟被填平, 潮滩整体地貌趋于平缓; 少数小冲沟被潮水冲刷成为较大的主要潮沟, 且发育成熟。此外, 盐沼植被簇团对潮沟的改道作用较显著(图 4i 至图 4iv)。500 个时间步长

后, 剖面处潮滩地貌整体变化不大, 整体滩面平均高程较 300 个步长时抬高约 0.1 m, 有少量新潮沟生成, 大部分潮沟高程平均减小约 0.3 m。

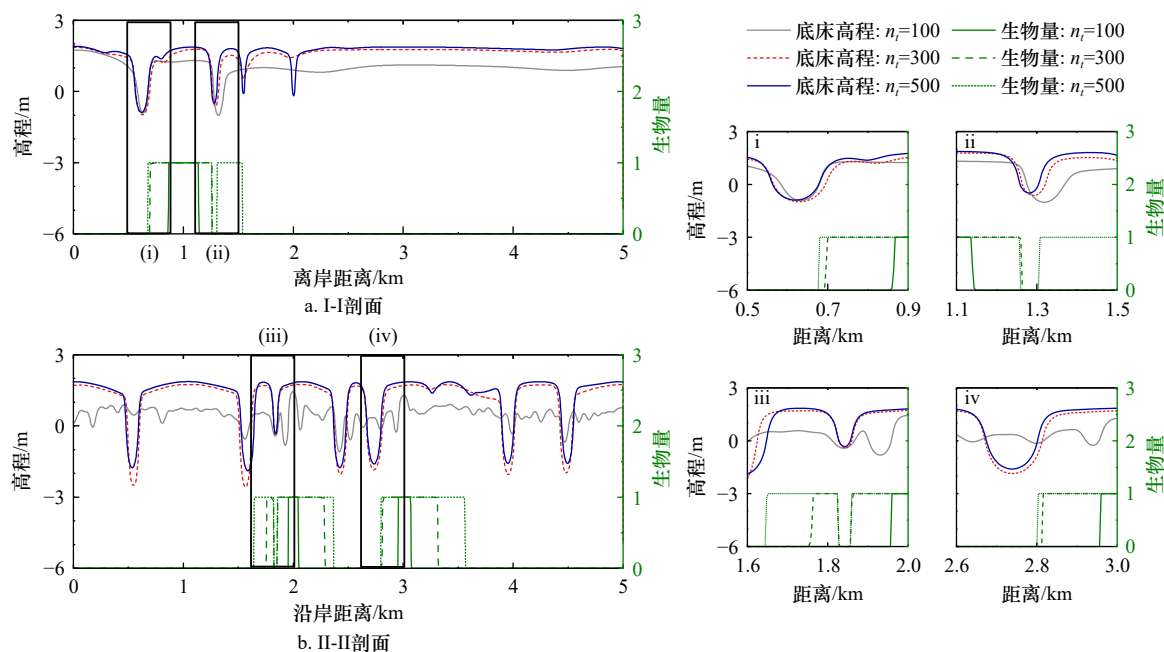


图 4 不同时间的断面高程及生物量图

Fig. 4 Cross-sectional elevation and biomass at different times

以盐沼植被簇团数量等于 2 为例

Number of salt marsh vegetation patches are 2

分别取有无盐沼植被簇团生长的潮滩在 500 个时间步长后的流速-切应力-地貌-生物量进行对照分析(图 5)。潮沟发育时, 潮滩上的潮流对潮滩进行局部冲刷, 水流流速及底床切应力增大, 生成大量潮沟。有盐沼植被簇团生长的潮滩, 盐沼植被通过弱流、固沙等生物特性以及对水流的阻挡作用, 改变水流走向, 水流在盐沼植被簇团边缘以及两盐沼植被簇团中间集中, 潮流流速增大, 最大约为 0.18 m/s, 对潮滩的冲刷作用变强, 潮滩底床切应力随之增大, 最高可达 0.73 N/m², 超过临界底床切应力后起泥沙生成潮沟, 即盐沼植被簇团通过影响潮滩系统中的水沙作用, 间接影响潮沟系统的地貌演变。

分别在不同发展时间内潮沟相关形态参数进行统计, 随着时间的推移, 500 个时间步长后有大量潮沟发育, 数量以及总长度与 100 个时间步长后分别增加 64.1% 和 33.5%, 而由于海边界涌入的大量泥沙沉积, 潮沟的平均宽度和总体积有了较显著的下降, 分别下降 32.6% 和 36.6%。由于潮沟长度、宽度及深度的共同变化, 总面积及宽深比并未呈现出单调递增或递减

