

DOI: 10.5846/stxb202006281666

冯璐, 刘京涛, 韩广轩, 张启浩, 彭玲. 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. 生态学报, 2021, 41(10): 3826-3835.

Feng L, Liu J T, Han G X, Zhang Q H, Peng L. Effects of groundwater level fluctuation on characteristics of soil seed banks in coastal wetlands of the Yellow River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 3826-3835.

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

冯璐¹, 刘京涛^{1,*}, 韩广轩², 张启浩³, 彭玲¹

1 滨州学院, 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州 256600

2 中国科学院烟台海岸带研究所, 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室 烟台 264003

3 杭州师范大学, 杭州 311121

摘要: 地下水位是影响湿地生态系统结构和功能的重要环境因子之一, 然而其如何影响滨海湿地土壤种子库特征尚不清楚。通过地下水位控制试验, 研究黄河三角洲滨海非潮汐湿地地下水位梯度 (-20、-60、-100 cm) 下, 土壤种子库密度、物种多样性等特征, 并通过土壤化学指标与对应的土壤种子库特征之间的通径分析, 探讨地下水位深度变化对土壤种子库特征的影响机理。研究发现, 在该区域秋季采样的土壤种子库中, 碱蓬和盐地碱蓬的种子数量最多; 地下水位变化对土壤种子库密度无显著影响, 但对土壤种子库的物种组成影响较大, 随着地下水位深度增加, 多年生草本植物种类呈增加趋势。整体上, 随着地下水位深度增加, 土壤种子库的 Margalef 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数随之增大。主成分分析表明, 土壤盐是影响黄河三角洲滨海湿地土壤种子库组成特征的主导因素, 贡献率为 69.482%, 土壤养分为次要影响因素, 贡献率为 23.710%, 进一步通径分析表明, 土壤水溶性盐总量对种子库物种多样性起到限制作用, 同时, 有效磷浓度通过水溶性盐总量对 Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数表现为间接负作用, 总磷浓度对种子库与地上植被相似性起到促进作用。研究表明, 黄河三角洲滨海湿地地下水位深度变化, 主要通过影响土壤水溶性盐总量, 进而影响土壤种子库物种多样性。

关键词: 地下水位; 物种多样性; 土壤种子库; 水溶性盐总量; 通径分析

Effects of groundwater level fluctuation on characteristics of soil seed banks in coastal wetlands of the Yellow River Delta

FENG Lu¹, LIU Jingtiao^{1,*}, HAN Guangxuan², ZHANG Qihao³, PENG Ling¹

1 Shandong Key Laboratory of Eco-Environmental Science for the Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256600, China

2 Key Laboratory of Coastal Environmental Process and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

3 Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China

Abstract: Soil seed banks are sources for the future regeneration of plants and play an important role in long-term population balance. Groundwater level is one of the dominant environmental factors that affects the structure and function of wetland ecosystem. While the effects and mechanisms of groundwater level on the characteristics of soil seed banks in coastal wetlands have received less attention. In order to study the effects of groundwater level on soil seed bank density, species diversity and similarity between seed banks and aboveground vegetation, a field control experiment for groundwater level was carried out following the gradients of -20 cm, -60 cm, and -100 cm in the coastal wetlands of the Yellow River Delta. The

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划课题(2017YFC0505904); 山东省自然科学基金项目(ZR2019PD008); 国家自然科学基金项目(41971126); 山东省高等学校青创科技支持计划(2019KJD010)

收稿日期: 2020-06-28; **网络出版日期:** 2021-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljteco@126.com

relationship between soil chemical properties and characteristics of the corresponding seed banks was analyzed by correlation analysis, principal component analysis and path analysis to explore how different groundwater levels affect the characteristics of the soil seed banks. The study showed that *Suaeda glauca* and *Suaeda salsa* had the largest number of seeds in the soil seed banks collected in autumn (both transient and persistent seed banks) in coastal saline wetland of the Yellow River Delta. The change of groundwater level had no significant effects on the density of soil seed banks, but it had significant effects on species composition. As the depth of groundwater level increased, the species number of perennial herbs were increasing. Overall, as the depth of groundwater level increased, Margalef index and Shannon-Wiener index of soil seed banks increased accordingly. A novelty finding is that the similarity (Sørensen index) between seed banks and above-ground vegetation increased as the groundwater level increased in 5—10 cm soil layer. Principal component analysis showed that soil salt including total water-soluble salt content and saline ions concentration was the dominant factors affecting soil seed bank characteristics with a contribution ratio of 69.482% and soil nutrients including total carbon, nitrogen and phosphorus concentration were the secondary factors with a contribution ratio of 23.710%. Path analysis showed that soil total water-soluble salt content had the greatest negative influence on Margalef index and Shannon-Wiener index of seed banks. While soil available phosphorus concentration showed indirectly negative effects through total water-soluble salt content on Margalef index and Shannon-Wiener index of seed banks. Total phosphorus concentration promotes the similarity between seed banks and the above-ground vegetation. Our results indicated that groundwater level fluctuation mainly affected species diversity of soil seed banks by changing the content of soil total water-soluble salt in coastal wetlands of the Yellow River Delta.

Key Words: groundwater level; species diversity; soil seed banks; total water-soluble salt content; path analysis

土壤种子库的形成是植物为了适应不可预知的环境而做出的“两面下注”均摊风险策略^[1],其作为生物多样性的一个重要组成部分,在植物种群的基因多样性维持^[2]和持续更新^[3]方面发挥重要作用,此外,土壤种子库与地上植被的关系密切^[4],在某种程度上决定了地上植物群落的结构和功能,因此一直是植物生态学研究的重要内容。黄河三角洲滨海湿地是世界上极具代表性的滨海河口湿地之一。由于地下水埋深较浅且矿化度高,以及强烈的蒸散发,导致黄河三角洲非潮汐湿地土壤盐渍化较为严重^[5],植物多样性较低,加之人为干扰^[6],原本脆弱的滨海湿地生态系统退化加剧^[7]。土壤种子库对于该区域植物群落稳定维持和植被自然恢复具有重要意义。

