

# 滨海盐沼水文特征对盐地碱蓬定植过程的影响

王青, 骆梦, 邱冬冬, 谢滢, 施伟, 崔保山

(北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 为了揭示盐沼水文特征对植物定植的影响, 选择黄河三角洲滨海盐沼无植被、具有一定水文梯度的区域, 通过定点监测和野外控制实验展开研究。结果表明: (1) 潮沟作为盐沼潮水的主要源汇通道, 高程和水文特征在垂直潮沟方向上发生显著变化; 在时间上, 盐沼表面潮汐过程存在干湿季特点; 在空间上, 淹水频率和淹水时长随高程增加而降低。(2) 土壤水盐特征与水文特征相关性不高, 但趋势显著: 盐度随着距潮沟距离的增加呈上升趋势, 含水率则相反。(3) 盐地碱蓬(*Suaeda salsa*) 种子捕捉量、萌发率和幼苗存活率随距潮沟距离增加而下降, 远离潮沟区域由于种子到达概率较低、萌发和生长条件较差, 降低了植物成功定植的概率。

**关键词:** 滨海盐沼; 定植过程; 潮汐水文特征; 盐地碱蓬; 黄河三角洲

滨海盐沼是处于海洋和陆地两大生态系统的过渡地区, 规则地或不规则地被海洋潮汐淹没, 具有较高草本或低灌木植被覆盖度的一种湿地生态系统<sup>[1-3]</sup>。从盐沼的定义来看, 周期性地被潮汐淹没和植被覆盖是滨海盐沼的典型特征。滨海盐沼湿地提供了十分重要的生态系统服务功能, 除了提供较高的生物多样性<sup>[4]</sup>和初级生产力<sup>[5]</sup>外, 更为重要的是通过削减波浪、稳固岸线加强了对岸线的保护<sup>[6-7]</sup>。一方面, 盐沼植物通过降低潮流流速和波浪能量减缓了极端潮汐事件(如风暴潮)对海岸的侵蚀和破坏; 另一方面, 盐沼植物创造了有利于泥沙沉降的条件, 加速沉积, 提高潮滩高程, 这对于应对全球气候变暖导致的海平面上升具有重要意义<sup>[8]</sup>。因此, 保护和修复滨海盐沼湿地, 特别是盐沼植被, 是应对气候变化带来的负面效应的关键措施之一。明晰湿地水文过程对盐沼植物定植的影响对于保护和修复盐沼植被具有重要意义。

水文过程是湿地的基本特征之一<sup>[9]</sup>。在海洋潮汐周期性或间歇性作用下, 滨海盐沼植被处于水文急剧变化的动态环境之中, 受水文环境的影响十分显著<sup>[10]</sup>。普遍认为, 潮汐淹水可通过对土壤透气性和化学特征的改变而影响盐沼植物生长<sup>[10-11]</sup>。在涨潮时段, 特别是大潮期间, 盐沼植物通常会被海水部分乃至全部淹没数小时。频繁淹水导致盐沼土壤中被消耗掉的氧气无法得到补充, 进而形成土壤缺氧<sup>[10]</sup>。除了造成缺氧土壤环境外, 频繁淹水还会导致土壤中其他影响植物生长的化合物和离子的富集, 包括 CO<sub>2</sub>、乙烯、S<sup>2-</sup>等<sup>[11-13]</sup>。潮汐淹水还会使植物地上部分在低 CO<sub>2</sub>、低光照环境下无法进行光合作用, 从而会进一步降低植物体内可利用 O<sub>2</sub> 的含量<sup>[11]</sup>。

收稿日期: 2019-04-07; 修订日期: 2019-07-10

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0404505); 国家自然科学基金项目(51639001, 51721093)

作者简介: 王青(1989-), 女, 安徽铜陵人, 博士, 主要从事湿地生态过程与环境响应研究。

E-mail: wqing59@126.com

通讯作者: 崔保山(1967-), 男, 河北涿源人, 博士, 教授, 主要从事湿地生态过程与环境响应研究。

E-mail: cuibsb@bnu.edu.cn

由于潮汐运动、潮滩地貌及其相互作用的复杂性,潮滩上的水文过程具有更高的变异性。除了高程梯度的影响,微地形<sup>[14]</sup>、植被<sup>[15]</sup>等特征也影响了潮滩上的水文过程。因此,盐沼中不同位置呈现出不同的水文特征,表现为不同的淹水频率、水位和持续时间,进而对盐沼植物的生长和分布产生了不同影响。有研究发现,潮汐频率、潮差、淹水时长等潮汐指标均与盐沼植物的分布和丰富度等相关,但不同指标的作用不尽相同<sup>[16]</sup>。淹水深度和淹水时长取决于植物相对于平均海平面的高度<sup>[11,17-18]</sup>。Long<sup>[1]</sup>在所著《Saltmarsh Ecology》一书中对盐沼进行了划分,低潮滩盐沼是指位于平均小潮高潮位(MHWN)和平均高潮位(MHW)之间的部分;中潮滩盐沼是指位于平均高潮位和平均大潮高潮位(MHWS)之间的部分;高潮滩盐沼是指平均大潮高潮位以上的部分。在低潮滩地区,潮汐频率和淹水时长一般均高于高潮滩地区。其次,潮汐对植物产生的影响也会因时间(如植物生活史阶段、季节等)的不同而不同<sup>[10,19-20]</sup>。此外,潮汐对植物的影响具有种间特异性和基因型特异性<sup>[21]</sup>。潮汐通过影响植物生长发育而影响盐沼中植物群落的结构和盐沼植物分布等<sup>[10-11,18]</sup>。

