

三江平原典型湿地枯落物早期分解过程及影响因素

武海涛^{1,2}, 吕宪国^{1,*}, 杨 青¹, 姜 明^{1,2}, 佟守正¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 长春 130012 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 枯落物分解是湿地物质循环和能量流动的关键环节,是维持湿地功能的重要过程之一。采用分解袋法对三江平原 3 种典型湿地植物枯落物分解过程及影响因素进行了研究。研究表明,在 164 d 实验过程中乌拉苔草分解速率始终最快,在分解前 103 d 中毛果苔草分解速率大于小叶章,但在 103 ~ 164 d 间小叶章分解速率大于毛果苔草。分解 164 d,小叶章、乌拉苔草和毛果苔草枯落物的失重率分别为初始重的 31.98%、32.99% 和 28.91%。分解过程中小叶章和毛果苔草枯落物中有机碳浓度波动较大,而乌拉苔草枯落物中持续下降;3 种枯落物有机碳绝对含量都表现为净释放。小叶章枯落物中 N 浓度波动较大,绝对含量发生净释放;毛果苔草枯落物 N 浓度持续增加,绝对含量净增加;乌拉苔草枯落物 N 浓度先增加后减少,绝对含量发生净释放。3 种枯落物中 P 浓度都先迅速下降后缓慢上升,绝对含量都表现为净释放。3 种枯落物中 C/N 和 C/P 也相应的发生变化。小叶章和乌拉苔草枯落物分解速率与枯落物 C/P 显著相关,而毛果苔草枯落物与枯落物 N 浓度显著相关。对应 3 种枯落物分解速率的主要环境因子分别为土壤含水量、土壤容重和土壤温度。3 种枯落物分解速率和营养物质含量动态受到枯落物自身质量和温湿条件、周围环境营养状况等自然环境条件的共同影响,相比而言,受枯落物质量的影响更大。

关键词 枯落物;分解过程;影响因素;典型湿地;三江平原

文章编号: 1000-0933 (2007)10-4027-09 中图分类号: P343.4, Q178.51+3, Q948.1 文献标识码: A

The early-stage litter decomposition and its influencing factors in the wetland of the Sanjiang Plain, China

WU Hai-Tao^{1,2}, LÜ Xian-Guo^{1,*}, YANG Qing¹, JIANG Ming^{1,2}, TONG Shou-Zheng¹

1 Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, China

2 Graduate University, CAS, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (10): 4027 ~ 4035.

Abstract: Litter decomposition is a key step to the nutrient cycle and energy flow in wetlands. It is also an important process in maintaining wetland functions. Using the litter bag technique, this paper examines the decomposition rates and their influencing factors by investigating three wetland macrophytes in the Sanjiang Plain, Northeast China: *Calamagrostis angustifolia*, *Carex meyeriana*, and *Carex lasiocapa*. It was found that during the experiment period of 164 days, the litter of *C. meyeriana* had the highest decomposition rate, but the rates of the other two types of litter varied. From Days 1 — 103, the litter of *C. lasiocapa* had a higher decomposition rate than that of *C. angustifolia*, but this was reversed during

基金项目 中国科学院知识创新工程资助项目 (KZCX3-SW-NA-01); 国家自然科学基金资助项目 (40501030); 湿地生态与环境重点实验室基金资助项目 (WELF-2004-B-002)

收稿日期 2006-09-03; **修订日期** 2007-03-28

作者简介 武海涛 (1978 ~), 男, 山东省人, 博士生, 主要从事湿地变化与环境效应、湿地土壤生态研究. E-mail: wuhaitao@neigae.ac.cn

*** 通讯联系人** Corresponding author. E-mail: luxg@neigae.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by the Knowledge Innovation Project, Chinese Academy of Sciences (No. KZCX3-SW-NA-01); National Natural Science Foundation of China (No. 40501030); Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment Foundation, CAS (No. WELF-2004-B-002)

Received date 2006-09-03; **Accepted date** 2007-03-28

Biography: WU Hai-Tao, Ph. D. candidate, mainly engaged in wetland change and environmental effect, wetland soil ecology. E-mail: wuhaitao@neigae.ac.cn

Days 104 — 164. Such differences led to different weight losses after the 164 days : *C. meyeriana* lost 28.91 per cent of its weight, *C. angustifolia* lost 31.98 per cent and *C. lasiocapa* lost 32.99 per cent. Another finding was that the amount of organic carbon in the litter of *C. angustifolia* and *C. lasiocapa* fluctuated, but continuously decreased in that of *C. meyeriana*. However overall, all three types of litter released organic carbon. The N concentration fluctuated in the litter of *C. angustifolia*, but increased continuously in the litter of *C. lasiocapa*. *C. meyeriana* showed an increase in N concentration from Days 1 — 103, and a decrease during Days 103 — 164. N was released substantially from the litter of both *C. angustifolia* and *C. meyeriana*, but accumulated in the litter of *C. lasiocapa*. In contrast to the variation in N concentrations, P concentrations in all three types of litter apparently decreased first and then slightly increased. Overall, P release was observed in all three types of litter. Finally, the C/N and C/P ratios varied significantly in the decomposition process. The litter decomposition rates of *C. angustifolia* and *C. meyeriana* were strongly related to their C/P values, while the decomposition rate of *C. lasiocapa* correlated strongly with the P content of its litter. This paper concludes that the main environmental factors influencing the decomposition rates were soil moisture, soil bulk and soil temperature. This experiment suggests that the decomposition rates and nutrient content variations were simultaneously influenced by the quality of the litter as well as environmental factors. However, in the Sanjian Plain, they were more strongly affected by the quality of the litter.

