DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202103057

王陈里,崔婉哲,赵飘,等. 滇池湖滨带优势湿地挺水植物分解特征研究 [J]. 广西植物, 2022, 42(7): 1136-1149. WANG CL, CUI WZ, ZHAO P, et al. Decomposition characteristics of common wetland emergent plants in Dianchi lakeside [J]. Guihaia, 2022, 42(7): 1136-1149.



滇池湖滨带优势湿地挺水植物分解特征研究

王陈里1,崔婉哲1,赵 飘1,肖德荣1,王 行1.2.3*

 (1. 西南林业大学 湿地学院/国家高原湿地研究中心,昆明 650224;2. 浙江大学 环境与资源学院 环境科学研究所,杭州 310058;3. 中国科学院城市环境研究所,福建 厦门 361021)

摘 要:湿地挺水植物是维持湿地生态系统功能的重要载体,其分解过程是物质能量循环的必要环节。为 了更全面地了解湿地凋落物的分解特征,该研究选取九种滇池湖滨带优势湿地挺水植物,采集生长旺季、立 枯阶段、倒伏阶段、沉水阶段共4个阶段的叶枯落物样品,在3.5 a 的培养期内测定了叶枯落物分解速率及3 大类指标(16种理化指标),分析了分解速率和理化指标的动态变化及其相关性、物种种类与分解阶段对各 指标变异的贡献度。结果表明:(1)分解速率(k)范围为0.43 ~ 1.41 a⁻¹,其中茭草分解最快(k=1.41 a⁻¹), 再力花分解最慢(k=0.43 a⁻¹)。(2)物理性状中的比叶面积、穿刺力度、干物质量在培养期内分别呈"持续 上升""持续下降"和"先升后降"的变化趋势;养分元素指标主要呈现"释放-富集""富集-释放"和"净释 放"3 种变化模式;涉碳化合物指标中,木质素表现为"富集-释放""富集-释放-富集"和"富集"模式,纤维 素与半纤维素表现为"富集-释放"的变化规律。(3)叶枯落物分解速率与初始物理指标(比叶面积、穿刺力 度、干物质量)和初始涉碳化合物指标(纤维素、半纤维素)的相关性最高。(4)13种指标在培养期内的动 态变化由分解阶段主导,3种指标由物种种类主导。其中,比叶面积、穿刺力度、干物质量、碳、钾、钙、硫、铁 等在不同植物的分解过程中表现出相似的规律,可作为研究挺水植物枯落物分解的关键指示性指标。该研 究表明,不同植物的分解速率不同,物理和涉碳化合物指标是调控分解速率的主要因子;通过揭示不同湿地 挺水植物的分解规律,为进一步开展枯落物分解预测提供重要理论参考。

关键词:挺水植物,分解动态,湖滨带,枯落物,生境

中图分类号: Q945 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2022)07-1136-14

Decomposition characteristics of common wetland emergent plants in Dianchi lakeside

WANG Chenli¹, CUI Wanzhe¹, ZHAO Piao¹, XIAO Derong¹, WANG Hang^{1,2,3*}

(1. Wetlands College, Southwest Forestry University/National Plateau Wetlands Research Center, Kunming 650224, China; 2. College of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, Fujian, China)

Abstract: Wetland emergent plants are important carriers for maintaining the functions of wetland ecosystems, and the decomposition process is a necessary part of the material energy cycle. In order to fully understand the decomposition characteristics of wetland litter, we selected nine dominant wetland emergent plants in Dianchi lakeside and collected the

收稿日期: 2021-05-20

基金项目:国家自然科学基金(41877346) [Supported by National Natural Science Foundation of China (41877346)]。

第一作者:王陈里(1994-),硕士研究生,主要从事全球变化与湿地环境演变研究,(E-mail)517647379@qq.com。

通信作者: 王行,博士,副教授,主要从事全球变化与湿地环境演变研究,(E-mail)hwang17@163.com。

leaf litter samples in four stages from living to death, including vigorous growth season, standing dead stage, lodging stage, and submerged stage. We measured the leaf litter decomposition rate and sixteen physical and chemical indexes during the 3.5 a period. We analyzed the dynamic changes of decomposition rate and physical and chemical indicators, as well as their correlation, and we calculated the contribution of species and decomposition stages to the variation of each indicators. The results were as follows: (1) Decomposition rates (k value) ranged from 0.43 a^{-1} to 1.41 a^{-1} , among which Zizania latifolia decomposed the fastest $(k = 1.41 a^{-1})$, Thalia dealbata decomposed the slowest (k = 0.43)a⁻¹). (2) Specific leaf area, puncture strength and dry matter amount showed a trend of "continuous increase" "continuous decrease" and "first increase and then decrease", respectively. Nutrient element indexes mainly presented "release-enrichment"" enrichment-release" and "net release" modes. Among the key carbon-related indexes, lignin showed the trend in "enrichment-release" "enrichment-release-enrichment" and "enrichment", respectively. Cellulose and hemicellulose showed "accumulation-release" changes. (3) Leaf litter decomposition rate had the highest correlation with initial physical indexes (i.e., specific leaf area, puncture strength, amount of dry matter) and initial carbon-related indexes (i.e., cellulose, hemicellulose). (4) Dynamic changes of thirteen indexes during the incubation period were mainly dominated by the decomposition stage, and three indexes were dominated by species. Among them, specific leaf area, puncture strength, amount of dry matter, carbon, potassium, calcium, sulfur, iron and other indexes have consistency in the decomposition dynamics of different emergent plants. Therefore, it can be used as key indexes for emergent plant litter decomposition. This study indicates that the decomposition rates of different plants are different, and physical and carbon-related compound indicators are the main factors regulating the decomposition rate, the decomposition law of wetland emergent plants is revealed to provide crucial theoretical reference for further predicting litter decomposition of wetland emergent plants.

Key words: emergent plants, decomposition of dynamic, lakeside, litter, habitat

湿地挺水植物是湿地生态系统中的主要组成 部分,在净化水质、维持生态系统稳定等方面发挥 着重要作用(Moore et al., 2010)。湿地挺水植物 的分解过程是湿地生态系统物质循环和能量流动 的重要环节,它与森林或沙漠植被枯落物分解相 比具有显著不同的分解特征(Berg & Mcclaugherty, 1989)。挺水植物衰老后不直接与 土壤或水体接触,而是在大气界面保持一定时间 的立枯状态,随后因风蚀破碎或重物压倒进入倒 伏阶段,经过一段时间枯落物进入水体后进入沉 水阶段,表现出较为明显的阶段性分解特征(平云 梅,2018;展鹏飞等,2019)。

