

上海市大莲湖池杉林三种优势植物枯落物分解动态*

王斌 郑思俊 朱义 巨波 赵慧娟 张群 崔心红**

(上海市园林科学研究所, 上海 200232)

摘要 用枯落物分解网袋法,对上海市大莲湖湿地池杉林内3种优势植物池杉(*Taxodium ascendens*)、孔雀稗(*Echinochloa crusgavonis*)、日本看麦娘(*Alopecurus japonicus*)的枯落物进行了190 d的分解培养,测定了解速率及其C、N、P养分元素释放动态。用收集器法对池杉林枯落物的数量进行了研究。结果表明,池杉林内池杉每年产生枯落物量为 $5.70 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,是该林地枯落物的主要来源。3种植物枯落物的分解速率(枯落物的干重量损失)依次为日本看麦娘>孔雀稗>池杉。C元素含量在3种植物枯落物中随时间显著下降;N、P元素在池杉枯落物中均有不同程度的富集,而在日本看麦娘和孔雀稗中则没有发生富集现象。

关键词 大莲湖;湿地;枯落物分解

中图分类号 Q948 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)3-0577-06

Decomposition dynamics of the litters from three dominant plant species in *Taxodium ascendens* forest in Dalian Lake of Shanghai. WANG Bin, ZHENG Si-jun, ZHU Yi, JU Bo, ZHAO Hui-juan, ZHANG Qun, CUI Xin-hong** (*Shanghai Landscape Gardening Research Institute, Shanghai 200232, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(3): 577-582.

Abstract: By using litterbag method, a 190-day incubation experiment was conducted to study the decomposition rates and the release dynamics of C, N, and P of the litters from three dominant species (*Taxodium ascendens*, *Echinochloa crusgavonis*, and *Alopecurus japonicus*) in *T. ascendens* forest in Dalian Lake, Shanghai. In the meantime, the quantity of the litters in the *T. ascendens* forest was measured by using collection container. In the forest, the annual production of *T. ascendens* litters was $5.70 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, being the primary source of the litters in the forest. The litter decomposition rate (dry mass loss rate) was in the order of *A. japonicus* > *E. crusgavonis* > *T. ascendens*. During the experimental period, the C content of the three species litters decreased significantly, while the N and P contents had somewhat increase in *T. ascendens* litters but not in *E. crusgavonis* and *A. japonicus* litters.

Key words: Dalian Lake; wetland; litter decomposition.

植物群落对湿地生态系统具有重要意义,一方面植物群落可净化水质、美化环境,另一方面产生大量的枯落物进入湿地有机质库中(Wetzel, 1990, 1995; Kuehn & Suberkropp, 1998)。植物枯落物的分解是湿地物质循环和能量流动的重要来源之一,对维持湿地功能起重要作用(吕宪国等, 1995)。枯落物量的大小、元素组成、分解速率及其元素富集对湿地物质循环均产生极大影响(Berg, 1986)。杨明生等(2008)和李文朝等(1997a, 1997b, 2001)对太

湖的研究表明,湿生植物在生长季从湖水和沉积物中吸收和富集大量N和P以及重金属等成分,能够改善水质。然而,湿生植物在生长季后死亡,逐渐腐烂分解释放出的氮、磷又提高了水体营养盐浓度,降低了水体和沉积物中溶解氧的水平。当水体中残留的生物量很大时,极易造成水体缺氧,促使植物体厌氧分解,造成水体发黄、发臭,很可能成为水华暴发的诱因(Hall & Meyer, 1998; 潘慧云等, 2008)。同时,尚未分解的残余生物物质会堆积在湖底底泥上,产生大量的生物沉积,并成为湖泊N、P的内源。这将加速浅水湖泊的淤浅,使湖泊丧失功能,引起沼泽化(Takashi *et al.*, 2000)。

