

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2011.06.012

增温对高寒草甸群落凋落物质量动态变化的影响

林巧燕^{1,4}, 徐广平², 苏爱玲¹, 段吉闯^{1,4}, 张振华^{1,4}, 罗彩云^{1,4}, 汪诗平^{3*}

(1. 中国科学院西北高原生物研究所高原适应与进化重点实验室, 西宁 810008; 2. 广西壮族自治区广西植物中国科学院研究所, 广西桂林 541006; 3. 中国科学院青藏高原研究所高寒生态学和生物多样性实验室, 北京 100085; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 为了解未来增温条件下, 青藏高原高寒草甸凋落物质量如何变化, 将有助于增强对高寒草甸生态系统碳源/汇效应的认识。该文通过定位可控的增温试验平台, 动态监测了凋落物生物量及其质量的变化。结果表明: 增温显著地促进了凋落物的分解速率($F=35.757, P<0.001$), 降低了凋落物中的 C、N 含量及其 C/N 比, 但提高了凋落物中的 P 含量; 随着生长季的推移, 增温显著增加了木质素含量及木质素/N 的比例。说明未来增温条件下, 高寒草甸生态系统的 C、N 循环过程将可能加快。

关键词: 增温; 凋落物; 碳含量; 氮含量; 磷含量; 纤维素; 木质素

中图分类号: Q948.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2011)06-0770-05

Response of litter quality to warming in the alpine meadow on the Tibetan Plateau

LIN Qiao-Yan^{1,4}, XU Guang-Ping², SU Ai-Ling¹, DUAN Ji-Chuang^{1,4}, ZHANG Zhen-Hua^{1,4}, LUO Cai-Yun^{1,4}, WANG Shi-Ping^{3*}

(1. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Haibei Alpine Meadow Ecosystem Research Station, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 2. Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and the Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China; 3. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Understanding how the response of litter quality to warming will increase our ability to predict the change of carbon sink/source of alpine meadow ecosystem under future warming condition. We found that warming (about 1.5 °C enhancement) significantly increased litter decomposition and phosphorus concentration, whereas decreased concentrations of carbon and nitrogen, and their ratio in remaining litters. From June to October in 2009, four fields measured results showed that warming significantly promoted the litter decomposition rate ($F=35.757, P<0.001$). These results suggested that warming would increase carbon/nitrogen cycling processes in the alpine region.

Key words: warming; litter; carbon; nitrogen; phosphorus; cellulose; lignin

全球变暖已是不争的事实, 政府间气候变化专门委员会(IPCC)预测, 2100 年全球气温估计将上升 1.4~5.8 °C, 仪器观测记录表明, 全球平均地表温度一直在增加, 1906~2005 年近 100 年全球地表温

度的线性趋势为 0.74 ± 0.18 °C, 特别是 1950 年前后(Bradley, 2001; IPCC, 2001, 2007)。在全球变化的背景下, 地面凋落物积累被看作是一个重要的碳汇, 分解快慢影响到陆地与大气间的碳分配(Ange-

收稿日期: 2011-03-27 修回日期: 2011-08-16

基金项目: 国家“973”项目(2010CB833502)[Supported by the National Basic Research Program of China(2010CB833502)]

作者简介: 林巧燕(1984-), 女, 浙江温州人, 硕士研究生, 主要从事草地生态学研究, (E-mail) lilianagain@yahoo.com.cn.

* 通讯作者: 汪诗平, 男, 博士, 研究员, 博士生导师, (E-mail) wangship2008@yahoo.cn.

lis 等, 2000)。凋落物包括枯立木、倒朽木、枯草、地表凋落物和地下枯死生物量等, 是陆地生态系统的重要组成部分, 凋落物在维系生态系统结构和功能中具有不可替代的作用(韩兴国等, 1999)。陆地生态系统凋落物分解是全球碳收支的一个重要组成部分, 主要受气候条件和凋落物质量等因素的综合控制。

