ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

第33卷 第12期 Vol.33 No.12 2013

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版

中国科学院科学出版基金资助出版

生 态 学 报

（SHENGTAI XUEBAO）

第 33 卷 第 12 期　　2013 年 6 月　（半月刊）

目　　次

前沿理论与学科综述

森林低温霜冻灾害干扰研究综述…… 李秀芬，朱教君，王庆礼，等（3563）

碱蓬属植物耐盐机理研究进展 …… 张爱琴，庞秋颖，阎秀峰（3575）

个体与基础生态

中国东部暖温带刺槐花期空间格局的模拟与预测 …… 徐　琳，陈效逑，杜　星（3584）

长白山林线树种岳桦幼树叶功能型性状随海拔梯度的变化…… 胡启鹏，郭志华，孙玲玲，等（3594）

油松天然次生林居群遗传多样性及与产地地理气候因子的关联分析 …… 李　明，王树香，高宝嘉（3602）

施氮对木荷 3 个种源幼苗根系发育和氮磷效率的影响…… 张　蕊，王　艺，金国庆，等（3611）

围封对内蒙古大针茅草地土壤碳矿化及其激发效应的影响…… 王若梦，董宽虎，何念鹏，等（3622）

干热河谷主要造林树种气体交换特性的坡位效应…… 段爱国，张建国，何彩云，等（3630）

生物降解对黑碳及土壤上苯酚脱附行为的影响…… 黄杰勋，莫建民，李非里，等（3639）

3 个树种对不同程度土壤干旱的生理生化响应 …… 吴　芹，张光灿，裴　斌，等（3648）

冬小麦节水栽培群体“穗叶比”及其与产量和水分利用的关系 …… 张永平，张英华，黄　琴，等（3657）

不同秧苗素质和移栽密度条件下臭氧胁迫对水稻光合作用、物质生产和产量的影响 ……
…… 彭　斌，李潘林，周　楠，等（3668）

根域限制下水氮供应对膜下滴灌棉花叶片光合生理特性的影响…… 陶先萍，罗宏海，张亚黎，等（3676）

光照和生长阶段对菖蒲根系泌氧的影响…… 王文林，王国祥，万寅婧，等（3688）

植物病原菌拮抗性野生艾蒿内生菌的分离、筛选和鉴定 …… 徐亚军，赵龙飞，陈　普，等（3697）

不同生物型棉蚜对夏寄主葫芦科作物的选择 …… 肖云丽，印象初，刘同先（3706）

性别和温度对中华秋沙鸭越冬行为的影响…… 曾宾宾，邵明勤，赖宏清，等（3712）

种群、群落和生态系统

基于干扰的汪清林区森林生态系统健康评价 …… 袁　菲，张星耀，梁　军（3722）

洞庭湖森林生态系统空间结构均质性评价…… 李建军，刘　帅，张会儒，等（3732）

景观、区域和全球生态

川西米亚罗林区不同海拔岷江冷杉生长对气候变化的响应…… 徐　宁，王晓春，张远东，等（3742）

2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系 ……
…… 穆少杰，李建龙，周　伟，等（3752）

地形因子对盐城滨海湿地景观分布与演变的影响…… 侯明行，刘红玉，张华兵，等（3765）

毛乌素沙地南缘植被景观格局演变与空间分布特征…… 周淑琴，荆耀栋，张青峰，等（3774）

贵州白鹇湖沉积物中孢粉记录的 5.5 kaB. P. 以来的气候变化 …… 杜荣荣，陈敬安，曾　艳，等（3783）

典型河谷型城市春季温湿场特征及其生态环境效应…… 李国栋,张俊华,王乃昂,等 (3792)
秦岭南北近地面水汽时空变化特征…… 蒋　冲,王　飞,喻小勇,等 (3805)
露天矿区景观生态风险空间分异…… 吴健生,乔　娜,彭　建,等 (3816)
基于 Holdridge 和 CCA 分析的中国生态地理分区的比较 …… 孔　艳,江　洪,张秀英,等 (3825)