* 林业公益性行业科研专项(201104088)资助。

** 通讯作者 E-mail: kysxinhongcui@163.com

收稿日期: 2012-07-10 接受日期: 2012-12-23

显然,植物枯落物分解过程的研究,对于探讨湿地的多种功能与机理以及预测湿地变化可能带来的环境效应具有重要意义。但湿地植物的枯落物分解包括复杂的物理、化学、生物过程,目前人们对其认识还很少(武海涛等,2006)。在实践中,已有大量的挺水或湿生植物被成功引入湖岸带以净化水质、维持湿地的稳定和美化景观。这些植物的枯落物将直接进入水体中。然而,人们对此类枯落物在水中的降解或沉积规律以及是否存在潜在的二次污染等问题缺少认识,这将制约湿生植物管理、利用策略的科学制定。本研究以上海市水源地的核心区域大莲湖湿地的池杉(*Taxodium ascendens*)林为对象,采用网袋分解法对该湿地群落中优势植物的枯落物降解动态进行了研究,以期为城市重要水源地的城市湿地管理提供科学依据。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究区概况

大莲湖湿地位于上海市青浦区,北纬 $31^{\circ}04'$,东经 $121^{\circ}00'$,属于淀山湖下游,总面积约 14.6 km^2 ,核心区面积 4.6 km^2 ,是上海市水源地的核心区域。经上海市淀山湖湿地生态修复工程的扩大,大莲湖湿地现有池杉林面积共计为 5.33 hm^2 。大莲湖水环境质量不仅影响城市用水安全,同时也影响黄浦江上游水源地的生物资源保育、水环境保护和净化等。大莲湖区域属北亚热带季风气候,年平均气温

约 $17.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量约 1050 mm ,降水集中在6—9月份,农田土壤类型属湖泊沉积母质生成的青紫土。本研究地点为大莲湖池杉林区。由于水位和水量受上游来水影响外,也与黄浦江潮位的变化有关,大莲湖湿地池杉林的水域面积和水位随季节和潮汐不同变化较大,丰水期整个池杉林均被淹没,水深可达 2 m ,枯水期池杉林大部分露出水面,仅部分地点仍有积水。大莲湖池杉平均高度 11.60 m ,平均胸径为 26.10 cm , 5.33 hm^2 林内经统计约有池杉 1300 株。

1.2 研究方法

1.2.1 大莲湖池杉林水质、底泥、植被调查 2009年3月、6月、9月、11月分别对大莲湖池杉林的植被状况进行了调查。调查显示,池杉群落可分为乔木层($>8\text{ m}$)、灌木层($2\sim 8\text{ m}$)、草本层3个层次。乔木层优势种为池杉,平均盖度为 70% ;灌木层仅零星分布几株小径级的池杉和少量芦苇(*Phragmites australis*);草本层盖度 85% ,主要优势种为孔雀稗(*Echinochloa crusgavonis*)、日本看麦娘(*Alopecurus japonicus*)、双穗雀稗(*Paspalum distichum*)等。因此,大莲湖池杉群落主要为乔-草结构。

于2009年3月对研究区域的水质、底泥进行了取样、分析。大莲湖池杉林的水质、底泥调查结果见表1、表2。结果表明,大莲湖池杉林地区的水域已处于严重的富营养化状态,池杉林水体中各个采样点的氮、磷污染均较为严重,总氮超过了 $2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,为劣V类水质;底质中氮、磷含量也非常高。

表1 大莲湖池杉林底泥的主要化学性质

Table 1 Chemical properties of the deposits under *Taxodium ascendens* stand in Dalian Lake

编号	有机质 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	总氮 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	总磷 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	铵态氮 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	速效磷 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	鲜土含水量 (%)
1	40.78 ± 2.88	1.96 ± 0.03	0.65 ± 0.03	60.66 ± 3.26	6.83 ± 0.92	53.18 ± 1.56
2	50.05 ± 1.57	2.34 ± 0.03	0.66 ± 0.08	31.77 ± 2.35	12.97 ± 1.22	60.35 ± 2.92
3	175.96 ± 7.53	7.11 ± 0.05	0.96 ± 0.09	49.17 ± 4.21	23.67 ± 1.65	68.43 ± 0.97
4	41.20 ± 1.91	2.06 ± 0.01	1.15 ± 0.07	24.79 ± 2.13	60.54 ± 3.67	47.48 ± 2.38
5	47.31 ± 2.10	3.15 ± 0.11	1.42 ± 0.08	26.55 ± 1.68	65.50 ± 4.01	64.60 ± 3.05

