

DOI: 10.5846/stxb201808091698

宋虹,袁中勋,任庆水,杨文航,王朝英,李昌晓.三峡消落带落羽杉人工幼林叶片的分解及磷释放特征.生态学报,2019,39(21): - .
Song H, Yuan Z X, Ren Q S, Yang W H, Wang C Y, Li C X. Foliar decomposition and phosphorus release in a *Taxodium distichum* young forest stand rehabilitated in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): - .

三峡消落带落羽杉人工幼林叶片的分解及磷释放特征

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

1 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

2 重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室, 重庆 400715

3 西南大学生命科学学院, 重庆 400715

摘要: 为探究三峡消落带人工重建植被落羽杉(*Taxodium distichum*)幼林叶片在不同水文条件下的分解特征及其对土壤-水体磷的贡献潜力, 本实验在控制条件下, 模拟三峡库区消落带土壤水分变化设置了常规生长水分条件(CK)、轻度干旱水分胁迫(T1)、潮湿(T2)、2 cm水淹(T3)、10 cm水淹(T4)5个不同处理, 研究落羽杉叶片分解及磷释放特征。研究结果表明:(1)在整个试验期间(90 d), T3、T4两个水淹处理的叶片失重率分别达51%(T3)和55%(T4), 显著高于CK、T1、T2三个未水淹处理;(2)未分解残留叶片中的全磷含量在CK、T1、T2三个未水淹的处理组呈现增加趋势, 而水淹处理(T3、T4)呈减少趋势;(3)土壤全磷含量在试验过程中呈现波动性变化特征, 但至试验结束时, 各处理中土壤全磷含量与CK相比均无显著差异;(4)T3、T4处理中叶片添加显著增加了上覆水体中总磷含量, 试验过程中呈现出在分解初期迅速上升, 在分解10 d时达到峰值, 之后逐渐降低并趋于稳定, 但试验结束时仍显著较高, 分别是对应无叶片组的17.15倍(T3)和5.81倍(T4)。这些结果说明水淹通过促进落羽杉叶片的分解从而增加上覆水体中磷的含量, 因此有必要在水淹前对消落带的落羽杉幼林叶片进行适时采收, 以尽可能减少其对库区水体的磷负荷。

关键词: 消落带; 土壤水分变化; 落羽杉叶片; 磷; 三峡库区

Foliar decomposition and phosphorus release in a *Taxodium distichum* young forest stand rehabilitated in the hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir

SONG Hong^{1,2,3}, YUAN Zhongxun^{1,2,3}, Ren Qingshui^{1,2,3}, YANG Wenhong^{1,2,3}, WANG Chaoying^{1,2,3}, LI Changxiao^{1,2,3,*}

1 Key Laboratory of Eco-environment in the Three Gorges Reservoir Region of the Ministry of Education, Chongqing 400715, China

2 Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research in the Three Gorges Reservoir Region, Chongqing 400715, China

3 School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: To explore traits related to leaf decomposition and the potential contribution of the phosphorus of the leaves of *Taxodium distichum* to the soil-water system in the fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, an indoor experiment was conducted upon simulation of the water change of the hydro-fluctuation belt in the reservoir. Five different kinds of water treatments were applied to investigate leaf decomposition processes of *T. distichum* and phosphorus release characteristics. Five water treatments included normal growth water condition (CK), light drought water stress (T1), water saturation (T2), 2 cm flooding (T3), and 10 cm flooding (T4). The results showed that: 1) During the entire experiment period

基金项目: 重庆市林业重点科技攻关项目(渝林科研 2016-8, 2019-16); 国家科技部国际合作专项(2015DFA90900); 中央财政林业科技推广示范项目(渝林科推 2014-10)

收稿日期: 2018-08-09; **网络出版日期:** 2019-00-00

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

(90 d), the rate of leaf weight loss of the two flooding groups reached 51% (T3) and 55% (T4), which were significantly higher than that of the three unflooded treatment groups of CK, T1, and T2; 2) The total phosphorus content in leaves increased in the CK, T1, and T2 treatment groups, but decreased in the flooding treatments (T3 and T4); 3) The total phosphorus content of the soil showed fluctuation characteristics during the experiment period, but at the end of experiment there was no significant difference in soil total phosphorus content between the treatment groups and the CK group; 4) During the experiment period, total phosphorus content of the overlying water of the T3 and T4 treatment groups with addition of leaves increased significantly compared with that of the respective treatment groups without addition of leaves and showed a rapid increase in the initial decomposition rate followed by a gradual decrease and finally a stable state. The peak value of leaf decomposition was observed on the 10th day, after which leaf decomposition decreased. However, at end of the experiment the total phosphorus content of T3 and T4 treatment groups with addition of leaves was still significantly higher than that of the respective treatment groups without addition of leaves, reaching 17.15 (T3) and 5.81 (T4) times higher, respectively. These results indicated that: water flooding can promote the decomposition of the leaves of the *T. distichum*; the decomposition of leaves under different water conditions did not significantly affect the phosphorus content in the soil; and the decomposition of the leaves of the *T. distichum* during flooding may increase the phosphorus content in the water. Therefore, it is necessary to collect the leaves of the *T. distichum* in the hydro-fluctuation belt in a timely manner in order to reduce the phosphorus load of the water body in the reservoir area as much as possible.

Key Words: hydro-fluctuation zone; water change; *Taxodium distichum* leaf; phosphorus; the Three Gorges Reservoir

消落带是指季节性水位涨落或者水库周期性蓄洪或泄洪使得被淹没土地周期性地出露于水面的区域^[1]。三峡水库建成后,其“蓄清排浑”的运行方式,使得水库每年 10 月汛末开始蓄水,到次年 1 月水库最高水位达 175 m,之后水位逐渐下降,6—9 月水库水位维持在汛期最低水位 145 m,从而形成了垂直落差达 30 m,总面积近 400 km²的消落带^[2]。三峡消落带具有水位反季节性、淹水时间长、淹没深度大等特点,使得生长于消落带的大量原有植被消亡,进而出现水土流失、生物多样性减少^[3-5]、库岸生态系统退化等严重的生态环境问题。消落带植被具有防治水土流失和土地退化^[6]、增强边坡稳定性^[7]、降低水体污染、保护库岸生物多样性等多方面的生态功能,因此植被修复与重建已成为三峡消落带生态治理的最重要方式^[8]。落羽杉 (*Taxodium distichum*) 为落叶乔木,是三峡库区消落带植被重建的优良适生树种^[9],目前已被广泛种植于三峡库区消落带 165—175 m 海拔段。由于库区采用以年度为周期的季节性水位调节方式,消落带土壤含水量呈现出一系列梯度性变化特征,位于消落带不同高程和坡位上的土壤将包括干旱、水饱和、水淹等多种类型^[9]。因此,在消落带营建的落羽杉人工林叶片的分解势必受到这些水分梯度的不同影响,进而对库区植被-土壤-水体的养分循环与平衡产生影响。