的趋势。值得一提的是, 由于 100 个时间步长时潮沟地貌发育尚未稳定, 潮沟的总面积、总体积以及宽深比的数值较潮沟稳定后差距较大。

从上述研究可知, 盐沼植被簇团对潮沟系统的发育具有重要影响。在盐沼植被与潮滩共同发育的初级阶段, 盐沼植被簇团主要起到侵蚀作用, 促进潮沟数量及长度的增加从而促进潮沟的发育; 而在后期, 植被的存在将稳定潮沟系统。这也进一步验证并补充了相关文献的发现^[21, 24, 50-52]。

3.2 不同分布盐沼植被对潮沟系统发育演变的影响

为研究盐沼植被簇团数量(N)与潮沟系统地貌演变的对应关系, 分别在潮滩上设置了不同分布的盐沼植被簇团, 对 500 个时间步长后潮沟地貌及盐沼植被簇团的结果进行对比(图 6)。盐沼区潮沟的走向受盐沼植被簇团数量及分布位置的控制, 由于植被对水流的阻挡作用, 与无植被时对比潮沟更易向盐沼植被簇团两侧产生新的潮沟分支(图 6)。盐沼植被簇团数量越多, 潮沟分叉越显著, 簇团数量为 4 时比簇团数量为 1 时的潮沟数量增加 32.4%(图 7a), 这是因为

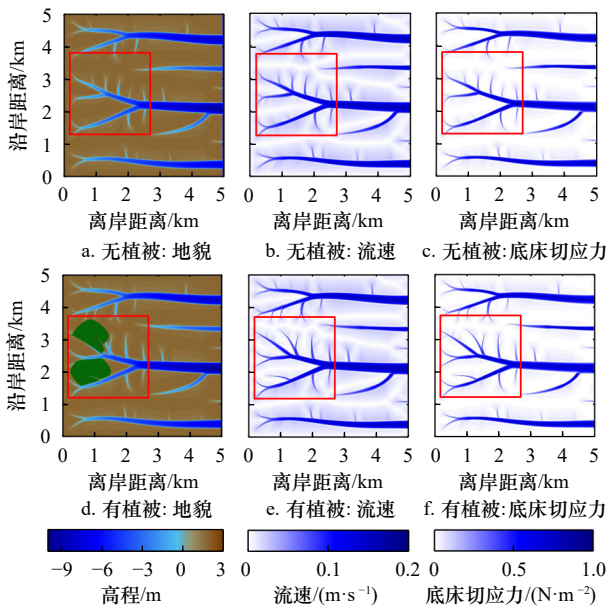


图5 有无植被结果对比

Fig. 5 Comparison of results with and without vegetation

$n_i=500$, 绿色部分为植被覆盖区域

$n_i=500$, the green area is covered by the vegetation

盐沼植被改变了潮滩的水沙动力(图5)。水流集中在相邻盐沼植被簇团之间, 流速及底床切应力增大, 在底床切应力足够大时, 便可形成通道侵蚀, 形成大量边缘冲刷式潮沟。但由于盐沼植被簇团的弱流、固沙等作用, 其内部及后部的水流及底床切应力均减小, 充分的沉积物使得潮间带的地形和地貌发生变化, 仍然在一定程度上限制了部分潮沟的发育, 影响了潮沟系统的演变。

