

淹水发生与持续时间对退化盐碱沼泽芦苇生长及土壤理化性质的影响

李晓宇¹, 齐明明², 李 聪², 李秀军¹, 刘兴土¹, 王 颖³, 蔺吉祥²

(1. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 中国科学院 湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102;

2. 东北林业大学 盐碱地生物资源环境研究中心, 东北油田盐碱植被恢复与重建教育部重点实验室,

哈尔滨 150040; 3. 吉林建筑大学 松辽流域水环境教育部重点实验室, 长春 130118)

摘 要:比较了不同淹水发生时间与持续时间对退化盐沼芦苇生长生理以及盐碱土壤理化性质的影响。结果表明,随着淹水持续时间的增加,芦苇株高显著增加,长期淹水条件下芦苇株高最高(FD₅),但地上和地下生物量呈先增加后下降趋势,淹水持续 2 月(FD₃)的生物量最高,Na⁺,K⁺ 浓度虽然不规则变化,但最低浓度值出现在 FD₃ 处理中。另外,盐碱土壤理化指标(pH 值,EC,Na⁺,Ca²⁺,HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻ 含量)随着淹水持续时间的增加呈先降低后上升趋势,土壤理化性质最优的处理为 FD₃。随着淹水发生时间的后移,芦苇的株高和地上生物量不变,地下生物量呈先增加后下降趋势,Na⁺ 含量呈先下降后上升趋势,芦苇地上器官的 K⁺ 含量以及盐碱土壤的 pH 值,EC,Na⁺,Ca²⁺,HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻ 含量表现为生长初期淹水低于生长后期淹水处理(FO₁,FO₂ 优于 FO₃,FO₄)。无论淹水发生时间还是淹水持续时间均对土壤的有机质,K⁺,Mg²⁺,Cl⁻,SO₄²⁻ 含量没有显著影响。因此,6 月,7 月份是芦苇生态需水期,在此阶段补充充足水分对芦苇的生长恢复具有显著意义,并能改善盐碱土壤的理化性质。

关键词:淹水; 发生和持续时间; 退化芦苇; 盐碱土壤

中图分类号:Q142.8,S153

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)06-0083-07

Effects of Flooding Occurrence Time and Duration on *P. australis* Growth and Soil Physical-Chemical Characteristics in Degraded Inland Marshes

LI Xiaoyu¹, QI Mingming², LI Cong², LI Xiujun¹, LIU Xingtu¹, WANG Ying³, LIN Jixiang²

(1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 2. Alkali Soil

Natural Environmental Science Center, Northeast Forestry University/Key Laboratory of Saline-alkali

Vegetation Ecology Restoration in Oil Field, Ministry of Education, Harbin 150040, China; 3. Key Laboratory

of Songliao Aquatic Environment, Ministry of Education, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China)

Abstract: Pot experiments were conducted to compare effects of flooding occurrence time and duration on *Phragmites australis* growth and soil physical-chemical characteristics in degraded inland marshes. The results showed that both flooding occurrence and duration time affected the growth of *P. australis* and saline-alkaline soil characteristics. With the increase of flooding duration, height of *P. australis* increased with the highest value in FD₅. The above and under ground biomass increased first and then decreased with the highest value in FD₃ (2 months flooding). Although Na⁺ and K⁺ contents did not show a regular change, they was the lowest in FD₃. The characteristic parameters (pH value, EC, Na⁺, Ca²⁺, HCO₃⁻ and CO₃²⁻ content) decreased first and then increased with the lowest value in FD₃ too. With delay of flooding occurrence time, there was no change on height and aboveground biomass of *P. australis*, but the tendency of underground biomass increased first and then decreased. Na⁺ had opposite tendency of underground biomass. The K⁺ content and the main characteristics of soil showed lower value in FO₁ and FO₂ treatments than FO₃ and FO₄ treatments. Meanwhile, flooding occurrence and duration time had no significant effects on organic matter, K⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ contents. Therefore, June and July was the key growth period with

收稿日期:2015-11-20

修回日期:2015-12-14

资助项目:国家重大科学研究计划项目(2012CB956100);国家自然科学基金资助项目(31100403);吉林省科技发展计划项目(20130102036JC)

第一作者:李晓宇(1983—),女,辽宁鞍山人,博士,副研究员,主要从事植物逆境生理与湿地恢复研究。E-mail:lixiaoyu@iga.ac.cn

通信作者:蔺吉祥(1985—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,讲师,主要从事植物生理生态学研究。E-mail:linjixiang@nefu.edu.cn

enough water. Supply water at this stage was quite important for restoring *P. australis* growth, and also improved the quality of saline-alkaline soil.