在消落带自然环境下,植被、土壤、水体是一个联系紧密的系统整体,系统内部的养分循环与平衡对库岸生态系统服务功能的正常发挥起着至关重要的作用。其中,作为绿色植物光合作用产物的一部分,凋落叶的分解被认为是生态系统养分循环的重要环节^[10-14]。在消落带土壤不同水分条件下,凋落物分解释放的养分去向主要是土壤及上覆水体,进入土壤中的养分可能会增加土壤肥力;而进入水体中的养分,则可能会造成水体的污染。有关植物凋落叶分解的养分释放动态研究主要集中在森林、草地及湿地生态系统中^[15-21],对于植物淹水条件下养分释放问题的研究则主要涉及湖泊、河流等水体中水生植物和枯枝落叶的分解及养分释放^[13,22-24]。然而,有关大型水库水位动态变化条件下的消落带人工重建植被的凋落物分解特征研究极少。相对于陆地环境,水淹能够显著促进植物的分解^[13],水淹条件下植物的腐烂分解能够释放出大量的养分,其中氮和磷是导致水体富营养化的关键因子^[25]。近年来的研究表明,三峡消落带土壤以及水库水体磷元素含量呈现快速升高的趋势^[26-28],水华发生的频率显著提高,在特定区域甚至超过了氮元素对水体的危害。然而在三峡消落带这一特殊环境下,土壤不同水分条件下落羽杉叶分解的磷元素动态特征及其对土壤-水体磷的贡

献潜力尚不清楚。为此我们提出以下两个科学假设:1、在三峡消落带生长的落羽杉叶片分解会增加土壤中的磷元素含量;2、在水淹条件下,消落带落羽杉叶片分解会增加上覆水体中磷元素含量。鉴于三峡消落带水文动态变化的实际情况,本实验很难在原位开展定量测定工作,因此在实验室控制条件下,模拟研究不同水分条件下三峡消落带落羽杉叶片分解及磷元素释放特征,以期能更好的为落羽杉及其同类树种在消落带造林实践中的应用及叶片的收获管理提供参考依据。

1 材料与方方法

1.1 研究材料

本实验研究材料落羽杉叶及紫色土均取自位于重庆市忠县石宝镇汝溪河流域的三峡消落带植被生态修复示范基地(东经 107°32′—108°14′,北纬 30°03′—30°35′)。2012 年 3 月,课题组利用前期研究筛选出的三峡库区消落带适生植物落羽杉 2 年生幼树进行消落带人工林构建。考虑到树木的耐受极限(165 m 以下存活较差)及行船安全,所有苗木均栽种于消落带上部 165—175 m 内。栽种时幼树的生长状况基本一致(树高 1.61 ± 0.01 m,胸径 0.76 ± 0.06 cm)。种植的株行距为 1×1 m。

落羽杉叶的采集:2017 年 6 月 6 日,在 165—175 m 海拔段落羽杉生长地采集落羽杉中上部成熟叶片并进行充分混匀,带回实验室后置于通风干燥处自然风干至恒重用后续试验。

试验用土壤采集:2017 年 6 月 6 日,在 165—175 m 海拔段落羽杉生长地随机选取 3 个具有代表性的样带,在每个样带内随机设置 3 块 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的样方,每个样方内按梅花形设置 5 个 $1 \times 1 \text{ m}$ 的小样方,使用直径 10 cm、高 20 cm 的环刀在小样方内进行土壤采集。每个小样方均取 0—20 cm 表层土。土壤采集前清除表层的植被,并刮去具有明显枯枝落叶的腐殖质层。将 5 个小样方的土壤进行混合作为该样方的混合样。将从 9 个样方中按以上方法采集的表层土壤放在塑料布上,弄碎、混匀后运回实验室用于后续试验,取土总重量共约 200 kg。

供试叶片及土壤性质分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 供试落羽杉叶片营养元素含量初始值(以干重计)

Table 1 Baseline data of nutrient contents in leaf of *T. distichum* provided for experimental use (DW)

全碳 Total Carbon (TC) (g/kg)	全氮 Total Nitrogen (TN) (g/kg)	全磷 Total Phosphorus (TP) (g/kg)	全钾 Total Potassium (TK) (g/kg)	碳/氮比 C/N ratio
475.17±0.46	22.69±0.24	11.78±0.20	6.49±0.08	20.95±0.22

表 2 供试土壤营养元素初始值(以干重计)

Table 2 Baseline data of nutrient contents in soil provided for experimental use (DW)

pH 值 pH value	有机质 Organic matter (OM) (g/kg)	全氮 Total Nitrogen (TN) (g/kg)	全磷 Total Phosphorus (TP) (g/kg)	全钾 Total Potassium (TK) (g/kg)
7.10±0.04	15.68±0.25	0.94±0.03	5.90±0.13	14.65±0.38

1.2 试验设计

将自然风干的落羽杉叶片分装入规格为直径 8 cm、高 12 cm、孔径大小为 60 目($0.25 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm}$)的圆柱状敞口尼龙分解袋中,每个分解袋装入叶片 3 g(精确至 0.01 g),根据试验处理及采样时间,共制备叶片分解袋 60 个。与此同时,设置 60 个同样规格的空白分解袋(无叶片装入)用作空白对照。

选择高 23 cm、内径 8 cm 的塑料柱状容器(底部密封、上部敞口),将混匀后的土壤放入容器内,使得容器中土壤厚度达到 10 cm。将制备好的分解袋置于土壤表面并用回形针固定,以保证分解袋与土壤充分接触。

模拟三峡消落带土壤含水量变化特征,分别设置常规水分组 CK、轻度干旱组 T1、潮湿饱和组 T2、浅淹组

T3 和深淹组 T4。CK 组即为正常供水组,土壤含水量为田间持水量的 60%—63% (土壤含水量采用称重法测定,下同);T1 组即为轻度水分胁迫,土壤含水量为田间持水量的 47%—50%;T2 组为土壤表面一直处于潮湿状态但无积水;T3 组为土壤全部淹没,水位超过土壤表面 2 cm,叶片刚好被水体淹没;T4 组为土壤全部淹没,水位超过土壤表面 10 cm,叶片浮于水体中。将配置好的应试样本随机分成五组,每个水分处理组分别放置 24 个样本(其中 12 个样本放置叶片分解袋,即叶片添加组;另外 12 个样本放置空白分解袋,即无叶片组)。所有试验用水均为去离子水。试验开始后,每天对各样本进行称重,添加去离子水以补充各容器内散失的水分,以使所有水分处理组中的土壤含水量在试验期间始终保持在设定水平。