全球气候变化所诱发的凋落物分解速率的变化可能对陆地生态系统碳储量产生更深远的影响, 可能直接对目前由于大气 CO_2 浓度升高引起的全球气候变化造成一个正反馈, 而凋落物分解对全球气候变化的反馈作用主要取决于凋落物积累和分解之间的平衡(Cornelissen 等, 2007)。草地凋落物是草地土壤有机质的主要物质源库, 是维持土壤肥力的基础, 凋落物通过分解向土壤释放营养元素, 是维持草地植被生长所需营养物质的重要来源, 也是植物体将营养物质归还的重要途径(Ogee & Brun, 2002)。

根据中国区域气候模式, 在假定大气 CO_2 浓度继续增加的各种情况下, 预测未来 50 年我国西北地区气温可能上升 $1.9 \sim 2.3 \text{ }^\circ\text{C}$, 青藏高原可能升高 $2.2 \sim 2.6 \text{ }^\circ\text{C}$ (丁一汇, 2002)。青藏高原被称为全球的“气象灶”和全球气候变化的预警区(郑度和姚檀栋, 2004), 青藏高原脆弱而具有敏感性的生态系统能对气候变化做出迅速的响应(赵新全, 2009)。因此, 基于野外模拟增温试验平台, 我们提出以下问题: (1) 增温是否加快了高寒草甸群落凋落物的分解? (2) 增温对高寒草甸群落凋落物养分含量的影响如何? 为深入研究高寒草甸群落物质营养循环、高寒草甸的碳汇效应和合理利用提供科学依据及理论指导。

1 材料与方 法

1.1 试验区的概况

本研究在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站进行, 海北站地处青藏高原东北隅的青海省海北藏族自治州门源县境内, 在祁连山北支冷龙岭东段南麓坡地的大通河河谷西段, 地理位置为 $37^\circ 29' \sim 37^\circ 45' \text{ N}$, $101^\circ 12' \sim 101^\circ 23' \text{ E}$ 。该地区位于亚洲大陆腹地, 具有明显的高原大陆性气候, 东南季风及西南季风微弱。受高海拔条件的制约, 气温极低, 按气候四季的标准划分, 这里全年皆冬, 无明显四季之分, 仅有冷暖二季之别, 干湿季分明。海北站多年平均气温为 $-1.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 降水量约 560 mm , 年日照时间可达 2467.7 h , 水面蒸发 1238 mm , 平均风速较低,

年平均仅为 $1.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 空气相对湿度为 67% , 平均气压为 691 hPa 。年内无绝对无霜期, 相对无霜期约为 20 d , 在最热的 7 月仍可出现霜冻、结冰、降雪(雨夹雪)等冬季的天气现象。表现出冷季寒冷、干燥、漫长, 暖季凉爽、湿润、短暂。本研究选择长期适应于高寒生态环境下形成的由耐寒中生植物组成的高寒矮嵩草(*Kobresia humilis*)群落为研究对象。

增温试验样地在试验开展前为冬季放牧草地, 围栏 10 m 外为气象观测站。增温装置系统安装好后, 样地外围安装网围栏防止家畜进入。

1.2 试验设计

本试验采用自由空气增温方法。以正六边形各顶点悬挂红外陶瓷加热器, 形成一个直径为 3 m 的圆形均匀的加热增温区。红外陶瓷加热器悬挂方式与地面形成 45° 夹角, 面向圆形的中心, 悬挂高度 1.2 m 。增温幅度可实现全天自动控制: 增温小区与对照小区通过红外传感器同时测定冠层温度; 数据传至数据采集器, 根据增温小区与对照小区冠层温度差值, 通过 PID 控制程序控制, 电源电压输出模块输出 $0 \sim 10 \text{ V}$ 电源信号(0 V 为完全关闭加热器, 10 V 为满功率工作); $0 \sim 10 \text{ V}$ 信号传至 Dimmer(LCED-2484, Kalglo), 输出 $0 \sim 220 \text{ V}$ 交流电电压, 控制陶瓷加热器的输出功率; 然后红外加热器在测定冠层温度进行重复反馈控制陶瓷加热器的输出功率。根据对气候变化过程中冬天比夏天增温明显和晚上比白天增温明显的预测结果, 本试验在夏季(5 月 1 日至 9 月 20 日)白天的温差(增温区与对照区的植被冠层温度差值)设定为 $1.2 \text{ }^\circ\text{C}$, 晚上为 $1.7 \text{ }^\circ\text{C}$; 冬季白天和夜间分别设置为 $+1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $+2.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