通过对比各点高程与其周围平均高程的相对高

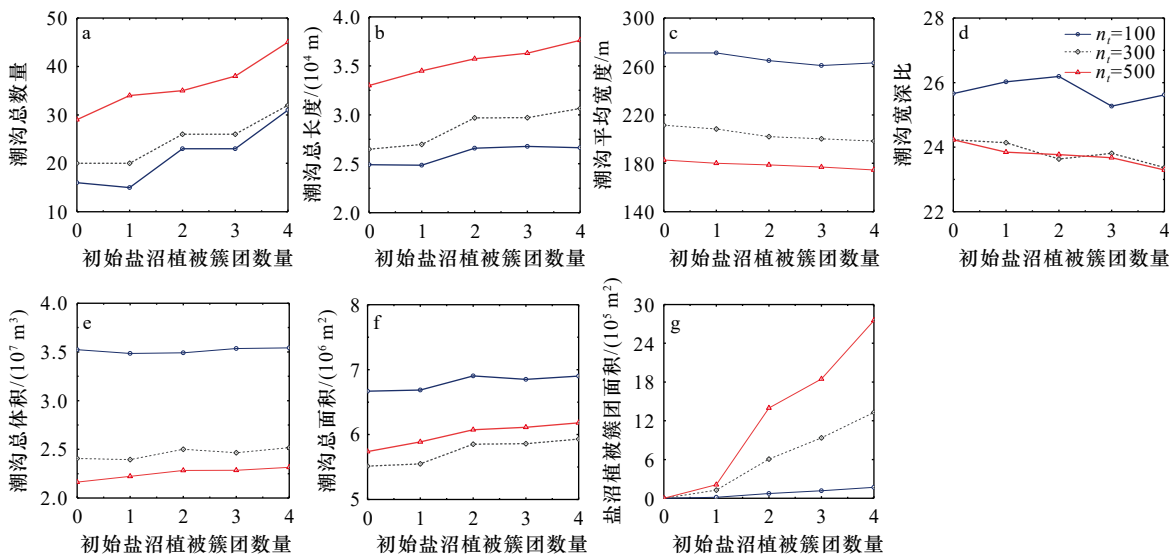


图7 潮沟及簇团参数与盐沼植被簇团分布的关系

Fig. 7 Relationship between parameters of tidal creeks and patches and the distribution of salt marsh vegetation patches

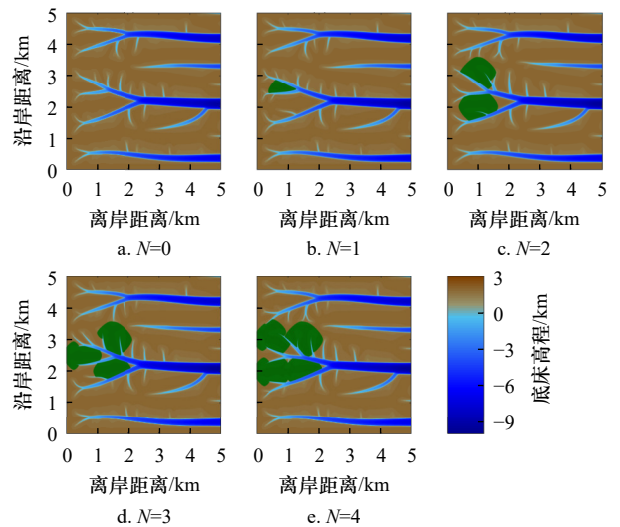


图6 不同分布盐沼植被簇团作用下的结果对比

Fig. 6 Results under the action of different distribution of salt

marsh vegetation patches

$n_i=500$, 绿色部分为植被覆盖区域

$n_i=500$, the green area is covered by the vegetation

低识别潮沟^[53], 并统计在不同发展时间内潮沟相关形态参数, 图7比较分析了潮沟的数量、总长度、平均宽度、总面积、总体积、宽深比以及盐沼植被簇团面积与不同分布的簇团之间的关系。随着盐沼植被簇团数量的增加, 同一时刻(即同一条折线上)潮沟的数量、总长度及总面积均呈显著的上升趋势, 且与盐沼植被簇团数量的增加促进了潮沟的发育, 但潮沟的平均宽度及宽深比则与之相反, 表示盐沼植被簇团易造成潮沟分汊, 且随着盐沼植被面积的增大, 盐沼植被

簇团数量越多,潮滩上越易形成又细又密的潮沟,这与野外观测的观点相符^[27]。植被覆盖下的潮沟,由于水流的冲刷作用增大导致潮沟深化,并通过侵蚀源头形成新的、较小的潮沟。盐沼植被簇团数量由1个变为2个时,潮沟的总长度及面积有了显著上升,表示盐沼植被簇团间的水流集中比单个簇团的边缘水流冲刷更易形成潮沟。

对比500个时间步长后I-I断面及II-II断面的局部沿程高程及生物量(图8),潮滩滩面高程的空间变化与盐沼植被簇团分布位置呈现显著的对应关系。由于盐沼植被对泥沙的捕获作用,有盐沼植被生长的

区域滩面略高于无盐沼植被生长的区域。由于植被对水流的阻挡作用,水流在多个盐沼植被簇团之间集中,并在盐沼植被簇团边缘掏蚀泥沙,盐沼簇团边缘及不同簇团之间均有潮沟生成,且潮沟深度超出无盐沼植被生长的潮滩约0.2~0.5 m。更多的盐沼植被簇团不一定产生更深的潮沟,在发育较为成熟的潮沟里,水动力条件以及冲刷程度受到盐沼植被簇团的影响较小,部分较深的潮沟对应的盐沼植被簇团数量不同(图8a)。同时,由于地形与水动力的双向相互作用,未受植被簇团影响的潮沟的位置及断面深度也会存在一些小差异(图8iv)。