数值为平均值 \pm 标准误。

表2 大莲湖池杉林的主要水质指标

Table 2 Parameters of water quality of *Taxodium ascendens* stand in Dalian Lake

编号	化学需氧量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	生化需氧量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	氨态氮 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	硝态氮 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总氮 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总磷 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	pH 值
1	27.20 ± 0.90	8.93 ± 0.21	0.06 ± 0.01	0.70 ± 0.06	1.90 ± 0.20	0.22 ± 0.09	7.35 ± 0.57
2	41.70 ± 3.39	7.07 ± 0.25	1.11 ± 0.03	0.67 ± 0.12	3.83 ± 0.03	1.26 ± 0.20	7.32 ± 0.18
3	34.70 ± 0.82	6.00 ± 0.26	0.22 ± 0.08	0.53 ± 0.12	2.57 ± 0.07	0.24 ± 0.06	7.23 ± 0.33
4	30.20 ± 3.00	9.00 ± 0.10	0.01 ± 0.00	0.53 ± 0.07	2.07 ± 0.09	0.90 ± 0.13	7.44 ± 0.05
5	16.00 ± 1.59	3.20 ± 0.10	0.73 ± 0.01	3.20 ± 0.06	4.87 ± 0.07	0.17 ± 0.02	7.56 ± 0.29

数值为平均值 \pm 标准误。

1.2.2 大莲湖池杉林内植物体生物量估算 于2009年6月在大莲湖池杉林乔木层共设置400 m²池杉标准样方4个,采用乔木层模型估算法计算生物量,池杉生物量模型以浙江省重点公益林生物量模型(袁位高,2009)中的杉类模型(如下式所示)为依据进行计算: $W=W_1+W_2+W_3$

$$W_1=0.0647H^{0.8959}D^{1.4880}$$

$$W_2=0.0971H^{1.7814}D^{0.0346}$$

$$W_3=0.0617H^{-0.10374}D^{2.115252}$$

式中, W 为总生物量(kg), W_1 为树干生物量, W_2 为树冠生物量, W_3 为树根生物量, H 为树高(m), D 为胸径(cm)。

池杉林的灌木层和草本层采用小样方收割法来估计生物量。在大莲湖池杉林每个标准样方中分别随机设置4个1 m×1 m小样方,共设置16个小样方,采集样方所有植物(包括地上部和地下部)带回实验室,于80℃恒温箱烘至恒重后称重,计算生物量。

1.2.3 大莲湖池杉林内枯落物现存量估算 在池杉林样方内随机布点,设置10个1 m×1 m小样方,收集小样方内所有枯落物,并带回实验室去除淤泥等杂质后,于80℃恒温箱烘至恒重并计算枯落物量。

1.2.4 大莲湖池杉林内枯落物样品采集和试验方法 用枯落物收集器收集池杉枯落物,将长度、宽度、高度分别为1 m×1 m×0.25 m的收集器设置在池杉林的样地里,底部距地面20 cm,每个样地设置10个收集器。于2009年的1月份至2010年的1月份,每3个月1次,分4次收集枯落物带回实验室,枯落物在80℃恒温条件下烘干至恒重后称重。

枯落物降解试验的材料采自大莲湖池杉林3种优势植物池杉、孔雀稗、日本看麦娘。分别为池杉当年叶片枯落物及孔雀稗、日本看麦娘两种植物地面上样品(茎、叶)各10 kg左右,清洗干净,风干后备用。

