

DOI: 10.5846/stxb201912032625

谢婷婷, 刘明辉, 袁中勋, 张松林, 李昌晓. 不同泥沙埋深对几种一年生草本枯落物分解及养分动态特征的影响. 生态学报, 2020, 40(21): 7755-7766.

Xie T T, Liu M H, Yuan Z X, Zhang S L, Li C X. Effects of different simulative sediment depths on litter decomposition and nutrient dynamic change of several annual herbaceous plants. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7755-7766.

不同泥沙埋深对几种一年生草本枯落物分解及养分动态特征的影响

谢婷婷^{1,2}, 刘明辉^{1,2}, 袁中勋^{1,2}, 张松林^{1,2}, 李昌晓^{1,2,*}

1 三峡库区生态环境教育重点实验室, 重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室, 西南大学生命科学学院, 重庆 400715

2 西南山地生态循环农业国家级培育基地, 重庆 400715

摘要:为探究三峡消落带泥沙淤积条件下一年生草本枯落物的分解及养分变化特征,通过模拟实验,采用分解袋法,研究不同泥沙埋深对 4 种一年生草本分解及养分动态的影响。所选择的三峡消落带 4 种一年生优势草本植物包括马唐 (*Digitaria sanguinalis*)、稗 (*Echinochloa crusgali*)、狼把草 (*Bidens tripartita*)、苍耳 (*Xanthium sibiricum*), 设置了无掩埋 (0 cm)、中度掩埋 (5 cm) 和深度掩埋 (10 cm) 3 个泥沙掩埋深度, 试验周期为 180 d。结果表明: (1) 在整个实验期间, 4 种一年生草本枯落物的分解速率均呈现先快后慢的特点, 与 0 cm 泥沙埋深处理相比, 5、10 cm 埋深下 4 种一年生草本枯落物的分解速率均显著降低; (2) 在分解结束时, 4 种一年生草本枯落物 C 含量变化不大, P 元素处于释放状态, 而在泥沙掩埋下 N 元素处于富集状态; (3) 除马唐和稗枯落物的 P 含量变化外, 4 种一年生草本枯落物 C、N、P 含量均表现为 0 cm 掩埋处理显著低于 5、10 cm 处理组; 相反, 4 种一年生草本枯落物 K 含量则表现为 0 cm 掩埋处理显著高于 5、10 cm 处理组。研究表明消落带大量泥沙淤积抑制枯落物的分解和 C、N、P 元素释放, 有利于降低对三峡库区水体富营养化及营养物质悬浮的贡献率, 一定程度上, 对库区水质保护有正面效应。

关键词: 三峡消落带; 一年生草本; 泥沙掩埋深度; 分解速率; 养分含量

Effects of different simulative sediment depths on litter decomposition and nutrient dynamic change of several annual herbaceous plants

XIE Tingting^{1,2}, LIU Minghui^{1,2}, YUAN Zhongxun^{1,2}, ZHANG Songlin^{1,2}, LI Changxiao^{1,2,*}

1 Key Laboratory of Eco-environment in the Three Gorges Region of Education, Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research in the Three Gorges Region, School of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 State Cultivation Base of Eco-agriculture for Southwest Mountainous Land, Chongqing 400715, China

Abstract: To explore traits related to litter decomposition and the nutrient change of annual herbaceous species under the condition of sediment deposition in the Three Gorges Reservoir. The effects of different sediment depths on ground litter decomposition and nutrient dynamic characteristics of four annual dominant herbaceous species (*Digitaria sanguinalis*, *Echinochloa crusgali*, *Bidens tripartita*, and *Xanthium sibiricum*) in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir were investigated using the litter-bag method. Three sediment depths included no burial (0 cm), moderate burial (5 cm) and deep burial (10 cm), were treated with an experimental period of 180 days. The results showed that: (1) During the experiment period, the decomposition rate of litters of four annual herbaceous species was fast at first and then

基金项目: 重庆市建设科技项目 (城科字 2019 第 1-4-2); 重庆市科技兴林首席专家团队项目 (TD2019-2); 中央林业改革发展资金科技推广示范项目 (渝林科推 2017-12); 国家国际科技合作专项 (2015DFA90900)

收稿日期: 2019-12-03; **网络出版日期:** 2020-09-01

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

slow. Compared with 0 cm sediment depth treatment, the decomposition rate significantly decreased in 5 cm and 10 cm. (2) When the decomposition ended, the carbon (C) content of four annual herbaceous species litters remained stable, the phosphorus (P) element was released, while the nitrogen (N) was enriched under sediment burial. (3) Except for changes in phosphorus content of *D. sanguinalis* and *E. crusgali* litter, the content of carbon, nitrogen and phosphorus of four annual herb litter in 0 cm was significantly lower than that in 5 cm and 10 cm treatment groups. On the contrary, the potassium (K) content of four annual herbs species litters in 0 cm was significantly higher than that in 5 cm and 10 cm treatment group. The results revealed that a large amount of sediment deposition in the water-level fluctuation zone inhibited the decomposition and C, N, and P release of the litter, which is beneficial to reduce the contribution of litter decomposition to water eutrophication and nutrient suspension in the Three Gorges Reservoir, and to a certain extent, has a positive effect on water quality protection.

Key Words: water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir; annual herbaceous; sediment burial depth; decomposition rate; nutrient contents

三峡大坝运行以来,库区水位每年在 145—175 m 之间周期性地涨落,形成了垂直落差达 30 m,面积近 350 km² 的消落带^[1-2]。消落带原有的植被群落因不能适应这种高强度、长时间和反季节的水淹^[3]而大量消亡。在水库低水位运行期,大量的一年生草本植物成为消落带最重要的植物类型,其中禾本科(Poaceae)、菊科(Asteraceae)占较大比例^[4-6]。尤其是以马唐(*Digitaria sanguinalis*)和稗(*Echinochloa crusgali*)为代表的一年生禾本科植物与以狼把草(*Bidens tripartita*)和苍耳(*Xanthium sibiricum*)为代表的一年生菊科植物,其在库区消落带大量广泛分布,且生长速度快,生物量积累大^[7-8]。然而在生长季结束后,这些一年生草本植物的地上部分最终将转化为较易分解的枯落物^[9]。与此同时,在库区消落带涨水期间,伴随江水携带的大量泥沙会将这些草本枯落物直接掩埋,常年泥沙沉积掩埋平均厚度可达 10 cm 左右^[10-12]。泥沙的掩埋极有可能会影响一年生草本枯落物的分解和 C、N、P 等营养物质的释放速率,进而改变水体和底泥的营养状态,进一步影响库区水体环境。

有研究表明,沉积物或泥沙掩埋对河岸带、湿地及沼泽枯落物的分解有抑制作用^[13-15]。Herbst^[16]认为,相比位于泥沙表面的枯落物,被掩埋的枯落物具有更高的物理稳定性,且包埋降低了枯落物周围环境中氧气浓度,抑制微生物的活力,从而减缓了枯落物分解;也有研究表明沉积物或泥沙掩埋对枯落物分解有促进作用^[17-18],原因可能是,适宜的沉积温度和水分有利于微生物的定殖和活动。另外,有极少数研究表明泥沙掩埋对枯落物的分解并无明显影响^[19]。由于枯落物分解与土壤环境关系复杂,对于三峡消落带特定水文环境条件下的泥沙掩埋是否会影响枯落物的分解还没有明确定论。目前有关三峡消落带一年生草本枯落物的分解研究主要集中于水淹处理对其分解的影响^[20-22],而关于消落带泥沙掩埋对一年生草本枯落物分解的影响相关研究极少。因此,本研究拟通过分解袋法,探究三峡库区消落带泥沙埋深对 4 种一年生草本枯落物分解的影响,并提出以下科学问题:在不同泥沙埋深条件下,随着泥沙掩埋深度的增加,4 种一年生草本枯落物的分解速率是否增加?在不同泥沙埋深下,4 种一年生草本枯落物的养分含量如何变化?本研究可为更好地管理和保护三峡库区消落带植被及其生态环境提供科学依据和理论参考。