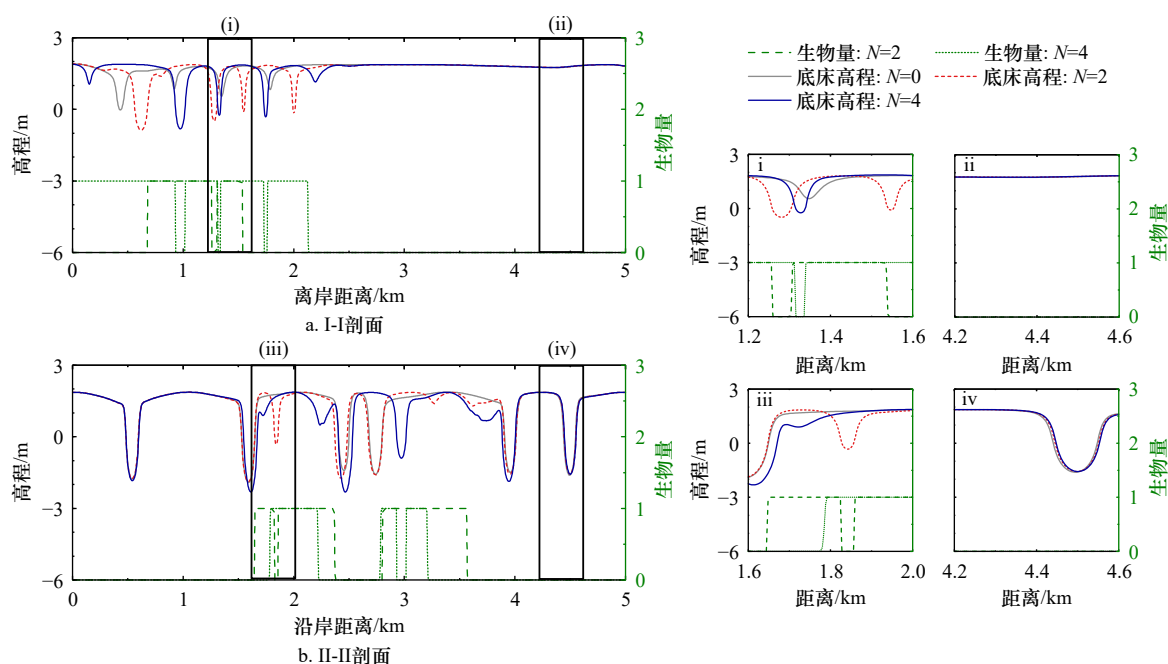


图8 断面高程及生物量图($n_f=500$)

Fig. 8 Cross-sectional elevation and biomass ($n_f=500$)

潮沟系统的发育与盐沼植被簇团的数量及位置有较强的对应关系。每个盐沼植被簇团边缘均有潮沟生成,盐沼植被簇团数量越多,潮沟分叉越显著,潮沟系统的宽深比越小,更易形成又细又密的复杂潮沟系统。野外观测数据验证了这一观点^[22-24, 27]。

3.3 盐沼植被对潮沟系统发育演变的响应

潮沟的发育状况也直接决定了盐沼植被簇团的扩张程度,两者间双向动力反馈机制是潮沟发育的重要环节。前人研究发现潮滩高程是直接决定盐沼植被生存和分布最重要的环境因子之一^[54],而潮沟发育引起的水沙变化是盐沼植被空间格局形成的重要驱动力,决定了其在自然和生态因素下的长期发展和演变^[28-30, 55],远离潮沟区域植被定植率降低^[31]。但由于潮沟内水动力增强,也会抑制盐沼植被的横向扩张^[24]。

对初始数量为4的盐沼植被簇团在100、300、500个时间步长后的潮沟地貌及盐沼植被发育进行重叠对比(图9)。在盐沼植被与潮沟系统共同发育的初期(100个时间步长内),盐沼植被簇团的生长受潮沟的影响作用较小,反之,潮沟的发育受盐沼植被簇团的影响作用较大。随着潮滩泥沙淤积,滩面高程抬高为盐沼植被簇团的生长创造了更好的条件,前缘植被对沉积物的截留增强了沉积物的稳定性,从而使簇团更好的生长扩散。在受潮沟影响较弱区域,较小的簇团可以开始合并成更大的簇团,盐沼植被簇团逐渐连成片。在潮沟断面内水位超出植被临界淹没高度时,潮沟中增加的水深和潮流切应力造成植被死亡,阻止了植被的横向扩张和生长并切割了盐沼植被簇团,直接影响了盐沼植被的空间分布规律。随着时间的推移,

