

文章编号:1000-5641(2013)05-0027-08

# 滨海围垦湿地芦苇凋落物分解 对模拟增温的响应

关阅章<sup>1</sup>, 刘安田<sup>2</sup>, 仲启铖<sup>1</sup>, 王开运<sup>1,3</sup>

(1. 华东师范大学 环境科学系, 上海 200062; 2. 华东师范大学 生命科学学院, 上海 200062;  
3. 华东师范大学 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 采用开顶式生长室(Open-top chambers, OTC)模拟增温, 结合网袋法, 研究了空气增温( $1.984 \pm 0.7$ ) °C对崇明东滩滨海围垦湿地代表植物——芦苇(*Phragmites australis*)不同凋落物组分(茎和叶)分解速率的影响, 并分析增温和非增温条件下凋落物分解速率与1.2 m高度的空气温度、0~5 cm土壤温度及0~5 cm土壤湿度3种主要环境因子的相关性及其变化. 结果表明:① 增温与不增温处理下, OTC组和对照(CG)组芦苇茎的年分解率分别为49.20%和45.11%, 而叶的年分解率分别为63.52%和58.53%, 增温对叶的分解促进作用更加显著;② 增温增大了湿地芦苇凋落物分解常数K值, OTC组和CG组茎的平均K值分别为0.028和0.027, 叶的平均K值分别为0.093和0.080, 叶的增幅显著大于茎的增幅;③ 3种主要环境因子与滨海围垦湿地芦苇凋落物的分解速率相关性由大到小依次是1.2 m空气温度>0~5 cm土层温度>0~5 cm土层湿度, 且增温使分解速率与3种环境因子相关性程度均增大, 其中, 叶分解速率与土壤温度的相关性变化最显著, 增大6.43%. 综上所述, 气温是影响滨海围垦湿地芦苇凋落物分解的关键环境因子, 增温不仅会增大滨海围垦湿地芦苇凋落物的分解速率, 同时也会改变芦苇凋落物分解速率与主要环境因子的相关性.

**关键词:** 湿地; 芦苇; 凋落物分解; 增温; 开顶式生长室

**中图分类号:** Q948 **文献标识码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-5641.2013.05.004

## Responses of decomposition of *Phragmites australis* litter to simulated temperature enhancement in the reclaimed coastal wetland

GUAN Yue-zhang<sup>1</sup>, LIU An-tian<sup>2</sup>, ZHONG Qi-cheng<sup>1</sup>, WANG Kai-yun<sup>1,3</sup>

(1. Department of Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. Department of Life Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

3. Shanghai Key Laboratory of Urbanization Ecological Restoration, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

收稿日期:2012-07

基金项目:国家科技部“十一五”科技支撑重大项目(2006BAC01A14);上海市科委科技创新行动计划(10dz1200602, 10dz1200902)

第一作者:关阅章,女,研究生,研究方向为湿地生态系统碳循环. E-mail: guanyuezhang@126.com.

通信作者:王开运,男,教授,博士生导师,研究方向为植被生态系统过程对全球气候变化响应以及城市绿地景观系统的功能和规划. E-mail: kywang@re.ecnu.edu.cn.

**Abstract:** By using open-top growth chambers (OTC) to simulate short-term warming and mesh bags, the study was carried out in the reclaimed wetland in the east Chongming tidal flat. The effects of short-term simulated warming ( $1.984 \pm 0.7$ ) °C on the decomposition of *Phragmites australis* litter were studied and the changes of correlations between decomposition rate and environmental parameters were analysed. The results are as follows: ① stem decomposition rates in OTC plots and CG plots are 49.20% and 45.11%, and leaves decomposition rates are 63.52% and 58.53%, respectively, which shows that warming has increased the decomposition rates; ② stems average decomposition coefficients ( $K$ ) in OTC plots and CG plots are 0.028 and 0.027, while the average decomposition coefficients of leaves are 0.093 and 0.080, respectively, which shows that the increment of leaves  $K$  is bigger than stems  $K$ ; ③ the order of correlation degree between environmental factors and decomposition rate is: 1.2 m air temperature > 0~5 cm soil temperature > 0~5 cm soil moisture, and the correlation coefficient between leaves decomposition rate and 1.2 m air temperature is biggest which is 6.43%. In summary, air temperature is the key factor affecting the *Phragmites australis* litter decomposition; meanwhile warming not only improves litters decomposition rates, but also changes the relevance between decomposition rate and environmental factors.

