

DOI: 10.5846/stxb201504030672

任庆水, 马朋, 李昌晓, 杨予静, 马骏. 三峡库区消落带落羽杉 (*Taxodium distichum*) 与柳树 (*Salix matsudana*) 人工植被对土壤营养元素含量的影响. 生态学报, 2016, 36(20): - .

Ren Q S, Ma P, Li C X, Yang Y J, Ma J. Effects of *Taxodium distichum* and *Salix matsudana* on the contents of nutrient elements in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir Area. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): - .

三峡库区消落带落羽杉 (*Taxodium distichum*) 与柳树 (*Salix matsudana*) 人工植被对土壤营养元素含量的影响

任庆水, 马朋, 李昌晓*, 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: 落羽杉与柳树被认为是三峡库区消落带植被修复的适生树种。2012 年 7 月 (T1) 及 2013 年 7 月 (T2) 在消落带人工基地取样, 研究了消落带人工植被 (处理组) 及裸地土壤 (对照组) 的营养元素含量, 并对植被生长情况进行调查。结果表明: (1) 对比处理组与对照养分含量发现, T1 时除土壤 pH 值外, 其他养分含量在处理组与对照组间均存在差异。T2 时只有 pH 值、磷 (包括有效磷 AP、全磷 TP)、速效钾 (AK) 含量在处理组与对照组中差异显著。 (2) 对同一植被类型而言, T2 时落羽杉土壤 pH 值与土壤有机质含量 (OM) 均显著低于 T1, 同样, T2 时柳树实生土壤 OM 也显著降低; 处理组土壤中碱解氮 (AN)、AP、全钾 (TK) 含量极显著的低于淹水前, 而 TP 含量却显著升高; 与 T1 相比, T2 时裸地土壤除 AN 含量降低、AK 含量显著升高外, 其它养分含量均未呈现显著差异。 (3) 相关性分析表明, 土壤 pH 值与 TP 含量呈现极显著负相关, 而 OM 与 AN、AP、TK 分别呈现出极显著正相关。AN、AP 分别与 TP 表现出极显著负相关关系, 而与 TK 表现出极显著正相关关系。TK 与 TP 也呈现极显著的负相关关系。此外, 植物高度、基径与冠幅三项生长指标与土壤中的 pH 值、OM、AN、AP (高度除外)、TK 呈现出负相关的现象。研究表明, 落羽杉与柳树人工植被对土壤养分的影响主要出现在水淹之前, 进一步证实三峡库区消落带开展科学的植被修复与重建值得提倡和肯定。

关键词: 三峡库区; 消落带; 植被修复; 土壤养分

Effects of *Taxodium distichum* and *Salix matsudana* on the contents of nutrient elements in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir Area

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

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

Abstract: The purpose of this study was to examine the dynamics of the chemical properties of soil in the water level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir (TGR) region. In addition, the potential impact of vegetation reconstruction on water quality was investigated. Bald cypress (*Taxodium distichum*) and Chinese willow (*Salix matsudana*) are the two dominant species in the riparian zone of the TGR area. Soil samples were taken from vegetation planted below either *T.*

基金项目: 重庆市林业重点科技攻关项目 (渝林科研 2015-6); 宁夏黄河流域生态体系优化构建技术合作研究 (2011DFG32780); 重庆市基础与前沿研究计划重点项目 (CSTC2013JJB00004); 中央高校基本科研业务费专项资金 (XDJK2013A011); 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 (教外司留 [2010-1561]); 中央财政林业科技推广示范项目 (渝林科推 [2014-10]); 重庆市研究生科研创新项目 (CYS2015068)

收稿日期: 2015-04-03; 网络出版日期: 2015-00-00

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

distichum, *S. matsudana* (treatments), or bare soil (control) in July 2012 (T1) and July 2013 (T2), before flooding and after water flooding respectively. The following parameters were measured: soil pH, organic matter (OM), alkali hydrolysable nitrogen (AN), available phosphorus (AP), available potassium (AK), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), and plant growth. The results showed that: (1) At T1, the treatment and control soil nutrient contents were significantly different, whilst pH did not differ between these groups. In contrast, at T2, only the pH, AP, TP, and AK showed significant differences between the treatments and control. (2) The pH value and OM content of *T. distichum* in T2, as well as OM content in *S. matsudana* in T2, were significantly lower than those in T1. After flooding (T1), although AN, AP, and TK contents below the experimental vegetation were significantly lower than the control, TP content was significantly increased. In contrast, at T2, besides an obvious decrease of AN content and a significant increase in AK, the other nutrient elements did not have any notable differences. (3) Correlation analysis showed that pH values were negatively correlated with TP, and OM showed a positive correlation with AN, AP, and TK. Furthermore, AN and AP were negatively correlated with TP and positively correlated with TK. TP and TK had a strong negative relationship. The three growth indices including height, diameter at breast height (DBH), and canopy cover were negatively correlated with soil nutrient elements, including pH, OM content, AN, AP (except height), and TK, while the height showed a positive correlation with TP. In conclusion, this study suggests that the effects of artificially vegetating soil appear only before flooding (T1), but no tafter water flooding (T2). Soil chemical properties under different treatments were homogeneous, which further confirms that artificial revegetation can improve the soil ecological environment with a low chance of eutrophication of the water body. However, there is the potential risk of phosphorus being released from the revegetation soil under *S. matsudana*, and therefore the detection of water phosphorus content is an important factor to take into consideration.

Key Words: Three Gorges Reservoir Area; hydro-fluctuation zone; revegetation; soil nutrients

三峡水库水位每年均在 145—175 m 之间变动^[1],这种以年度为周期的“冬蓄夏排”的水位调度方式使得库周形成垂直落差达 30 m、面积近 400 km²的消落带。该消落带区域是具有独特的反季节水文变化特征的生态区域^[2]。由于库区消落带水位周期性变化,使得土壤含水量呈现出从干旱状态到全水淹状态的一系列梯度变化^[3]。生长于该消落带区域的原有植物种类,因不能适应这种大跨度、长时间、反季节的水淹—干旱—水淹的交替性水文变化节律,基本上消失殆尽。失去了植被覆盖的三峡库区消落带,生物多样性显著降低,生态服务功能退化甚至丧失,本应拥有的生态屏障功能极度减弱^[4]。加之库区周边群众对三峡库区消落带土地的不合理开发利用,导致消落带生境遭到严重损坏,引发诸多环境问题,如关键种群丧失^[5]、水体富营养化加速^[6-7]、景观破碎化严重^[8]、极易引发流行疫情^[9]等。因此,三峡库区消落带植被的修复与重建引起了国内外学者的广泛关注^[10-12]。已有研究表明,落羽杉(*Taxodium distichum*)与柳树(*Salix matsudana*)是三峡库区消落带植被构建的适宜树种^[13-14]。

尽管目前已有关于三峡库区土壤营养元素动态变化的研究报道,如植物群落与水淹对土壤的影响^[15],消落带土壤有机质和全氮含量分布特征^[16],三峡库区初期土壤养分变化特征^[2]等,但均未针对消落带特定的人工乔木树种下土壤营养元素含量开展深入细致的研究,尤其是对生长于三峡库区消落带的人工植被落羽杉和柳树是否会改变土壤营养元素含量,氮磷含量增加后是否影响到水体的富营养化目前还未见报道。因此,本文拟通过对三峡库区消落带落羽杉、柳树实生土壤营养元素含量变化的研究,为三峡库区消落带植被的修复与重建工作提供技术和理论支撑。

1 研究区域概况

本研究区域位于三峡库区重庆忠县境内的汝溪河流域,地处 107°32′—108°14′E, 30°03′—30°35′N,属于

重庆东北部地区三峡库区中心地带。境内河流交错,低山连绵起伏,属丘陵地貌,拥有典型岸坡系统。地质岩层以侏罗纪蓬莱组砂页岩为主,土壤类型有紫色土、水稻土和黄壤。该地区属亚热带东南季风气候,年积温 5787 ℃,年均温 18.2 ℃,无霜期 341 d,日照时数 1327.5 h,日照率 29%,年降雨量 1200 mm,相对湿度 80%。自三峡工程竣工以来,生态环境问题日益突出,消落带原始植被严重破坏,土壤侵蚀及水土流失现象严重。当地沿岸村民利用退水后出露的消落带继续进行农事耕种,翻耕土壤、施用化肥和农药的现象较为普遍。

