

DOI: 10.5846/stxb201405110966

马朋, 李昌晓, 任庆水, 杨予静, 马骏. 模拟水淹-干旱胁迫对水杉幼树实生土壤营养元素含量的影响. 生态学报, 2015, 35(23): - .

Ma P, Li C X, Ren Q S, Yang Y J, Ma J. Effects of simulated submergence and drought on the nutrient content of soils planted with Dawn Redwood (*Metasequoia glyptostroboides*) saplings. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): - .

模拟水淹-干旱胁迫对水杉幼树实生土壤营养元素含量的影响

马 朋, 李昌晓*, 任庆水, 杨予静, 马 骏

西南大学生命科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

摘要: 本试验模拟三峡库区消落带水位变化情况, 对 2 年生水杉幼树实生土壤 pH 值和主要营养元素含量进行研究。试验共设置 3 个处理阶段, 阶段 1 为淹水处理阶段, 包括常规供水组 (C), 半淹组 (H) 和全淹组 (F); 阶段 2 为干旱处理阶段, 包括常规供水 (C), 半淹 (H), 全淹 (F), 常规供水—轻度干旱 (CD), 半淹—轻度干旱 (HD) 和全淹—轻度干旱 (FD) 6 种不同水分处理组; 阶段 3 时将所有处理组恢复到正常供水处理, 每种水分处理均设置水杉幼树实生土壤与无植物空白对照土壤。测试的指标包括 pH 值, 有机质 (OM)、碱解氮 (AN)、有效磷 (AP)、速效钾 (AK)、全氮 (TN)、全磷 (TP) 和全钾 (TK) 含量。研究表明, 阶段 1 结束时, C 组和 H 组水杉幼树盆栽土壤的氮素及 TP 含量较无植物组显著下降, H 组的 AP 含量及 F 组的氮素和 TP 含量显著升高; 与正常供水组 (C 组) 相比, 淹水处理增高了水杉幼树盆栽土壤的 pH 值和 OM 含量, 降低了其 AP 含量, 而 F 组水杉土壤的 TN、TP 和 AN 含量分别较 C 组显著升高 17.1%, 16.9% 和 34.2%。阶段 2 结束时, 前期水淹增加了水杉幼树实生土壤 pH 值、OM、AN 和 AP 含量后期对干旱的敏感性; 与无植物组相比, 水杉幼树的栽植增加了除 C 组外的其他水分处理组土壤的 OM 含量; 在水杉盆栽土壤中, 与 C 组相比, H 和 F 组的 pH 值分别升高 2.6% 和 3.8%, OM 含量却未出现显著差异。经过 21 d 的正常供水处理, H、HD 组水杉土壤的 pH 值较无植物组土壤显著下降, 所有水淹组土壤的 OM 含量则显著升高, 与此同时, C 组、CD 组的 TN 和 CD 组的 TP 含量显著升高; 各淹水处理组的水杉土壤在恢复生长后, 其 pH 值及多项营养元素含量均已恢复至 C 组水平, HD 和 FD 组水杉土壤的所有化学性质亦恢复至 CD 组水平。在对水杉幼树盆栽土壤化学性质的相关分析中发现, OM、TN、TP 和 AN 含量两两之间存在极显著的正相关, pH 值与 OM、TN、TP、TN 含量呈极显著负相关关系。研究证实, 在三峡库区消落带适度营造水杉对于恢复库区植被、改良土壤肥力状况具有积极作用, 但是在水库退水期时应及时浇水灌溉, 避免将其置于干旱环境当中。

关键词: 消落带; 土壤营养; 水杉幼树; 三峡库区; 恢复生长

Effects of simulated submergence and drought on the nutrient content of soils planted with Dawn Redwood (*Metasequoia glyptostroboides*) saplings

MA Peng, LI Changxiao*, REN Qingshui, YANG Yujing, MA Jun

Key Laboratory for the Eco-Environment of the Three Gorges Reservoir Region of the Ministry of Education, College of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: This study investigated the effect of how water availability influences the pH and nutrient content of soils planted with two-year-old Dawn Redwood (*Metasequoia glyptostroboides*) saplings, by applying different water treatments to simulate the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir in this study. The treatments involved 3 phases. In the first phase, the treatments were presented with a conventional water supply (C), half flooding (H), and full flooding (F).

基金项目: 重庆市自然科学基金重点项目 (CSTC2013JJ00004); 国家林业公益性行业科研专项 (201004039); 留学回国人员科研启动基金项目 (教外司留 [2010-1561]); 中央高校基本科研业务费专项资金 (XDJK2013A011) 资助

收稿日期: 2014-05-11; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lichangx@swu.edu.cn

Light drought was introduced in the second phase, and included six: conventional water supply (C), half flooding (H), full flooding (F), conventional water supply followed by light drought (CD), half flooding followed by light drought (HD), and full flooding followed by light drought (FD). In the third phase, all treatments were returned to the conventional water supply. Each treatment group lasted 166 days in total, and contained soil samples planted with two-year-old *M. glyptostroboides* saplings and soils without vegetation. The pH value, organic matter (OM), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), alkali hydrolysable nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and available potassium (AK) content in soils containing *M. glyptostroboides* soils and non-vegetated soils were measured after each 166-day treatment. After phase I, compared to non-vegetated soils (control), *M. glyptostroboides* soil in groups C and H had highly significant lower nitrogen and TP content and the H treatment had lower AP content, while the F treatment had higher nitrogen and TP content. Compared with the control (group C), flooding treatment increased the pH value and content of OM, whereas AP content decreased. Compared to the control, the TN, TP, and AN content in group H of *M. glyptostroboides* soils increased by 17.1%, 16.9%, and 34.2%, respectively. After the drought treatment of phase II, flooding had a significant effect on the subsequent sensitivity of pH value, as well as OM, AN, and AP content in *M. glyptostroboides* soils. Compared to the control, the OM content in the soils of all the water treatment groups (excluding group C) increased significantly in the soils planted with *M. glyptostroboides*. Concurrently, compared with group C, the pH value increased by 2.6% and 3.8% in group H and F, respectively; however, the OM content was not significantly different in *M. glyptostroboides* soils. After the water supply was resumed to the level of the control for all treatments, compared to the control, the pH value of *M. glyptostroboides* soils in group H and HD decreased. In contrast, the OM content in the soils of all the flooding treatment groups and the TN content in soils of group C and CD content increased significantly. In addition, compared to the control, the OM content significantly increased in all the previous flooding treatment groups. The pH value and a number of nutrient contents under the flooding treatments recovered to the level of the control group after recovery growth treatment. All of the chemical properties of the HD and FD groups in *M. glyptostroboides* soils also recovered to the level of the CD group. The correlation analysis of soil chemical properties in *M. glyptostroboides* saplings soils showed that a very significant, positive correlation was present among OM, TP, TN, and AN content. However, the pH value exhibited a highly negative relationship with OM, TN, TP, and TN content. The results showed that *M. glyptostroboides* is viable for revegetating the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, but that timely irrigation during the drawdown time period is necessary.