地下水位是影响湿地生态系统结构和功能的重要环境因子之一^[8],目前,对土壤种子库与地下水位关系的文献报道还相对较少,已有研究主要集中在草地和淡水生态系统,例如,将8种湿草甸植物种子分别埋藏到不同地下水位深度的(-5、-30 cm和-70 cm)生境中,其中4种植物种子表现出随着水位升高,种子生活力降低^[9];在草地采集原土于室内模拟不同地下水位(-5 cm和-30 cm),研究发现高水位条件有利于湿草地植物种子的存活,而低水位条件有利于干草地植物种子的存活^[10];在中国塔里木河下游,随着地下水位的下降,土壤种子库密度减小、物种多样性下降、生活型逐渐单一,同时,种子库与地上植被相似性系数也随之降低^[11]。对于滨海非潮汐湿地而言,地下水位深度会直接影响土壤水盐运移,改变土壤的物理和化学过程。随着地下水位深度变化,地上植物群落组成,尤其是优势植物种会发生相应改变^[12],直接影响土壤种子库的输入。同时,不同植物种子的生活力和萌发力对地下水位的响应存在种间差异。因此,滨海湿地地下水位深度变化可能导致土壤种子库物种组成呈现较大差异。

盐度是滨海湿地特征性环境因子之一,影响植物的生存和分布^[13]。种子萌发力和生活力对盐度的响应存在显著的种间和地域差异。例如,2种地中海盐沼优势植物的种子在高盐(含盐量大于3%)条件下,种子萌发率骤降甚至不萌发,但仍保持较高的生活力^[14];灯芯草种子在高盐条件下不能萌发,但种子生活力并没有降低^[15]。然而,荷兰西斯蒙尼克岛盐沼的几种优势植物,仅能形成瞬时或短期持久种子库^[16]。黄河三角洲滨海湿地受到海水和高矿化度的地下水共同作用,土壤含盐量较高,很多植物的种子对萌发条件要求较严

格,导致滨海湿地土壤种子库和地上植被差异较大^[6]。由于毛管水上升促进盐分的上移,地下水位深度变化引起的土壤盐度改变,可能是影响黄河三角洲滨海湿地土壤种子库物种组成及种子库与地上植被相似性的关键因子。

本研究基于黄河三角洲滨海湿地土壤种子库特征对地下水位深度变化的响应存在知识空白的现状,通过地下水位深度控制试验,研究黄河三角洲滨海湿地土壤种子库密度、物种多样性以及种子库与地上植被相似性如何响应地下水位深度变化,旨在回答:1) 土壤种子库密度、物种多样性以及种子库与地上植被相似性是否均随地下水位升高而降低;2) 土壤盐度是否为影响黄河三角洲滨海湿地土壤种子库组成特征的关键因子。以为黄河三角洲退化滨海湿地的植被自然恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

地下水控制试验在中国科学院烟台海岸带研究所黄河三角洲滨海湿地生态试验站(37°45'36"—37°46'15"N,118°58'38"—118°58'58"E)内布设。该试验站位于山东省东营市垦利区,黄河三角洲国家级自然保护区大汶流管理站西侧。地下水控制试验平台于2014年布设,采用单因素随机区组设计,共3个地下水位深度处理,分别为-20、-60、-100 cm。每个处理设4个重复,共计12个控制池,每个控制池面积为3 m×3 m。控制池底部用石子填充,厚度30 cm,上部用原土回填,上填土厚度1.2 m,地表距控制池上沿50 cm。水位自动供水系统根据连通器原理,保证控制池内水位维持设定水平。

1.2 植被调查和土壤取样方法

2018年10月,于试验站内的植物种子成熟散布后,在每个控制池内设置的面积为1 m×1 m的样方中(图1),调查统计植物物种组成和每种植物盖度,并用体积是100 cm³的环刀取0—5 cm和5—10 cm深度土壤各3份,2份同深度土壤样品混匀用于种子库分析,1份用于土壤化学指标分析,种子库和土壤化学指标测试与控制池重复一致均为4个重复,共计48份土样(3地下水位深度×4重复×2土壤深度×2袋土样),所有土样带回实验室内4℃暗保存。

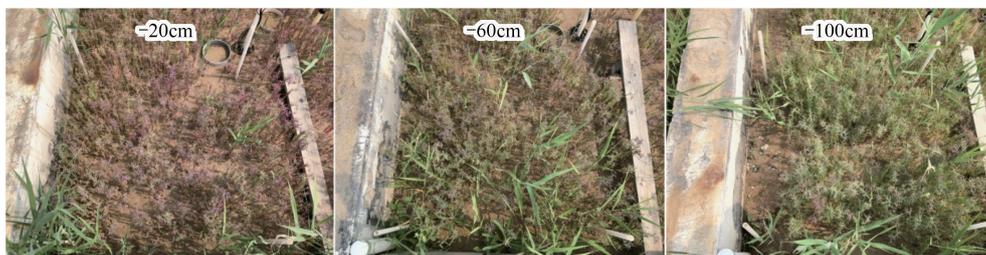


图1 不同地下水位深度控制池的样方内的植物群落

Fig.1 Vegetation community composition in the controlled pools of different groundwater level

1.3 萌发试验

2019年3月,在滨州学院黄河三角洲生态环境研究中心的温室内进行种子库萌发试验,根据幼苗形态鉴别土壤中可自然萌发的种子的数量和种类^[17]。将用于种子库分析的土样去除石块和植物根系等杂质,将每个自封袋内的土样分别平铺于24个尺寸为长27 cm×宽21 cm×高4.7 cm的亚克力材质托盘内,土层厚度约2 cm。每天喷洒定量的蒸馏水,使土壤保持适宜的湿度。试验期间,每天观察土壤中种子萌发情况,长出的幼苗经鉴定后拔除。试验持续5个月,每个月翻动土壤,使种子库充分萌发,连续2周无幼苗萌发后结束试验。

1.4 土壤化学指标测试方法

将用于化学指标测试分析的土样,除去枯枝、石块等杂质,烘干至恒重,研磨后过2 mm网筛。分别使用台式pH计(FE28-Standard)和电导率仪(DDSJ-308A)测定土壤去离子水浸提液的pH值和电导率,水土比