为了明晰滨海盐沼水文过程对盐沼植物定植的影响机制,本文以黄河三角洲滨海盐沼湿地为研究区,以中国北方分布最广、最普遍的盐生植物盐地碱蓬为研究对象,探讨不同水文特征对其定植的影响。由于盐地碱蓬为一年生草本植物,其定植受潮汐水文过程的影响极大,从种子扩散、种子固定、幼苗萌发到生长,潮汐水文过程对其定植起到了决定性的作用。目前,人们普遍关注水盐条件对盐地碱蓬生长的影响,对不同水文特征下盐地碱蓬定植过程的了解仍较为缺乏。本文根据盐沼实际水文过程,设置不同的淹水频率、水位、持续时间条件,对不同水文条件下的盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)种子萌发和幼苗生长过程进行研究,为盐地碱蓬群落的修复和保护提供依据。

## 1 研究方法数据来源

### 1.1 研究区概况

研究区位于中国山东省东营市黄河入海口的黄河三角洲国家级自然保护区(37°40′~38°10′N, 118°41′~119°16′E)。保护区总面积15.3万hm<sup>2</sup>,是中国乃至世界上最年轻的陆地,保存着中国暖温带地区最广阔、最完整、最年轻的湿地生态系统<sup>[22]</sup>。潮汐为不规则半日潮,平均大潮潮差为1.06~1.78 m,平均小潮潮汐振幅潮差为0.46~0.78 m<sup>[23]</sup>。年平均降水量为592.2 mm,年均蒸发量为1962 mm<sup>[22]</sup>。滨海盐沼区植物种类较为单一,由海向陆呈带状分布,依次为互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel.)、盐地碱蓬、怪柳(*Tamarix chinensis* Lour.)、芦苇(*Phragmites australis*)群落<sup>[24-25]</sup>。其中,盐地碱蓬群落跨度最大,从低潮滩到高潮带一直有分布,是黄河三角洲滨海盐沼湿地的先锋种和建群种<sup>[22]</sup>。

### 1.2 野外控制实验

为研究水文过程对盐地碱蓬定植的影响,选择黄河口北岸盐沼中的无植被区域进行盐地碱蓬的萌发和生长实验(图1)。为了设置不同的水文梯度,选择有潮沟经过的开放裸斑作为实验区,在潮沟两侧的裸斑上各布设3条垂直于潮沟断面的样线,共6条样线;并在距潮沟不同距离处设置样点,每条样线设置8个样点。

为了解每个样点的土壤特征,特别是盐度和含水率,在每个点位使用环刀进行采样,每个点位3个重复。每个土样为深5 cm直径5.05 cm的标准环刀土样。每个土样称

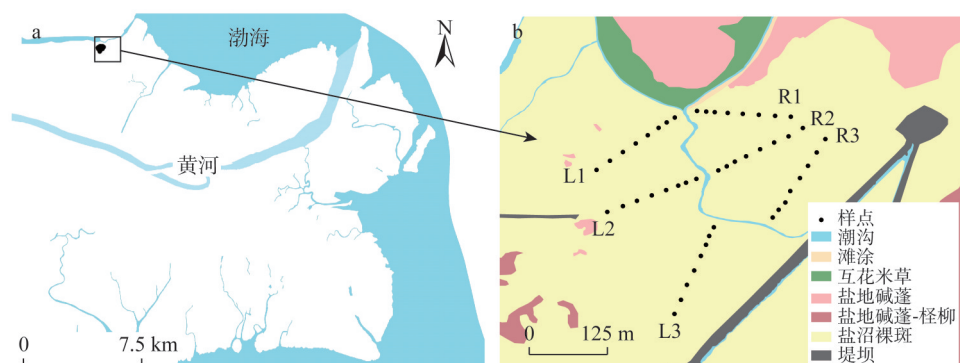


图1 研究区位置和样点样线布设

Fig. 1 Location of the study area and design of sampling points

重之后于60℃下烘干48小时,采用烘干法来测定土壤含水率<sup>[22]</sup>。取部分烘干的土壤样品进行研磨,过20目筛,将土样和去离子水以1:5的比例混合,将样品进行振荡处理,使二者混合均匀后,静置3小时后利用盐度计(HANNA 910,美国)测量上清液的浸出盐度<sup>[22]</sup>。

为了记录研究区的潮汐水文特征,利用Odyssey Water Level Loggers(Z412, New Zealand)水位计对盐沼裸斑表面的潮汐淹水过程进行了长期监测,揭示盐沼表面的淹水特征。高程采用中海达V9高程测量装置测得。

水位计设置在垂直样线所在潮沟段附近,设置点高程为0.75 m。由于所使用水位计为电容式水位计,其记录的水位高度即从探头到被淹没的电容线位置的距离,因此,水位计必须垂直于滩面放置,探头与滩面接触。本文利用直径为6 cm的PVC管放置水位计。PVC管总长2 m,埋入地下50 cm用以固定。PVC管滩面以上部分设置若干孔洞,便于水流通过淹没水位计探头。为了防止泥沙对测量的影响,PVC管外包裹两层孔径小于1 mm的细纱网。将校准并开启后的水位计放置在PVC管道内,探头与滩面接触,保持电容线垂直。水位计上端记录部分固定在PVC管顶端,并进行防水处理。水位计设置记录时间间隔为10 min,每两个月取回读数。

