

DOI: 10.5846/stxb201801270213

杨文航,任庆水,李昌晓,宋虹,袁中勋,马文超,崔云凤,王朝英.三峡库区消落带落羽杉与立柳林土壤微生物生物量碳氮磷动态变化.生态学报, 2019,39(5): - .

Yang W H, Ren Q S, Li C X, Song H, Yuan Z X, Ma W C, Cui Y F, Wang C Y. Dynamic changes in soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus of *Taxodium distichum* and *Salix matsudana* plantation in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir Region. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(5): - .

三峡库区消落带落羽杉与立柳林土壤微生物生物量碳氮磷动态变化

杨文航^{1,2},任庆水¹,李昌晓^{1,*},宋虹¹,袁中勋¹,马文超¹,崔云凤³,王朝英¹

1 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,重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室,重庆 400715

2 西北大学附属中学浐灞中学,西安 710032

3 重庆市忠县石宝镇农业服务中心,重庆 404332

摘要:为探究库区消落带人工乔木植被恢复重建后土壤质量及肥力的变化特征,于2016年6月(T₁)、2016年9月(T₂)、2017年6月(T₃)及2017年9月(T₄)选择165—175 m高程落羽杉与立柳土壤为研究对象,并以裸地作为对照,测定土壤微生物生物量碳、氮、磷和相关理化性质。结果表明:(1)经历水淹(T₂—T₃)会使土壤微生物生物量处于较低水平,落干期(T₁—T₂、T₃—T₄)落羽杉与立柳人工植被恢复生长能显著提高土壤微生物生物量,对土壤微生物恢复具有重要意义。(2)落羽杉与立柳土壤微生物生物量碳、氮占土壤有机碳、全氮百分比在4个时期均显著高于裸地,表明落羽杉与立柳土壤微生物对土壤碳、氮库的贡献大于裸地,落羽杉土壤微生物生物量磷及其占全磷百分比在T₁和T₃处于极低水平,T₂和T₄处于较高水平,应注意磷元素的迁移。(3)土壤微生物生物量碳、氮、磷与土壤有机碳和全氮有极显著相关性,与土壤pH值呈不同程度的负相关。在三峡库区消落带进行落羽杉与立柳乔木植被恢复重建能显著提高土壤微生物生物量及土壤肥力,进一步证实开展科学的植被修复与重建值得提倡和肯定。

关键词:消落带;落羽杉;立柳;微生物生物量碳氮磷

Dynamic changes in soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus of *Taxodium distichum* and *Salix matsudana* plantation in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir Region

YANG Wenhong^{1,2}, REN Qingshui¹, LI Changxiao^{1,*}, SONG Hong¹, YUAN Zhongxun¹, MA Wenchao¹, CUI Yunfeng³, WANG Chaoying¹

1 Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research in Three Gorges Reservoir Region, School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 Chanba Camous Middle School Affiliated to Northwest University, Xi'an 710032, China

3 Shibao Agricultural Service Center, Chongqing 404332, China

Abstract: The operation of the Three Gorges Dam Reservoir (TGDR) on the Yangtze River, China, has formed a hydro-fluctuation belt with an annual water level change of 30 m, spanning an area of 350 km². This has led to a decline in plant community within the hydro-fluctuation belt. Revegetation is an eco-friendly method that can be used to restore the

基金项目:重庆市林业重点科技攻关项目(渝林科研2016-8);国家国际科技合作专项(2015DFA90900);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);重庆市研究生科研创新项目(CYB16066)

收稿日期:2018-01-27; 网络出版日期:2018-00-00

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

ecological integrity of the hydro-fluctuation zone of the TGDR. This method also facilitates the proper maintenance of the functions and services of riparian ecosystem. Therefore, in this study, revegetation of the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir (TGR) of China was carried out in the Ruxi River basin in Gonghe Village of Shibao Township, Zhong County, Chongqing Municipality of China. The changes in soil fertility and quality were evaluated by assessing the content of soil microbial biomass carbon (SMBC), soil microbial biomass nitrogen (SMBN), and soil microbial biomass phosphorus (SMBP). Soil samples were collected from plots of previously planted *T. distichum* and *S. matsudana* woodland in Zhong County of the TGR in June 2016 (T_1), September 2016 (T_2), June 2017 (T_3), and September 2017 (T_4) at elevations between 165 and 175 m above sea level. The results showed the following: (1) Under the conditions of flooding (T_2 - T_3), the soil microbial biomass was low. The soil microbial biomass increased significantly after the restorative growth of *T. distichum* and *S. matsudana* during the period of drawdown (T_1 - T_2 and T_3 - T_4), indicating that artificial vegetation restoration has a positive effect on soil microbial recovery. (2) The SMBC/SOC and SMBN/TN of *T. distichum* and *S. matsudana* woodland were significantly higher than those of unplanted soil, indicating that the soil turnover rate was faster in the artificial vegetation restoration soil. However, the phosphorus level in the soil of *T. distichum* varied significantly, which necessitates further evaluation of phosphorus migration within soil. (3) The soil microbial biomass significantly correlated with the soil organic C and total N, but it negatively correlated with the soil pH. Overall, the revegetation of *T. distichum* and *S. matsudana* increased soil microbial biomass, and also enhanced the soil quality of the hydro-fluctuation belt. The results of this study further validate artificial revegetation as a suitable method for ecosystem restoration.

Key Words: hydro-fluctuation belt; *Salix matsudana*; *Taxodium distichum*; soil microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus

三峡水库建成运行后,水库水位每年均在 145—175 m 之间变动,形成垂直落差达 30 m,总面积约 348.93 km²的消落带^[1]。新形成的水库消落带具有水淹时间长、水淹深度大、反季节性等特点^[2]。生长在消落带范围内的植物面临严峻的水淹胁迫,水淹敏感型植物因无法适应复杂的水淹环境而逐渐消亡,消落带生物多样性降低^[3],生态屏障功能减退^[4]。进而导致生态系统水土保持功能和自身修复能力的下降,引起土壤侵蚀、土地退化等问题^[5]。植被作为陆地生态系统的重要组成部分,是生态系统中物质循环与能量流动的中枢,在水土保持、水源涵养及固碳过程中都起着重要的作用^[6]。我国植被破坏引起的生态环境破坏日益严重,已启动“天保工程”和“退耕还林还草工程”,使得植被恢复与重建能够在较大范围内进行。国内外对于人工植被恢复的研究主要集中在大面积退化土壤,如黄土丘陵区^[7],退耕弃耕地^[8]等。研究内容主要包括不同植被类型恢复方式和不同植被恢复年限对土壤质量的影响。研究中存在的不足主要包括:(1)对比研究较少,人工林的恢复效果在一些区域还存在很大的争议,是否有完全对照实验。(2)在生态系统的重建与恢复过程中,应该尽可能的选择本土植物物种,然而当本土物种无法适应新环境生存时,选取新物种进行植被恢复对土壤质量的影响不明确。消落带植被的良好生长可以有效防治水土流失和土地退化、提高库岸稳定性及降低水体污染等^[9]。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]。落羽杉(*Taxodium distichum*)与立柳(*Salix matsudana*)为落叶性乔木,因其生长迅速、成活率高、耐水淹、保持水土等特点而被选为消落带植被重建适生树种^[13-14]。