为 5:1,土壤水溶性盐总量 (TWSS) 直接用电导率值表示^[18]。使用元素分析仪 (Elementar Vario EL III) 测定总碳 (TC) 和总氮 (TN)。采用重铬酸钾容量法 (外加热法) 测定土壤总有机碳 (TOC)。采用钼锑抗比色法测定总磷 (TP) 和有效磷 (A-P)。使用火焰原子吸收分光光度计 (Shimadzu AA 6800) 测定 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度。使用离子色谱仪 (Dionex IC 2000) 测定 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度^[19]。

1.5 数据处理

本试验采用 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Sørensen 相似性指数对土壤种子库特征进行描述^[20]。计算公式如下:

$$\text{Margalef 丰富度指数} = (S-1)/\ln N$$

$$\text{Shannon-Wiener 多样性指数} = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$\text{Sørensen 相似性指数} = 2w/(a+b)$$

式中, S 为种子库的物种数; N 为种子库中的种子总数; P_i 为第 i 种植物的种子数占种子库中种子总数的比值; w 为地上植被和土壤种子库共有物种的数量; a 和 b 分别为地上植被和土壤种子库各自拥有的物种数。

用 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析,用 GraphPad prism 6 软件进行制图。采用单因素方差分析检验地下水位深度变化对土壤种子库密度、Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数、Sørensen 指数的影响。多重比较采用最小显著差异 (LSD) 法检验 ($\alpha=0.05$)。采用 Pearson 相关分析和主成分 (PCA) 分析筛选主要影响因素^[21],采用多元逐步回归和通径系数分析方法^[22],将自变量与因变量的简单相关系数分解为直接通径系数和间接通径系数,比较土壤各化学指标对种子库特征的直接和间接影响的相对重要性。

2 结果与分析

2.1 地下水位深度变化对地上植物群落物种组成的影响

由表 1 可知,控制池内共有 5 种植物,隶属于 4 科 4 属。随地下水位深度增加,地上植物物种数随之增加,且多年生草本植物种类呈增加趋势。盐地碱蓬在 3 种地下水位深度条件下均为优势植物,芦苇在 3 种地下水位深度条件下均可生长,但数量较少。鹅绒藤和苜蓿菜在地下水位深度为 -20 cm 时,无法生长,在地下水位深度为 -60 cm 和 -100 cm 时,可以生长但数量极少。

表 1 不同地下水位深度的地上植物种类组成

Table 1 Species composition of aboveground vegetation of different groundwater level depth

| 地下水位深度/cm Depth of groundwater level | 物种组成 Species composition |
|---|---|
| -20 | 碱蓬 (<i>Suaeda glauca</i>)、芦苇 (<i>Phragmites australis</i>)、盐地碱蓬 (<i>Suaeda salsa</i>) |
| -60 | 碱蓬 (<i>Suaeda glauca</i>)、芦苇 (<i>Phragmites australis</i>)、鹅绒藤 (<i>Cynanchum chinense</i>)、苜蓿菜 (<i>Sonchus arvensis</i>) |
| -100 | 碱蓬 (<i>Suaeda glauca</i>)、盐地碱蓬 (<i>Suaeda salsa</i>)、芦苇 (<i>Phragmites australis</i>)、苜蓿菜 (<i>Sonchus arvensis</i>)、鹅绒藤 (<i>Cynanchum chinense</i>) |

2.2 地下水位深度变化对土壤种子库特征的影响

土壤种子库共记录到 6 种植物,隶属于 4 科 5 属。不同地下水位深度的土壤种子库中,盐地碱蓬、碱蓬种子数量占比之和均超过 70% (图 2)。考虑土层深度与否,地下水位深度对土壤种子库密度均无显著影响,但总体上地下水位深度为 -60 cm 的土壤种子库密度分别比地下水位深度为 -20 cm 和 -100 cm 的土壤种子库密度高 79.2% 和 63.8% (图 3)。随地下水位深度增加,种子库 Margalef 指数呈增加趋势。不考虑土层深度时,地下水位深度为 -60 cm 和 -100 cm 的土壤种子库 Margalef 指数分别显著高于地下水位深度为 -20 cm 的土壤种子库 Margalef 指数 ($P=0.003$; $P=0.000$); 当土层深度为 5—10 cm 时,随地下水位深度增加, Margalef 指数显著增加 ($P=0.003$; $P=0.000$; $P=0.004$) (图 4)。

整体上,随地下水位深度增加,种子库 Shannon-Wiener 指数逐渐增大;考虑土层深度时,在 0—5 cm 和 5—10 cm 土层均表现为,地下水位深度为-60 cm ($P=0.042$; $P=0.043$) 和-100cm ($P=0.011$; $P=0.017$) 的土壤种子库 Shannon-Wiener 指数分别显著高于地下水位深度为-20 cm 的土壤种子库(图 5)。整体上,地下水位深度变化对 Sørensen 指数无显著影响,仅当土层深度为 5—10 cm 时,地下水位深度为-20 cm 和-60 cm 的 Sørensen 指数显著高于地下水位深度为-100 cm 的 Sørensen 指数(图 6)。

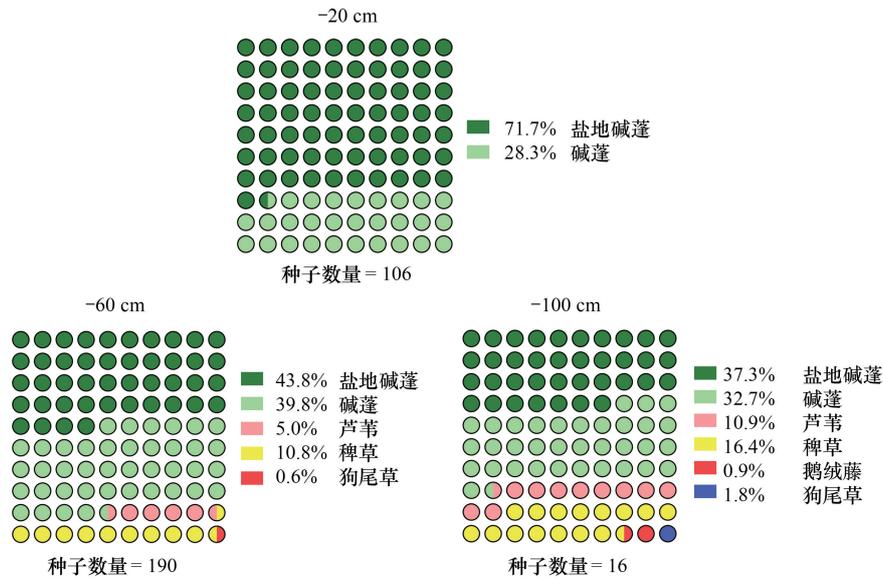


图 2 不同地下水位深度的土壤种子库物种组成

Fig.2 Species composition of soil seed banks at different groundwater levels. "Total" indicates number of seedlings