1 材料与方法

1.1 取样地概况

试验材料采自于三峡库区腹心地带重庆市忠县石宝镇消落带(北纬 30°36′,东经 108°06′)。该区域植被覆盖以草本为主。该地属于亚热带东南季风区山地气候,气候温和,日照充足,雨量充沛,≥10℃ 年积温 5787℃,年平均气温 18.2℃,日照时数 1327.5 h,日照率 29%,太阳辐射能 3.5×10⁵ J/cm²,年降雨量 1200 mm,多集中在 6—8 月,相对湿度 80%^[23]。

1.2 试验材料

2018 年 9 月,于重庆忠县石宝镇的汝溪河流域消落带采集马唐、狼把草、苍耳和稗的地上部分,将其冷冻保存并立刻带回实验室,剪成 8 cm 大小的小段^[24](采用剪除法保持茎叶比例为 1:1),于 105℃ 杀青 30 min,在 60℃ 烘干至恒重备用。4 种一年生草本枯落物初始元素含量如表 1 所示。

表 1 马唐、稗、狼把草、苍耳枯落物元素含量及其比值初始值

Table 1 Baseline data of litter initial nutrient contents and their ratio of *D. sanguinalis*, *E. crusgali*, *B. tripartita*, and *X. sibiricum*

物种 Species	元素含量及其比值 Element contents and ratio						
	C/(g/kg)	N/(g/kg)	P/(g/kg)	K/(g/kg)	C/N	C/P	N/P
马唐 <i>D. sanguinalis</i>	402.83±0.42	11.97±0.25	2.14±0.02	19.22±0.58	33.67±0.68	128.11±0.97	3.81±0.09
稗 <i>E. crusgali</i>	384.17±2.16	12.20±0.53	3.56±0.21	16.73±1.05	31.53±1.51	108.24±6.77	3.43±0.08
狼把草 <i>B. tripartita</i>	428.70±0.87	12.07±0.35	3.87±0.14	14.50±1.06	35.55±0.97	110.91±3.97	3.12±0.04
苍耳 <i>X. sibiricum</i>	395.57±1.63	16.43±0.29	4.16±0.27	19.71±0.54	24.08±0.49	95.44±5.96	3.96±0.21

表中数据为平均值±标准误

同时,在位于重庆的三峡库区消落带采集泥沙土,其粒径组成为黏粒、粉粒(占较大比例)和砂粒^[25-26]。将泥沙土带回实验室经自然风干后,去除杂质和根系备用。供试土壤性质如表 2 所示。

表 2 土壤性质初始值

Table 2 Baseline data of soil property

TC/(g/kg)	TN/(g/kg)	TP/(g/kg)	TK/(g/kg)	T/℃	ORP/mv	pH
13.47±0.25	0.60±0.01	0.62±0.02	17.52±0.61	16.00±0.56	272.00±20.52	7.87±0.06

TC: 土壤全碳 Total carbon; TN: 土壤全氮 Total nitrogen; TP: 土壤全磷 Total phosphorus; TK: 土壤全钾 Total potassium; T: 土壤表面温度 Soil temperature; ORP: 土壤氧化还原电位 Oxidation-reduction potential

1.3 试验设计

将烘干至恒重的马唐、狼把草、苍耳和稗枯落物装入规格为 8 cm×8 cm、孔径为 0.5 mm×0.5 mm 的分解袋中,每个分解袋装入样品 3.0 g 备用。

选择长宽高分别为 66 cm×45 cm×35 cm 的分解箱(顶部开敞)为实验容器,将消落带试验用土混匀后放入容器中,使容器内的土壤厚度达到 15 cm,并将分解袋置于泥沙土表面(代表埋深 0 cm)和埋深 5、10 cm 处。试验设计为:36 个分解箱=4 个物种(马唐、狼把草、苍耳和稗枯落物)×3 次取样时间(30、90、180 d)×3 个重复,每个分解箱包括 3 个掩埋深度(0、5、10 cm),同时,在实验开始时(0 d)选取了 3 个土壤样本和 12 个植物样本(每种物种各 3 个)测定初始值,共制备分解袋 120 个(每种物种各 30 个)。实验开始后,所有分解箱保持土壤表面淹水 20 cm。

试验于 2018 年 10 月开始,所有处理均在西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室生态学研究基地(海拔 249 m,透明顶棚,四周开敞)进行。根据三峡库区消落带冬季水淹节律,在分解袋放置后的第 30、90、180 天从各处理组取回样品。将分解袋带回实验室后,小心移除分解袋表面的杂质,用自来水缓慢冲洗净泥土等杂质后再用超纯水冲洗 3 遍,洗净的枯落物装进做好标记的信封中,放入 60℃ 烘箱烘干至恒重,称量干重,并计算枯落物的干质量损失率。之后用球磨机研磨,过 0.25 mm 筛,用于养分元素含量的测定。

1.4 指标测定

采用元素分析仪(CHNS-O-Vario EL cube; Heraeus Elementar, Hanau, Germany)测定 C、N 元素含量;P、K 元素含量先采用微波消解仪(SpeedWave MWS-4)消解,再利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Thermo Fisher Scientific iCAP 6300)测定;温度使用温度计测定;pH 值使用酸度计法测定;氧化还原电位使用氧化还原电位计(oxidation-reduction potential, ORP)测定。

1.5 数据分析

根据干质量损失率公式计算如下:

$$\text{干质量损失率} = (W_0 - W_t) / W_0 \times 100\%$$

式中, W_0 为样品初始干重(g), W_t 为分解 t 时间后样品的干重(g)。

根据 Olson^[27] 指数衰减模型 $W_t/W_0 = ae^{-kt}$ 拟合分解模型, 得到分解速率常数 k (/d), 并由此计算枯落物分解 95% 所需的时间。

数据均采用 SPSS(IBM, Chicago, USA) 和 Microsoft Excel 进行分析。采用重复度量方差分析(Repeated measure ANOVA)分析物种、掩埋深度和时间及其交互作用对干物质损失率和营养元素含量的影响; 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)揭示同一采样时间不同泥沙掩埋处理对 4 种一年生草本枯落物干质量损失率及营养元素含量的影响、同一处理在不同时间下 4 种一年生草本枯落物的干质量损失率及营养元素含量的差异以及同一物种在不同泥沙掩埋处理下的 C/N 和 C/P 比值差异, 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 Origin 9.0 作图。

2 结果

2.1 分解期间不同埋深土壤温度、pH 值和氧化还原电位的变化

由表 3 可以看出, 在枯落物分解期间, 土壤温度在不同掩埋深度处理下无显著差异; 土壤 pH 值和氧化还原电位表现为 0 cm 显著高于 5、10 cm 埋深处理组($P<0.05$), 而 5、10 cm 埋深处理组之间无显著差异($P>0.05$)。