挺水植物枯落物不同阶段的分解特征受基质 质量、养分元素和不同生境及物种等因素影响表 现出明显差异。张新厚和宫超(2013)研究了挺水 植物的立枯分解,发现环境因子(温度、水分等)和 基质质量是影响其立枯分解过程的关键因素。魏 江明等(2016)发现,乌梁素海芦苇枯落物的分解 速率和营养元素含量变化受其自身质量和环境因 子共同影响,且环境因子(温度、溶解氧、pH值)与 枯落物分解速率及元素释放动态显著相关。在闽 江河口湿地枯落物立枯与倒伏阶段的分解动态研 究中,曾从盛等(2012)指出立枯分解是湿地植物 的重要分解阶段,在此阶段下的植物枯落物氮含 量略有下降,而倒伏阶段逐渐上升,同时分解过程 中磷含量的波动较大。叶枯落物分解在干旱生境 下,受微生境(林下、林窗)影响,林窗分解速率大 于林下,且基质质量与土壤湿度对分解过程起主 导作用(杨晶晶等,2019)。同时,叶片的化学属性 也对枯落物的分解发挥着重要作用,如阔叶物种 碳氮比小,初始氮含量高,相比于针叶物种,其枯 落物分解较快(王清奎等,2007)。同时,部分研究 表明,总养分含量(单个养分浓度之和)是影响凋 落率的一个重要因素(Zhang et al., 2008; Prescott, 2010)。综合上述研究发现:(1)目前针对挺水植 物分解过程中某一阶段的研究较丰富,而有关湿 地植物枯落物整体分解特征的研究相对匮乏,特 别是关于湿地挺水植物枯落物各分解阶段中不同 指标的变化规律缺少系统的探索:(2)鉴于分解生 境与叶片基质质量对湿地挺水植物枯落物分解的 不同影响,需要进一步对多物种枯落物分解中指 标变化的普适性规律进行深入研究,从而量化分 解生境与物种差异对叶枯落物分解特征的贡献度 大小。

本文在西南第一大湖泊滇池选取水葱 (Schoenoplectus tabernaemontani)、 茨 草 (Zizania latifolia)、再力花(Thalia dealbata)、花叶芦竹 (Arundo donax var. versicolor)、荷叶(Nelumbo nucifera)、芦苇(Phragmites australis)、芦竹(Arundo donax)、纸莎草(Cyperus papyrus)、芒草(Miscanthus sinensis)共9种常见湿地挺水植物作为研究对象。 结合挺水植物分解特征,将其分为3个分解阶段: 立枯阶段、倒伏阶段、沉水阶段。并采集生长旺季 期植物叶片作为分解阶段的对照。首先,测定了 枯落物的分解速率及不同分解阶段中的物理指 标、养分元素指标、涉碳化合物指标,共3大类、16 个指标:其次,分析了枯落物初始基质质量与分解 速率的相关性,旨在揭示挺水植物分解过程中初 始基质质量对分解过程的影响:最后,为探究不同 指标在物种及分解阶段中的变异程度,我们利用 Adonis 检验进一步分析了物种种类与分解阶段对 各指标变异的贡献度,并通过变异系数 R²来表示 各指标在不同物种及生境中的变异程度,进而筛 选出具有明显生境变化规律的指标。对筛选出的 指标,进行了多项式拟合,得到不同指标在分解过 程中的拟合模型,为进一步预测湿地挺水植物枯 落物分解随不同生境的动态变化规律提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

滇池位于昆明西南,是中国第六大淡水湖泊, 地理坐标为102°36′—102°47′E、24°40′—25°02′ N。滇池湖体呈南北向分布,湖面海拔高度1887.4 m,总面积为311.3 km²。研究区域为亚热带高原 季风气候,日照长霜期短,年均温为14.4 ℃,年均 降水量为1036.1 mm。经过前期调查可知,研究区 域优势挺水植物群落包括水葱、茭草、再力花、花 叶芦竹、荷叶、芦苇、芦竹、纸莎草、芒草9类。

1.2 试验设计

1.2.1 凋落物分解试验 于 2015 年 10 月植物生长 末期,在滇池湖滨带收集九种植物的地上部分,自 然风干一周后于 65 ℃烘箱内杀青并培养 48 h 至 恒量。取出后将植物样品分别放入不同分解袋 (孔径为 1 mm,规格为 10 cm×15 cm 的尼龙袋) 中,每种植物设置 6 个生物学重复,每个重复装取 4 袋(每袋精确放入 5.00 g 植物样品),共 216 袋 (9种植物×6个重复×4袋)。将滇池湖滨带挺水 植物作为参照母体,采用凋落物分解袋法,模拟其 分解过程(图1)。立枯阶段(分解第一年):2015 年12月,将分解袋通过 PVC 管悬于空中1.2 m 处;倒伏阶段(分解第二年):2016年12月,将分 解袋中放入乒乓球悬浮于水中;沉水阶段(分解第 三年):2017年12月,将分解袋掩埋在5 cm 深度 的底泥(原位水底沉积物)中。本实验主要用于测 定质量残留率从而计算分解速率。



图 1 不同界面中凋落物袋放置示意图 Fig. 1 Litter bags in different interfaces

1.2.2 植物不同分解阶段模拟试验 在昆明滇池 湿地生态系统定位研究站建立有 3 个原位研究单 元,每个研究单元为长 3 m、宽 2 m、深 0.5 m 的长 方形水池。2015 年 4 月在滇池挖取九种植物的克 隆单株,选取长势基本相似的植物为试验对象。 将植物分别移植到直径 35 cm、高 40 cm 的塑料盆 中进行培养,且塑料盆内加入 30 cm 厚的原位水底 沉积物。每种植物每个研究单元放置 6 盆,共计 162 盆(9 种植物×3 个单元×6 个重复)。各研究 单元引入原环境水体用以模拟其原生淹水环境, 最大程度还原9种植物生长及分解的原生环境。 式中:*M*, 植物培养期为3.5 a,在该培养期内,当年死亡的地 初始枯落物⁻⁻

植物培养期为3.5 a,在该培养期内,当年死亡的地 上部分叶枯落物陆续经过立枯、倒伏、沉水3个阶段。本实验主要用于理化指标测定。

1.3 测定项目与方法

本研究主要测定两类指标,一类为分解速率, 另一类为理化性质。针对分解速率,在测定凋落 物残留质量时,分阶段回收凋落物袋。当野外植 物处于生长旺季期时,每种植物回收6个凋落物 袋(6个生物学重复)测定初始质量,随着植物母 体进入立枯、倒伏、沉水阶段,依次回收相同数量 的凋落物袋并测定残留质量(每种植物共回收24 个凋落物袋),并通过各个阶段的残留质量计算分 解速率。