**Key words:** wetland; *Phragmites australis*; litter decomposition; temperature enhancement; open-top chambers (OTC)

## 0 引 言

凋落物分解是生态系统物质循环和能量转换的重要途径<sup>[1,2]</sup>,受到气候、凋落物基质质量和分解者群落组成等诸多因素的影响<sup>[3-5]</sup>.在众多气候因素中,气温和降水是影响凋落物分解速率的主要因子<sup>[6,7]</sup>.不少研究发现,凋落物的分解速率随温度的升高而加快<sup>[8,9]</sup>.

近几十年来,我国对凋落物分解也进行了大量的研究<sup>[1,10,11]</sup>.但总体来说,对于森林生态系统凋落物分解的研究相对较多,对湿地植被的凋落物分解研究则开始较晚<sup>[12]</sup>.目前,国内有关湿地凋落物分解的研究主要集中在淡水湿地中,如沼泽、河流、湖泊等<sup>[13,14]</sup>,地域上主要集中在华北泥炭沼泽<sup>[15]</sup>、高原湿地<sup>[16]</sup>和东北三江平原沼泽湿地<sup>[17-19]</sup>,内容上包括了有机碳、N、P和微量元素分解规律等,而对滨海湿地凋落物分解的研究关注相对较少,尤其是如大气变暖、CO<sub>2</sub>浓度升高和干湿沉降等全球气候变化对湿地凋落物分解影响的研究亟待加强<sup>[12]</sup>.

本实验采用开顶式生长室模拟大气增温,研究崇明东滩滨海围垦湿地代表植物——芦苇(*Phragmites australis*)不同凋落物组分(茎和叶)的分解速率对增温的响应,并对比分析了增温和非增温条件下凋落物分解速率与主要环境因子的相关性及其变化,为全面了解增温对滨海围垦湿地芦苇凋落物分解的影响及其关键驱动机制提供科学依据.

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域自然概况

本实验在崇明东滩 98 大堤和 92 大堤之间的围垦区域进行,东滩位于东经 121°45',北纬 31°30',是崇明岛的最东端,年平均气温 15.3 °C,最热为 7、8 月份,月平均气温为 27.5 °C,最冷

为1月,月平均气温为 $2.0^{\circ}\text{C}$ 。全年降水量充足,年平均降雨量为 $1\,117.1\text{ mm}$ 。在1998年围垦之前,此区域属于发育良好的原生滨海盐沼湿地高潮滩。围垦后盐沼湿地不再受潮汐影响,水位下降,旱生化、盐渍化加剧,该围垦滩涂湿地的优势植物群落由以镥草为主转为以芦苇为主,其盖度在80%以上。

## 1.2 样地设置

本实验在该湿地生态系统的芦苇群落设进行样方设置,分别设置4个开顶式生长室(Open-top chambers, OTC)样方和4个对照(CG)样方,样地东西长60 m,南北长30 m,见图1。增温主要通过OTC来实现,OTC由0.8 cm厚氟化玻璃制成,氟化玻璃可有效阻隔地面向大气的红外辐射,从而产生增温效果。OTC为11边形,高约3.5 m,底部面积 $12.5\text{ m}^2$ ,顶部开口,单室总体积为 $37.5\text{ m}^3$ 。