表 3 不同泥沙掩埋处理分解过程中的土壤环境变量

Table 3 Soil environmental variables in different soil burial treatments during decomposition

深度 Depth/cm	温度 Temperature/°C	pH	氧化还原电位 Oxidation-reduction potential/mv
0	13.49±5.70a	8.48±0.37a	426.89±28.62a
5	14.20±6.27a	7.08±0.80b	8.78±0.88b
10	14.10±6.04a	7.25±0.70b	8.78±1.12b

不同小写字母表示不同泥沙掩埋处理组之间差异显著($P<0.05$)

2.2 枯落物的分解速率动态变化

重复度量方差分析结果(表 4)表明, 不同泥沙埋深处理、采样时间和物种及其交互作用对枯落物的干物质损失率均产生显著的影响。由图 1 可以看出, 随着分解时间的延长, 4 种一年生草本枯落物的干物质损失率逐渐增加。在 180 d 的实验期间, 不同泥沙埋深下 4 种一年生草本枯落物干质量损失率的增加速率均表现为先快后慢。分解至第 30 天时, 干质量损失最为明显, 4 种一年生草本枯落物干质量损失率达到 30%—60%

表 4 马唐、狼把草、苍耳、稗枯落物干质量损失率及元素含量重复度量方差分析结果

Table 4 Results of repeated measure ANOVA for mass loss rate and element content of *D. sanguinalis*, *E. crusgali*, *B. tripartita*, and *X. sibiricum* litter

变异来源 Source of variation	F				
	MR	C	N	P	K
物种 Species	321.557 ***	105.400 ***	32.983 ***	19.059 ***	4.783 **
掩埋深度 Buried depth	463.872 ***	245.736 ***	45.468 ***	36.917 ***	5.431 **
时间 Time	4783.661 ***	23.391 ***	33.905 ***	449.243 ***	302.599 ***
物种×掩埋深度 Species×Buried depth	20.482 ***	3.773 **	9.369 ***	9.156 ***	0.738
物种×时间 Species×Time	30.238 ***	4.002 ***	5.277 ***	4.909 ***	1.902
掩埋深度×时间 Buried depth×Time	20.935 ***	9.516 ***	4.479 **	0.532	0.956
物种×掩埋深度×时间 Species×Buried depth×Time	1.928 *	3.483 ***	2.625 **	2.150 *	0.822

MR: 干质量损失率 dry mass loss rate; C: 全碳 total carbon; N: 全氮 total nitrogen; P: 全磷 total phosphorus; K: 全钾 total potassium。*: $P<0.05$;

** : $P<0.01$; *** : $P<0.001$

之间,其中苍耳在 30 d 期间的干质量损失率最高。分解第 30—90 天期间,4 种一年生草本枯落物干质量损失率仍继续增加,但增加速率与前 30 d 相比均有所降低。分解至第 90—180 天期间,不同泥沙埋深下狼把草、苍耳和稗枯落物干质量损失率的增加速率进一步降低,马唐枯落物干质量损失率的增加速率与 30—90 d 基本保持一致。另外,在不同埋深下 4 种一年生草本枯落物分解均表现为 0 cm 快于 5、10 cm。

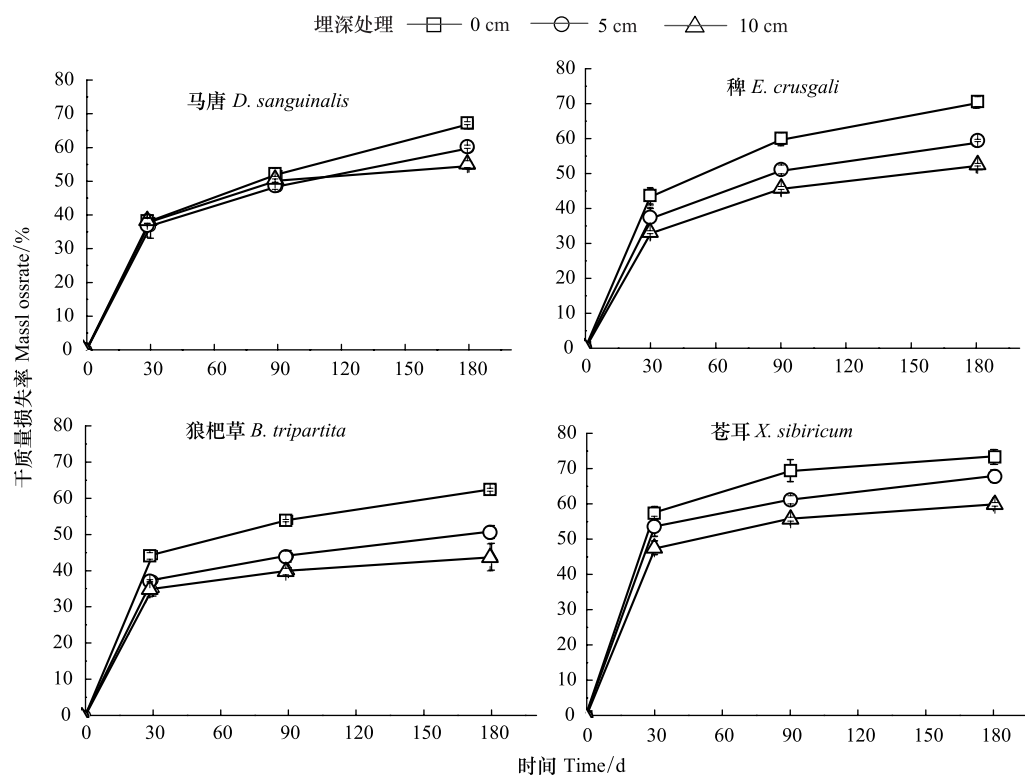


图 1 不同泥沙埋深处理下马唐、稗、狼把草、苍耳的枯落物干质量损失率的变化

Fig.1 Change of mass loss rate of *D. sanguinalis*, *E. crusgali*, *B. tripartita*, and *X. sibiricum* litter under different soil buried depth treatments

根据 Olson 指数衰减模型,发现泥沙掩埋下 4 种一年生草本枯落物的分解速率均降低(表 5)。苍耳在 5、10 cm 泥沙掩埋下的分解速率相同,而马唐、狼把草和稗枯落物的分解速率随着掩埋深度增加而降低。相同掩埋深度下,马唐和稗的分解速率最大,其分解 95%所需的时间也最短。

2.3 枯落物的营养元素含量动态变化

由表 4 可知,不同泥沙埋深处理、采样时间和物种及三者的交互作用均对枯落物元素含量产生极显著的影响(泥沙掩埋深度和采样时间的交互作用对 P 的影响以及各交互作用对 K 的影响除外)。从图 2 可以看出,在 180 d 实验期内,马唐和稗枯落物在 0 cm 埋深处理下,C 含量呈现先升高后降低的动态趋势,狼把草枯落物 C 含量呈降低趋势,而苍耳枯落物 C 含量未出现显著变化;5 cm 和 10 cm 埋深处理下,马唐、稗、狼把草和苍耳的 C 含量均呈现升高的趋势。分解至 180 d 时,4 种一年生草本枯落物的 C 含量均表现为 0 cm 埋深显著低于 5、10 cm ($P < 0.05$)。