目前对于三峡库区植被修复后的研究报道已有不少,但主要集中在草本植物,如狗牙根(*Cynodon dactylon* (L.) Pers.)、牛鞭草(*Hemarthria compressa* (L. f.) R. Br.)等^[15-16]。而对于人工乔木植被的生态修复效应研究相对较少,且主要集中在植物光合作用、营养元素含量以及土壤营养元素含量方面^[17-18]。消落带人工植被修复后土壤肥力的研究不足主要包括植被恢复年限较短,新种植的植被在生理形态方面均未达到稳定阶段,与植被恢复年限超过一定时间后对土壤肥力的影响可能不同;且评价土壤肥力的测定指标主要为土壤理化性质,库区消落带每年经历一次水淹—干旱交替,环境变化速度快,频率高,土壤理化性质周转较慢,可能

无法及时反映土壤变化趋势。土壤微生物是生态系统的重要组成部分,土壤微生物生物量的多少及其变化是土壤肥力高低及其变化的重要依据之一^[19]。土壤微生物生物量周转时间较快,对外界反应的灵敏性,在精确测定土壤有机质(soil organic matter, SOM)变化之前,其动态变化可更早指示土壤变化趋势,对土壤利用和管理具有重要的指示意义^[20]。基于以上部分,我们提出两个科学问题:1)三峡库区消落带适生人工乔木植被修复达到稳定阶段后,在经历周期性水淹的环境下,土壤微生物生物量碳氮磷含量随着时间推移是否能持续升高。2)时间、植被以及时间×植被交互作用对于土壤微生物生物量碳氮磷含量的影响是否显著。

本实验创新之处在于以位于三峡库区忠县石宝镇共和村的典型消落带为研究区域,选取海拔 165—175 m 范围内恢复 5 年生长良好的外来乔木落羽杉和立柳土壤为研究对象,并设置裸地作为完全对照,通过研究消落带两种人工林土壤微生物生物量碳、氮和磷含量及土壤理化性质的动态变化,并对相关影响因素进行分析,为认识三峡库区消落带外来乔木植被修复与重建对土壤微生物生物量和土壤质量的影响提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验样地位于重庆市忠县三峡库区消落带植被修复示范基地,面积 13.3 hm²。示范基地位于忠县石宝镇共和村(107°32′—108°14′E,30°03′—30°35′N),长江一级支流汝溪河流域,濒临长江北岸,位于忠县东北部,距离主城区 38 km。该流域属亚热带东南季风区山地气候,≥10℃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%,太阳总辐射能 3.5×10⁵ J/cm²,年降雨量 1200 mm,相对湿度 80%,四季分明,雨量充沛,日照充足。该区域土壤类型主要为石灰性紫色土,土壤熟化程度较低,水土流失、土层侵蚀现象严重。

消落带 30 m 落差内经历周期性水淹,研究周期内 175 m 高程短时间淹水约 0 d,165 m 高程中期淹水约 175 d,155 m 高程长期淹水约 260 d。为进行三峡水库消落区的生态修复,于 2012 年 3 月在重庆忠县石宝镇汝溪河流域构建植被生态修复示范基地。示范基地建设前期为废弃梯田,在示范基地内 165—175 m 海拔高程按 1 m×1 m 的株行距带状(垂直于河流方向)栽植落羽杉和立柳植被林地,落羽杉和立柳均为带状单一林地植被构建,共 10 个重复。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。取样时苗木成活率均为 100%,生长状况良好。同时设置裸地作为对照,裸地与植被恢复林地同为研究区域内原废弃梯田,人工除杂后但未进行人工乔木植被恢复的土壤,定期进行维护管理,去除杂草作为空白对照。土壤取样时对各物种植物生长状况进行测定(表 1)。

表 1 植被生长状况(平均值±标准误)

Table 1 Basic situation of the vegetation (Mean±SE)

物种 Species	时间 Time	株高 Height/cm	胸径 DBH Diameter at breast height /cm	冠幅 Canopy/m ²	株行距 Plantting distance/ (m×m)
落羽杉 <i>T. distichum</i>	T ₁	502±19	6.13±0.23	7.99±1.68	1×1
	T ₂	520±14	6.23±0.14	8.13±0.82	1×1
	T ₃	521±11	6.24±0.08	8.31±0.49	1×1
	T ₄	535±10	6.32±0.17	8.64±0.46	1×1
立柳 <i>S. matsudana</i>	T ₁	313±54	2.79±0.19	1.56±0.20	1×1
	T ₂	331±28	2.82±0.24	1.72±0.06	1×1
	T ₃	329±34	2.82±0.22	1.69±0.13	1×1
	T ₄	347±33	2.89±0.15	1.86±0.24	1×1

T₁: 2016 年 6 月, June 2016; T₂: 2016 年 9 月, September 2016; T₃: 2017 年 6 月, June 2017; T₄: 2017 年 9 月, September 2017

1.2 样品采集测定与数据处理

根据三峡库区忠县汝溪河流域水位的变化(图 1),于 2016 年 6 月(T₁)植被恢复初期时取样一次(此时水位退至最低,植被经历水淹后出露时间不久,枝叶萌发新芽,植被整体处于恢复生长初期),2016 年 9 月(T₂)

植被恢复旺盛期时取样一次(此时水位开始上涨,植被即将经历水淹,同时光照强度也逐渐减弱,植被整体处于恢复生长旺盛期),然后经历水淹,于2017年6月(T_3)和2017年9月(T_4)取样两次。