为进行三峡水库消落区的生态修复,课题组于 2012 年 3 月(T0)在重庆忠县石宝镇汝溪河流域建立植被生态修复示范基地,面积 0.133 km²,示范基地内土壤质地、肥力状况基本一致(表 1)。研究区域内,在 165 m—175 m 海拔高程按 1 m×1 m 的行间距栽植落羽杉、柳树两种带状混交植被(落羽杉苗木由重庆市江北区机场附近的苗圃提供,柳树苗木由重庆市忠县石宝镇一苗圃提供)。所选岸坡样地平均坡度为 26°,岸坡上接受光照辐射强度大致相同,土壤预热条件基本一致。所栽植苗木的规格均为两年生健康苗木,栽种时苗木的基本情况如表 2 所示。两次取样时植被成活率均为 100%,生长状况良好。

表 1 土壤养分含量初始值
Table 1 The basic content of soil nutrient

植被类型 Vegetation types	pH pH value	有机质含量 OM content/ (g/kg)	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)	全氮含量 TN content/ (g/kg)	全磷含量 TP content/ (g/kg)	全钾含量 TK content
落羽杉 <i>T.distichum</i>	6.597±0.137	10.325±0.651	75.623±5.021	3.145±0.188	58.734±4.215	0.609±0.032	0.697±0.060	27.834±2.518
柳树 <i>S. matsudana</i>	6.423±0.085	12.668±0.732	77.522±4.329	3.320±0.564	57.238±5.618	0.732±0.078	0.589±0.026	29.887±1.532
裸地 Unplanted soil	6.605±0.142	10.536±0.529	74.603±7.712	3.274±0.257	55.632±4.882	0.620±0.012	0.724±0.134	27.032±0.975

表 2 落羽杉与柳树苗木栽植规格(平均值±标准误)
Table 2 Basic situation of the saplings (Mean ± SE)

植被类型 Vegetation types	株高/m Height/m	胸径/cm Diameter at breast height (DBH)	冠幅/m ² Canopy	株行距/(m×m) Plantting Distance
落羽杉 <i>T.distichum</i>	1.631±0.023	0.413±0.030	0.781±0.083	1×1
柳树 <i>S. matsudana</i>	1.613±0.130	0.386±0.192	0.492±0.244	1×1

2 研究方法

2.1 样品采集与分析

根据三峡水库水位在忠县汝溪河流域的变化(图 1),于 2012 年 7 月(T1)水位上涨前取样一次,然后于 2013 年 7 月(T2)水位消落后进行第二次野外取样。两次取样时,土壤物理性质如下(表 3)。

表 3 土壤基本物理性质
Table 3 Basic physical characteristics of soil

植被类型 Vegetation types	含水量 Water content		容重 Volume-weight/(g/cm ³)		孔隙度 Porosity		电导率 Conductivity/(s/m)	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
落羽杉 <i>T.distichum</i>	13.80%	19.20%	1.61	1.44	38.49%	45.79%	105.83	135.92
柳树 <i>S. matsudana</i>	12.70%	24.70%	1.44	1.29	41.20%	51.50%	114	150.50
裸地 Unplanted soil	12.40%	10.50%	1.61	1.25	38.68%	47.26%	131.75	132.08

在采样区域内,落羽杉取样地理坐标为 108°08′11″E, 30°21′09″N,柳树取样地理坐标为 108°09′24″E,30°21′12″N,每种植被类型下均随机划定 6 块 5 m×5 m 样方,每个样方内按梅花形设置 5 个重复取样点,各样方间隔 10m。同时选取试验区域内相同海拔段的无植被裸地土壤(108°07′14″E, 30°21′14″N)作为对照。野外

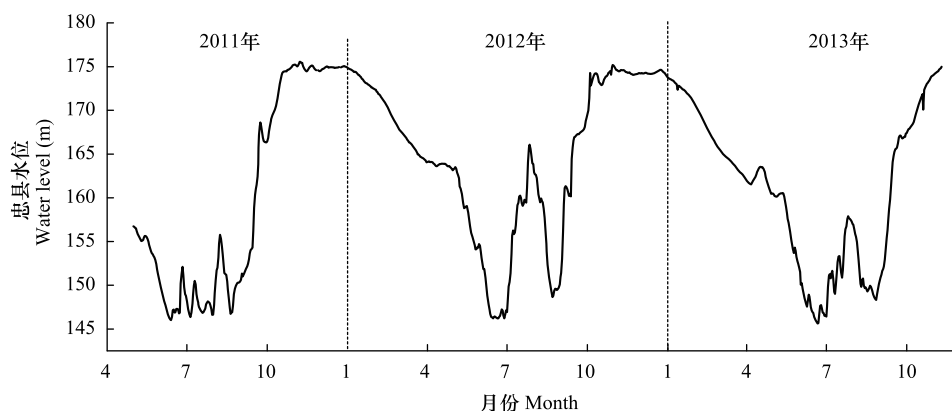


图1 2011年5月至2013年10月重庆忠县水位变化

Fig.1 Water level change of the hydro-fluctuation zone in Zhongxian County from May 2011 to October 2013

操作时采用 IQ150 土壤原位 pH 计 (IQ Scientific Instruments, Inc., San Diego, CA USA) 测定土壤 pH 值, 同时在各样地随机选取 5 株植物, 记录生长状况, 用卷尺测量株高与冠幅, 用游标卡尺测定基径, 相关方法参考方精云等《植物群落查清的主要内容, 方法和技术规范》^[17]; 每个采样点采集 0—20 cm 土层的土壤样品, 并将每个样地的土壤样品按四分法混合后, 用聚乙烯自封袋带回实验室, 风干后以供土壤化学分析。

土壤有机质 (OM) 测定采用重铬酸钾外加热法; 土壤全氮 (TN) 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 (AN) 含量; 土壤全磷 (TP)、速效磷 (AP) 含量测定采用钼锑抗比色法; 全钾 (TK)、速效钾 (AK) 含量测定采用原子吸收光谱仪 (美国 PE 公司生产的 AA800)。

2.2 数据处理

根据测定土壤指标, 采用重复度量方差分析 (Repeated measures ANOVA) 分析不同取样时间与不同植被类型对土壤养分含量的影响, 并用 Tukey 检验法检验每个指标在不同植被类型间的差异显著性 ($\alpha=0.05$); 采用独立样本 T 检验分析一年水淹落干之后, 同一植被类型各化学指标在前后两次测定之间的差异显著性; 并采用 Pearson 相关系数法评价土壤各化学特性之间的相关性。本研究采用 SPSS 17.0 软件进行数据分析, 用 Origin 8.6 软件制图。

3 结果

3.1 人工植被生长状况

落羽杉和柳树在 T2 时期的株高、胸径和冠幅较 T1 时均有显著增加 ($P<0.05$) (图 2), 落羽杉所测上述三项指标依次增加 37%、167%、126%, 柳树上述三项指标则依次增加 47%、124%、108%。与 T0 时刚栽种相比, 落羽杉在 T2 时的株高、胸径和冠幅分别增加 53%、336% 和 265%; 同样地, 柳树在 T2 时则依次分别增加 74%、232% 和 211%。

3.2 土壤 pH 值与有机质含量的变化

对土壤 pH 值进行分析发现, 植被类型、取样时间均对土壤 pH 值产生显著影响, 而二者交互作用并未显著影响土壤 pH 值 (表 4)。在同一植被处理组内, T2 时柳树实生土壤与裸地土壤 pH 值分别与各自 T1 时的值相比均未呈现出显著差异; 与之不同, 与 T1 时相比, 落羽杉实生土壤 T2 时的 pH 值极显著降低 23% ($P<0.001$; 表 5)。

重复度量方差分析表明, 植被类型、取样时间以及二者的交互作用均会对土壤 OM 含量产生显著影响 ($P<0.05$; 表 4)。此外, 在同一处理组内, 裸地土壤在 T2 时的 OM 含量与 T1 时相比无显著性差异存在, 这与落羽杉和柳树实生土壤 T2 时的 OM 含量较 T1 时分别显著降低 25% 和 42% 形成鲜明对比 ($P<0.05$; 表 5)。