### 1.2.1 种子萌发实验

为了了解潮汐梯度上种子萌发过程的差异,本研究利用种子添加实验对不同潮汐梯度下萌发条件进行了检测。于2016年3月在每个点位埋设一个深度为7.5 cm、直径为7.5 cm的薄皮塑料花盆,外与裸斑表面齐平。每个样点3个重复( $N=144$ )。用裸斑表层土壤放入花盆内,并在深度为1 cm处均匀撒入50粒去年从附近盐沼收集来的盐地碱蓬种子。为了防止外来种子的影响,在坑洞外设置一个高15 cm、直径10 cm的铁丝笼,铁丝笼外围用孔径小于1 mm的细纱网覆盖。于2016年4-5月对萌发结果进行测定。

### 1.2.2 幼苗存活实验

为了对幼苗生长阶段的存活情况进行了解,本研究采用幼苗移植实验对不同潮汐梯度下的存活条件进行了检测。于2016年4月对附近盐沼的盐地碱蓬幼苗进行采集,采集过程中利用直径为10 cm的PVC管对幼苗进行原状土移植,将带原状土的盐地碱蓬幼苗连同PVC管一同埋入实验点位,保证原状土表面与裸斑表面齐平。每个样点3个重复

( $N=144$ )。移植过程中选择长势一致、高度约为5 cm的幼苗进行移植, 保证每个PVC管内的幼苗数在20~30之间。为了缓解移栽胁迫, 在移植后的一周内每隔2~3天进行淡水浇灌<sup>[22]</sup>。每个月对移栽幼苗数目进行记录, 直至2016年9月。

### 1.3 数据分析

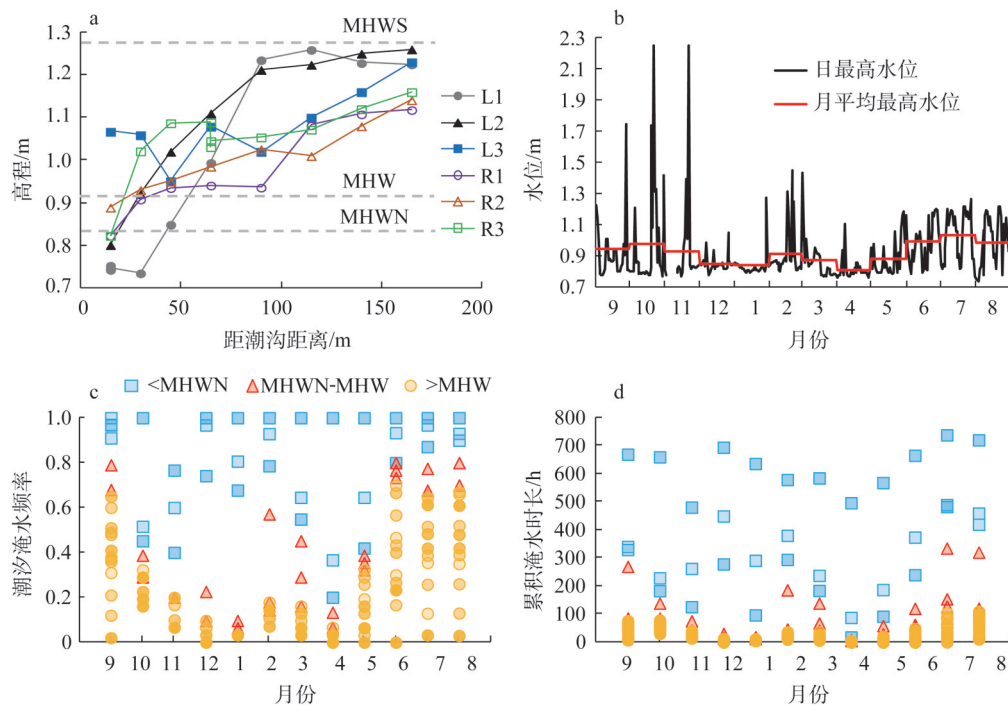
取回的水位计利用水位计管理软件取得读数后, 利用设定时的校准曲线(一次方程, 即信号与水深之间的关系)将信号转换为水深数据, 再加上水位计安置处的高程, 即得到滩上的水位数据。由于数据量较大, 本研究采用Fortran 6.5对水位数据进行统计, 得到研究区的潮汐水文特征。其中, 潮汐频率以统计时段内潮汐到达的天数比上统计时段总天数计; 累积淹水时长以统计时段内的总淹水小时数计, 平均日淹水时长以累积淹水时长除以统计时段内潮汐到达总天数计; 平均最大水深以每天的最高水位减去点位高程统计得到。

利用拟合曲线分析水文特征与高程之间的变化关系, 及水文特征与土壤条件、盐地碱蓬定植过程之间的变化关系。

## 2 结果分析

### 2.1 盐沼表面水文特征

盐沼地表高程梯度变化较小, 垂直于潮沟样线上的样点高程随距潮沟距离增加呈上升趋势, 6条样线高程分布在0.7~1.3 m之间(图2a), 基本位于平均小潮高潮位(MH-



注: a为样点高程, b为水位计记录潮汐水位特征, c为实验点位潮汐淹水频率的时间分布, d为实验点位累积淹水时长的时间分布; MHWN为平均小潮高潮位, MHW为平均高潮位。

图2 研究区样点高程和水文特征在时间尺度上的变化趋势

Fig. 2 Variation trends of elevation and hydrological characteristics of sampling points on temporal scale