针对理化性质,于2018年10月底,从研究单 元中采集试验池内处于生长旺盛期阶段(2018年 鲜样)、立枯阶段(2017年死亡)、倒伏阶段(2016 年死亡)、沉水阶段(2015年死亡)的植物叶片。 在每一个研究单元内,随机选择2盆植被,共计6 个生物学重复。将样品装入 8 号聚乙烯自封袋 中,用以测定3大指标,包括物理指标(比叶面积、 穿刺力度、干物质量)、养分元素指标(碳、氮、磷、 钾、钙、镁、硫、铁、锰的含量)和涉碳化合物指标 (纤维素、半纤维素、木质素、灰分),共计216个样 品(9种植被×3个单元×2 盆×4个生长阶段)。在 测定3大指标时,将采集的样品除去杂质与表面 水分,扫描测定叶面积。取部分样品于65℃烘箱 中烘干 48 h 后,再次称重以测得植物干物质量,干 物质量与叶面积相比得到比叶面积。烘干后的样 品粉碎过筛用于分析测定总有机碳、全氮、全磷、 钾、钙、镁、硫等元素指标含量。剩余样品留取部 分进行烘干,用来测定纤维素、半纤维素、木质素、 灰分含量。其中,纤维素含量测定采用硫酸蒽酮 比色法,半纤维含量测定采用盐酸水解法,木质素 含量测定采用硫代硫酸钠滴定法(熊素敏等, 2005),灰分测定采用焚烧法。叶片初始成分见 表1。

1.4 数据处理

本文基于负指数衰减模型(Olson, 1963),来 表征枯落物的分解过程。Olson负指数模型是拟 合枯落物分解速率的经典模型,公式如下:

$$\frac{M_t}{M_0} = e^{-kt} \tag{1}$$

式中: M_i 为t年分解后的残余干重(g); M_0 为 初始枯落物干重(g);k为枯落物分解速率(a^{-1}) (李成道等,2019;赵红梅等,2020)。

本研究同时估算了枯落物 50%分解时间 $t_{0.5}$ 和 95%分解时间 $t_{0.5}$,计算公式如下:

$$t_{0.5} = \frac{\ln_{0.5}}{-k} \tag{2}$$

$$t_{0.95} = \frac{\ln_{0.05}}{-k} \tag{3}$$

为深入探讨初始基质质量对分解速率的影响, 我们对枯落物分解速率指数与枯落物初始基质质 量进行了 Pearson 相关性分析。利用 Adonis 检验分 析了不同分组对于样品的解释度(*R*²值),*R*²越大解 释度越高(Chan et al., 2016;Xu et al, 2017)。为能 够进一步阐释挺水植物叶枯落物分解过程中 16 种 指标的变异原因,建立了以下公式:

$$RC = R_{\text{fmm}}^2 : R_{\text{fm}}^2 \tag{4}$$

式中,*RC*(relative contribution)为阶段贡献度。 当 *RC*小于1时,则为分解阶段对各指标变异的贡 献度大,反之则为物种对各指标变异的贡献度大。 将 *RC*>3 的值筛选出来,进行多项式拟合,从而得 到这些指标随分解阶段变化的拟合方程。

2 结果与分析

2.1 枯落物质量损失特征

9种挺水植物在分解过程中的质量残留率变 化规律表现一致,随分解时长的延长,枯落物质量 残留率均不断减少(图2)。对比不同分解阶段的 质量残留率均值可知:立枯阶段(72.3%)>倒伏 阶段(42.8%)>沉水阶段(23.1%)。其中,倒伏 阶段质量残留率较立枯阶段下降 29.5%,沉水阶 段质量残留率较倒伏阶段下降 19.7%,表明从立 枯到倒伏阶段的枯落物分解速率更快。

由表 2 可知, Olson 负指数模型拟合的九种挺 水植物的 R²范围为 0.725 ~ 0.998, k 值范围为 0.43 ~ 1.41 a⁻¹。其中, 茭草分解最快(k = 1.41 a⁻¹), 再力花分解最慢(k = 0.43 a⁻¹)。茭草分解 50%与 95%所需时间为 0.49 a 与 2.13 a, 而再力花 分解所需时间最长, 其分解至 50%与 95%所需时 间分别为 1.62 a 和 6.98 a。

2.2 枯落物物理指标动态变化

9种植物叶枯落物的比叶面积均呈不断上升





A. 植物生长旺季; B-D 为植物分解阶段。B. 立枯阶段; C. 倒伏阶段,D. 沉水阶段。下同。

A. Vigorous growth season; B - D. Plants decomposition stages. B. Standing dead stage; C. Lodging stage; D. Submerged stage. The same below.

图 2 凋落叶分解过程中枯落物的质量残留率变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of mass residue rate during decomposition of withered leaf litters

的变化趋势,且在沉水阶段达到最大值(图 3)。 其中最大值为水葱 369 cm² · g⁻¹,最小值为纸莎草 56 cm² · g⁻¹。穿刺力度与比叶面积变化趋势相反, 总体呈持续下降趋势,且纸莎草在不同阶段均为 最大值。大多数植物叶枯落物的干物质量呈先升 后降的变化模式,在立枯阶段达到最大值,其中芦 苇的干物质量最高(94.9%)。

2.3 枯落物养分元素动态变化

大量、中量和微量养分元素在不同植物之间 呈现出多种变化模式(图4)。大量元素中,碳在 不同分解阶段中的变化不明显。各类植物(除芦 苇外)的氮含量与磷含量在生长旺季至立枯阶段 的变化为"释放"模式,在倒伏和沉水阶段,不同的 物种呈现出不同的变化模式。各类植物(除水葱 外)的钾含量呈现出"释放-富集-释放""释放-富 集"两种模式。水葱的钾含量显著高于其余物种, 其初始钾含量为 61.2 mg · g⁻¹。

中量元素中,各类植物的镁含量变化多样。 各类植物(除荷叶外)的钙含量在整个分解阶段中 总体呈"富集-释放"模式;荷叶的钙含量呈"释 放-富集-释放",且在整个分解阶段明显高于其余 物种,在倒伏阶段达到 121.0 mg·g⁻¹。在各类植 物的硫含量动态变化中,"富集-释放"和"释放- 富集-释放"为两种主要的变化模式。

微量元素中,各类植物(除花叶芦竹外)的铁 含量呈现"富集"模式,且在沉水阶段达到最大值, 花叶芦竹的铁含量为"富集-释放",在倒伏阶段达 到最大值。各类植物的锰含量变化模式差异较 大,其中再力花的锰含量最高,呈"富集-释放"模 式;荷叶的锰含量呈"释放-富集"模式;水葱的锰 含量呈"富集"模式;其余植物的锰含量较低,无明 显变化趋势。

2.4 枯落物涉碳化合物及灰分动态变化

各类植物的涉碳化合物及灰分呈现出不同的 变化模式(图5)。荷叶和芦竹的木质素呈"富集-释放"模式,水葱和纸莎草的木质素呈"富集-释 放-富集"模式,其余植物的木质素呈"富集"模 式。其中,荷叶的木质素在各个阶段都高于其他 植物。纤维素与半纤维素在整个分解周期内总体 呈"富集-释放"模式。其中,芦竹的纤维素呈"释 放-富集-释放"模式;荷叶的纤维素与半纤维素在 各个阶段都低于其他植物,且变化幅度较小。另 外,大多数物种的灰分呈现"富集-释放"模式,立 枯阶段的灰分较生长旺季增加了 69.0%,而倒伏 阶段较立枯阶段下降了 20.7%,沉水阶段较倒伏 阶段下降了 17.9%。