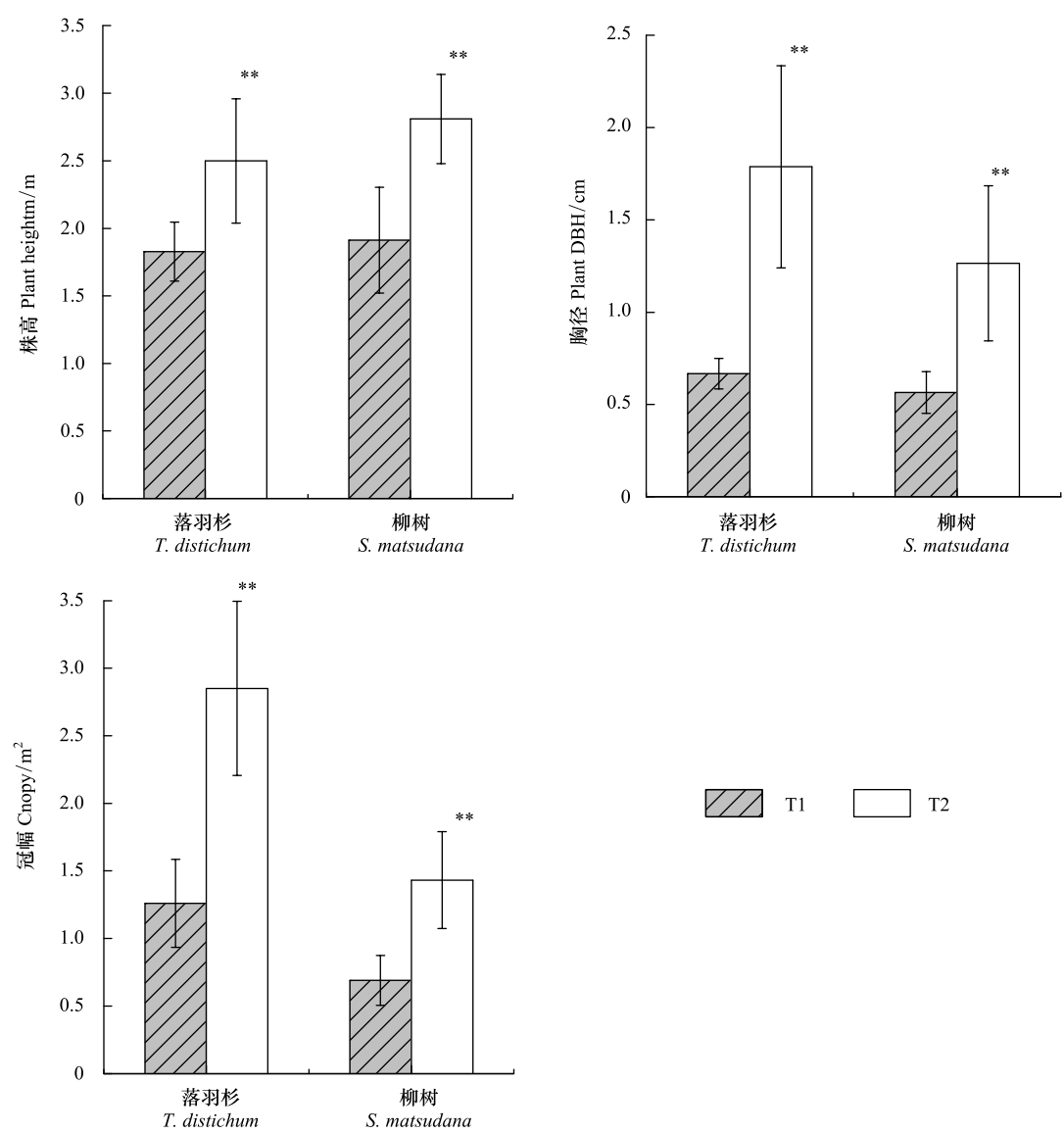


图 2 消落带植被样地树木生长状况 (平均值±标准误)

Fig.2 Growth circumstance of sampling trees in the Three Gorges Reservoir Area (Means ± SE)

* * $P < 0.01$

表 4 土壤营养元素含量的重复度量方差分析

Table 4 Repeated measures ANOVA table for soil nutrition content

化学性质 Chemical properties	F 值(概率) F value(Property)		
	取样时间 Time	植被类型 Vegetation types	取样时间×植被类型 Time × Vegetation types
pH 值 pH value	17.863 (0.001) **	3.809 (0.046) *	3.456 (0.058) ns
有机质含量 Organic matter(OM) content	6.581 (0.022) *	15.380 (0.000) ***	8.211 (0.004) **
碱解氮含量 Available nitrogen (AN) content	314.502 (0.000) ***	9.288 (0.002) **	12.050 (0.001) **
有效磷含量 Available nitrogen (AP) content	90.443 (0.000) ***	5.144 (0.011) *	4.761 (0.025) *
速效钾含量 Available nitrogen (AK) content	2.779 (0.116) ns	0.771 (0.480) ns	10.474 (0.251) ns
全氮含量 Total nitrogen (TN) content	9.044 (0.009) **	3.450 (0.059) ns	1.141 (0.346) ns
全磷含量 Total phosphorus (TP) content	71.004 (0.000) ***	18.160 (0.000) ***	23.931 (0.000) ***
全钾含量 Total potassium (TK) content	75.699 (0.000) ***	35.608 (0.000) ***	17.939 (0.000) ***

ns $P > 0.05$; * $P < 0.05$; * * $P < 0.01$; * * * $P < 0.001$

表 5 不同植被类型 T1 与 T2 取样时土壤 pH 值与有机质含量(平均值 $\pm$ 标准误)Table 5 Soil pH and OM content at T1 and T2 under different vegetation types (Mean $\pm$ SE)

植被类型 Vegetation types	pH 值 pH value			有机质 OM content/(g/kg)		
	T1	T2	T 值(P 值)	T1	T2	T 值(P 值)
落羽杉 <i>T. distichum</i>	6.796 $\pm$ 0.212 a	5.253 $\pm$ 0.124 b	6.273 (0.000)	13.974 $\pm$ 0.424 b	10.479 $\pm$ 0.952 a	3.353 (0.012)
柳树 <i>S. matsudana</i>	5.945 $\pm$ 0.439 a	5.423 $\pm$ 0.095 b	1.159 (0.295)	19.955 $\pm$ 1.897 a	11.593 $\pm$ 0.664 a	4.160 (0.006)
裸地 Unplanted soil	6.705 $\pm$ 0.405 a	6.302 $\pm$ 0.101 a	0.966 (0.374)	9.821 $\pm$ 1.009 c	12.831 $\pm$ 1.400 a	-1.744 (0.112)

不同字母表示同一时间不同人工植被类型的土壤 pH 值与 OM 含量存在显著差异

3.3 土壤氮磷钾速效养分含量的变化

对土壤 AN 含量而言, T1 时, 三种植被类型 AN 含量差异显著, 而经过水淹后差异被消除(图 3a)。重复度量方差分析表明, 取样时间、取样时间与植被类型的交互作用也极显著影响土壤的 AN 含量($P<0.01$; 表 4)。就同一植被处理组内 AN 含量而言, 与 T1 时相比, 不论是人工植被土壤还是裸地土壤, 其 AN 含量均极显著降低($P<0.001$), 落羽杉、柳树、裸地土壤 AN 含量在 T2 时分别下降 35%、43% 和 28%(图 4a)。

T1 时落羽杉实生土壤 AP 含量与裸地与柳树实生土壤相比, 分别显著降低 42% 和 40%, T2 时则仅较裸地显著降低 65%, 而与柳树实生土壤无显著差异($P<0.05$; 图 3b)。然而, 柳树实生土壤 AP 含量在 T1 时与裸地土壤之间则并无显著性差异存在, T2 时显著低于裸地土壤。植被类型、取样时间以及植被类型与取样时间的交互作用均对土壤 AP 含量产生显著影响($P<0.05$; 表 4)。在相同植被类型下, 落羽杉与柳树实生土壤在 T2 时的 AP 含量较 T1 时分别显著下降 54% 和 51%, 这与裸地土壤前后两次测定的平均值之间并未产生显著差异形成明显对比(图 4b)。

植被处理组并未显著改变土壤 AK 含量, 与之相同, 时间因素对 AK 含量无显著影响, 植被与时间的交互作用也未显著影响土壤的 AK 含量($P>0.05$; 表 4)。对同一处理组内前后不同测定时间的 T 检验结果表明, 落羽杉和柳树在 T2 时的土壤 AK 含量较 T1 时并无显著变化(图 4c), 但裸地土壤 T2 时的 AK 含量与 T1 相比则显著增加 41%。