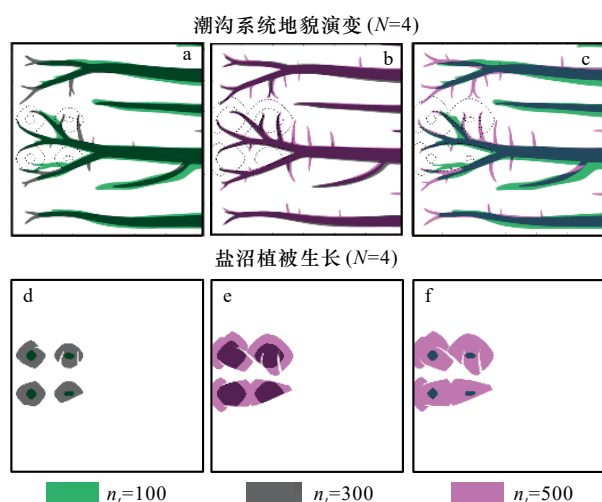


图9 盐沼植被簇团作用下的地形及植被发育过程
Fig. 9 Landform and vegetation development under the action of salt marsh vegetation patches

盐沼植被簇团与潮沟系统相互作用, 最终将改变盐沼植被的空间格局, 形成被主要潮沟切割的盐沼滩。这一发现也进一步验证了其他相关研究^[21, 24, 56-57]。

4 结论

本文通过改变盐沼植被簇团的数量及分布位置, 探讨了盐沼植被簇团与潮沟系统地貌演变的双向反

馈机制, 得到的主要结论如下:

(1) 盐沼植被簇团的存在促进了盐沼植被簇团边缘潮沟系统的发育。这种促进作用在潮沟发育初期更显著, 随着时间的增加, 潮沟内比盐沼簇团边缘更易形成水流汇聚, 地形导致的侵蚀占主导地位, 盐沼簇团对潮沟发育的影响逐渐由促进作用转为稳定作用。

(2) 潮滩滩面高程的空间变化受盐沼植被簇团分布的控制, 潮沟的走向和盐沼植被簇团数量及位置呈现显著的对应关系。盐沼植被簇团边缘易冲刷形成潮沟, 多个盐沼植被簇团间的水流集中比单个簇团的边缘水流冲刷更易形成潮沟。

(3) 盐沼植被的演化也受潮沟发育和演变的影响, 潮沟限制了盐沼植被的横向扩散, 切割盐沼植被簇团, 形成新的植被格局。

本数值模拟研究的结果与潮滩-潮沟系统现场实测吻合, 对认识盐沼潮滩湿地的演变机制并预测其未来演变可提供科学支撑。未来研究中, 可考虑潮滩剖面坡度对潮滩生物地貌的影响, 同时开展室内实验、现场观测与控制试验, 构建不同类型盐沼植被的生物过程与物理过程的相互作用关系式, 研发考虑不同类型盐沼植被和种群竞争下的潮滩演变生物动力地貌模型, 将盐沼潮滩演变从定性向定量层面推进。

参考文献:

- [1] Amos C L. Chapter 10 siliciclastic tidal flats[J]. *Developments in Sedimentology*, 1995, 53: 273-306.
- [2] Friedrichs C T. Tidal flat morphodynamics: a synthesis[J]. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, 2011, 3: 137-170.
- [3] 时钟, Pye K, 陈吉余. 潮滩盐沼物理过程的研究进展综述[J]. *地球科学进展*, 1995, 10(1): 19-30.
Shi Zhong, Pye K, Chen Jiyu. Progress in physical processes on mudflat saltmarsh: an overview[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1995, 10(1): 19-30.
- [4] Temmerman S, Meire P, Bouma T J, et al. Ecosystem-based coastal defence in the face of global change[J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 79-83.
- [5] Leonardi N, Carnacina I, Donatelli C, et al. Dynamic interactions between coastal storms and salt marshes: a review[J]. *Geomorphology*, 2018, 301: 92-107.
- [6] Leonard L A, Luther M E. Flow hydrodynamics in tidal marsh canopies[J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, 40(8): 1474-1484.
- [7] 周曾, 陈雷, 林伟波, 等. 盐沼潮滩生物动力地貌演变研究进展[J]. *水科学进展*, 2021, 32(3): 470-484.
Zhou Zeng, Chen Lei, Lin Weibo, et al. Advances in biogeomorphology of tidal flat-saltmarsh systems[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(3): 470-484.
- [8] 时钟, 杨世伦, 缪莘. 海岸盐沼泥沙过程现场实验研究[J]. *泥沙研究*, 1998(4): 30-37.
Shi Zhong, Yang Shilun, Miao Xin. Coastal saltmarsh sediment processes: a field experimental study[J]. *Journal of Sediment Research*, 1998(4): 30-37.
- [9] 高抒, 杜永芬, 谢文静, 等. 苏沪浙闽海岸互花米草盐沼的环境-生态动力过程研究进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 57(11): 2567-2586.
Gao Shu, Du Yongfen, Xie Wenjing, et al. Environment-ecosystem dynamic processes of *Spartina alterniflora* salt-marshes along the eastern China coastlines[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(11): 2567-2586.
- [10] 杨世伦, 时钟, 赵庆英. 长江口潮沼植物对动力沉积过程的影响[J]. *海洋学报*, 2001, 23(4): 75-80.
Yang Shilun, Shi Zhong, Zhao Qingying. Influence of tidal marsh vegetations on hydrodynamics and sedimentation in the Changjiang Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 2001, 23(4): 75-80.
- [11] Leonard L A, Croft A L. The effect of standing biomass on flow velocity and turbulence in *Spartina alterniflora* canopies[J]. *Estuarine*,