Keywords: flooding; occurrence and duration; degraded *P. australis*; saline-alkaline soils

内陆盐碱沼泽主要是由含盐的水、土以及耐盐植物所组成的地球上稀有的生态系统。我国内陆盐沼主要分布在东北松嫩平原西部,这些湿地不同于常规的以 Na^+ , Cl^- 和 SO_4^{2-} 为主要盐离子的内陆盐沼,而是由含有 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的苏打盐碱土发育而来。松嫩平原是世界三大苏打盐碱土分布区之一^[1-2],该地区原有 25% 以上的内陆盐沼,但是随着气候的不断变化以及人类活动的干扰,内陆盐沼的水文情势发生改变,近年来盐沼面积减少了 50% 以上,土壤的盐碱化问题日益严峻。作为松嫩平原西部的生态屏障,恢复内陆盐碱湿地具有重要的生态学意义。

水是维持湿地生态系统结构与功能稳定的关键因子,也对湿地植物生长发育起着重要的调控作用^[3]。水文情况的改变会直接影响有机质积累、营养循环、湿地植被的生产力以及物种丰富度^[4]。自然湿地季节性水位波动较大,常随着淹水与干旱的发生而不断变化^[5]。湿地植被对这两种极端环境(淹水和干旱)的敏感度和耐受性对其分布具有决定性意义^[6-7]。水分胁迫对许多植物的生长与代谢有着不利影响,主要取决于胁迫的强度与持续期、植被基因型、发育阶段以及环境因子等^[8]。通常干旱胁迫复水后,植物的有效生长与产量恢复将取决于复水的发生时间和持续时间。植物在干旱胁迫下的胁迫生理响应会在复水后快速或者慢速的消失^[9]。淹水对植物和土壤的影响研究多见于水稻^[10-11] 及其土壤养分的影响^[12-14],在湿地恢复理论研究中,学者更多的关注湿地水位的波动^[15-17],而淹水时间研究较少见。因此了解湿地植物对淹水的发生和持续时间的生长和生理响应将有助于湿地植物生长恢复与水资源有效利用。

芦苇(*Phragmites australis*)是一种多年生禾本科植物,根据生境可分为沙生芦苇、旱生芦苇以及水生芦苇。对于水生芦苇来说,其通常在水陆交错区形成稠密的群落,常被用于人工湿地净化水质^[18-19],也是松嫩平原西部的内陆盐沼上的建群种。前人已有研究表明,芦苇首先受水位变异限制,然后才是地表水的营养负荷^[20]。作为优势种,芦苇可以生长在临近水体平均水位的正负 1 m 以及盐度在 0%~20% 的区域内,无论是幼苗还是成体植株均可以暴漏在完全水淹或者干旱条件下几天甚至几个月来适应湿地大幅的水位波动^[21]。在我们已发表的研究中,已经证明在芦苇适当的发育阶段实施不同频率的干湿交替,可以有效提高芦苇的产量和光合能力^[22]。本研究利用盆栽模拟试验,进一步比较不同淹水发生与持

续时间对盐碱沼泽芦苇生长以及土壤理化性质的影响,以期获得快速恢复芦苇生长的水文条件和有效改善盐碱土壤的方法。

1 材料与方法

1.1 试验样地概况及供试材料

本研究所用芦苇选自松嫩平原西部牛心套保退化芦苇沼泽湿地(45°13'N, 123°21'E),该地区属中温带半干旱季风气候,平均降水量 412.7 mm,蒸发量为 1 696.9 mm,无霜期约为 137 d,土壤为盐碱化沼泽土。由于降水量远远小于蒸发量,曾经退化为盐碱草地。2002—2013 年,该地区恢复了大面积退化的芦苇沼泽,主要通过霍林河与洮儿河引水补给。由于微地貌不同,该湿地既有长期处于高水位的恢复芦苇湿地,也有仍旧处于长期缺水而退化的芦苇草甸。我们选择了保留在高地的退化芦苇斑块,于 2012 年 5 月挖取 20 cm×20 cm×20 cm 见方的苇墩,以及同层的盐碱土用于本试验。

将盐碱土混匀后填入直径 30 cm,高 35 cm 的硬塑桶内,放置挖取的苇墩,再用盐碱土将空隙填满,最后土层厚度约为 25 cm,灌溉地下水,帮助芦苇恢复生长。在试验处理前,芦苇平均株高约 20 cm。

1.2 淹水发生与持续时间的设计

本试验为模拟退化的芦苇沼泽,因此在淹水处理外的其他阶段均以干旱为准。干旱标准为土壤含水量始终保持为田间持水量的 35%~40%,淹水标准为水位始终保持高出土壤表面 10 cm。为避免雨水干扰,试验均在温室大棚内进行,并保持通风,与室外温度一致。

本研究设置 2 组共 10 项处理,每项处理 3 次重复,FD 组:FD₀₋₅,淹水发生时间一致,为芦苇缓苗后,持续时间依次增加,分别为 0,0.5,1,2,3,4 月(其中 FD₀ 代表试验期间保持长期干旱状态为对照组,FD₅ 为整个生长季淹水);FO 组:淹水持续时间一致,均为 1 个月,其发生时间分别推后一个月,即在 6 月,7 月,8 月,9 月分别淹水(FO₁₋₄),其他生育阶段做干旱处理。由干旱至淹水状态,用量筒定量添加即可,由淹水至干旱水分状态,则利用针筒吸干桶内水分,保证无水层积在土壤表层,而慢慢通过蒸发转变为干旱状态。

1.3 芦苇生长与离子含量

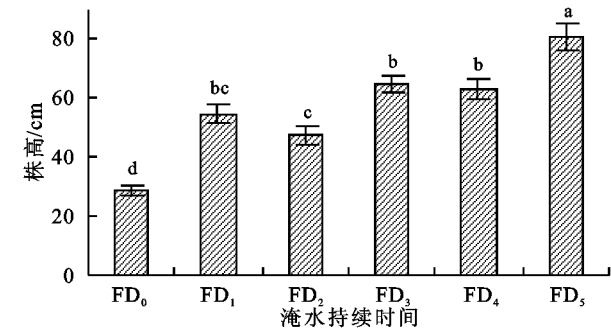
在生长季结束后(10 月上旬),每个处理选取 7~10 棵芦苇,测量其株高。并分开地上与地下部分,反复用