3.4 土壤氮磷钾全量含量的变化

不同人工植被处理对土壤全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)含量的影响不尽相同。T1 时, 柳树实生土壤 TN 含量极显著高于落羽杉与裸地土壤, 分别显著高出 24% 和 23%, T2 时 TN 含量在三种植被处理组间无显著差异存在(图 5a)。重复度量方差分析表明, 植被类型对 TN 含量无显著影响, 与植被因素相似, 植被与取样时间的交互作用对土壤 TN 含量也无显著影响($P>0.05$; 表 4); 但与之不同的是, 取样时间则显著影响各处理组的土壤 TN 含量($P<0.05$; 表 4)。T 检验结果表明, 在每个处理组内, 前后两次取样的土壤的 TN 含量均无显著差异存在($P>0.05$; 图 6a)。

取样时间以及取样时间与植被互作也极显著影响土壤的 TP 含量($P<0.01$, 表 4)。在每个处理组内, T2 时落羽杉与柳树土壤的 TP 含量与 T1 测定时相比均极显著地增加($P<0.01$; 图 6b), 而与之相反, T2 时裸地土壤的 TP 含量较 T1 时并无显著差异存在($P>0.05$; 图 6b)。

柳树植被处理组土壤的 TK 含量最高, 分别显著高出落羽杉和裸地土壤 33% 和 65%。与此同时, 落羽杉比裸地土壤也显著高出 24%。然而落羽杉、柳树与裸地三者 TK 含量的差异主要表现在水淹前(T1), 水淹后三者差异则被消除(图 5c)。土壤 TK 含量受时间、植被类型以及二者交互作用的显著影响(表 4)。对同一处理组内前后两次不同测定时间的 T 检验表明, T2 时落羽杉与柳树实生土壤的 TK 含量较 T1 时均极显著降低($P<0.01$; 图 6c), 分别降低 37% 和 57%, 与裸地土壤的 TK 含量在前后两次测定值之间无显著差异形成鲜明对比($P>0.05$; 图 6c)。

3.5 土壤营养元素含量相关性分析

相关性分析表明, 土壤 pH 值与 TP 含量呈现极显著负相关, 而 OM 与 AN、AP、TK 分别呈现出极显著正相关。与此同时, AN、AP 分别与 TP 表现出极显著负相关关系, 而与 TK 表现出极显著正相关关系。TK 与 TP

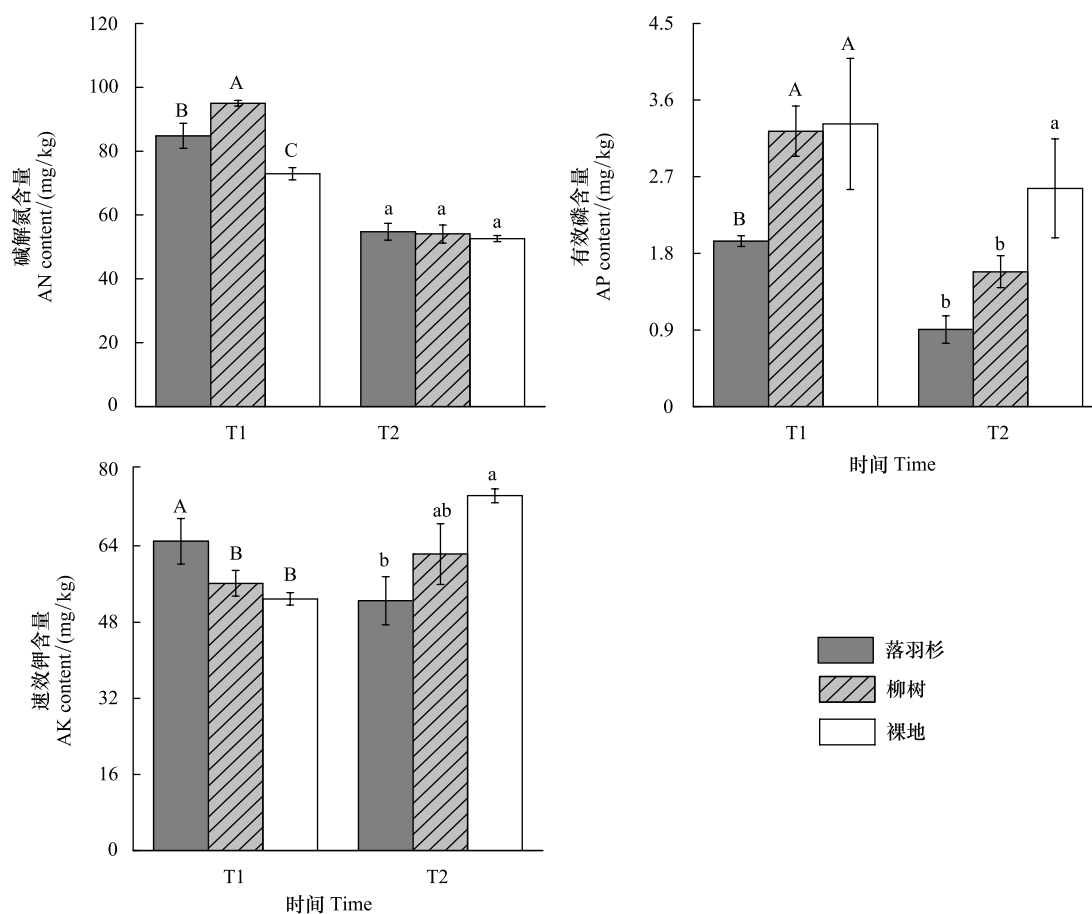


图3 相同取样时间落羽杉、柳树及裸地土壤碱解氮(a)、有效磷(b)、速效钾(c)含量(平均值±标准误)

Fig.3 Soil AN (a), AP (b), and AK (c) content under different vegetation types in the same time (Mean ± SE)

不同大写字母表示 T1 时不同人工植被类型的土壤性质存在显著差异。不同小写字母表示 T2 时不同人工植被类型的土壤性质存在显著差异

也呈现极显著的负相关关系。植物高度、基径与冠幅三项生长指标,与 TN 和 AK 均未表现出显著的相关性,而与土壤 pH 值、OM、AN、AP(高度除外)、TK 含量均呈现负相关关系。另外,植物的株高与 TP 呈现出极显著的正相关性。

表6 人工植被土壤营养元素间的相关性分析

Table 6 Correlations between soil nutrient contents of artificial vegetation

化学及生长指标 Chemical and growth indice	pH 值 pH value	有机质 OM	碱解氮 AN	有效磷 AP	速效钾 AK	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	株高 Height	冠幅 DBH
有机质 OM	0.325									
碱解氮 AN	0.432 *	0.699 **								
有效磷 AP	0.047	0.655 **	0.787 **							
速效钾 AK	0.104	0.014	0.002	0.008						
全氮 TN	-0.084	0.254	-0.194	-0.095	0.079					
全磷 TP	-0.387 *	-0.444 *	-0.785 **	-0.529 **	0.191	0.465 *				
全钾 TK	0.359	0.813 **	0.856 **	0.777 **	-0.124	0.079	-0.646 **			
株高 Height	-0.423 *	-0.406 *	-0.656 **	-0.340	-0.196	0.179	0.621 **	-0.542 **		
冠幅 DBH	-0.472 *	-0.561 **	-0.583 **	-0.547 **	-0.134	-0.244	0.226	-0.634 **	0.581 **	
胸径 Canopy	-0.502 *	-0.429 *	-0.591 **	-0.481 *	-0.034	0.076	0.387	-0.504 *	0.593 **	0.829 **