Key Words: water-level-fluctuating zone; soil nutrients; *Metasequoia glyptostroboides* saplings; the Three Gorges Reservoir; recovery growth

消落带 (water-level-fluctuating zone) 是指水体水位因季节性涨落而形成的周期性水淹-干旱交替的水陆衔接地带^[1-2]。三峡工程自竣工以来,在库区形成了一个垂直落差达 30 m 的消落带区域^[3-4],该消落带的反季节调度方式使其冬季因蓄水将面临长时间、大深度的水淹,夏季由于排水以及高温则出现一定程度的干旱^[5-6],长期作用势必导致原有消落带土壤的理化和生物性质发生改变^[7]。研究表明,消落带植被体系重建可以有效防治水土流失^[8]、提高土壤肥力^[9]、增强岸坡的稳定性^[10],目前,许多学者针对三峡库区消落带湿地植被的恢复与重建做了大量的研究,并取得显著成果^[11-13],其中,水杉 (*Metasequoia glyptostroboides*) 被认为是良好的库岸带造林树种之一^[14]。

水杉不仅适应性强,而且生长速度快,轻度耐盐碱、耐水淹,在我国丹江口水库消落区大量存活^[15]。三峡水库消落带土壤与水体联系紧密,若将水杉栽植于三峡库区消落带,前期水淹—后期干旱以及恢复生长处理对其生长土壤的 pH 值和营养元素含量的影响还无从知晓,因此,开展不同水分条件对水杉幼树实生土壤化学性质影响的研究十分必要。本研究模拟三峡库区消落带水文变化情况,设计前期水淹—后期干旱胁迫的盆

栽试验,对 2 年生水杉实生幼树土壤的主要营养元素含量变化进行研究,旨在从土壤微生态的角度认识消落带植被重建后其土壤主要营养元素含量的变化机制,为当地植被恢复建设提供技术和理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究树种和地点

本试验选择 2 年生水杉幼树(取自四川邻水县苗圃)作为研究对象,2012 年 11 月下旬将生长基本一致的 45 株幼苗带土盆栽(土壤为取自三峡库区忠县汝溪河流域消落带的混匀紫色土,每盆装约 5 kg,盆中央内径 18 cm,盆高 20 cm),与此同时,取装有相同土壤且大小一致的 45 盆不栽植苗木的盆钵作为空白对照,将所有盆钵放置于三峡库区生态环境教育部重点实验室基地大棚下(海拔高度 249 m,透明顶棚,四周开敞)进行相同土壤基质、光照和水分驯化适应。试验于 2013 年 1 月正式开展,此时苗木的高度为 (97.05 ± 1.53) cm,基茎为 (0.85 ± 0.11) mm。供试土壤的基本特征见表 1。

表 1 供试土壤营养元素含量初始值(平均值 $\pm$ 标准误)

Table 1 Baseline data of nutrient contents in soil provided for experimental use (mean $\pm$ SE)

pH 值 pH value	有机质含量 Organic Matter content/ (g/kg)	全氮含量 Total Nitrogen content/ (g/kg)	全磷含量 Total Phosphorus content/ (g/kg)	全钾含量 Total Potassium content/ (g/kg)	碱解氮含量 Available Nitrogen content/ (mg/kg)	有效磷含量 Available Phosphorus content/ (mg/kg)	速效钾含量 Available Potassium content/ (mg/kg)
8.30 $\pm$ 0.04	11.62 $\pm$ 0.56	1.11 $\pm$ 0.03	1.11 $\pm$ 0.10	53.61 $\pm$ 5.24	76.70 $\pm$ 3.78	0.85 $\pm$ 0.16	161.02 $\pm$ 4.08

1.2 试验设计

本试验根据三峡库区消落带水文变化情况,共设置 3 个不同水分处理阶段。阶段 1 为淹水处理期,共 3 个处理组,包括常规供水组(C),即控制土壤含水量为田间持水量的 60%—63%(采用称重法确定);半淹组(H),即将苗盆放入水池中,向池内注入水并保持淹至植物中部;全淹组(F),即将苗盆放入水池中,向池内注入水并保持淹没植物顶端 20 cm。75 d 后,每组随机选择 6 盆土壤(含 3 盆无植物对照组土壤)进行破坏性取样。阶段 2 为干旱处理期,将阶段 1 剩余的样本再随机平分为两个处理组,一组继续保持阶段 1 的水分处理,另一组进行轻度干旱胁迫处理(即保证植株叶片的清晨叶水势小于 -0.5 MP,在清晨 6:00—7:00 时,采用美国 Wescor 公司生产的 Psypro 露点水势仪对水杉幼苗上部充分发育成熟的叶片进行水势测定,具体监测结果见图 1)。此时,除了 C、H 和 F3 个处理组外,还增加了 CD 组(常规供水—轻度干旱处理)、HD 组(半淹—轻度干旱处理)、和 FD 组(全淹—轻度干旱处理)3 个处理组,试验处理期为 60 d(由于达到半干旱状态需 10 d,故阶段 2 处理时间共 70 d)。阶段 3 为恢复处理阶段,此时将所有的处理组均恢复到正常田间水分管理,21 d 后取样测试。整个处理阶段持续 166 d,处理结束时共取 90 个土壤样品。具体的试验设计方案见表 2。

1.3 土壤样品采集与土壤性质测定

对试验土壤进行取样时,先把植株的地上部分刈割下来(整个处理阶段所有植株的存活率为 100%,对植物指标的测定结果将另作报道),将苗盆中的土壤倒出,去除其中的根系与杂物,然后将每盆土壤充分混匀,在室内风干后研磨,过筛。过筛后的土壤用于土壤 pH 值、有机质(OM)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、碱解氮(AN)、有效磷(AP)、速效钾(AP)含量的测定。无植物组做相同处理。土壤 pH 值测定采用电位计法(土:水 = 1:2.5);土壤有机质含量测定采用重铬酸钾外加热法;土壤全 N 含量测定采用全自动凯氏定氮仪(瑞士 Büchi 公司生产的 Distillation Unit B-324);用碱解-扩散法测定土壤碱解氮含量;土壤全 P、速效 P 含量利用钼锑抗比色法;全 K、速效 K 含量采用原子吸收光谱仪(美国 PE 公司生产的 AA800)。

1.4 统计分析

根据测定土壤指标,采用独立样本 T 检验(Independent-samples T test)分析水杉幼树盆栽土壤与无植物组土壤化学性质之间的差异显著性。用单因素方差分析(One-way ANOVA)揭示同一取样时间下不同水分处理

组的土壤化学性质,若检验结果表明分析因素对土壤化学性质具有显著影响,则采用 Tukey 检验法进行多重比较。采用 Pearson 相关系数评价水杉幼树土壤各指标间的相关关系。本研究采用 SPSS 20.0 (SPSS Inc., USA) 软件和 Microsoft Excel 2003 软件进行数据分析,用 Origin 8.5 (Origin lab Corporation) 制图。

表 2 试验设计

Table 2 Experiment design

处理 Treatment	阶段 1 Phase 1	阶段 2 Phase 2	阶段 3 Phase 3
	0—75 d	75—145 d	145—166 d
C 组 Group C	正常供水 Conventional Water Supply	C 组:正常供水 Conventional Water Supply CD 组:轻度干旱 Light Drought	正常供水 Conventional Water Supply
H 组 Group H	半淹 Half Flooding	H 组:半淹 Half Flooding HD 组:轻度干旱 Light Drought	正常供水 Conventional Water Supply
F 组 Group F	全淹 Full Flooding	F 组:全淹 Full Flooding FD 组:轻度干旱 Light Drought	正常供水 Conventional Water Supply

2 结果与分析

2.1 水杉幼树实生土壤化学性质对水淹的响应(阶段 1)

对阶段 1 不同水分处理下的土壤 pH 值和营养元素含量进行比较发现,与无植物组相比,不同水分处理组的水杉幼树盆栽土壤 pH 值和 OM 含量并未出现显著性差异。以水分处理为因子,对水杉幼树实生土壤性质进行单因素方差分析,结果表明,经过 75 d 的水淹处理后,与 C 组相比,H 和 F 组土壤的 pH 值和 OM 含量均显著提高($P < 0.05$) (图 2)。