将风干后的材料在80℃下干燥至恒重。从每种植物材料中随机称取10 g的样品16份,分别放入规格为20 cm×30 cm的1 mm尼龙筛网中并标记,将其中一袋样品作为试验的初始样品密封保存,留做化学分析。其他15袋样品悬挂在尼龙绳上,一同放入大莲湖湿地池杉林试验区湖水中,使样品试验期间一直被水浸泡。每30 d左右收集1次样品,每种植物每次随机收取3袋(3个重复),放入0.5 mm土壤筛中清洗,然后置于80℃烘干至恒重并称

量、密封保存,留做化学分析。试验时间为2010年1月至7月共190 d。

1.3 分析与计算方法

枯落物中的总碳含量TC(重铬酸钾-硫酸消化法,LY/T 1237-1999);总氮含量TN(硫酸-高氯酸消煮,LY/T 1271-1999,凯氏法测定,LY/T 1269-1999);总磷含量TP(硫酸-高氯酸消煮,LY/T 1271-1999,钼锑抗比色法测定,LY/T 1270-1999)。

枯落物分解的计算方法:测定枯落物在不同分解时间的残余质量,可以得到枯落物在不同分解时间的残留率: $Y=X_t/X_0 \times 100\%$ 。枯落物分解速率可根据Olson(1963)的衰减指数模型计算: $X_t/X_0 = e^{-kt}$,式中: X_0 为分解初始干质量; t 为分解时间(d); X_t 为分解 t 天后的残留干物质重; k 为分解系数即平均分解速率。用Olson衰减指数模型拟合分解模型,得到分解常数 k (d⁻¹),并由此推断枯落物分解半衰期($t_{0.5}$,分解50%所需时间)和分解95%所需时间($t_{0.95}$)等指标。

1.4 数据处理

所有数据均采用3次重复的平均值,应用Excel 2003和SPSS 13.0软件进行数据处理,统计分析采用one-way ANOVA,通过LSD多重检验法检验显著性。

2 结果与分析

2.1 大莲湖池杉林生物量

根据模型计算,每株池杉平均生物量为133.70 kg,因而池杉总生物量可达32.61 t·hm⁻²,其中树干为18.94 t·hm⁻²,树冠为2.09 t·hm⁻²,树根为11.58 t·hm⁻²。5.33 hm²池杉林内灌木层和草本层现存量可达1.63 t·hm⁻²,枯落物现存量可达1.40 t·hm⁻²。因此,大莲湖池杉林内枯落物及活体植物生物量约为35.64 t·hm⁻²。5.33 hm²池杉林内每年池杉产生总量约5.70 t·hm⁻²的枯落物。由此可见,池杉生物量及枯落物量较大,为大莲湖池杉林湿地中枯落物重要来源。

2.2 枯落物养分元素分析和分解动态模型

3种植物的枯落物中主要养分元素TC、TN、TP初始含量有一定的差异(表3),从表3可知,池杉中TC含量最高,TN、TP含量最低,C/N最大为49.86;日本看麦娘的TN、TP含量最高,C/N最小只有16.99。

表3 3种植物枯落物的初始化学组成

Table 3 Initial chemical contents in the litters of the three species

植物种类	总碳(mg·g ⁻¹)	总氮(mg·g ⁻¹)	总磷(mg·g ⁻¹)	碳氮比
池杉 <i>Taxodium ascendens</i>	528.03±20.15 a	10.59±2.63 b	0.44±0.08 c	49.86±2.51 a
孔雀稗 <i>Echinochloa crusgavonis</i>	410.94±28.97 b	13.69±1.97 b	1.09±0.13 b	30.02±1.46 b
日本看麦娘 <i>Alopecurus japonicus</i>	462.37±33.56 b	27.21±3.29 a	3.57±0.21 a	16.99±2.26 c

数值为平均值±标准误;同行不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$ 。

表4 枯落物分解动态的回归方程

Table 4 Regression analysis for the litter decomposition dynamics

植物种类	Olson 指数模型	分解系数 k (d ⁻¹)	相关系数	半分解时间(d)	95% 分解时间(d)
池杉	$y = 86.67e^{-0.002t}$	0.0020	0.938 **	275	1426
孔雀稗	$y = 101.04e^{-0.0053t}$	0.0053	0.979 **	133	567
日本看麦娘	$y = 95.17e^{-0.0106t}$	0.0106	0.928 **	61	278