** 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)

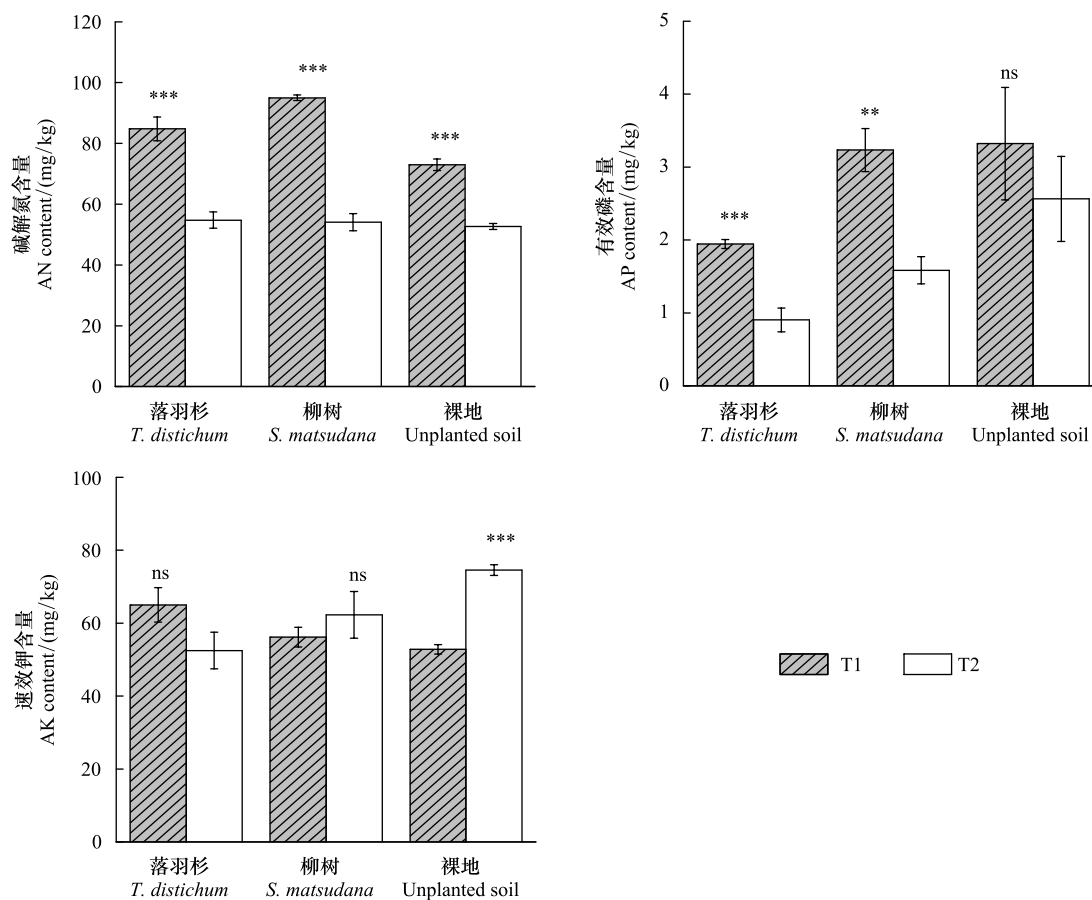


图4 落羽杉、柳树及裸地土壤在不同取样时间的碱解氮(a)、有效磷(b)、速效钾(c)含量(平均值±标准误)

Fig.4 Soil AN (a), AP (b), and AK (c) content under different vegetation types (Mean ± SE)

ns 表示 $P > 0.05$; * 表示 $P < 0.01$; *** 表示 $P < 0.001$

4 讨论

消落带为陆生生态系统和水生生态系统的过渡地带,存在频繁的物质交换。在人工植被构建后,植被-土壤之间存在季节性的干湿交替,伴随着土壤理化性质、好氧厌氧状态、植被生长状态等一系列复杂变化。同时,水土-河岸土壤之间也发生着强烈的物质交换,水分条件通过影响土壤湿度、氧化还原电位、通气条件等影响土壤养分及土壤化学过程。

4.1 植被生长状况

落羽杉是杉科落羽杉属的落叶乔木,柳树属于杨柳科柳属落叶乔木,二者均易繁殖,耐水淹能力强,是园林绿化、用材和农田防护林的常用树种^[18-21]。目前,对落羽杉的研究主要集中在水淹条件下其光合特性的变化^[3]、根部次生代谢物质含量及根生物量的变化^[13]等方面;而对柳树的研究则主要集中在水分胁迫下其生理生化反应^[22]、柳树对重金属的耐受性^[21]等。

在消落带人工建植的落羽杉与柳树示范基地内,尽管2012年7月人工植被构建初期(T1时),落羽杉与柳树相比,二者株高和基径并无显著差异($P > 0.05$),但经过三峡水库的一个水淹周期之后,落羽杉胸径、冠幅均显著高于柳树($P < 0.05$;图2)。有研究表明,完全水淹条件下氧气供应减少,使植物生长遭受胁迫,导致植物对碳水化合物利用率降低,加剧营养物质在植物体内的消耗^[23];加之水中二氧化碳含量较少,植物的光合作用受阻^[24],故水淹会引起植物生长状况下降,生物量减少,以致植物生长随着水淹和退水发生改变。就本研究而言,植被生长一年之后,树木的株高、基径、冠幅均呈现增加趋势,且两种树木的长势较为明显,这应与

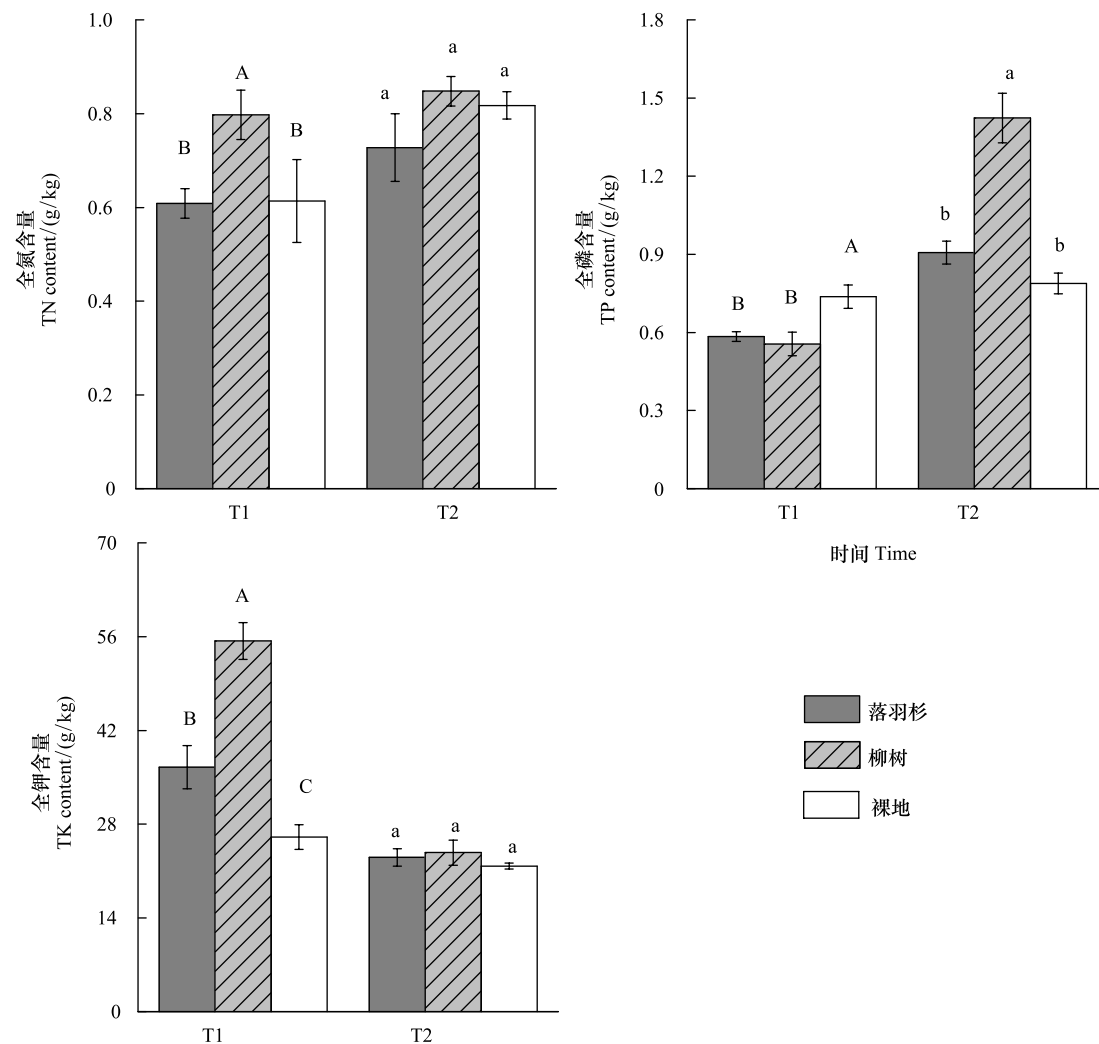


图5 相同取样时间落羽杉、柳树及裸地土壤碱解氮(a)、有效磷(b)、速效钾(c)含量(平均值±标准误)