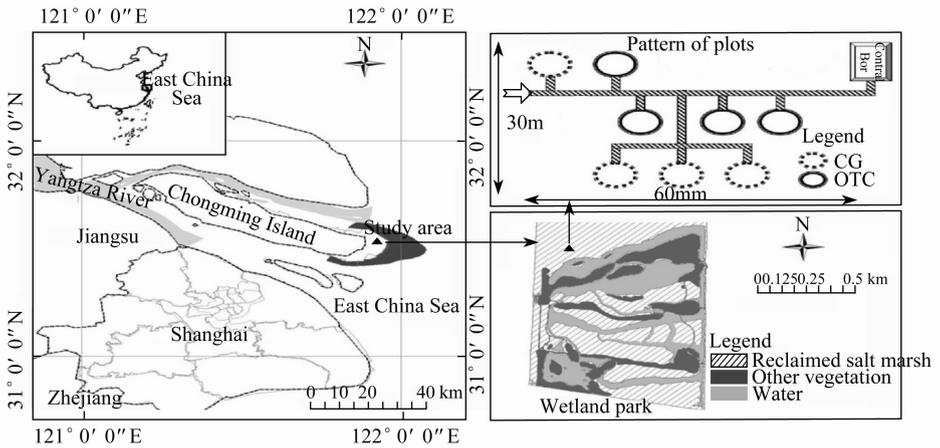


图1 研究区域和样地设置

Fig. 1 The location of study area and pattern of plots

## 1.3 凋落物的收集与处理

在研究样地附近选择生长较好的芦苇群落,在2010年生长季节末期,齐地收割芦苇的地上部分进行凋落物分解实验,茎和叶单独分开处理。将茎和叶在 $65^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重,分别取 $5.00\text{ g}$ 装入孔径为 $1\text{ mm}$ ,大小为 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 的尼龙网袋中,于2011年2月底分别随机地放置于4个OTC样方和4个CG样方中,每个样方分别放置茎凋落物和叶凋落物各12袋,共计192个网袋。

从2011年3月底开始,每个月月底,从每个样方随机取出一个茎凋落物分解袋和叶凋落物分解袋中,认真清除泥土等杂质后,在 $65^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重,并及时称重,凋落物分解过程中的失重采用重量损失法。

## 1.4 环境因子测定

本实验采用全自动小型气候观测系统监测OTC样方和对照CG样方内的 $1.2\text{ m}$ 高度的空气温度数据,在其中4个增温样方(OTC)和4个对照样方(CG)中分别装有温度传感器(VAISALA HMP45A, Helsinki, Finland),传感器采样频率为 $1\text{ min}$ ,所有传感器均用导线与控制器连接(LT/WSK-PLC, Qianjing Corporation, Beijing),数据存储间隔为 $1\text{ min}$ ,实行 $24\text{ h}$ 连续监测。

0~5 cm 土壤温度和湿度采用土壤三参数仪(Wet-2, Delta-T, Cambridge, UK).

间断监测,监测时间是每月的月中 15 日前后两天和月底 28 日前后两天.

### 1.5 数据处理

凋落物的分解速率常数  $K$  采用 Olson 指数模型计算:

$$x_t/x_0 = e^{-Kt}. \tag{1}$$

式中,  $x_0$  为凋落物的初始质量(g);  $x_t$  为凋落物的分解后的剩余质量(g);  $t$  为凋落物的分解时间(月). 运用 excel 2007, SPSS 18.0 和 Sigmaplot 10.0 进行数据分析和作图.

## 2 结果与分析

### 2.1 OTC 的增温效果

以日均温的全年平均均值计算增温幅度, 试验期间, OTC 组的 1.2 m 空气年平均温度比对照样地增加了  $(1.98 \pm 0.7) ^\circ\text{C}$  (见图 1), 8 月份达到增幅最大值, 为  $(4.69 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$ ; 0~5 cm 土层温度平均增加  $(0.23 \pm 0.4) ^\circ\text{C}$ , 7 月份达到增幅最大值, 比对照增加  $(2.98 \pm 0.4) ^\circ\text{C}$ ; 此外, 0~5 cm 土层湿度平均增加  $(2.32 \pm 0.3) \%$ . 上述实验结果表明, OTC 处理对 1.2 m 空气温度增温效果最显著, 对表层土壤温度影响明显小于对空气的影响, 同时一定程度地增加了表层土壤的湿度.