本试验于 2017 年 7 月 13 日正式开始,所有试验处理均在西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室的生态试验园地室内室温下进行(该试验园地位于嘉陵江畔,与落羽杉叶采集地的气候条件基本一致)。根据叶片分解先快后慢的特点,分别在第 10、30、60、90 d 时进行样品采集。每次采样时,分别从各处理组中随机选取 6 个(即叶片添加组样本和无叶片组样本各 3 个重复)进行破坏性取样,采集的样品均包括分解袋内未分解完叶片、下层土壤及上覆水体。将分解袋带回实验室后,仔细清理掉分解袋上附着杂物及土壤颗粒,置于 60℃ 烘箱中烘干 72 h 至恒重,称其干重计算叶片的失重率和分解残留率,之后用球磨仪研磨,过 0.25 mm 筛,用于叶片中 TP 含量的测定。土壤样品带回实验室后自然风干,碾磨并过 0.25 mm 的土壤孔筛,用于土壤 TP 含量的测定。取水淹处理组中上覆水体,带回实验室后测定其中 TP 含量。

1.3 指标测定

根据失重率公式和一次指数模型对落羽杉叶片失重率和分解残留率(W_t/W_0)进行计算拟合,进而计算出落羽杉叶片在不同水分条件下的失重率和分解速率^[18]。

$$\text{失重率} = (W_0 - W_t) / W_0 \times 100\%$$

$$\text{一次指数模型: } W_t / W_0 = ae^{-kt}$$

式中, W_t 为 t 时刻的分解残留量(干重), W_0 为落羽杉叶片初始重量(干重), k 为一次指数模型拟合的分解速率(day^{-1}), a 为常数。

叶片及土样 TP 测定时先将研磨过筛后的样品用微波消解仪(SpeedWave MWS-4)进行消解,然后采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES, Thermo Fisher iCAP 6300)测定^[29]。

水体 TP 采用过硫酸钾消解-紫外分光光度计法测定^[30]。

1.4 数据统计与分析

数据均采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析,采用重复测量方差分析(Repeated measure ANOVA),分析水分处理、时间及其交互作用对各指标的影响。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)分析同一采样时间不同水分处理对各指标的影响,并用 Duncan 多重比较(Duncan's multiple range test)进行差异显著性检验($\alpha = 0.05$)。采用 OriginPro 8.5(Origin lab Corporation)作图。

2 结果与分析

2.1 叶片失重率动态

水分处理、取样时间、及二者的交互作用均对落羽杉叶片失重率具有极显著影响(表 3)。图 1 表明,在 90 d 的试验期间,T3 和 T4 两个水淹处理组叶片的失重率表现为快—慢交替变化,而三个非水淹处理下叶片的失重率则表现为先快后慢。分解 10 d 时,各水分处理组叶片质量快速损失明显,干物质损失量分别占试验结束时总损失量的 42%(CK)、48%(T1)、41%(T2)、52%(T3)和 53%(T4)。分解期间,三个非水淹处理下叶片失重率增加速率有所降低进而呈现平缓变化趋势,与之相反,两个水淹处理下叶片失重率仍有显著增加($P < 0.05$)。任一取样时间下,落羽杉叶片失重率均表现为随土壤含水量增加而增加的趋势,且水淹处理组叶片失重率显著高于未水淹处理组叶片失重率($P < 0.05$)。

表 3 落羽杉叶片及土壤各变量的重复测量方差分析结果

Table 3 Repeated measure ANOVA table for variables of *T. distichum* leaf and soil

变量 Variables	时间 Time		处理 Treatment		时间×处理 Time×Treatment	
	F	P	F	P	F	P
叶失重率 Mass loss rate	106.479	0.000	89.137	0.000	4.562	0.000
叶全磷含量 TP Content of leaf	69.729	0.000	194.596	0.000	5.890	0.000
土壤全磷含量 TP content of soil	75.400	0.000	9.960	0.002	15.164	0.000

2.2 叶片分解率动态

采用一次指数模型对落羽杉叶片的物质残留率进行拟合(表 4),进而计算出叶片在不同水分条件下的分解速率。落羽杉叶片在水淹环境下的分解速率高于非水淹环境下的分解速率。在整个试验期间,与 CK 组相比,两个水淹处理组落羽杉叶片的分解速率分别高 67%(T3)和 99%(T4),T2 组叶片的分解速率高 12%,而与之相反,T1 处理组叶片分解速率则低 17%。

2.3 叶片中全磷含量的变化

水分处理、时间以及二者的交互作用对叶片磷含量的影响均达到极显著水平(表 3)。试验结果表明,三个未水淹处理组中叶片磷含量均随时间的推移呈现不同程度的增长趋势,在第 90 d 时叶片磷含量均显著高于试验初始值(11.78 g/kg) ($P < 0.05$),分别达 18.83 g/kg (CK)、20.81 g/kg (T1)、23.70 g/kg (T2),表现为磷元素的富集。然而,两个水淹处理下叶片磷含量则表现为先升高后下降,至试验结束时略低于试验初始值(11.78 g/kg),分别为 11.61 g/kg (T3)、10.50 g/kg (T4),但未达到显著差异($P > 0.05$)。除此之外,从图 2 中可以看出,所有取样时间下叶片磷含量均表现为未水淹处理组显著高于水淹处理组($P < 0.05$),三个未水淹处理组叶片磷含量差异不显著($P > 0.05$),两个水淹处理组叶片磷含量随水分含量增加呈下降趋势(T3>T4),但相互之间亦无显著性差异($P > 0.05$)。

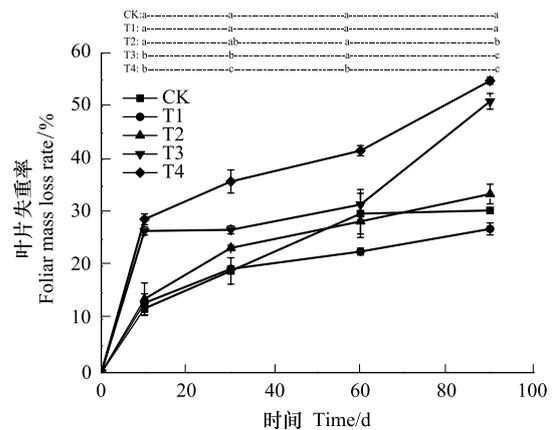


图 1 不同水分条件下落羽杉叶片失重率的变化

Fig. 1 Changes of foliar mass loss of *T. distichum* during decomposition under different water conditions