Fig.5 Soil TN (a), TP (b), and TK (c) content under different vegetation types in the same time (Mean ± SE)

其根系分泌物活化土壤难溶态元素、增加植物对矿质元素的吸收及提高营养物质的利用效率密切相关。由此较好地解释了植物高度、基径与冠幅三项生长指标与土壤中的一些营养元素含量呈现出负相关的现象(表6)。同时,土壤微生物对土壤理化性质的影响可以调节土壤质量,进而影响地表植被生长^[25],也可能是植被生长状况产生差异的原因,但仍需后续进一步探究。

4.2 土壤 pH 值与有机质含量的变化

已有研究表明,三峡水库消落带土壤淹水之后,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]。然而,本实验中落羽杉、柳树土壤的 pH 值并不完全遵循这一变化规律。在 T1 时,落羽杉与柳树实生土壤的 pH 值与裸地土壤并无显著差异(表5),而在经历一年的水文变化周期后(即 T2 时)却显著低于裸地土壤(表5),由此说明落羽杉与柳树的生长发育已经改变三峡库区消落带实生土壤的 pH 值,使得土壤的酸性较无植物对照组裸地有所增强。这极有可能是由于栽植的落羽杉与柳树人工植被在根际形成偏酸的土壤环境所致。有许多研究表明杉木等人工林会引起土壤 pH 值降低^[28],造成土壤酸化的影响因素很多,如土壤的理化性质、土壤生物的种类与数量、当地的环境条件等^[29]。但针对具体土壤进行分析,其酸度成因和动态变化应是各个因素交互作用的结果^[30]。在三峡库区消落带水淹—落干条件下,种植落羽杉与柳树的消落带土壤出现酸化现象,极有可能是土壤胶体界面阴阳离子吸收不平衡所致^[31]。落羽杉与柳树在生长过程

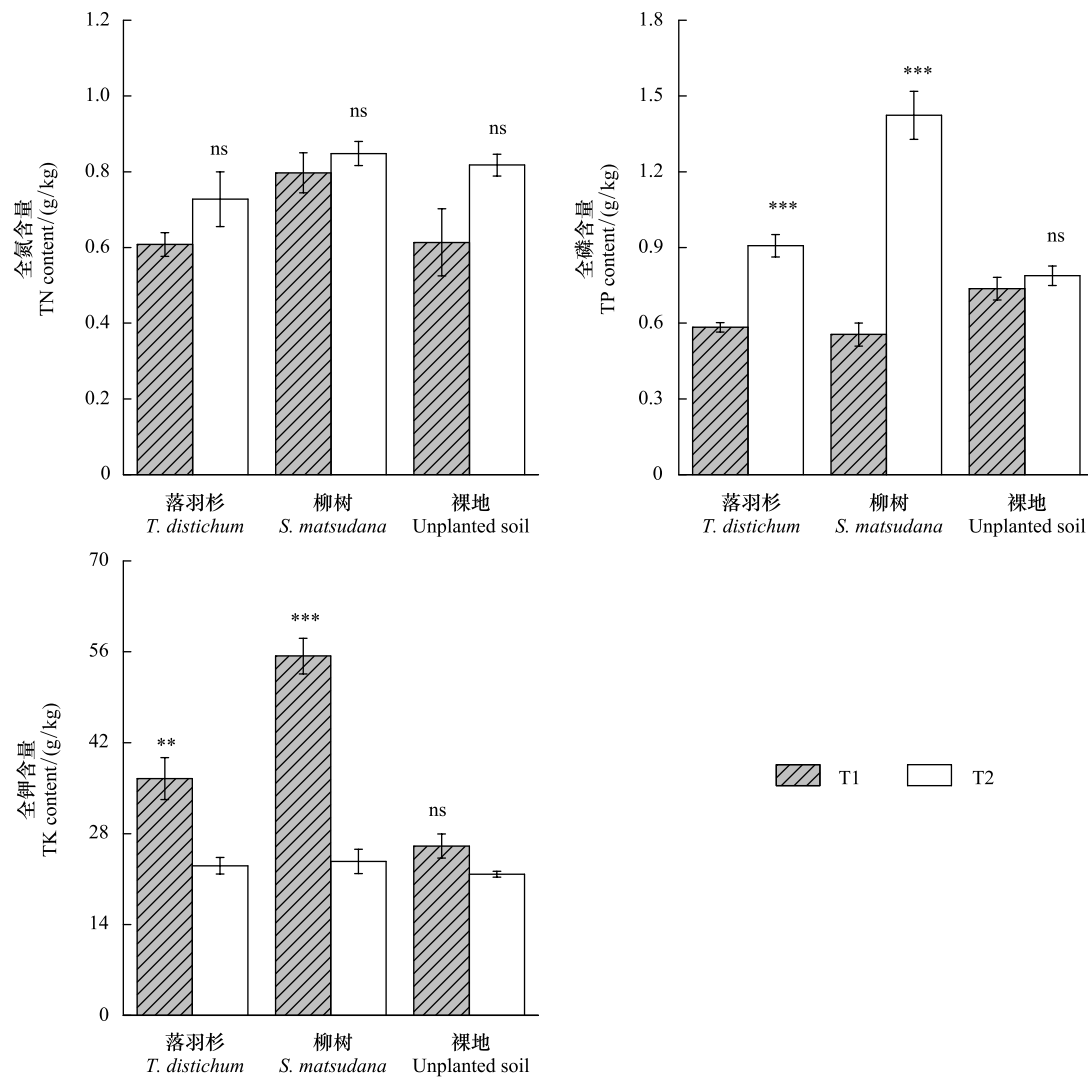


图6 落羽杉、柳树及裸地土壤在不同取样时间的全氮(a)、全磷(b)、全钾(c)含量(平均值±标准误)

Fig.6 Soil TN (a), TP (b), and TK (c) content under different vegetation types (Mean ± SE)

中会从土壤中吸收大量的矿质阳离子,如 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等,这样会导致土壤胶体界面阳离子吸收量大于阴离子吸收量,使得落羽杉与柳树实生土壤朝酸性方向发展;另外,落羽杉与柳树根系分泌的有机酸、 HCO_3^- 和微生物在土壤表层分泌的酸性较强的有机酸(如草酸等),将进一步导致落羽杉与柳树的实生土壤出现酸化现象^[30,32-33]。

土壤 OM 主要来源于植被凋落物以及土内微生物和土壤动物、植物根系的残基。其中,凋落物是土壤养分重要的物质与能量来源,凋落物自身的营养元素经分解后归还土壤,可以显著提高土壤肥力^[34]。Aert 等^[35] 研究发现土壤养分的供给与循环存在正反馈作用,凋落物产量增加时,反馈也不断加强^[36]。本研究发现经过一个周期的水淹—落干之后的消落带裸地土壤的 OM 含量存在一定程度升高的现象(表 5),这与已有的国内外研究结果基本一致^[37-38]。因为处于淹水状态下的土壤,其氧化还原电位会降低,易产生还原性物质,有利于 OM 的积累^[39-40];与此同时,渍水厌氧条件使生物活动减弱,OM 的分解减少^[41],有利于其含量的维持甚至于增加。与裸地相反,种植落羽杉与柳树的土壤 OM 在经历一个水淹周期之后含量均降低且差异显著(表 5),主要是由于栽植林木之后的消落带土壤通透性及亲水性增强,江水浸泡之后易发生软化,江水、雨水的淘蚀冲击作用加大,极易导致土壤 OM 的流出,进而降低幼树实生土壤中 OM 的含量。

本研究中落羽杉、柳树、裸地 3 种不同处理的土壤 OM 含量存在差异的现象,充分说明不同植被类型将会

影响土壤 OM 甚至土壤养分含量的变化^[42],尤其是不同植被之间的凋落物数量与生物量差异较大,导致进入土壤中的有机物数量不同^[6,35,43]。然而,柳树处理组的 OM 含量显著高于落羽杉及裸地处理组,主要是由于淹水前(即 T1)土壤中的 OM 含量差异引起,淹水后(即 T2)三个处理组的土壤 OM 含量并无显著差异存在(表 5)。在三峡水库水位涨落过程中,柳树与落羽杉凋落物容易悬浮在水体表面,且随着水流离开土壤,加之较长时间的水淹浸泡,各处理组土壤的 OM 含量容易呈现出均质化、且相互之间无显著差异的现象(表 5)^[44-45]。