Key Words :litter ;decomposition process ;influencing factors ;wetland ;Sanjiang Plain

湿地是最富有生产力的生态系统之一,湿地植物生物量大,且很少被消费。同时,湿地水文波动而引起的好氧-厌氧环境,使得湿地枯落物分解速率低而大量积累。作为重要碳库的湿地,其分解过程和分解速率的变化,将直接影响全球变化的进程。枯落物分解是湿地生态系统营养物质循环和能量流动的关键环节,是维持湿地生态系统功能的主要过程之一。基于湿地分解过程的重要性,众多学者围绕湿地分解过程^[1~4]和影响因素^[5~9]进行了大量研究,枯落物分解过程成为国际湿地科学研究的重要内容和热点领域。

三江平原是我国集中连片且分布面积最大的淡水湿地之一,也是我国湿地研究的重要实验地,长期以来三江平原湿地研究对我国湿地的研究具有引领作用^[10]。国内对三江平原枯落物分解的研究主要集中在单一湿地植物类型的分解过程上,如刘景双^[11]、郑玉琪^[12]对小叶章、毛果苔草枯落物中氮等化学元素的季节动态进行了研究,王世岩等^[13]研究了小叶章枯落物分解的季节动态和磷的动态变化,高俊琴等^[14]研究了小叶章枯落物质量、不同有机质组分的分解动态,杨继松等^[15]对三江平原湿地小叶章、毛果苔草和漂筏苔草枯落物分解速率和氮、磷元素动态进行了研究,并讨论了淹水和枯落物性质对分解过程的影响,但整体上过去对分解影响因素的综合研究和不同典型湿地植物分解的对比研究较少。目前,三江平原垦殖化严重,面状污染和区域变暖加剧,区域环境要素正发生着改变^[16]。本文以三江平原作为研究地,选择具有明显环境梯度的碟型洼地湿地作为研究对象,综合研究不同环境梯度下3种典型湿地植物枯落物早期分解的过程、营养动态和影响因素,旨在深入湿地枯落物分解机理的研究,也为环境变化下湿地分解过程的响应研究提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区自然概况

三江平原是由黑龙江、松花江、乌苏里江冲积而成的低平原。区内沼泽广布,发育典型,现有沼泽湿地面积 $83.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[17]。研究区位于三江平原别拉洪河和浓江的河间地带 (33°31'E,47°35'N),地处温带湿润季风气候,年均温 -1.9℃,1 月份平均气温 -21℃,7 月份平均气温 22℃,年降水量 600 mm 左右,60% 以上降水集中在 7~9 月份。实验区设置在该区域内的中国科学院三江平原沼泽湿地生态实验站沼泽综合实验场西南部的碟型洼地中 (中心位置在 133°30'35" E,47°35'11" N)。观测洼地面积约 4 hm²,海拔高度 55.4~55.7 m。从洼地的中心到边缘,分布植物分别为毛果苔草-漂筏苔草-狭叶甜茅 (*Carex lasiocapa*-*Carex pseudocuraica*-*Glyceria spiculosa*,*C. la*-*C. pa*-*G. sa*) 群落、乌拉苔草-毛果苔草 (*Carex meyeriana*-*Carex lasiocapa*,*C. ma*-*C. la*) 群

落和小叶章-沼柳-越桔柳 (*Calamagrostics angustifolia*-*Ass. Salix brachypoda*-*Salix myrtilloides*, *C. aa*-*S. ba*-*S. ms*) 群落,且呈现明显的环带状,优势物种分别为毛果苔草 (*Carex lasiocapa*, *C. la*)、乌拉苔草 (*Carex meyeriana*, *C. ma*)和小叶章 (*Calamagrostics angustifolia*, *C. aa*) 土壤类型由泥炭沼泽土、腐殖质沼泽土和草甸沼泽土向潜育白浆土过渡,淹水由常年淹水和季节性淹水向无淹水过渡。

1.2 研究方法

1.2.1 分解袋法进行枯落物分解实验

沿上述碟形洼地的中心到边缘选择一条宽约 5 m 长约 45 m 的典型样带,样点选择样带内的 *C. la* -*C. pa* -*G. sa*、*C. ma*-*C. la* 和 *C. aa* -*S. ba* -*S. ms* 群落,代表不同的水文-土壤-植物类型组合。每个群落中选择 4 个重复样点。分解实验采用尼龙网袋法。为保证无脊椎动物对枯落物分解的作用^[8,19],同时考虑到大网孔分解袋中枯落物容易损失等原因,本实验选择 5 目 (4 mm)、50 目 (0.27 mm)、100 目 (0.15 mm) 和 250 目 (0.058 mm) 4 种网孔分解袋。网袋规格为 15 cm × 15 cm。