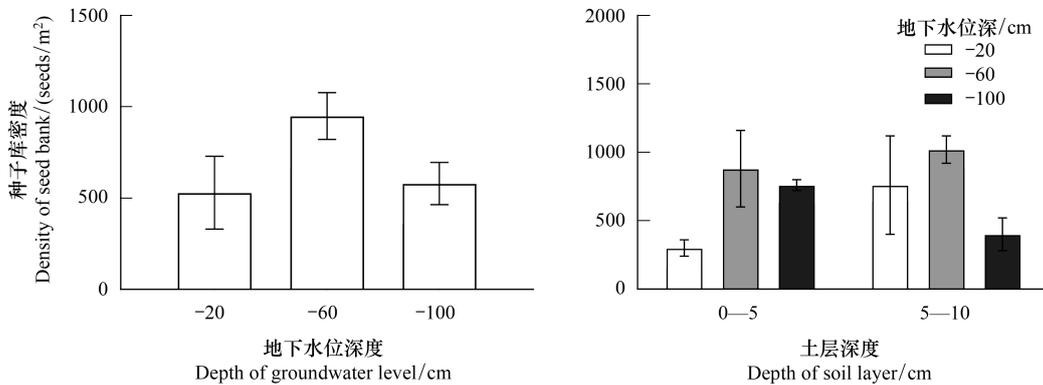


图 3 不同地下水位深度的土壤种子库密度比较

Fig.3 Comparison of density of seed bank at different depth of groundwater level

2.3 土壤化学指标对种子库特征的影响

2.3.1 主要影响因子筛选

土壤化学指标与种子库密度无显著相关关系(图 7)。pH 值与种子库的 Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数呈显著的正相关关系, TWSS、A-P、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度均与 Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数呈显著的负相关关系(图 7)。TC、TOC、TP 和 SO_4^{2-} 浓度与 Sørensen 指数呈显著的正相关关系(图 7)。

土壤化学指标的主成分分析结果显示,13 个因子可概括为 2 个主成分,累计贡献率为 93.192%。第 1 个主成分主要由土壤盐决定,贡献率为 69.482%,其中 TWSS、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 有较高载荷。第 2 个主成分主要由土壤养分决定,贡献率为 23.710%,其中 TC、TN 和 TP 有较高载荷(表 2)。

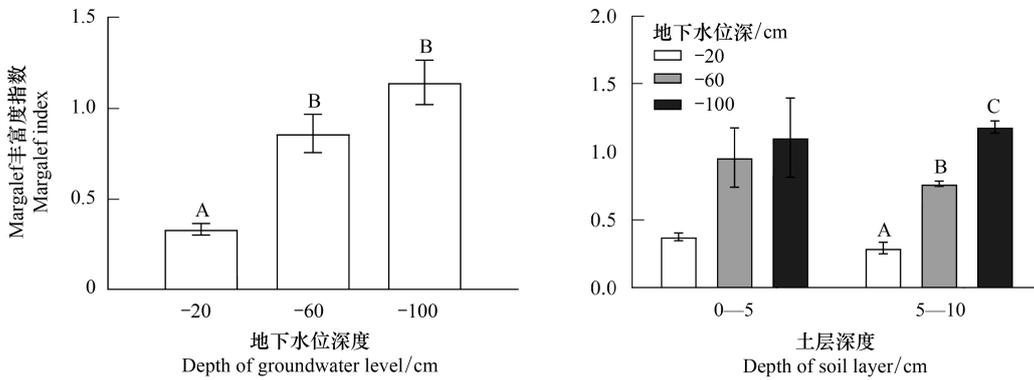


图 4 不同地下水位深度的土壤种子库物种丰富度指数比较

Fig.4 Comparison of Margalef index of seed bank at different depth of groundwater level

不同字母表示有显著差异 ($P < 0.05$)

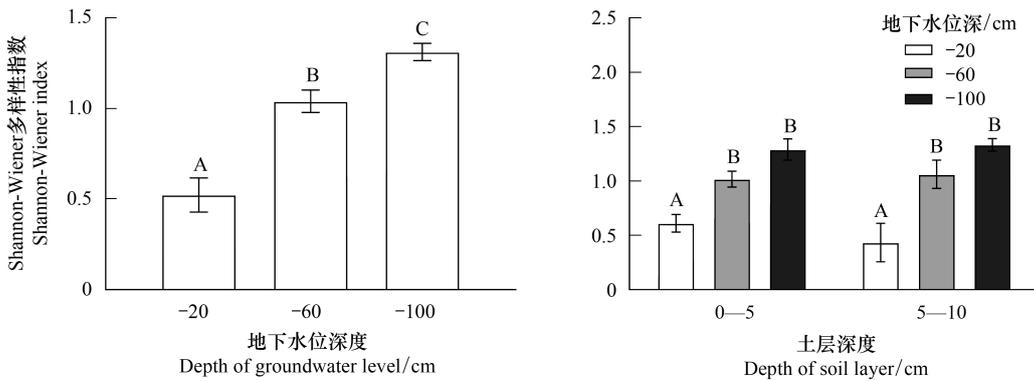


图 5 不同地下水位深度的土壤种子库多样性指数比较

Fig.5 Comparison of Shannon-Wiener index of seed bank at different depth of groundwater level

不同字母表示有显著差异 ($P < 0.05$)