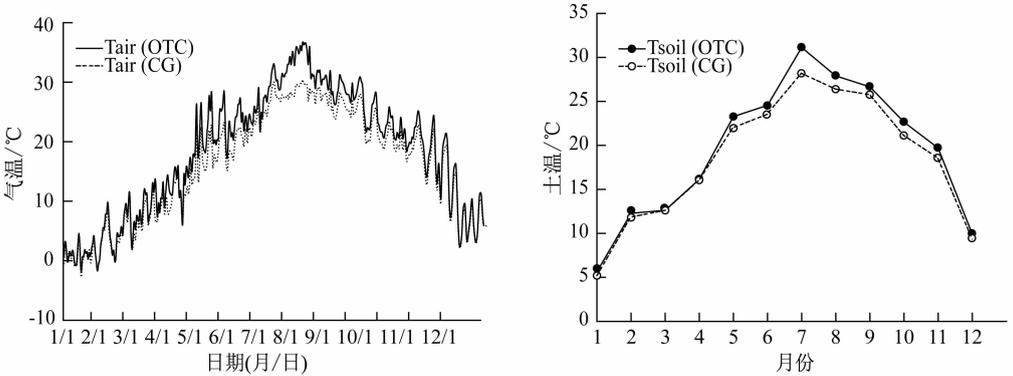


图 2 不同样地空气温度和土壤温度的月变化

Fig. 2 Monthly changes of air temperature and soil temperature at different plots

### 2.2 OTC 组与 CG 组芦苇凋落物残留量随时间的变化

芦苇凋落物茎和叶在 OTC 组和 CG 组的凋落物年分解残留量动态变化如图 3 和图 4. 由图 3 可知, 在增温和非增温条件下, 茎的分解都呈现出先加快后减缓的趋势. OTC 组和 CG 组凋落物茎分解的时间主要在 4 月至 9 月, 其分解量占全年分解总量的百分比分别为 27.82% 和 24.41%, 且峰值都在 8 月. 但是, 增温条件下的 OTC 组与非增温条件下的 CG 组茎的分解特征也有明显不同: 3 月份的开始凋落物茎残留量比 CG 组少, 5 月份残留量差距加速变大, 8 月份 OTC 组残留量和 CG 组出现最显著差异 ( $\Delta$ 茎 =  $-0.28 \text{ g}$ ,  $P < 0.01$ ); 9 月份以后随着分解速率大小趋向一致, 两组凋落物茎残留量差距逐渐减小; 分解一年后, OTC 组茎和 CG 组茎的分解率分别为 49.20% 和 45.11%, 表明增温后, 在整个研究期间, OTC 组茎分解速率要比 CG 组快.

由图 4 可知, OTC 组和 CG 组凋落物叶的分解主要在 2~3 月和 5~12 月两个时间段,

其中高峰期在 5~8 月,其分解量占全年分解总量的百分比分别为 43.3%和41.5%,在 3~5 月残留量不明显,9~12 月两者仍有十分明显的差距,这些分解特征与茎的分解明显不同;分解一年后,OTC 组叶和 CG 组叶的分解率分别为 63.52%和58.53%,表明增温对叶的分解有更加明显的促进作用。

进一步单因素方差分析结果显示 OTC 组和 CG 芦苇茎的分解速率差异性不显著 ( $F = 2.84, P > 0.05$ );相反,叶的分解速率差异性显著 ( $F = 410.68, P < 0.01$ ),表明增温显著增加了芦苇叶的分解速率。

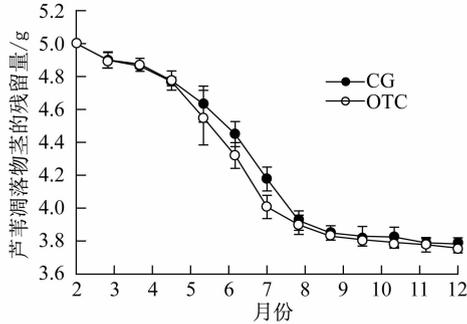


图 3 不同样地茎的残留量月变化

Fig. 3 Monthly changes of stem residual quantity at different plots

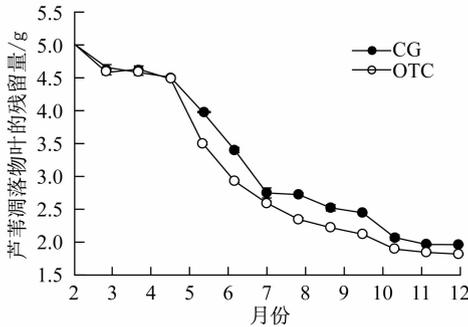


图 4 不同样地叶子的残留量月变化

Fig. 4 Monthly changes of leaf residual quantity at different plots

### 2.3 增温对湿地芦苇凋落物分解常数 $K$ 的影响

采用公式(1),分别对 OTC 组和 CG 组芦苇凋落物茎和叶的分解过程进行非线性拟合,得出拟合方程及其判定系数  $R^2$ ,见表 1. 拟合方程的  $R^2$  均大于 0.8,表明拟合方程能够较好的反应分解速率. 本实验分解周期内,OTC 组和 CG 组芦苇茎和叶的分解拟合方程分别为  $X_t = 5e^{-0.028t}$ ,  $X_t = 5e^{-0.027t}$  和  $X_t = 5e^{-0.093t}$ ,  $X_t = 5e^{-0.080t}$ .