4.3 土壤氮磷钾速效养分含量的变化

土壤速效养分含量是表征土壤肥力的重要指标,反映出一定时间内土壤速效营养对植物的供给状况^[34]。对于土壤速效养分含量,植物生长吸收是其减少的主要原因。但由于同种植物对于不同元素、不同植物对于同种元素的吸收利用程度不同,故落羽杉与柳树土壤的变化情况也存在差异。水淹之后,各处理组土壤 AN 含量呈现下降趋势,可能是植物生长消耗及雨水淋失共同造成的。值得特别指出的是,土壤在淹水的厌氧条件下将会进行反硝化反应,将 NO_3^- 转变为 N_2 ^[46],从而进一步促使长期水淹状态下的土壤 AN 含量较淹水前显著偏低。

在淹水还原条件下,土壤中磷的含量受土壤 pH 值、Eh 以及无定型铁的影响^[47-48],其溶解性和有效性会增加^[49]。本研究发现,经过一个周期的水淹之后,落羽杉与柳树实生土壤的 AP 含量均低于水淹之前,且柳树土壤 AP 含量下降更为显著,极有可能是由于柳树对磷的吸收强度显著高于落羽杉所致。尽管淹水在一定程度上可以增加土壤中速效磷的有效性,但三峡水库长时间的淹水以及江水的扰动均可能造成沉积物中速效磷的大量物理释放;另外,淹水造成的较长期强烈厌氧环境,使 Fe^{3+} 转化为 Fe^{2+} ,后者可与磷结合产生可溶性的磷酸亚铁盐释入上覆水中^[50],进而使 AP 含量降低。

本实验发现裸地土壤的 AK 含量较淹水前显著升高(图 3c),可能是由于水浸促进了含钾矿物的风化,使难溶态钾向可溶态钾转化。然而,落羽杉与柳树实生土壤的 AK 含量在淹水前后分别并无显著差异,说明有植被生长的消落带土壤对 AK 的供给相对较为稳定。尽管土壤钾元素容易受到雨水淋溶作用的影响,且 AK 极易在水分胁迫条件下从土壤中溶出,从而降低土壤的 AK 含量,但在三峡库区消落带的特定环境条件下,尤其是在消落带植被得到修复重建后,土壤 AK 含量保持较为平稳,这从一个侧面反映出消落带植被的修复与重建所起的重要作用。

4.4 土壤氮磷钾全量含量的变化

在外界土壤环境与气候状况相同的条件下,不同的植被类型将对土壤的化学性质产生明显影响。这表明土壤特性除了与其环境气候、成土母岩、自然条件密切相关外,植被的作用也不容忽视。事实上,植物群落对土壤发育的作用,一是可以通过根系、凋落物等返还土壤而直接参与土壤的成土过程,二是可以通过改变群落水热环境而间接影响土壤的发育^[5]。在消落带水位涨落前后,本研究中落羽杉与柳树实生土壤 TN 含量均未发生显著改变(图 4a),而 TP 含量与 TN 相比结果却截然不同(图 4b)。由此充分说明,落羽杉与柳树种植初期土壤氮素养分总量将不会得到显著增加,但会显著增加土壤磷元素的总量。这可能是由于植被构建之后,土壤团聚结构得到改善^[51],土壤孔隙度有所增加,进而促进了固磷细菌对磷元素的矿化;此外,土壤中的 TP 大部分是无机磷,含量取决于成土母质的风化程度及矿物组成,在本研究中,测定时间 T2 处于 2013 年 7 月,土壤温度较高,较高的温度将促进砂土风化,这也可能导致土壤 TP 含量显著增加。

本实验中落羽杉与柳树林地经历一年的水淹周期之后,土壤 TK 含量均有所降低,这极有可能是植物生长利用消耗以及雨水淋溶损耗所致。有研究指出 OM 具有突出的保钾作用^[52-53],本研究发现消落带土壤 OM 与 TK 含量存在显著的正相关(表 4),因此 TK 含量降低也应与 OM 的含量减少(表 5)密切相关。特别值得指出的是,消落带裸地土壤的 TN、TP、TK 含量均在淹水前后差异分别不显著,可能与其成土母质类型相对稳定有一定关系^[44]。

4.5 土壤营养成分含量之间的相关性

本研究发现 pH 值与 TP 含量呈显著负相关性(表 4)表明,土壤磷元素的总量受到土壤 pH 值的强烈影

响,pH 值越低,消落带土壤中的磷元素总量将有所增加。这从一个侧面较好地解释了在 T2 时落羽杉与柳树适生土壤因较低的 pH 值 TP 含量较裸地相比均显著增加(图 4b)的现象。在含磷化合物中,可被植物吸收的只有正磷酸盐和有机磷两种形式,pH 值的变化会引起磷的存在形式的改变,抑制了磷元素的固定作用,促进了磷元素的有效利用,故土壤变酸或变碱都会造成正磷酸盐含量降低^[54]。

三峡库区消落带土壤 OM 与 AN 含量表现出极显著的正相关性,是因为土壤氮素主要存在于 OM 中,氮素的输入量主要依赖于植物残体的归还量和生物固氮^[2,55]。本研究不同植被类型速效氮含量与 OM 含量有相同的消长趋势,这与之前的研究结论一致^[32,56]。

一般而言,土壤中钾元素的有效态主要为交换态,其含量大小主要取决于土壤本身含量和土壤表面的聚集作用^[57]。本研究发现土壤 TK 与 OM 含量呈现出极显著的正相关性,这极有可能系消落带水淹和植被修复重建所致,因为 OM 的积累能改善土壤的物理性质,使钾元素更易累积和转移,促使难溶性钾的释放,提高 AK 的利用效率^[2]。本实验中落羽杉与柳树实生土壤 OM 含量在 T2 时较 T1 时显著降低,势必会导致钾元素的累积和转移速率相对变缓,但由于土壤中 AK 的供给仍保持相对稳定(图 3c),故土壤中 TK 总量在 T2 时的显著降低可能是由于落羽杉与柳树生长过程消耗所致。

土壤中的 AP 含量因植被生长吸收减少,而植被为获取更多的 AP,促使土壤释放大量 TP,且使其向对应的速效养分转化,以满足自身生长需求,这不但与上述 TP 含量升高相吻合,且可以较好的体现 AP 与 TP 之间的负相关关系。消落带中,植物的生长与土壤 pH 值及营养元素含量密切相关,本研究中植物生长过程中根系分泌有机酸造成土壤 pH 降低,是植被生长指标与土壤 pH 值呈现负相关的主要原因,与此同时植被为满足自身生长发育需要,吸收土壤中的 OM、AN 与 AP,促使土壤中 OM、AN 及 AP 含量降低;而 OM 具有保钾作用,因此植被生长吸收造成 OM 含量的降低,可能间接影响土壤中的 TK 含量,使植被生长与土壤 TK 呈现负相关关系。

5 结论

在三峡库区消落带种植的人工植被落羽杉与柳树,在经历一个水淹—落干的水文变动周期后,两树种实生土壤在 T2 时的 pH 值均显著低于同时段的裸地(表 5),并且 OM 含量、AN(图 3a)、AP(图 3b)、AK(图 3c)、TN(图 5a)、TK(图 5c)分别均未显著高出裸地对照组。与 T2 时的裸地相比,只有柳树人工植被实生土壤的 TP 含量显著升高(落羽杉与裸地在 T2 时的 TP 含量无显著差异, $P>0.05$,图 5b)。

综上所述,落羽杉与柳树人工植被对土壤养分的影响,主要出现在水淹之前(即 T1 时期)。在经历一个水淹—落干的水文变化周期之后,各处理组土壤营养元素含量的均一化现象明显。这进一步证实在三峡库区消落带开展科学的植被修复与重建值得提倡和肯定,人工植被产生水体富营养化的风险较低。当然,需要特别注意柳树实生土壤向水体中释放 P 元素的风险,加强对水体 P 含量的检测。由于本研究仅涉及到一个水淹周期,时间相对较短,开展长期的动态跟踪研究显得十分必要,这也是课题组目前正在进行的工作之一。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 李昌晓,钟章成. 模拟三峡库区消落带土壤水分变化条件下落羽杉与池杉幼苗的光合特性比较. 林业科学, 2005, 41(6): 28-34.
- [4] 曲国辉,郭继勋. 松嫩平原不同演替阶段植物群落和土壤特性的关系. 草业学报, 2003, 12(1): 18-22.
- [5] 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.
- [6] 夏建国,仲雨猛,曹晓霞. 干湿交替条件下土壤磷释放及其与土壤性质的关系. 水土保持学报, 2011, 25(4): 237-242.
- [7] 冯大兰,刘芸,钟章成. 三峡库区消落带现状与对策研究. 中国农学通报, 2006, 22(4): 378-381.
- [8] 周永娟,仇江啸,王姣,王效科,吴庆标. 三峡库区消落带生态环境脆弱性评价. 生态学报, 2010, 30(24): 6726-6733.
- [9] 熊俊,袁喜,梅朋森,张丽萍,许文年,黄应平. 三峡库区消落带环境治理和生态恢复的研究现状与进展. 三峡大学学报:自然科学版,