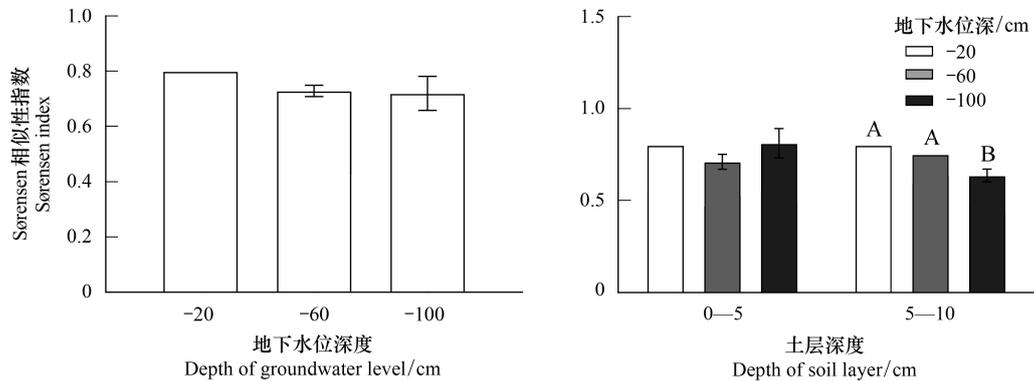


图 6 不同地下水位深度的土壤种子库与地上植被相似性指数比较

Fig.6 Comparison of Sørensen index of seed bank and vegetation at different depth of groundwater level

不同字母表示有显著差异 ($P < 0.05$)

选择与种子库特征指标显著相关且在主成分分析中载荷较高的 8 个土壤化学指标作为自变量 (TWSS、TC、TN、TP、A-P、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^-), 分别与因变量土壤种子库密度、Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数和 Sørensen 指数进行多元逐步回归分析。分析结果显示, 对 Margalef 指数筛选出有显著影响的因子为 TWSS 和 A-P; 对 Shannon-Wiener 指数筛选出有显著影响的因子为 TWSS、A-P 和 TP; 对 Sørensen 相似性指数筛选出有

显著影响的因子为 TP。

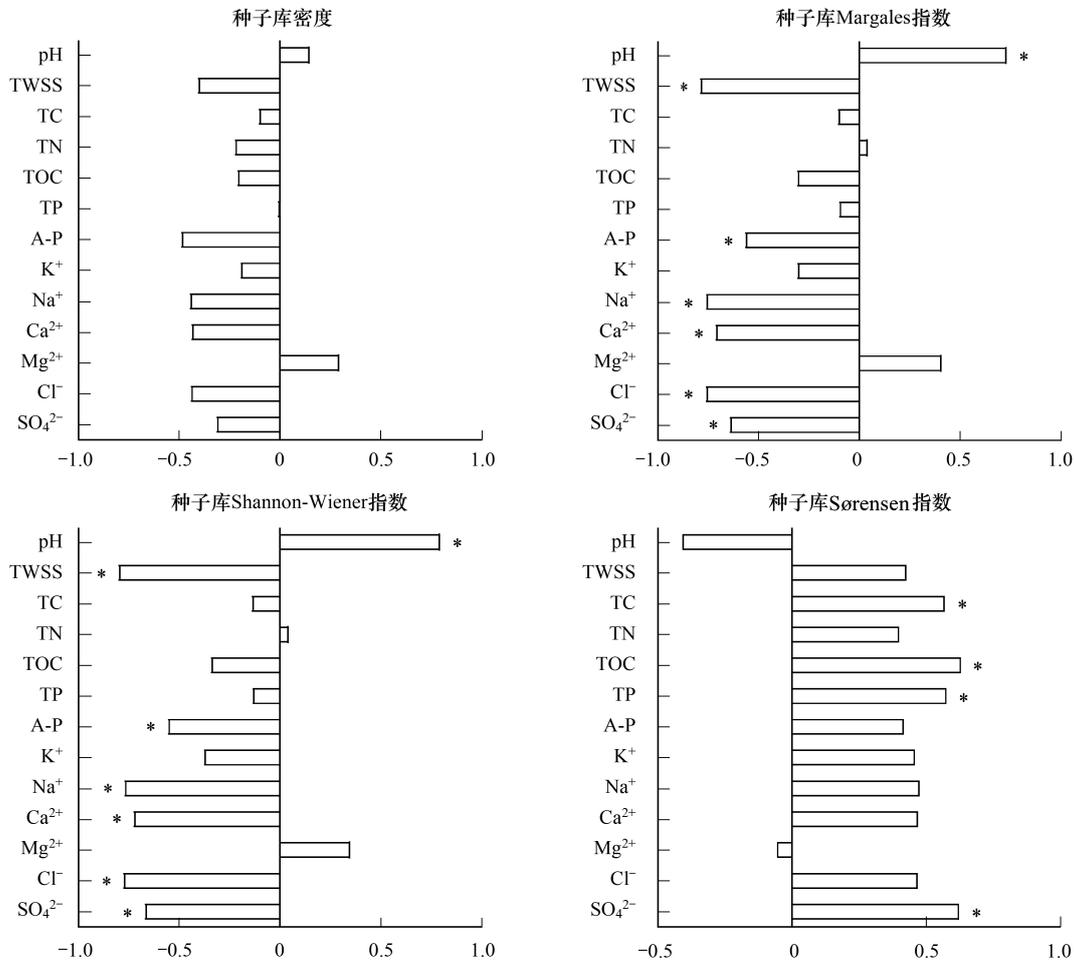


图 7 土壤化学指标与种子库密度、Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数及 Sørensen 指数的相关关系

Fig.7 Correlation coefficients among soil chemical characteristics and soil seed bank density, Margalef index, Shannon-Wiener index and Sørensen index

“*”表示显著相关 ($P < 0.05$); TWSS: 土壤水溶性盐总量 Total water soluble salt content; TC: 总碳浓度 Total carbon concentration; TN: 总氮浓度 Total nitrogen concentration; TOC: 总有机碳浓度 Total organic carbon concentration; TP: 总磷浓度 Total phosphorus concentration; A-P: 有效磷浓度 Available phosphorus concentration