图中数据为平均值±标准误($n = 3$); CK:常规水分;T1:轻度干旱水分胁迫;T2:水分饱和;T3:2cm水淹;T4:10cm水淹;不同小写字母表示同一时间下不同处理间存在显著差异($P < 0.05$)

表 4 落羽杉叶片残留率(W_t/W_0)一次指数拟合模型Table 4 First-order exponential simulation of foliar mass remaining rate (W_t/W_0) of *T. distichum*

水分处理 Water treatment	一次指数拟合模型 First-order exponential model	分解系数 Decomposition coefficient (k)	相关系数 Correlation coefficient (R^2)	显著性 Significance (P)
常规水分 Conventional water condition (CK)	$W_t/W_0 = 106.496e^{-0.09t}$	0.09	0.837	<0.001
轻度干旱水分胁迫 Light drought water stress (T1)	$W_t/W_0 = 103.887e^{-0.075t}$	0.075	0.917	<0.001
水分饱和 Water saturation (T2)	$W_t/W_0 = 107.138e^{-0.101t}$	0.101	0.903	<0.001
2 cm 水淹 2 cm flooding (T3)	$W_t/W_0 = 111.224e^{-0.150t}$	0.150	0.850	<0.001
10 cm 水淹 10 cm flooding (T4)	$W_t/W_0 = 111.926e^{-0.179t}$	0.179	0.937	<0.001

2.4 土壤中全磷含量的变化

时间、水分处理及二者的交互作用均对土壤中全磷含量的影响达到极显著水平(表 3)。各水分处理组土壤全磷含量在试验期间按升降交替形式呈波动性变化。试验结束时,T1、T2、T3 和 T4 水分处理组的土壤全磷

含量分别达 4.17 g/kg、4.33 g/kg、4.29 g/kg、4.57 g/kg, 与 CK 组土壤全磷含量 4.21 g/kg 相比均无显著差异 (所有的 $P>0.05$), 但均较试验初始值 5.90 g/kg 有所降低。

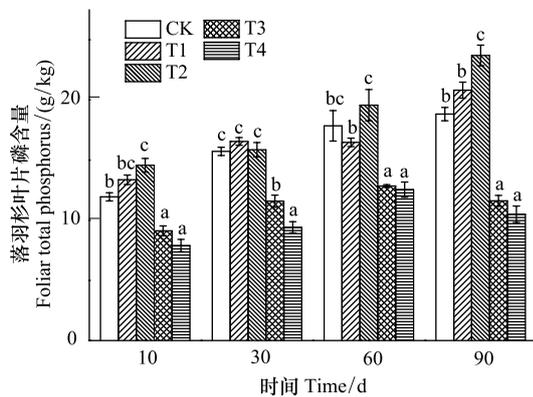


图 2 不同水分条件下叶片全磷含量的变化

Fig. 2 Changes of foliar total phosphorus content of *T. distichum* during decomposition under different water conditions

图中数据为平均值±标准误 ($n=3$); CK: 常规水分; T1: 轻度干旱水分胁迫; T2: 水分饱和; T3: 2cm 水淹; T4: 10 cm 水淹; 不同小写字母表示同一时间下不同处理间存在显著差异 ($P<0.05$)

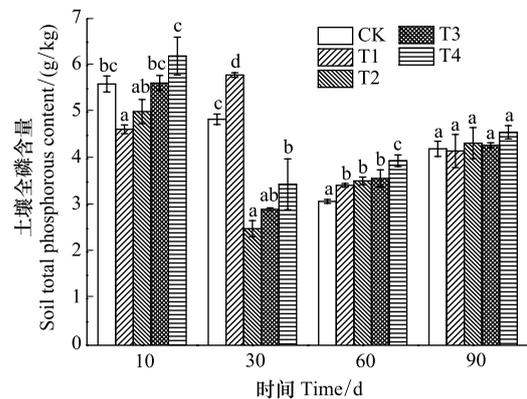


图 3 不同水分条件下土壤中全磷含量的变化

Fig. 3 Changes of total phosphorus content of soil under different water conditions

图中数据为平均值±标准误 ($n=3$); CK: 常规水分; T1: 轻度干旱水分胁迫; T2: 水分饱和; T3: 2cm 水淹; T4: 10 cm 水淹。不同小写字母表示同一时间下不同处理间土壤全磷含量存在显著差异 ($P<0.05$)

2.5 上覆水体中总磷含量的变化

落羽杉叶片分解过程中上覆水体中的总磷含量也受到了时间、水分、叶片及其相互作用的显著影响 (表 5)。叶片添加组的上覆水体总磷含量在试验初期迅速升高, 并在第 10 d 时分别达到峰值 1.78 mg/L (T3)、3.33 mg/L (T4), 随后逐渐下降, 并在第 60 d 后逐步趋于稳定 (图 4)。与之相反, 无叶片组的水体总磷含量在试验过程中无明显变化, 始终维持在 0.08—0.16 mg/L。在整个试验期间, 叶片添加组的上覆水体总磷含量始终显著高于各自对应的无叶片组 ($P<0.01$)。试验结束时, 叶片添加组水体总磷含量分别为各自对应的无叶片组的 17.15 倍 (T3) 和 5.81 倍 (T4)。

表 5 上覆水体 TP 含量重复测量方差分析结果

Table 5 Repeated measure ANOVA table for TP in overlying water

变量 Variable	时间 Time		处理 Treatment		叶片 Leaf		时间×处理 Time×Treatment		时间×叶片 Time×Leaf		处理×叶片 Treatment×Leaf		时间×处理×叶片 Time×Treatment×Leaf	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
水体总磷含量 TP in water	42.365	0.000	15.359	0.004	838.840	0.000	17.320	0.000	38.657	0.000	19.237	0.002	21.082	0.000

2.6 叶片-土壤-上覆水体磷的平衡分析

磷元素平衡分析结果表明, 在为期 90 d 的落羽杉叶片分解试验期间, 不同水分处理下磷元素有不同程度的平衡损失, 但均小于 22% (表 6)。

3 讨论

3.1 水分处理对落羽杉叶片失重率及分解率的影响

植物在环境中的分解大体呈指数衰减的变化规律^[10-11, 31], 受到生物与非生物因素的综合影响^[20, 32], 如枯落物质量、温度、湿度、水分等^[33-35]。在消落带自然环境条件下, 土壤水分是水陆生态系统物质循环的重要环