于 2005 年 4 月末在样带内 *C. la*- *C. pa*-*G. sa*、*C. ma*-*C. la* 和 *C. aa*-*S. m*-*S. ba* 群落分别收集各群落优势物种 *C. la*、*C. ma* 和 *C. aa* 的立枯物,除去泥土等杂质,并用水冲洗,剪成长约 10 cm 的小段,60℃ 下烘干至恒重。分别称取 10 g (精确度为 0.001 g) 装入不同网孔的分解袋中,每种立枯物单独装袋。5 月中旬随机布设在相应的各自群落中。布设土壤表层深度 0 ~ 10 cm。在随后的 6、7、8、10 月底分别回收分解袋,每种枯落物类型的每种网孔分解袋各回收 3 个,每月共计回收分解袋 36 个。将分解袋带回实验室,清除枯落物表面的泥土、植物根系、藓类和无脊椎动物等杂质,用去离子水冲洗干净。60℃ 下烘干至恒重,称重 (精确度为 0.001 g)。称重后,进行磨碎,过筛,用于测定残留物中 TC、TN 和 TP 含量。

实验过程中,每月在分解袋布设样点相邻的相同生境下采集土壤样品,采样深度 0 ~ 10 cm,3 次重复,用于测定土壤中 TC、TN 和 TP 的含量和土壤容重、土壤含水率。另外,对每个样点应用曲管地温计测定地表 (0 cm)、5 cm 和 10 cm 土壤深的土壤温度,取平均值。

1.2.2 实验室样品分析和数据处理

枯落物残留物中 TC、TN 和 TP 含量的测定参照李西开^[20]提供的方法。同种枯落物的同一测定项目在四种不同网孔分解袋中的平均值作为最后求值。土壤中 TC、TN 和 TP 含量的测定参照刘光崧^[21]的方法。枯落物残留物中 TC、TN 和 TP 绝对含量为测定的浓度与相应枯落物残留质量的乘积。

根据 Olson^[22] 指数衰减模型 $W_t = W_0 e^{-k t}$ 拟合分解模型,得到分解速率常数 k (d^{-1}),并由此推断出枯落物分解 95% 的时间 $t_{0.95} = 2.9957/k$ 。式中, W_t 为经时间 t (d) 后枯落物的分解残留量; W_0 为枯落物的初始量; k 为分解速率常数; t 为分解进行的时间 (d)。

数据采用 SPSS10.0 和 ORIGINPRO7.5 进行统计分析和图像绘制。

2 结果与分析

2.1 枯落物分解动态

由图 1 可见,湿地植物枯落物分解速率具有明显的阶段性。实验前 41 d 中分解最快,随后分解速率缓慢下降。3 种湿地植物枯落物在前 41 d 中的分解速率常数分别为 0.0031 (*C. aa*)、0.0040 (*C. ma*) 和 0.0036 而在 41 ~ 164 d 中对应的平均分解速率常数分别为 0.0024 (*C. aa*)、0.0028 (*C. ma*) 和 0.0024 (*C. la*)。主要因为在分解初期枯落物中易溶性有机颗粒和无机盐类含量高,分解以物理淋溶为主,分解速率快,随着分解的进行难溶性物质含量增加,分解速率下降。

实验过程中乌拉苔草分解速率始终最快,在分解前 103 d 中毛果苔草分解速率大于小叶章,但在 103 ~ 164 d 间小叶章分解速率大于毛果苔草 (图 1)。164 d 时,小叶章、乌拉苔草和毛果苔草的失重率分别为 31.98%、32.99% 和 28.91%,即乌拉苔草分解最快,小叶章次之,毛果苔草最慢。以分解 164 d 内的分解速率常数计算,3 种枯落物分解初始 95% 所需要的时间为 3.4a (*C. ma*)、3.6a (*C. aa*) 和 4.1a (*C. la*) (表 1)。

表 1 枯落物物质残留率 (%) 与分解天数 (d) 间的指数方程及其相应参数

Table 1 Equations and parameters of relations between litter mass remaining (%) and decomposition days (d)						
枯落物类型 Litter type	方程 Equation	k	R^2	p	分解时间 Time for decomposition (d)	$t_{0.95}$ (d)
<i>C. aa</i>	$y = 98.471e^{-0.0023t}$	0.0023	0.9901	<0.001	164	3.6
<i>C. ma</i>	$y = 96.451e^{-0.0024t}$	0.0024	0.9603	<0.001	164	3.4
<i>C. la</i>	$y = 96.531e^{-0.0020t}$	0.0020	0.9543	<0.001	164	4.1

K : 分解速率常数 Constant of decomposition rate; $t_{0.95}$: 95% 干物质分解需要的时间 (d) Time (d) needed for 95% of dry mass decomposed

2.2 枯落物营养元素变化动态

2.2.1 枯落物中 C、N 和 P 浓度与绝对含量的变化

图 2 中 a,b,c 显示了枯落物中元素浓度的变化,反映元素在枯落物中所占比例的动态;d,e,f 是营养元素绝对含量的变化曲线,直接反映枯落物中营养元素的实际含量的动态。

整个分解过程中毛果苔草枯落物中 C 浓度始终大于小叶章和乌拉苔草枯落物 (图 2. a)。小叶章和毛果苔草枯落物分解过程 C 浓度起伏较大,两者分别在第 72 天和 41 天达到最大值 442.6 g/kg 和 498.5 g/kg,随后又有所波动,到 164 d 时分别为 431.0 ~ 458.6 g/kg 和 443.3 ~ 473.3 g/kg。乌拉苔草枯落物中 C 浓度表现为整体下降趋势,在 103 d 时达到最低 425.6 g/kg,随后 103 ~ 164 d 内又有所增加。从图 2. d 可以看出,3 种枯落物中 C 绝对含量一直下降,即都发生了净损失。其中,毛果苔草枯落物中 C 绝对含量始终大于另外两种,在夏季 (分解 41 ~ 103 d) 乌拉苔草枯落物 C 释放速率最大。到 164 d 时,小叶章、乌拉苔草和毛果苔草枯落物中 C 的绝对含量分别为初始值的 65.6% ~ 70.5%、65.7% ~ 72.1% 和 66.0% ~ 71.1%。