不同水分处理下土壤的氮、磷和钾含量则呈现出不同的变化规律:与无植物对照组土壤相比,水杉幼树土壤 TN、TP 和 AN 含量的变化趋势一致,即 C、H 组显著降低,F 组极显著上升(图 3a, b, d);这与 K 含量在有无植物土壤中均无显著性差异形成对比(图 3c, f);H 组水杉幼树土壤 AP 含量显著低于无植物组,C 和 F 组则与其未出现显著性差异(图 3e)。

对于水杉幼树实生土壤,与 C 组相比,全淹组(F)的 TN、TP 和 AN 含量分别显著升高了 17.1%、16.9% 和 34.2%;而半淹组(H)的三个指标较 C 组并未出现显著差异($P > 0.05$) (图 3a, b, d);经过阶段 1 的淹水处理,H、F 组的 AP 含量较 C 组分别显著下降了 48.3% 和 57.6% (图 3e);而 K 含量在 3 个水分处理组之间未出现显著性差异(图 3c, f)。

2.2 水杉幼树实生土壤化学性质对干旱的响应(阶段 2)

在阶段 2 处理结束后,与无植物组土壤相比,不同水分处理组的水杉幼树实生土壤化学性质呈现不同的变化规律,其中,栽植水杉幼树的所有水分处理组土壤的 pH 值较无植物组土壤无显著性变化(图 4a);而除 C 组外,水杉幼树盆栽土壤 OM 含量均显著或极显著高于无植物组(图 4b);就土壤壤全量营养元素含量而言,

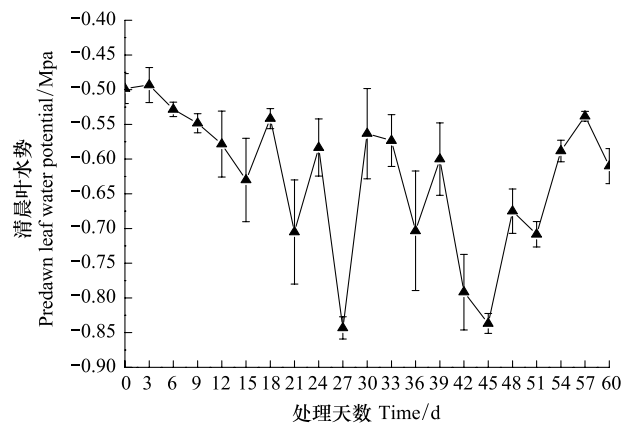


图 1 干旱阶段水杉幼树清晨叶水势(阶段 2)(平均值±标准误)

Fig. 1 Predawn leaf water potential of *Metasequoia glyptostroboides* saplings under light drought stress in Phase 2 (mean±SE)

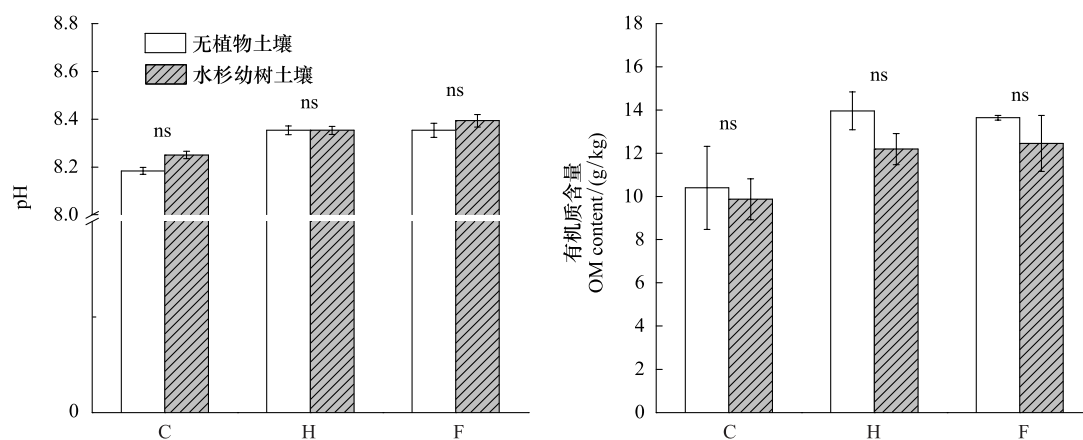


图2 阶段1不同水分处理下盆栽土壤 pH 值、有机质含量(平均值 ± 标准误)

Fig. 2 The change of pH value and organic matter content in soils under different water treatment in phase 1 (mean±SE)

a, b 分别表示土壤 pH 值、有机质含量的变化, C (Conventional Water Supply), H (Half Flooding), F (Full Flooding) 分别表示正常供水、半淹和全淹 3 个不同水分处理组

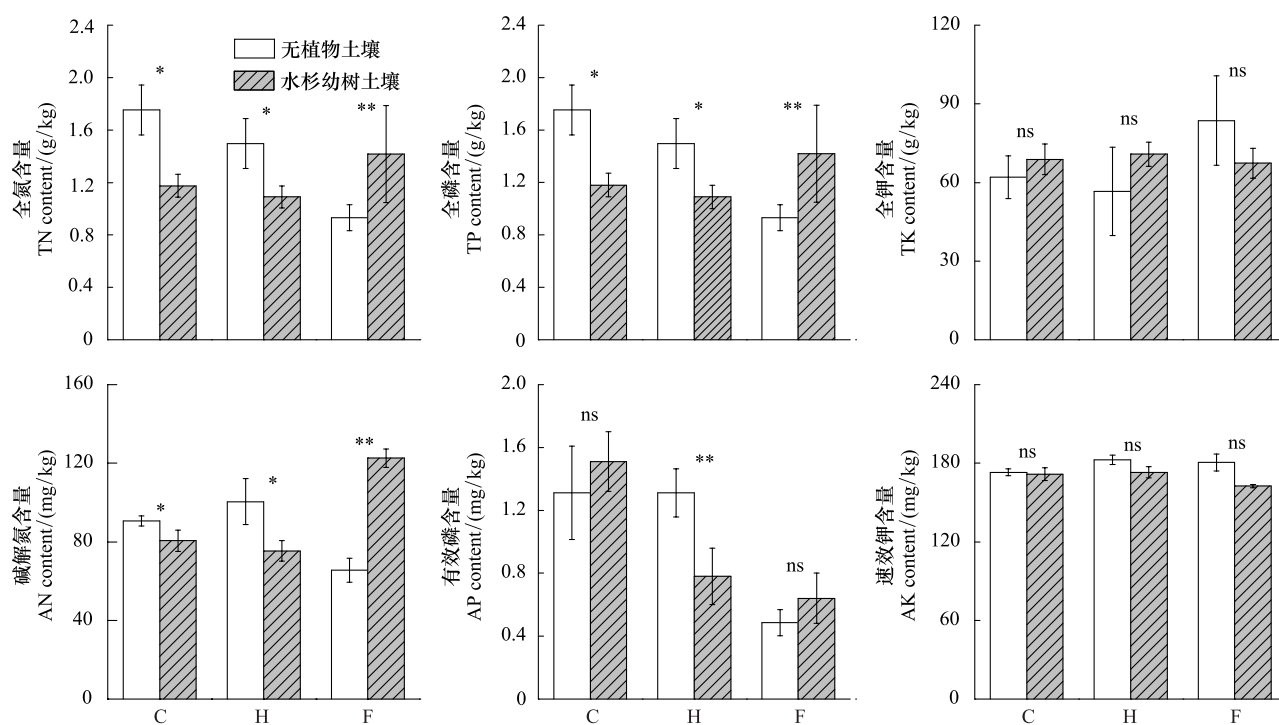


图3 阶段1不同水分处理下盆栽土壤 N、P、K 含量(平均值 ± 标准误)