分解系数  $K$  值越大说明分解速率越快,OTC 组和 CG 组茎的平均  $K$  值分别为 0.028 和 0.027,表明 OTC 组茎的分解速率略高于 CG 组;OTC 组和 CG 组叶的平均  $K$  值分别为 0.093 和 0.080,表明叶的分解速率显著大于茎的分解速率 ( $P < 0.05$ ).

表 1 CG 组和 OTC 组中芦苇凋落物茎和叶的分解系数(K)及其判定系数(R<sup>2</sup>)

Tab. 1 The decay constant and correlation coefficient of stem and leaf in litter

样点	茎			叶		
	分解系数(K)	拟合方程	判定系数(R <sup>2</sup> )	分解系数(K)	拟合方程	判定系数(R <sup>2</sup> )
CG-1	0.026	$X_t = 5e^{-0.026t}$	0.837	0.081	$X_t = 5e^{-0.081t}$	0.911
CG-2	0.027	$X_t = 5e^{-0.027t}$	0.869	0.08	$X_t = 5e^{-0.080t}$	0.94
CG-3	0.029	$X_t = 5e^{-0.029t}$	0.904	0.079	$X_t = 5e^{-0.079t}$	0.953
CG-4	0.025	$X_t = 5e^{-0.025t}$	0.897	0.081	$X_t = 5e^{-0.081t}$	0.939
均值	0.027	$X_t = 5e^{-0.027t}$	0.915	0.08	$X_t = 5e^{-0.080t}$	0.939
OTC-1	0.029	$X_t = 5e^{-0.029t}$	0.859	0.092	$X_t = 5e^{-0.092t}$	0.936
OTC-2	0.028	$X_t = 5e^{-0.028t}$	0.801	0.093	$X_t = 5e^{-0.093t}$	0.921
OTC-3	0.028	$X_t = 5e^{-0.028t}$	0.944	0.093	$X_t = 5e^{-0.093t}$	0.932
OTC-4	0.028	$X_t = 5e^{-0.028t}$	0.816	0.094	$X_t = 5e^{-0.094t}$	0.919
均值	0.028	$X_t = 5e^{-0.028t}$	0.903	0.093	$X_t = 5e^{-0.093t}$	0.928

## 2.4 分解系数 K 与 3 种环境因子的相关性分析

分别将茎和叶的分解速率系数 K 与环境因子(空气温度、土壤温度和土壤湿度)进行 Pearson 相关性分析,得到凋落物分解速率与 3 种环境因子的相关性分析,见表 2.

表 2 凋落物分解速率与环境因子的 Pearson 相关性分析

Tab. 2 The Pearson Correlation analysis of litter between decomposition rate and environment factors

	茎				叶			
	CG		OTC		CG		OTC	
	相关系数(R <sup>2</sup> )	P						
空气温度	0.756	<0.05	0.755	<0.05	0.687	<0.05	0.710	<0.05
土壤温度	0.635	<0.05	0.634	<0.05	0.544	<0.05	0.579	<0.05
土壤湿度	0.035	>0.05	0.051	>0.05	0.003	>0.05	0.033	>0.05

结果显示:与 OTC 组和 CG 组茎的分解速率相关性由大到小依次是 1.2 m 空气温度 ( $R_{\text{OTC}}^2 = 0.755, R_{\text{CG}}^2 = 0.756$ ) > 0~5 cm 土层温度 ( $R_{\text{OTC}}^2 = 0.634, R_{\text{CG}}^2 = 0.635$ ) > 0~5 cm 土层湿度 ( $R_{\text{OTC}}^2 = 0.051, R_{\text{CG}}^2 = 0.035$ ); 与 OTC 组和 CG 组叶的分解速率相关性由大到小依次是 1.2 m 空气温度 ( $R_{\text{OTC}}^2 = 0.713, R_{\text{CG}}^2 = 0.687$ ) > 0~5 cm 土层温度 ( $R_{\text{OTC}}^2 = 0.579, R_{\text{CG}}^2 = 0.544$ ) > 0~5 cm 土层湿度 ( $R_{\text{OTC}}^2 = 0.033, R_{\text{CG}}^2 = 0.003$ ). 由此可见,升温与非升温条件下,凋落物分解均与空气温度最相关,其次是土壤温度,与表层土壤湿度无显著相关 ( $P > 0.05$ ).