** $P<0.01$ 。

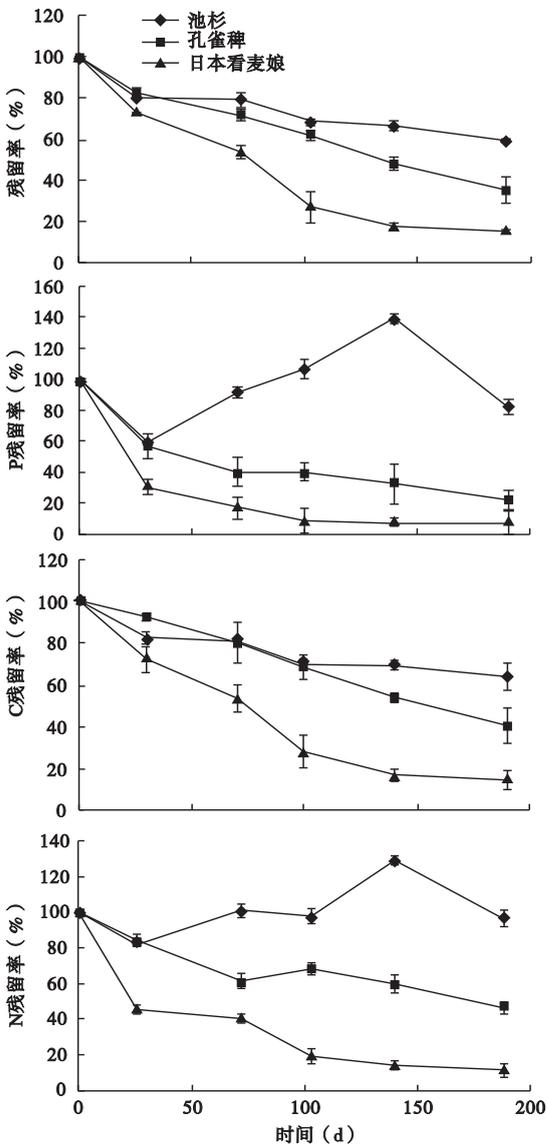


图1 降解试验中3种植物的枯落物质量及C、N、P元素的变化

Fig.1 Dynamics of dry mass remaining and nutrient element contents in the three species residues during the litter decomposition trial

表4所列池杉枯落物的平均分解速率(分解系数 k , d⁻¹)最小,仅为0.002,分解速度最慢;孔雀稗枯落物的分解系数为0.0053;日本看麦娘最大,为0.0106,分解速度最快。从分析数据可见,枯落物中C/N值大的池杉降解速率最慢,其分解半衰期为275 d;相反,枯落物中C/N值小的日本看麦娘降解速率快,分解半衰期仅61 d。枯落物中C/N值与降解速率成负相关。

2.3 枯落物分解速率及其碳、氮、磷释放动态

图1显示3种枯落物干物质残留量为池杉>孔雀稗>日本看麦娘,且有差异显著。表明池杉枯落物的分解速度最慢,日本看麦娘的枯落物分解释放速度最快。到试验结束时(190 d),池杉枯落物的干物质残留率为59.36%,孔雀稗为35.44%,而日本看麦娘仅为15.12%(图1)。3种枯落物的干物质和C的分解释放动态基本一致。在试验最初30 d,3种枯落物的N、P都快速释放,特别是日本看麦娘N、P释放分别达到44.78%、69.47%,并且P释放的速度快于N的释放;30 d后,孔雀稗和日本看麦娘残留物中N、P释放速度放缓,而池杉残留物开始富集N、P;试验100 d后,孔雀稗和日本看麦娘残留物中N、P释放速度十分缓慢;试验140 d时,池杉残留物富集的N、P量达到最大,开始向周围释放N、P(图1)。

