植物资源与环境学报, 2025, **34**(1): 11-20, 32
*Journal of Plant Resources and Environment*

# 盐度和淹水频率对上海崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库动态的影响

王　莹[1a], 李德志[1a,1b,2,3,①], 陈　婧[1a], 贾　静[1a], RASOOL Samreen Ghulam[1a]

(1. 华东师范大学: a. 生态与环境科学学院, b. 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241;
2. 崇明生态研究院, 上海 202162; 3. 自然资源部大都市区国土空间生态修复工程技术创新中心, 上海 200062)

**摘要**: 以上海崇明东滩盐沼湿地近海区域不同群落(生境)土壤种子库为研究对象,通过在温室内模拟潮汐作用,探究土壤盐度、淹水频率及其交互作用对土壤种子库萌发动态的影响。结果表明:崇明东滩盐沼湿地近海区域海三棱藨草〔× *Bolboschoenoplectus mariqueter* (Tang et F. T. Wang) Tatanov〕群落、互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel.)群落、芦苇〔*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.〕群落和光滩生境土壤种子库共萌发出 13 种植物,隶属于 7 科 12 属,其中海三棱藨草、马唐〔*Digitaria sanguinalis* (Linn.) Scop.〕和升马唐〔*Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler〕的总频度较高,分别为 0.108、0.064 和 0.059。禾本科(Poaceae)和莎草科(Cyperaceae)是崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库萌发植物群落的典型科。本地植物(海三棱藨草和芦苇)群落土壤种子库主要萌发海三棱藨草、马唐和升马唐;而入侵植物(互花米草)群落土壤种子库主要萌发马唐、升马唐和碱菀〔*Tripolium pannonicum* (Jacquin) Dobroczajeva〕,其中碱菀仅在互花米草群落土壤种子库中萌发。海三棱藨草群落土壤种子库对不同盐度和淹水频率的适应性较强。除光滩生境外,其他 3 种群落土壤种子库在盐度 0.0%、0.5%、1.0%和 1.5%以及淹水频率 1、3、7、10 d 处理条件下均有海三棱藨草萌发。与对照(淡水湿润)处理条件相比较,不同盐度和淹水频率处理显著($P<0.05$)降低了该区域土壤种子库萌发植物群落的植株密度和物种多样性。综上所述,在恢复崇明东滩盐沼湿地的本地植物群落时,利用土壤种子库是一个可行的途径,其中特别推荐海三棱藨草群落的土壤种子库。

**关键词**: 土壤种子库; 盐沼湿地; 崇明东滩; 潮汐作用; 盐度; 淹水频率

**中图分类号**: Q948.11; Q948.4　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1674-7895(2025)01-0011-10
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2025.01.02

**Effects of salinity and waterlogging frequency on the dynamics of soil seed bank in the coastal area of Chongming Dongtan salt marsh wetland in Shanghai**　WANG Ying[1a], LI Dezhi[1a,1b,2,3,①], CHEN Jing[1a], JIA Jing[1a], RASOOL Samreen Ghulam[1a] (1. East China Normal University: a. School of Ecological and Environmental Sciences, b. Shanghai Key Lab for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration, Shanghai 200241, China; 2. Institute of Eco-Chongming, Shanghai 202162, China; 3. Technology Innovation Center for Land Spatial Eco-Restoration in Metropolitan Area, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200062, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2025, **34**(1): 11-20, 32

**Abstract**: Taking the soil seed banks of different communities (habitats) in the coastal area of Chongming Dongtan salt marsh wetland in Shanghai as research objects, tidal action was simulated in a greenhouse to explore the effects of soil salinity, waterlogging frequency, and their interactions on the germination dynamics of soil seed banks. The results show that a total of 13 plant species belonging to

**收稿日期**: 2024-03-05
**基金项目**: 国家重点研发计划项目(2017YFC0506002; 2016YFC0503102); 上海市科委国际科技合作一带一路战略青年科学家交流项目(19230742600); 自然资源部大都市区国土空间生态修复工程技术创新中心开放研究项目(CXZX2021B01; CXZX2022B01)
**作者简介**: 王　莹(1999—),女,河南郑州人,硕士研究生,主要从事湿地生态学方面的研究。
①通信作者 E-mail: dzli@des.ecnu.edu.cn
**引用格式**: 王　莹, 李德志, 陈　婧, 等. 盐度和淹水频率对上海崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库动态的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(1): 11-20, 32.

12 genera of 7 families germinate from the soil seed banks of × *Bolboschoenoplectus mariqueter* (Tang et F. T. Wang) Tatanov community, *Spartina alterniflora* Loisel. community, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. community, and the unvegetated habitat in the coastal area of Chongming Dongtan salt marsh wetland, among which the total frequencies of × *B. mariqueter*, *Digitaria sanguinalis* (Linn.) Scop., and *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler are relatively high, which are 0.108, 0.064, and 0.059, respectively. The Poaceae and Cyperaceae are typical families of germinated plant communities in the soil seed banks of the coastal area of Chongming Dongtan salt marsh wetland. The soil seed banks of native plant (× *B. mariqueter* and *P. australis*) communities mainly germinate × *B. mariqueter*, *D. sanguinalis*, and *D. ciliaris*; while the soil seed bank of invasive plant (*S. alterniflora*) community mainly germinates *D. sanguinalis*, *D. ciliaris*, and *Tripolium pannonicum* (Jacquin) Dobroczajeva, among which *T. pannonicum* only germinates in the soil seed bank of *S. alterniflora* community. The soil seed bank of × *B. mariqueter* community exhibits relatively strong tolerance to different salinities and waterlogging frequencies. Except for the unvegetated habitat, the soil seed banks of the other three communities all have germination of × *B. mariqueter* under the treatment conditions of salinities of 0.0%, 0.5%, 1.0%, and 1.5% and waterlogging frequencies of 1, 3, 7, and 10 d. Compared with the control (freshwater wetting) treatment condition, different salinity and waterlogging frequency treatments significantly ($P<0.05$) reduce the plant density and species diversity of the germinated plant communities in the soil seed banks of this area. In conclusion, utilizing the soil seed bank is a feasible approach when restoring native plant communities in Chongming Dongtan salt marsh wetland, and the soil seed bank of × *B. mariqueter* community is particularly recommended.

**Key words**: soil seed bank; salt marsh wetland; Chongming Dongtan; tidal action; salinity; waterlogging frequency

滨海湿地是位于海洋和陆地生态系统间的交错过渡地带[1],受到海、陆环境的双重影响和制约,因而具有特殊的水文、植被、土壤特征[2],是世界上具有较高生产力以及多种功能和价值的生态系统之一[3],但同时也是最为脆弱的生态系统类型之一[4]。全球气候变化引起的海平面上升以及极端气候事件频发,可导致潮汐波动加剧,并对滨海湿地生态系统的稳定性产生重要影响。潮汐作用下的水、盐环境差异,是滨海湿地最为显著的特征之一[5],且对湿地植物群落的更新、生长、分布和服务功能有重要影响。

土壤种子库作为植物群落更新与恢复的关键组成部分[6],在维持生态系统的物种多样性方面发挥重要作用[7]。此外,土壤种子库可以汇聚从地上植被中消失物种的种子,被视为退化湿地生态系统恢复的重要潜在资源[3]。种子对环境胁迫具有较高的抗性,对于植物群落来说,种子在土壤中的自然储存被认为是群落稳定性的关键[8-9]。土壤种子库能够通过"储藏效应",降低种群在一定区域内灭绝的风险[10-11],在生态系统受到干扰后,可以起到重要的缓冲作用。环境因子对土壤种子库的影响,最终也会在植物群落组成、结构和功能上有所体现[12]。已有研究结果表明:湿地土壤种子库的结构和功能受关键环境因子(如土壤水分和盐分)的影响[13]。具体而言,土壤种子库的密度和物种丰富度随土壤盐度的升高而降低,并且,在不同盐渍化程度的生境中,优势种存在明显差异。此外,水位的波动也对滨海湿地土壤种子库的物种多样性产生影响;水位下降能够提高土壤种子库的物种丰富度[14-15]。