2.5 枯落物初始成分与分解速率的相关性

将初始成分与枯落物分解速率进行 Pearson 相关性分析(图6),发现分解速率与物理指标及 涉碳化合物指标相关性较高,其中主要与比叶面 积及干物质量呈显著正相关,与纤维素呈显著负 相关。其次,分解速率还与氮含量、钙含量呈正相 关关系,与穿刺力度及半纤维素呈现负相关,而与 其余指标无相关性。

初始指标之间的两两相关性分析显示,比叶 面积与干物质量、碳含量、氮含量、铁含量具有较 高的正相关性。穿刺力度与纤维素呈较高正相 关,这与上述穿刺力度和纤维素均与分解指数呈 负相关一致。干物质量与碳含量、钙含量、镁含 量、灰分、木质素呈正相关,与纤维素、半纤维素呈 负相关。纤维素和半纤维素与养分元素指标主要 呈负相关或相关性不显著。

2.6 植物物种与生境对各指标的相对贡献

在比叶面积、干物质量、穿刺力度和碳、钾、 钙、镁、硫、铁、锰的含量以及半纤维素、纤维素、木 质素、氮磷比的动态变化过程中,分解阶段对指标

表1 9种挺水植物初始成分(平均值)

Table 1 Primary constituents of nine emergent plants (\bar{x})

指标 Index	水葱, Schoenoplectus tabernaemontani	茭草 Zizania latifolia	再力花 Thalia dealbata	花叶芦竹 Arundo donax var. versicolor	荷叶 Nelumbo nucifera	芦苇 Phragmites australis	芦竹 Arundo donax	纸莎草 Cyperus papyrus	芒草 Miscanthus sinensis
比叶面积 Specific leaf area (cm ² ・g ⁻¹)	101.0	173.0	60.4	88.5	66.0	153.0	92.0	21.8	56.1
穿刺力度 Puncture strength (gf)	221.0	78.6	121.0	95.9	93.7	58.1	68.1	554.0	55.5
干物质量 Amount of dry matter (%)	21.5	46.0	39.1	22.5	91.2	50.8	38.6	23.9	15.4
碳含量 Carbon content (mg・g ⁻¹)	360.0	399.0	415.0	401.0	403.0	429.0	380.0	360.0	335.0
氦含量Nitrogen content (mg · g ⁻¹)	25.0	30.8	20.8	11.4	18.1	17.4	13.1	6.2	9.2
磷含量Phosphorus content (mg・g ⁻¹)	6.6	1.5	0.8	0.6	1.1	0.9	1.1	0.8	0.5
钾含量 Kalium content (mg・g ⁻¹)	61.2	7.4	17.6	17.1	16.8	14.0	25.0	9.9	5.6
钙含量Calcium content (mg・g ⁻¹)	13.1	9.4	10.4	6.5	71.4	6.5	21.7	9.4	11.1
镁含量Magnesium content (mg・g ⁻¹)	3.8	1.9	2.6	1.6	5.7	1.7	3.0	1.4	1.6
硫含量Sulphur content (mg・g ⁻¹)	4.4	1.5	2.3	3.0	4.2	2.7	2.4	1.9	1.3
铁含量 Iron content (mg・g ⁻¹)	1.2	0.9	0.6	1.4	0.5	0.6	0.6	0.4	0.7
锰含量Manganese content (mg・g ⁻¹)	0.7	0.5	1.8	0.2	1.3	0.2	0.1	0.7	0.2
纤维素 Cellulose (%)	30.7	30.4	27.2	21.2	16.4	28.7	37.6	44.1	32.9
半纤维素 Hemicellulose (%)	20.6	19.6	16.3	16.7	10.5	22.6	25.2	19.1	23.9
木质素 Lignin (%)	23.9	18.0	23.8	16.6	47.9	27.9	17.6	22.1	16.6
灰分 Ash content (%)	2.7	3.3	3.7	3.7	5.7	1.4	6.7	1.7	1.4





变异的解释度最大(表3)。特别地,分解阶段对 涉碳化合物指标变异的解释度大于物理指标和养 分元素指标的解释度。植物物种对氮含量、磷含 量、灰分指标动态变化的解释度较高。我们对分 解阶段贡献度(RC)大于3的指标进行拟合,得到 比叶面积与铁含量在整个分解周期均呈指数型上 升、穿刺力度呈下降的趋势。干物质量、纤维素与 半纤维素均呈抛物线式的变化规律。碳含量在整 个分解周期内的变化较平缓。钾含量与硫含量呈 波动下降的变化模式,钙含量呈"微富集-微释放" 变化模式。木质素呈持续上升的趋势。具体拟合 方程如图7所示。

3 讨论

3.1 枯落物初始基质质量对湿地挺水植物分解速 率的影响

枯落物基质质量对枯落物的分解具有关键作

表 2 凋落叶分解质量残留率指数回归方程

Table 2	Models $(y = ae^{-kt})$ for the relationship between
	mass residue rate of leaf litter and time

物种 Species	回归方程 Regression equation	R^2	分解 指数 k Decom- posing index (a ⁻¹)	<i>t</i> _{0.5} (a)	<i>t</i> _{0.95} (a)
水葱 Schoenoplectus tabernaemontani	$y = 143.37 e^{-0.568t}$	0.725	0.57	1.22	5.27
茭草 Zizania latifolia	$y = 431.76e^{-1.409t}$	0.842	1.41	0.49	2.13
再力花 Thalia dealbata	$y = 114.11 e^{-0.429t}$	0.994	0.43	1.62	6.98
花叶芦竹 Arundo donax var. versicolor	$y = 133.51 e^{-0.818t}$	0.914	0.82	0.85	3.66
荷叶 Nelumbo nucifera	$y = 366.7 e^{-1.206t}$	0.875	1.21	0.58	2.48
芦苇 Phragmites australis	$y = 156.41 e^{-0.677t}$	0.924	0.68	1.02	4.43
芦竹 Arundo donax	$y = 116.72e^{-0.483t}$	0.998	0.48	1.44	6.20
纸莎草 Cyperus papyrus	$y = 91.074 e^{-0.445t}$	0.773	0.45	1.56	6.73
芒草 Miscanthus sinensis	$y = 130.67 e^{-0.768t}$	0.891	0.77	0.90	3.90

用。大量研究表明,植物初始质量是影响枯落物 分解的重要因子(陈鸽等,2019)。我们前期研究 了植物质量、增温及生境三者对湿地植物枯落物 分解的贡献,发现植物质量贡献率达28.8%,仅次 于生境(Aerts, 1997; 王行等, 2018)。本文中, 分 解速率与养分元素中的初始氮含量成正相关,这 与初始基质质量中的氮含量对预测枯落物分解的 相关研究结果一致(Swift et al., 1979;马志良等, 2015)。同时,枯落物中的初始氮含量越高,微生 物可以利用的氮源越高,分解越迅速。涉碳化合 物中的纤维素由长链葡萄糖分子构成,其结构相 对简单,相比木质素降解较快,但纤维素分子量较 大且不溶于水,导致分解前期富集而后期才开始 降解,因此初始纤维素含量与分解速率呈显著负 相关(邓仁菊等,2010;周世兴等,2016)。半纤维 素的种类多样且降解过程较为复杂,降解发生前 多具有不同长短的潜伏期(李晗等,2015)。因此, 初始半纤维素含量与分解速率也呈负相关。由此 可知,枯落物在分解前期受养分元素调控,而到了 分解中后期主要受涉碳化合物影响较大。