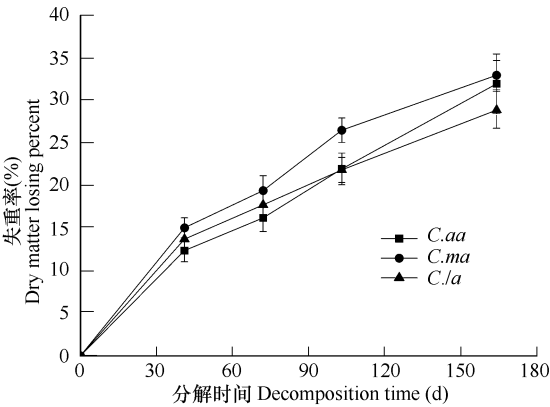


图 1 湿地枯落物分解过程中失重率变化曲线

Fig. 1 Changes of losing percent of marsh litter during the decomposition processes

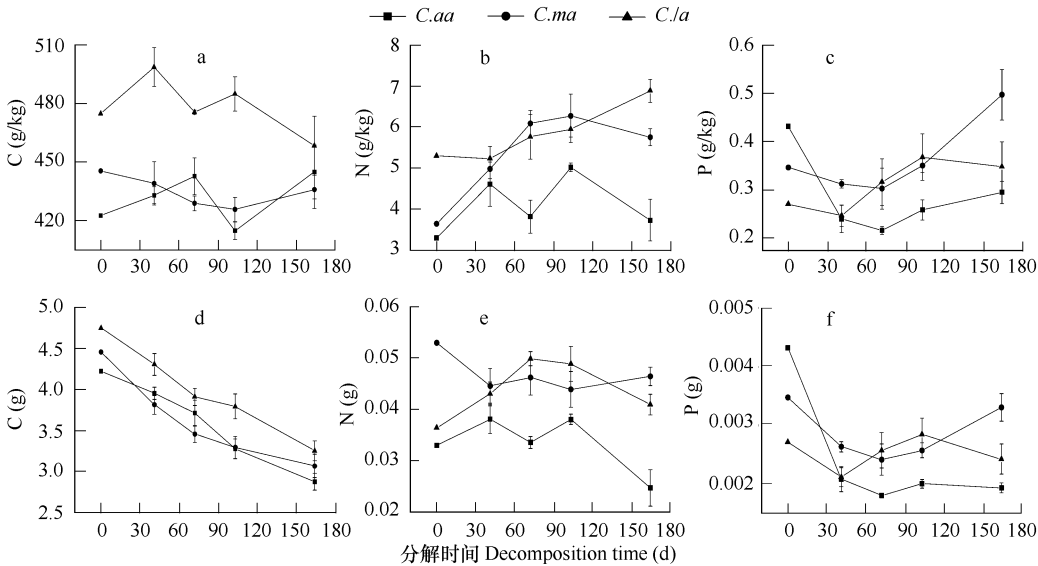


图 2 枯落物分解过程中 C、N 和 P 含量变化

Fig. 2 Changes of carbon, nitrogen and phosphorous of different marsh litter during the decomposition

3 种枯落物中 N 浓度整体上都表现为增加,但变化趋势不同 (图 2. b)。小叶章枯落物中 N 浓度波动较

大 毛果苔草枯落物中 N 浓度一直持续增加 ;乌拉苔草枯落物先增加后减少,整体上表现为增加。小叶章和乌拉苔草枯落物中 N 含量在前 41 d 迅速增加,分别达到初始值的 123.5% ~ 156.1% 和 130.1% ~ 143.5% ;而毛果苔草变化很小。原因可能是三江平原 5 月底到 6 月底为气温回升期,小叶章群落表面无淹水,乌拉苔草群落仅凹处淹水,水深较浅,这两种群落土壤温度回升快,而处于淹水的毛果苔草温度回升慢,土壤 25 cm 以下仍为冻层。土壤温度的差异,使得微生物活性和化学反应速率不同。随后小叶章和乌拉苔草中 N 浓度波动较大,实验结束时 N 浓度都大于初始浓度 而毛果苔草枯落物中 N 浓度在 164 d 实验期内一直持续增加。从 N 的绝对含量变化 图 2. e) 看,小叶章枯落物中在夏季 41 ~ 103 d) 发生积累,而后 (03 ~ 164 d) 释放,到 164 d 时为初始值的 64.1% ~ 85.6% ,净释放 毛果苔草在 164 d 分解过程中始终大于初始值,72 d 时达到最大值,随后稍有下降,到 164 d 时为初始值的 106.8% ~ 117.9% ,净增加 ;乌拉苔草在整个分解实验过程中,N 一直处于净释放,164 d 时 N 绝对含量占初始值的 84.3% ~ 90.9% 。