此外,增温使芦苇凋落物分解速率与环境因子的相关性也发生了一定变化:增温引起茎分解速率与空气温度和土壤温度的相关性变化很小,而使叶的分解速率与 1.2 m 空气温度、0~5 cm 土壤温度的相关性增加了 3.35%、6.43%.

## 3 讨 论

OTC 增温促进了滨海湿地芦苇凋落物的分解. Silver 和 Couteaux 等总结全球细根分解数据时发现,年平均温度与凋落物分解速率呈线性正相关<sup>[20,21]</sup>. 本实验研究结果表明,分解一年后,OTC 组和 CG 组茎的分解率分别为 49.20%和 45.11%. OTC 组和 CG 组叶的分解率分别为 63.52%和 58.53%,增温使茎和叶的分解速率分别增加 4.09%和 4.99%,表明

增温对滨海围垦湿地芦苇凋落物的分解有促进作用. Wang 等对阔叶林和针叶林两种凋落物进行的 5 个月增温 10 °C 分解实验显示,阔叶林和针叶林分解量分别增加了 1.87% 和 2.63%<sup>[22]</sup>,与本实验中增温对茎和叶的促进作用不同相一致,说明虽然增温能够促进凋落物的分解,但凋落物分解速率对增温的响应因基质质量而异.

增温对凋落物分解的影响可以分为间接影响和直接影响<sup>[23,24]</sup>. 间接影响是指增温影响生态系统的群落组成、结构及物候变化、凋落物基质质量及土壤养分可利用性等<sup>[25]</sup>;直接影响主要是指增温可提高微生物的活性,从而促进凋落物的分解<sup>[26]</sup>. Shimel 等研究发现,松类凋落物的分解主要受真菌的影响<sup>[27]</sup>,而 Zhang 等的研究进一步表明,增温可以增加细菌和真菌等微生物的生物量和活性,从而加快了凋落物的分解<sup>[28,29]</sup>. 相关研究发现,OTC 所导致的增温和土壤相对含水量增大,可以提高土壤微生物活性,加速凋落物的分解<sup>[30-32]</sup>. 本实验中,OTC 对降雨量基本没有影响,同时,OTC 增温也未使地土壤湿度产生明显变化,所以原地增温法对滨海湿地芦苇分解的影响主要是通过影响凋落物物理分解和微生物活性等直接途径实现的. 此外试验周期为 1 年,其分解所处的阶段为分解前期,分解速率的限制因素应是 N 及易分解糖类,已有研究表明本地区芦苇叶的 N 含量要比茎的高 18.66 g/kg, C/N 比茎的低 36.1%,短期的增温可能对湿地凋落物中 N 等易分解物质的促进作用更加明显,所以导致 OTC 组和 CG 组茎的分解速率差异性不显著而叶的分解速率差异性显著,即 OTC 模拟的增温对茎的分解速率影响不显著,对叶的分解速率影响较明显.