表 2 土壤化学指标的主成分分析

Table 2 PCA analysis of soil chemical characteristics

| 主成分 Principal component | 成分 1 Component 1 | 成分 2 Component 2 |
|---|---------------------|---------------------|
| pH 值 pH value | -0.830 | -0.278 |
| 土壤水溶性盐总量 Total water soluble salt content | 0.994 | 0.066 |
| 总碳浓度 Total carbon concentration | 0.290 | 0.930 |
| 总氮浓度 Total nitrogen concentration | 0.247 | 0.919 |
| 有机碳浓度 Organic carbon concentration | 0.520 | 0.818 |
| 总磷浓度 Total phosphorus concentration | 0.236 | 0.953 |
| 有效磷浓度 Available phosphorus concentration | 0.893 | 0.357 |
| 钾离子浓度 K ⁺ concentration | 0.531 | 0.824 |
| 钠离子浓度 Na ⁺ concentration | 0.990 | 0.128 |
| 钙离子浓度 Ca ²⁺ concentration | 0.968 | 0.242 |
| 镁离子浓度 Mg ²⁺ concentration | -0.412 | 0.754 |
| 氯离子浓度 Cl ⁻ concentration | 0.990 | 0.134 |
| 硫酸根离子浓度 SO ₄ ²⁻ concentration | 0.855 | 0.505 |
| 贡献率 Contribution rate/% | 69.482 | 23.710 |

2.3.2 土壤化学指标与种子库特征的通径分析

土壤化学指标对种子库 Margalef 指数的直接作用系数的绝对值由大到小依次为:TWSS>A-P 浓度>TP 浓度>TN 浓度>TC 浓度>Ca²⁺浓度>Na⁺浓度>Cl⁻浓度;对种子库 Shannon-Wiener 指数的直接作用系数的绝对值由大到小依次为:TWSS>A-P 浓度>TP 浓度>Na⁺浓度>Cl⁻浓度>TC 浓度>Ca²⁺浓度>TN 浓度;对 Sørensen 指数的直接作用系数的绝对值由大到小依次为:TP 浓度>TN 浓度>Na⁺浓度>Cl⁻浓度>TWSS>Ca²⁺浓度>A-P 浓度>TC 浓度。

TWSS 和 A-P 共同对种子库 Margalef 指数影响率为 77.7% ($R^2=0.777$, $P=0.001$),其中 TWSS 为直接负作用,A-P 通过 TWSS 表现为间接负作用(表 3);TWSS、A-P 和 TP 共同对种子库 Shannon-Wiener 指数的影响率为 89.9% ($R^2=0.899$, $P=0.001$),其中 TWSS 为直接负作用,A-P 通过 TWSS 表现为间接负作用,TP 通过 A-P 表现为间接正作用(表 4);TP 对种子库 Sørensen 指数的影响率为 33.2% ($R^2=0.332$, $P=0.05$),为直接正作用。

表 3 主要因子对土壤种子库 Margalef 指数的通径分析

Table 3 Path analysis between Margalef index of soil seed banks and main soil chemical characteristics

| 因子 Factor | 相关系数 Correlation coefficient | 直接通径系数 Direct path coefficient | 间接通径系数 Indirect path coefficient | |
|--------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------|
| | | | TWSS | A-P |
| TWSS | -0.790* | -1.680* | — | 0.889 |
| A-P | -0.565* | 0.972* | -1.537 | — |

TWSS: 水溶性盐总量 Total water soluble salt content; A-P: 有效磷浓度 Available phosphorus concentration

表 4 主要因子对土壤种子库 Shannon-Wiener 指数的通径分析

Table 4 Path analysis between Shannon-Wiener index of soil seed banks and main soil chemical characteristics

| 因子 Factor | 相关系数 Correlation coefficient | 直接通径系数 Direct path coefficient | 间接通径系数 Indirect path coefficient | | | |
|--------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------|-----------|-----------|
| | | | TWSS | A-P | TP | 合计 Total |
| TWSS | -0.802 | -2.187 | — | 1.4823 | -0.097632 | 1.384668 |
| A-P | -0.556 | 1.62 | -2.001105 | — | -0.174246 | -2.175351 |
| TP | -0.135 | -0.339 | -0.629856 | 0.83268 | — | 0.202824 |

TP: 总磷浓度 Total phosphorus concentration

3 讨论

3.1 地下水位深度变化对土壤种子库物种组成的影响

不同地下水位深度的土壤种子库中,盐地碱蓬和碱蓬种子数量均占较大比例。土壤种子库物种组成很大程度上取决于种子库的输入和种子持久性。黄河三角洲滨海湿地一年生植物种数比例高达 31.21%^[23],其中以盐地碱蓬和碱蓬分布最广,它们生产的种子体型较小且近球形,更易进入土壤^[24]。然而,该区域的其他优势植物,如芦苇、白茅 (*Imperata cylindrica*)、怪柳 (*Tamarix chinensis*) 等植物种子外部结构十分相似,均具有附属物且质量较轻,不易进入土壤,因此从种子库输入角度可以解释,该区域土壤种子库中盐地碱蓬和碱蓬种子所占比例最高的原因。根据种子生活力(种子发芽的潜在能力或种胚具有的生命力,seed viability)维持时间长短划分,生活力短于 1 年的种子构成的种子库为瞬时种子库,介于 1—5 年的为短期持久种子库,超过 5 年的为长期持久种子库^[25]。瞬时种子库对地上植被及时补充,持久种子库决定生态系统在遭受干扰后的植被恢复方向。一年生植物通常形成持久种子库避免种群灭绝的风险^[26],碱蓬和盐地碱蓬均属于一年生草本植物,而芦苇、白茅、怪柳均属多年生植物,研究表明一年生植物种子的持久性普遍大于多年生植物种子^[27],在土壤盐度较高的滨海湿地生态系统,碱蓬和盐地碱蓬的种子通过多态性、休眠和萌发行为多样性等耐盐机制表现出较强的耐盐能力^[28],因此,从种子持久性角度,也可以解释本研究中碱蓬和盐地碱蓬种子数量所占比例最高的原因。