上海崇明东滩盐沼湿地位于崇明岛东部,是长江河口地区规模最大、发育最完善的河口型淤泥质潮滩湿地,是一个典型的盐沼湿地生态系统。在前人研究的基础上,本研究通过在温室内模拟潮汐作用,探究了不同盐度和淹水频率对崇明东滩盐沼湿地近海区域4种群落(生境)土壤种子库动态的影响,深入探讨了盐度和淹水频率对土壤种子库动态的调控机制,旨在为分析和预测潮汐影响下的崇明东滩盐沼湿地未来植被动态趋势提供科学依据,并为该区域湿地的生态保育和修复提供重要的技术支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

崇明东滩盐沼湿地地处上海崇明东滩鸟类国家级自然保护区(北纬31°25′~31°38′、东经121°50′~122°05′),位于崇明岛最东端,总面积241.55 km$^2$,为国际重要湿地。崇明东滩盐沼湿地的生境差异主要

由潮汐变化引起，并对生境内多种动植物的生存、习性和分布产生影响。崇明东滩盐沼湿地所在的长江口为中潮型河口，属非正规半日潮型，每日昼夜两潮，平均潮差 2.6 m，大潮平均潮差近 4 m。该区域主要优势种为芦苇〔*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.〕、互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel.)和海三棱藨草〔× *Bolboschoenoplectus mariqueter* (Tang et F. T. Wang) Tatanov〕等盐沼植物，分布面积较大[16]。

### 1.2　研究方法

1.2.1　*样地设置及土壤种子库采样方法*　于 2022 年 11 月分别在崇明东滩盐沼湿地近海区域的海三棱藨草群落、互花米草群落、芦苇群落及光滩生境(无植被)4 种群落(生境)设置样地。每种群落(生境)样地中设置 3 个样方，其中，海三棱藨草群落和光滩生境内每个样方面积 50 cm×50 cm，互花米草群落和芦苇群落内每个样方面积 100 cm×100 cm，样方间距大于或等于 10 m。在每个样方内，随机采集 3 个土壤样品(面积 20 cm×20 cm，0~10 cm 土层)，分别标记后装袋。将采集到的新鲜土壤样品带回实验室，剔除石块、植物根茎残余等，以避免无性繁殖植株对实验结果可能造成的影响。将同一样地的 9 个土壤样品混合均匀，自然风干后装入密闭袋，储存至次年 3 月份进行种子库萌发实验。

1.2.2　*土壤种子库萌发实验设计*　土壤种子库萌发实验于 2023 年 3 月至 10 月在华东师范大学校园内温室中进行。根据崇明东滩盐沼湿地的土壤盐度以及研究区域的潮汐淹水频率[17-19]，实验以淡水湿润处理(每日向土壤中加入适量自来水，以保持土壤湿润)为对照(CK)，设置盐度(NaCl 质量分数)0.0%、0.5%、1.0%、1.5%以及淹水频率 1、3、7 和 10 d 交互处理，每个处理 3 次重复，共 204 盆。首先，在每个塑料盆(直径 16 cm、高 17 cm)内铺垫 1 层透气无纺布，以防止实验过程中沙子流失，然后在花盆中装入高 12 cm 的无菌细沙。最后，将取自 4 个样地的土壤样品分别均匀铺在无菌沙层上，平铺厚度 2 cm。淹水处理当天分早(8:00—9:00 左右)、晚(20:00—21:00 左右)2 次，早晚间隔约 12 h，模拟日潮和夜潮。每盆内施以当天配置的对应盐度的溶液，直至淹没土壤表面。每日鉴定和统计各盆中萌发植物的种类及数量，持续观测至 2 周内无种子萌发为止。本实验萌发天数共 139 d。

### 1.3　数据处理和分析

根据种子萌发数据，计算物种频度(某种植物出现的样方数与样方总数的比值)、植株密度(单位面积上植物的株数)、Partrick 丰富度指数、Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数、Sørensen 指数和 Jaccard 指数[20]。利用 R 4.2.3 软件的 vegan 和 ggplot2 包进行非度量多维尺度(NMDS)分析并绘图，模型降维效果通过 stress 值判断，一般情况下，stress 值小于 0.2 即为合理，$P$ 值表示分组间差异，$P$ 值小于 0.05 时差异显著；利用 vegan 和 tidyverse 包进行群落(生境)、盐度和淹水频率的变差分解，residuals 表示模型未解释的部分。利用 SPSS 26 软件进行方差分析(ANOVA)，采用 Duncan's 法进行多重比较，$P$ 值小于 0.05 时差异显著。

## 2　结果和分析

### 2.1　物种组成和频度分析

上海崇明东滩盐沼湿地近海区域不同群落(生境)土壤种子库萌发植物群落的物种组成见表 1，不同群落(生境)、盐度和淹水频率下土壤种子库萌发植物的物种频度见表 2。

上海崇明东滩盐沼湿地近海区域 4 种群落(生境)的土壤种子库共萌发出 13 种植物，隶属于 7 科 12 属。海三棱藨草、马唐〔*Digitaria sanguinalis*

**表 1　上海崇明东滩盐沼湿地近海区域不同群落(生境)土壤种子库萌发植物群落的物种组成**
**Table 1　Species composition of germinated plant communities in the soil seed banks of different communities (habitats) in the coastal area of Chongming Dongtan salt marsh wetland in Shanghai**

| 科 Family | 属 Genus | 种 Species |
|---|---|---|
| 海三棱藨草群落 × *Bolboschoenoplectus mariqueter* community | | |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 大戟属 *Euphorbia* | 泽漆 *Euphorbia helioscopia* |
| 禾本科 Poaceae | 芦苇属 *Phragmites* | 芦苇 *Phragmites australis* |
| 禾本科 Poaceae | 马唐属 *Digitaria* | 马唐 *Digitaria sanguinalis* |
| 禾本科 Poaceae | 马唐属 *Digitaria* | 升马唐 *Digitaria ciliaris* |

续表1 Table 1 (Continued)