境因素,水位将影响土壤的透气性与水体中溶解氧浓度,进而影响微生物对有机质的矿化分解。通常,土壤水分含量也是影响与分解相关的无脊椎动物的活力以及土壤动物的组成和丰富度的决定因子^[36]。本研究发现,水淹环境下(T3与T4处理)叶片失重率与分解速率均显著高于未水淹环境(CK、T1和T2处理)(图1,表4),表明水分偏少在一定程度上限制了陆地环境中叶片的分解^[37-39],同时也说明水淹条件促进了叶片的分解。前人研究也发现相对于陆地环境,水淹能够促进凋落叶的分解^[13,39-40],水体环境中叶片分解率显著高于陆地环境中叶片分解率^[16,18,41]。这是因为相对于陆地环境,水体可以促进枯落物的淋溶与微生物的新陈代谢,从而加快枯落物的分解^[42]。此外,水分对枯落物的浸润作用也可以导致枯落物较高的淋溶损失^[43]。有研究表明,真菌是水淹环境下主要的分解者^[44],其生物量在水淹条件下显著增加^[45-46],我们推测这也是水淹下叶片分解率加快的原因之一。

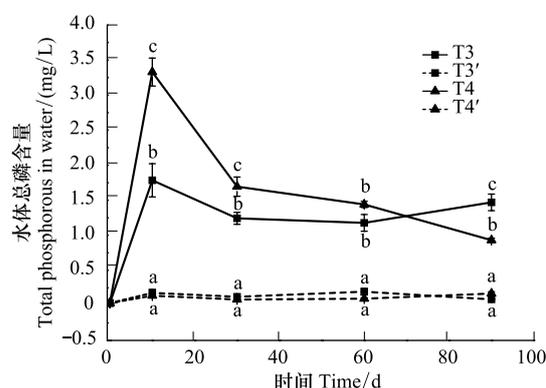


图4 水淹条件下上覆水体中总磷含量变化

Fig.4 Changes of TP in overlying water during decomposition under flooding conditions

图中数据为平均值±标准误($n=3$);T3:2cm水淹叶片添加组;T4:10cm水淹叶片添加组;T3':2cm水淹无叶片组;T4':10cm水淹无叶片组。不同小写字母表示同一时间下不同处理间水体总磷含量存在显著差异($P<0.05$)

表6 叶片-土壤-上覆水体磷的平衡分析

Table 6 Equilibrium analysis of phosphorus in leaf-soil-overlying water

水分处理 Water Treatment	分解阶段 Decomposition Stage	各部分磷含量/毫克 Phosphorus Content/mg					平衡损失 Balance loss
		叶片 Leave	土壤 Soil	水体 Water	总量 Total		
常规水分 Conventional water condition (CK)	初始	31.31±0.33	3694.29±16.19	-	3725.61±16.15	-	
	试验期间	33.16±0.81	3010.72±170.55		3043.88±170.06	18.3%	
轻度干旱水分胁迫 Light drought water stress (T1)	初始	31.31±0.33	3694.29±16.19	-	3725.61±16.15	-	
	试验期间	35.21±1.13	3040.42±160.78		3075.64±160.50	17.4%	
水分饱和 Water saturation (T2)	初始	31.31±0.33	3694.29±16.19	-	3725.61±16.15	-	
	试验期间	36.02±1.17	2898.05±179.09		2934.07±178.73	21.2%	
2 cm 水淹 2 cm flooding (T3)	初始	31.31±0.33	3694.29±16.19	0.01±0.00	3725.62± 25.90	-	
	试验期间	22.50±1.47	2885.89±186.80	0.19±0.03	2908.59±187.02	21.9%	
10 cm 水淹 10 cm flooding (T4)	初始	31.31±0.33	3694.29±16.19	0.02±0.00	3725.63± 25.15	-	
	试验期间	19.23±1.75	2967.74±173.91	0.89±0.18	2987.86±174.56	19.8%	

表中数据为平均值±标准误($n=3$)。初始:分解第0天;试验期间:分解第0—90天。各部分磷含量:各部分磷浓度×各部分干重。平衡损失:(初始总量-试验期间总量)/初始总量×100%

水淹深度影响叶片分解的微环境,进而导致分解的差异^[38,45,47]。Sun等^[38]研究了4种不同水文条件下植物凋落物的分解,发现浅水淹环境下(23.23cm)的分解最快;Xie等^[45]也发现浅水淹环境中(5cm)的叶片分解率大于深水淹环境中(80cm)的分解率。一般认为,随水淹深度加深,水体溶解氧浓度下降^[48],微生物活力降低^[39,44,49],从而使植物分解率降低。本试验中,水淹10cm处理下叶片分解率高于水淹2cm处理下的分解率(图1,表4),表明水淹深度加深促进了叶片分解。与前人的研究结果不一致的原因,可能是因为前人研究的水淹深度差异较大,且叶片分解袋为扁平状并固定于土壤表面;而本试验中水淹2cm与水淹10cm两个水淹深度差异较小,且采用的分解袋为上部敞口的分解袋,水淹过程中叶片处于漂浮状态,与原位状态相似,同时T4处理组中水体积大促进 O_2 溶解,从而一定程度上加速了叶片的分解。

分解前期(0—10d)叶片失重率迅速增加(图1),这与叶片中的可溶性组分的快速淋溶释放有关^[50]。由

于试验前期处于夏季,这期间较高的环境温度能够增加与分解相关的微生物的活力^[51-52],加快微生物对植物残体的分解,从而降低植物剩余干质量^[53]。在 60 d 后三个未水淹处理组叶片失重率呈平稳变化趋势(图 1),可能是因为随着分解时间的推移,叶片中容易被分解者利用的养分逐渐减少。与未水淹处理组不同的是, T3、T4 两个水淹处理组 60 d 后叶片失重率仍显著增加(图 1),这主要是因为水淹条件下,厌氧微生物大量繁殖^[45],从而增加了微生物对叶片的利用率^[54]。