WN) 到平均大潮高潮位 (MHWS) 之间。本文设置的垂直潮沟样线点位基本横跨了低、中位盐沼。与降水特征类似, 潮汐淹水在时间上也存在干湿季特征。实验期间, 10 月和 11 月都经历了最大潮, 最高水位超过了 2 m; 从月平均最高水位来看, 最高水位从 11 月开始降低, 12 月、1 月、4 月达最低, 并于 5 月开始逐渐升高 (图 2b)。盐沼表面, 低于平均小潮高潮位 (MHWN) 的样点在时间尺度上变异较小, 低、中位盐沼样点从 10 月开始, 淹水频率和时间逐渐减小, 直到第二年的 5 月开始逐渐增加 (图 2c、图 2d)。

潮汐淹水特征在高程梯度上变化显著。淹水频率随着高程的增加而降低 (图 3a), 呈指数下降趋势。各样点的平均最大淹水水深在 0.1~0.3 m 之间, 与淹水频率不同, 最大淹水水深随着高程的增加呈二次曲线关系, 高程在 0.9~1.1 m 之间的样点具有较高的最大淹水水深 (图 3b)。来潮日的平均日淹水时间与淹水频率类似, 随着高程的增加呈下降趋势 (图 3c), 平均日淹水时间跨度较大, 在 2~21 h 之间, 但是 95.83% 的点位日淹水时间低于 12 h。

2.2 土壤水盐特征在水文梯度上的变化

土壤水盐条件是影响植物生长分布的重要环节因子, 特别是在滨海盐沼湿地中。根据崔保山等<sup>[26]</sup>、Xie 等<sup>[27]</sup>的研究结果, 该区域的土壤盐度在 12 ppt 以下, 在盐地碱蓬生长的阈值范围以内; 土壤含水率在 17%~31% 之间, 变异性较大, 也在盐地碱蓬生长阈值范围以内。相关性分析表明 (表 1), 土壤盐度与水文梯度显著相关,

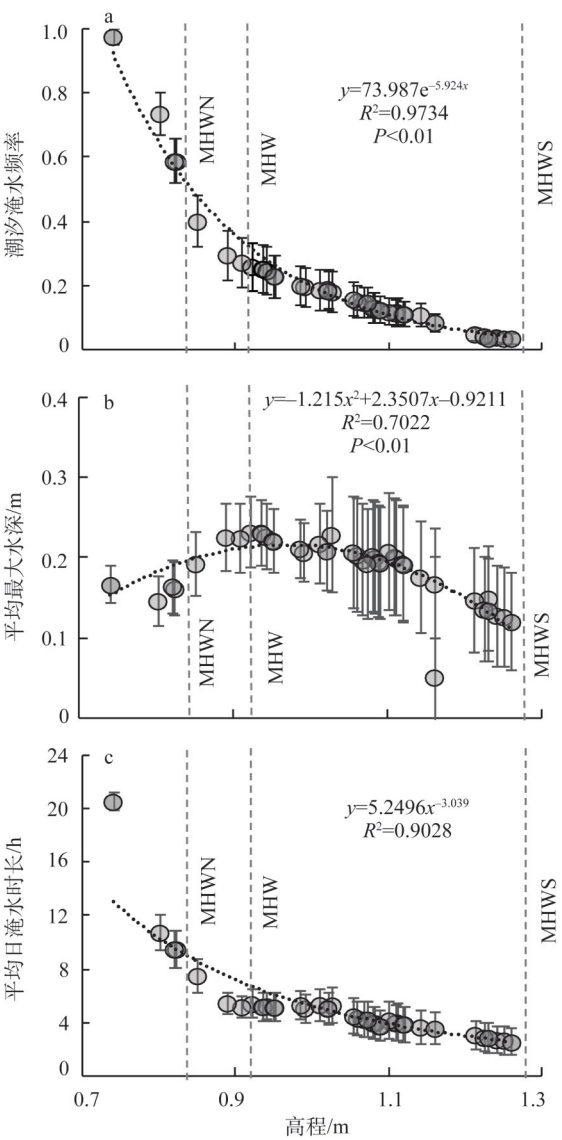


图3 研究区样点月尺度水文特征在高程梯度上的变化趋势

Fig. 3 Variation trends of monthly hydrological characteristics on the gradient of elevation

表1 土壤盐度和含水率与高程和水文梯度的相关性

Table 1 Correlation of soil salinity, moisture content and elevation, hydrological gradient

	高程	距离	频率	水深	淹水时长
土壤盐度	0.239	0.36*	-0.337*	0.126	-0.316*
土壤含水率	-0.532**	-0.668**	0.554**	0.077	0.471**

注: “、\*”分别表示相关性在0.01、0.05水平上显著 (双侧)。

但相关度较低;土壤含水率与高程和水文梯度均显著相关,相关度高于盐度。随着距潮沟距离的增加(图4),土壤盐度呈上升趋势,含水率呈下降趋势。土壤盐度和含水率的相关性分析表明,二者具有显著的负相关关系( $R^2=-0.618^{**}$ )。

### 2.3 盐沼表面水文特征对盐地碱蓬定植过程的影响

在垂直潮沟方向上,盐地碱蓬种子捕捉量呈指数下降趋势,在90 m以后种子捕捉量趋于稳定,均在50个以下(图5a)。盐地碱蓬种子萌发率随着距潮沟距离的增加也呈下降趋势(图5b)。与种子捕捉量不同的是,除距离为15 m处的种子萌发率高于20%以外,15 m以后各处的种子萌发率均处于较低水平,且差异不大;此外,不同样线断面上