- Coastal and Shelf Science, 2006, 69(3/4): 325–336.
- [12] Shi J Z, Hamilton L J, Wolanski E. Near-bed currents and suspended sediment transport in saltmarsh canopies[J]. *Journal of Coastal Research*, 2000, 16(3): 909–914.
- [13] Evans B R, Möller I, Spencer T, et al. Dynamics of salt marsh margins are related to their three-dimensional functional form[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(9): 1816–1827.
- [14] Allen J R L. Morphodynamics of Holocene salt marshes: a review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(12): 1155–1231.
- [15] 吴德力, 沈永明, 方仁建. 江苏中部海岸潮沟的形态变化特征[J]. *地理学报*, 2013, 68(7): 955–965.
Wu Deli, Shen Yongming, Fang Renjian. A morphological analysis of tidal creek network patterns on the central Jiangsu coast[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 955–965.
- [16] 沈永明, 张忍顺, 王艳红. 互花米草盐沼潮沟地貌特征[J]. *地理研究*, 2003, 22(4): 520–527.
Shen Yongming, Zhang Renshun, Wang Yanhong. The tidal creek character in salt marsh of *Spartina alterniflora* loisel on strong tide coast[J]. *Geographical Research*, 2003, 22(4): 520–527.
- [17] De Vaate I B, Brückner M Z M, Kleinhans M G, et al. On the impact of salt marsh pioneer species-assemblages on the emergence of intertidal channel networks[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(3): e2019WR025942.
- [18] Schwarz C, Ye Qinghua, 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): 385–400.
- [19] 郑宗生, 周云轩, 田波, 等. 植被对潮沟发育影响的遥感研究——以崇明东滩为例[J]. *国土资源遥感*, 2014, 26(3): 117–124.
Zheng Zongsheng, Zhou Yunxuan, Tian Bo, et al. Effects of vegetation on the dynamic of tidal creeks based on quantitative satellite remote sensing: a case study of Dongtan in Chongming[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2014, 26(3): 117–124.
- [20] 刘露雨, 屈凡柱, 栗云召, 等. 黄河三角洲滨海湿地潮沟分布与植被覆盖度的关系[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(6): 1830–1837.
Liu Luyu, Qu Fanzhu, Li Yunzhao, et al. Correlation between creek tidal distribution and vegetation coverage in the Yellow River Delta coastal wetland[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(6): 1830–1837.
- [21] Temmerman S, Bouma T J, Van De Koppel J, et al. Vegetation causes channel erosion in a tidal landscape[J]. *Geology*, 2007, 35(7): 631–634.
- [22] Dai Weiqi, Li Huan, Zhou Zeng, et al. UAV photogrammetry for elevation monitoring of intertidal mudflats[J]. *Journal of Coastal Research*, 2018, 85(10085): 236–240.
- [23] 戴玮琦, 李欢, 龚政, 等. 无人机技术在滩涂地貌演变研究中的应用[J]. *水科学进展*, 2019, 30(3): 359–372.
Dai Weiqi, Li Huan, Gong Zheng, et al. Application of unmanned aerial vehicle technology in geomorphological evolution of tidal flat[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(3): 359–372.
- [24] Dai Weiqi, Li Huan, Chen Xindi, et al. Saltmarsh expansion in response to morphodynamic evolution: field observations in the Jiangsu coast using UAV[J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 95(S1): 433–437.
- [25] Symonds A M, Collins M B. The establishment and degeneration of a temporary creek system in response to managed coastal realignment: the Wash, UK[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32(12): 1783–1796.
- [26] 尹延鸿. 潮沟研究现状及进展[J]. *海洋地质动态*, 1997(7): 1–4.
Yin Yanhong. Status quo and progress in tidal channel[J]. *Marine Geology Letters*, 1997(7): 1–4.
- [27] 侯明行, 刘红玉, 张华兵. 盐城淤泥质滩涂湿地潮沟发育及其对米草扩张的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(2): 400–409.
Hou Mingxing, Liu Hongyu, Zhang Huabing. Effect of tidal creek system on the expansion of the invasive *Spartina* in the coastal wetland of Yancheng[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(2): 400–409.
- [28] 崔保山, 蔡燕子, 谢焯, 等. 湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(6): 738–746.
Cui Baoshan, Cai Yanzi, Xie Tian, et al. Ecological effects of wetland hydrological connectivity: problems and prospects[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2016, 52(6): 738–746.
- [29] Leal L C, Andersen A N, Leal I R. Anthropogenic disturbance reduces seed-dispersal services for myrmecochorous plants in the Brazilian Caatinga[J]. *Oecologia*, 2014, 174(1): 173–181.
- [30] Moffett K B, Gorelick S M. Relating salt marsh pore water geochemistry patterns to vegetation zones and hydrologic influences[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(3): 1729–1745.
- [31] 王青, 骆梦, 邱冬冬, 等. 滨海盐沼水文特征对盐地碱蓬定植过程的影响[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(12): 2569–2579.
Wang Qing, Luo Meng, Qiu Dongdong, et al. Effect of hydrological characteristics on the recruitment of *Suaeda salsa* in coastal salt marshes[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(12): 2569–2579.
- [32] Best Ū 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: 152–166.
- [33] Mariotti G. Beyond marsh drowning: the many faces of marsh loss (and gain)[J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 144: 103710.
- [34] Mariotti G, Murshid S. A 2D tide-averaged model for the long-term evolution of an idealized tidal basin-inlet-delta system[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2018, 6(4): 154.