Fig. 3 The change of N, P and K content in soils under different water treatment in phase 1 (mean±SE)

a, b, c, d, e, f 分别表示土壤全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、碱解氮(AN)、有效磷(AP)、速效钾(AK)含量的变化

除 F 组的 TN 含量和 C 组的 TP 含量显著升高、CD 组的 TP 含量显著下降外,水杉栽植并未显著影响其土壤的全量养分含量(表 3);而就速效养分而言,C 组水杉幼树盆栽土壤的 AN 和 AK 含量、HD 组的 AN 含量、F 组和 CD 组的 AP 含量均较无植物组显著极显著下降,H 组和 CD 组 AN 含量和 FD 组的 AP 含量较无植物组土壤显著上升,其余处理组水杉幼树土壤的速效养分含量较对照组未出现显著差异(表 4)。

对水杉幼树盆栽土壤化学性质进行单因素方差分析表明,就 pH 值而言,持续水淹组(H、F)仍显著高出 C 组 3.9%和 4.3%,与此同时,HD 和 FD 组的土壤 pH 值显著高出 CD 组 2.6%和 3.8%(图 4a)。对于土壤 OM 含量,H 和 F 组较 C 组均未出现显著性变化,且 HD 和 FD 组与 CD 组之间亦无显著性差异存在($P > 0.05$)(图 4b)。

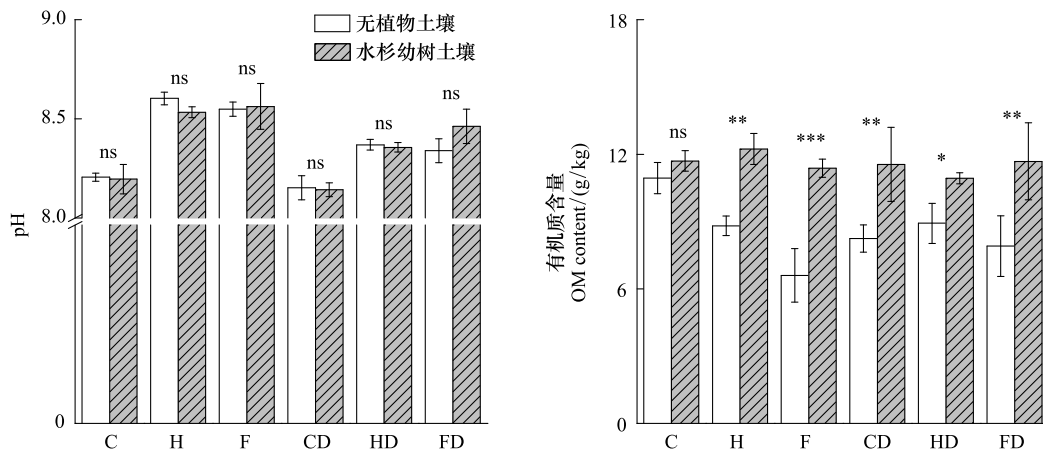


图4 阶段2不同水分处理下盆栽土壤 pH 值、有机质含量(平均值 ± 标准误)

Fig. 4 The change of pH value and organic matter content in soils under different water treatment in phase 2 (mean±SE)

C, H, F, CD (Conventional Water Supply-Light Drought), HD (Half Flooding-Light Drought) 和 FD (Full Flooding-Light Drought) 分别表示正常供水、半淹、全淹、常规供水—轻度干旱、半淹—轻度干旱和全淹—轻度干旱 6 个不同水分处理组

水杉幼树实生土壤全量养分含量在阶段 2 呈现不同规律的变化。其中,与 C 组相比,H 组土壤的 TN 含量显著降低了 18.9%,而与 F 组之间则没有显著性差异($P > 0.05$);与干旱对照组(CD)相比,HD 和 FD 组土壤 TN 含量未出现显著性差异。就土壤 TP 含量而言,H 和 F 组与 C 组并未出现显著性差异,同时,HD、FD 组也并未与 CD 组出现显著差异($P > 0.05$)。另外,F 组土壤 TK 含量显著高出 C 组 17.9%,H 组土壤 TK 含量与 C 组之间则没有显著性差异存在;与此同时,HD 和 FD 组土壤 TK 含量与 CD 组之间亦未无显著性差异存在($P > 0.05$)(表 3)。

表3 阶段2不同水分处理下盆栽土壤全氮、全磷、全钾含量(平均值 ± 标准误)

Table 3 The change of TN, TP and TK content in soils under different water treatments in phase 2 (mean±SE)

处理 Treatment	全氮含量 TN content / (g/kg)			全磷含量 TP content / (g/kg)			全钾含量 TK content / (g/kg)		
	无植物土壤 Unplanted soils	水杉幼树 土壤 Soils of <i>M.</i> <i>glyptostroboides</i> saplings	显著性 Sig.	无植物土壤 Unplanted soils	水杉幼树 土壤 Soils of <i>M.</i> <i>glyptostroboides</i> saplings	显著性 Sig.	无植物土壤 Unplanted soils	水杉幼树 土壤 Soils of <i>M.</i> <i>glyptostroboides</i> saplings	显著性 Sig.
C 组 Group C	1.00±0.10 a	1.22±0.20 a	ns	1.10±0.11 a	0.89±0.04 b	*	59.51±8.96 b	69.17±1.83 b	ns
H 组 Group H	0.94±0.09 b	0.99±0.08 b	ns	0.95±0.01 b	1.03±0.10 ab	ns	67.42±10.46 b	57.24±12.31 b	ns
F 组 Group F	0.95±0.02 b	1.20±0.10 a	*	0.94±0.03 b	0.94±0.03 ab	ns	97.26±17.98 a	84.30±15.01 a	ns
CD 组 Group CD	0.97±0.04 b	0.93±0.05 b	ns	0.97±0.04 b	1.22±0.04 a	*	66.33±2.77 b	67.60±2.17 b	ns
HD 组 Group HD	1.01±0.03 b	1.03±0.10 ab	ns	1.01±0.03 a	0.93±0.05 ab	ns	67.38±6.15 b	66.31±3.89 b	ns
FD 组 Group FD	1.09±0.82 b	0.94±0.03 b	ns	1.09±0.08 a	0.99±0.82 ab	ns	76.31±12.56ab	73.73±5.12 ab	ns

不同字母表示不同水分处理组间土壤营养元素含量间差异显著($P < 0.05$)。C, H, F, CD, HD 和 FD 分别表示正常供水、半淹、全淹、常规供水—轻度干旱、半淹—轻度干旱和全淹—轻度干旱 6 个不同水分处理组

对水杉幼树实生土壤速效养分含量进行单因素方差分析表明,与 C 组相比,F 组土壤 AN 含量没有出现显著差异($P > 0.05$),而 H 组则显著升高 17.9%;与 CD 组相比,HD 组和 FD 组水杉土壤 AN 含量分别显著下降 21.6%和 16.6%。就土壤 AP 含量而言,H、F 组与 C 组相比并无显著差异($P > 0.05$),HD、FD 组较 CD 组则显著升高($P < 0.05$)。阶段 2 处理结束后,所有组别土壤的 AK 含量仍无显著性差异存在(表 4)($P > 0.05$)。