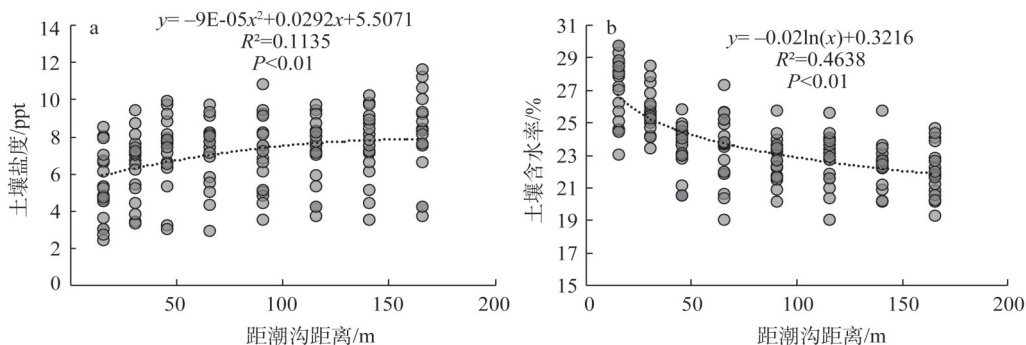


图4 土壤盐度和含水率在垂直潮沟样线上的变化趋势

Fig. 4 Trends of soil salinity and moisture content on the sampling lines

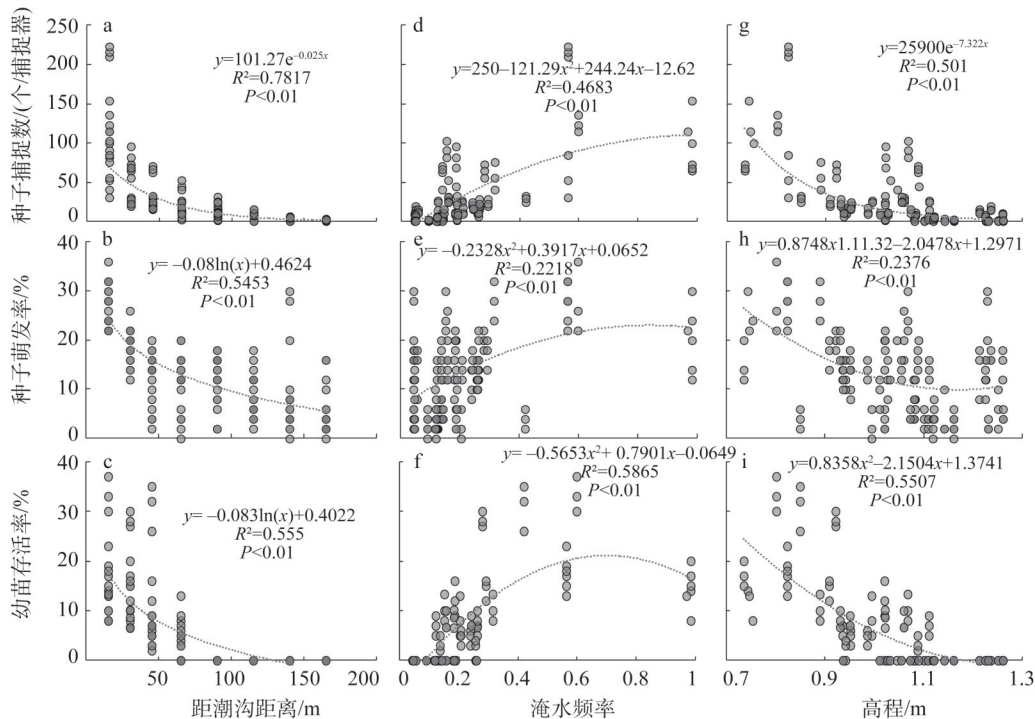


图5 水文特征对盐地碱蓬定植过程的影响

Fig. 5 Effect of hydrological characteristics on the recruitment of *Suaeda salsa*

的种子萌发率变异性较大。盐地碱蓬幼苗的存活率与种子捕捉量的规律类似,且在距离梯度上的差异性更大:在65 m以前,幼苗存活率虽处于较低水平但仍有幼苗存活;在65 m以后,几乎没有幼苗存活。从淹水频率上看,种子捕捉量和萌发率随淹水频率增加呈上升趋势(图5d、图5e),但相关度均低于距潮沟距离;幼苗存活率则先增加后降低,在淹水频率0.3~0.6间具有较高存活率,且与淹水频率的相关度高于距潮沟距离(图5f)。从高程上看,种子捕捉量、萌发率和存活率均随着高程增加而降低,与随距潮沟距离增加而降低的规律类似,但相关度低于距潮沟距离(图5g~图5i)。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

通过实证研究揭示了盐沼表面的水文特征及其对盐地碱蓬定植过程的影响。盐沼表面水文特征与地表高程关系紧密,因此高程梯度可以用来表征地表的水文梯度。时间上,盐沼表面水文特征有干湿季之分;空间上,接近潮沟区域高程越低,淹水频率较高、时长较长,具有较高的种子到达量、萌发率和幼苗存活率,有利于盐地碱蓬定植,但淹水频率太高的区域不利于幼苗存活;而远离潮沟的区域受水文条件的制约会对盐地碱蓬的定植产生不利影响。因此在对盐沼湿地的管理和修复中,需要分阶段、分区域考虑水文条件对定植的影响。