| 科 Family | 属 Genus | 种 Species |
|---|---|---|
| 禾本科 Poaceae | 穇属 *Eleusine* | 牛筋草 *Eleusine indica* |
| 茜草科 Rubiaceae | 拉拉藤属 *Galium* | 拉拉藤 *Galium spurium* |
| 莎草科 Cyperaceae | 海三棱藨草属 × *Bolboschoenoplectus* | 海三棱藨草 × *Bolboschoenoplectus mariqueter* |
| 互花米草群落 *Spartina alterniflora* community | | |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 大戟属 *Euphorbia* | 泽漆 *Euphorbia helioscopia* |
| 禾本科 Poaceae | 狗尾草属 *Setaria* | 狗尾草 *Setaria viridis* |
| 禾本科 Poaceae | 马唐属 *Digitaria* | 马唐 *Digitaria sanguinalis* |
| 禾本科 Poaceae | 马唐属 *Digitaria* | 升马唐 *Digitaria ciliaris* |
| 菊科 Asteraceae | 碱菀属 *Tripolium* | 碱菀 *Tripolium pannonicum* |
| 莎草科 Cyperaceae | 海三棱藨草属 × *Bolboschoenoplectus* | 海三棱藨草 × *Bolboschoenoplectus mariqueter* |
| 莎草科 Cyperaceae | 水葱属 *Schoenoplectus* | 三棱水葱 *Schoenoplectus triqueter* |
| 苋科 Amaranthaceae | 碱蓬属 *Suaeda* | 碱蓬 *Suaeda glauca* |
| 芦苇群落 *Phragmites australis* community | | |
| 大戟科 Euphorbiaceae | 大戟属 *Euphorbia* | 泽漆 *Euphorbia helioscopia* |
| 禾本科 Poaceae | 芦苇属 *Phragmites* | 芦苇 *Phragmites australis* |
| 禾本科 Poaceae | 马唐属 *Digitaria* | 马唐 *Digitaria sanguinalis* |
| 禾本科 Poaceae | 马唐属 *Digitaria* | 升马唐 *Digitaria ciliaris* |
| 莎草科 Cyperaceae | 海三棱藨草属 × *Bolboschoenoplectus* | 海三棱藨草 × *Bolboschoenoplectus mariqueter* |
| 光滩生境 Unvegetated habitat | | |
| 禾本科 Poaceae | 马唐属 *Digitaria* | 马唐 *Digitaria sanguinalis* |
| 禾本科 Poaceae | 马唐属 *Digitaria* | 升马唐 *Digitaria ciliaris* |
| 菊科 Asteraceae | 黄鹌菜属 *Youngia* | 黄鹌菜 *Youngia japonica* |
| 千屈菜科 Lythraceae | 千屈菜属 *Lythrum* | 千屈菜 *Lythrum salicaria* |

表2 不同群落(生境)、盐度和淹水频率下上海崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库萌发植物的物种频度[1)]
Table 2 Species frequency of germinated plants in the soil seed banks of the coastal area of Chongming Dongtan salt marsh wetland in Shanghai under different communities (habitats), salinities, and waterlogging frequencies[1)]

| 物种[2)] Species[2)] | 不同群落(生境)中物种频度 Species frequency in different communities (habitats) | | | | | 对照组的物种频度 Species frequency in the control group | 不同盐度下物种频度 Species frequency under different salinities | | | | 不同淹水频率下物种频度 Species frequency under different waterlogging frequencies | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $C_{Bm}$ | $C_{Sa}$ | $C_{Pa}$ | UH | 总计 Total | | 0.0% | 0.5% | 1.0% | 1.5% | 1 d | 3 d | 7 d | 10 d |
| Bm | 0.333 | 0.020 | 0.078 | — | 0.108 | 0.083 | 0.188 | 0.125 | 0.083 | 0.042 | 0.167 | 0.083 | 0.063 | 0.125 |
| Ds | 0.059 | 0.098 | 0.078 | 0.020 | 0.064 | 0.250 | 0.208 | — | — | — | — | — | 0.063 | 0.146 |
| Dc | 0.059 | 0.059 | 0.078 | 0.039 | 0.059 | 0.583 | 0.083 | 0.021 | — | — | 0.021 | — | 0.042 | 0.042 |
| Eh | 0.039 | 0.020 | 0.020 | — | 0.020 | — | 0.083 | — | — | — | — | 0.042 | 0.042 | — |
| Pa | 0.039 | — | 0.020 | — | 0.015 | 0.167 | — | — | 0.021 | — | — | — | — | 0.021 |
| Tp | — | 0.039 | — | — | 0.010 | 0.083 | — | 0.021 | — | — | 0.021 | — | — | — |
| Gs | 0.039 | — | — | — | 0.010 | — | 0.042 | — | — | — | — | 0.042 | — | — |
| Sv | — | 0.020 | — | — | 0.005 | 0.083 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Yj | — | — | — | 0.020 | 0.005 | — | 0.021 | — | — | — | 0.021 | — | — | — |
| Sg | — | 0.020 | — | — | 0.005 | — | — | 0.021 | — | — | 0.021 | — | — | — |
| Ei | 0.020 | — | — | — | 0.005 | — | 0.021 | — | — | — | — | — | — | 0.021 |
| Ls | — | — | — | 0.020 | 0.005 | — | 0.021 | — | — | — | 0.021 | — | — | — |
| St | — | 0.020 | — | — | 0.005 | — | — | 0.021 | — | — | 0.021 | — | — | — |

[1)] $C_{Bm}$: 海三棱藨草群落 × *Bolboschoenoplectus mariqueter* (Tang et F. T. Wang) Tatanov community; $C_{Sa}$: 互花米草群落 *Spartina alterniflora* Loisel. community; $C_{Pa}$: 芦苇群落 *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. community; UH: 光滩生境 Unvegetated habitat. —: 无植物萌发 No plant germination.

[2)] Bm: 海三棱藨草 × *Bolboschoenoplectus mariqueter* (Tang et F. T. Wang) Tatanov; Ds: 马唐 *Digitaria sanguinalis* (Linn.) Scop.; Dc: 升马唐 *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler; Eh: 泽漆 *Euphorbia helioscopia* Linn.; Pa: 芦苇 *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.; Tp: 碱菀 *Tripolium pannonicum* (Jacquin) Dobroczajeva; Gs: 拉拉藤 *Galium spurium* Linn.; Sv: 狗尾草 *Setaria viridis* (Linn.) P. Beauv.; Yj: 黄鹌菜 *Youngia japonica* (Linn.) DC.; Sg: 碱蓬 *Suaeda glauca* (Bunge) Bunge; Ei: 牛筋草 *Eleusine indica* (Linn.) Gaertn.; Ls: 千屈菜 *Lythrum salicaria* Linn.; St: 三棱水葱 *Schoenoplectus triqueter* (Linn.) Palla.

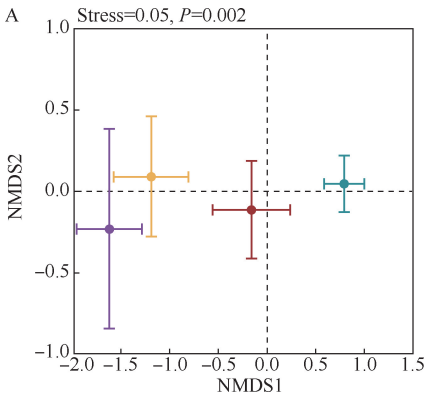
（Linn.）Scop.〕和升马唐〔*Digitaria ciliaris*（Retz.）Koeler〕的总频度相对较高，分别为 0.108、0.064 和 0.059。鉴于海三棱藨草隶属于莎草科（Cyperaceae），马唐和升马唐隶属于禾本科（Poaceae），且大多数萌发植物也属于这 2 个科，因此，禾本科和莎草科是研究区土壤种子库萌发植物群落的典型科。

海三棱藨草群落土壤种子库共萌发出 7 种植物，其中海三棱藨草、马唐和升马唐的频度较高，分别为 0.333、0.059 和 0.059。互花米草群落土壤种子库共萌发出 8 种植物，其中马唐、升马唐和碱菀〔*Tripolium pannonicum*（Jacquin）Dobroczajeva〕的频度较高，分别为 0.098、0.059 和 0.039。芦苇群落土壤种子库共萌发出 5 种植物，其中海三棱藨草、马唐和升马唐的频度较高，均为 0.078。光滩生境土壤种子库共萌发出 4 种植物，其中升马唐的频度最高，为 0.039。在 4 种群落（生境）的土壤种子库中，均有马唐和升马唐萌发。拉拉藤（*Galium spurium* Linn.）和牛筋草〔*Eleusine indica*（Linn.）Gaertn.〕仅在海三棱藨草群落的土壤种子库中萌发出现。碱菀、狗尾草〔*Setaria viridis*（Linn.）P. Beauv.〕、碱蓬〔*Suaeda glauca*（Bunge）Bunge〕和三棱水葱〔*Schoenoplectus triqueter*（Linn.）Palla〕仅在互花米草群落的土壤种子库中萌发出现。黄鹌菜〔*Youngia japonica*（Linn.）DC.〕和千屈菜（*Lythrum salicaria* Linn.）仅在光滩生境的土壤种子库中萌发出现。