- [35] Mariotti G. Revisiting salt marsh resilience to sea level rise: are ponds responsible for permanent land loss?[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2016, 121(7): 1391–1407.
- [36] Mariotti G. Marsh channel morphological response to sea level rise and sediment supply[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 209: 89–101.
- [37] Rinaldo A, Fagherazzi S, Lanzoni S, et al. Tidal networks: 3. Landscape-forming discharges and studies in empirical geomorphic relationships[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(12): 3919–3929.
- [38] Di Silvio G, Dall'Angelo C, Bonaldo D, et al. Long-term model of planimetric and bathymetric evolution of a tidal lagoon[J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(8): 894–903.
- [39] Arons A B, Stommel H. A mixing-length theory of tidal flushing[J]. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 1951, 32(3): 419–421.
- [40] Monden M. Modeling the interaction between morphodynamics and vegetation in the Nisqually River Estuary, 2010[D]. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2010.
- [41] Carr J, Mariotti G, Fagherazzi S, et al. Exploring the impacts of seagrass on coupled marsh-tidal flat morphodynamics[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, 6: 92.
- [42] 张长宽, 黄婷婷, 陶建峰, 等. 江苏海岸潮滩剖面形态与动力泥沙响应关系[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(3): 245–251.
Zhang Changkuan, Huang Tingting, Tao Jianfeng, et al. Response relationship of tidal flat profile and dynamic sediment along Jiangsu coast[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2020, 48(3): 245–251.
- [43] Balke T, Bouma T J, Horstman E M, et al. Windows of opportunity: thresholds to mangrove seedling establishment on tidal flats[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2011, 440: 1–9.
- [44] Hu Zhongjian, Ge Zhenming, Ma Qiang, et al. Revegetation of a native species in a newly formed tidal marsh under varying hydrological conditions and planting densities in the Yangtze Estuary[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 83: 354–363.
- [45] Poppema D W, Willemsen P W J M, De Vries M B, et al. Experiment-supported modelling of salt marsh establishment[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2019, 168: 238–250.
- [46] Hu Z, Van Belzen J, Van Der Wal D, et al. Windows of opportunity for salt marsh vegetation establishment on bare tidal flats: the importance of temporal and spatial variability in hydrodynamic forcing[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(7): 1450–1469.
- [47] 张晓祥, 王伟玮, 严长清, 等. 南宋以来江苏海岸带历史海岸线时空演变研究[J]. *地理科学*, 2014, 34(3): 344–351.
Zhang Xiaoxiang, Wang Weiwei, Yan Changqing, et al. Historical coastline spatio-temporal evolution analysis in Jiangsu coastal area during the past 1 000 years[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(3): 344–351.
- [48] 王文昊, 高抒, 徐杨佩云, 等. 江苏中部海岸潮滩沉积速率特征值的数值实验分析[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2014, 50(5): 656–665.
Wang Wenhao, Gao Shu, Xu Yangpeiyun, et al. Numerical experiments for the characteristic deposition rates over the tidal flat, central Jiangsu coast[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2014, 50(5): 656–665.
- [49] 丁海燕. 盐城海岸线30年变迁及海岸带可持续发展路径[J]. *盐城师范学院学报(人文社会科学版)*, 2021, 41(4): 11–20.
Ding Haiyan. Coastline change in the past 30 years and sustainable development path of coastal zone in Yancheng[J]. *Journal of Yancheng Teachers University (Humanities & Social Sciences Edition)*, 2021, 41(4): 11–20.
- [50] Fagherazzi S, Kirwan M L, Mudd S M, et al. Numerical models of salt marsh evolution: ecological, geomorphic, and climatic factors[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(1): RG1002.
- [51] Fagherazzi S, Sun Tao. A stochastic model for the formation of channel networks in tidal marshes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(21): L21503.
- [52] Marani M, Belluco E, Ferrari S, et al. Analysis, synthesis and modelling of high-resolution observations of salt-marsh eco-geomorphological patterns in the Venice lagoon[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 69(3/4): 414–426.
- [53] Geng Liang, Gong Zheng, Lanzoni S, et al. A new method for automatic definition of tidal creek networks[J]. *Journal of Coastal Research*, 2018, 85(S1): 156–160.
- [54] Silvestri S, Defina A, Marani M. Tidal regime, salinity and salt marsh plant zonation[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 62(1/2): 119–130.
- [55] Coco G, Zhou Zeng, Van Maanen B, et al. Morphodynamics of tidal networks: advances and challenges[J]. *Marine Geology*, 2013, 346: 1–16.
- [56] Wang Chen, Temmerman S. Does biogeomorphic feedback lead to abrupt shifts between alternative landscape states?: An empirical study on intertidal flats and marshes[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, 118(1): 229–240.
- [57] Taramelli A, Valentini E, Cornacchia L, et al. Indications of dynamic effects on scaling relationships between channel sinuosity and vegetation patch size across a salt marsh platform[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2018, 123(10): 2714–2731.