4 种一年生草本枯落物在 180 d 实验期内(图 3),0 cm 埋深处理下,N 含量均无显著差异;5、10 cm 埋深处理下,马唐和稗枯落物的 N 含量均呈升高趋势(10 cm 埋深下稗的 N 含量并未达到显著差异),而狼把草和苍耳枯落物 N 含量无显著差异(除苍耳在 5 cm 埋深下 N 含量呈下降趋势)。整个分解期间,4 种一年生枯落物的 N 含量均表现为 0 cm 显著低于 5、10 cm 埋深处理组 ($P < 0.05$)。

表 5 不同泥沙埋深处理下马唐、稗、狼把草、苍耳干物质残留率(y)与分解天数(t)的指数方程及其相应参数

Table 5 Equations and parameters of natural logarithm (y) of mass remaining regressed on decomposition days (t) of *D. sanguinalis*, *E. crusgali*, *B. tripartita*, and *X. sibiricum* under different soil burial treatments

物种 Species	埋深度 Depth/cm	回归方程 Regression models	K/d	R^2	P	$t_{0.95}/d$
马唐 <i>D. sanguinalis</i>	0	$y = 70.236e^{-0.004t}$	0.004	0.995	<0.001	748.93
	5	$y = 68.839e^{-0.003t}$	0.003	0.975	<0.001	998.57
	10	$y = 63.468e^{-0.002t}$	0.002	0.897	<0.001	1497.87
稗 <i>E. crusgali</i>	0	$y = 62.153e^{-0.004t}$	0.004	0.961	<0.001	748.93
	5	$y = 66.365e^{-0.003t}$	0.003	0.941	<0.001	998.57
	10	$y = 69.605e^{-0.002t}$	0.002	0.938	<0.001	1497.87
狼把草 <i>B. tripartita</i>	0	$y = 59.512e^{-0.003t}$	0.003	0.987	<0.001	998.57
	5	$y = 65.333e^{-0.002t}$	0.002	0.947	<0.001	1497.87
	10	$y = 66.289e^{-0.001t}$	0.001	0.717	0.004	2995.73
苍耳 <i>X. sibiricum</i>	0	$y = 43.847e^{-0.003t}$	0.003	0.793	<0.001	998.57
	5	$y = 49.077e^{-0.002t}$	0.002	0.918	<0.001	1497.87
	10	$y = 53.815e^{-0.002t}$	0.002	0.905	<0.001	1497.87

K : 分解速率常数 Decomposition rate constant; $t_{0.95}$: 分解 95% 干物质所需要的时间 Time of 95% decomposition

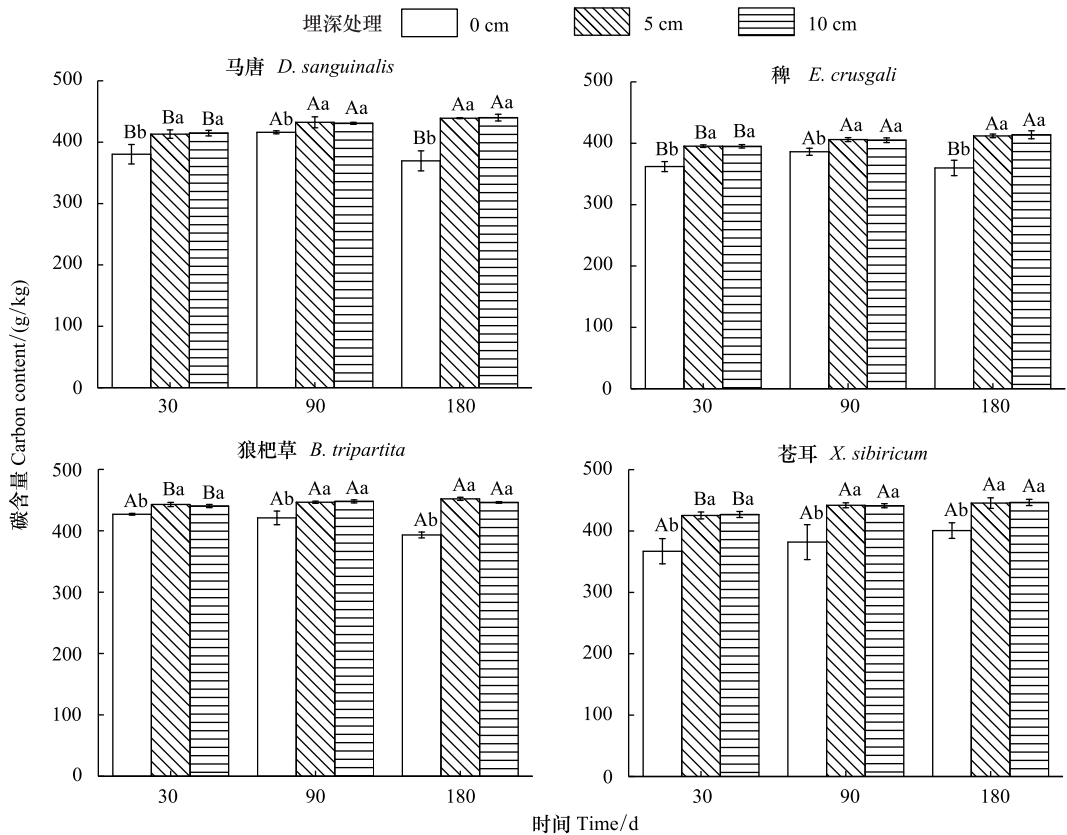


图 2 不同泥沙埋深处理下马唐、稗、狼把草、苍耳的枯落物的碳元素含量动态变化

Fig.2 Dynamic of carbon content of *D. sanguinalis*, *E. crusgali*, *B. tripartita*, and *X. sibiricum* litter under different soil buried depth treatments

不同小写字母表示同一时间不同处理之间差异显著,不同大写字母表示同一处理在不同时间之间差异显著 ($P<0.05$)