3.2 水分处理对叶片中全磷含量的影响

植物残体养分的释放规律受植物残体种类、分解阶段及所处环境条件的影响,同时也与养分自身性质紧密相关^[55]。本试验中,经过 90 d 分解后,CK、T1、T2 三个未水淹处理下叶片磷的含量均随时间的推移有不同程度的增加(图 2),而 T3、T4 两个水淹处理下叶片磷的含量呈现出先升高后下降的趋势,这说明分解过程中叶片对磷的富集与释放处于动态变化中,与以往研究结果相符^[20,56-57]。这主要是由于叶片失重和磷释放的不同步发生导致。另外,在非水淹条件下,叶片分解过程中磷元素可能成为与分解相关的微生物群落生长发育的限制性养分从而被微生物固定,因而造成叶片中磷发生富集可能正是聚集在叶片表面的微生物固定导致的磷的反向迁移过程,即真菌、细菌、放线菌的菌丝体将磷从土壤中向叶片中迁移的过程^[58]。历经 90 d 分解后, T3、T4 两个水淹处理组中叶片磷的含量低于试验初始值,表现出磷元素释放的趋势,与以往研究结果一致^[48,59-60],可能是因为水淹条件有利于厌氧微生物的大量繁殖与活动,在促进叶片分解的同时,促进了磷元素的释放。与此同时,所有取样时间下叶片磷含量均表现为随土壤水分含量增加而下降的趋势,这是因为水体促进了以磷酸根或磷酸化合物等生物活性物质为主要存在形式的磷的淋溶损失^[61]。

3.3 水分变化下叶片分解对土壤中全磷含量的影响

植物残体的分解在维持土壤营养状况,促进生态系统养分循环方面起着重要作用^[62]。在试验期内,各水分处理下土壤磷含量均表现为升降交替的波动性变化(图 3),这可能反映了磷元素在土壤—叶片—上覆水体间的迁移与再分配。两个水淹处理组中,在落羽杉叶片分解初期土壤中全磷含量有所增加,主要是因为分解初期落羽杉叶片失重迅速(图 1),使得叶片中磷淋出,增加了水体磷含量的同时也增加了土壤磷含量。因 T4 处理组中叶片分解在 90 d 内始终快于 T3 处理组,这也使得 T4 处理组中的土壤全磷含量在试验期间始终略高于 T3 处理组土壤中全磷含量。两个水淹处理下土壤全磷含量在分解期间均表现为先减少后增加,这是因为淹水土壤的厌氧还原条件促进了铁的还原,从而导致磷的释放^[63]。落羽杉叶片分解后期,部分亚铁离子再度被氧化,与水体中的磷酸根离子作用生成难溶的磷酸铁从而被土壤所吸附^[64],使得土壤中的全磷含量又有所增加。

叶片分解在为土壤提供养分的同时,微生物的同化作用也存在着对磷酸盐的吸收^[65]。本试验设置 5 种不同水分处理,水分条件变化使土壤氧化还原电位发生改变,需氧厌氧微生物种类不同,微生物丰度也可能存在一定的差异,从而吸收土壤中的养分程度不同^[66],极有可能造成不同水分条件下土壤磷的变化特征不一致。试验过程中,土壤全磷含量逐渐趋于稳定,试验结束时,各水分处理组土壤全磷含量无显著差异,这是生物和非生物因素共同作用的结果^[63]。由此证明前面的第一项假设是不成立的,即三峡消落带生长的落羽杉叶片的分解并不会显著影响土壤中磷元素含量。

3.4 水分处理对上覆水体中总磷含量的影响

本试验中,上覆水体中总磷含量先上升后下降,这说明在水—土—叶片试验系统中上覆水体、土壤和叶片中的总磷进行了再分配。试验初期落羽杉叶片中的总磷快速淋溶释放至上覆水体中,导致水体中总磷含量迅速升高,并达到显著水平(图 4),这与谢理等^[67]研究结果相符。这是因为在淹水初期,叶片干质量损失明显(图 1),植物残体的腐解会释放大量的低分子有机酸,其配位螯合效应能降低土壤对磷的固定,从而促进磷的释放^[68-69]。T4 处理组上覆水体中总磷含量显著高于 T3 处理组中总磷含量,这可能是因为 T4 处理组中水体积大,可以对土壤磷进行更有效的浸提。此外,由于 T4 处理组水量大,能够促进氧气的溶解,对落羽杉叶片的分解起到一定的促进作用,进而加快了叶片中磷元素的释放。分解 10 d 时,水体中总磷含量分别达峰值 1.78

mg/L(T3)、3.33 mg/L(T4),之后逐渐下降。这是因为当上覆水体总磷浓度达到 1—2mg/L 时,无论水体中环境条件如何,底泥均会吸收磷^[70],即磷逐步迁移至下层土壤中^[71]。然而,虽然土壤对水体中总磷具有一定的沉淀和吸附作用,但在 90 d 分解后,两个叶片添加组中上覆水体总磷含量仍显著高于各自对应的无叶片组(图 4),由此说明,叶片分解确实会对水环境产生一定的负面影响。尽管在消落带实际环境中,由于水体的稀释作用,水体中磷浓度会有所降低,但是磷的淋出仍然可以增加水体富营养化的潜在风险。这充分证明前面的第二项假设是成立的,即在水淹条件下,消落带落羽杉叶分解会显著增加上覆水体中磷元素含量。

水土界面的磷交换过程十分复杂,它涉及到磷的物理、化学、生物循环,如溶解态磷的吸附与解吸,磷酸盐的沉淀与溶解,以及微生物的同化作用等。在本模拟系统中,磷素循环是封闭的,落羽杉叶片分解所释放的磷,其去向应当增加水体以及土壤的磷含量,然而,本试验研究在某些处理并没有完全得到这样的结果。究其原因,一方面可能是有部分磷以磷化氢这一气体形式损失至空气中^[59],另一方面可能是本试验所采用的容器壁及容器底部吸附了少量的磷。在试验开展过程中,每隔两天对各试验样本使用去离子水进行水分补充时,去离子水的加入对土壤中的磷起到了淋洗的作用,使部分磷酸盐向下迁移被下层土壤逐渐吸附固定^[72],当所接触的土壤吸附固定磷达到饱和后,磷将以可溶态形式继续向下运动,进而有少部分吸附到了容器界面的壁及底部。在试验的采样过程中,由于仅是对容器内未分解完叶片、上覆水体及土壤进行了破坏性取样,并未使用去离子水进行容器底和容器壁的清洗,故得到了本试验的处理结果。

4 结论

1) 在 90 d 试验周期内,不同水分处理对落羽杉叶片的分解过程的影响存在显著差异,表现出随着水分含量的增加落羽杉叶片分解失重率也不断增加的趋势,淹水处理能够显著促进落羽杉叶的分解。

2) 不同水分条件能够不同程度影响落羽杉叶片磷元素的富集与释放特征,在分解过程中,三个未水淹处理组中的磷元素在试验末表现为富集,而两个水淹处理组则表现出释放趋势。