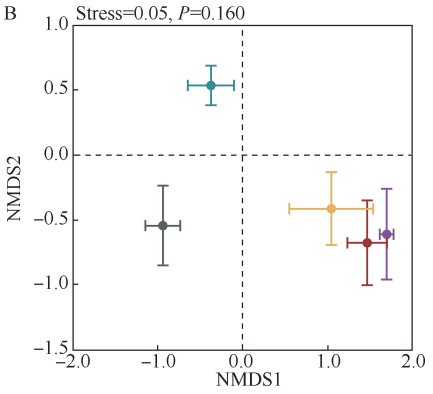
不同盐度处理条件下，对照和盐度 0.0%处理条件下崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库萌发的植物共有 11 种，其中马唐在这 2 个处理条件下均萌发，泽漆（*Euphorbia helioscopia* Linn.）、拉拉藤、狗尾草、黄鹌菜、牛筋草和千屈菜仅在对照或盐度 0.0%处理条件下萌发。碱蓬和三棱水葱仅在盐度 0.5%处理条件下萌发，仅海三棱藨草在对照以及盐度 0.0%、0.5%、1.0%和1.5%处理条件下均萌发。

不同淹水频率处理条件下，对照以及淹水频率 1、3、7、10 d 处理条件下崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库的萌发植物分别有 6、7、3、4 和 5 种。仅海三棱藨草在 5 种处理条件下均萌发，狗尾草仅在对照处理条件下萌发，黄鹌菜、碱蓬、千屈菜和三棱水葱仅在淹水频率 1 d 处理条件下萌发，拉拉藤仅在淹水频率 3 d 处理条件下萌发，牛筋草仅在淹水频率 10 d 处理条件下萌发。

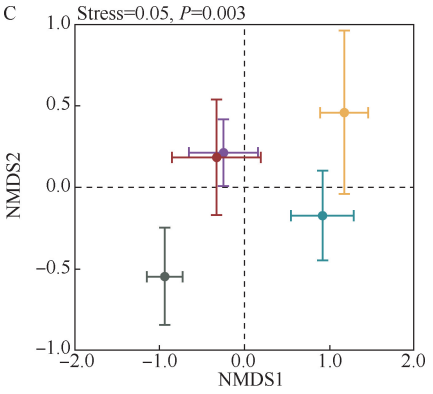
非度量多维尺度（NMDS）分析结果（图 1）显示：




—●—：海三棱藨草群落 × *Bolboschoenoplectus mariqueter*（Tang et F. T. Wang）Tatanov community；—●—：互花米草群落 *Spartina alterniflora* Loisel. community；—●—：芦苇群落 *Phragmites australis*（Cav.）Trin. ex Steud. community；—●—：光滩生境 Unvegetated habitat.




—●—：对照 The control；—●—：盐度 0.0% Salinity of 0.0%；—●—：盐度 0.5% Salinity of 0.5%；—●—：盐度1.0% Salinity of 1.0%；—●—：盐度 1.5% Salinity of 1.5%.




—●—：对照 The control；—●—：淹水频率 1 d Waterlogging frequency of 1 d；—●—：淹水频率 3 d Waterlogging frequency of 3 d；—●—：淹水频率 7 d Waterlogging frequency of 7 d；—●—：淹水频率 10 d Waterlogging frequency of 10 d.

A：群落（生境）Community（habitat）；B：盐度 Salinity；C：淹水频率 Waterlogging frequency.

**图 1　基于非度量多维尺度（NMDS）的上海崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库萌发植物群落的物种组成分析**

**Fig. 1　Analysis on species composition of germinated plant communities in the soil seed banks of the coastal area of Chongming Dongtan salt marsh wetland in Shanghai based on non-metric multidimensional scaling（NMDS）**

不同群落(生境)土壤种子库萌发植物群落的距离较远,相似性程度较低。不同盐度处理条件下,对照和盐度0.0%处理条件下的土壤种子库萌发植物群落分别分布在第3和第2象限,与其他3种盐度处理条件下的土壤种子库萌发植物群落的相似性程度较低;盐度0.5%、1.0%和1.5%处理条件下的土壤种子库萌发植物群落均分布在第4象限,三者间存在一定程度相似性。不同淹水频率处理条件下,淹水频率7和10 d处理条件下的土壤种子库萌发植物群落总体分布在第2象限,二者间存在一定程度相似性;其他淹水频率处理条件下的土壤种子库萌发植物群落间的距离较远,相似性程度较低。从土壤种子库萌发植物群落的物种组成来看,在不同群落(生境)和不同淹水频率处理条件下,土壤种子库萌发的植物群落间存在显著差异($P<0.05$)。

### 2.2 相似性分析

上海崇明东滩盐沼湿地近海区域不同群落(生境)土壤种子库萌发植物群落的相似性分析结果见表3。结果显示:海三棱藨草群落与芦苇群落土壤种子库萌发植物群落最相似,Sørensen指数和Jaccard指数均最大,分别为0.833和0.741。互花米草群落与光滩生境土壤种子库萌发植物群落的Sørensen指数和Jaccard指数均最小,分别为0.333和0.200,说明这2种群落(生境)土壤种子库萌发植物群落的差异较大。

### 2.3 不同处理条件下植株密度和物种丰富度分析

上海崇明东滩盐沼湿地近海区域不同群落(生境)土壤种子库萌发植物群落的植株密度和Partrick丰富度指数见表4。结果显示:海三棱藨草群落土壤种子库萌发植物群落在对照(CK)处理条件下的植株密度最高(729.7 $m^{-2}$),在CK和T2(盐度0.0%,淹水频率3 d)处理条件下的Partrick丰富度指数最高(均为2.000)。在盐度0.0%处理条件下,互花米草群落土壤种子库在T3(盐度0.0%,淹水频率7 d)和T4(盐度0.0%,淹水频率10 d)处理条件下均有种子萌发,且T4处理条件下的植株密度最高(198.9 $m^{-2}$),而在盐度0.5%、1.0%和1.5%处理条件下,仅T5(盐度0.5%,淹水频率1 d)和T13(盐度1.5%,淹水频率1 d)处理条件下有种子萌发;该萌发植物群落的Partrick丰富度指数在CK和T5处理条件下最高(均为1.333)。芦苇群落土壤种子库在CK、T1(盐度0.0%,淹水频率1 d)、T3、T4、T8(盐度0.5%,淹水频率10 d)和T12(盐度1.0%,淹水频率10 d)处理条件下均有种子萌发,其中T3处理条件下的植株密度最高(281.8 $m^{-2}$),而在盐度1.5%处理条件下无种子萌发;该萌发植物群落的Partrick丰富度指数在CK和T3处理条件下最高(均为1.333)。光滩生境土壤种子库仅在CK和盐度0.0%处理条件(淹水频率3 d除外)下有少量种子萌发,在盐度0.5%、1.0%和1.5%处理条件下均无种子萌发;该萌发植物群落的Partrick丰富度指数在T1处理条件下最高(0.667)。相较于CK处理,盐度和淹水处理降低了大多数土壤种子库萌发植物群落的植株密度和Partrick丰富度指数。在淹水频率3 d处理条件下,互花米草群落、芦苇群落和光滩生境土壤种子库均无种子萌发。在盐度1.5%处理条件下,仅海三棱藨草群落和互花米草群落土壤种子库在T13处理条件下有少量种子萌发。