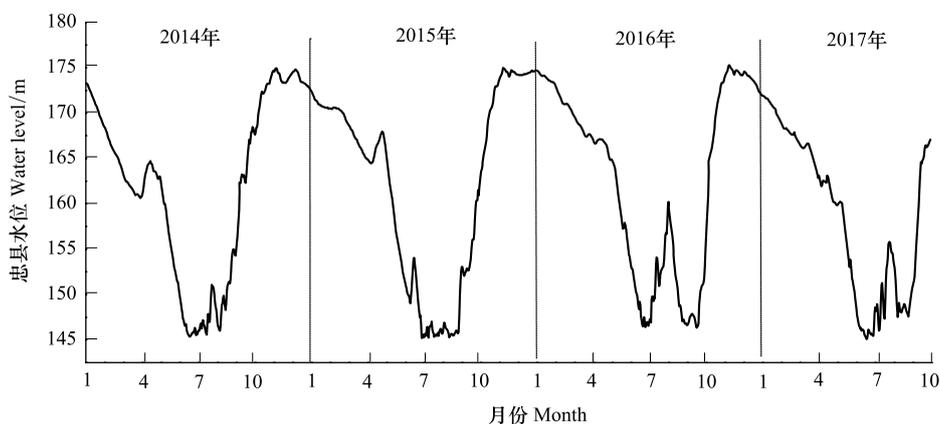


图1 2014年1月—2017年10月三峡库区重庆忠县水文图

Fig.1 Water level change of the hydro-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir in Zhong County from January 2014 to October 2017

在三峡库区消落带试验样地 165—175 m 海拔高程内,同种植被类型下随机选取 3 个具有代表性的带状样地作为重复,选试验区内相同海拔段的裸地进行对照(CK)。每种植被类型下分别随机设置 3 块 5 m×5 m 的样方,每个样方进行梅花形 5 点取样,采集表层(0—20 cm)土样,剔除可见杂物后混合均匀,用四分法装袋迅速带回实验室,一部分土样自然风干,碾磨并过 100 目筛,用于测定土样含水量、pH 值、有机质及全氮等理化性质。另一部分土样过 2 mm 筛后,用蒸馏水调节至饱和持水量的 40%,25℃、相对湿度 100%条件下预培养 7—15 d,用于分析土壤微生物生物量碳、氮和磷。土样中有机碳(Soil organic carbon, SOC)和全氮(Total nitrogen, TN)采用元素分析仪(Elementar Vario EL, Germany)测定。全磷(Total phosphorus, TP)采用电感耦合等离子体发射光谱仪测定(Thermo, America)^[21]。采用土:水=1:2.5 水浸提,酸度计法测定土壤 pH 值。采用烘干法测定土壤含水量^[22]。

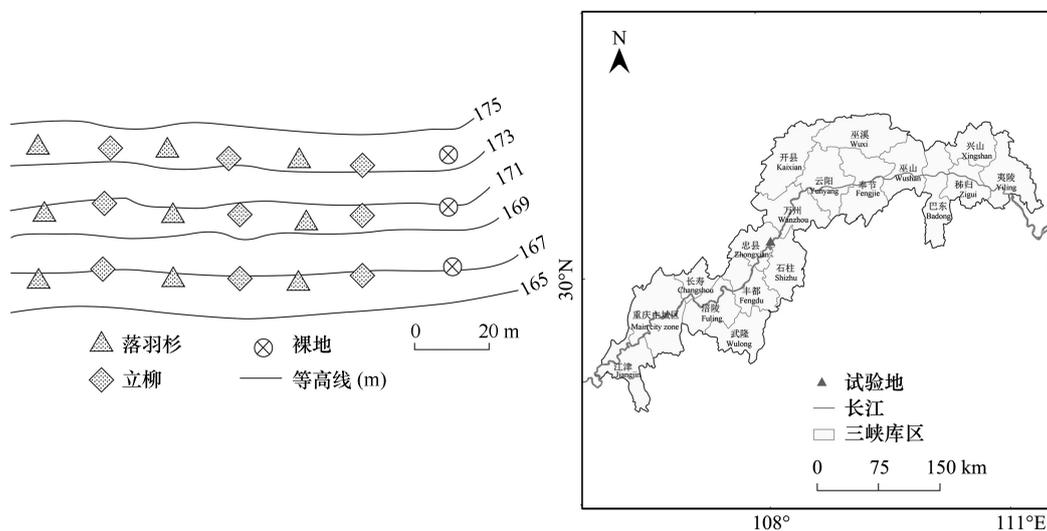


图2 位于重庆忠县的三峡水库消落带样地分布示意图

Fig.2 Sketch map of sampling sites of the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir in Zhong County, Chongqing Municipality

土壤微生物生物量碳(Soil microbial biomass carbon, SMBC)的测定采用氯仿熏蒸提取重铬酸钾氧化

法^[23],土壤微生物生物量氮(Soil microbial biomass nitrogen, SMBN)测定采用氯仿熏蒸提取凯氏定氮法^[24]。土壤微生物生物量磷(Soil microbial biomass phosphorus, SMBP)用碳酸钠浸提-钼锑抗比色法测定^[25]。并分别用(1)、(2)和(3)计算 SMBC、SMBN 和 SMBP 的含量。

$$\text{SMBC} = EC/kEC \quad (1)$$

$$\text{SMBN} = EN/kEN \quad (2)$$

$$\text{SMBP} = EPt/kP \quad (3)$$

式中, EC 、 EN 和 EPt 分别为熏蒸土壤与未熏蒸土壤有机碳、氮和磷的差值, kEC 、 kEN 和 kP 分别为 SMBC、SMBN 和 SMBP 的转换系数,取值 0.38、0.45 和 0.40^[26]。

1.3 数据统计与分析

试验数据采用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差(One-way ANOVA)和重复度量方差(Repeated measures ANOVA)统计分析,检测不同取样时间与不同植被类型对土壤微生物生物量含量的影响,并用 Duncan 法检验不同植被类型间和不同时间的差异性($\alpha=0.05$),各指标之间的相关关系采用 Pearson 相关系数法评价,图形用 Origin 8.5 制图。

2 结果与分析

2.1 消落带不同植被类型土壤理化性质动态变化($P<0.05$)

落羽杉土壤含水量在四个时期无显著性差异,且 T_1 - T_3 显著高于裸地($P<0.05$),表明落羽杉保水能力更强且更稳定(图 3)。裸地土壤 pH 值表现出 $T_2>T_1>T_3>T_4$ 的规律并有显著性差异($P<0.05$)(图 3),并且在 4 个时期均显著高于落羽杉和立柳,且经历一次水淹后,土壤 pH 高于 7 的有下降趋势,低于 7 的有升高趋势,