- 2011, 33(2): 23-28.
- [10] Mitsch W J, Lu J J, Yuan X Z, He W S, Zhang L. Optimizing ecosystem services in China. *Science*, 2008, 322(5901): 528.
- [11] Zhang J X, Liu Z J, Sun X X. Changing landscape in the Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River from 1977 to 2005: Land use/land cover, vegetation cover changes estimated using multi-source satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2009, 11(6): 403-412.
- [12] 程瑞梅, 肖文发, 王晓荣, 封晓辉, 王瑞丽. 三峡库区植被不同演替阶段的土壤养分特征. *林业科学*, 2010, 46(9): 1-6.
- [13] 李昌晓, 钟章成. 三峡库区消落带土壤水分变化对落羽杉(*Taxodium distichum*)幼苗根部次生代谢物质含量及根生物量的影响. *生态学报*, 2007, 27(11): 4394-4402.
- [14] 李昌晓, 钟章成. 模拟三峡库区消落带土壤水分变化条件下落羽杉幼苗实生土壤营养元素含量的变化. *林业科学*, 2008, 44(7): 124-129.
- [15] Ye C, Zhang K R, Deng Q, Zhang Q F. Plant communities in relation to flooding and soil characteristics in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(3): 1794-1802.
- [16] 郭劲松, 黄轩民, 张彬, 方芳, 付川. 三峡库区消落带土壤有机质和全氮含量分布特征. *湖泊科学*, 2012, 24(2): 213-219.
- [17] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 唐志尧, 贺金生, 于丹, 江源, 王志恒, 郑成洋, 朱江玲, 郭兆迪. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. *生物多样性*, 2009, 17(6): 533-548.
- [18] 汪贵斌, 曹福亮. 土壤盐分及水分含量对落羽杉幼苗生长的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2396-2400.
- [19] 张建锋, 孙启祥, Makeshin F. 盐胁迫对柳树新无性系苗木生长和土壤酶活性的影响. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 125-129.
- [20] Randall C K, Duryea M L, Vince S W, English R J. Factors influencing stump sprouting by pondcypress (*Taxodium distichum* var. *nutans* (Ait.) Sweet). *New Forests*, 2005, 29(3): 245-260.
- [21] 徐爱春, 陈益泰, 王树凤, 吴天林. 柳树对 Cd 吸收、积累和耐性的初步研究. *环境科学研究*, 2006, 19(5): 96-100.
- [22] 王传印, 姜涛, 张娜, 张胜男. 水分胁迫下柳树的生理生化反应. *山东林业科技*, 2006, (5): 28-29.
- [23] Gibbs J, Greenway H. *Review: mechanisms of anoxia tolerance in plants. I. Growth, survival and anaerobic catabolism*. *Functional Plant Biology*, 2003, 30(3): 353-353.
- [24] Mommer L, Visser E J W. Underwater photosynthesis in flooded terrestrial plants: a matter of leaf plasticity. *Annals of Botany*, 2005, 96(4): 581-589.
- [25] Rillig M C, Mummey D L. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*, 2006, 171(1): 41-53.
- [26] 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.
- [27] 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*, 2004, 18(6): 120-123.
- [28] 刘丽, 段争虎, 汪思龙, 胡江春, 胡治刚, 张倩茹, 王书锦. 不同发育阶段杉木人工林对土壤微生物群落结构的影响. *生态学杂志*, 2009, 28(12): 2417-2423.
- [29] 王旭琴, 戴伟, 夏良放, 邓宗付, 于海霞, 聂立水. 亚热带不同人工林土壤理化性质的研究. *北京林业大学学报*, 2006, 28(6): 56-59.
- [30] Pallant E, Riha S J. Surface soil acidification under red pine and Norway spruce. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(4): 1124-1130.
- [31] 汪思龙, 廖利平, 邓仕坚, 高洪, 黄志群. 杉楠混交与人工杉木林自养机制的恢复. *应用生态学报*, 2000, 11(1): 33-36.
- [32] 夏汉平, 余清发, 张德强. 鼎湖山 3 种不同林型下的土壤酸度和养分含量差异及其季节动态变化特性. *生态学报*, 1997, 17(6): 645-653.
- [33] 盛炜彤, 杨承栋, 范少辉. 杉木人工林的土壤性质变化. *林业科学研究*, 2003, 16(4): 377-385.
- [34] 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.
- [35] Aerts R, de Caluwe H. Nutritional and plant-mediated controls on leaf litter decomposition of *Carex* species. *Ecology*, 1997, 78(1): 244-260.
- [36] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 黄志霖, 付甜, 封晓辉. 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系. *生态学报*, 2012, 32(3): 852-862.
- [37] Laura R D. On the stimulating effect of drying a soil and the retarding effect of drying a plant material. *Plant and Soil*, 1976, 44(2): 463-465.
- [38] Nguyen B T, Marschner P. Effect of drying and rewetting on phosphorus transformations in red brown soils with different soil organic matter content. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(8): 1573-1576.
- [39] 董元华, 徐琪. 水成土壤演化中有机质含量变化的研究. *生态学报*, 1990, 10(4): 323-327.
- [40] Sahrawat K L. Organic matter accumulation in submerged soils. *Advances in Agronomy*, 2003, 81: 169-201.
- [41] 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.
- [42] 罗歆, 代数, 何丙辉, 刘秀华, 唐寅. 缙云山不同植被类型林下土壤养分含量及物理性质研究. *水土保持学报*, 2011, 25(1): 64-69.
- [43] Barth R C, Klemmedson J O. Shrub-induced spatial patterns of dry matter, nitrogen, and organic carbon. *Soil Science Society of America Journal*,

1978, 42(5): 804-809.

- [44] 张文菊, 童成立, 杨钙仁, 吴金水. 水分对湿地沉积物有机碳矿化的影响. 生态学报, 2005, 25(2): 249-253.
- [45] 郭泉水, 康义, 赵玉娟, 洪明, 孔倩倩, 聂必红. 三峡库区消落带土壤氮磷钾、pH 值和有机质变化. 林业科学, 2012, 48(3): 7-10.
- [46] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. Science of the Total Environment, 2007, 380(1/3): 48-65.
- [47] Phillips I R, Greenway M. Changes in water-soluble and exchangeable ions, cation exchange capacity, and phosphorus_{max} in soils under alternating waterlogged and drying conditions. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1998, 29(1/2): 51-65.
- [48] 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.
- [49] Gale P M, Reddy K R, Graetz D A. Phosphorus retention by wetland soils used for treated wastewater disposal. Journal of Environmental Quality, 1994, 23(2): 370-377.
- [50] Watts C J. The effect of organic matter on sedimentary phosphorus release in an Australian reservoir. Hydrobiologia, 2000, 431(1): 13-25.
- [51] 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, 2013, 48(11): 15-22.
- [52] 徐晓燕, 马毅杰, 张瑞平. 土壤中钾的转化及其与外源钾的相互关系的研究进展. 土壤通报, 2003, 34(5): 489-492.
- [53] 刘世全, 高丽丽, 蒲玉琳, 邓良基, 张世熔. 西藏土壤磷素和钾素养分状况及其影响因素. 水土保持学报, 2005, 19(1): 75-78.
- [54] 范晓晖, 刘芷宇. 根际 pH 环境与磷素利用研究进展. 土壤通报, 1992, 23(5): 238-240.
- [55] 陈为峰, 史衍玺, 田素锋, 王薇. 黄河口新生湿地土壤氮磷分布特征研究. 水土保持学报, 2008, 22(1): 69-73.
- [56] 高雪松, 邓良基, 张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析. 水土保持学报, 2005, 19(2): 53-56.
- [57] 杨小波, 胡荣桂. 热带滨海沙滩上森林植被的组成成分与土壤性质的研究. 生态学杂志, 2000, 19(4): 6-11.