本试验所采用的自由空气增温方法, 具有可实现自动增温控制和增温区域加热效果均匀的特点, 它能很好地在野外生态系统下运行, 该增温装置能满足试验预测增温变化幅度的需要(Kimball 等, 2008; Luo 等, 2010; Hu 等, 2010)。设置了 4 个处理: 增温不放牧(WNG)、不增温放牧(NWG)、不增温不放牧(NWNG)和增温放牧(WG)4 个处理。每处理有 4 次重复, 采用随机区组试验设计, 各小区之间相隔 3 m , 以避免增温处理的相互影响。增温自 2006 年 5 月 26 日起开始运行。放牧试验是在有放牧处理的小区内圈 2 只绵羊, 夏季放牧水平、放牧时间视植被状况而定, 总体上牧草年利用率约 50% 。

1.3 取样和分析方法

由于放牧试验小区地上凋落物很少, 所以, 在本

文章中只讨论增温(W)小区和不增温(NW)下调落物分解试验。2009年6~9月每月下旬采用样方法分别在增温小区(W)和不增温小区(NW)取凋落物样品(各4个重复),样方面积为10 cm×10 cm。所取样品按照处理分别混合均匀之后,立即称其鲜重,然后在60℃下烘至恒重后称其干重,计算干鲜比。剩余样品粉碎装瓶以备化学成分分析,C元素采用TOC仪(岛津5000A)测定;N、P采用A33型连续流动分析仪测定;纤维素、半纤维素和木质素则在饲料纤维分析仪(ANKOM 200, Macedon, New York, USA)上分析测定。

1.4 数据分析

利用SPSS(16.0)软件中的Repeated-measure统计分析方法,以增温为Between-subject因子、以监测日期作为Within-subject因子进行方差分析,探讨增温、取样日期以及他们的互作对凋落物生物量和质量的影响,检验在0.05水平上是否显著。

2 结果与分析

2.1 单位面积凋落物现存生物量

2009年6、7、8、9月每月下旬采用样方法分别测定了增温(W)小区和不增温(NW)小区地上凋落物现存生物量(表1)。表1结果表明,6~9月份,NW小区的单位面积地上凋落物现存生物量都显著高于W小区的地上凋落物现存生物量($F=22.735, P<0.01$),每月单位面积地上凋落物现存生物量彼此之间也存在显著的差异,最小值均出现在8月份,分别为146.74 g·m⁻²和254.80 g·m⁻²。但9月底凋落物都有快速增加,主要是当年凋落物生产的结果。根据在该试验平台上不同处理对地上净初级生产力的观测结果,发现与不增温相比,增温显著增加了地上净初级生产力(Luo等,2009),因此,依据增温小区较低的地上凋落物现存生物量,这说明了增温促进了凋落物的分解。

2.2 凋落物化学成分

凋落物化学成分含量的高低可以反映其品质的好坏,进而会影响其分解速率。2009年6~9月,测定了增温(W)小区和不增温(NW)小区凋落物全碳(TC)、全氮(TN)、全磷(TP)、木质素(L)、半纤维素(HC)、纤维素(C)等化学成分的含量以及其碳氮比(C/N)和木质素氮比(L/N),研究结果发现,各化学成分在W和NW处理之间存在着显著的差异($F=$

736.633, $P<0.001$),而在相同的处理下,每月凋落物的TC、TN、TP、L、HC、C等化学成分以及C/N和L/N彼此之间也存在显著的差异。总体上,增温显著降低了凋落物中的全碳(图1:A)、全氮(图1:B)含量,但显著增加了全磷含量(图1:C),而降低了凋落物中的C/N比(图1:D)。增温显著降低了7、9月份的凋落物中的纤维素含量(图2:A),但显著增加了木质素含量(图2:C),对半纤维素含量的影响6月份与7月份的正好相反(图2:B),并显著提高了木质素/N的比例(图2:D)。随着生长季节的向后推移,凋落物逐步分解,使得凋落物中的所有养分含量均显著下降(图1和图2)($P<0.05$)。同时,还发现凋落物中的全碳、全氮、纤维素、半纤维素和木质素等含量还受到增温与季节间的互作影响。