在 180 d 实验期内 (图 4), 0 cm 埋深处理下, 马唐和稗枯落物的 P 含量随分解的时间增加而增加, 狼把草

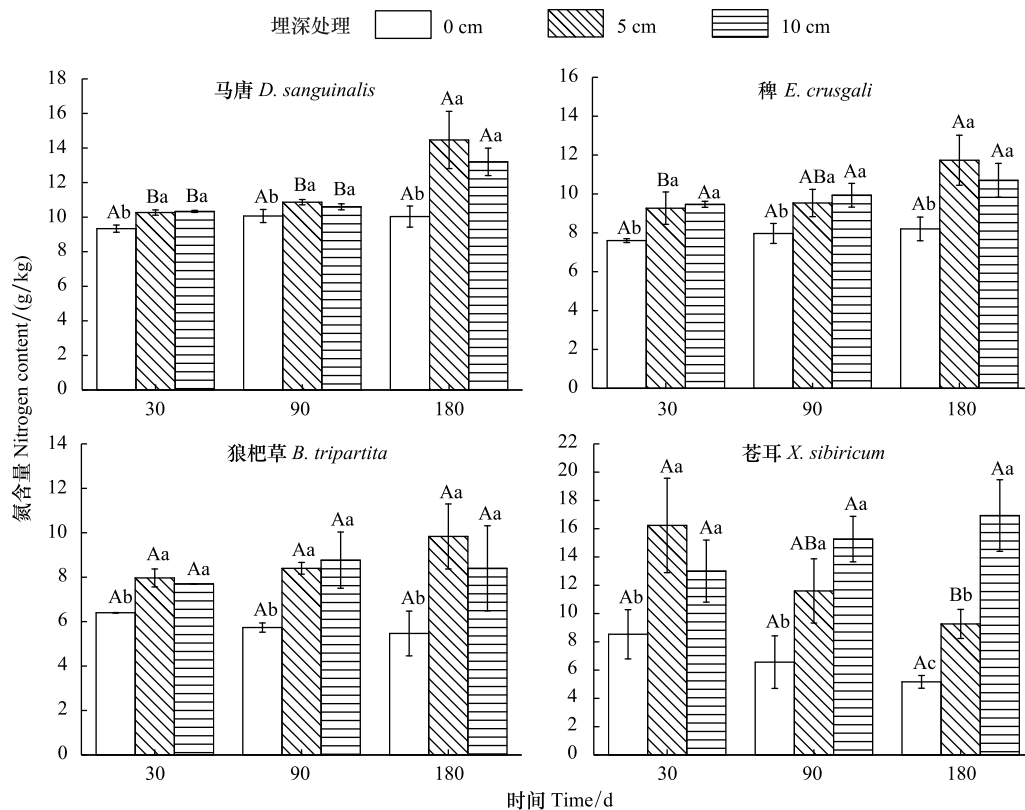


图3 不同泥沙埋深处理下马唐、稗、狼把草、苍耳的枯落物的氮元素含量动态变化

Fig.3 Dynamic of nitrogen content of *D. sanguinalis*, *E. crusgali*, *B. tripartita*, and *X. sibiricum* litter under different soil buried depth treatments

和苍耳枯落物 P 含量却保持不变;5、10 cm 埋深处理下,马唐和稗枯落物的 P 含量呈升高的趋势,在 5 cm 埋深下狼把草 P 含量无显著变化,而苍耳呈下降趋势;在 10 cm 埋深下狼把草 P 含量呈升高趋势,苍耳无显著变化。在分解至第 180 天,除马唐和稗枯落物在不同埋深处理下 P 含量无显著差异外 ($P>0.05$),其他枯落物 P 含量在 0 cm 埋深显著低于 5、10 cm 埋深处理组 ($P<0.05$)。

在 180 d 分解期间(图 5),0 cm 埋深处理下,马唐和稗枯落物 K 含量呈现先降低后升高的趋势,狼把草枯落物呈升高的趋势,而苍耳枯落物未出现显著变化;5、10 cm 埋深处理下,4 种一年生草本枯落物 K 含量呈降低趋势(10 cm 埋深下稗和 5 cm 埋深下苍耳的 K 含量并未达到显著差异)。整个分解期间,4 种一年生草本枯落物 K 含量却表现为 0 cm 埋深显著高于 5、10 cm ($P<0.05$)。

2.4 不同泥沙掩埋深度下 4 种一年生草本枯落物的 C/N、C/P 比值变化

由图 6 可知,在整个分解期间,马唐及稗枯落物的 C/N 和 C/P 比值在不同泥沙埋深处理下无显著差异,狼把草和苍耳枯落物的 C/N 和 C/P 比值在均表现为 0 cm 埋深处理显著高于 5 cm 和 10 cm ($P<0.05$),而苍耳枯落物的 C/P 比值随埋深深度增加而显著降低。

3 讨论

植物在水环境中的分解一般呈衰减的变化规律^[28-29],通常可分为枯落物快速溶解和微生物及胞外酶作用下的缓慢分解 2 个阶段^[30]。分解过程包括:可溶性物质的淋溶,此阶段为枯落物快速分解期,主要是植物体内易溶有机颗粒和无机盐类快速淋溶过程^[31];以及微生物与酶作用对难溶性物质降解,此阶段为分解后期,分解速率较慢^[19,32]。本研究中 4 种一年生草本枯落物的分解呈现出先快后慢的特点(图 1),前 30 d 的干

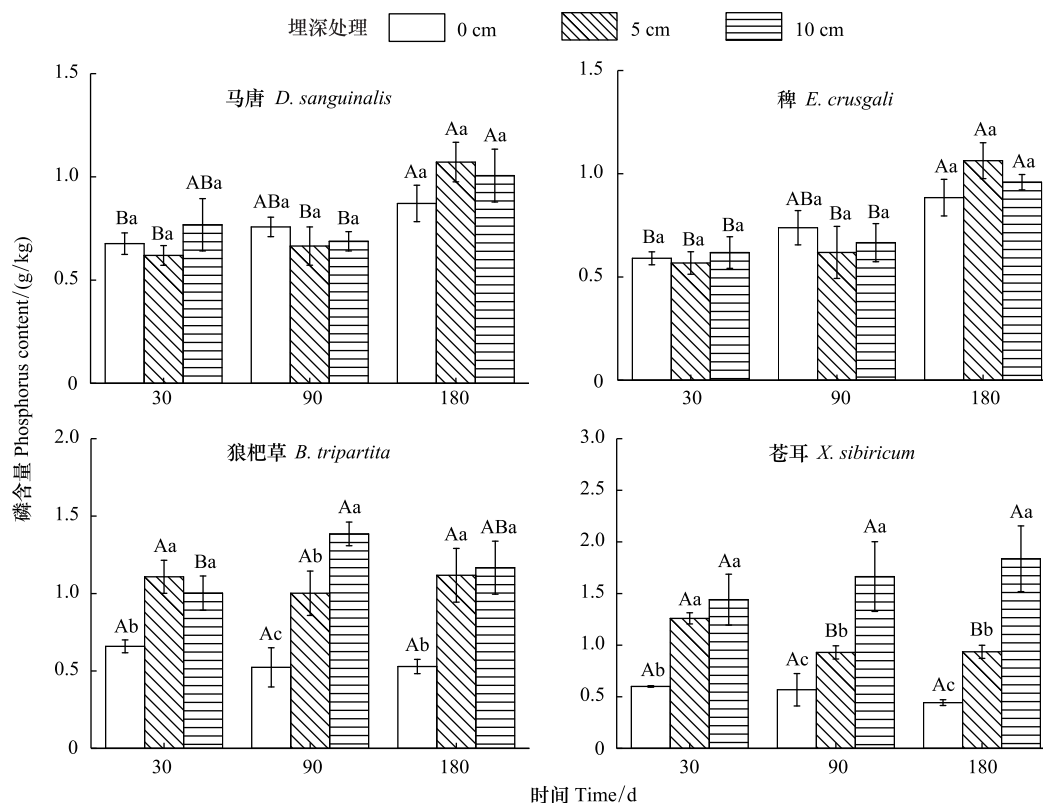


图4 不同泥沙埋深处理下马唐、稗、狼把草、苍耳的枯落物的磷元素含量动态变化

Fig.4 Dynamic of phosphorus content of *D. sanguinalis*, *E. crusgali*, *B. tripartita*, and *X. sibiricum* litter under different soil buried depth treatments

物质损失率迅速增加,这主要是由于枯落物中可溶性物质快速淋溶^[33]所致。与此同时,试验前期处于秋季,环境温度较后期高,能增加与分解活动相关的微生物活性^[34],加速微生物对枯落物的分解,从而减少干物质残余量。随着分解时间延长,枯落物可溶解的成分逐渐减少,难溶性物质(如酚类、木质素和纤维素等)的比例增加,而微生物对难溶性物质的降解过程缓慢^[35],因此干物质损失也逐渐减缓。