3.2 湿地挺水植物分解特征

立枯阶段为挺水植物分解的第一个阶段,在这 个过程中叶枯落物一直处于大气界面,因此不仅受 到本身基质质量的影响,还受到了环境因子的调控 (Stefano et al., 2010 张新厚和宫超, 2013)。影响立 枯枯落物分解的因素包括降水、湿度、太阳辐射、风 速以及枯落物质量等,湿度与温度较基质因素相比 起决定作用(Vitousek, 1994; 王立新等, 2003; Eliška & Kateřina, 2006;张新厚和宫超, 2013)。由 此,立枯阶段植物主要受到降水、湿度等环境因子 的影响,从而发生破碎,导致穿刺力度低于生长旺 季。本研究发现,叶枯落物的干物质量在立枯阶段 不断上升,这主要与立枯阶段植物迅速失水而导致 立枯阶段植物干重与鲜重的比值与生长旺季相比 不断升高有关。在养分元素指标方面,叶枯落物中 的氮主要表现为"释放"模式。杜雨潭等(2020)对 亚热带不同植被枯落物层中的碳、氮、磷的含量动 态变化进行研究,发现随着植物分解出现释放的过 程,这与我们的研究结果一致。与氮的变化相反, 在此阶段钙元素作为结构性元素,随叶枯落物干物 质量升高表现出富集的趋势(李铭红等,2000)。除 上述以钙为代表的稳定元素外,大部分金属元素在 枯落物体内以离子态的形式存在,容易受到降水淋 溶作用的影响,从而导致分解过程中以铁元素为代 表的微量元素出现微释放(李志安等,2004;余星和 周运超,2016)。在涉碳化合物指标中,木质素、纤 维素、半纤维素的含量在此阶段均略有上升。且木 质素会在分解前期积累,与受到木质素聚合体保护 的纤维素变化一致(张雨鉴等,2020)。半纤维素的 降解需要非常复杂的微生物群落,而在立枯阶段的 微生物菌落数量相比沉水阶段少,因此在分解初期 半纤维素不断积累(李晗等,2015)。

倒伏阶段在植物分解过程中处于第二个阶段,分解速率加快,枯落物大部分处于大气界面, 小部分处于水体界面,因此本阶段的挺水植物主 要受到水土界面处的环境因素影响。我们发现, 此时的涉碳化合物指标较其余指标变化明显。其 中,木质素开始富集,而纤维素、半纤维素略有释 放。纤维素的分解主要由纤维素酶控制,而纤维 素酶活性主要与环境因子有关(陈亚梅等,2015)。 半纤维素会在水分淋溶与干湿交替的剧烈作用下 分解,但半纤维素的分解具有一定的潜伏期,且分 解需要更为复杂的微生物群落(李晗等,2015)。



图 4 9 种挺水植物养分元素指标变化 Fig. 4 Trend of nutrient elements in nine emergent plants

有研究表明,环境因子影响微生物群落的结构与 活性(岳楷等,2016;Pablo et al., 2016),而此阶段 的枯落物受到环境因子的剧烈影响,在叶际形成 复杂的微生物群落,对涉碳化合物的分解强烈。 中量元素中的钙稍有释放,这可能与水分的淋洗 作用有关(刘征,2014)。

沉水阶段为挺水植物分解的第三个阶段,叶枯 落物在这个过程中一直处于水体界面,主要受水分 因子的影响。养分元素指标方面,大部分枯落物的 钾呈释放模式,这主要与在沉水阶段受到水分淋溶 作用有关 (Boemer, 1984;Kost & Boerner, 1985;李 忠文等,2013)。中量元素中的钙在此阶段表现较为稳定,这与李忠文等(2013)对亚热带樟树的研究 结果一致。而微量元素中的铁大量富集,这可能与 枯落物分解过程中吸附金属元素形成螯合物与配 合物有关(He et al., 2020)。在涉碳化合物指标方 面,酶解作用是纤维素与半纤维素降解的主要原因 之一(陈亚梅等,2015)。真菌是分解不同类型枯落 物木质纤维素的主要因素(Wang et al., 2020)。枯 落物半纤维素的变化较为复杂,受到水分淋溶、干 湿交替等环境的影响(李晗等,2015)。本文中,纤 维素与半纤维素在沉水阶段表现为大量释放,这也



图 5 9种挺水植物涉碳化合物及灰分变化 Fig. 5 Key carbon-related and ash-related changes in nine emergent plants

说明了酶、微生物与环境因子对难分解化合物降解 的交互作用明显。

3.3 物种差异与分解阶段对关键指标的相对贡献

本研究中,分解阶段对关键指标变异的相对 贡献显著大于物种,这主要与不同分解阶段所处 不同分解环境有关。在大气界面的枯落物受到降 水、风速、太阳辐射、微生物等环境因子的影响,而 水体界面的枯落物受到水分淋溶与厌氧微生物及 水中动物的影响。研究表明,在季节性冻融特征 较为显著的溪流中,水温、浊度等因子能直接影响 枯落物养分元素的变化(陈鸽等,2019)。彭倩等 (2021)对粗枝云杉不同径级根系分解过程的研究 发现,生长环境条件不同对根系分解中养分元素 的释放有不同影响。在本研究中,我们发现不同 分解阶段对涉碳化合物指标的解释度更高,这主 要与涉碳化合物大多为难分解的大分子物质,其 分解主要与环境因子中的水分淋溶、物理破碎等 有关。另外,分解阶段所主导的环境因子变化会 对分解者(如微生物、小型动物)产生影响,进而影 响难分解化合物的降解。向元彬等(2015)对不同 密度巨桉人工林枯落物分解研究指出,林分密度 小的巨桉林环境适合分解木质素和纤维素的菌类 生存。干旱生境下3种植物叶枯落物分解动态特 征的研究表明,林窗中太阳辐射强度大于林下,有 利于木质素、纤维素的降解(杨晶晶等,2019)。湿 地挺水植物枯落物立枯分解研究表明,难分解成 分的微生物活性及分解能力受环境因子影响,从 而间接影响了湿地挺水植物枯落物的分解(张新 厚和宫超,2013)。在本研究中,分解阶段对枯落 物各指标变异的贡献度大于物种种类,这与不同 分解阶段环境因子的调控作用密切相关。受此影 响,大部分指标在不同分解阶段之间表现出明显 的动态变化特征。同时,受不同植物物种初始性 状影响,小部分指标的动态变化在物种之间表现 出明显差异性。

3.4 湿地挺水植物的一般分解规律

在湿地挺水植物的分解过程中,植被枯落物 的分解速率随着时间的增加而减小。立枯阶段至



图中红色表示正相关,蓝色表示负相关,红色越深表示正相关越显著,蓝色越深表示负相关越显著。 The red in the figure indicates the positive correlation, the blue indicates the negative correlation, the deeper the red, the more significant the positive correlation, and the darker the blue, the more significant the negative correlation.