Interaction between marginal salt marsh patches and tidal channel evolution on tidal flats

Zhang Rongcheng¹, Zhang Xiaotian¹, Cao Haobing¹, Li Shouqian², Lu Yan², Lu Yongjun², Zhou Zeng^{1,3}

(1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 3. *Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Marginal salt marsh patches play a crucial role in the morphological evolution of salt marsh-tidal flat systems by dissipating hydrodynamics and stabilizing sediment, and the tidal channel can also influence the growth, expansion and erosion of the salt marsh patches. However, the interactions between saltmarsh patch expansion and tidal channel formation are complex and poorly understood. In the study, we established a two-dimensional bi-morphodynamic model and introduced a dynamic vegetation module to simulate the spatial-temporal distribution of saltmarsh patches and the geomorphic evolution of the tidal channel system. We explored the two-way feedback between the spatial patterns of the tidal trench system and salt marsh vegetation patches with different initial numbers. Model results showed that the tidal channel extended rapidly to both sides of the sea and land at first, and then developed a large number of creeks, and the salt marsh patches expanded to the periphery and gradually formed a large patch. Besides, the presence of marsh patches can increase the density of tidal channels and promote the development of tidal channels. Further, the orientation of tidal channels was affected by the spatial distribution of marsh patches, which can divert water flow and induce the concentration of tidal flow. Specially, in the early stage of salt-marsh evolution, more tidal channels were formed by the interactions between hydrodynamics and sediment motion with the increase of marsh patch numbers, and in the later stage, the influence of salt marsh clusters gradually changed from promotion to stabilization. However, the expansion and the spatial distribution pattern of salt marsh patches was later limited by the formation of tidal channels reciprocally. Our study extended current understanding of the mechanisms underlying the co-evolution of marsh patches and tidal channels, and can provide scientific basis for future works on coastal protection and restoration.

Key words: tidal channel system; salt marsh vegetation patches; numerical simulation; landform evolution