2.3 水杉幼树实生土壤化学性质对复水的响应(阶段 3)

经过 21 天的恢复生长,除 H 组、HD 组水杉幼树土壤 pH 值较无植物组显著下降外,其余处理组的 pH 值与无植物组土壤间均无显著性差异(图 5a);而除 C 组和 CD 组的水杉盆栽土壤 OM 含量较无植物组无显著性

差异外,所有淹水处理组的水杉盆栽土壤的 OM 含量则显著或极显著地高于无植物对照组(图 5b)。水杉幼树土壤除 C 组的 TN 含量和 CD 组的 TN、TP 及 AN 含量较无植物组显著上升,F 组的 TK 含量、C 和 CD 组的 AP 含量显著下降外,各处理组的水杉盆栽土壤 N、P、K 含量较无植物组间已无显著性差异(表 5,6)。

表 4 阶段 2 不同水分处理下盆栽土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量(平均值 $\pm$ 标准误)

Table 4 The change of AN, AP and AK content in soils under different water treatments in phase 2 (mean $\pm$ SE)

处理 Treatment	碱解氮含量 AN content / (mg/kg)			有效磷含量 AP content / (mg/kg)			速效钾含量 AK content / (mg/kg)		
	无植物土壤 Unplanted soils	水杉幼树 土壤 Soils of <i>M. glyptostroboides</i> saplings	显著性 Sig.	无植物土壤 Unplanted soils	水杉幼树 土壤 Soils of <i>M. glyptostroboides</i> saplings	显著性 Sig.	无植物土壤 Unplanted soils	水杉幼树 土壤 Soils of <i>M. glyptostroboides</i> saplings	显著性 Sig.
C 组 Group C	92.35 $\pm$ 2.58 a	68.26 $\pm$ 2.30 b	**	0.54 $\pm$ 0.30 c	0.69 $\pm$ 0.14 c	ns	182.73 $\pm$ 6.45 a	163.70 $\pm$ 3.18 a	*
H 组 Group H	66.72 $\pm$ 6.91 b	83.17 $\pm$ 7.35 a	*	1.05 $\pm$ 0.48 a	0.71 $\pm$ 0.21 c	**	184.36 $\pm$ 8.05 a	172.43 $\pm$ 6.11 a	ns
F 组 Group F	66.29 $\pm$ 5.60 b	66.29 $\pm$ 1.62 b	ns	0.79 $\pm$ 0.08 bc	0.57 $\pm$ 0.11 c	*	173.8 $\pm$ 5.29 a	168.08 $\pm$ 6.89 a	ns
CD 组 Group CD	67.82 $\pm$ 2.66 b	83.17 $\pm$ 7.35 a	*	1.06 $\pm$ 0.38 a	0.41 $\pm$ 0.21 c	***	178.55 $\pm$ 4.23 a	172.23 $\pm$ 2.50 a	ns
HD 组 Group HD	99.17 $\pm$ 13.31 a	65.22 $\pm$ 3.16 b	**	0.94 $\pm$ 0.30 b	0.80 $\pm$ 0.27 b	ns	170.73 $\pm$ 3.54 a	160.53 $\pm$ 1.78 a	ns
FD 组 Group FD	75.31 $\pm$ 5.06 b	69.34 $\pm$ 5.03 b	ns	0.89 $\pm$ 0.12 b	1.13 $\pm$ 0.13 a	*	146.99 $\pm$ 12.17b	159.53 $\pm$ 6.03 a	ns

单因素方差分析结果表明(图 5),阶段 3 时所有水分处理组的水杉幼树实生土壤 pH 值均恢复至 C 组水平($P > 0.05$);除了 H 组土壤 OM 含量显著高出 C 组 18.7%外,其余组别的土壤 OM 含量也恢复至 C 组水平,HD 和 FD 组土壤 OM 含量与 CD 组之间亦无显著性差异存在($P > 0.05$)。

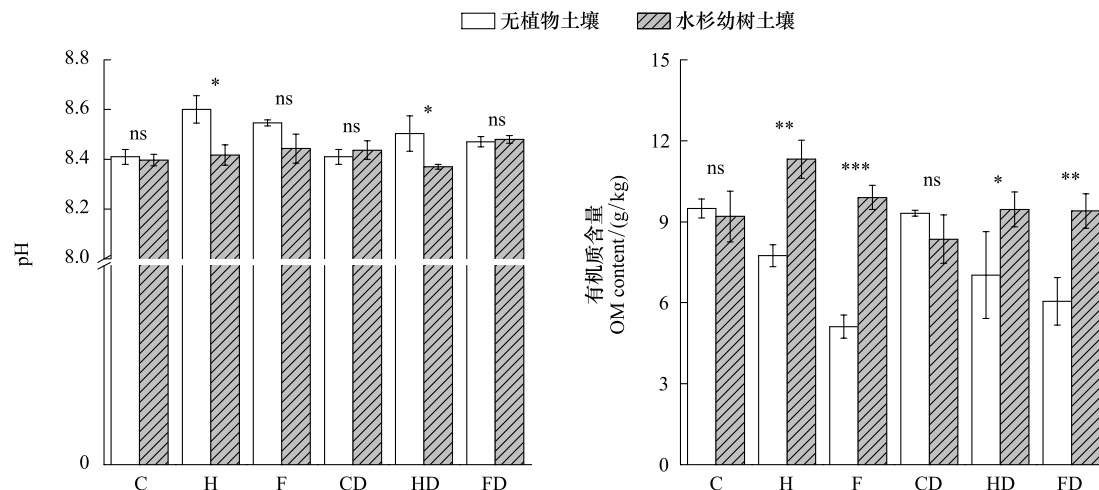


图 5 阶段 3 不同水分处理下盆栽土壤 pH 值、有机质含量(平均值 $\pm$ 标准误)

Fig. 5 The change of pH value and organic matter content in soils under different water treatment in phase 3 (mean $\pm$ SE)

C, H, F, CD (Conventional Water Supply-Light Drought), HD (Half Flooding-Light Drought) 和 FD (Full Flooding-Light Drought) 分别表示正常供水、半淹、全淹、常规供水—轻度干旱、半淹—轻度干旱和全淹—轻度干旱 6 个不同水分处理组

与 C 组相比,F 组水杉幼树实生土壤的 TN 含量没有出现显著变化,而 H 组仍显著低于 C 组 27.1%;HD、FD 组分别和 CD 组之间没有显著性差异($P > 0.05$)。同时,所有处理组土壤的 TP 含量均恢复到了 C 组的水平,且 HD、FD 组与 CD 组也未出现显著差异。另外,F 组的水杉幼树实生土壤 TK 含量在恢复生长后显著高于 C 组,而 HD 和 FD 与 C 组之间未出现显著性差异($P > 0.05$)(表 5)。

所有处理组的水杉幼树实生土壤 AN 含量在经历恢复生长后均恢复到正常供水组(C)水平,且 HD 和 FD 组与 CD 之间也分别未出现显著性差异($P > 0.05$)。21 d 的正常供水后,H 和 F 组土壤 AP 含量显著低于 C 组($P < 0.05$);与 CD 组相比,HD 和 FD 组土壤 AP 含量没有显著变化。与此同时,所有处理组水杉幼树实生

土壤之间的 AK 含量仍未出现显著差异(表 6)。

表 5 阶段 3 不同水分处理下盆栽土壤全氮、全磷、全钾含量(平均值 ± 标准误)

Table 5 The change of TN, TP and TK content in soils under different water treatments in phase 3 (mean±SE)