表1 增温对地上凋落物现存生物量的影响

Table 1 Effects of warming on dynamics of aboveground biomass of litter with standing death (g/m²)

月份 Month	增温 Warming (W)	不增温 No-warming (NW)
6月 Jun.	421.34±36.70 b	465.34±30.39 a
7月 Jul.	257.03±8.75 b	284.55±15.44 a
8月 Aug.	146.74±11.80b	254.80±19.35 a
9月 Sept.	301.71±16.88 b	345.40±31.26 a

注:表中数据为平均值±标准误,同一行内不同字母间表示在 $P<0.05$ 水平上的差异显著性。

Note: The data in the table are average value±se, different letters mean significant differences at $P<0.05$ level.

3 结论与讨论

目前,增温对凋落物分解影响的试验多集中于以下3种:(1)通过纬度形成的气温梯度,研究温度对凋落物分解速率的影响(Hobbies,1996);(2)通过海拔高度形成的气温梯度进行研究(Vitousek等,1994);(3)通过辐射加热器增温样区进行研究(Beier等,2004)。如果其它条件不变,增温会增加凋落物的分解速率。例如,Moore等(1999)在加拿大的一个分解试验表明,年平均气温是分解速率最密切相关的控制因子,气温升高可使凋落物分解率增加4%~7%。Pausas等(2004)对地表和不同土壤层凋落物分解速率的研究表明,由于地表温度相对较高,更有利于凋落物的分解。另一方面,就全球范围而言,气候决定着草地生态系统的分布格局,控制着凋落物质量和产量,间接地调控着凋落物的分解动态(Wang等,2003)。

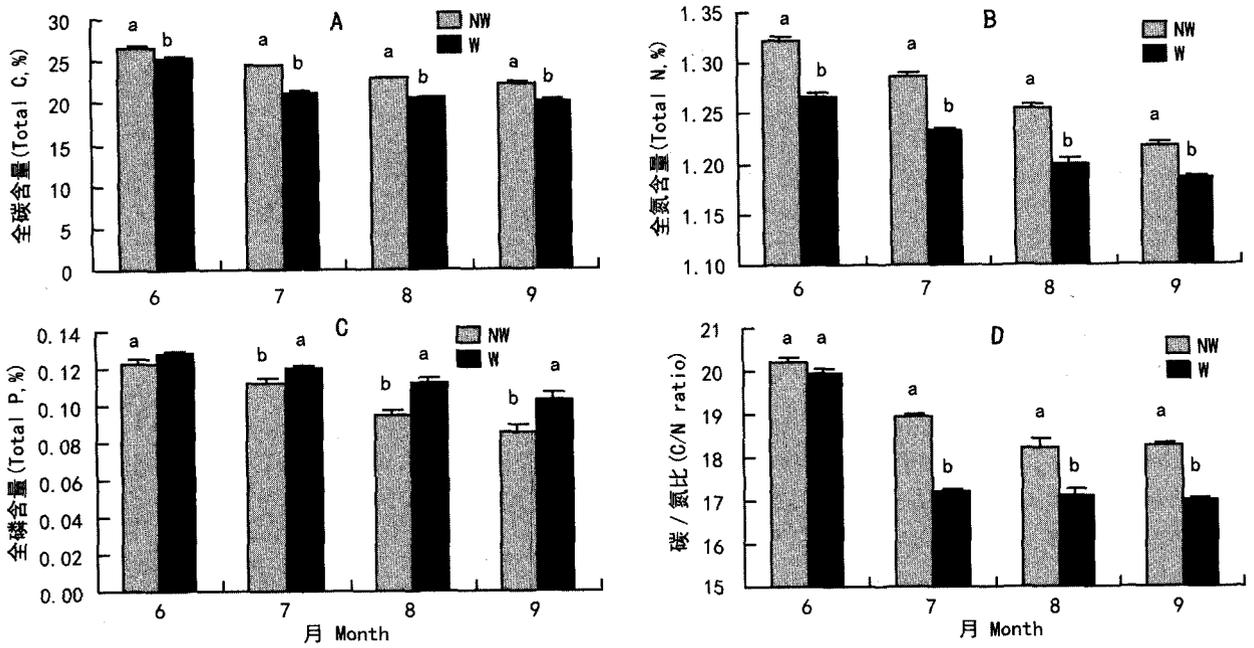


图 1 增温对凋落物全碳、全氮、全磷及碳/氮比的影响

Fig. 1 Effect of warming on total carbon, total nitrogen, total phosphorus and C/N ratio in litters