3 讨论

枯落物的分解速率与枯落物的物质组成有着密切的关系(Almendros *et al.*, 2000)。枯落物初始N、P含量常常与其早期分解速率呈正相关(Vesterdal, 1999; Berg, 1986, 2000)。枯落物的C/N被认为

是制约枯落物分解速率最重要的因素之一,同时也是预测枯落物分解速率最理想的质量指标(Lee & Bukaveckas, 2002)。研究表明,在湿地环境中,枯落物的初始 C/N 都与分解速率呈负相关关系,如 Lee 和 Bukaveckas(2002)等发现,美国中西部湿地优势物种的枯落物分解速率均与枯落物中 C/N 呈显著负相关,这一现象在本研究中得到验证。枯落物的物质组成也主导着各元素在凋落物分解过程中的释放规律。一般认为,枯落物中养分元素的释放模式有 3 种:1) 淋溶-富集-释放;2) 富集-释放;3) 直接释放(郭晋平等,2009)。本试验结果显示,大莲湖湿地的 3 种植物枯落物分解速率(枯落物的干重量损失)依次为日本看麦娘>孔雀稗>池杉;其中养分元素的释放主要表现为两种模式。池杉枯落物中养分元素释放的方式为:30 d 内可溶成分的淋溶释放,30 d 至 140 d 为 N、P 富集状态,140 d 后富集达到最大并开始释放,呈现释放-富集-释放的模式,且分解过程中 N、P 的释放和富集是同步变化的。这是由于池杉枯落物中 C 含量高,比较难分解的物质如木质素、纤维素等含量较多,由 N、P 组成的蛋白质、有机酸等易于分解物质含量较低,C/N 值大,因此分解速率慢。孔雀稗和日本看麦娘的枯落物中 N、P 含量高,C/N 值小,分解释放速率则快;其中的 C、N、P 等养分均表现为直接淋溶释放为主,不出现富集过程。这一结果与王瑾和黄建辉(2001)、莫江明(2004)、刘颖(2009)、林开敏(2010)等对五角枫(*Acer mono*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、楠木(*Phoebe bournei*)、木荷(*Schima superba*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、锥栗(*Castanopsis chinensis*)、华润楠(*Machilus chinensis*)、红松(*Pinus koraiensis*)、冷杉(*Abies nephrolepis*)、红松云杉(*Picea jezoensis*)、岳桦(*Betula ermanii*)等的研究结果相同。他们的研究显示,阔叶树种叶凋落物比针叶树种叶凋落物易分解,草本植物叶凋落物比木本植物叶凋落物易分解,且草本植物叶和阔叶树种叶凋落物中的营养元素也较易释放。本研究中,池杉、孔雀稗和日本看麦娘的枯落物分解也遵循此释放规律。

环淀山湖区域是上海市最大的水源保护区和生态涵养区,大莲湖湿地为其核心区域(沈根祥等,2010)。然而,该水域生态环境已处于严重的富营养化状态,为劣 V 类水质(裴恩乐等,2010),并且底

质中氮、磷含量也非常高,这种状况对上海饮用水安全构成了严重的威胁。因此,对淀山湖区域进行污染的控制和对湖内植物的管理非常重要。本研究显示,池杉、孔雀稗、日本看麦娘枯落物分解过程具有明显的阶段性,前 30 d 分解速率较快,随后缓慢下降。因此,建议加强对大莲湖湿生植物的管理,在湿地植物进入衰亡的季节时尽早、尽快剔除池杉枯落物以及日本看麦娘、孔雀稗等枯败植物,以减缓湖泊 N、P 的负荷。