图 6 初始成分与枯落物分解速率 Pearson 相关性 Fig. 6 Pearson correlation between initial components and litter decomposition rate

倒伏阶段分解速率最大,倒伏阶段至沉水阶段次 之,沉水阶段以后的分解速率最小。本研究结果 与张全军等(2020)的研究结果相一致。不同物种 的分解速率也存在较大的差异,本研究计算的 9 种植物中,分解速率最大的为茭草(1.41 a⁻¹),分解 速率最小为再力花(0.43 a⁻¹)。枯落物分解 50%, 茭草仅需半年时间,而再力花需要 1.62 a。

对比其他生态系统发现,沙漠生态系统植被的枯落物分解速率普遍较低,如李成道等(2019)研究发现,在光照条件下,极端干旱区植被在一年半的分解率不到40%,远远小于湿地挺水植物。森林生态系统较为复杂,植被枯落物分解速率受植被类型影响较大,如米彩红(2014)研究指出,几种人工林枯落物分解速率,最大值为小叶杨

(2.91 a⁻¹),最小值为松柏(0.60 a⁻¹)。整体而言, 森林植被的枯落物分解速率最快,其次为湿地植 被,最慢为沙漠植被。

4 结论

本研究测定了滇池湖滨带九种优势挺水植物 在4个生长阶段的质量衰减及关键指标变化动 态,得到如下结论:(1)不同湿地挺水植物的枯落 物分解速率不同。例如:茭草的 k 值为 1.41 a⁻¹,是 本研究中分解速率最快的挺水植物;再力花的 k 值为 0.43 a⁻¹,是最难分解的挺水植物。(2)通过 对分解速率与枯落物初始成分进行 Pearson 相关 性分析可知,分解速率与物理指标及涉碳化合物

表 3 各指标非参数多因素方差分析

Table 3 Variance analysis of non-parametric multivariate for each index

指标 Index	物和 Spec	钟 vies	分解 Decom sta	阶段 贡献率 Relative contgri-		
	R^2	Р	R^2	Р	bution RC	
干物质量 Amount of dry matter (%)	0.036	0.799	0.325	0.002	9.03	
比叶面积 Specific leaf area (cm² • g ⁻¹	0.265)	0.090	0.880	0.001	3.32	
穿刺力度 Puncture strength (gf)	0.168	0.238	0.747	0.001	4.45	
碳含量 Carbon content (mg・g ⁻¹)	0.088	0.490	0.519	0.001	5.90	
氮含量 Nitrogen content (mg・g ⁻¹)	0.493	0.011	0.409	0.001	0.83	
磷含量 Phosphorus content (mg・g ⁻¹)	0.514	0.003	0.350	0.001	0.68	
钾含量 Kalium content (mg・g ⁻¹)	0.094	0.581	0.431	0.001	4.59	
钙含量 Calcium content (mg・g ⁻¹)	0.062	0.715	0.549	0.001	8.85	
镁含量 Magnesium content (mg・g ⁻¹)	0.120	0.311	0.300	0.001	2.50	
硫含量 Sulphur content (mg・g ⁻¹)	0.103	0.400	0.422	0.001	4.10	
铁含量 Iron content (mg・g ⁻¹)	0.224	0.087	0.695	0.001	3.10	
锰含量 Manganese content (mg・g ⁻¹)	0.189	0.131	0.531	0.001	2.81	
纤维素 Cellulose(%)	0.091	0.404	0.552	0.001	6.07	
半纤维素 Hemicellulose (%)	0.016	0.885	0.754	0.001	47.10	
木质素 Lignin (%)	0.151	0.325	0.627	0.001	4.15	
灰分 Ash content (%)	0.305	0.006	0.131	0.034	0.43	

指标的相关性较高,其中与比叶面积及干物质量 呈显著正相关,与纤维素呈显著负相关。其次,分 解速率还与凋落物氮含量、钙含量呈正相关,与穿 刺力度及半纤维素呈负相关。(3)物理指标(比叶 面积、穿刺力度、干物质量)在不同植物之间的分 解动态特征相似;养分元素指标主要呈"释放-富 集""富集-释放""净释放"三种模式;涉碳化合物 指标中,木质素呈"富集-释放""富集-释放-富 集"和"富集"模式,纤维素与半纤维素在整个分解 周期内总体呈"富集-释放"模式。(4)所测 16 种 指标中,13 种指标(比叶面积、干物质量、穿刺力度 和碳、钾、钙、镁、硫、铁、锰的含量以及半纤维素、 纤维素、木质素)在不同分解阶段表现出明显变 异,这些指标的动态变化主要由分解阶段主导;物 种种类对其余3种指标(氮和磷的含量和灰分)变 异的解释度较高,这些指标的动态变化主要由物 种种类主导。拟合分析发现,比叶面积、穿刺力 度、干物质量和碳、钾、钙、硫、铁的含量以及木质 素、纤维素、半纤维素在不同植物之间的变化趋势 一致,或可作为表征湿地挺水植物叶枯落物分解 的指示性指标,在未来挺水植物凋落物分解规律 的研究及预测中应重点关注。

参考文献:

- AERTS R, 1997. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship [J]. Oikos, 79(3): 1-10.
- BERG B, MCCLAUGHERTY C, 1989. Nitrogen and phosphorus release from decomposing litter in relation to the disappearance of lignin[J]. Can J Bot, 67(4):1148-1156.
- BOEMER REJ, 1984. Foliar nutrient dynamics and nutrient use efficiency of four deciduous tree species in relation to site fertility [J]. J Appl Ecol, 21(3): 1-10.
- CHAN AA, BASHIR M, RIVAS MN, et al., 2016. Characterization of the microbiome of nipple aspirate fluid of breast cancer survivors [J]. Sci Rep, 6: 2–15.
- CHEN G, WANG L, GONG YW, et al., 2019. Release dynamics of nitrogen and phosphorus of leaf litter in a forest stream of the Changbai Mountains during seasonal freezingthawing period [J]. Ecol Environ Sci, 28 (12): 2341 – 2348. [陈鸽, 王璐, 宫雨薇, 等, 2019. 季节性冻融期长 白山森林溪流中凋落叶 N、P 的释放动态 [J]. 生态环境 学报, 28(12): 2341–2348.]
- CHEN YM, HE RL, DENG CC, et al., 2015. Litter decomposition and lignocellulose enzyme activities of *Actinothuidium hookeri* and *Cystopteris montana* in alpine timberline ecotone of western Sichuan, China [J]. Chin J Appl Ecol, 26(11): 3251-3268. [陈亚梅,和润莲,邓长春,等, 2015. 川西高山林线交错带两种地被物分解的木质纤维素酶活性特征 [J]. 应用生态学报, 26(11): 3251-3268.]
- DENG RJ, YANG WQ, ZHANG J, et al., 2010. Changes in litter quality of subalpine forests during one freeze-thaw season [J]. Acta Ecol Sin, 30(3): 830-835. [邓仁菊, 杨 万勤, 张健, 等, 2010. 季节性冻融期间亚高山森林凋落 物的质量变化 [J]. 生态学报, 30(3): 830-835.]
- DU YT, CHEN JL, LI LD, et al., 2020. C, N and P stoichiometry characteristics of forest floor litter layer at different vegetation restoration stages in the mid-subtropical regions, China [J]. J Cent S Univ For Technol, 40(2): 108-119. [杜雨潭, 陈金磊, 李雷达, 等, 2020. 亚热带不同植



图 7 指标与不同分解阶段的多项式拟合 Fig. 7 Index fitted with polynomials at different decomposition stages

被恢复林地凋落物层碳、氮、磷化学计量特征 [J]. 中南林 业科技大学学报,40(2):108-119.]