不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); W, 增温处理; NW 不增温处理

Different small letters mean significance at 0.05 level; W, warming treatment; NW, no warming treatment

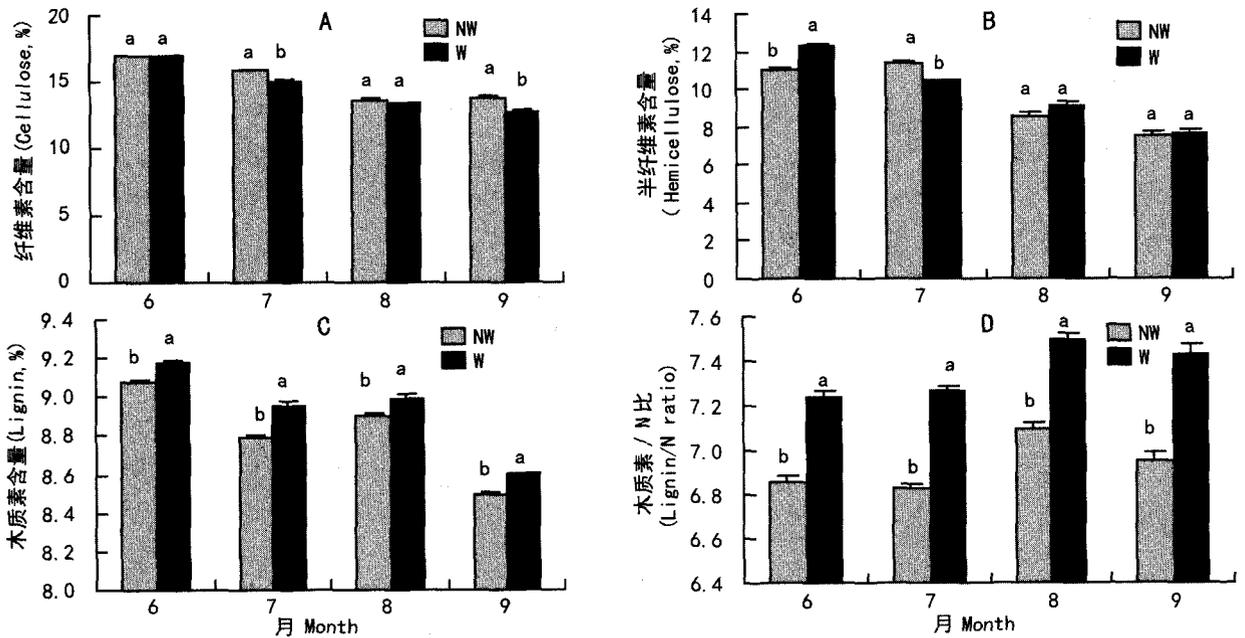


图 2 增温对凋落物纤维素、半纤维素、木质素和木质素/氮比的影响

Fig. 2 Effect of warming on concentrations of cellulose, hemicellulose, lignin and lignin/N ratio in litters

草地凋落物分解是草地生态系统中有机质残体分解转化的基本过程,是系统养分循环的关键环节,对调节土壤养分的可利用性和维持草地生产力具有重要作用(陈佐忠等,2000)。全球变暖以及与此相

关的环境变化在本世纪将会对北半球的大多数地区产生影响,尤其是对北部高纬度地区(ACIA, 2005)。而青藏高原正在经历的气候变暖将远远大于全球平均增幅(IPCC,2007)。我们以前的研究表

明,增温增加了地上净初级生产力(Luo等,2009),但该研究发现增温反而降低了地上凋落物现存生物量,说明增温加快了凋落物的分解,这与以前的研究结果是一致的(Luo等,2010;Xu等,2010)。