参考文献

- 郭晋平,丁颖秀,张芸香. 2009. 关帝山华北落叶松林凋落物分解过程及其养分动态. 生态学报, **29**(10): 5684-5695.
- 李文朝,陈开宁,吴庆龙,等. 2001. 东太湖水生植物生物质腐烂分解实验. 湖泊科学, **13**(4): 331-336.
- 李文朝. 1997a. 东太湖沉积物中氮的积累与水生植物沉积. 中国环境科学, **17**(5): 418-421.
- 李文朝. 1997b. 东太湖水生植物的促淤效应与磷的沉积. 环境科学, **18**(3): 9-12.
- 林开敏,章志琴,叶发茂,等. 2010. 杉木人工林下杉木、楠木、木荷叶凋落物分解特征及营养元素含量变化的动态特征. 植物资源与环境学报, **19**(2): 34-39.
- 刘颖,武耀祥,韩士杰,等. 2009. 长白山四种森林类型凋落物分解动态. 生态学杂志, **28**(3): 400-404.
- 吕宪国,何岩,杨青. 1995. 湿地碳循环及其在全球变化中的意义//陈宜瑜. 中国湿地研究. 长春:吉林科学技术出版社: 68-72.
- 莫江明,薛璟花,方运霆. 2004. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的响应. 生态学报, **24**(7): 1413-1420.
- 潘慧云,徐小花,高士祥. 2008. 沉水植物衰亡过程中营养盐的释放过程及规律. 环境科学研究, **21**(1): 64-68.
- 裴恩乐,郭文利,夏述忠. 2010. 大莲湖生态修复区浮游生物分布状况及变动趋势. 野生动物, **31**(3): 154-156.
- 沈根祥,王振旗,钱晓雍,等. 2010. 上海大莲湖区域农业面源污染特征研究. 上海农业学报, **26**(1): 55-59.
- 王瑾,黄建辉. 2001. 暖温带地区主要树种叶片凋落物分解过程中主要元素释放的比较. 植物生态学报, **25**(3): 375-380.
- 武海涛,吕宪国,杨青. 2006. 湿地草本植物枯落物分解的影响因素. 生态学杂志, **25**(11): 1405-1411.
- 杨明生,熊邦喜,杨学芬,等. 2008. 武汉南湖沉积物中水生植物残体及其氮磷分布. 生态学报, **28**(4): 1508-1513.
- 袁位高,江波,葛永金,等. 2009. 浙江省重点公益林生物量模型研究. 浙江林业科技, **29**(2): 1-5.
- Almendros G, Dorado J, González-Vila FJ, et al. 2000. U¹³C

- NMR assessment of decomposition patterns during composting of forest shrub biomass. *Soil Biology & Biochemistry*, **32**: 793–804.
- Berg B. 2000. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management*, **133**: 13–22.
- Berg B. 1986. Nutrient release from litter and humus in coniferous forest soils: A mini review. *Scandinavian Journal of Forest Research*, **1**: 359–369.
- Hall RO, Meyer JL. 1998. The trophic significance of bacteria in a detritus-based foodweb. *Ecology*, **79**: 1995–2012.
- Kuehn KA, Suberkropp K. 1998. Decomposition of standing litter of the freshwater emergent macrophyte *Juncus effuses*. *Aquatic Microbiology Ecology*, **14**: 171–182.
- Lee AA, Bukaveckas PA. 2002. Surface water nutrient concentrations and litter decomposition rates in wetlands impacted by agriculture and mining activities. *Aquatic Botany*, **74**: 273–285.
- Olson JS. 1963. Energy storage and the balance of producers and decomposition in ecological systems. *Ecology*, **44**: 332–341.
- Takashi A, Trung KV, Jagath M. 2000. Modeling the effects of macrophyte growth and decomposition on the nutrient budget in Shallow Lakes. *Aquatic Botany*, **68**: 217–237.
- Vesterdal L. 1999. Influence of soil type on mass loss and nutrient release from decomposing foliage litter of beech and Norway spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, **29**: 95–105.
- Wetzel RG. 1995. Death, detritus and energy flow in aquatic ecosystems. *Freshwater Biology*, **33**: 83–89.
- Wetzel RG. 1990. Detritus, macrophytes and nutrient cycling in lakes. *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia Dott. Marco De Marchi Verbania Pallanza*, **47**: 233–249.
-
- 作者简介 王 斌, 1973年生, 博士, 主要从事生态学研究。
E-mail: swzpb@hotmail.com
责任编辑 张 敏
-