3.2 影响滨海湿地土壤种子库物种多样性的主要因子

本文中土壤种子库密度并未受到各化学指标的影响,而相似的研究表明,青藏高原草地土壤种子库密度与土壤 pH 显著负相关,与土壤湿度和有机质含量显著正相关^[29],二者研究结果不同的可能原因是,1) 种子库取样时间不同,本文的取样时间是 10 月,包含了瞬时和持久土壤种子库,而后者的取样时间是 8 月,基本为持久土壤种子库;2) 本研究中碱蓬和盐地碱蓬种子数量比例较高,在 3 种不同地下水位深度条件下,碱蓬均能很好地生长繁殖,生产大量种子,并形成持久种子库^[30],因此种子库密度并未受到环境因子的影响。然而,种子库物种多样性受到土壤化学指标的显著影响,例如 Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数均与土壤 pH 值正相关,与土壤水溶性盐总量(TWSS)、有效磷浓度(A-P)、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度负相关。主成分分析提取的 2 个主成分,分别为土壤盐和养分,即埋藏环境的盐分和养分是影响种子库的重要因素,其中土壤水溶性盐总量是影响种子库物种多样性的关键因子,且为直接的负作用,这与我们第 2 个假设一致。此外,土壤有效磷浓度在水溶性盐总量的影响下,显著影响种子库多样性,表现为间接的负作用,这与松嫩平原盐碱草地的土壤种子库研究结果相似,有效磷与种子库物种组成显著相关^[31]。土壤有效磷浓度受到土壤自然化学属性和生物属性的影响,由土壤化学指标间的相关分析可知,土壤有效磷浓度与水溶性盐总量显著正相关,很可能是土壤盐度限制有效磷的释放。尽管本研究没有测定土壤微生物的活性,但已有研究表明,较高的土壤有效磷浓度促进微生物的代谢和增加群落多样性^[32],加速部分种子的分解失活,进而可能降低种子库物种多样性。目前,对于滨海湿地而言,环境因子对土壤种子库影响研究仍相对匮乏。但本研究结果与已有的研究结论趋于一致,如位于美国路易斯安那州的滨海湿地,土壤种子库物种组成受到水淹和土壤盐度影响,持续水淹和高盐条件降低种子库的萌发和物种丰富度^[33];又如,天津滨海盐碱湿地,整体上土壤种子库物种组成特征受到盐度、有机质和 pH 值影响较大^[34]。

3.3 种子库与地上植被群落相似性

种子库与地上植被相互影响,地上植被生产的种子输入土壤,是土壤种子库形成的基础,而种子库中的种子在环境条件适宜时萌发,在一定程度上决定着地上植物群落的结构^[35]。本文中,3 种地下水位深度的土壤种子库与地上植被相似性差异较小(0.63—0.81),整体上相似性指数偏高,这与,黄河三角洲滨海湿地较高的土壤盐度导致土壤种子库和地上植被差异较大的研究结果不一致^[6]。可能原因是 1) 本研究的土壤样品采集于试验站内的人工控制平台,由于控制池有一定高度,阻碍了风对种子传播,池内植被产生的种子大部分散布于内,可能增加了种子库与地上植被共有物种的概率;2) 本研究的土壤种子库样品既包含持久种子库,又包含瞬时种子库,可能会导致种子库与地上植被相似性较高^[36];3) 地下水位控制平台修建时,控制池内的土壤经由原土回填,对土壤种子库产生了较大干扰,干扰后的土壤种子库与地上植被的相似性指数较高,这与较多研究的结果一致^[37-38]。因此,若要进一步研究滨海湿地地下水位深度对种子库与地上植被相似性的影响,需在自然生境进行取样分析。总碳、有机碳、总磷和 SO_4^{2-} 浓度同土壤种子库与地上植被相似性呈显著正相关,其中,总磷浓度对相似性指数起直接的正作用,表明土壤养分对该区域的种子库与地上植被相似性起到促进作用,可能原因是较多的土壤养分会促进更多的种子萌发,进而增加了种子库与地上植被相似性。

4 结论

黄河三角洲滨海湿地地下水位深度变化显著影响土壤种子库物种多样性,具体表现为随地下水位升高,土壤种子库 Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数均降低,主要归因于地下水位变化引起的土壤水溶性盐总量改变,即种子库物种多样性随着土壤盐度升高而降低。因此,针对该区域的退化生境植被的自然恢复,可采取人为降低地下水位或土壤水溶性盐总量的措施,有效增加土壤种子库物种多样性,提高地上植被群落自然恢复潜力。

参考文献(References):

- [1] Ooi M K J, Auld T D, Denham A J. Climate change and bet-hedging: interactions between increased soil temperatures and seed bank persistence. *Global Change Biology*, 2009, 15(10): 2375-2386.