**表3 上海崇明东滩盐沼湿地近海区域不同群落(生境)土壤种子库萌发植物群落的Sørensen指数和Jaccard指数[1)]**

**Table 3 Sørensen index and Jaccard index of germinated plant communities in the soil seed banks of different communities (habitats) in the coastal area of Chongming Dongtan salt marsh wetland in Shanghai[1)]**

| 群落(生境) Community (habitat) | Sørensen指数 Sørensen index | | | Jaccard指数 Jaccard index | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $C_{Bm}$ | $C_{Sa}$ | $C_{Pa}$ | $C_{Bm}$ | $C_{Sa}$ | $C_{Pa}$ |
| $C_{Sa}$ | 0.533 | | | 0.364 | | |
| $C_{Pa}$ | 0.833 | 0.615 | | 0.714 | 0.444 | |
| UH | 0.364 | 0.333 | 0.444 | 0.222 | 0.200 | 0.286 |

[1)] $C_{Bm}$: 海三棱藨草群落 × *Bolboschoenoplectus mariqueter* (Tang et F. T. Wang) Tatanov community; $C_{Sa}$: 互花米草群落 *Spartina alterniflora* Loisel. community; $C_{Pa}$: 芦苇群落 *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. community; UH: 光滩生境 Unvegetated habitat.

### 2.4 不同群落(生境)、盐度和淹水频率下植株密度和物种多样性指数及三因素方差分析

不同群落(生境)、盐度和淹水频率下上海崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库萌发植物群落的植株密度和物种多样性指数见表5。结果显示:海三棱藨草群落土壤种子库萌发植物群落的植株密度、Partrick丰富度指数和Simpson优势度指数均显著($P<0.05$)高于其他3种群落(生境),光滩生境土壤种子库萌发植物群落这3个指标均最低,互花米草群落与芦苇群落土壤种子库萌发植物群落间的这3个指标无显著差异。不同群落(生境)土壤种子库萌发植物群落间Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数均无显著差异。

**表 4　上海崇明东滩盐沼湿地近海区域不同群落(生境)土壤种子库萌发植物群落的植株密度和 Partrick 丰富度指数[1)]**
**Table 4　Plant density and Partrick richness index of germinated plant communities in the soil seed banks of different communities (habitats) in the coastal area of Chongming Dongtan salt marsh wetland in Shanghai[1)]**

| 编号 No. | 盐度/% Salinity | 淹水频率/d Waterlogging frequency | 植株密度/$m^{-2}$ Plant density | | | | Partrick 丰富度指数 Partrick richness index | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $C_{Bm}$ | $C_{Sa}$ | $C_{Pa}$ | UH | $C_{Bm}$ | $C_{Sa}$ | $C_{Pa}$ | UH |
| CK | | | 729.7 | 83.0 | 198.7 | 16.7 | 2.000 | 1.333 | 1.333 | 0.333 |
| T1 | 0.0 | 1 | 663.1 | — | 182.4 | 33.2 | 1.000 | — | 0.333 | 0.667 |
| T2 | 0.0 | 3 | 348.2 | — | — | — | 2.000 | — | — | — |
| T3 | 0.0 | 7 | 265.3 | 49.7 | 281.8 | 16.6 | 0.333 | 1.000 | 1.333 | 0.333 |
| T4 | 0.0 | 10 | 182.4 | 198.9 | 49.7 | 16.6 | 1.333 | 1.000 | 1.000 | 0.333 |
| T5 | 0.5 | 1 | 49.7 | 149.2 | — | — | 0.333 | 1.333 | — | — |
| T6 | 0.5 | 3 | 66.3 | — | — | — | 0.333 | — | — | — |
| T7 | 0.5 | 7 | 33.2 | — | — | — | 0.333 | — | — | — |
| T8 | 0.5 | 10 | 198.9 | — | 49.7 | — | 0.667 | — | 0.333 | — |
| T9 | 1.0 | 1 | 82.9 | — | — | — | 0.333 | — | — | — |
| T10 | 1.0 | 3 | 16.6 | — | — | — | 0.333 | — | — | — |
| T11 | 1.0 | 7 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| T12 | 1.0 | 10 | 99.5 | — | 33.2 | — | 0.667 | — | 0.333 | — |
| T13 | 1.5 | 1 | 16.6 | 49.7 | — | — | 0.333 | 0.333 | — | — |
| T14 | 1.5 | 3 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| T15 | 1.5 | 7 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| T16 | 1.5 | 10 | — | — | — | — | — | — | — | — |

[1)] $C_{Bm}$：海三棱藨草群落 × *Bolboschoenoplectus mariqueter* (Tang et F. T. Wang) Tatanov community；$C_{Sa}$：互花米草群落 *Spartina alterniflora* Loisel. community；$C_{Pa}$：芦苇群落 *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. community；UH：光滩生境 Unvegetated habitat. CK：对照 The control. —：无植物萌发 No plant germination.

**表 5　不同群落(生境)、盐度和淹水频率下上海崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库萌发植物群落的植株密度和物种多样性指数($\bar{X}\pm SE$)[1)]**
**Table 5　Plant density and species diversity indexes of germinated plant communities in the soil seed banks of the coastal area of Chongming Dongtan salt marsh wetland in Shanghai under different communities (habitats), salinities, and flooding frequencies ($\bar{X}\pm SE$)[1)]**

| 群落(生境) Community (habitat) | 植株密度/$m^{-2}$ Plant density | Partrick 丰富度指数 Partrick richness index | Simpson 优势度指数 Simpson dominance index | Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index | Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index |
|---|---|---|---|---|---|
| $C_{Bm}$ | 161.9±37.5a | 0.588±0.109a | 0.483±0.081a | 0.059±0.023a | 0.076±0.028a |
| $C_{Sa}$ | 31.2±10.6b | 0.294±0.081b | 0.281±0.076b | 0.035±0.020a | 0.051±0.029a |
| $C_{Pa}$ | 46.8±19.3b | 0.275±0.084b | 0.248±0.075bc | 0.043±0.022a | 0.062±0.031a |
| UH | 4.9±2.5b | 0.098±0.051c | 0.098±0.051c | 0.014±0.014a | 0.020±0.020a |
| **盐度/% Salinity** | **植株密度/$m^{-2}$ Plant density** | **Partrick 丰富度指数 Partrick richness index** | **Simpson 优势度指数 Simpson dominance index** | **Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index** | **Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index** |
| CK | 257.0±93.0a | 1.250±0.218a | 1.000±0.158a | 0.171±0.069a | 0.247±0.099a |
| 0.0 | 143.0±35.2b | 0.667±0.117b | 0.602±0.100b | 0.099±0.034b | 0.134±0.045b |
| 0.5 | 34.2±13.1c | 0.208±0.066c | 0.194±0.059c | 0.009±0.009c | 0.012±0.012c |
| 1.0 | 14.5±8.2c | 0.104±0.054c | 0.092±0.045c | 0.009±0.009c | 0.014±0.014c |
| 1.5 | 4.1±3.3c | 0.042±0.029c | 0.042±0.029c | 0.000±0.000c | 0.000±0.000c |
| **淹水频率/d Waterlogging frequency** | **植株密度/$m^{-2}$ Plant density** | **Partrick 丰富度指数 Partrick richness index** | **Simpson 优势度指数 Simpson dominance index** | **Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index** | **Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index** |
| CK | 257.0±93.0a | 1.250±0.218a | 1.000±0.158a | 0.171±0.069a | 0.247±0.099a |
| 1 | 76.7±27.5b | 0.292±0.079b | 0.278±0.073b | 0.023±0.017b | 0.033±0.024b |
| 3 | 26.9±15.0b | 0.167±0.081b | 0.129±0.058b | 0.024±0.019b | 0.025±0.018b |
| 7 | 40.4±22.5b | 0.208±0.079b | 0.194±0.073b | 0.037±0.021b | 0.053±0.031b |
| 10 | 51.8±15.1b | 0.354±0.087b | 0.329±0.078b | 0.033±0.019b | 0.048±0.028b |