资源与产业生态

中国农业生态效率评价方法与实证——基于非期望产出的 SBM 模型分析 …… 潘　丹, 应瑞瑶 (3837)
舟山市东极大黄鱼养殖系统能值评估…… 宋　科,赵　晟,蔡慧文,等 (3846)
不同基因型玉米间混作优势带型配置…… 赵亚丽,康　杰,刘天学,等 (3855)
气候与土壤对烤后烟叶类胡萝卜素和表面提取物含量的影响…… 陈　伟,熊　晶,陈　懿,等 (3865)

城乡与社会生态

成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益 …… 张艳丽, 费世民,李智勇,等 (3878)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ￥90.00 * 1510 * 33 * 2013-06

封面图说:长白山南坡的岳桦林——长白山岳桦林位于海拔约 1700—2000m 之间的山坡。这种阔叶林分布在针叶林带的上面,成为山地森林的上缘种类,在世界山地森林中实属罕见。岳桦能够顽强地抗御长白山潮湿、寒冷、强风等恶劣气候因素,在严酷的环境条件下形成纯林,是与其独特的生长发育机理密切相关的。岳桦的枝干颇具韧性,在迎风处,由于风吹雪压,树干成片地向背风侧倾斜,这种特性使它能不畏风雪,顽强生存。随着海拔的升高,岳桦林也逐渐矮化,这是岳桦林保护自身生存,适应大自然的结果。

彩图及图说提供:陈建伟教授　北京林业大学　E-mail:cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201210061373
王若梦, 董宽虎, 何念鹏, 朱剑兴, 代景忠, 施侃侃. 围封对内蒙古大针茅草地土壤碳矿化及其激发效应的影响. 生态学报, 2013, 33(12): 3622-3629.
Wang R M, Dong K H, He N P, Zhu J X, Dai J Z, Shi K K. Effect of enclosure on soil C mineralization and priming effect in *Stipa grandis* grassland of Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3622-3629.

围封对内蒙古大针茅草地土壤碳矿化及其激发效应的影响

王若梦[1,2], 董宽虎[3], 何念鹏[1,*], 朱剑兴[1], 代景忠[4], 施侃侃[5]

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 山西农业大学研究生学院, 太谷 030801; 3. 山西农业大学动物科技学院, 太谷 030801;
4. 内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010019; 5. 北京林业大学林学院, 北京 100083)

摘要:土壤呼吸及其控制机理是全球变化研究的重点之一,其中土壤呼吸的温度敏感性和激发效应是近年来的研究热点。以长期围封的大针茅草地(Fenced grassland, FG)和自由放牧草地(Grazing grassland, GG)为对象,通过不同温度(5、10、15、20、25 ℃和 30 ℃)和添加混合凋落物的室内培养途径,探讨了长期围封对草地碳矿化(或土壤微生物呼吸)的温度敏感性和激发效应的影响。实验结果表明:在培养 42 d 内,长期围封的大针茅草地的土壤碳矿化累积量高于自由放牧草地;土壤碳矿化量随温度的升高而升高,围封对大针茅草地土壤碳矿化的温度敏感性的影响不显著,Q_{10} 值介于 1.1—1.9 之间。添加混合凋落物使土壤碳矿化表现出了明显的激发效应,且自由放牧草地的激发效应高于长期封育草地;在培养的前 7 d,土壤激发效应随着培养温度升高而增强,激发效应最高值达 6.38;但在整个培养期(42 d)土壤激发效应 15 ℃为最大。从长远角度看,中间温度更有利于土壤激发效应以及土壤碳矿化。在相同的有机物质输入状况下,长期围封大针茅草地的激发效应更低,可能是大针茅草地在长期围封状况下仍然具有碳固持效应的重要机制之一。

关键词:草地;激发效应;碳矿化;土地利用方式;温度敏感性

Effect of enclosure on soil C mineralization and priming effect in *Stipa grandis* grassland of Inner Mongolia

WANG Ruomeng[1,2], DONG Kuanhu[3], HE Nianpeng[1,*], ZHU Jianxing[1], DAI Jingzhong[4], SHI Kankan[5]