- ELIŠKA R, KATEŘINA H, 2006. Wetland plant decomposition under different nutrient conditions: what is more important, litter quality or site quality [J]. Biogeochemistry, 80(3): 15-26.
- HE W, LEI L, MA ZY, et al., 2020. Nonadditive effects of decomposing mixed foliar litter on the release of several metallic elements in a *Pinus massoniana* Lamb. forest [J]. Ann For Sci, 77(2): 22–36.
- KOST JA, BOERNER REJ, 1985. Foliar nutrient dynamics and nutrient use efficiency in Cornus florida [J]. Oecologia,

66(4): 1-15.

- LI CD, LI XY, SUN HJ, et al., 2019. Decomposition characteristics of *Karelinia caspia*, *Alhagi sparsifolia* and *Populus euphratica* leaves in extremely arid areas [J]. J Desert Res, 39(2): 193-201. [李成道, 李向义, SUN HJ, 等, 2019. 极端干旱区花花柴(*Karelinia caspia*)、骆驼刺 (*Alhagi sparsifolia*)和胡杨(*Populus euphratica*)叶片凋落物 分解特征 [J]. 中国沙漠, 39(2): 193-201.]
- LI H, WU FZ, YANG WQ, et al., 2015. Effects of forest gap on hemicellulose dynamics during foliar litter decomposition in an subalpine forest [J]. Chin J Plant Ecol, 39(3): 229-238. [李晗, 吴福忠, 杨万勤, 等, 2015. 亚高山森林林窗

对凋落物分解过程中半纤维素动态的影响 [J]. 植物生态 学报, 39(3): 229-238.]

- LI MH, YU MJ, PAN WR, 2000. Release dynamics of calcium in an evergreen broad-leaved forest dominated by *Cyclobalanopsis glauca* in East China [J]. J Zhejiang Univ (Sci Ed), 27(3): 334-346. [李铭红, 于明坚, 潘文戎, 2000. 青冈常绿阔叶林钙的释放动态 [J]. 浙江大学学报 (理学版), 27(3): 334-346.]
- LI ZA, ZOU B, DING YZ, et al., 2004. Key factors of forest litter decomposition and research progress [J]. Chin J Ecol, 23(6):77-83. [李志安, 邹碧, 丁永祯, 等, 2004. 森林凋 落物分解重要影响因子及其研究进展 [J]. 生态学杂志, 23(6):77-83.]
- LI ZW, YAN WD, ZHENG W, et al., 2013. Litter fall production and nutrient dynamic of *Cinnamomum camphora* and *Pinus massoniana* mixed forests in subtropics China [J]. Acta Ecol Sin, 33(24): 7707-7714. [李忠文, 闫文 德, 郑威, 等, 2013. 亚热带樟树-马尾松混交林凋落物量 及养分动态特征 [J]. 生态学报, 33(24): 7707-7714.]
- LIU Z, SUN N, 2014. Establishemnt of ISSR-PCR reaction system of *Cymbidium sinense* and its optimization [J]. J Green Sci Technol, 3: 145-147. [刘征, 孙楠, 2014. 不同密度杂 种落叶松枯枝落叶营养元素的动态特征 [J]. 绿色科技, 3: 145-147.]
- MA ZL, GAO S, YANG WQ, et al., 2015. Litter decomposition of six common tree species at different rainy periods in the subtropical region [J]. Acta Ecol Sin, 35 (22): 7553 7561. [马志良,高顺,杨万勤,等, 2015. 亚热带常绿阔 叶林 6 个常见树种凋落叶在不同降雨期的分解特征 [J]. 生态学报, 35(22): 7553–7561.]
- MI CH, 2014. Effect of litter decomposition and nutrient circulation on soil polarization in the planted pure forests of Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest A & F University. [米彩红, 2014. 黄土高原人工纯林枯落物分解 和养分循环对土壤极化的影响 [D]. 杨凌:西北农林科技 大学.]
- MOORE M, ROMANO SP, COOK T, 2010. Synthesis of Upper Mississippi River System submersed and emergent aquatic vegetation: Past, present, and future [J]. Hydrobiologia, 640: 103-114.
- OLSON JS, 1963. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems [J]. Ecology, 44(2): 15-26.
- PABLO GP, IVÁN P, JEAN MARC O, et al., 2016. Disentangling the litter quality and soil microbial contribution to leaf and fine root litter decomposition responses to reduced rainfall [J]. Ecosystems, 19(3): 16–29.
- PENG Q, REN YZ, ZHANG Y, et al., 2021. The release dynamic of four nutrient elements in decomposing *Picea* asperata roots of different diameters [J]. Chin J Appl Environ Biol, 27(1): 8-14. [彭倩, 任雨之, 张悦, 等, 2021. 粗枝 云杉不同径级根系分解过程中4个养分元素释放特征

[J]. 应用与环境生物学报, 27(1): 8-14.]