3 种枯落物中 P 元素浓度和绝对含量变化趋势基本相同,都在分解初期迅速下降,后又缓慢上升 图 2. c, f)。小叶章和乌拉苔草枯落物中 P 的浓度和绝对含量在 72 d 时达到最低,而毛果苔草在 41 d 时达到最小值,随后都有所增加。分解到 164 d 时 3 种枯落物中 P 浓度为初始值的 62.9% ~ 73.6% (C. aa)、128.3% ~ 158.6% (C. ma)和 109.4% ~ 147.5% (C. la)。从 P 绝对含量看,到 164 d 时平均分别为初始值的 42.7% (C. aa)、88.3% (C. ma)和 79.8% (C. la),都发生了净释放。

2.2.2 枯落物中 C/N 和 C/P 变化动态

164 d 中,3 种枯落物的 C/N 都发生了不同程度的下降 图 3. a)。乌拉苔草和毛果苔草枯落物中 C/N 一直下降 小叶章枯落物在分解到 103 d 前一直下降,在 103 ~ 164 d 稍有上升。164 d 时,三者 C/N 分别为初始值的 87.5% ~ 105.9% (C. aa)、75.35% ~ 82.2% (C. ma)和 57.6% ~ 65.3% (C. la)。分解过程中 C/N 始终为乌拉苔草 > 毛果苔草 > 小叶章。而 C/P 变化与 C/N 不同,三种枯落物都表现为先增加后减小 图 3. b)。小叶章和乌拉苔草枯落物 C/P 在 72 d 时达到最大值,而毛果苔草在 41 d 时达到最大值,这与 3 种不同枯落物中 P 含量最低点出现的时间对应。164 d 时,枯落物中 C/P 分别为初始值的 142.9% ~ 160.9% (C. aa)、69.1% ~ 83.3% (C. la)和 72.4% ~ 93.0% (C. ma),即小叶章枯落物中 C/P 增大,而毛果苔草和乌拉苔草中 C/P 减小。

2.3 枯落物分解速率影响因素分析

枯落物分解是复杂的生物物理化学过程,受到众多因素的影响。对枯落物分解的各项因子做主成分分析 (PCA 方法),结果表明前三项主成分累计贡献率 >83.5%,第一主成分贡献率 >51.0%。影响小叶章枯落物分解的第一主成分中载荷量大于 0.9 的因素主要有土壤 P 浓度 (-0.966)、枯落物 P 浓度 (-0.989)、枯落物 C/P (0.993)和土壤含水量 (0.933) 影响乌拉苔草枯落物分解的第一主成分中载荷量大于 0.9 的因素主要有土壤 C 浓度 (-0.997)、枯落物 P 浓度 (-0.933)、枯落物 C/N (0.918)、枯落物 C/P (0.985)、土壤温度 (0.910)和土壤容重 (0.971) 毛果苔草对应的因素有土壤 C 浓度 (0.972)、枯落物 C/N (-0.943)、枯落物 C/P (-0.976)等。说明所研究的枯落物分解速率不仅受到枯落物质量的影响,也受到自然温湿条件和周围环境中营养物质状况等环境因子的影响。

为进一步确定影响因素中的主要因子,对 3 种不同湿地植物枯落物失重率与枯落物营养物质含量及其比

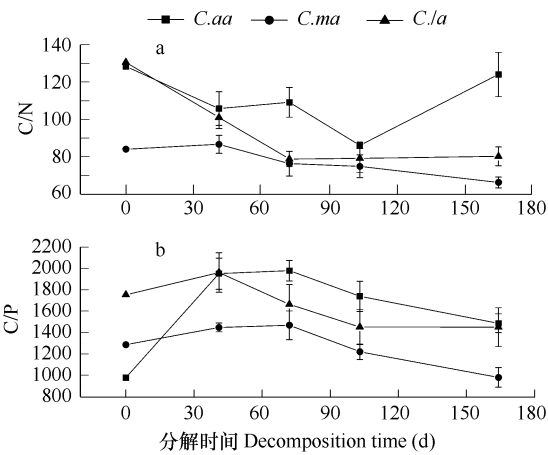


图 3 枯落物分解过程中 C/N 和 C/P 的变化
Fig. 3 Changes of C/N, C/P of remaining litter during the decomposition

值、周围土壤中营养物质含量及比值和土壤温度、含水量及近地面湿度等指标间做相关和回归分析 (stepwise 逐步进入法)。分析结果表明 (表 2), 小叶章枯落物失重率与 小叶章枯落物中 C/P 和土壤含水量显著相关; 乌拉苔草枯落物失重率与枯落物中 C/P、土壤 C 含量和土壤容重显著相关; 毛果苔草枯落物失重率则主要受到毛果枯落物 N 含量和土壤温度的影响。

表 2 枯落物物质失重率 (%) 主要影响因素及其相应参数和方程

Table 2 Equations and parameters of relations between litter losing percent and the influencing factors

枯落物类型 Litter type	影响因素 Influence factor	相关系数 (r) Correlation coefficient	回归方程 Regression equation	R ²	P
C. aa	枯落物 C/P	0.972	$y = 854.998 - 0.363x$	0.945	0.028
	土壤含水量	0.985	$y = 1177.02 - 3.315x$	0.985	0.015
C. ma	枯落物 C/P	0.961	$y = 658.86 - 0.332x$	0.924	0.039
	土壤容重	0.963	$y = 434.74 - 1362.3x$	0.928	0.037
C. la	枯落物 N	0.989	$y = -348.17 + 92.99x$	0.977	0.011
	土壤温度	0.958	$y = 292.20 - 6.767x$	0.918	0.042