[1)] $C_{Bm}$：海三棱藨草群落 × *Bolboschoenoplectus mariqueter* (Tang et F. T. Wang) Tatanov community；$C_{Sa}$：互花米草群落 *Spartina alterniflora* Loisel. community；$C_{Pa}$：芦苇群落 *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. community；UH：光滩生境 Unvegetated habitat. CK：对照 The control. 同列中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P<0.05$).

随着盐度的升高,崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库萌发植物群落的植株密度、Partrick 丰富度指数、Simpson 优势度指数、Shannon－Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数总体呈下降的趋势。对照(CK)处理条件下的上述 5 个指标最高,显著高于其他 4 种盐度处理条件;盐度 0.0%处理条件下的上述 5 个指标也较高,显著高于盐度 0.5%、1.0%和 1.5%处理条件;盐度 0.5%、1.0%和 1.5%处理条件下的上述 5 个指标较低,且这 3 种盐度处理条件间无显著差异。

在对照处理条件下,崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库萌发植物群落的植株密度、Partrick 丰富度指数、Simpson 优势度指数、Shannon－Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数均显著高于淹水频率 1、3、7 和 10 d 处理条件;淹水频率 1、3、7 和 10 d 处理条件间上述 5 个指标无显著差异。

方差分析结果(表 6)表明:群落(生境)对崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库萌发植物群落的植株密度、Partrick 丰富度指数和 Simpson 优势度指数的影响在 0.001 水平上显著;盐度对植株密度、Partrick 丰富度指数、Simpson 优势度指数、Shannon－Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数 5 个指标的影响在 0.001 水平上显著;群落(生境)和盐度的交互作用对植株密度的影响在 0.001 水平上显著;群落(生境)和淹水频率的交互作用对 Partrick 丰富度指数的影响在 0.05 水平上显著;群落(生境)、盐度和淹水频率间的交互作用对 Partrick 丰富度指数和 Simpson 优势度指数的影响分别在 0.01 和 0.05 水平上显著;淹水频率以及盐度和淹水频率的交互作用对上述 5 个指标的影响均不显著。

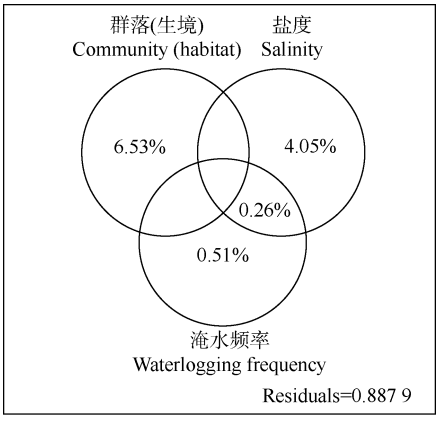
**表 6 上海崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库萌发植物群落的植株密度和物种多样性指数的三因素方差分析[1)]**
**Table 6 Three-factor analysis of variance on plant density and species diversity indexes of germinated plant communities in the soil seed banks of the coastal area of Chongming Dongtan salt marsh wetland in Shanghai[1)]**

| 变量 Variable | 各指标的 $F$ 值 $F$ value of each index | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 植株密度 Plant density | Partrick 丰富度指数 Partrick richness index | Simpson 优势度指数 Simpson dominance index | Shannon－Wiener 指数 Shannon-Wiener index | Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index |
| C | 29.41 *** | 13.99 *** | 8.95 *** | 2.26 | 2.16 |
| S | 14.42 *** | 19.58 *** | 19.63 *** | 5.95 *** | 5.67 *** |
| F | 1.57 | 1.73 | 2.39 | 0.13 | 0.24 |
| C×S | 4.30 *** | 1.49 | 0.99 | 0.52 | 0.51 |
| C×F | 0.80 | 2.06 * | 1.65 | 1.35 | 1.26 |
| S×F | 0.75 | 1.16 | 1.30 | 0.41 | 0.48 |
| C×S×F | 1.39 | 1.99 ** | 1.66 * | 1.32 | 1.20 |

[1)] C: 群落(生境) Community (habitat); S: 盐度 Salinity; F: 淹水频率 Waterlogging frequency. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$.

## 2.5 不同群落(生境)、盐度和淹水频率下变差分解分析

将群落(生境)、盐度和淹水频率对上海崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库萌发植物群落的物种组成差异进行变差分解分析,结果见图 2。群落(生境)、盐度和淹水频率共解释了上海崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库萌发植物群落物种组成差异的 11.35%,其中,群落(生境)、盐度和淹水频率对该区域土壤种子库萌发植物群落物种组成差异的净解释度分别为 6.53%、4.05%和 0.51%;盐度和淹水频率存在交互作用,共同解释度为 0.26%。




图中百分数为解释度(解释度小于 0 的数据未显示)The percentages in the figure are the interpretations (the data with an interpretability less than 0 are not shown).

**图 2 群落(生境)、盐度和淹水频率对上海崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库萌发植物群落物种组成差异的变差分解图**
**Fig. 2 Variance partitioning diagram of community (habitat), salinity, and waterlogging frequency on the differenes of species composition of germinated plant communities in the soil seed banks of the coastal area of Chongming Dongtan salt marsh wetland in Shanghai**

## 3　讨　　论

### 3.1　土壤种子库的萌发植物群落分析

上海崇明东滩盐沼湿地近海区域海三棱藨草群落、互花米草群落、芦苇群落和光滩生境土壤种子库共萌发出 13 种植物，隶属于 7 科 12 属。禾本科和莎草科是萌发植物群落的典型科，其中海三棱藨草、马唐和升马唐的频度较高。海三棱藨草作为崇明东滩盐沼湿地植物的主要优势种，其分布面积曾经一度占盐沼植被总面积的 20.61%[16]，其种子数量较多，因此，崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库萌发出的海三棱藨草的总频度最高。马唐和升马唐是禾本科马唐属（*Digitaria* Haller）的小种子植物，二者种子生产力极高，单株可生产数万粒种子，且可以通过风、潮汐、动物和人等方式快速传播，同时种子很容易进入并储存在土壤中，形成种子库，在适宜的环境条件下可重新萌发[21-23]。

作为崇明东滩植物的主要优势种，芦苇、互花米草和海三棱藨草等均属于克隆植物。克隆植物在繁殖过程中，通常将资源优先分配给无性繁殖，甚至一些克隆植物已完全放弃有性繁殖[24]，[25]47。于振林[25]33-49对盐沼湿地植物繁殖对策的研究认为，海三棱藨草在盐水（盐度 1.0%）处理条件下，将资源全部投入营养生长，而在淡水处理条件下，可以产生种子和球茎，而芦苇和互花米草在淡水和盐水处理条件下对有性繁殖的投入均为 0，但将部分资源分配给无性繁殖。Vlok[26]研究了弯管鸢尾属（*Watsonia* Mill.）植物 *Watsonia fourcadei* J. W. Mathews et L. Bolus 的资源分配，认为 *W. fourcadei* 植株在新生球茎干质量至少积累 3.5 g 后，才会将资源分配至有性繁殖。采自崇明东滩盐沼湿地的土壤种子库有少量芦苇萌发，但无互花米草萌发，由此可以推断，该地区芦苇和互花米草的主要繁殖方式为无性繁殖。这也符合克隆植物优先将资源投入无性繁殖的生态对策。