- PING YM, CUI LJ, LI W, et al., 2018. Research review of litters decomposition of wetland emergent plants [J]. World For Res, 31(3): 15-20. [平云梅,崔丽娟,李伟,等, 2018. 湿地挺水植物凋落物分解研究概述 [J]. 世界林业 研究, 31(3): 15-20.]
- PRESCOTTP CE, 2010. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils [J]. Biogeochemistry, 101(1/2/3): 1-10.
- STEFANO M, JOHN AT, ROBERT BJ, et al., 2010. Stoichiometric controls on carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics in decomposing litter [J]. Ecol Monogr, 80(1): 15-26.
- SWIFT MJ, HEAL OW, ANDERSON JM, et al., 1979. Decomposition in terrestrial ecosystems [J]. Stud Ecol, 5(14): 2772-2774.
- VITOUSEK PM, 1994. Beyond global warming: ecology and global change [J]. Ecology, 75(7): 1861–1876.
- WANG H, YAN PF, ZHAN PF, et al., 2018. The relative contribution of plant quality, simulated rising temperature, and habitat to litter decomposition [J]. Chin J Appl Ecol, 29(2): 474-482. [王行, 闫鹏飞, 展鹏飞, 等, 2018. 植物质量、模拟增温及生境对凋落物分解的相对贡献 [J]. 应用生态学报, 29(2): 474-482.]
- WANG LX, WANG J, HUANG JH, et al., 2003. Comparison of major nutrient release patterns of *Quercus liaotungensis* leaf litter decomposition in different climatic zones [J]. Acta Bota Sin, 45(4): 399-407. [王立新, 王瑾, 黄建辉, 2003. 辽 东栎叶片凋落物在不同气候带下的分解及其主要元素释 放的比较 [J]. 植物学报, 45(4): 399-407.]
- WANG QK, WANG SL, YU XJ, et al., 2007. Effects of *Cunninghamia* lanceolata-broad leaved tree species mixed leaf litters on active soil organic matter [J]. Chin J Appl Ecol, 18 (6): 1203-1207. [王清奎, 汪思龙, 于小军, 等, 2007. 杉木与阔叶树叶凋落物混合分解对土壤活性有机质的影响 [J]. 应用生态学报, 18(6): 1203-1207.]
- WANG WB, ZHANG Q, SUN XM, et al., 2020. Effects of mixed-species litter on bacterial and fungal lignocellulose degradation functions during litter decomposition [J]. Soil Biol Biochem, 141: 14–26.
- WEI JM, WANG LX, LIU DW, et al., 2016. On the decomposition dynamics and nutrient release of *Phragmites australis* litter in Wuliangsu Lake [J]. J Saf Environ, 16(5): 364–370. [魏江明,王立新,刘东伟,等, 2016. 乌 梁素海芦苇枯落物分解动态及营养元素释放研究 [J]. 安 全与环境学报,16(5): 364–370.]
- XIANG YB, HUANG CD, HU TX, et al., 2015. Changes in masses of substrates during litter decomposition in *Eucalyptus* grandis plantations with different densities [J]. J NW A & F Univ (Nat Sci Ed), 43(4): 65-72. [向元彬, 黄从德, 胡 庭兴, 等, 2015. 不同密度巨桉人工林凋落物分解过程中 基质质量的变化 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学)

版),43(4):65-72.]

- XIONG SM, ZUO XF, ZHU YY, 2005. Determination of cellulose, hemi-cellulose and ligin in rice hull [J]. Cereal Feed Indust, 1(8): 40-51. [熊素敏, 左秀凤, 朱永义, 2005. 稻壳中纤维素、半纤维素和木质素的测定 [J]. 粮食 与饲料工业, 1(8): 40-51.]
- XU KY, XIA GH, LU JQ, et al., 2017. Impaired renal function and dysbiosis of gut microbiota contribute to increased trimethylamine-N-oxide in chronic kidney disease patients [J]. Sci Rep, 7(1): 4–16.
- YANG JJ, ZHOU ZL, LÜ RH, et al., 2019. Dynamic decomposition of foliar litters of three plant species in arid habitats [J]. Arid Zone Res, 36(4): 916-923. [杨晶晶, 周正立, 吕瑞恒, 等, 2019. 干旱生境下 3 种植物叶凋落 物分解动态特征 [J]. 干旱区研究, 36(4): 916-923.]
- YU X, ZHOU YC, 2016. Dynamic of trace elements releasing in the process of litter decomposition in the *Pinus mussonian* plantation [J]. Hubei Agric Sci, 55(7): 1682-1696. [余星,周运超, 2016. 马尾松凋落物分解过程中的微量元素 释放动态 [J]. 湖北农业科学, 55(7): 1682-1696.]
- YUE K, YANG WQ, PENG Y, et al., 2016. Effects of streams on lignin degradation during foliar litter decomposition in an alpine forest [J]. Chin J Plant Ecol, 40(9): 893-901. [岳 楷,杨万勤,彭艳,等, 2016. 高寒森林溪流对凋落叶分解 过程中木质素降解的影响 [J]. 植物生态学报, 40(9): 893-901.]
- ZENG CS, ZHANG LH, WANG TE, et al., 2012. Nutrient dynamics of the litters during standing and sediment surface decay in the Min River estuarine mars [J]. Acta Ecol Sin, 32 (20): 6289-6299. [曾从盛,张林海,王天鹅,等, 2012. 闽江河口湿地植物枯落物立枯和倒伏分解主要元素 动态 [J]. 生态学报, 32(20): 6289-6299.]
- ZHANG DQ, HUI DQ, LUO YQ, et al., 2008. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors [J]. J Plant Ecol, 1(2): 85–93.
- ZHANG PF, LI H, LIU YS, et al., 2019. Dynamics of phyllospheric fungal community in a wetland plant, *Schoenoplectus tabernaemontani* [J]. Chin J Ecol, 38(6):

1800-1809. [展鹏飞,李晖,刘耘硕,等,2019. 湿地植物 水葱叶围真菌群落动态特征 [J]. 生态学杂志,38(6): 1800-1809.]

- ZHANG XH, GONG C, 2013. Research advances in standing litter decomposition of emergent macrophyte in wetlands [J]. Ecol Environ Sci, 22(4): 712-717. [张新厚, 宫超, 2013. 湿地挺水植物凋落物立枯分解研究进展 [J]. 生态 环境学报, 22(4): 712-717.]
- ZHANG YJ, WANG KQ, SONG YL, et al., 2020. Response of litter decomposition of zonal vegetation to simulated nitrogen deposition in central Yunnan, China [J]. Acta Ecol Sin, 40(22): 8274-8286. [张雨鉴, 王克勤, 宋娅丽, 等, 2020. 滇中亚高山地带性植被凋落物分解对模拟氮沉降的 响应 [J]. 生态学报, 40(22): 8274-8286.]
- ZHAO HM, CHENG JH, ZHANG WT, et al., 2020. Litters decomposition characteristics of five species in the Gurbantunggut Desert [J]. J Desert Res, 40(2): 165-176. [赵红梅,程军回,张文太,等, 2020. 古尔班通古特 沙漠 5 种植物凋落物分解特征 [J]. 中国沙漠, 40(2): 165-176.]
- ZHANG QJ, ZHANG GS, YU XB, et al., 2020. Dynamic characteristics of the decomposition rate and carbon, nitrogen and phosphorus release of the dominant plants in Poyang Lake Wetland [J]. Acta Ecol Sin, 40(24): 8905-8916. [张全 军,张广帅,于秀波,等, 2020. 鄱阳湖湿地优势植物枯落 物的分解速率及碳、氮、磷释放动态特征 [J]. 生态学报, 40(24): 8905-8916.]
- ZHOU SX, HUANG CD, XIANG YB, et al., 2016. Effects of simulated nitrogen deposition on lignin and cellulose degradation of foliar litter in natural evergreen broad-leaved forest inrainy area of western China [J]. Chin J Appl Ecol, 27(5): 1368-1374. [周世兴,黄从德,向元彬,等, 2016. 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林凋落物木 质素和纤维素降解的影响 [J]. 应用生态学报, 27(5): 1368-1374.]

(责任编辑 李 莉)