1 *Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*

2 *Graduate School of Shanxi Agricultural University, Taigu* 030801, *China*

3 *College of Animal Science and Veterinary Medicine, Shanxi Agricultural University, Taigu* 030801, *China*

4 *College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010019, *China*

5 *The Academy of Forestry of Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*

Abstract: In recent decades, the carbon (C) cycle and soil respiration of terrestrial ecosystems have been become hot topics for the global climate change, and research focused on the temperature sensitivity and priming effects of soil microbial respiration (or soil C mineralization) has increased rapidly since 2000. In this study, we focused on long-term fenced *Stipa grandis* grassland (FG) and grazing *Stipa grandis* grassland (GG) in Inner Mongolia, China, investigating the impact of land-use change on the temperature sensitivity and the priming effects of soil microbial respiration by incubating soils in the

基金项目:国家自然科学基金资助项目 (31270519, 31070431)

收稿日期:2012-10-06; **修订日期**:2013-02-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: henp@ igsnrr. ac. cn; dongkuanhu@126. com

laboratory under a temperature gradient (5, 10, 15, 20, 25 and 30℃) and with substrate addition (mixed litter). The incubation experiment was continued for 6 weeks, and the rates of soil C mineralization were measured throughout using our newly developed equipment. The results showed that the amount of soil C mineralization was higher in GG than that in FG duration the 6-weeks incubation. The rates of soil C mineralization increased significantly with increasing incubation temperature for both GG and FG (temperature coefficient (Q_{10}) values ranged from 1.1 to 1.9), however, the Q_{10} values for GG and FG were not significantly different. After mixed-litter addition, the rates of soil C mineralization not only in GG but also in FG increased significantly, and showed the apparent "priming effects" of C mineralization. Compared with long-term fenced grassland (FG), grazing grassland (GG) had higher priming effects, which even after only 7 d were 6.38 times higher. Moreover, the priming effects increased with increasing incubation temperature in the first week, although these effects were the highest at 15℃ duration the 42 d of incubation. These findings suggest that, on a longer time scale, medium temperatures should promote soil C mineralization. On the whole, long-term grazing exclusion depressed the priming effect of soil microbial respiration and resulted in less C emission under the same mixed litter input. This is probably one of the mechanisms underlying the capacity of long-term fenced grasslands to sequester CO_2 in Inner Mongolia.

Key Words: grassland; priming effect; soil C mineralization; land-use type; temperature sensitivity

土壤呼吸是过去几十年全球化生态学的研究热点。温度是影响土壤呼吸的重要因素,因此土壤呼吸的温度敏感性及其区域格局一直是全球变化研究的核心内容[1-5]。此外,科学家还认为激发效应对土壤呼吸具有重要贡献,也是近年来该领域新的研究增长点[6-8]。

土壤呼吸的温度敏感性通常是土壤呼吸速率对温度变化的响应强度[3, 9-10],通常用 Q_{10} 表示;Q_{10} 是指温度每升高 10 ℃土壤呼吸所增加的倍数,Q_{10} 值越大温度敏感性越高[10-12]。土壤激发效应早在 20 世纪 20 年代后期就被发现,40 年代科学家用同位素实验证实了该现象并被广泛接受[8],但目前科学家对于激发效应的机理解释以及在陆地生态系统碳循环中的作用仍存在较大争议[13-16]。国内学者围绕外源物质添加对土壤呼吸的激发效应也做了部分研究,例如,孙丽娟等[17]发现鼎湖山凋落物可显著增加土壤有机碳的分解和总呼吸。王光军等[18]发现改变凋落物输入会显著影响杉木人工林土壤呼吸。目前科学家对激发效应的定义也存在较大的差异[19],本文将土壤碳矿化激发效应定义为外源有机物质输入对土壤碳矿化量的影响,用添加和非添加处理的土壤碳矿化量的比值来表示。在研究中土壤呼吸主要包括自养呼吸(主要是根呼吸)和异氧呼吸(主要是土壤微生物呼吸)[10]。在大多数室内培养实验中,科学家通常将土壤微生物呼吸速率等同于土壤碳矿化速率(从土壤有机碳转化为无机碳的速率),本文采用土壤碳矿化来描述土壤碳转化速率。