### 3.2　群落（生境）对土壤种子库萌发植物群落的影响

群落（生境）对上海崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库萌发植物群落的物种组成、植株密度、Partrick 丰富度指数和 Simpson 优势度指数均存在显著影响，其中海三棱藨草群落土壤种子库萌发植物群落的植株密度、Partrick 丰富度指数和 Simpson 优势度指数均显著高于其他群落（生境）。地上植被是土壤种子库种子的主要来源。地上植被所产生的种子以种子雨的形式补充到土壤种子库，因此，不同群落（生境）形成的土壤种子库的物种组成通常存在差异[27-28]。崇明东滩盐沼湿地本地植物（海三棱藨草和芦苇）群落土壤种子库萌发的植物种类均以海三棱藨草、马唐和升马唐为主，而入侵植物（互花米草）群落土壤种子库萌发的植物种类以马唐、升马唐和碱菀为主，其中碱菀仅存在于互花米草群落的土壤种子库。光滩生境土壤种子库萌发的植物种类主要为马唐。由此可见互花米草的入侵在一定程度上改变了土壤种子库萌发植物群落的物种组成。

### 3.3　盐度和淹水频率对土壤种子库萌发植物群落的影响

盐度对上海崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库萌发植物群落的植株密度、Partrick 丰富度指数、Simpson 优势度指数、Shannon－Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数存在显著影响，淹水频率对该区域土壤种子库萌发植物群落的物种组成存在显著影响。土壤中种子在萌发过程中通过增加细胞内溶质浓度进行渗透吸水，促进胚的发育和分化。高盐环境通过降低水分可利用性和抑制养分吸收延迟或阻止种子萌发和幼苗生长[29-31]，进而降低土壤种子库萌发植物群落的密度和物种多样性。已有研究结果表明湿地生境土壤种子库的种子密度和物种丰富度与土壤盐度呈负相关[14]。本研究也获得相似结果，崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库萌发植物群落的植株密度和物种多样性指数总体随盐度升高而降低，其中对照和盐度 0.0%处理条件下的植株密度和物种多样性指数显著高于盐度 0.5%、1.0%和 1.5%处理条件。

有研究表明：低盐环境由于可以促进细胞膜的渗透调节，从而可以在一定程度上促进部分盐生植物种子的萌发[32]。微量 $Na^+$ 对呼吸酶有刺激作用，可以加速种子萌发[33-34]。换言之，适宜的低盐环境可以促进部分植物种子的萌发，甚至打破种子的休眠[35-36]。崇明东滩盐沼湿地大多数植物对盐度较敏感，甚至马唐、泽漆、拉拉藤、狗尾草、黄鹌菜、牛筋草和千屈菜仅在对照和盐度 0.0%处理条件下萌发，但碱蓬和三棱水葱仅在盐度 0.5%的低盐处理条件下萌发，由此可见，低盐环境促进了碱蓬和三棱水葱种子的萌发。此外，在盐度 0.0%～1.5%处理条件下的各土壤种子库中，海三棱藨草均有萌发，表明海三棱藨草对不同盐度的适应能力较强，可在滨海湿地生态系

统保育以及生态修复中发挥重要作用。

淹水条件变化对湿地土壤种子库中种子萌发影响很大。淹水周期的变化可以在不同程度上影响土壤种子库更新[37],同时,淹水不仅抑制地上植被生长[38],还可能抑制湿地土壤种子库中大多数物种的萌发。Lei 等[37] 对落羽杉〔*Taxodium distichum* (Linn.) Rich.〕群落土壤种子库植物种子萌发潜力的研究发现,淹水处理显著降低了土壤种子库的种子密度和物种丰富度。Wang 等[39]在东北地区的研究也表明:水分状况是土壤种子库中种子萌发最重要的限制因子。本研究中,与对照处理条件相比,淹水显著降低了崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库萌发植物群落的植株密度和物种多样性指数,但不同淹水频率对其群落结构的影响没有明显规律,其中淹水频率 3 d 处理对土壤种子库中种子萌发的抑制作用相对较大,而淹水频率 1 d 处理条件下,土壤种子库萌发植物群落的植株密度和物种多样性指数反而总体较高。推测由于水分频繁的补充和排出,淹水频率 1 d处理为土壤提供了较为适宜的水盐循环条件,从而为种子萌发创造了较好的环境。相反,由于土壤水分的蒸发以及土壤表层盐分的累积,淹水频率 3 d 处理对土壤种子库中种子的萌发产生了不利影响,因为高盐度环境往往会抑制种子的吸水和萌发过程。随着全球气候变化,沿海地区被海水淹没的频率将会升高[40-41],在此情形下,崇明东滩盐沼湿地近海区域土壤种子库如何响应淹水频率变化还有待进一步研究。

**参考文献:**


[1] YANG W, LI N, LENG X, et al. The impact of sea embankment reclamation on soil organic carbon and nitrogen pools in invasive *Spartina alterniflora* and native *Suaeda salsa* salt marshes in eastern China[J]. Ecological Engineering, 2016, 97: 582-592.

[2] 李 伟, 崔丽娟, 赵欣胜, 等. 中国滨海湿地及其生态系统服务功能研究概述[J]. 林业调查规划, 2014, 39(4): 24-30.

[3] ZHAO Y P, LIAO J C, BAO X K, et al. Soil seed bank dynamics are regulated by bird diversity and soil moisture during alpine wetland degradation [J]. Biological Conservation, 2021, 263: 109360.

[4] 李 晶, 雷茵茹, 崔丽娟, 等. 我国滨海滩涂湿地现状及研究进展[J]. 林业资源管理, 2018(2): 24-28, 137.

[5] 赵庆庆, 白军红, 高永超, 等. 黄河三角洲湿地土壤盐离子沿水盐梯度的变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 641-649.

[6] ROYO A A, RISTAU T E. Stochastic and deterministic processes regulate spatio-temporal variation in seed bank diversity[J]. Journal of Vegetation Science, 2013, 24(4): 724-734.

[7] KALAMEES R, PÜSSA K, ZOBEL K, et al. Restoration potential of the persistent soil seed bank in successional calcareous (alvar) grasslands in Estonia[J]. Applied Vegetation Science, 2012, 15(2): 208-218.

[8] DEMALACH N, KIGEL J, STERNBERG M. The soil seed bank can buffer long-term compositional changes in annual plant communities[J]. Journal of Ecology, 2021, 109(3): 1275-1283.

[9] OOI M K J. Seed bank persistence and climate change[J]. Seed Science Research, 2012, 22(Suppl. 1): S53-S60.

[10] CHU H, ZHANG C P, DONG Q M, et al. The effect of grazing intensity and season on the soil seed bank and its relation with above-ground vegetation on the alpine steppe[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2019, 285: 106622.

[11] OOI M K J, AULD T D, DENHAM A J. Projected soil temperature increase and seed dormancy response along an altitudinal gradient: implications for seed bank persistence under climate change[J]. Plant and Soil, 2012, 353: 289-303.

[12] 安 航. 青藏高原东部高寒草地土壤种子库对环境因子变化的响应机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021: 18-20.