自来水和蒸馏水冲洗后在 105℃烘箱中杀青 15 min,在 70℃恒温烘至恒重,记录地上与地下的生物量。

另外,取地上器官的干样品 100 mg,用 10 ml 去离子水沸水条件下浸提 60 min,浸提液用于测试盐离子。采用原子吸收分光光度计(TAS-990,Purkinje General,北京)法测试 Na^+ 和 K^+ 含量。

1.4 土壤理化性质与离子分析

每个盆栽处理取 500 g 土壤,阴干后,过 2 mm 筛。参照森林土壤有机质的测定(LY/T 1237—1999),采用重铬酸钾法氧化—外加加热法测试有机质(OM),同时参照森林土壤水溶性盐分分析(LY/T1251—1999)方法测试土壤 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- 等离子含量。将土壤与水按照 1 : 5 比例混合后在 25℃摇床上震动 1 h,其悬浮液利用 DDS-307 和 PHS-3 C 测试土壤 pH 值和电导率(EC)。



注:不同字母代表差异显著($p<0.05$),下同。

1.5 统计分析

采用 SPSS 17.0 (SPSS Inc, Chicago, IL, USA) 和 Sigmaplot 2010 对数据进行统计分析与作图,结果用平均数±标准误(Mean±SE)表示,用单因素方差分析(ANOVA)分别对株高、盐离子和土壤理化性质指标进行统计分析,采用最小显著差数法(LSD)进行多重比较,显著水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 淹水对芦苇生长和生理特征的影响

淹水持续时间(FD)和淹水发生时间(FO)处理下的株高均显著高于对照组(FD₀)($p<0.05$,图 1,表 1)。随着淹水持续时间的增加,芦苇高度呈增加趋势,其中 FD₅ 处理下的株高值最大,约为 FD₀ 的 1.8 倍。随着淹水发生时间的变动,芦苇株高变化不显著(图 1)。

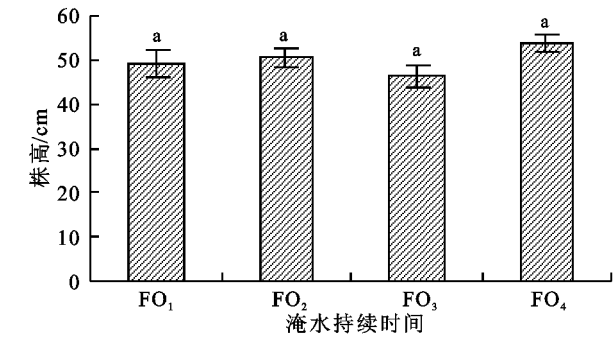


图 1 淹水发生和持续时间对芦苇株高的影响

表 1 淹水处理对芦苇株高、生物量和离子含量影响的单因素方差分析					
FD	F	Sig.	FO	F	Sig.
株高	72.00	**	株高	72.00	**
地上生物量	23.91	**	地上生物量	23.91	**
地下生物量	40.13	**	地下生物量	40.13	**
Na^+	7.31	0.02*	Na^+	30.60	**
K^+	3.46	0.04*	K^+	3.10	0.05*

* $p<0.05$; ** $p<0.01$ 。

淹水发生时间和持续时间同样对芦苇地上与地下生物量具有显著影响($p<0.05$,图 2,表 1)。随着淹水持续时间(FD)的增加,芦苇的地上生物量和地下生物量呈现先增加后降低趋势,最高值出现在 FD₃ 处理下,增长量分别为 FD₀ 的 5.4,2.5 倍。随着淹水发生时间的后移,地上生物量虽然有下降趋势,但差异不显著,地下生物量则先增加后降低,最大值出现在 FO₂ 处理上。

淹水发生时间和持续时间对芦苇地上器官的 Na^+ , K^+ 含量具有显著影响(表 1)。

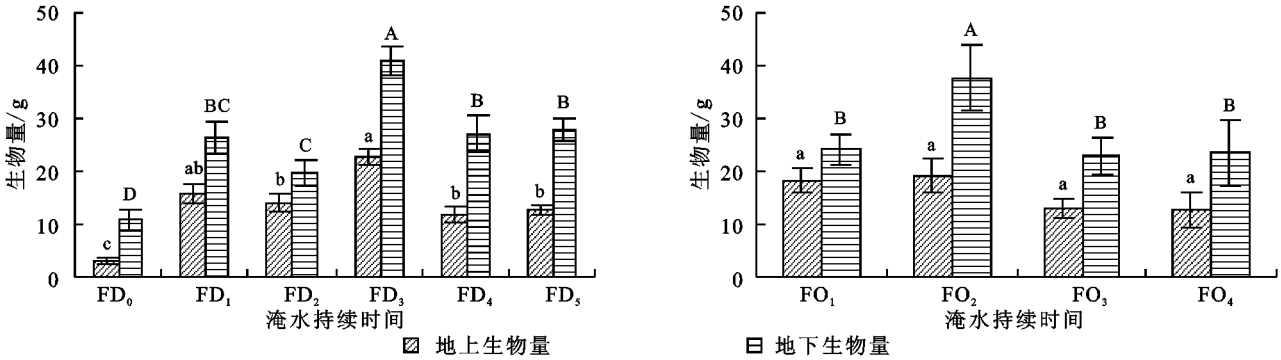
随着淹水时间的增加, Na^+ 含量呈现不规则变化,当淹水期为 2,3 个月时(FD₃,FD₄),其含量显著