处理 Treatment	全氮含量 TN content / (g/kg)			全磷含量 TP content / (g/kg)			全钾含量 TK content / (g/kg)		
	无植物土壤 Unplanted soils	水杉幼树 土壤 Soils of <i>M.</i> <i>glyptostroboides</i> saplings	显著性 Sig.	无植物土壤 Unplanted soils	水杉幼树 土壤 Soils of <i>M.</i> <i>glyptostroboides</i> saplings	显著性 Sig.	无植物土壤 Unplanted soils	水杉幼树 土壤 Soils of <i>M.</i> <i>glyptostroboides</i> saplings	显著性 Sig.
C 组 Group C	0.81 ±0.25 b	1.18±0.03 a	**	0.81 ±0.25 ab	0.88±0.03 ab	ns	59.66±38.65c	63.26±6.20 b	ns
H 组 Group H	0.82 ±0.06 b	0.86±0.06 b	ns	0.85 ±0.12 ab	0.86±0.06 ab	ns	67.25±2.44bc	70.20±14.71 bc	ns
F 组 Group F	0.94 ±0.04 a	1.01±0.09 a	ns	1.04 ±0.03 a	1.01±0.09 a	ns	93.84±13.91a	79.91±0.36 a	*
CD 组 Group CD	0.65 ±0.07 c	0.90±0.03 ab	*	0.65 ±0.07 b	0.90±0.03 ab	*	64.69±2.93bc	67.45±1.36 b	ns
HD 组 Group HD	0.85 ±0.12 b	0.72±0.02 b	ns	0.82 ±0.06 ab	0.72±0.02 b	ns	69.15±8.32bc	61.97±1.65 b	ns
FD 组 Group FD	1.04 ±0.04 a	1.03±0.04 a	ns	0.94 ±0.04 a	1.00±0.05 a	ns	78.34 ±2.80 b	75.23±4.01 ab	ns

表 6 阶段 3 不同水分处理下盆栽土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量(平均值 ± 标准误)

Table 6 The change of AN, AP and AK content in soils under different water treatments in phase 3 (mean±SE)

处理 Treatment	碱解氮含量 AN content / (mg/kg)			有效磷含量 AP content / (mg/kg)			速效钾含量 AK content / (mg/kg)		
	无植物土壤 Unplanted soils	水杉幼树 土壤 Soils of <i>M.</i> <i>glyptostroboides</i> saplings	显著性 Sig.	无植物土壤 Unplanted soils	水杉幼树 土壤 Soils of <i>M.</i> <i>glyptostroboides</i> saplings	显著性 Sig.	无植物土壤 Unplanted soils	水杉幼树 土壤 Soils of <i>M.</i> <i>glyptostroboides</i> saplings	显著性 Sig.
C 组 Group C	57.93±15.63ab	62.69±1.60ab	ns	0.84±0.07ab	0.72±0.28a	ns	185.95±8.15ab	183.07±12.95a	ns
H 组 Group H	60.35±7.66ab	61.22±3.43ab	ns	0.73±0.09b	0.36±0.15b	**	199.45±5.69a	189.49±6.42a	ns
F 组 Group F	66.21±2.50ab	70.45±5.42a	ns	1.02±0.65a	0.54±0.20b	**	176.77±9.05ab	188.75±4.41a	ns
CD 组 Group CD	48.20±4.30b	63.64±1.94ab	*	0.73±0.29b	0.63±0.15a	ns	180.90±4.32ab	174.74±5.88a	ns
HD 组 Group HD	58.61±3.90ab	52.54±1.31b	ns	0.90±0.25a	0.60±0.12a	*	173.68±10.82a	180.83±8.05a	ns
FD 组 Group FD	72.05±2.14a	71.83±2.26a	ns	1.04±0.06a	0.72±0.21a	**	160.45±8.43b	169.25±10.45a	ns

2.4 水杉幼树盆栽土壤化学性质间的相关性分析

对水杉幼苗盆栽土壤化学性质进行相关性分析,结果表明,pH 值与 OM、TN、TP 及 AN 含量呈显著或极显著负相关,而与全钾含量呈显著正相关。OM 含量与 TN、TP 及 AN 含量呈现出极显著的正相关关系,但与 TK 含量却呈极显著负相关。TN 含量与 TP、AN 含量呈极显著正相关,却与 TK 含量呈显著负相关;TP 含量与 AN 含量呈极显著正相关,与 TK 含量呈显著负相关;同时,TK 含量与 AK 含量呈显著正相关,与 AN 含量呈显著负相关(表 7)。

3 讨论

土壤是陆地生态系统中物质循环和能量流动的重要场所,其营养成分的变化与地表植被类型^[16-17]、不同用地方式^[18-19]和人类活动^[20-21]等因素有着密切联系。三峡库区消落带土壤每年有 5—6 个月的时间(因高程而异)浸泡在水体中^[22],其余时间出露成陆,每年都始终处于季节性的干湿交替变化之中。该区域土壤在淹没时会受到因水位涨落所造成的重力侵蚀和水浪的冲刷,在落干期会受到地表径流和雨水淋溶的影响^[23]。一般而言,周期性的水位消涨一方面会加速消落区土壤对营养物质的机械吸收、物理吸收、化学吸收和生物吸收等过程,另一方面会促进土壤养分的释放、溶解和扩散过程^[24],但是在三峡库区消落带这一特殊区域,土壤营养元素含量的变化还要结合当地水文特征、气候类型、植被种类和元素特殊理化性质等方面综合考虑。

表 7 水杉幼树实生土壤化学特性间的相关性分析

Table 7 Correlations between soil chemical properties of *M. glyptostroboides* saplings

化学指标 Chemical indexes	pH 值 pH value	有机质含量 OM content	全氮含量 TN content	全磷含量 TP content	全钾含量 TK content	碱解氮含量 AN content	有效磷含量 AP content
有机质含量 OM content	-0.554 **						
全氮含量 TN content	-0.393 **	0.520 **					
全磷含量 TP content	-0.394 **	0.522 **	0.799 **				
全钾含量 TK content	0.267 **	-0.249 **	-0.199 *	-0.205 *			
碱解氮含量 AN content	-0.277 **	0.420 **	0.701 **	0.701 **	-0.210 *		
有效磷含量 AP content	-0.062	0.086	0.047	0.049	-0.142	0.005	
速效钾含量 AK content	0.027	-0.093	-0.141	-0.143	0.265 **	-0.176	0.029

注: ** 表示 $\alpha = 0.05$ 下相关性达到极显著水平; * 表示 $\alpha = 0.01$ 下相关性达到显著水平(两尾检验)

3.1 水杉幼树实生土壤化学性质对水淹的响应(阶段 1)

土壤酸碱度是土壤的最重要化学性质,它与土壤微生物的活动、有机质的合成和分解、各类营养元素的转化与释放及有效性、土壤保持养分的能力都有关系;其高低可控制和影响土壤中的微生物区系,进而影响绝大多数营养元素的转化方向、转化过程、转化形态及其有效性等^[25]。前人针对三峡消落带模拟试验以及其他流域的研究发现,经过淹水,酸性土壤 pH 值升高,碱性土壤 pH 值降低,最终都趋近于中性^[26-27],但是与之不同,本研究发现经历淹水处理会显著提高水杉幼树盆栽土壤的 pH 值,这可能是因为在嫌气强烈的还原条件下,土壤内形成大量碱性的还原性碳酸铁锰,溶解度较大,导致土壤 pH 值升高^[28]。