#### 3.2 讨论

植物定植是生态系统中最重要生态过程之一,生态系统存在、维持、并发挥功能的基础<sup>[28]</sup>。对于滨海盐沼来说,盐沼植被还起到了重要的防护作用,并减缓了气候变化带来的负面影响(如应对海平面上升、极端气候事件)<sup>[29-30]</sup>。因此,植物定植一直是生态修复和保护的重点关注对象。盐地碱蓬作为中国北方滨海湿地分布最广、最普遍的本地种,一直是滨海盐沼湿地保护和修复的重要对象。作为一年生草本植物,盐地碱蓬群落每年都要经历种子扩散、着陆、萌发、幼苗生长、成熟、种子降落的过程,然后再进入下一年的定植过程,周而复始,因此特别依赖于上一年的群落分布和生长及种子扩散格局。与多年生植物相比,盐地碱蓬群落分布具有更强的随机性,其定植过程更受盐沼水文条件的制约。对水文条件的高度依赖性和盐沼表面水文过程的复杂性、不确定性和变异性,增加了对盐地碱蓬群落定居和分布预测的难度,进而影响了对滨海湿地管理和修复的难度。因此,本研究通过对滨海盐沼表面水文特征的监测和野外定点实验,揭示水文特征对盐地碱蓬定植过程的影响,以期为中国滨海盐沼湿地的管理和修复提供依据和基础。

滨海盐沼由于水文条件急剧变化、地表高程差异小,为盐沼表面水文特征的研究带来了难度,更是缺乏高精度的水文、地形等基础资料。本研究通过小范围内的高程测量和水文监测,在一定程度上揭示了盐沼表面的水文特征。通常,盐沼表面高程会随着距潮沟距离的增加而增加,因此在垂直潮沟方向上会呈现一定的高程和水文梯度,这也是大多数实证研究设置梯度的依据<sup>[31]</sup>。与其他降雨补给、地下水补给湿地(如河流、湖泊)一样,盐沼表面水文特征也呈现出干湿季的特点,表现为淹水频率、水位、淹水时长在11月到次年4月之间处于较低水平,并从5月开始逐渐增加。从盐地碱蓬的生命周期角度来看,干期位于种子扩散中、后期和萌发前期。对于种子扩散来说,潮汐运动是

其主要驱动,其扩散格局更依赖于偶尔的高潮位潮汐事件<sup>[33-34]</sup>。高潮位的潮汐时间(如风暴潮)对种子扩散的意义更大,会将种子运输到更远的地方<sup>[33-34]</sup>。种子随潮汐到达某处后,就进入休眠期,等到条件合适时再萌发。在休眠期间,如果没有潮汐扰动,种子会一直停在某处直至萌发。因此,即使位于干期,也不会对种子扩散产生制约。盐地碱蓬的种子萌发可以从3月持续到6月,一旦水盐、温度条件合适就会萌发<sup>[35]</sup>。干期的水分条件会对种子萌发产生一定的制约,但是未萌发的种子依然可以等到湿季继续萌发。

从空间上看,虽然盐沼表面的高程差较小,但是很小的高程差就会引起水文条件的巨大变化,这与多数研究相符<sup>[31-32]</sup>,即随着高程的增加,淹水频率和淹水时长会显著下降,在高于平均高潮位的点后趋于平缓。因此,高程越低的点位水文环境变动越剧烈。对于平均最大淹水深度来说,在同一水位下,高程越高的点淹水深度越小。但是不同高程点位经历的淹水频率不同,高程低的点位经历了更多的低水位淹水事件,因而从平均淹水深度来看,盐沼表面的平均最大淹水深度差异不大。因此,相较于淹水深度来说,淹水频率和淹水时长随高程的变化更为敏感,也是最为显著的水文指标。

潮汐水文特征对土壤水盐条件有影响,但不是唯一因素<sup>[36]</sup>。土壤水盐条件是系统水循环和物质运移的综合体现<sup>[36]</sup>。土壤中的水分和盐度来源于潮汐,但是除了潮汐过程,土壤水还面临着垂向的蒸散发和地下水过程,以及横向的水分运动过程<sup>[36]</sup>。因而,单一的潮汐水文指标,包括高程或位置指标都无法精确描述土壤水盐特征,仅表现出一定的变化趋势,即在高程增加、淹水频率降低、距潮沟距离增加的梯度上表现含水率降低、盐度增加的趋势,这也与大多数描述盐沼土壤水盐规律的研究相符<sup>[32, 36]</sup>。从土壤水盐对植物生长胁迫的角度来说,高盐、低水分条件不利于植物的生长,但如果胁迫程度在植物生长阈值以内,水盐胁迫的负面影响有限,并不会制约植物定植。

由于潮汐是种子扩散的主要驱动力,因此高程越低的位置潮汐到达的概率越高,可能携带种子到达的概率也相应较高。对于种子来说,能够到达并不一定意味着能够停留在某地<sup>[34]</sup>。研究中的种子捕捉器能够提高种子被截留的概率,所以虽然在高程较低、淹水频率较高的点位种子捕捉量较大,但并不意味着实际中到达的种子都能保留在该处。此外,与淹水频率和高程相比,本研究中距潮沟距离对种子捕捉量具有更高的拟合度,说明种子扩散还与距种子源距离有关<sup>[37]</sup>。许多研究表明,距种子源距离越近,种子达到的概率越高<sup>[37]</sup>。由于实验区并无植被,无法提供本地种子源,因此到达的种子完全依赖于潮汐携带。因此,在局部尺度上潮沟可以看作种子源,因而距潮沟距离可以更好描述种子到达情况。

在盐沼表面,只要条件合适种子可以很快萌发,因此较长周期的水文过程对于萌发来说并不敏感。相反,种子萌发与土壤水盐条件的联系更为紧密,因此也表现出与土壤水盐条件联系最为紧密的距潮沟距离关系更为密切,即低盐高水分条件最有利于种子萌发。在幼苗生长阶段,幼苗的存活率与水文过程的联系加强。与种子萌发相比,生长阶段植物对土壤水盐胁迫的忍耐力增强<sup>[27, 31]</sup>,但更易受淹水的影响。淹水频率太低会产生干旱、高盐胁迫,而淹水频率太高、淹水时间过长又会对植物产生缺氧胁迫<sup>[31]</sup>,两种情况都会造成植物的死亡。