降低(图 3, $p<0.05$),比 FD₀ 降低了 42.6%,FD₅ 处理则促进了 Na^+ 的积累高于 FD₀ 25%。随着淹水发生时间(FO)的后移,芦苇体内的 Na^+ 含量表现为先降低后增加的趋势,FO₂ 处理下的含量最低,芦苇的生长后期淹水 FO₄ 的 Na^+ 的积累不同淹水持续时间条件下,芦苇地上器官的 K^+ 含量呈不规则变化,其中 FD₁,FD₃,FD₄ 的 K^+ 含量最低,FD₅ 含量最高。随着淹水发生后移, K^+ 的含量呈增加趋势。

2.2 淹水对土壤理化性质的影响

淹水发生时间(FO)与持续时间(FD)对盐碱土壤的 pH 值和 EC 都有显著影响($p<0.05$,图 4,表 2),随着淹水持续时间的增加,pH 值和 EC 呈现先降低后增加的趋势。其中,以淹水 3 个月(FD₃)的值最低,pH 值由对照的 10.07 下降至 8.71,EC 由对照的 576.5 下降至 239.5。随着淹水发生时间(FO)的后移,土壤 pH 值有显著增加趋势,土壤 EC 先增加后降低,其中 FO₁ 和 FO₂ 处理的 pH 值和 EC 低于其他处理。