土壤有机质是土壤中营养元素的重要来源,是表征土壤肥力与质量的重要指标^[29],其含量不仅可以直接影响土壤的理化性质,同时还与土壤氮磷的全量和有效量有紧密的联系,也是土壤稳定性的重要保证^[30]。本阶段可能是由于处理时间较短,水杉凋落物少且水杉凋落物较难分解的缘故^[31],栽植水杉的盆栽土壤 OM 含量较无植物组并无显著性差异;而不同水分处理组中,水杉幼树盆栽土壤 OM 含量较 C 组均显著上升,这是由于淹水导致氧化还原电位低,形成大量还原性物质,导致有机质大量积累^[32]。

土壤中氮磷含量主要与植物体内的养分循环过程有关^[33],而在消落带这一特殊的水陆衔接地带,其全量养分同时也受水位周期性改变的影响^[18]。本研究中可能由于正常供水组和半淹组水杉幼树生长未受到抑制,需消耗较多的 N、P,使得 C 组和 H 组土壤的 TN、TP、AN 含量及 H 组土壤的 AP 含量较无植物对照组显著下降;而 F 组水杉由于生长受到抑制,其土壤 TN、TP 和 AN 含量显著高于无植物组。TK 含量主要由土壤的成土母岩类型所决定,同时也受到人为施肥的影响^[33],而整个研究中并未进行人为施肥活动,故土壤 TK 含量主要来源于土壤母质,本阶段的水杉土壤 TK 较空白组无显著差异,进一步说明植被因素对土壤 TK 含量影响不大。另一方面,对于 F 组的水杉幼树土壤,主要是由于本研究中水杉土壤中的 TN 和 TP 含量与 OM 含量有密切的相关性,其 TN 和 TP 含量变化与 OM 含量相似,其含量均较 C 组显著增加(图 3)。

土壤速效养分是表征土壤肥力的重要指标,其含量水平高低对于植物的生长起着关键性作用、可以一定程度上反映出土壤近期速效营养对植物生长的供应状况^[34]。碱解氮是来源于植物凋落物的分解后释放出的氨态氮和硝态氮及固氮微生物降解的化合态氮,是植物可以利用的氮素状态。本研究中, F 组水杉盆栽土壤 AN 含量与 TN 含量的趋势类似,均显著高于 C 组;而 H 和 F 组土壤的 AP 含量均在本阶段显著下降,可能是由于淹水所引起的土壤 pH 升高,导致正磷酸盐量的降低^[35],间接导致 AP 含量的下降。

3.2 水杉幼树实生土壤化学性质对干旱的响应(阶段 2)

经过本阶段的干旱处理后,HD 和 FD 组土壤 pH 值仍较 CD 组显著升高(图 4a),说明前期水淹增加了水杉幼树盆栽土壤 pH 值后期对干旱胁迫的敏感性。本阶段处理结束后,栽植水杉的盆栽土壤除 C 组外,各水分处理组的 OM 含量均显著或极显著增加,与水杉幼树枯枝落叶以及死亡根系进入到土壤中有关系,还可能与土壤微生物种群和数量的增加有一定关系。与此同时,由于土壤的暴露,土壤中氧气增加,微生物活性显著上

升,加速了对有机质的分解速率,降低了有机质含量^[36],致使 HD 和 FD 组水杉幼树盆栽土壤 OM 含量下降至 CD 组水平(图 4b)。

此阶段中 HD 和 FD 组水杉土壤全量养分含量均较 CD 组无显著性差异,说明前期的水淹并未增加水杉幼树实生土壤全量养分含量后期对干旱的敏感性。而 H 组和 F 组水杉土壤 TN 含量在阶段 2 较阶段 1 显著下降,其原因主要是在淹水期间,一方面一些易释放形态的氮进入到水体中,使得消落带土壤中的全氮含量下降;另一方面则是由于土壤有机物质的分解,增加 TN 向水体的释放量^[37]。另外,随着处理时间的继续,土壤 TK 含量在 H 组有显著上升趋势,这可能与水淹使得土壤从水中吸附营养元素有关^[38]。

另外,HD 和 FD 组的土壤 AN 含量均较 CD 组显著下降,而 AP 含量则显著升高,这说明前期水淹增加了水杉幼树实生土壤 AN 和 AP 含量后期对干旱的敏感性。前人研究发现,影响土壤磷素释放的环境因素除了水中溶解氧、pH 值、氧化还原电位、温度、生物等方面外,土壤周围环境水体组成、水文情势也是影响土壤磷素释放的重要因子^[39-40]。长期淹水处理(141 d)后 H 组和 F 组水杉幼树 AP 含量较 C 组仍显著下降,主要是由于长期淹水所引起的强烈厌氧状态易使 Fe^{3+} 转化为 Fe^{2+} ,进而与 P 素形成可溶性的磷酸亚铁盐,与磷酸盐一起释入上覆水中,导致淹水组土壤 AP 含量下降^[41]。

3.3 水杉幼树实生土壤化学性质对复水的响应(阶段 3)

本研究区域内的土壤 pH 值偏碱性,在所有处理结束后,H 和 HD 组水杉盆栽土壤 pH 较无植物组显著下降,说明水杉栽植对土壤的酸碱度有一定的改善作用,这与前人研究结果^[42]类似;另外,试验结束时除 C 和 CD 组水杉盆栽土壤 OM 含量较无植物组显著或极显著升高,说明水杉对消落带土壤肥力有显著改良作用。对于水杉盆栽土壤而言,阶段 3 处理结束后,所有水分处理组土壤的 pH 值、OM、TP、AN 和 AK 含量均与 C 组无显著性差异存在($P > 0.05$),说明短期的正常供水处理可以使得水杉幼树盆栽土壤 pH 值及多项营养元素含量迅速恢复至对照组水平。另外,H 组和 F 组水杉土壤的 AP 含量较 C 组显著下降,极可能是由于湿干交替的环境增加土壤释放磷素的趋势^[43-44],使土壤 AP 含量显著降低。

4 结论

本研究中,水杉栽植对消落带土壤具有一定的改良作用,并通过对土壤的改良进一步促进自身的生长发育。三峡库区内土壤退化严重,土壤肥力在逐步下降;且随侵蚀程度的增加,土壤中有机质及 N、P 含量将普遍缺乏^[45],因此,在三峡库区消落带适度营造水杉对于恢复库区植被、改良土壤肥力状况具有积极作用;此外,前期水淹增强了水杉幼树盆栽土壤 pH 值、AN 和 AP 含量对后期干旱胁迫的敏感性,且短期恢复生长处理可将水杉土壤 pH 值及多项营养元素含量迅速恢复至正常供水组水平,因此在库区水位处于落干期时应注意定期浇水抗旱,保证其土壤含水量达到正常水平。

参考文献(References):

- [1] Minshall G W, Rugenski A. Riparian processes and interactions // Methods in Stream Ecology. 2nd ed. New York: Elsevier, 2007: 721-742.
- [2] 程瑞梅,王晓荣,肖文发,郭泉水. 消落带研究进展. 林业科学, 2010, 46(4): 111-119.
- [3] 康义,郭泉水,程瑞梅,洪明,金江群,王祥福. 三峡库区消落带土壤物理性质变化. 林业科学, 2010, 46(6): 1-5.
- [4] Chen F Q, Xie Z Q. Reproductive allocation, seed dispersal and germination of *Myricaria laxiflora*, an endangered species in the Three Gorges Reservoir Area. Plant Ecology, 2007, 191(1): 67-75.
- [5] 任雪梅,杨达源,徐永辉,周彬. 三峡库区消落带的植被生态工程. 水土保持通报, 2006, 26(1): 42-49.
- [6] 苏维词. 三峡库区消落带的生态环境问题及其调控. 长江科学院院报, 2013, 21(2): 32-34.
- [7] Baldwin D S, Mitchell A M. The effects of drying and re-flooding on the sediment and soil nutrient dynamics of lowland river-floodplain systems: A synthesis. Regulated Rivers: Research & Management, 2000, 16(5): 457-467.
- [8] Mukhopadhyay S, Joy V C. Influence of leaf litter types on microbial functions and nutrient status of soil: ecological suitability of forest trees for afforestation in tropical laterite wastelands. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(12): 2306-2315.
- [9] 杨予静,李昌晓,张晔,崔云凤. 水淹-干旱交替胁迫对湿地松幼苗盆栽土壤营养元素含量的影响. 林业科学, 2013, 49(2): 61-71.