3) 水淹环境中叶片分解初期会向水体释放大量磷,使水体中磷大幅增加。虽然随着时间的推移会有部分磷因下层土壤的吸附作用沉积到土壤中,但叶片添加组仍较各自对应的无叶片添加组有显著增高,从而会提高水体富营养化的潜在风险。

因此,在三峡库区消落带水淹前有必要对人工种植的落羽杉幼林叶片进行及时收获,以尽可能减少其分解对库区水体产生的磷负荷。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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, 2004, 21(2): 32-34, 41-41.
- [4] 周明涛,杨平,许文年,肖海. 三峡库区消落带植物治理措施. 中国水土保持科学, 2012, 10(4): 90-94.
- [5] 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.
- [6] 董杰,罗丽丽,杨达源,陈可锋. 三峡库区紫色土坡地土壤退化特征:土壤养分贫瘠化. 地理与地理信息科学, 2007, 23(6): 58-64.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 李昌晓,钟章成,刘芸. 模拟三峡库区消落带土壤水分变化对落羽杉幼苗光合特性的影响. 生态学报, 2005, 25(8): 1953-1959.
- [10] Koukoura Z, Mamolos A P, Kalburtji K L. Decomposition of dominant plant species litter in a semi-arid grassland. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23(1): 13-23.
- [11] Chimney M J, Pietro K C. Decomposition of macrophyte litter in a subtropical constructed wetland in south Florida (USA). *Ecological Engineering*, 2006, 27(4): 301-321.

- [12] Menéndez M, Hernández O, Comín F A. Seasonal comparisons of leaf processing rates in two Mediterranean rivers with different nutrient availability. *Hydrobiologia*, 2003, 495(1/3): 159-169.
- [13] 陈书秀, 江明喜. 三峡地区香溪河流域不同树种叶片凋落物的分解. *生态学报*, 2006, 26(9): 2905-2912.
- [14] 陈法霖, 郑华, 欧阳志云, 张凯, 屠乃美. 土壤微生物群落结构对凋落物组成变化的响应. *土壤学报*, 2011, 48(3): 603-611.
- [15] Kasurinen A, Riikonen J, Oksanen E, Vapaavuori E, Holopainen T. Chemical composition and decomposition of silver birch leaf litter produced under elevated CO₂ and O₃. *Plant and Soil*, 2006, 282(1/2): 261-280.
- [16] Kelley R H, Jack J D. Leaf litter decomposition in an ephemeral karst lake (Chaney Lake, Kentucky, U.S.A.). *Hydrobiologia*, 2002, 482(1/3): 41-47.
- [17] Merrix F L, Lewis B R, Ormerod S J. The effects of low pH and palliative liming on beech litter decomposition in acid-sensitive streams. *Hydrobiologia*, 2006, 571(1): 373-381.
- [18] 孙志高, 刘景双, 于君宝, 秦胜金. 模拟湿地水分变化对小叶章枯落物分解及氮动态的影响. *环境科学*, 2008, 29(8): 2081-2093.
- [19] 窦荣鹏, 江洪, 余树全, 马元丹, 郭培培, 宋新章. 热带尖峰岭和亚热带千岛湖六种凋落叶的分解特征. *生态学报*, 2010, 30(16): 4521-4528.
- [20] 武海涛, 吕宪国, 杨青. 湿地草本植物枯落物分解的影响因素. *生态学杂志*, 2006, 25(11): 1405-1411.
- [21] 李雪峰, 韩士杰, 胡艳玲, 赵玉涛. 长白山次生针阔混交林叶凋落物中有机物分解与碳、氮和磷释放的关系. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 245-251.
- [22] 成小英, 王国祥, 濮培民, 李世杰. 凤眼莲腐烂分解对湖泊水质的影响. *中国环境科学*, 2004, 24(3): 303-306.
- [23] 韩红娟, 翟水晶, 胡维平. 马来眼子菜腐烂分解氮磷转化模型研究. *环境科学*, 2010, 31(6): 1483-1488.
- [24] 厉恩华, 刘贵华, 李伟, 袁龙义, 温峰. 洪湖三种水生植物的分解速率及氮、磷动态. *中国环境科学*, 2006, 26(6): 667-671.
- [25] 邵学新. 潮滩湿地植物对磷素迁移转化及截留的影响机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [26] 朱强. 三峡库区消落带土壤磷吸附特性及淹水—落干周期下的变迁[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- [27] 孙璐. 三峡库区小江流域消落带土壤磷对水环境影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [28] 冉小萌. 三峡库区消落带土壤磷素释放性能及影响因素研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [29] 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.
- [30] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [31] Thullen J S, Nelson S M, Cade B S, Sartoris J J. Macrophyte decomposition in a surface-flow ammonia-dominated constructed wetland: Rates associated with environmental and biotic variables. *Ecological Engineering*, 2008, 32(3): 281-290.
- [32] 孙志高, 刘景双. 湿地枯落物分解及其对全球变化的响应. *生态学报*, 2007, 27(4): 1606-1618.
- [33] Lan N K, Asaeda T, Manatunge J. Decomposition of aboveground and belowground organs of wild rice (*Zizania latifolia*): mass loss and nutrient changes. *Aquatic Ecology*, 2006, 40(1): 13-21.
- [34] Rejmánková E, Houdková K. Wetland plant decomposition under different nutrient conditions: what is more important, litter quality or site quality? *Biogeochemistry*, 2006, 80(3): 245-262.
- [35] 侯翠翠, 宋长春, 李英臣, 郭跃东, 杨桂生. 不同水分条件下毛茛苔草枯落物分解及营养动态. *生态学报*, 2012, 32(2): 650-658.
- [36] Schmidt A, John K, Auge H, Brandl R, Horgan F G, Settele J, Zaitsev A S, Wolters V, Schädler M. Compensatory mechanisms of litter decomposition under alternating moisture regimes in tropical rice fields. *Applied Soil Ecology*, 2016, 107: 79-90.
- [37] Swarnalatha B, Reddy M V. Leaf litter breakdown and nutrient release in three tree plantations compared with a natural degraded forest on the coromandel coast (Puducherry, India). *Ecotropica*, 2011, 17(2): 39-51.
- [38] Sun Z G, Mou X J, Liu J S. Effects of flooding regimes on the decomposition and nutrient dynamics of *Calamagrostis angustifolia* litter in the Sanjiang Plain of China. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(8): 2235-2246.
- [39] Wallis E, Raulings E. Relationship between water regime and hummock-building by *Melaleuca ericifolia* and *Phragmites australis* in a brackish wetland. *Aquatic Botany*, 2011, 95(3): 182-188.
- [40] Langhans S D, Tiegls S D, Gessner M O, Tockner K. Leaf-decomposition heterogeneity across a riverine floodplain mosaic. *Aquatic Sciences*, 2008, 70(3): 337-346.
- [41] Yue K, Yang W Q, Peng C H, Peng Y, Zhang C, Huang C P, Tan Y, Wu F Z. Foliar litter decomposition in an alpine forest meta-ecosystem on the eastern Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 2016, 566-567: 279-287.
- [42] Molles Jr M C, Crawford C S, Ellis L M. Effects of an experimental flood on litter dynamics in the middle rio grande riparian ecosystem. *River Research and Applications*, 1995, 11(3/4): 275-281.
- [43] Day Jr F P. Effects of flooding on leaf litter decomposition in microcosms. *Oecologia*, 1983, 56(2/3): 180-184.
- [44] dos Santos Fonseca A L, Bianchini Jr I, Pimenta Monteiro C M, Pereira Soares C B, Mangiavacchi N. The flow velocity as driving force for decomposition of leaves and twigs. *Hydrobiologia*, 2013, 703(1): 59-67.
- [45] Xie Y J, Xie Y H, Hu C, Chen X H, Li F. Interaction between litter quality and simulated water depth on decomposition of two emergent macrophytes. *Journal of Limnology*, 2015, 75(1): 36-43.
- [46] Wright E L, Black C R, Cheesman A W, Turner B L, Sjögersten S. Impact of simulated changes in water table depth on ex situ decomposition of