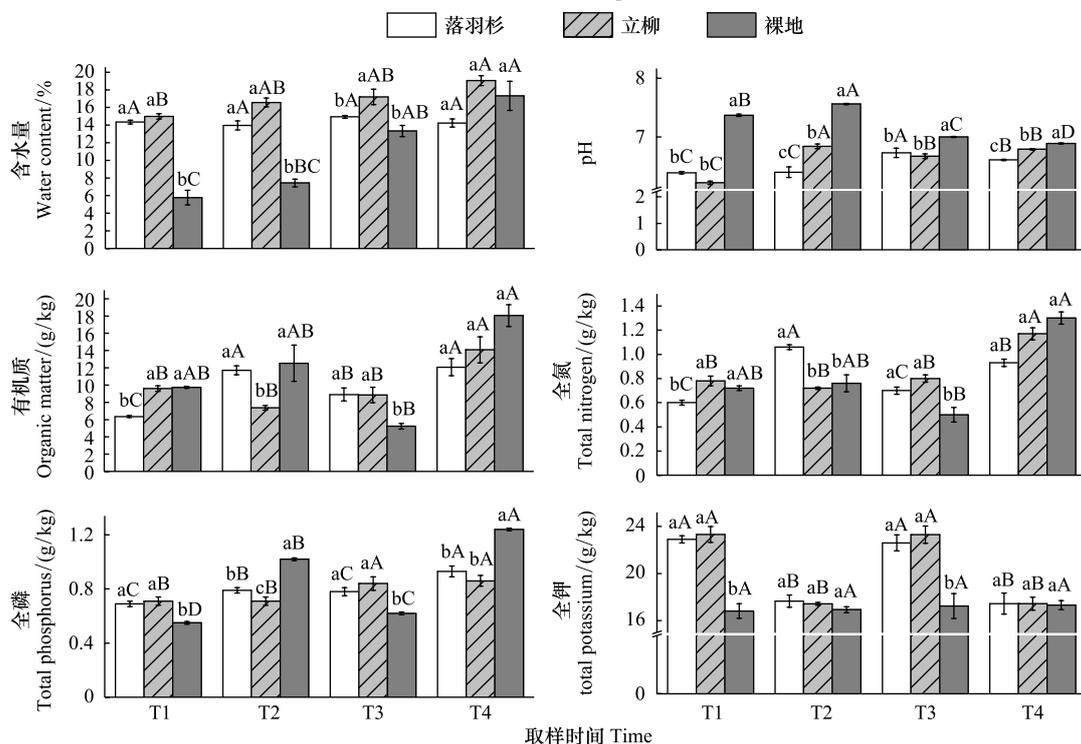


图 3 消落带不同植被类型土壤理化性质随时间变化的特征

Fig.3 Soil physicochemical characters of different vegetation types with time

T_1 : 2016 年 6 月, June 2016; T_2 : 2016 年 9 月, September 2016; T_3 : 2017 年 6 月, June 2017; T_4 : 2017 年 9 月, September 2017; 不同小写字母代表同一时间不同植被类型土壤理化性质间显著差异 ($P<0.05$), 不同大写字母代表不同时间同种植被类型土壤理化性质间显著差异 ($P<0.05$)

整体趋于中性(图3)。落羽杉土壤有机质 T_2 与 T_4 显著高于 T_1 和 T_3 , T_3 显著高于 T_1 ($P < 0.05$), 表明落羽杉在恢复生长过程中土壤有机质含量增加, 经历一次淹水后土壤有机质显著降低, 但相比上一年植被恢复初期时土壤有机质仍显著升高(图3)。各植被类型土壤全氮表现出与土壤有机质同样的规律(图3)。裸地土壤全磷 T_1 和 T_3 显著低于落羽杉和立柳, T_2 和 T_4 显著高于落羽杉和立柳 ($P < 0.05$), 说明在植被恢复期间裸地土壤全磷的增加高于落羽杉和立柳(图3)。落羽杉和立柳土壤全钾均表现出 T_1 显著高于 T_2 , T_3 显著高于 T_4 ($P < 0.05$); 裸地4个时期无显著性差异, 且 T_2 和 T_4 三者间无显著性差异, 这表明落羽杉与立柳土壤全钾(Total potassium, TK)含量的降低主要与植被吸收有关(图3)。

2.2 消落带不同植被类型土壤微生物生物量碳氮磷动态变化

土壤微生物生物量碳整体上表现出落羽杉>立柳>裸地的规律, 同时重复测量方差分析(表2)结果表明植被类型极显著影响土壤微生物生物量碳, 说明进行植被恢复后, 土壤微生物生物量碳明显提高, 且种植落羽杉对土壤微生物生物量碳的提高优于立柳(图4)。落羽杉 T_1 — T_2 、 T_3 — T_4 均有大幅上升, T_2 — T_3 有明显下降(图4), 重复测量方差分析(表2)结果表明取样时间极显著影响土壤微生物生物量碳, 说明落羽杉在植被恢复生长期间微生物的数量及活性明显增加, 但经历水淹后微生物的数量及活性明显下降。土壤微生物生物量氮在4个时期均表现为落羽杉与立柳显著高于裸地 ($P < 0.05$), 落羽杉与立柳 T_1 — T_4 的变化趋势与土壤微生物生物量碳相似(图4)。土壤微生物生物量磷落羽杉 T_1 和 T_3 处于极低水平, 显著低于立柳与裸地, T_2 和 T_4 显著高于立柳与裸地 ($P < 0.05$)。且变化趋势与土壤微生物生物量碳氮相似, 但幅度更大。表明在落羽杉植被恢复初期, 受到了磷元素的限制, 在恢复生长期间磷元素得到大量补充(图4)。