### [参 考 文 献]

- [1] 郭剑芬,杨玉盛,陈光水,等. 森林凋落物分解研究进展[J]. 林业科学,2006(4):390-398.
- [2] HUI D F, ROBERT B, JAKSON. Assessing interactive responses in litter decomposition in mixed species litter[J]. *Plant Soil*, 2009, 314(2):263-271.
- [3] AERS R. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: A triangular relationship[J]. *Oikos*, 1997, 79(3):439-449.
- [4] CADISH G, GILLER K E. *Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition*[M]. Michigan: CAB International, 1997.
- [5] GARTNER T B, CARDON G. Decomposition dynamics in mixed-species leaf litter[J]. *Oikos*, 2004, 104(2):230-246.
- [6] RAIJA L, JUKKA L, CARL C T, et al. Scots pine litter decomposition along drainage succession and soil nutrient gradients in peatland forest effects of inter-annual weather variation[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 1095-1109.
- [7] VITOUSEK P M, TURNER D R, PARTON W J, et al. Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawaii: patterns, mechanisms and models[J]. *Ecology*, 1994, 75(2):418-429.
- [8] 彭少麟,刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应[J]. 生态学报,2002,22(9):1534-1544.
- [9] HORNSBY D C, LOCKABY B G, CHAPPELKA A H. Influence of microclimate on decomposition in Loblolly pine stands: A field microcosm approach[J]. *Can J For Res*, 1995, 25:1570-1577.
- [10] SINGH K P, SINGH P K, TRIPATHI S K. Litter fall, litter decomposition and nutrient release patterns in four native species raised on coal mine spoil at Singrauli, India[J]. *Biol Fertil Soil*, 1999, 29:371-378.
- [11] 高志红,张万里,张庆费. 森林凋落物生态功能研究概况及展望[J]. 东北林业大学学报,2004,32:79-83.
- [12] 周存宇. 凋落物在森林生态系统中的作用及其研究进展[J]. 湖北农学院学报,2003,23:98-104.
- [13] 孙志高,刘景双. 湿地枯落物分解及其对全球变化的响应[J]. 生态学报,2007,27(4):1606-1618.
- [14] 柳新伟. 大汶河湿地香蒲和芦苇分解动态研究[J]. 中国农学通报,2009,25(24):464-467.
- [15] 童晓丽,颜玲,赵颖,等. 树叶凋落物在受酸性矿山废水污染溪流中的分解[J]. 生态学报,2006,26(12):4033-4038.

- [16] 白光润,王升忠,冷雪天,等. 草本泥炭形成的生物环境机制[J]. 地理学报,1999,54(3):247-254.
- [17] 田应兵,熊明彪,熊晓山,等. 若尔盖高原湿地土壤——植物系统有机碳的分布与流动[J]. 植物生态学报,2003,27(4):490-495.
- [18] 刘景双,孙雪利,于君宝. 三江平原小时章、毛果苔草枯落物中氮素变化分析[J]. 应用生态学报,2000,11(6):898-902.
- [19] 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的分析[J]. 中国草地,2000(3):12-16.
- [20] 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[J]. 中国草地,2000(6):6-10.
- [21] SILVER W L, MIYA R K. Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects [J]. *Oecologia*, 2001, 129:407-419.
- [22] COUTEAUX M M, BOTTNER P, BERG B. Litter decomposition, climate and litter quality [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 1995(10):63-66.
- [23] WANG C Y, HAN G M, JIA Y, et al. Insight into the temperature sensitivity of forest litter decomposition and soil enzymes in subtropical forest in China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2011:1-8.
- [24] 曾峰,邱治军,许秀玉. 森林凋落物分解研究进展[J]. 生态环境学报,2010,19(1):239-243.
- [25] 周华坤,周兴民,赵新全. 模拟增温效应对矮嵩草草甸影响的初步研究[J]. 植物生态学报,2000,24(5):547-553.
- [26] CHEN H, HARMON M E, TIAN H Q. Effects of wetland litter decomposition and its responses to global change [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9):1549-1563.
- [27] 吕桂芬. 油蒿群落枯枝落叶分解过程中微生物数量的季节动态变化研究[J]. 内蒙古大学学报,2000,31(1):69-70.
- [28] SCHIMMEL J, BALSER T C, WALLENSTEIN M. Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function [J]. *Ecology*, 2007, 88:1386-1394.
- [29] ZHANG W, PARKER K M, LUO Y, et al. Soil microbial responses to experimental warming and clipping in a tall-grass prairie [J]. *Global Change Biol*, 2005(11):266-277.
- [30] ZHANG W J, XU Q, WANG X K, et al. Impacts of experimental atmospheric warming on soil microbial community structure in a tallgrass prairie [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004:1742-1747.
- [31] 陈华, MARK E H, 田汉勤. 全球变化对陆地生态系统枯落物分解的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(9):1549-1560.
- [32] LIU Q, PENG S L. Decomposition of leaf litter in tropical and subtropical forests of southern China [J]. *Journal of Tropical Forest Science*, 2005, 17(4):543-556.
- [33] RIBEIRO C, MADEIRA M, ARAÚJO M C. Decomposition and nutrient release from leaf litter of *Eucalyptus globulus* grown under different water and nutrient regimes [J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 171:31-41.