淹水发生时间和持续时间对土壤的有机质含量无显著影响(表 2, $p>0.05$)。



注:不同处理间地上和地下生物量的显著性差异分别用小写字母和大写字母标注($p<0.05$)。

图 2 淹水发生和持续时间对芦苇生物量的影响

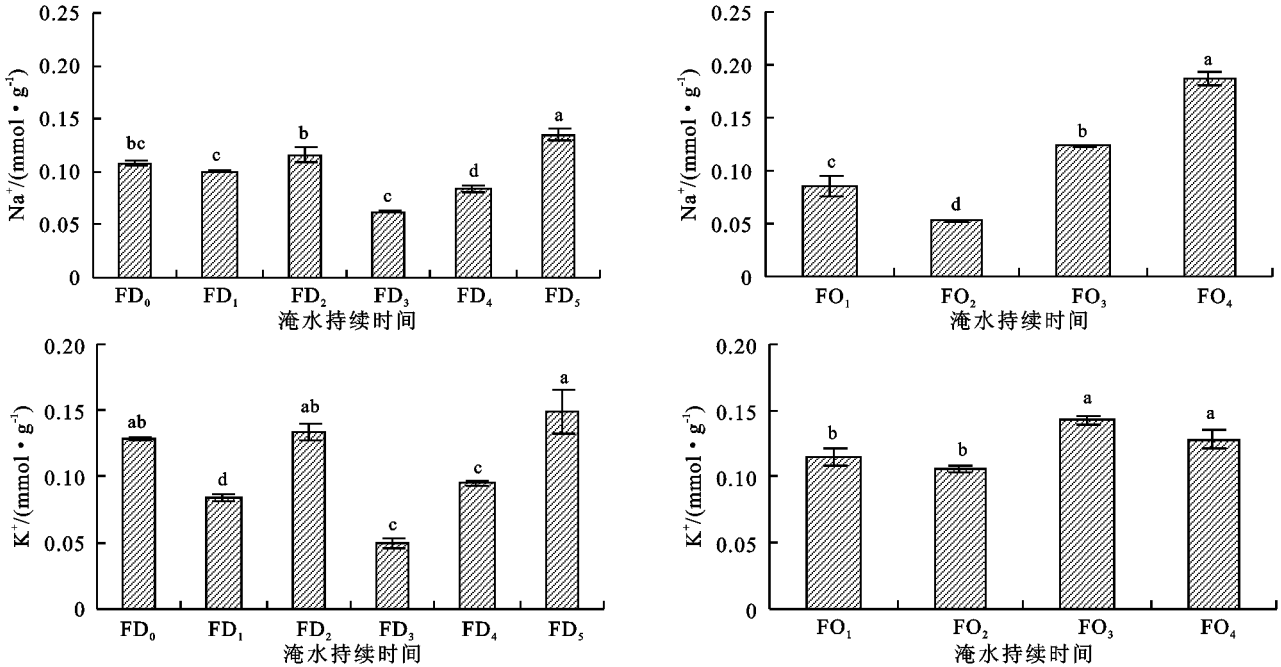


图 3 淹水发生和持续时间对芦苇地上器官盐离子 Na⁺ 和 K⁺ 含量的影响

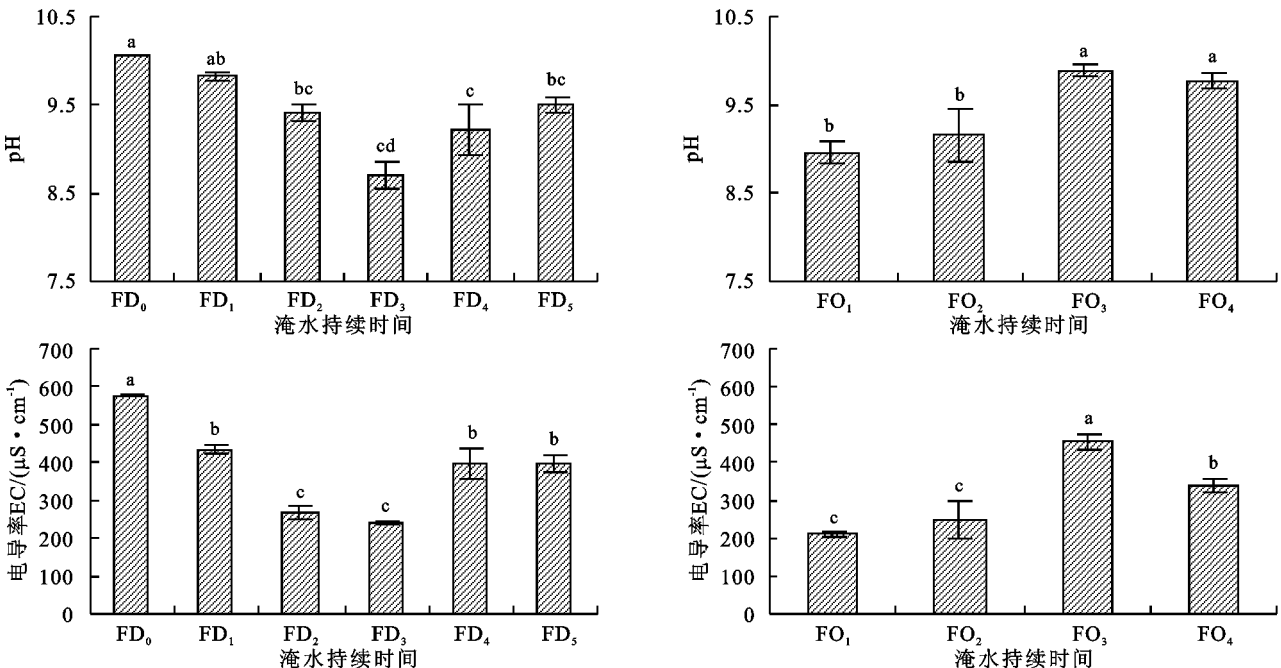


图 4 淹水发生与持续时间对盐碱土壤 pH 值和电导率(EC)的影响

表 2 淹水处理对盐碱土壤理化性质影响的单因素方差分析

		F	Sig.		F	Sig.		F	Sig.
FD	有机质	1.90	0.23	CO ₃ ²⁻	26.47	**	Na ⁺	23.81	**
	pH 值	29.61	**	HCO ₃ ⁻	5.99	0.03*	Mg ²⁺	2.56	0.10
	电导率	16.98	**	Cl ⁻	4.33	0.06	K ⁺	3.06	0.07
				SO ₄ ²⁻	0.33	0.62	Ca ²⁺	18.40	**
FO	有机质	1.09	0.45	CO ₃ ²⁻	17.63	**	Na ⁺	30.31	**
	pH 值	7.03	0.05*	HCO ₃ ⁻	32.67	*	Mg ²⁺	6.76	0.55
	电导率	15.05	0.012*	Cl ⁻	5.02	0.77	K ⁺	3.25	0.14
				SO ₄ ²⁻	7.13	0.06	Ca ²⁺	11.45	**

注: * 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$ 。

淹水发生与持续时间均显著影响盐碱土壤的 Na⁺ 和 Ca²⁺ 含量 ($p<0.05$, 图 5), 对 K⁺ 和 Mg²⁺ 含量没有显著影响 (表 2)。与土壤 pH 值和 EC 的变化趋势相近, 随着淹水持续时间的增加, Na⁺ 和 Ca²⁺

含量先下降后增加, 最低值出现在 FD₃ 处理, 比 FD₀ 降低了 76.73% 和 83.71%。随着淹水时间的后移, Na⁺ 和 Ca²⁺ 呈增加趋势, 其中 FO₁ 和 FO₂ 的含量最低。