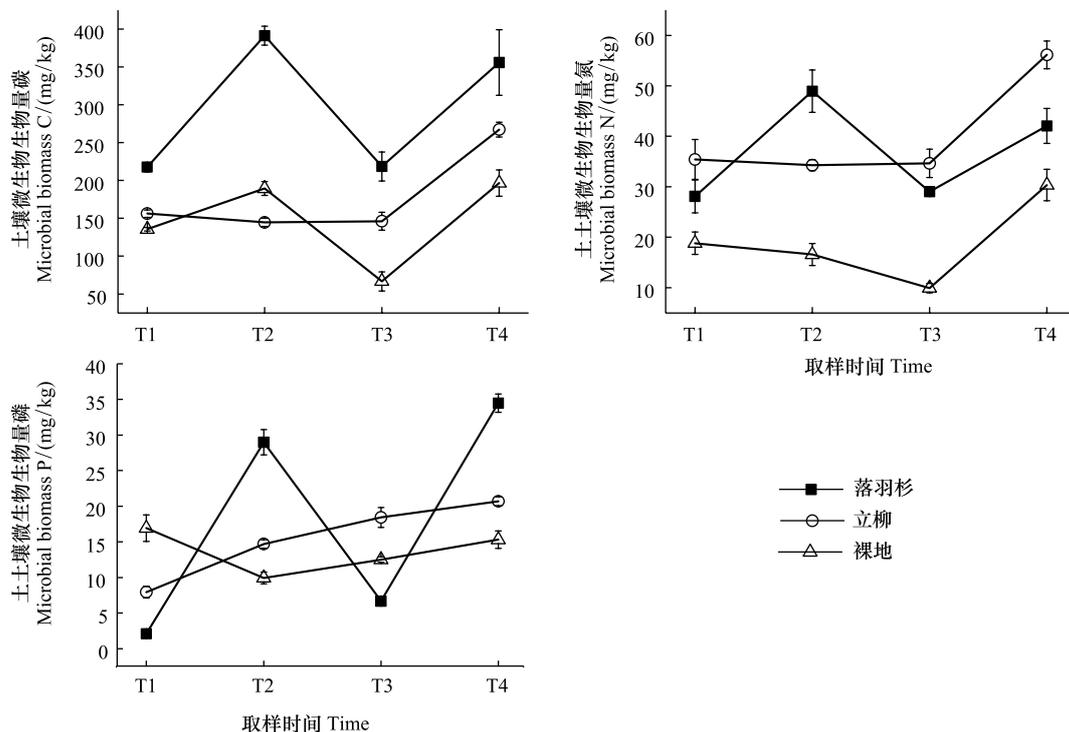


图4 消落带不同植被类型土壤微生物生物量碳、氮、磷随时间的动态变化

Fig.4 Dynamic changes of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus under different vegetation types with time

2.3 消落带不同植被类型土壤微生物生物量碳氮磷比值动态变化

土壤微生物生物量碳氮比可以反映土壤中微生物种类和区系, 土壤 SMBC/SMBN 落羽杉与立柳 T_1 — T_4 保持平稳, 范围分别在 7—9 和 4—5 之间, 表明落羽杉与立柳土壤微生物种类存在差异(图5)。微生物生物量碳磷比可以与土壤有机质中有效磷密切相关, 土壤 SMBC/SMBP 落羽杉 T_1 、 T_3 显著高于立柳和裸地, 其它时

期三者间无显著性差异(图 5),表明落羽杉土壤有效磷在 T_1 和 T_3 变化较大。土壤微生物生物量与全量的比值可以反映出微生物对碳氮磷库的贡献,土壤 SMBC/SOC 和 SMBN/TN 的 4 个时期落羽杉与立柳均显著高于裸地,且 3 种植被类型在 T_2 — T_3 均表现出下降的趋势(图 5),表明植被恢复提高了微生物对碳氮库的贡献,但经历水淹使贡献降低。土壤 SMBP/TP 在 T_1 和 T_3 表现为立柳与裸地显著高于落羽杉, T_2 和 T_4 表现为落羽杉显著高于立柳和裸地(图 5)。

表 2 取样时间、植被类型及其交互作用对土壤微生物生物量 C、N、P 含量影响的重复测量方差分析结果

Table 2 The results of repeated measures ANOVA table for soil microbial biomass content

土壤微生物生物量 Soil microbial biomass	F 值(概率)P value(Property)		
	取样时间 Time	植被类型 Vegetation types	取样时间×植被类型 Time × vegetation types
微生物生物量碳 Microbial biomass carbon	36.013(0.000)**	137.411(0.000)**	7.271(0.000)**
微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen	11.157(0.000)**	31.539(0.001)**	2.694(0.048)*
微生物生物量磷 Microbial biomass phosphorus	16.236(0.000)**	2.453(0.166)	12.948(0.000)**

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

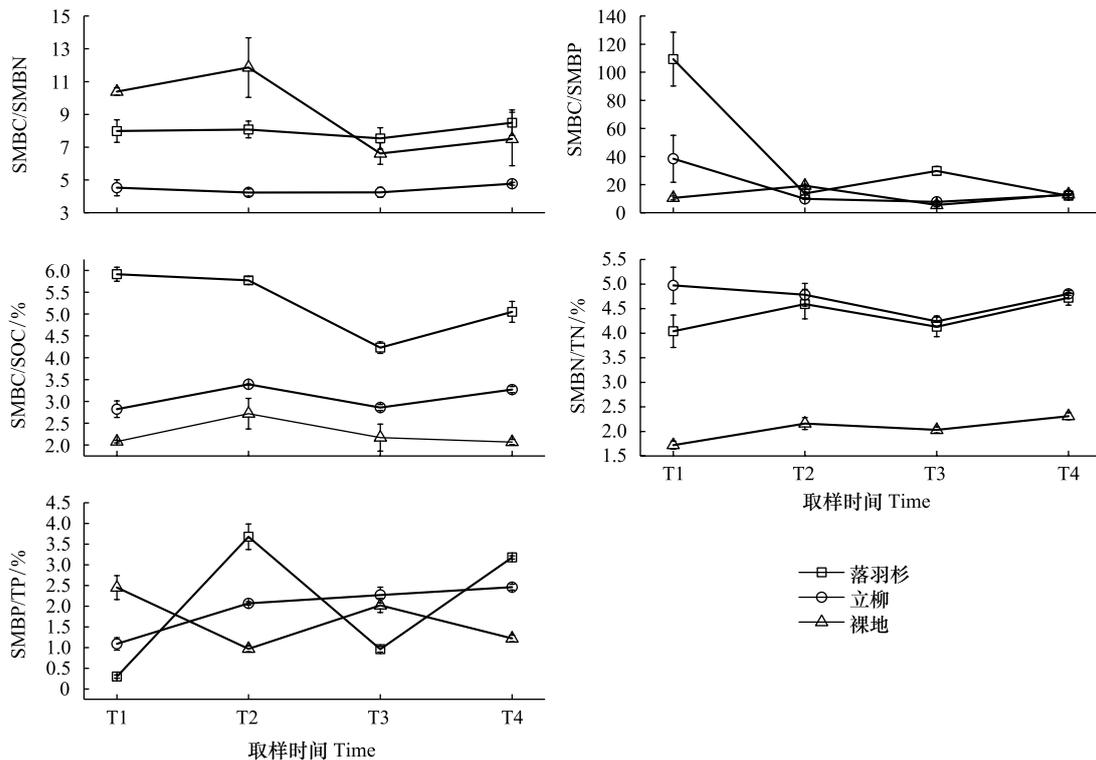


图 5 消落带不同植被类型土壤微生物生物量比值随时间的动态变化

Fig.5 Dynamic changes of soil microbial biomass ratio under different vegetation types with time

SMBC:微生物生物量碳,Soil microbial biomass carbon; SMBN:微生物生物量氮,Soil microbial biomass nitrogen; SMBP:微生物生物量磷,Soil microbial biomass phosphorus; SOC:有机碳,Soil organic carbon; TN:全氮,Total nitrogen; TP:全磷,Total phosphorus