增温会加快分解速率,例如,Vitousek(1994)等在太平洋热带岛屿(Mauna Loa)的研究表明,随海拔升高及气温降低,凋落物的分解速率呈指数降低。Silver和Miya(2001)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。这些结果都有力地支持了我们的研究结果:温度升高,凋落物分解速率加快的观点。同时,在我们的试验中,由于增温降低了凋落物中的N含量,表明增温加快了凋落物中N的释放从而加快了高寒草甸生态系统的N循环;然而,增温却增加了凋落物中的P固定,这表明在未来增温条件下,有可能会导导致生态系统的P缺乏。

木质素含量高的凋落物含有大量难分解的物质以及一小部分相对容易分解的可溶性化合物(Murphy等,1998),因此其分解速率相对较慢。气候条件通过影响植物群落物种特性和微生物活性而影响凋落物的质量,物种特性最终会决定凋落物的质量并且驱动其分解(Cornwell等,2008)。凋落物分解试验的温度范围为3~25℃(Taylor,1988),且主要强调生长季节内的凋落物分解及其对凋落物质量和环境因子的响应(杨万勤等,2007)。凋落物分解过程的复杂性来自于气候条件和凋落物质量的交互作用,在自然环境条件下很多因子的可控性差,如温度条件和水分条件在时间和空间上变异比较大,很难评估各因子在分解过程中的相对重要性,无法有效的区分环境因素和枯落物自身的物理化学性质对枯落物分解速率的影响。因此,在全球变化背景下,为有效区分不同影响因子(如温度、湿度和凋落物质量等)对枯落物分解特性及其温度敏感性的可能影响及相互作用,我们通过生化培养箱,在温度、湿度梯度可控的条件下,已开展了室内培养试验研究(苏爱玲,2010),将在下篇文章中深入报道温度和湿度变化对凋落物分解过程的影响。

致谢 感谢广西植物研究所李先琨和蒋巧媛老师提出的宝贵意见,作者谨表示衷心感谢!

参考文献:

- 丁一汇. 2002. 西部环境变化的预测[M]. 北京:科学出版社
- 陈佐忠,汪诗平. 2000. 中国典型草原生态系统[M]. 北京:科学出版社
- 苏爱玲. 2010. 气候变化对高寒草甸凋落物分解特性的影响及温度敏感性研究[D]. 硕士论文. 中国科学院研究生院
- 郑度,姚檀栋. 2004. 青藏高原隆升与环境效应[M]. 北京:科学出版社
- 赵新全. 2009. 高寒草甸生态系统与全球变化[M]. 北京:科学出版社
- 韩兴国,李凌浩,黄建辉. 1999. 地球化学概论[M]. 北京:高等教育出版社
- ACIA. 2005. Arctic Climate Impact Assessment[M]. Cambridge:Cambridge University Press
- Angelis PD, Kesari SC, Giuseppe ESM. 2000. Litter quality and decomposition in a CO₂-enriched Mediterranean forest ecosystem[J]. *Plant Soil*, **224**:31-41
- Beier C, Emmett B, Gundersen P, et al. 2004. Novel approaches to study climate change effects on terrestrial ecosystems in the field: drought and passive night-warming[J]. *Ecosystems*, **7**:583-597
- Bradley RS. 2001. Many citations support global warming trend [J]. *Science*, **292**(5 524):2011
- Cornelissen JHC, Van Bodegom PM, Aerts R, et al. 2007. Global negative vegetation feedback to climate warming responses of litter decomposition rates in cold biomes[J]. *Ecol Lett*, **10**:619-627
- Cornwell WK, Cornelissen JHC, Amatangelo K, et al. 2008. Plant species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide[J]. *Ecol Lett*, **11**:1 065-1 071
- Hobbie SE. 1996. Temperature and plant species control over litter decomposition in Alaskan Tundra[J]. *Ecol Monogr*, **66**(4): 503-522
- Hu YG, Chang XF, Wang SP, et al. 2010. Effects of warming and grazing on N₂O fluxes in an alpine meadow ecosystem on the Tibetan plateau[J]. *Soil Biol Biochem*, **42**:944-952
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Climate Change 2001: the Scientific Basis[M]. Paris:France
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Climate Change 2007: Summary for Policymakers[M]. Valencia, Spain
- Luo CY, Xu GP, Wang SP, et al. 2009. Effects of grazing and experimental warming on DOC concentrations in the soil solution on the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Soil Biol Biochem*, **41**:2 493-2 500
- Luo CY, Xu GP, Wang SP, et al. 2010. Effect of warming and grazing on litter mass loss and temperature sensitivity of litter and dung mass loss on the Tibetan plateau[J]. *Global Change Biol*, **16**:1 606-1 617
- Moore TR, Trofymow JA, Taylor B, et al. 1999. Litter decomposition rates in Canadian forests[J]. *Global Change Biol*, **5**:75-82
- Murphy KL, Klopatek JM, Klopatek CC. 1998. The effects of litter quality and climate on decomposition along an elevational gradient[J]. *Ecol Appl*, **8**:1 061-1 071
- Kimball BK, Conley MM, Wang SP, et al. 2008. Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots[J]. *Global Change Biol*, **14**:309-320
- Ogee J, Brunet YA. 2002. Forest floor model for heat and moisture including a litter layer[J]. *J Hydro*, **255**(1-4):212-233
- Pausas JG, Casals P, Romanya J. 2004. Litter decomposition and faunal activity in Mediterranean forest soils: effects of N content