3 讨论

3.1 研究方法

湿地植物特别是挺水植物具有明显的立枯阶段,且已有研究表明分解过程从立枯阶段开始。研究区湿地植物一般在 8 月份开始形成立枯,到 10 月底基本全部枯死,在冬季在风吹和积雪作用下倒伏,部分一直到来年 4 月仍处于立枯形态,但 5 月底立枯基本全部倒伏。因此,本实验中枯落物材料选择在春季的 4 月底取样,在 5 月份开始布设,尽量维持了枯落物原有的自然分解次序和所处的环境条件。

无脊椎动物对枯落物的分解作用已被证实^[8,23],但多数研究中由于受到研究方法的限制往往被忽视。该研究区土壤动物的分解作用有探讨^[9]。本研究采用不同网孔的分解袋,目的在于将无脊椎动物的作用计算在内。

3.2 枯落物分解影响因素

枯落物自身质量是影响枯落物分解难易程度的重要“基质”,主要决定于枯落物的组织结构、营养元素和有机化合物的种类和浓度,特别是在其它条件相同时,枯落物质量是影响分解的决定性因素。本研究表明,三种枯落物分解速率都与枯落物质量的不同指标显著相关。其中,小叶章和乌拉苔草枯落物分解中枯落物 C/P 是限制性因素,而毛果苔草枯落物分解中枯落物 N 含量是限制性因素 (表 2),而与 Lee 和 Bukaveckas^[4]研究所得的 C/N 是枯落物分解的最理想的指示指标不同。

枯落物分解过程中营养物质含量的变化,受到枯落物自身质量和微生物活动的影响。Gessner^[5]认为微生物对营养物质的固定是影响枯落物营养动态的重要过程。微生物固定营养物质的结果使得营养物质的浓度升高,甚至绝对含量增加。Köchy 和 Wilson^[6]认为微生物对营养元素的固定与枯落物 C/N、C/P 等性质和外源营养元素的可获得性有关。而且,异养生物 N 和 P 含量比枯落物中的含量高,因此分解过程中分解活动对营养物质的需求量常常超过枯落物的营养供给量^[7]。在这种前提下,周围环境中可溶性的无机营养物质可能成为分解过程的重要控制因素^[8,29]。小叶章和乌拉苔草枯落物初始 C/N 相对较低,分解过程中 N 都发生的净释放,说明枯落物中 N 绝对含量大于微生物分解活动的需求量,总体上不需要外源 N 补给;N 为其非限制性因素。毛果苔草枯落物初始 C/N 相对较高,分解中 N 总量发生了净增加,说明了毛果苔草枯落物中的 N 量不能满足微生物分解活动的需求量,需要外源 N 补给;N 为其分解的限制性因子。而 3 种枯落物中 P 含量都发生了净释放,这可能与 P 主要以磷酸根离子或化合物的形态存在而极容易发生淋溶有关。P 的释放也受到 C/P 的影响,C/P 初始值最小的小叶章枯落物释放量最大。从 P 绝对含量的变化上看,在整体下降趋势中夏季有不同程度的上升。这种波动说明微生物固定外源 P 和枯落物释放 P 间的动态平衡。毛果苔草枯落物夏季 P、N 绝对含量上升最为明显,主要是因为毛果苔草群落常年淹水的环境为枯落物分解提供了充足的可

利用性 N、P 等营养物质^[1]。从以上分析可知,枯落物自身质量和微生物活动的需求量,决定了枯落物中营养物质含量的动态,也决定了外源营养物质的影响强度,而且三者枯落物中外源营养物质的影响,仅在常年淹水的毛果苔草群落表现明显。相比而言,3 种枯落物的分解受到枯落物质量的影响更大,与 Debusk 和 Reddy^[10] 人研究结论相同。

碟型洼地中 3 种不同植物群落间的环境梯度,决定了影响分解的环境因子不同。小叶章-沼柳-越桔柳群落位于环型湿地的边缘,较其它群落气温回升快,全年平均气温高^[11],但该群落为常年不淹水群落,水分条件成为分解过程的主要影响因素。毛果苔草-漂筏苔草-狭叶甜茅群落靠近环型湿地的中心位置,常年淹水 10 ~ 30 cm^[12],为分解提供了充足的水分条件,而全年平均气温最低^[11],不利于微生物活性的发挥,温度因素成为毛果苔草枯落物分解的主要影响因素。乌拉苔草-毛果苔草群落,位于环型湿地的中间部位,该群落微地貌起伏较大,上层为高起的塔头,主要有苔草的根盘结而成,紧实坚硬,下层较低处为淹水的伴生种群落分布区,主要为毛果苔草,表层以疏松的枯落物和藓层为主,土壤疏松。此群落为碟形洼地湿地中常年不淹水群落和常年淹水群落的过渡群落,水位、水分条件波动最大。这种自然的干湿交替也能够加速枯落物的分解过程^[13]。而且乌拉苔草群落也是蚂蚁等无脊椎动物的主要分布区,生长季节无脊椎动物的采食、作穴等活动也大大改善了土壤的容重^[13]。因此,乌拉苔草-毛果苔草群落微地貌中土壤容重变化较大。土壤容重直接决定了土壤中水分、溶解氧含量,也影响了微生物和无脊椎动物的活性。在乌拉苔草群落土壤容重是枯落物分解的主要影响因素。由以上分析可知,处于不同环境梯度下的 3 种典型湿地植物枯落物分解的自然影响因子不同。