非环境因素及环境因素共同决定着枯落物的分解进程^[36]。有研究表明分解期间植物的 C/N、C/P 比能解释不同掩埋深度下分解速率的差异,其反映了枯落物中碳水化合物和木质素与蛋白质的比例,分解期间 C/N、C/P 比越高会导致分解速率越慢^[37-38]。本研究发现狼把草和苍耳在分解期间 C/N 和 C/P 比值 0 cm 埋深高于 5 cm 和 10 cm,而马唐和稗在各泥沙埋深下则无显著差异,然而,4 种一年生草本枯落物均表现为在 0 cm 埋深处理中的分解速率高于泥沙埋深 5、10 cm 处理组,表明不同泥沙掩埋深度微环境对枯落物分解的影响更大,进而导致分解速率的差异。相关研究表明沉积物掩埋通过一系列直接和间接机制显著抑制了枯落物的分解^[39],如压实碎屑,减少碎屑与周围的气体交换,抑制微生物的活性等。Cornut 等^[15]研究发现,在水淹条件下枯落物放置于泥沙表面分解速率大于泥沙掩埋下的分解速率;曹丹丹等^[40]研究了不同埋深下水生植物枯落物的分解,发现 0 cm 埋深下分解最快。本研究与其研究结果一致,原因可能是泥沙掩埋使枯落物受到挤压,具有了更高的物理稳定性,减缓有机物的分解^[41]。另外,随着掩埋深度的增加,枯落物周围环境的 pH 值和氧化还原电位显著降低(表 3),减少了枯落物与周围气体交换,降低了环境中的氧气浓度,进而抑制了微生物的活性,减缓了枯落物的分解^[14,42]。还有可能是由于 O₂ 的缺乏,酚氧化酶等需要氧气的酶活性较低^[43],从而抑制枯落物的分解。在相同掩埋深度下,马唐和稗的分解速率最大,其分解 95% 所需的时间也最短。原因可能是马唐和稗的初始 C/N、C/P 比值较狼把草和苍耳高,其枯落物表面微生物繁殖快且代谢活性强,使得分解速率也随之加快^[44];还与植物柔软度及形态有关,稗和马唐都属于禾本科,叶片经脉柔软,呈纤细水平状,

具有茎秆柔软、易分解的特性;而苍耳和狼把草具有粗状锯齿叶,叶面积大,茎秆硬实,难分解。

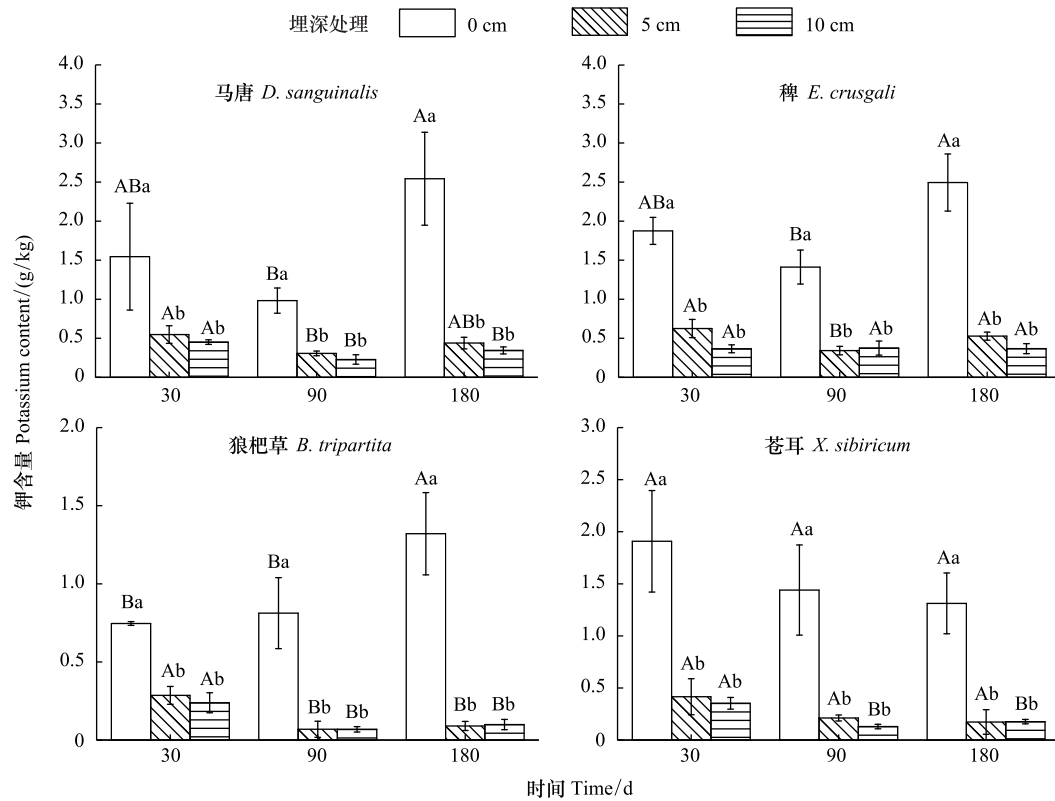


图5 不同泥沙埋深处理下马唐、稗、狼把草、苍耳的枯落物的钾元素含量动态变化

Fig.5 Dynamic of potassium content of *D. sanguinalis*, *E. crusgali*, *B. tripartita*, and *X. sibiricum* litter under different soil buried depth treatments

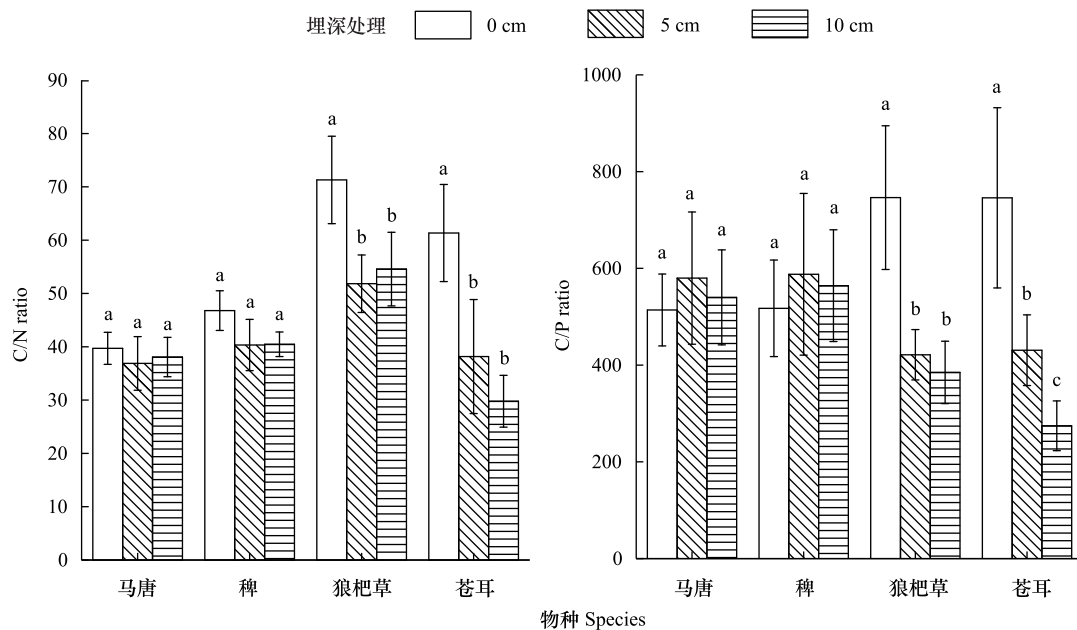


图6 在分解期间不同泥沙埋深处理下马唐、稗、狼把草、苍耳枯落物的 C/N 和 C/P 比值变化

Fig.6 Changes of C/N and C/P ratio of *D. sanguinalis*, *E. crusgali*, *B. tripartita*, and *X. sibiricum* litter under different soil buried depth treatments during decomposition