- use strategy by populations of a subtropical invader in the non-native range: a potential mechanism for the evolution of increased competitive ability[J]. *J Ecol*, doi:10.1111/j.1365-2745.2011.01843.x
- Gendron F, Wilson SD. 2007. Responses to fertility and disturbance in a low-diversity grassland[J]. *Plant Ecol*, **191**(2):199-207
- Good NF, Good RE. 1972. Population dynamics of tree seedlings and saplings in a mature eastern hardwood forest[J]. *Bull Torrey Bot Club*, **99**(4):172-178
- Guo XR, Cao KF, Xu ZF. 2006. Acclimation to irradiance in seedlings of three tropical rain forest *Garcinia* species after simulated gap formation[J]. *Photosynthetica*, **44**(2):193-201
- Hewitt N, Kellman M. 2004. Factors influencing tree colonization in fragmented forests: an experimental study of introduced seeds and seedlings[J]. *Fore Ecol Manag*, **191**(1-3):39-59
- Inderjit, Evans H, Crocoll C, et al. 2011. Volatile chemicals from leaf litter are associated with invasiveness of a neotropical weed in Asia[J]. *Ecology*, doi:10.1890/10-0400.1.
- Jia HJ(贾海江), Li XK(李先琨), Tang SC(唐赛春), et al. 2009. Allelopathic effects of *Eupatorium adenophorum* on seed germination of three woody plants in karst region(紫茎泽兰对三种岩溶地区木本植物种子萌发的化感作用)[J]. *Guihaia*(广西植物), **29**(5):631-634
- Laska G. 2001. The disturbance and vegetation dynamics: a review and an alternative framework[J]. *Plant Ecol*, **157**(1):77-99
- Lepik M, Liira J, Zobel K. 2004. The space-use strategy of plants with different growth forms, in a field experiment with manipulated nutrients and light[J]. *Folia Geobot*, **39**(2):113-127
- Li AF(李爱芳), Gao XM(高贤明), Dang WG(党伟光), et al. 2007. Growth trends of Crofton weed (*Eupatorium adenophorum*) seedlings in different habitats(不同生境条件下紫茎泽兰幼苗生长动态)[J]. *Biodiv Sci*(生物多样性), **15**(5):479-485
- Li YP, Feng YL. 2009. Differences in seed morphometric and germination traits of crofton weed (*Eupatorium adenophorum*) from different elevations[J]. *Weed Sci*, **57**(1):26-30
- Lozon JD, MacIsaac HJ. 1997. Biological invasions: are they dependent on disturbance[J]. *Environ Rev*, **5**(2):131-144
- Morrison JA, Mauck K. 2007. Experimental field comparison of native and non-native maple seedlings: natural enemies, ecophysiology, growth and survival[J]. *J Ecol*, **95**(5):1036-1049
- Niu YF(牛燕芬), Luo FC(罗富成), Chen G(陈功). 2006. Comparative study on the next year growth of *Lolium multiflorum* Lam after mowing(一年生黑麦草刈割利用后第二年长势情况的比较研究)[J]. *J Sichuan Grassland*(四川草原), (1):13-15
- Riccardi N, Giussani G. 2007. The relevance of life-history traits in the establishment of the invader *Eudiptomus gracilis* and the extinction of *Eudiptomus padanus* in Lake Candia(Northern Italy): evidence for competitive exclusion[J]. *Aquatic Ecol*, **41**(2):243-254