4 结论

(1) 3 种典型湿地枯落物分解过程具有明显的阶段性,前 41d 分解速率较快,随后缓慢下降。在分解 164d 内,小叶章、乌拉苔草和毛果苔草枯落物失重率分别为 31.98%、32.99% 和 28.91%。

(2) 分解过程小叶章和毛果苔草枯落物 C 浓度波动较大,乌拉苔草 C 浓度整体表现出下降趋势,3 种枯落物 C 绝对含量都发生净损失。小叶章枯落物中 N 浓度波动较大,毛果苔草枯落物 N 浓度一直持续增加,乌拉苔草枯落物先增加后减少,整体上表现为增加;对应 3 种枯落物中 N 绝对含量分别发生净释放、净增加和净释放。3 种枯落物中 P 浓度都先迅速下降后缓慢上升,绝对含量都表现为净释放。在 164 天的分解实验过程中,3 种枯落物的 C/N 都发生不同程度的下降;小叶章枯落物中 C/P 增大,毛果苔草和乌拉苔草中 C/P 减小。

(3) 小叶章和乌拉苔草枯落物分解速率与枯落物 C/P 显著相关,毛果苔草枯落物与枯落物 N 浓度显著相关,对应影响 3 种植物枯落物分解的主要环境因子分别为土壤含水量、土壤容重和土壤温度。相比而言,所研究枯落物的分解速率主要受枯落物质量的影响。

References :

[1] 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.

[2] Villar C A, de Cabo L, Vaithianathan P, *et al.* Litter decomposition of emergent macrophytes in a floodplain marsh of the lower Paraná River. *Aquatic Botany*, 2001, 70 (1) :105—116.

[3] Komínková D, Kuehn K A , Büsing N, *et al.* Microbial biomass, growth, and respiration associated with submerged litter of *Phragmites australis* decomposing in a littoral reed stand of a large lake. *Aquatic Microbial Ecology*, 2000, 22 (1) :271—282.

[4] Park S , Cho K H. Nutrient leaching from leaf litter of emergent macrophyte (*Cizania latifolia*) and the effects of water temperature on the leaching process. *Korean Journal of Biological Sciences*, 2003, 7 (4) :289—294.

[5] Lee A A, Bukaveckas P A. Surface water nutrient concentrations and litter decomposition rates in wetlands impacted by agriculture and mining activities. *Aquatic Botany*, 2002, 74 (4) :273—285.

[6] Atkinson R B, John Cairns J R. Plant decomposition and litter accumulation in depressional wetlands :functional performance of two wetland age classes that were created via excavation. *Wetlands*, 2001, 21 (1) :354—362.