不同小写字母表示同一物种不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)

枯落物的养分释放规律由植物种类、分解阶段以及环境因素共同决定,同时也取决于自身的养分性质^[45]。4种一年生草本枯落物在整个分解期间C含量变化不大,趋势呈现先增加后不变的趋势,表明C元素释放速率与枯落物干质量损失率一致;另外,由于分解后期为难溶解物质,植物体内的C主要以纤维素、木质素等结构性元素的形态存在^[46],因此分解后期C含量趋于稳定。有研究表明,C变化可能更容易受到沉积物水分和微生物活动的影响^[47],本研究中C含量在不同泥沙埋深下均表现为0 cm埋深显著低于5、10 cm埋深,原因是表层枯落物与泥沙掩埋下的枯落物相比较而言,直接处于水环境中的枯落物C元素的释放得到了加强。

相关研究表明,微生物对枯落物的分解不仅需要从枯落物本身获取相应元素,还可能需要从土壤或者大气中获取相对缺乏的元素^[48]。整个实验期间,0 cm埋深下4种一年生草本枯落物的N元素均为释放状态,在5 cm和10 cm埋深处理下N元素处于富集状态,由于0 cm埋深时枯落物直接位于沉积泥沙表面,泥沙颗粒渗入分解袋比泥沙掩埋的少,从而增加枯落物N元素被水体中微生物固定的接触面;另外,N会释放到水中或作为其他形式(如气体)释放^[49],降低位于表面枯落物N含量。Gessner^[50]发现,掩埋芦苇叶片、茎和鞘中的N含量呈上升趋势。Sun和Liu^[36]还表明,沉积物掩埋增加了菖蒲分解过程中N的含量。曹磊等^[51]研究表明,黄河口沼泽的芦苇分解受到了N的限制,而芦苇的N含量增加。一般认为,掩埋下植物枯落物N含量增加,可能是由于植物枯落物中的微生物从沉积物分解环境中对N的固定作用所致,这可能也是N含量在5 cm和10 cm埋深处理高于0 cm的原因之一。

本实验中,P在整个分解期间为释放状态,与以往的研究结果一致^[52-53]。由于水分条件促进了磷酸根或磷酸化合物等生物活性物质为主要形式的P的淋溶损失^[54],此外,存在于植物细胞液中的无机磷释放以及核酸和ATP分子中的磷代谢较快^[55],可能也是导致是试验中P处于释放状态的原因之一。本研究中P含量表现为0 cm埋深显著低于泥沙埋深5 cm和10 cm处理组,原因是直接处于水环境的表层枯落物,能够加速可溶性P物质淋溶,同时水环境有利于厌氧微生物的大量繁殖与活动^[22],加速了对枯落物中P元素的获取。有研究表明3种掩埋处理的P动态受C/N、C/P比值影响^[18],C/N、C/P比是表征分解速率和微生物活性的有效指标^[47]。然而,马唐和稗的P含量在不同掩埋处理组保持稳定,原因是马唐和稗枯落物的C/N、C/P比无显著差异,在不同掩埋深度下P元素分解相关微生物活性差异较小,造成枯落物的P含量在不同掩埋处理组保持稳定。

同样地,不同泥沙埋深下4种一年生草本枯落物K元素表现为释放状态。由于K在植物体内主要以无机盐形式存在^[56],淹水后将很快以淋溶方式进入水体;另外,K元素易溶于水,在生态系统中的移动性大,因此容易淋溶释放^[46]。本实验中枯落物的K元素含量在泥沙掩埋0 cm组高于5 cm和10 cm处理组,其原因可能是位于表层枯落物的微生物活性更高,微生物作用可能是导致K富集的主要机制之一^[57]。除此之外,沉积物对金属元素的亲和力较强^[58],沉积泥沙通过对K的吸附和积累,可能促进了枯落物K的释放,所以导致掩埋下的枯落物K含量更低。在整个实验期间,5 cm和10 cm泥沙埋深处理中,K含量均无显著差异,究其原因可能是泥沙掩埋下温度、pH值和氧化还原电位无显著差异(表3),泥沙掩埋下枯落物所处环境差异较小,可能导致泥沙掩埋下微生物的活性基本一致^[59],使得在泥沙掩埋下K含量稳定。

4 结论

综上所述,在180 d的分解试验过程中,4种一年生草本枯落物的分解和营养元素释放均呈现先快后慢的特点。泥沙掩埋处理显著降低枯落物的干质量损失率,但对C元素的释放率影响不大,对N、P元素的释放具有一定的减缓作用,对K元素的释放有一定促进作用;另外,在5 cm和10 cm泥沙埋深处理下元素含量无显著差异,说明掩埋深度对枯落物元素释放影响较小。研究表明消落带大量泥沙淤积会对枯落物的分解和C、N、P元素释放产生抑制作用,从而对三峡库区水体富营养化、营养物质悬浮的贡献率下降,一定程度上,对库区水质保护有正面效应。此外,由于三峡库区消落带泥沙淤积存在不同类型、强度的扰动因素,因此下一步有