2.4 消落带不同植被类型土壤微生物生物量碳、氮、磷和土壤理化性质的关系

SMBC 与 SMBN 极显著相关,且两者均与 SMBP、SOC、TN 呈极显著相关,与 pH 值极显著负相关(表 3)。SMBP 与 SOC、TN 呈显著或极显著相关,与 TK 显著负相关。土壤含水率与 SMBN、TN 呈极显著相关,与 pH 值极显著负相关。

表 3 消落带不同植被类型土壤微生物生物量与土壤碳氮磷相关性

Table 3 Correlation coefficients between soil microbial biomass and soil carbon, nitrogen and phosphorus in different vegetation types

相关系数 Correlation	微生物 生物量碳 SMBC	微生物 生物量氮 SMBN	微生物 生物量磷 SMBP	有机碳 SOC	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	pH 值 pH value
微生物生物量氮 SMBN	0.679 **							
微生物生物量磷 SMBP	0.561 **	0.553 **						
有机碳 SOC	0.425 **	0.480 **	0.333 *					
全氮 TN	0.503 **	0.684 **	0.446 **	0.919 **				
全磷 TP	0.324	0.206	0.187	0.668 **	0.580 **			
全钾 TK	-0.101	0.075	-0.408 *	-0.272	-0.246	-0.172		
pH 值 pH value	-0.514 **	-0.665 **	-0.219	-0.155	-0.363 *	-0.165	-0.315	
土壤含水率 Soil moisture	0.172	0.611 **	0.128	0.312	0.520 **	0.241	0.258	-0.637 **

SMBC: 微生物生物量碳, Soil microbial biomass carbon; SMBN: 微生物生物量氮, Soil microbial biomass nitrogen; SMBP: 微生物生物量磷, Soil microbial biomass phosphorus; SOC: 有机碳, Soil organic carbon; TN: 全氮, Total nitrogen; TP: 全磷, Total phosphorus; TK: 全钾, Total potassium; “**”和“*”分别表示极显著($P < 0.01$)和显著($P < 0.05$)相关

3 讨论

三峡库区消落带大尺度、反季节性水淹使原有乔木植被无法生存,落羽杉和立柳经历 4 个水淹周期后仍生长良好^[18]。频繁的周期性水淹—干旱交替伴随着土壤氧化还原电位、土壤温度、光照强度等环境因子改变^[27]。在人工乔木植被重建后,植被—土壤之间发生植被生长状态、好氧厌氧状态、土壤理化性质等一系列复杂变化^[28]。土壤含水率落羽杉与立柳在 T_1 — T_3 均显著高于裸地, T_4 时三者无显著差异,且落羽杉 4 个时期含水率稳定无差异(图 3)。这可能主要由于研究区域 T_4 前后持续多雨,落羽杉相较于立柳枝叶更为茂密,短时期内的高强度降雨或干旱对落羽杉土壤含水率的影响远小于立柳,更小于裸地。有研究表明人工植被恢复可以增强土壤保水能力,有利于土壤养分储存,土壤水份过高或过低都不利于微生物繁殖^[29]。落羽杉与立柳土壤 pH 值在 4 个时期均显著低于裸地(图 3)。有研究表明杉木等人工林会引起土壤 pH 值降低^[30],这可能由于随着植被恢复时间增长,植被根系分泌有机酸含量增加。

植被恢复对土壤微生物的积极影响主要来自生物量(如凋落物、根系分泌物等)增加导致的能源输入增加^[31]。已有许多不同用地类型的研究表明,人工植被恢复对微生物生物量具有显著促进作用^[32-34]。本研究中立柳 SMBC 和 SMBN 含量 4 个时期均显著高于裸地($P < 0.05$),并且在 T_1 — T_2 和 T_3 — T_4 植被恢复生长期表现出明显上升趋势, T_2 — T_3 经历一次水淹后至下一次植被恢复初期有明显下降趋势;立柳 SMBC 和 SMBN 含量 T_1 — T_3 表现平稳, T_3 — T_4 有明显上升(图 4)。这表明在植被恢复生长期,落羽杉对土壤 SMBC 和 SMBN 的提高优于立柳,但遭受水淹时,立柳土壤 SMBC 和 SMBN 具有更好的稳定性。出现这种结果的原因可能是 T_2 — T_3 落羽杉在遭受水淹时大量叶片凋落,逆境胁迫下的地上部分营养不足与地下部分厌氧环境使土壤微生物大量死亡,从而导致土壤微生物生物量明显下降。消落带 165—175 m 落羽杉 T_1 — T_2 、 T_3 — T_4 时期是恢复生长的旺盛阶段,地上生物量和根系分泌物显著增加。实地勘察发现,在经历一次水淹后的 6 月,落羽杉土壤表层仍有大量分解初期的凋落叶,而在 9 月时凋落叶已大量分解,增加了能源的输入。针叶树种的凋落物中含有较多难以分解的疏水性芳香族化合物,会影响土壤微生物生物量、群落结构和活性^[35]。有研究表明土壤微生物生物量和地上凋落物的季节变化异步发生,可能提前或滞后凋落物 1 个月^[36]。立柳与落羽杉恢复生长旺盛期一致,但地上生物量以及凋落叶等均相对较少,能源输入增加和减少的变化趋势相对不明显。落羽杉 SMBP 含量在 T_1 、 T_3 显著低于立柳与裸地(图 4)表明此时落羽杉土壤磷元素受到限制。Liu 等^[37] 研究热带森林发现,凋落物的移除(人为定期收获凋落物)将导致磷元素的缺失和限制。消落带退水过程中会带走部分凋落物,且剩余凋落物在 T_1 、 T_3 处于分解前期,此时磷水平较低。同时影响土壤微生物生物量磷的因素较多,有关微生物体磷的代谢速率、途径和来源还有待进一步的研究^[38]。