[13] 冯 璐, 刘京涛, 韩广轩, 等. 黄河三角洲滨海湿地地下水位变化对土壤种子库特征的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 3826-3835.

[14] ZHAO Y T, WANG G D, ZHAO M L, et al. Direct and indirect effects of soil salinization on soil seed banks in salinizing wetlands in the Songnen Plain, China [J]. Science of the Total Environment, 2022, 819: 152035.

[15] MA M J, MA Z, DU G Z. Effects of water level on three wetlands soil seed banks on the Tibetan Plateau[J]. PLoS ONE, 2014, 9(7): e101458.

[16] 上海崇明东滩鸟类国家级自然保护区管理处. 2015 上海崇明东滩鸟类国家级自然保护区年度资源监测报告[R/OL]. (2017-04-16)[2024-02-03]. https://www.dongtan.cn/warehouse/Upload/20171219132715979.pdf.

[17] TANG L, GAO Y, LI B, et al. *Spartina alterniflora* with high tolerance to salt stress changes vegetation pattern by outcompeting native species[J]. Ecosphere, 2014, 5(9): 1-18.

[18] 彭娜娜. 崇明东滩湿地土壤微生物生物量碳氮分异及影响因素分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2022: 32-34.

[19] 李诗华. 长江口典型盐沼植被的环境适应性与生物地貌过程建模[D]. 上海: 华东师范大学, 2022: 45-51.

[20] 李 林, 魏识广, 练琚愉, 等. 亚热带不同纬度植物群落物种多样性分布规律[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1249-1257.

[21] 郭文磊, 张泰勋, 张 纯, 等. 马唐种子萌发及幼苗建成对不同环境因子的响应[J]. 植物保护, 2022, 48(2): 85-93.

[22] GALLART M, MAS M T, VERDÚ A M C. Demography of *Digitaria sanguinalis*: effect of the emergence time on survival, reproduction, and biomass[J]. Weed Biology and Management, 2010, 10(2): 132-140.


(下转第 32 页 Continued on page 32)

生长及黄酮类物质含量的影响[J]. 西北植物学报, 2022, 42(1): 118-126.
[30] 刘泰龙, 姬亚丽, 刘怡萱, 等. 基于转录组测序探讨西藏麦地卡湿地5种植物对高海拔光照的适应机制[J]. 植物科学学报, 2021, 39(6): 632-642.
[31] 韦存虚, 谢佩松, 周卫东, 等. 麦冬、土麦冬和阔叶土麦冬叶表皮形态结构的观察[J]. 植物资源与环境学报, 2008, 17(4): 9-15.
[32] 黄 蕾. 光质对作物角质层蜡质生物合成及生物学功能的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2020: 1-3.
[33] 肖世基, 刘 珍, 张茂生, 等. 金钗石斛中一个新的联苄类化合物[J]. 药学学报, 2016, 51(7): 1117-1120.
[34] 周宇娟, 王俊豪, 徐 红, 等. 铁皮石斛联苄类化学成分的研究[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(15): 3853-3858.
[35] 徐俊驹, 虞 泓, 陈业高. 密花石豆兰化学成分的研究[J]. 云南化工, 2005, 32(1): 11-13, 23.
[36] 冷平生, 苏淑钗, 王天华, 等. 光强与光质对银杏光合作用及黄酮苷与萜类内酯含量的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2002, 11(1): 1-4.
[37] WANG P J, CHEN S R, GU M Y, et al. Exploration of the effects of different blue LED light intensities on flavonoid and lipid metabolism in tea plants via transcriptomics and metabolomics[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(13): 4606.
[38] 王华美, 于延冲, 付春祥, 等. 木质素合成关键酶咖啡酰辅酶A氧甲基转移酶的研究进展[J]. 基因组学与应用生物学, 2014, 33(2): 458-466.
[39] LIAO Z K, LIU X J, ZHENG J, et al. A multifunctional true caffeoyl coenzyme A *O*-methyltransferase enzyme participates in the biosynthesis of polymethoxylated flavones in citrus[J]. Plant Physiology, 2023, 192(3): 2049-2066.

(责任编辑: 张明霞)

(上接第20页 Continued from page 20)

[23] ERFANZADEH R, HAZHIR S, JAFARI M. Effect of cushion plants on the soil seed bank in overgrazed semiarid regions[J]. Land Degradation and Development, 2020, 31(8): 990-1000.
[24] 李卓琳, 穆春生, 吴春英. 气候变化对草原多年生克隆植物无性繁殖的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(8): 1694-1704.
[25] 于振林. 环境梯度对盐沼湿地植物繁殖对策的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2023.
[26] VLOK J H J. Survival strategy of *Watsonia fourcadei* (Iridaceae); allocation of resources to sexual reproduction and vegetative survival of the parent plant[J]. South African Journal of Botany, 2021, 139: 192-196.
[27] 李有志, 张灿明, 林 鹏. 土壤种子库评述[J]. 草业科学, 2009, 26(3): 83-90.
[28] 谢天资, 黄劲松, 黎燕琼, 等. 土壤种子库研究进展及展望[J]. 绵阳师范学院学报, 2015, 34(5): 57-62.
[29] 徐佳慧, 赵晓亭, 毛凯涛, 等. 非生物逆境胁迫下的种子萌发调控机制研究进展[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 71-83.
[30] IBRAHIM E A. Seed priming to alleviate salinity stress in germinating seeds[J]. Journal of plant physiology, 2016, 192: 38-46.
[31] YADAV S P, BHARADWAJ R, NAYAK H, et al. Impact of salt stress on growth, productivity and physicochemical properties of plants: a review[J]. International Journal of Chemical Studies, 2019, 7(2): 1793-1798.
[32] 宗 莉, 甘 霖, 康玉茹, 等. 盐分、干旱及其交互胁迫对黑果枸杞发芽的影响[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 499-503.
[33] 刘 群, 彭 斌, 田长彦, 等. 8种盐生植物种子萌发特征与NaCl盐度的关系[J]. 生态学报, 2023, 43(17): 7284-7293.
[34] 尤 佳, 王文瑞, 卢 金, 等. 盐胁迫对盐生植物黄花补血草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3825-3833.
[35] 胡茜靓, 赵志淼, 兰燕月, 等. 盐度和水淹对海三棱藨草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(1): 55-63.
[36] ORLOVSKY N, JAPAKOVA U, ZHANG H F, et al. Effect of salinity on seed germination, growth and ion content in dimorphic seeds of *Salicornia europaea* L. (Chenopodiaceae)[J]. Plant Diversity, 2016, 38(4): 183-189.
[37] LEI T, MIDDLETON B. Germination potential of baldcypress (*Taxodium distichum*) swamp soil seed bank along geographical gradients[J]. Science of the Total Environment, 2021, 759: 143484.
[38] JANOUSEK C N, DUGGER B D, DRUCKER B M, et al. Salinity and inundation effects on productivity of brackish tidal marsh plants in the San Francisco Bay-Delta Estuary[J]. Hydrobiologia, 2020, 847: 4311-4323.
[39] WANG G D, MIDDLETON B, JIANG M. Restoration potential of sedge meadows in hand-cultivated soybean fields in northeastern China[J]. Restoration Ecology, 2013, 21(6): 801-808.
[40] MIDDLETON B A, SOUTER N J. Functional integrity of freshwater forested wetlands, hydrologic alteration, and climate change[J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2016, 2(1): e01200.
[41] MALLAKPOUR I, VILLARINI G. The changing nature of flooding across the central United States[J]. Nature Climate Change, 2015, 5(3): 250-254.

(责任编辑: 张明霞)