必要对多种影响因素进行组合研究,以便于更深入了解泥沙掩埋对三峡消落带一年生草本枯落物分解的影响。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] Yuan X Z, Zhang Y W, Liu H, Xiong S, Li B, Deng W. The littoral zone in the Three Gorges Reservoir, China: challenges and opportunities. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(10): 7092-7102.
- [3] 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.
- [4] 张爱英,熊高明,樊大勇,谢宗强.三峡水库运行对淹没区及消落带植物多样性的影响. *生态学杂志*, 2016, 35(9): 2505-2518.
- [5] 杨朝东,张霞,向家云.三峡库区消落带植物群落及分布特点的调查. *安徽农业科学*, 2008, 36(31): 13795-13796.
- [6] 付娟,李晓玲,戴泽龙,张海峰,罗玉红,胥焘,黄应平.三峡库区香溪河消落带植物群落构成及物种多样性. *武汉大学学报:理学版*, 2015, 61(3): 285-290.
- [7] 杜立刚,方芳,郭劲松,高红涛,王春明,李哲.三峡库区消落带草本植物碳氮磷释放及影响因素. *环境科学研究*, 2014, 27(9): 1024-1031.
- [8] 王强,袁兴中,刘红,张跃伟,陈忠礼,李波.三峡水库初期蓄水对消落带植被及物种多样性的影响. *自然资源学报*, 2011, 26(10): 1680-1693.
- [9] 张志永,彭建华,万成炎,郑志伟,仇登高.三峡库区澎溪河消落区草本植物的分布与分解. *草业学报*, 2010, 19(2): 146-152.
- [10] Bao Y H, Tang Q, He X B, Hu Y H, Zhang X B. Soil erosion in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Hydrology Research*, 2015, 46(2): 212-221.
- [11] 王永艳,文安邦,史忠林,严冬春,陈佳村.三峡库区干支流消落带泥沙沉积特征分析. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 123-126.
- [12] Tang Q, Bao Y H, He X B, Zhou H D, Cao Z J, Gao P, Zhong R H, Hu Y H, Zhang X B. Sedimentation and associated trace metal enrichment in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment*, 2014, 479-480(1): 258-266.
- [13] Vargo S M, Neely R K, Kirkwood S M. Emergent plant decomposition and sedimentation: response to sediments varying in texture, phosphorus content and frequency of deposition. *Environmental and Experimental Botany*, 1998, 40(1): 43-58.
- [14] Danger M, Cornut J, Elger A, Chauvet E. Effects of burial on leaf litter quality, microbial conditioning and palatability to three shredder taxa. *Freshwater Biology*, 2012, 57(5): 1017-1030.
- [15] Cornut J, Elger A, Lambrigt D, Marmonier P, Chauvet E. Early stages of leaf decomposition are mediated by aquatic fungi in the hyporheic zone of woodland streams. *Freshwater Biology*, 2010, 55(12): 2541-2556.
- [16] Herbst G N. Effects of burial on food value and consumption of leaf detritus by aquatic invertebrates in a Lowland Forest Stream. *Oikos*, 1980, 35(3): 411-424.
- [17] Smith J J, Lake P S. The breakdown of buried and surface-placed leaf litter in an upland stream. *Hydrobiologia*, 1993, 271(3): 141-148.
- [18] Sun Z G, Mou X J, Zhang D Y, Sun W L, Hu X Y, Tian L P. Impacts of burial by sediment on decomposition and heavy metal concentrations of *Suaeda salsa* in intertidal zone of the Yellow River estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 116(1-2): 103-112.
- [19] Mayack T D, Thorp H J, Cothran M. Effects of burial and floodplain retention on stream processing of allochthonous litter. *Oikos*, 1989, 54(3): 378-388.
- [20] 刘娜.三峡库区消落带典型植物淹水后降解动态与养分释放特征研究[D].重庆:西南大学,2016.
- [21] 袁庆叶,谢宗强,杨林森,熊高明,李兆佳,樊大勇.水淹条件下三峡水库消落带常见草本植物的分解. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2229-2237.
- [22] Xiao L W, Zhu B, Kumwimba M N, Jiang S W. Plant soaking decomposition as well as nitrogen and phosphorous release in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir. *Science of the Total Environment*, 2017, 592(8): 527-534.
- [23] 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特征. *生态学报*, 2012, 32(06): 1723-1733.
- [24] 王建超,朱波,汪涛,易礼军.三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验. *环境科学*, 2012, 33(4): 1144-1151.
- [25] 王永艳,文安邦,史忠林,严冬春,朱波,唐家良.三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价. *环境科学*, 2016, 37(3): 935-941.
- [26] 唐强,贺秀斌,鲍玉海,钟荣华,阎丹丹,高进长.三峡水库干流典型消落带泥沙沉积过程. *科技导报*, 2014, 32(24): 73-77.
- [27] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 1963, 44(2): 322-331.
- [28] 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.
- [29] Weintraub M N, Schimel J P. Interactions between carbon and nitrogen mineralization and soil organic matter chemistry in Arctic Tundra soils. *Ecosystems*, 2003, 6(2): 129-143.
- [30] 武海涛,吕宪国,杨青,姜明,佟守正.三江平原典型湿地枯落物早期分解过程及影响因素. *生态学报*, 2007, 27(10): 4027-4035.
- [31] 张川.高山森林溪流凋落物分解中有机组分的变化特征[D].成都:四川农业大学,2016.
- [32] 严海元.缙云山马尾松林凋落物的微生物分解及养分释放特征研究[D].重庆:西南大学,2011.
- [33] 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.

- [34] Mamilov A S, Dilly O M. Microbial characteristics during the initial stages of litter decomposition in forest and adjacent cropland soil. *Ecological Engineering*, 2007, 31(3): 147-153.
- [35] Song Y Y, Song C C, Li Y C, Hou C C, Yang G S, Zhu X Y. Short-term effect of nitrogen addition on litter and soil properties in *Calamagrostis angustifolia* freshwater marshes of Northeast China. *Wetlands*, 2013, 33(3): 505-513.
- [36] Sun Z G, 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.
- [37] Chen H. Root decomposition in three coniferous forests: effects of substrate quality, temperature, and moisture [D]. Oregon State; Oregon State University, 1999.
- [38] Moretto A S, Distel R A. Decomposition of and nutrient dynamics in leaf litter and roots of *Poa ligularis* and *Stipa gyneriodes*. *Journal of Arid Environments*, 2003, 55(3): 503-514.
- [39] Nielsen T, Andersen F O. Phosphorus dynamics during decomposition of mangrove (*Rhizophora apiculata*) leaves in sediments. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2003, 293(1): 73-88.
- [40] 曹丹丹, 王东, 杨雪, 郭璇, 牛红玉. 泥沙埋深对苦草和微齿眼子菜及两物种混合分解的影响. *水生生物学报*, 2016, 40(2): 327-336.
- [41] Berg B. Nutrient release from litter and humus in coniferous forest soils—a mini review. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1986, 1(1-4): 359-369.
- [42] Laiho R, Laine J, Trettin C C, Finér L. Scots pine litter decomposition along drainage succession and soil nutrient gradients in peatland forests, and the effects of inter-annual weather variation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(7): 1095-1109.
- [43] Freeman C, Ostle N J, Fenner N, Kang H. A regulatory role for phenol oxidase during decomposition in peatlands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(10): 1663-1667.
- [44] 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(11): 79-90.
- [45] 赵鹏武, 宋彩玲, 苏日娜, 海龙, 周梅, 魏江生, 王树森. 森林生态系统凋落物研究综述. *内蒙古农业大学学报: 自然科学版*, 2009, 30(2): 292-299.
- [46] 李文朝, 陈开宁, 吴庆龙, 潘继征. 东太湖水生植物生物物质腐烂分解实验. *湖泊科学*, 2001, 13(4): 331-336.
- [47] Sun Z G, Mou X J. Effects of sediment burial disturbance on macro and microelement dynamics in decomposing litter of *Phragmites australis* in the coastal marsh of the Yellow River estuary, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(6): 5189-5202.
- [48] 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.
- [49] Zhang Q S, Zak J C. Effects of gap size on litter decomposition and microbial activity in a subtropical forest. *Ecology*, 1995, 76(7): 2196-2204.
- [50] Gessner M O. Breakdown and nutrient dynamics of submerged *Phragmites* shoots in the littoral zone of a temperate Hardwater Lake. *Aquatic Botany*, 2000, 66(1): 9-20.
- [51] 曹磊, 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段丽琴, 王启栋. 黄河三角洲典型潮汐湿地碳、氮、磷生物地球化学特征. *海洋科学*, 2015, 39(1): 84-92.
- [52] 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.
- [53] 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(11): 832-841.
- [54] 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.
- [55] Schreeg L A, Mack M C, Turner B L. Leaf litter inputs decrease phosphate sorption in a strongly weathered tropical soil over two time scales. *Biogeochemistry*, 2013, 113(1-3): 507-524.
- [56] Jacobson T K B, Bustamante M M D C, 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.
- [57] Laing G D, Ryckegem G V, Tack F M G, Verloo M G. Metal accumulation in intertidal litter through decomposing leaf blades, sheaths and stems of *Phragmites australis*. *Chemosphere*, 2006, 63(11): 1815-1823.
- [58] Håkan T W, Mark E, David H. Geochemical and physical characteristics of river and lake sediments at Naivasha, Kenya. *Hydrobiologia*, 2002, 488(1-3): 27-41.
- [59] 陈为峰, 史衍玺. 黄河三角洲新生湿地不同植被类型土壤的微生物分布特征. *草地学报*, 2010, 18(6): 859-864.