有研究表明微生物生物量碳氮比可以反映土壤中细菌和真菌的比例^[39]。一般情况下,细菌碳氮比在 5 : 1 左右,真菌在 10 : 1 左右^[40-41]。本研究中落羽杉与立柳土壤 SMBC/SMBN 在 4 个时期变化趋势平稳,范围在 4—9 之间(图 5),与李香珍等^[42]报道的 5—9 基本相符;而裸地 T_1 、 T_2 略高, T_3 、 T_4 下降,整体范围在 6—12 之间(图 5)。Moore 等研究发现植物恢复生长初期根系能分泌促进土壤中细菌繁殖的物质,可能导致碳氮比偏低^[43]。而当真菌在微生物群落中占优势时,能提高土壤的腐质化能力,土壤固碳能力较强^[44]。而落羽杉土壤微生物生物量碳氮比范围保持在 7—9 波动较小,表明有稳定且较强的固碳能力。土壤 SMBC/SMBP 与贾国梅等^[45]研究结果不完全相同,这可能由于本研究中落羽杉土壤 SMBP 变化幅度较大,在 T_1 、 T_3 处于较低水平,直接影响 SMBC/SMBP 变化。土壤微生物生物量与土壤养分的比值可以反映土壤养分向微生物生物量的周转效率、土壤养分损失和土壤矿物对有机质的固定,并且其在表征土壤变化过程或土壤健康变化时要比单独使用微生物生物量或土壤养分的值更有效^[46]。本研究中,土壤微生物生物量碳、氮、磷占土壤有机碳、全氮、全磷百分比的范围分别为 2.07%—5.91%、1.72%—4.72%、0.3%—3.68%(图 5),与 Liao 等^[47]研究植被覆盖下微生物生物量碳占有机碳 1.0%—4.0%或 2.0%—7.0%相符;与 Devi 等^[48]研究混合森林系统微生物生物量氮占全氮 2.0%—7.8%和 Speir 等^[49]研究草地牧场微生物生物量磷占全磷 2.6%—5.9%相比略低。在消落带特殊的环境下,植被恢复生长周期短,同时恢复期高温多雨。有研究表明,三峡库区消落带降水过程中的侵蚀和径流是减少土壤 SOC 和 TN 的主要原因^[50]。Martucci 等^[51]研究发现混交恢复林有更高的微生物生物量。消落带植被恢复面临多种环境因子胁迫,恢复至天然林水平可能还需更长的时间。

本研究中 SMBC、SMBN 与 SOC 和 TN 之间具有极显著相关性(表 3),与张洋等^[52]研究微生物生物量碳、氮和有机碳和全氮间相关性结果一致,表明 SMBC、SMBN 可以作为判断落羽杉与立柳土壤肥力变化的指标。SMBC、SMBN 与 pH 值极显著负相关(表 3),与柴雪思等^[53]研究三峡库区消落带自然环境下植被土壤结果一致,但与 Ma 等^[54]研究三角洲湿地恢复项目不完全一致。表明消落带弱酸性的环境可能更有利于微生物繁殖,但 pH 值对土壤微生物生物量的影响可能因区域环境的不同而有差异。SMBP 与 SMBC、SMBN 呈显著相关,但与 TP 并无显著相关性,与彭佩钦等^[55]研究结果一致,表明全磷似乎不能反映土壤磷水平。

就研究工作而言,前期课题组进行了适生物种的筛选以及大面积的植被构建,经过 5 年原位生长,乔木植被仍生长良好。针对构建乔木植被对消落带环境的适应与响应,本课题组相继开展了一系列实验研究。在前期研究基础上,本研究重点探究消落带特殊生境下人工乔木植被(自然环境下消落带内不存在林地)恢复对土壤微生物生物量碳氮磷含量动态变化的影响,以期对定量评价消落带植被恢复后土壤肥力的变化提供依据。然而,本研究仅涉及到对土壤相关性质的研究,缺乏对地上部分尤其是遭受水淹凋落的大量凋落物研究(消落带内凋落物的凋落时间和分解环境具有独自的特殊性),因此开展凋落物分解规律和机制的研究十分重要,对于消落带植被恢复管理及土壤养分储存起到重大作用,这也是课题组目前正在进行的工作。

4 结论

三峡库区消落带经历一次水淹会导致土壤微生物生物量下降,但落干期落羽杉与立柳人工植被恢复生长能显著提高土壤微生物生物量,对土壤微生物恢复具有重要意义。落羽杉与立柳相比裸地均有更稳定的微生物生物量碳氮比,其中落羽杉的固碳能力更强。落羽杉与立柳土壤微生物生物量碳、氮对土壤碳、氮库的贡献均显著高于裸地。SMBC、SMBN 和 SMBP 与 SOC 和 TN 有极显著相关性,与土壤 pH 值呈不同程度的负相关。在三峡库区消落带进行落羽杉与立柳乔木植被恢复重建能显著提高土壤微生物生物量及土壤肥力,进一步证实开展科学的植被修复与重建值得提倡和肯定。

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] 樊大勇,熊高明,张爱英,刘曦,谢宗强,李兆佳.三峡库区水位调度对消落带生态修复中物种筛选实践的影响.植物生态学报,2015,

- 39(4): 416-432.
- [3] 朱妮妮, 郭泉水, 秦爱丽, 裴顺祥, 马凡强, 朱莉, 简尊吉. 三峡水库奉节以东秭归和巫山段消落带植物群落动态特征. 生态学报, 2015, 35(23): 7852-7867.
- [4] 揭胜麟, 樊大勇, 谢宗强, 张想英, 熊高明. 三峡水库消落带植物叶片光合与营养性状特征. 生态学报, 2012, 32(6): 1723-1733.
- [5] 滕明君, 曾立雄, 肖文发, 周志翔, 黄志霖, 王鹏程, 佃袁勇. 长江三峡库区生态环境变化遥感研究进展. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3683-3693.
- [6] 胡婵娟, 郭雷. 植被恢复的生态效应研究进展. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1640-1646.
- [7] 张健, 刘国彬. 黄土丘陵区不同植被恢复模式对沟谷地植物群落生物量和物种多样性的影响. 自然资源学报, 2010, 25(2): 207-217.
- [8] Hedlund K. Soil microbial community structure in relation to vegetation management on former agricultural land. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1299-1307.
- [9] 郭泉水, 洪明, 康义, 裴顺祥, 程瑞梅. 消落带适生植物研究进展. 世界林业研究, 2010, 23(4): 14-20.
- [10] 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.
- [11] Mitsch W J, Lu J J, Yuan X Z, He W S, Zhang L. Optimizing ecosystem services in China. *Science*, 2008, 322(5901): 528.
- [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. 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.
- [14] 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.
- [15] 任庆水, 马朋, 李昌晓, 秦红, 杨予静. 三峡库区消落带两种草本植被土壤细菌群落多样性. 生态学报, 2016, 36(11): 3261-3272.
- [16] 韩文娇, 白林利, 李昌晓. 水淹胁迫对狗牙根光合、生长及营养元素含量的影响. 草业学报, 2016, 25(5): 49-59.
- [17] Wang C Y, Li C X, Wei H, Han W J. Effects of long-term periodic submergence on photosynthesis and growth of *Taxodium distichum* and *Taxodium ascendens* saplings in the hydro-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir of China. *PLoS One*, 2016, 11(9): e162867.
- [18] 马文超, 刘媛, 周翠, 王婷, 魏虹. 水位变化对三峡库区消落带落羽杉营养特征的影响. 生态学报, 2017, 37(4): 1128-1136.
- [19] Makarov M I, Malysheva T I, Maslov M N, Kuznetsova E Y, Menyailo O V. Determination of carbon and nitrogen in microbial biomass of southern-Taiga soils by different methods. *Eurasian Soil Science*, 2016, 49(6): 685-695.
- [20] Sparling G P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Australian Journal of Soil Research*, 1992, 30(2): 195-207.
- [21] Spohn M, Widdig M. Turnover of carbon and phosphorus in the microbial biomass depending on phosphorus availability. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 113: 53-59.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-109.
- [23] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [24] Brookes P C, Landman A, Pruden G, Jenkinson D C. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(6): 837-842.
- [25] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Phosphorus in the soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 1984, 16(2): 169-175.
- [26] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 54-88.
- [27] Pezeshki S R, DeLaune R D. Soil oxidation-reduction in wetlands and its impact on plant functioning. *Biology*, 2012, 1(2): 196-221.
- [28] 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): 6431-6444.
- [29] Liu B X, Shao M A. Modeling soil-water dynamics and soil-water carrying capacity for vegetation on the Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 2015, 159: 176-184.
- [30] 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.
- [31] 何振立. 土壤微生物量及其在养分循环和环境质量评价中的意义. 土壤, 1997, 29(2): 61-69.
- [32] Mureithi S M, Verdoort A, Gachene C K K, Njoka J T, Wasonga V O, De Neve S, Meyerhoff E, Van Ranst E. Impact of enclosure management on soil properties and microbial biomass in a restored semi-arid rangeland, Kenya. *Journal of Arid Land*, 2014, 6(5): 561-570.
- [33] Card S M, Quideau S A. Microbial community structure in restored riparian soils of the Canadian prairie pothole region. *Soil Biology and*