- [2] Tellier A. Persistent seed banking as eco-evolutionary determinant of plant nucleotide diversity: novel population genetics insights. *New Phytologist*, 2019, 221(2): 725-730.
- [3] Saatkamp A, Poschlod P, Venable D L. The functional role of soil seed banks in natural communities//Gallagher R S, ed. *Seeds: The Ecology of Regeneration in Plant Communities*. 3rd ed. CABI, Wallingford, 2014: 263-295.
- [4] 马红媛, 梁正伟, 吕丙盛, 杨昊谕, 王淑红. 松嫩碱化草甸土壤种子库格局、动态研究进展. *生态学报*, 2012, 32(13): 4261-4269.
- [5] Fan X M, Pedroli B, Liu G H, Liu Q S, Liu H G, Shu L C. Soil salinity development in the yellow river delta in relation to groundwater dynamics. *Land Degradation & Development*, 2012, 23(2): 175-189.
- [6] Xie T, Cui B S, Bai J H, Li S Z, Zhang S Y. Rethinking the role of edaphic condition in halophyte vegetation degradation on salt marshes due to coastal defense structure. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2018, 103: 81-90.
- [7] Jevrejeva S, Jackson L P, Riva R E M, Grinstead A, Moore J C. Coastal sea level rise with warming above 2 °C. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(47): 13342-13347.
- [8] Feng W J, Mariotte P, Xu L G, Buttler A, Bragazza L, Jiang J H, Santonja M. Seasonal variability of groundwater level effects on the growth of *Carex cinerascens* in lake wetlands. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(1): 517-526.
- [9] Kaiser T, Pirhofer-Walzl K. Does the soil seed survival of fen-meadow species depend on the groundwater level? *Plant and Soil*, 2015, 387(1/2): 219-231.
- [10] Bekker R M, Oomes M J M, Bakker J P. The impact of groundwater level on soil seed bank survival. *Seed Science Research*, 1998, 8(3): 399-404.
- [11] 徐海量, 李吉玫, 叶茂. 塔里木河下游不同地下水位下土壤种子库特征. *生态学杂志*, 2008, 27(3): 305-310.
- [12] You X G, Liu J L. Describing the spatial-temporal dynamics of groundwater-dependent vegetation (GDV): a theoretical methodology. *Ecological Modelling*, 2018, 383: 127-137.
- [13] Schoolmaster Jr D R, Stagg C L. Resource competition model predicts zonation and increasing nutrient use efficiency along a wetland salinity gradient. *Ecology*, 2018, 99(3): 670-680.
- [14] Rubio-Casal A E, Castillo J M, Luque C J, Figueroa M E. Influence of salinity on germination and seeds viability of two primary colonizers of Mediterranean salt pans. *Journal of Arid Environments*, 2003, 53(2): 145-154.
- [15] Greenwood M E, MacFarlane G R. Effects of salinity and temperature on the germination of *Phragmites australis*, *Juncus kraussii*, and *Juncus acutus*: Implications for estuarine restoration initiatives. *Wetlands*, 2006, 26(3): 854-861.
- [16] Wolters M, Bakker J P. Soil seed bank and driftline composition along a successional gradient on a temperate salt marsh. *Applied Vegetation Science*, 2002, 5(1): 55-62.
- [17] Zhang C H, Willis C G, Ma Z, Ma M J, Csontos P, Baskin C C, Baskin J M, Li J Y, Zhou H K, Zhao X Q, Yao B Q, Du G Z. Direct and indirect effects of long-term fertilization on the stability of the persistent seed bank. *Plant and Soil*, 2019, 438(1/2): 239-250.
- [18] 江洪, 白莹莹, 饶应福, 陈冲, 蔡永立. 新围垦盐土地三种人工林群落细根生物量及其影响因素分析. *植物学报*, 2016, 51(3): 343-352.
- [19] Zhao X M, Xia J B, Chen W F, Chen Y P, Fang Y, Qu F Z. Transport characteristics of salt ions in soil columns planted with *Tamarix chinensis* under different groundwater levels. *PLoS ONE*, 2019, 14(4): e0215138.
- [20] Zhang J, Liu G B, Xu M X, Xu M, Yamanaka N. Influence of vegetation factors on biological soil crust cover on rehabilitated grassland in the hilly Loess Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(4): 1099-1105.
- [21] 李平, 王冬梅, 丁聪, 刘若莎, 张鹏, 张琳琳. 黄土高寒区典型植被类型土壤入渗特征及其影响因素. *生态学报*, 2020, 40(5): 1610-1620.
- [22] 冯璐, 卜兆君, 吴玉环, 刘莎莎, 刘超. 泥炭地特征性环境因子促进泥炭藓持久孢子库的形成. *植物生态学报*, 2019, 43(6): 512-520.
- [23] 张绪良, 叶思源, 印萍, 袁红明. 黄河三角洲滨海湿地的维管束植物区系特征. *生态环境学报*, 2009, 18(2): 600-607.
- [24] Thompson K, Band S R, Hodgson J G. Seed size and shape predict persistence in soil. *Functional Ecology*, 1993, 7(2): 236-241.
- [25] Thompson K, Bakker J P, Bekker R M. *The Soil Seed Banks of North West Europe: Methodology, Density and Longevity*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [26] Lampei C, Metz J, Tielbörger K. Clinal population divergence in an adaptive parental environmental effect that adjusts seed banking. *New Phytologist*, 2017, 214(3): 1230-1244.
- [27] Thompson K, Hodgkinson D J. Seed mass, habitat and life history: a re-analysis of salisbury (1942, 1974). *New Phytologist*, 1998, 138(1): 163-167.
- [28] 张科, 田长彦, 李春俭. 一年生盐生植物耐盐机制研究进展. *植物生态学报*, 2009, 33(6): 1220-1231.
- [29] Ma M J, Dalling J W, Ma Z, Zhou X H. Soil environmental factors drive seed density across vegetation types on the Tibetan Plateau. *Plant and Soil*, 2017, 419(1/2): 349-361.
- [30] Ma H Y, Li J P, Yang F, Lü X T, Pan Y P, Liang Z W. Regenerative role of soil seed banks of different successional stages in a saline-alkaline grassland in Northeast China. *Chinese Geographical Science*, 2018, 28(4): 694-706.
- [31] Ma H Y, Yang H Y, Liang Z W, Ooi M K J. Effects of 10-year management regimes on the soil seed bank in saline-alkaline grassland. *PLoS ONE*, 2015, 10(4): e0122319.
- [32] Wang T Q, Yuan Z M, Yao J. A combined approach to evaluate activity and structure of soil microbial community in long-term heavy metals contaminated soils. *Environmental Engineering Research*, 2018, 23(1): 62-69.
- [33] Baldwin A H, McKee K L, Mendelsohn I A. The influence of vegetation, salinity, and inundation on seed banks of oligohaline coastal marshes. *American Journal of Botany*, 1996, 83(4): 470-479.
- [34] 贺梦璇, 莫训强, 李洪远, 孟伟庆. 天津滨海典型盐碱湿地土壤种子库特征及 CCA 分析. *生态学杂志*, 2014, 33(7): 1762-1768.
- [35] 刘庆艳, 姜明, 吕宪国, 王国栋. 湿地土壤种子库与地上植被相似性关系研究评述. *生态学报*, 2014, 34(24): 7465-7474.
- [36] Peco B, Ortega M, Levassor C. Similarity between seed bank and vegetation in Mediterranean grassland: a predictive model. *Journal of Vegetation Science*, 1998, 9(6): 815-828.
- [37] Touzard B, Amiaud B, Langlois E, Lemauviel S, Clément B. The relationships between soil seed bank, aboveground vegetation and disturbances in an eutrophic alluvial wetland of Western France. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2002, 197(3): 175-185.
- [38] 张起鹏, 王建, 赵成章, 张志刚, 冯婉婉, 王珂. 高寒干旱草原披针叶黄华植物群落土壤种子库与地上植被的关系. *生态学报*, 2017, 37(14): 4619-4626.