- leaf litter from a neotropical peatland. *Wetlands*, 2013, 33(2): 217-226.
- [47] Arroita M, Aristi I, Díez J, Martínez M, Oyarzun G, Elosegí A. Impact of water abstraction on storage and breakdown of coarse organic matter in mountain streams. *Science of the Total Environment*, 2015, 503-504: 233-240.
- [48] Xie Y J, Xie Y H, Xiao H Y, Chen X S, Li F. Controls on litter decomposition of emergent macrophyte in Dongting Lake wetlands. *Ecosystems*, 2017, 20(7): 1383-1389.
- [49] Torremorell A, Gantes P. Decomposition and nitrogen dynamics of *Rhynchospora asperula* in floating soils of Esteros del Iberá, Argentina. *Wetlands Ecology and Management*, 2010, 18(2): 191-201.
- [50] 范航清, 林鹏. 淋溶在红树植物秋茄落叶分解失重中的潜在作用. *海洋与湖沼*, 1995, 26(1): 28-33.
- [51] Martínez A, Larrañaga A, Pérez J, Descals E, Pozo J. Temperature affects leaf litter decomposition in low-order forest streams: field and microcosm approaches. *Fems Microbiology Ecology*, 2014, 87(1): 257-267.
- [52] Fernandes I, Seena S, Pascoal C, Cássio F. Elevated temperature may intensify the positive effects of nutrients on microbial decomposition in streams. *Freshwater Biology*, 2015, 59(11): 2390-2399.
- [53] 王博, 李法云, 范志平. 不同温度下黑藻分解过程及对水体-底泥碳、氮、磷的影响研究. *环境污染与防治*, 2013, 35(10): 46-51.
- [54] Cheever B M, Kratzer E B, Webster J R. Immobilization and mineralization of N and P by heterotrophic microbes during leaf decomposition. *Freshwater Science*, 2012, 31(1): 133-147.
- [55] 许晓静, 张凯, 刘波, 兰长春, 徐小牛. 森林凋落物分解研究进展. *中国水土保持科学*, 2007, 5(4): 108-114.
- [56] 张晓曦, 刘增文, 祝振华, 杜良贞. 侧柏与其他树种枯落叶混合分解对养分释放的影响. *土壤学报*, 2013, 50(1): 178-185.
- [57] 林淑伟, 吴承祯, 洪伟, 范海兰, 林晗, 程煜. 凋落叶养分动态的起伏型时间序列分析. *福建林学院学报*, 2009, 29(3): 215-219.
- [58] 李海涛, 于贵瑞, 李家永, 梁涛, 陈永瑞. 井冈山森林凋落物分解动态及磷、钾释放速率. *应用生态学报*, 2007, 18(2): 233-240.
- [59] 司静, 邢奕, 卢少勇, 金相灿, 胡小贞, 张义安, 包裕尉. 沉水植物衰亡过程中氮磷释放规律及温度影响的研究. *中国农学通报*, 2009, 25(1): 217-223.
- [60] Peng Y, Yang W Q, Yue K, Tan B, Huang C P, Xu Z F, Ni X Y, Zhang L, Wu F Z. Temporal dynamics of phosphorus during aquatic and terrestrial litter decomposition in an alpine forest. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 832-841.
- [61] Jacobson T K B, da CunhaBustamante M M, Kozovits A R. Diversity of shrub tree layer, leaf litter decomposition and N release in a Brazilian Cerrado under N, P and N plus P additions. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2236-2242.
- [62] Mcnaughton S J, Oosterheld M, Frank D A, Williams K J. Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature*, 1989, 341(6238): 142-144.
- [63] 郭念, 江韬, 魏世强, 闫金龙, 梁俭, 卢松, 高洁. 自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响. *环境科学*, 2014, 35(12): 4544-4552.
- [64] 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.
- [65] Sallade Y E, Sims J T. Phosphorus transformations in the sediments of Delaware's agricultural drainageways; II. Effect of reducing conditions on phosphorus release. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26(6): 1579-1588.
- [66] 罗佳. 枫香人工林凋落物分解速率及其对土壤养分的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2009.
- [67] 谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌. 滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中 DOM 释放特征研究. *环境科学*, 2013, 34(9): 3458-3466.
- [68] 章爱群, 贺立源, 赵会娥, 郭再华, 崔雪梅. 有机酸对土壤无机态磷转化和速效磷的影响. *生态学报*, 2009, 29(8): 4061-4069.
- [69] 杨茜, 蒋珍茂, 石艳, 闫金龙, 何明靖, 魏世强. 低分子量有机酸对三峡库区消落带典型土壤磷素淋溶迁移的影响. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 126-131.
- [70] 徐轶群, 熊慧欣, 赵秀兰. 底泥磷的吸附与释放研究进展. *重庆环境科学*, 2003, 25(11): 147-149.
- [71] 周林飞, 邹飞, 李颖卓. 沉水植物腐解对人工湿地水质的持续影响研究. *水土保持学报*, 2013, 27(6): 119-123, 129-129.
- [72] del Campillo M C, Van Der Zee S E A T M, Torrent J. Modelling long-term phosphorus leaching and changes in phosphorus fertility in excessively fertilized acid sandy soils. *European Journal of Soil Science*, 1999, 50(3): 391-399.