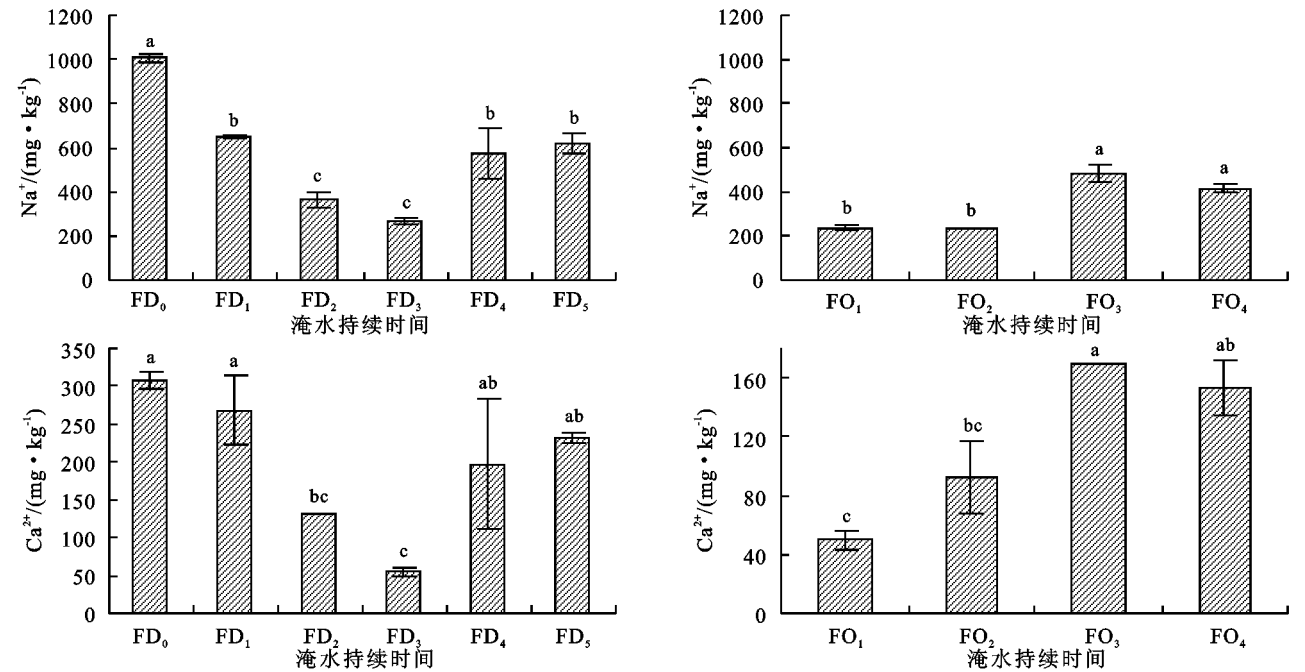


图 5 淹水发生和持续时间对盐碱土壤阳离子 Na⁺ 和 Ca²⁺ 含量的影响

淹水发生与持续时间均显著影响着盐碱土壤的 HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻ 含量 ($p<0.05$, 图 6), 对 Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 含量的影响不显著 (表 2)。随着淹水持续时间的增加 (FD), HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻ 含量先下降后增加, 最低值为 FD₃ 处理, 随着淹水发生时间的后移 (FO), HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻ 含量呈增加趋势, FO₁ 和 FO₂ 的值低于其他处理。

3 讨论

水位波动对植物个体生长与植被组成具有显著的影响。对于湿地植物而言, 适当的淹水水位、淹水持续时间和淹水发生时间有助于植物生产力的提升。例如, 小叶章 (*Calamagrostis angustifolia*) 生物量的峰值出现时间随积水深度的增加而增加^[23]; 长期淹

水可以提高红穗苔草 (*Carex argyi* Levl. et Vant) 地上部生物量的分配比例^[24], 茭白 (*Zizania latifolia*) 的茎秆也会随着淹水期延长而显著增加^[24]。此外, 也有研究表明水位可以促进芦苇的平均株高与茎粗, 但也有报道指出芦苇的生长指标在中水位最优^[25-26]。芦苇属于中水深生态种组植物, 其生态位宽度较大, 随着淹水持续时间的增加, 芦苇株高显著伸长, 这一结果与茭白研究结果一致^[24], 但是由本试验可得, 芦苇生物量不与淹水的持续时间成正相关, 而是在淹水持续一定时间后再排干, 会促进生物量的积累 (FD₃)。在前人对甘蔗的研究中已经表明, 当甘蔗生长在一定高水位环境中后, 短时间的淹水期有时会增加产量, 证明了淹水后的甘蔗茎秆通气组织形成的时间对其高产具有重要意义^[27]。