综上,植物定植各阶段都会受到盐沼表面水文过程的影响,但影响的程度存在差异,如种子萌发就对土壤水盐条件更加敏感。而植物的成功定植必须突破每一阶段的限



制。综合来看,盐沼表面的水文过程对于盐地碱蓬定植是必需的。与水文梯度相对应,远离潮沟的区域的低种子到达率、萌发率和幼苗存活率会对定植产生一定的影响;接近潮沟的区域具有较高的种子到达率、萌发率和幼苗存活率,适宜盐地碱蓬定植,但过高的淹水频率会对幼苗存活产生制约。除了水文条件外,还有其他影响定植的因素,如种子截留、植食等。因此,本文仅从地表水文影响角度揭示了适宜盐地碱蓬定植的区域,在实际中需要综合考虑地形、植食等其他因素对定植的影响。

### 参考文献(References):

- [1] LONG S P, MASON C F. Saltmarsh Ecology. Bishopbriggs, Glasgow: Blackie & Son Limited, 1983.
- [2] 时钟, PYE K, 陈吉余. 潮滩盐沼物理过程的研究进展综述. 地球科学进展, 1995, 10(1): 19-30. [SHI Z, PYE K, CHEN J Y. Progress in physical process on mudflat saltmarsh: A review. Advance in Earth Science, 1995, 10(1): 19-30.]
- [3] VERNBERG F J. Salt-marsh processes: A review. Environmental Toxicology and Chemistry, 1993, 12(12): 2167-2193.
- [4] GEDAN K B, SILLIMAN B R, BERTNESS M D. Centuries of human-driven change in salt marsh ecosystems. Annual Review of Marine Science, 2009, 1: 117-141.
- [5] MITSCH W J, GOSSELINK J G. Wetlands. 3<sup>rd</sup> ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2000.
- [6] D'ALPAOS A. The mutual influence of biotic and abiotic components on the long-term ecomorphodynamic evolution of salt-marsh ecosystems. Geomorphology, 2011, 126: 269-278.
- [7] MOLLER I, KUDELLA M, RUPPRECHT F, et al. Wave attenuation over coastal salt marshes under storm surge conditions. Nature Geoscience, 2014, 7: 727-731.
- [8] NICHOLLS R J, WONG P P, BURKETT V R, et al. Coastal systems and low-lying areas. In: PARRY M L, CANZIANI O F, PALUTIKOF J P, et al. (eds.). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [9] 崔保山, 杨志峰. 湿地学. 北京: 北京师范大学出版社, 2006. [CUI B S, YANG Z F. Wetlands. Beijing: Beijing Normal University Press, 2006.]
- [10] ADAM P. Saltmarsh Ecology. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [11] COLMER T D, FLOWERS T J. Flooding tolerance in halophytes. New Phytologist, 2008, 179(4): 964-974.
- [12] KEDDY P A. Wetland Ecology: Principles and Conservation. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [13] BRINKMAN R, VAN DIEPEN C A. Mineral soils. In: PATTEN B C, ed. Wetlands and Shallow Continental Water Bodies. Vol. 1. Natural and Human Relationships. Hague, The Netherlands: SPB Academic Publishing, 1990: 37-59.
- [14] COURTWRIGHT J, FINDLAY S E G. Effects of microtopography on hydrology, physicochemistry, and vegetation in a tidal swamp of the Hudson River. Wetlands, 2011, 31: 239-249.
- [15] BOUMA T J, DE VRIES M B, LOW E, et al. Flow hydrodynamics on a mudflat and in salt marsh vegetation: Identifying general relationships for habitat characterisations. Hydrobiologia, 2005, 540: 259-274.
- [16] CASANOVA M T, BROCK M A. How do depth, duration and frequency of flooding influence the establishment of wetland plant communities?. Plant Ecology, 2000, 147(2): 237-250.
- [17] SILVESTRI S, DEFINA A, MARANI M. Tidal regime, salinity and salt marsh plant zonation. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2005, 62(1-2): 119-130.
- [18] ARMSTRONG W, WRIGHT E J, LYTHER S, et al. Plant zonation and the effects of the springneap tidal cycle on soil aeration in a Humber salt marsh. Journal of Ecology, 1985, 73(1): 323-339.
- [19] ROBERTSON A, BACON P, HEAGNEY G. The responses of floodplain primary production to flood frequency and timing. Journal of Applied Ecology, 2001, 38(1): 126-136.
- [20] KOZLOWSKI T. Plant responses to flooding of soil. Bioscience, 1984, 34(3): 162-167.
- [21] VOESENEK L, COLMER T, PIERIK R, et al. How plants cope with complete submergence. New Phytologist, 2006, 170(2): 213-226.
- [22] 贺强. 黄河口盐沼植物群落的上行、种间和下行控制因子. 上海: 上海交通大学, 2012. [HE Q. Bottom-up, interspe-