- [7] Arp C D, Cooper D J, Stednick J D. The effects of acid rock drainage on *Carex aquatilis* leaf litter decomposition in Rocky Mountain fens. *Wetlands*, 1999,19 (4) :665 — 674.
- [8] Kuehn K A, Suberkropp K. Decomposition of standing litter of the freshwater emergent macrophyte *Juncus effusus*. *Freshwater Biology*, 1998,40 (4) 717 — 727.
- [9] Kuehn K A, Gessner M O, Wetzel RG, *et al.* Decomposition and CO₂ evolution from standing litter of the emergent macrophyte *Erianthus giganteus*. *Microbial Ecology*, 1999,38 (1) 50 — 57.
- [10] Tong S Z, Lv X G, Yang Q, *et al.* Progress and prospect in wetland research of Sanjiang Plain. *Resources Science*, 2005,27 (6) 180 — 188.
- [11] Liu J S, Sun X L, Yu J B. Nitrogen content variation in litters of *Calamagrostis angustifolia* and *Carex lasiocarpa* in Sanjiang Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000,11 (6) 898 — 902.
- [12] Zheng Y Q, Liu J S, Wang J D, *et al.* Variation of chemical elements of *Carex lasiocarpa* litter in Sanjiang Plain. *Glassland of China*, 2000,22 (1) 12 — 16.
- [13] Wang S Y, Yang Y X. Study on dynamics of litter decomposition and seasonal dynamics of Phosphorus in decomposed residue of *Calamagrostis Angustifolia* in Sanjiang Plain. *Glassland of China*, 2000,22 (6) 8 — 10.
- [14] Gao J Q, OU Y H, Lv X G, *et al.* Study on litter decomposition and influence factors in *Calamagrostis Angustifolia* wetland in Sanjiang Plain. *Journal of Water and Soil Conservation*, 2004,18 (4) 121 — 124,136.
- [15] Yang J S, Liu J S, Yu J B, *et al.* Decomposition and nutrient dynamics of marsh litter in the Sanjiang Plain, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006,26 (6) :1297 — 1302.
- [16] Liu X T, Ma X H. *Natural Environmental Changes and Ecological Protection in the Sanjiang Plain*. Beijing :Science Press, 2002. 65 — 202.
- [17] Li Y, Zhang Y Z, Zhang S W. Landscape structure changes and ecological effects of mire-wetland in Sanjiang Plain. *Scientia Geographica Sinica*, 2002,22 (6) 677 — 682.
- [18] Ana I L, Mogens R F, Miguel A P, *et al.* The effect of macrofauna, meiofauna and microfauna on the degradation of *Spartina maritime* detritus from a salt marsh area. *Acta Oecologica*, 1999,20 (4) 249 — 258.
- [19] Wu H T, Lu X G, Yang Q, *et al.* Effect of soil fauna on decomposition of litters in *Carex lasiocarpa* wetland in Sanjiang Plain . *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006,22 (1) 5 — 10.
- [20] Li Y K. *Conventional Methods of Agricultural Chemistry Analysis in Soil*. Beijing :Science Press, 1983. 272 — 277.
- [21] Liu G S. *Soil physical and chemical analysis & description of soil profiles*. Beijing :China Standards Press, 1996. 31 — 38.
- [22] Olson J S. Energy storage and the balance of products and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 1963,44 (1) :322 — 331.
- [23] Wu H T, Lu X G, Yang Q, *et al.* Ecological characteristics and functions of soil fauna community. *Acta Pedologica Sinica*, 2005,43 (1) 314 — 323.
- [24] Lee A A, Bukaveckas P A. Surface water nutrient concentrations and litter decomposition rates in wetlands impacted by agriculture and mining activities. *Aquatic Botany*, 2002,74 (4) :273 — 285.
- [25] Gessner M O. Mass loss, fungal colonisation and nutrient dynamics of *Phragmites australis* leaves during senescence and early aerial decay. *Aquatic Botany*, 2001,69 (4) :325 — 339.
- [26] Köchy M, Wilson S D. Litter decomposition and nitrogen dynamics in Aspen forest and Mixed-grass prairie. *Ecology*, 1997,78 (1) :732 — 739.
- [27] Enr quez S, Duarte C M, Sand-Jensen K. Patterns in decomposition rates among photosynthetic organisms :the importance of detritus C :N :P content. *Oecologia*, 1993,94 (4) :457 — 471.
- [28] Aerts R, Wallen B, Malmer N. Growth-limiting nutrients in Sphagnum-dominated bogs subject to low and high atmospheric nitrogen supply. *Journal Ecology*, 1992,80 (1) 131 — 140.
- [29] Verhoeven JTA, Keuter A, Van Logtestijn R, *et al.* Control of local nutrient dynamics in mires by regional and climatic factors :a comparison of Dutch and Polish sites. *Journal Ecology*, 1996,84 (4) 647 — 656.
- [30] Debusk W F, Reddy K R. Litter decomposition and nutrient dynamics in a phosphorus enriched everglades marsh. *Biogeochemistry*, 2005,75 (1) :217 — 240.
- [31] Liu J P, Yang Q, Lu X G. Studies on the soil temperature gradient in annular wetlands in the Sanjiang Plain, China. *Wetland Science*, 2005,3

() 42—47.

[2] Yang Q, Liu J P, Lu X G, *et al.* Structure and function of soil-vegetation-animal system of annular wetland in the Sanjiang Plain. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23 (4) 72—77.

[3] Anderson J T, Smith LM. The effect of flooding regimes on decomposition of *Polygonum pensylvanicum* in Playa wetlands (Southern Great Plains, USA). *Aquatic Botany*, 2002, 74 (1) 97—108.

参考文献：

[0] 佟守正,吕宪国,杨青,等. 三江平原湿地研究进展与展望. *资源科学*, 2005, 27 (6) 180~188.

[1] 刘景双,孙雪利,于君宝. 三江平原小叶章、毛果苔草枯落物中氮素变化分析. *应用生态学报*, 2000, 11 (6) 898~902.

[2] 郑玉琪,刘景双,王金达,等. 三江平原典型沼泽生态系统毛果苔草枯落物中化学元素变化分析. *中国草地*, 2000, 22 (1) 12~16.

[3] 王世岩,杨永兴. 三江平原小叶章枯落物分解动态及其分解残留物中磷素季节动态. *中国草地*, 2000, 22 (6) 6~10.

[4] 高俊琴,欧阳华,吕宪国,等. 三江平原小叶章湿地枯落物分解及其影响因子研究. *水土保持学报*, 2004, 18 (4) 121~124, 136.

[5] 杨继松,刘景双,于君宝,等. 三江平原沼泽湿地枯落物分解及其营养动态. *生态学报*, 2006, 26 (1) 1297~1302.

[6] 刘兴土,马学慧. 三江平原自然环境变化与生态保育. 北京: 科学出版社, 2002. 65~202.

[7] 李颖,张养贞,张树文. 三江平原沼泽湿地景观结构变化与环境效应. *地理科学*, 2002, 22 (6) 677~682.

[9] 武海涛,吕宪国,杨青,等. 土壤动物对三江平原典型毛果苔草湿地枯落物分解的影响. *生态与农村环境学报*, 2006, 22 (1) 5~10.

[10] 李酉开. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1983. 272~277.

[11] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996. 31~38.

[13] 武海涛,吕宪国,杨青,等. 土壤动物主要生态特征与生态功能研究进展. *土壤学报*, 2005, 43 (1) 314~323.

[11] 刘吉平,杨青,吕宪国. 三江平原典型环型湿地土壤温度梯度研究. *湿地科学*, 2005, 3 (1) 42~47.

[12] 杨青,刘吉平,吕宪国,等. 三江平原典型环型湿地土壤-植被-动物系统的结构及功能研究. *生态学杂志*, 2004, 23 (4) 72~77.