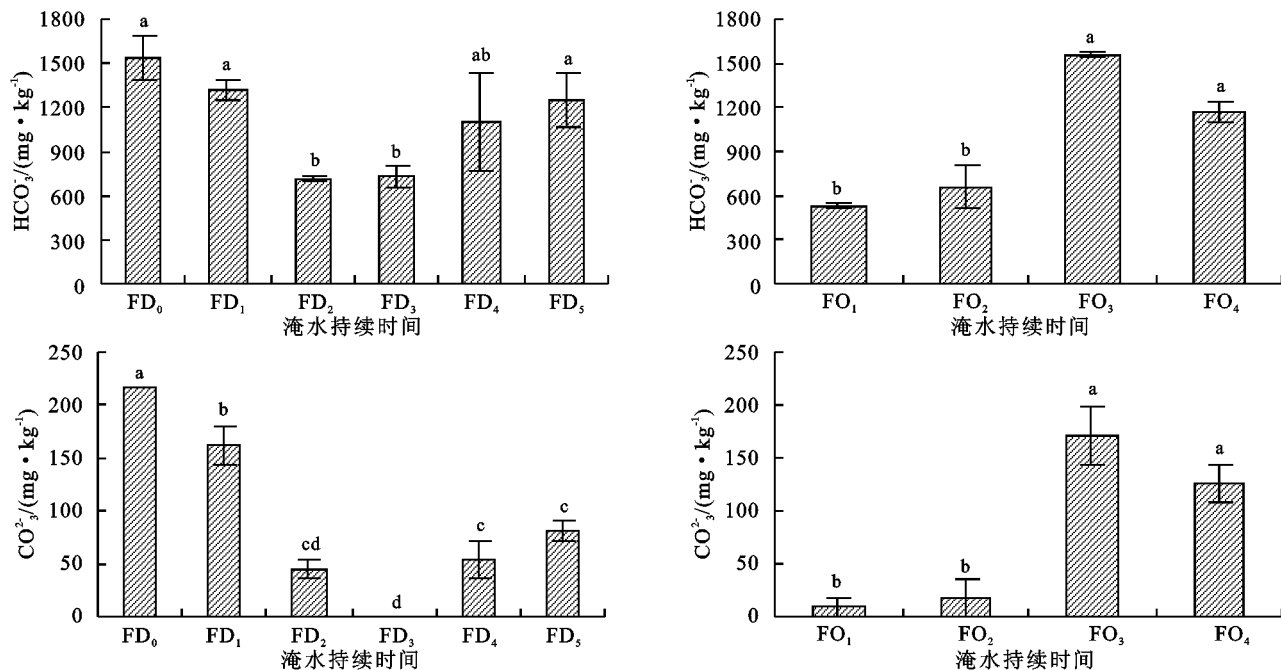


图6 淹水发生和持续时间对盐碱土壤阴离子 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 含量的影响

在湿地植物恢复生长的过程中,淹水持续时间不易过长或过短,短时间的淹水不能满足植物生长的基本需求,而长时间淹水虽然促进茎秆的伸长,但并不利于生物量的积累,茎秆的伸长属于一种对厌氧和淹水的胁迫响应。从本文芦苇生物量与离子含量的结果可以看出,长时间淹水促进了芦苇的茎秆伸长,但中等淹水时间有利于芦苇生物量积累的最大化和 Na^+ 含量吸收的最小化(图2,3)。中等淹水时间和较高淹水频率能为植物获得最大萌发率提供最佳时机,这种水文条件可以增加种子库的萌发机会。另外,适当的淹水持续期和发生时间也有助于芦苇种群内大小不同个体的生长,利于芦苇种群的整体恢复生长。而前人对苔草(*Carex acuta*)、桦木(*Betula pubescens*)和绣线菊(*Filipendula ulmaria*)等植物的研究表明无论任何时间段,淹水持续期和频率都会降低植物的生长性能^[28],因此淹水处理(包括水位、频率、持续期、发生时间)在湿地植被恢复过程中因物种而异。

在 FO_4 处理中(9月份单独淹水),芦苇遭受干旱胁迫长达3.5个月。植物对 Na^+ , K^+ 积累和吸收是对干旱胁迫的生理响应,是一种渗透调节过程。长时间干旱胁迫后再淹水,不但没有缓解植物对于干旱胁迫和盐碱胁迫的生理响应,甚至加剧了胁迫的影响。因此,芦苇增加了对 Na^+ 的吸收。长时间淹水下(FD_5),芦苇仍然吸收大量 Na^+ ,可能由于根细胞膜遭到破坏,从而降低植物对离子吸收的选择性。

在芦苇的生长季初期,其根系尚未布满土壤孔隙,淹水后再排水会增加土壤盐离子的淋洗,盐离子浓度、pH值和电导率等降低更多,但是后期由于根系的生长,植物体的吸收,盐离子含量的淋洗或者排除量降

低。淹水一排水过程改变了土壤细菌和功能群的丰富度,其氧化还原电位比长期淹水和干旱降低的更慢^[29]。钟继洪和 Macariola 指出长期淹水会显著降低土壤强度,延长淹水时间会促进土壤粉粒和黏粒的分散,这在生产实践中意义不大^[30]。因此,在芦苇生长过程,淹水后再排放有效的降低了盐碱土壤的盐离子含量,改善了土壤的理化性质,提升了土壤的整体质量。淹水条件促使土壤释放大量和微量元素的能力显著不同^[31]。关于淹水发生和持续时间对盐碱土壤结构以及营养的影响,需要进一步与无植物生长的盐碱土壤进行比较研究。综上所述,湿地生态系统的恢复,尤其是植被的恢复受多种环境因子影响,包括水文、土壤营养等,将恢复水文方法与植被和土壤的恢复有机整合起来,对湿地生态系统的恢复更有意义。

4 结论

(1) 在不同淹水持续时间处理下,淹水持续2月(FD_3)的芦苇生物量最高,而 Na^+ , K^+ 浓度显著低于其他淹水时间。同时, FD_3 处理下的土壤理化性质表现为最优。因此6月、7月份是最佳的淹水恢复时间。

(2) 在不同淹水发生时间处理下,芦苇的株高和地上生物量不变,芦苇地上器官的 Na^+ , K^+ 含量以及盐碱土壤理化性质表现为生长初期淹水低于生长后期淹水处理(FO_1 , FO_2 优于 FO_3 , FO_4)。因此,6月和7月份分别淹水是芦苇质量恢复和盐碱土壤性质改善的最佳时间。

由以上结论可以得出,6月、7月份是芦苇生态需水期,在此阶段补充充足水分对芦苇的生长恢复具有显著意义,并能改善盐碱土壤的理化性质。

参考文献:

- [1] Guan Y, Liu G, Liu Q, et al. The study of salt-affected soils in the Yellow River Delta based on remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing-beijing, 2001, 5(1): 52-56.
- [2] Li Y, Zhao K, Ding Y, et al. An empirical method for soil salinity and moisture inversion in West of Jilin[C]// Proceedings of the 2013 the International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE 2013), Nanjing, China, 2013.
- [3] Manivannan P, Jaleel C A, Kishorekumar A, et al. Changes in antioxidant metabolism of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. by propiconazole under water deficit stress[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2007, 57(1): 69-74.
- [4] 杨富亿, 李秀军, 刘兴土, 等. 松嫩平原退化芦苇湿地恢复模式[J]. 湿地科学, 2009, 7(4): 306-313.
- [5] Mitsch W J, Gosselink J G. Wetlands [M]. John Wiley & Sons Inc., New York, 2000.
- [6] Auble G T, Friedman J M, Scott M L. Relating riparian vegetation to present and future streamflows[J]. Ecological Applications, 1994, 4(3): 544-554.
- [7] Wassen M J, Peeters W H M, Venterink H O. Patterns in vegetation, hydrology, and nutrient availability in an undisturbed river floodplain in Poland[J]. Plant Ecology, 2003, 165(1): 27-43.
- [8] Bray E A. Molecular responses to water deficit[J]. Plant physiology, 1993, 103(4): 1035.
- [9] Pinheiro C, Passarinho J A, Ricardo C P. Effect of drought and rewatering on the metabolism of *Lupinus albus* organs[J]. Journal of plant physiology, 2004, 161(11): 1203-1210.
- [10] 王斌, 周永进, 许有尊, 等. 不同淹水时间对分蘖期中稻生育动态及产量的影响[J]. 中国稻米, 2014, 20(1): 68-72.
- [11] 王振省, 李磊, 李婷婷, 等. 水稻分蘖期淹水对根系生长和产量的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(6): 54-57.
- [12] 易维洁, 曲东, 王庆. 碳源和淹水时间对水稻土微生物 Fe(III) 还原能力的影响[J]. 应用生态学报, 2010(12): 3133-3140.
- [13] 黄森. 淹水时间对水稻土中 4 种铁还原功能微生物丰度的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [14] 薄录吉, 王建国, 王岩, 等. 淹水时间对水稻土磷素形态转化及其有效性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(6): 930-934.
- [15] 栾金花, 张乐, 邹元春, 等. 不同水分梯度下三江平原湿地漂筏苔草无性系株高生长特性[J]. 湿地科学, 2006, 4(4): 258-263.
- [16] 王丽, 胡金明, 宋长春, 等. 水位梯度对三江平原典型湿地植物根茎萌发及生长的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2432-2437.
- [17] 杨涛, 宫辉力, 胡金明, 等. 水分胁迫对三江平原典型湿地植物种群高度与密度的影响[J]. 西北植物学报, 2010, 30(9): 1887-1894.
- [18] Clevering O A, Lissner J. Taxonomy, chromosome numbers, clonal diversity and population dynamics of *Phragmites australis*[J]. Aquatic Botany, 1999, 64(3): 185-208.
- [19] Engloner A I. Structure, growth dynamics and biomass of reed (*Phragmites australis*): A review[J]. Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 2009, 204(5): 331-346.
- [20] Zhao Y, Xia X, Yang Z. Growth and nutrient accumulation of *Phragmites australis* in relation to water level variation and nutrient loadings in a shallow lake[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(1): 16-25.
- [21] Pagter M, Bragato C, Brix H. Tolerance and physiological responses of *Phragmites australis* to water deficit[J]. Aquatic Botany, 2005, 81(4): 285-299.
- [22] 李晓宇, 刘兴土, 李秀军, 等. 不同干湿交替频率对芦苇生长和生理的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(3): 99-107.
- [23] 王丽, 胡金明, 宋长春, 等. 水分梯度对三江平原典型湿地植物小叶章地上生物量的影响[J]. 草业学报, 2008, 17(4): 19-25.
- [24] 陈静蕊, 王秋林, 黎明, 等. 红穗苔草对天鹅洲湿地淹水时间变化的形态学响应[J]. 植物科学学报, 2011, 1(4): 474-479.
- [25] 仲启铖, 王江涛, 周剑虹, 等. 水位调控对崇明东滩围垦区滩涂湿地芦苇和白茅光合、形态及生长的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 408-418.
- [26] 贺强, 崔保山, 赵欣胜, 等. 水、盐梯度下黄河三角洲湿地植物种的生态位[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 969-975.
- [27] Glaz B, Morris D R, Daroub S H. Sugarcane photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance due to flooding and water table[J]. Crop Science, 2004, 44(5): 1633-1641.
- [28] Johansson M E, Nilsson C. Responses of riparian plants to flooding in free-flowing and regulated boreal rivers: an experimental study[J]. Journal of Applied Ecology, 2002, 39(6): 971-986.
- [29] Mchergui C, Besaury L, Langlois E, et al. A comparison of permanent and fluctuating flooding on microbial properties in an ex-situ estuarine riparian system[J]. Applied Soil Ecology, 2014, 78: 1-10.
- [30] 钟继洪. 淹水时间对土壤粘闭的影响[J]. 生态环境学报, 1993(1): 42-47.
- [31] Narteh L T, Sahrawat K L. Influence of flooding on electrochemical and chemical properties of West African soils[J]. Geoderma, 1999, 87(3): 179-207.