- Biochemistry, 2010, 42(9): 1463-1471.
- [34] Deng Q, Cheng X L, Hui D F, Zhang Q, Li M, Zhang Q F. Soil microbial community and its interaction with soil carbon and nitrogen dynamics following afforestation in central China. *Science of the Total Environment*, 2016, 541: 230-237.
- [35] 刘纯, 刘延坤, 金光泽. 小兴安岭 6 种森林类型土壤微生物量的季节变化特征. *生态学报*, 2014, 34(2): 451-459.
- [36] Ruan H H, Zou X M, Scatena F N, Zimmerman J K. Asynchronous fluctuation of soil microbial biomass and plant litterfall in a tropical wet forest. *Plant and Soil*, 2004, 260(1/2): 147-154.
- [37] Liu L, Gundersen P, Zhang W, Zhang T, Chen H, Mo J M. Effects of nitrogen and phosphorus additions on soil microbial biomass and community structure in two reforested tropical forests. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14378.
- [38] 赵彤, 闫浩, 蒋跃利, 黄懿梅, 安韶山. 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响. *生态学报*, 2013, 33(18): 5615-5622.
- [39] 杨佳佳, 安韶山, 张宏, 陈亚南, 党廷辉, 焦菊英. 黄土丘陵区小流域侵蚀环境对土壤微生物量及酶活性的影响. *生态学报*, 2015, 35(17): 5666-5674.
- [40] Wardle D A. Controls of temporal variability of the soil microbial biomass: a global-scale synthesis. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(13): 1627-1637.
- [41] 王芳, 张金水, 高鹏程, 同延安. 不同有机物料培肥对渭北旱塬土壤微生物学特性及土壤肥力的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3): 702-709.
- [42] 李香真, 曲秋皓. 蒙古高原草原土壤微生物量碳氮特征. *土壤学报*, 2002, 39(1): 97-104.
- [43] Moore J M, Klose S, Tabatabai M A. Soil microbial biomass carbon and nitrogen as affected by cropping systems. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 31(3/4): 200-210.
- [44] Bailey V L, Smith J L, Bolton H Jr. Fungal-to-bacterial ratios in soils investigated for enhanced C sequestration. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(7): 997-1007.
- [45] 贾国梅, 何立, 程虎, 王世彤, 向翰宇, 张雪飞, 席颖. 三峡库区不同植被土壤微生物量碳氮磷生态化学计量特征. *水土保持研究*, 2016, 23(4): 23-27.
- [46] Filep T, Draskovits E, Szabó J, Koós S, Lúszló P, Szalai Z. The dissolved organic matter as a potential soil quality indicator in arable soils of Hungary. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(7): 479.
- [47] Liao M, Xie X M. Effect of heavy metals on substrate utilization pattern, biomass, and activity of microbial communities in a reclaimed mining wasteland of red soil area. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, 66(2): 217-223.
- [48] Devi N B, Yadava P S. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, North-east India. *Applied Soil Ecology*, 2006, 31(3): 220-227.
- [49] Speir T W, Cowling J C, Sparling G P, West A W, Corderoy D M. Effects of microwave radiation on the microbial biomass, phosphatase activity and levels of extractable N and P in a low fertility soil under pasture. *Soil Biology and Biochemistry*, 1986, 18(4): 377-382.
- [50] Jia G M, Liu X. Soil microbial biomass and metabolic quotient across a gradient of the duration of annually cyclic drainage of hillslope riparian zone in the Three Gorges Reservoir area. *Ecological Engineering*, 2017, 99: 366-373.
- [51] Couto G M D, Eisenhauer N, De Oliveira E B, Cesarz S, Feliciano A L P, Marangon L C. Response of soil microbial biomass and activity in early restored lands in the northeastern Brazilian Atlantic Forest. *Restoration Ecology*, 2016, 24(5): 609-616.
- [52] 张洋, 倪九派, 周川, 樊芳玲, 谢德体. 三峡库区紫色土旱坡地桑树配置模式对土壤微生物生物量碳氮的影响. *中国生态农业学报*, 2014, 22(7): 766-773.
- [53] 柴雪思, 雷利国, 江长胜, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊. 三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨. *环境科学*, 2016, 37(8): 2979-2988.
- [54] Ma Z W, Zhang M X, Xiao R, Cui Y, Yu F H. Changes in soil microbial biomass and community composition in coastal wetlands affected by restoration projects in a Chinese delta. *Geoderma*, 2017, 289: 124-134.
- [55] 彭佩钦, 吴金水, 黄道友, 汪汉林, 唐国勇, 黄伟生, 朱奇宏. 洞庭湖区不同利用方式对土壤微生物生物量碳氮磷的影响. *生态学报*, 2006, 26(7): 2261-2267.