- Szarzynski J, Anhuif D. 2001. Micrometeorological conditions and canopy energy exchanges of a neotropical rain forest(Surumoni-Crane Project, Venezuela)[J]. *Plant Ecol*, **153**(1):231-239
- Tian YH, Feng YL, Liu C. 2007. Addition of activated charcoal to soil after clearing *Ageratina adenophora* stimulates growth of forbs and grasses in China[J]. *Trop Grasslands*, **41**(4):285-291
- Tilman D. 1988. Plant Strategies and the Dynamics and Structure of Plant Communities[M]. New Jersey: Princeton Univ Press
- Wang ML(王满莲), Feng YL(冯玉龙), Li X(李新). 2006. Effects of soil phosphorus level on morphological and photosynthetic characteristics of *Ageratina adenophora* and *Chromolaena odorata*(紫茎泽兰和飞机草的形态和光合特性对磷营养的响应)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **17**(4):602-606
- Wang WQ(王文琪), Wang JJ(王进军), Zhao ZM(赵志模). 2006. Seed population dynamics and germination characteristics of *Eupatorium adenophorum*(紫茎泽兰种子种群动态及萌发特性)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **17**(6):982-986
- Weiner J. 1990. Asymmetric competition in plant populations[J]. *Trends Ecol Evol*, **5**(11):360-364
- Xiang YC(向言词), Peng SL(彭少麟), Zhou HC(周厚诚), et al. 2002. The impacts of non-native species on biodiversity and its control(外来种对生物多样性的影响及其控制). *Guihaia*(广西植物), **22**(5):425-432
- Zheng L(郑丽), Feng YL(冯玉龙). 2005. Allelopathic effects of *Eupatorium adenophorum* on seed germination and seedling growth in ten herbaceous species(紫茎泽兰叶片化感作用对10种草本植物种子萌发和幼苗生长的影响)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **25**(10):2782-2787
- Zheng YL, Feng YL, Liu WX, et al. 2009. Growth, biomass allocation, morphology, and photosynthesis of invasive *Eupatorium adenophorum* and its native congeners grown at four irradiances[J]. *Plant Ecol*, **203**(2):263-271

(上接第774页 Continue from page 774)

- and the moss layer[J]. *Soil Biol Biochem*, **36**:989-997
- Silver W, Miya R. 2001. Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects[J]. *Oecologia*, **129**:407-419
- Taylor BR. 1988. Does repeated freezing and thawing accelerate decay of leaf litter[J]. *Soil Biol Biochem*, **20**:657-665
- Vitousek PM, Turner DR, Parton WJ. 1994. Litter decomposition on the Mauna Loa environment matrix, Hawaii: patterns, mechanisms, and models[J]. *Ecology*, **75**:418-429
- Wang LX, Wang J, Huang JH. 2003. Comparison of major nutrient released patterns of *Quercus liaotungensis* leaf litter decomposition different climatic zones[J]. *Acta Bot Sin*, **45**(4):399-407
- Xu GP, Hu YG, Wang SP, et al. 2010. Effects of litter quality and climate change along an elevation gradient on litter mass loss in an alpine meadow ecosystem on the Tibetan plateau[J]. *Plant Ecol*, **209**:257-268
- Yang WQ(杨万勤), Deng RJ(邓仁菊), Zhang J(张健). 2007. Forest litter decomposition and its responses to global climate change(森林凋落物分解及其对气候变化的响应)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **18**(12):2889-2895