- cific and top-down determinants of plant communities in salt marshes in the Yellow River Estuary. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University. 2012.]
- [23] 赵延茂, 宋朝枢. 黄河三角洲自然保护区科学考察集. 北京: 中国林业出版社, 1995. [ZHAO Y M, SONG C S. Scientific Report of Yellow River Delta Natural Reserve. Beijing: China Forestry Publishing House, 1995.]
- [24] CUI B S, HE Q, AN Y. Community structure and abiotic determinants of salt marsh plant zonation vary across topographic gradients. *Estuaries and Coasts*, 2011, 34: 459-469.
- [25] CUI B S, HE Q, ZHANG K J, et al. Determinants of annual-perennial plant zonation across a salt-fresh marsh interface: A multistage assessment. *Oecologia*, 2011, 166: 1067-1075.
- [26] 崔保山, 贺强, 赵欣胜. 水盐环境梯度下翅碱蓬的生态阈值. *生态学报*, 2008, 28(4): 1408-1418. [CUI B S, HE Q, ZHAO X S. Researches on the ecological thresholds of *Suaeda salsa* to the environmental gradients of water table depth and soil salinity. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1408-1418.]
- [27] XIE T, CUI B S, LI S Z. Analysing how plants in coastal wetlands respond to varying tidal regimes throughout their life cycles. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 123: 113-121.
- [28] FRIESS D A, KRAUSS K W, HORSTMAN E M, et al. Are all intertidal wetlands naturally created equal? Bottlenecks, thresholds and knowledge gaps to mangrove and saltmarsh ecosystems. *Biological Reviews*, 2012, 87: 346-366.
- [29] DEEGAN L A, JOHNSON D S, WARREN R S, et al. Coastal eutrophication as a driver of salt marsh loss. *Nature*, 2012, 490: 388-392.
- [30] DOBSON A P, BRADSHAW A D, BAKER A J M. Hopes for the future: Restoration ecology and conservation biology. *Science*, 1997, 227: 515-522.
- [31] FRAAIJE R G A, TER BRAAK C J F, VERDUYN B, et al. Early plant recruitment stages set the template for the development of vegetation patterns along a hydrological gradient. *Functional Ecology*, 2015, 29: 971-980.
- [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. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2018, 54(1): 17-24. [LUO M, WANG Q, QIU D D, et al. Characteristics of hydrological connectivity and its ecological effects in a typical tidal channel system of the Yellow River Delta. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2018, 54(1): 17-24.]
- [33] CHANG E R, VEENEKLAAS R M, BAKKER J P. Seed dynamics linked to variability in movement of tidal water. *Journal of Vegetation Science*, 2007, 18: 253-262.
- [34] CHANG E R, VEENEKLAAS R M, BUITENWERF R, et al. To move or not to move: Determinants of seed retention in a tidal marsh. *Functional Ecology*, 2008, 22: 720-727.
- [35] DAUSSE A, BONIS A, BOUZILLE J B, et al. Seed dispersal in a polder after partial tidal restoration: Implications for salt-marsh restoration. *Applied Vegetation Science*, 2008, 11: 3-12.
- [36] 辛沛, 金光球, 李凌. 潮汐作用下盐沼孔隙水流动及溶质运移模拟. *水科学进展*, 2009, 20(3): 379-384. [XIN P, JIN G Q, LI L. Modelling of tide induced pore water flow and solute transport in a salt marsh. *Advances in Water Science*, 2009, 20(3): 379-384.]
- [37] LEVINE J M, MURRELL D J. The community-level consequences of seed dispersal patterns. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 2003, 34: 549-574.

## Effect of hydrological characteristics on the recruitment of *Suaeda salsa* in coastal salt marshes

WANG Qing, LUO Meng, QIU Dong-dong, XIE Tian, SHI Wei, CUI Bao-shan

(School of Environment, Beijing Normal University, State Key Laboratory of Water Environment

Simulation, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Salt marshes are increasingly valued for their function of coastal protection. Affected by periodic tidal events, salt marshes are highly dynamic ecosystems, especially for the hydrological characteristics. The dynamic hydrological characteristics have significantly affected the recruitment of plant, resulting in a profound influence on the distribution of salt marsh plants. To reveal the effect of hydrological characteristics on plant recruitment in salt marshes, this study conducted a field experiment on a bare patch of Yellow River Delta coastal salt marshes. A typical tidal inundation gradient was set, by choosing six transects from a main tidal creek to high areas on a bare patch in mid to high salt marshes. And the measurement of hydrological and soil characteristics, seed emergence and seedling survival experiments were conducted on the tidal gradient. Our results showed that: (1) Elevation, tidal hydrodynamics, and the inundation gradient had significant effects along the gradient from the creek to the salt marsh: The elevation of sampling points increased with the distance from the creek; on the temporal scale, there were wet and dry periods of hydrological process, the inundation frequency, water table and cumulative inundation period were lower during November to April, and they started to increase since May; on the spatial scale, the inundation frequency and cumulative inundation period decreased with the increase of elevation, and became stable after the average high water level; the relationship between the maximum water depth and elevation was revealed as a quadratic curve, and the maximum water depth reached the highest values in the elevation of 0.9 to 1.1 m. (2) Soil salinity and moisture content were not correlated with the hydrological gradient, but their changing trends were significant: with the increase of the distance to the tidal creek, soil salinity was increasing, while soil moisture content was decreasing. (3) The captured *Suaeda salsa* seeds (by seed traps), seed emergence rate and survival rate decreased with the increase of the distance to the tidal creek, which revealed that the recruitment of *Suaeda salsa* was significantly affected by hydrological characteristics. At the dry end of hydrological gradient (the higher area), the lower inundation frequency went against the dispersal of *Suaeda salsa* seeds, seeds emergence and seedling growth, which reduced the recruitment success of *Suaeda salsa*.

**Keywords:** coastal salt marsh; recruitment; tidal hydrological characteristic; *Suaeda salsa*; Yellow River Delta