- [10] Maikhuri R K, Semwal R L, Rao K S, Singh K, Saxena K G. Growth and ecological impacts of traditional agroforestry tree species in central Himalaya, India. *Agroforestry Systems*, 2000, 48(3): 257-271.
- [11] 张晔, 李昌晓. 水淹与干旱交替胁迫对湿地松幼苗光合与生长的影响. *林业科学*, 2011, 47(12): 158-164.
- [12] 谭淑端, 王勇, 张全发. 三峡水库消落带生态环境问题及综合防治. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(S1): 101-105.
- [13] 杜立刚, 方芳, 郭劲松, 付川, 李哲, 鲍振国. 三峡库区城市消落带生态规划与保护探讨. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(6): 726-731.
- [14] 白祯, 黄建国. 三峡库区护岸林主要树种的耐湿性和营养特性. *贵州农业科学*, 2011, 39(6): 166-169.
- [15] 刘文治, 张全发, 李天煜, 李伟, 吴文颖, 刘贵华. 丹江口库区湿地植被的数量分类和排序. *武汉植物学研究*, 2006, 24(3): 220-224.
- [16] 常超, 谢宗强, 熊高明, 赵常明, 申国珍, 赖江山, 徐新武. 三峡库区不同植被类型土壤养分特征. *生态学报*, 2009, 29(11): 5978-5985.
- [17] Reszkowska A, Krtimmelbein J, Peth S, Horn R, Zhao Y, Gan L. Influence of grazing on hydraulic and mechanical properties of semiarid steppe soils under different vegetation type in Inner Mongolia, China. *Plant and Soil*, 2011, 340(1): 59-72.
- [18] 雷明, 李昌晓, 陈伟, 魏虹. 三峡水库岸坡系统不同用地类型对土壤酶活性和土壤化学性质的影响. *林业科学*, 2012, 48(11): 15-22.
- [19] 马朋, 李昌晓, 雷明, 杨予静, 马骏. 三峡库区岸坡消落带草地, 弃耕地和耕地土壤微生物及酶活性特征. *生态学报*, 2014, 34(4): 1010-1020.
- [20] Teague W R, Dowhower S L, Baker S A, Haile N, DeLaune P B, Conover D M. Grazing management impacts on vegetation, soil biota and soil chemical, physical and hydrological properties in tall grass prairie. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 141(3-4): 310-322.
- [21] Farmaha B S, Fernández F G, Nafziger E D. Distribution of soybean roots, soil water, phosphorus and potassium concentrations with broadcast and subsurface-band fertilization. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(3): 1079-1089.
- [22] Sand-Jensen K. Environmental variables and their effect on photosynthesis of aquatic plant communities. *Aquatic Botany*, 1989, 34(1-3): 5-25.
- [23] Luo F L, Zeng B, Chen T, Ye X Q, Liu D. Response to simulated flooding of photosynthesis and growth of riparian plant *Salix Variegata* in the Three Gorges Reservoir Region of China. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(5): 910-918.
- [24] 范小华, 谢德体, 魏朝富. 水、土环境变化下消落区生态环境问题研究. *中国农学通报*, 2006, 22(10): 374-379.
- [25] 孙儒泳, 李庆芬, 牛翠娟, 娄安如. 基础生态学. 北京: 高等教育出版社, 2004: 90-121.
- [26] 张金洋, 王定勇, 石孝洪. 三峡水库消落区淹水后土壤性质变化的模拟研究. *水土保持学报*, 2005, 18(6): 120-123.
- [27] 唐罗忠, 生原喜久雄, 户田浩人, 黄宝龙. 湿地林土壤的 Fe^{2+} , Eh 及 pH 值的变化. *生态学报*, 2005, 25(1): 103-107.
- [28] 常超, 谢宗强, 熊高明, 储立民. 三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响. *自然资源学报*, 2011, 26(7): 1236-1244.
- [29] 张世熔, 黄元仿, 李保国, 高峻. 黄淮海冲积平原区土壤有机质时空变异特征. *生态学报*, 2002, 22(12): 22-28.
- [30] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000: 158-196.
- [31] 马元丹, 江洪, 余树全, 窦荣鹏, 郭培培, 王彬. 不同起源时间的植物叶凋落物在中亚热带的分解特性. *生态学报*, 2009, 29(10): 5237-5245.
- [32] Sahrawat K L. Organic matter accumulation in submerged soils. *Advances in Agronomy*, 2003, 81: 169-201.
- [33] 蒋文伟, 周国模, 余树全, 钱新标, 盛文明. 安吉山地主要森林类型土壤养分状况的研究. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 73-76.
- [34] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 10-25.
- [35] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测. 北京: 中国大地出版社, 2008: 37-38.
- [36] Forster S, Graf G. Continuously measured changes in redox potential influenced by oxygen penetrating from burrows of *Callianassa subterranea*. *Hydrobiologia*, 1992, 235(1): 527-532.
- [37] Kaye J P, Binkley D, Rhoades C. Stable soil nitrogen accumulation and flexible organic matter stoichiometry during primary floodplain succession. *Biogeochemistry*, 2003, 63(1): 1-22.
- [38] 王晓荣, 程瑞梅, 肖文发, 郭泉水, 封晓辉. 三峡库区消落带初期土壤养分特征. *生态学杂志*, 2010, 29(2): 281-289.
- [39] Giesler R, Esberg C, Lagerström A, Graae B J. Phosphorus availability and microbial respiration across different tundra vegetation types. *Biogeochemistry*, 2012, 108(1-3): 429-445.
- [40] Liikanen A, Murtoniemi T, Tanskanen H, Väisänen T, Martikainen P J. Effects of temperature and oxygen availability on greenhouse gas and nutrient dynamics in sediment of a eutrophic mid-boreal lake. *Biogeochemistry*, 2002, 59(3): 269-286.
- [41] Watts C J. The effect of organic matter on sedimentary phosphorus release in an Australian reservoir. *Hydrobiologia*, 2000, 431(1): 13-25.
- [42] 李乃丹, 张庆费, 孙卿, 达良俊. 城市废弃工业区低干扰绿地植物群落的土壤特性. *东北林业大学学报*, 2008, 36(12): 13-16.
- [43] 胡刚, 王里奥, 袁辉, 包亮, 欧阳鸥. 三峡库区消落带下部区域土壤氮磷释放规律模拟实验研究. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(5): 780-784.
- [44] 马利民, 唐燕萍, 滕衍行, 赵建夫. 三峡库区消落区土壤磷释放的环境影响因子. *地学前缘 (中国地质大学 (北京); 北京大学)*, 2008, 15(5): 235-241.
- [45] 杜榕桓, 史德明, 袁建模. 长江三峡库区水土流失对生态与环境的影响. 北京: 科学出版社, 1994: 81-86.