围封是内蒙古地区广泛采用的草地恢复措施之一,也是实现该地区草地碳汇效应的最重要措施[20-22]。围封对草地土壤呼吸温度敏感性和激发效应的影响,可能将影响到土壤有机质的稳定性,并最终决定草地的碳固持效应与潜力。本文利用长期封育的大针茅草地和自由放牧草地,通过添加凋落物和室内培养途径,探讨了围封对土壤碳矿化的温度敏感性和激发效应的影响,希望能为探讨全球变化背景下我国内蒙古典型草地的碳固持效应提供理论依据。

1　实验材料与方法

1.1　野外实验样地概况

该地区属大陆性温带半干旱草原气候,海拔 1200—1250 m,年平均温度 0.4 ℃,年平均降水量 345 mm[20]。实验样地是中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站的长期实验样地,分别是 1979 年封育的大针茅草地和围栏外的自由放牧草地。植被为典型大针茅群落,优势植物为大针茅、羊草和糙隐子草。表 1 详细描述了实验样地的基本特征。

表 1 实验样地特征与土地利用历史

Table 1 The properties of experimental plots and land-use history

样地类别 Types	地理坐标 Location	土壤有机碳含量 Soil organic carbon /(g/kg)	土壤全氮含量 Soil total nitrogen (g/kg)	优势植物种类 Dominant species	土地利用历史 Land-use type
围封草地(FG) Fenced grassland	43°33′ N 116°40′ E	16.16±1.90a	1.46±0.17a	羊草(*Leymus chinensis*)、大针茅(*Stipa grandis*)、西伯利亚羽茅(*Achnatherum sibiricum*)	1979 至今,围栏封育,围封前草地状态良好
放牧草地(GG) Grazing grassland	43°33′ N 116°40′ E	13.38±0.80b	1.33±0.10a	羊草(*L. chinensis*)、大针茅(*S. grandis*)、糙隐子草(*Agropyron cristatum*)	自由放牧,草地轻度退化

表内具有相同的小写字母则表示差异不显著($P < 0.05$)

1.2 野外取样

2011 年 9 月,在围封草地和自由放牧草地分别设置了一条 100 m 的取样样带,每条样带设置 4 个 1 m × 1 m 样方;在完成样方内地上生物量取样和地表凋落物收集后,采用土钻法对 0—30 cm 土壤进行取样,每个样地获得 4 份土壤样品。

1.3 室内培养与测试方法

1.3.1 室内培养

首先测定土壤含水量以及饱和含水量;将收集的地上凋落物混合、烘干和粉碎。随后,将约 25 g 风干土的土壤样品装入 100 mL 圆口塑料瓶,添加石英砂 5 g,再将土壤含水量调节至 60% 饱和含水量。在完成水分调节后,先将所有土壤样品放入 20 ℃ 恒温恒湿培养箱内培养 1 周;再分别放入 5、10、15、20、25 ℃和 30 ℃ 培养箱内培养 2 d,随后开展土壤碳矿化速率本底测定。随后,按照土壤 1% 的比例向部分培养瓶内添加混合凋落物、充分摇匀;添加凋落物处理分别表示为 FG+和 GG+。简言之,实验共包括 2 个实验样地、6 个培养温度梯度、2 种添加处理、4 次重复,共计 96 个培养样品。

1.3.2 土壤碳矿化速率的测试方法和测定频率

土壤碳矿化速率的测定采用自主研发装置进行测定(图 1)。该装置主要包括气体进样装置、CO_2 起始浓度调节装置、自动控制装置和红外 CO_2 浓度分析仪器;主要仪器 Licor-7000 红外 CO_2 浓度分析仪、低温循环仪、恒温水浴锅、数据采集器和电磁阀等。该系统可根据实验需求调节装置内起始 CO_2 浓度、测试时间以及不同测试样品间的自动切换,可成功实现在室内对土壤碳矿化速率的高速连续测定,可广泛应用于土壤碳周转和微生物活性等相关领域。

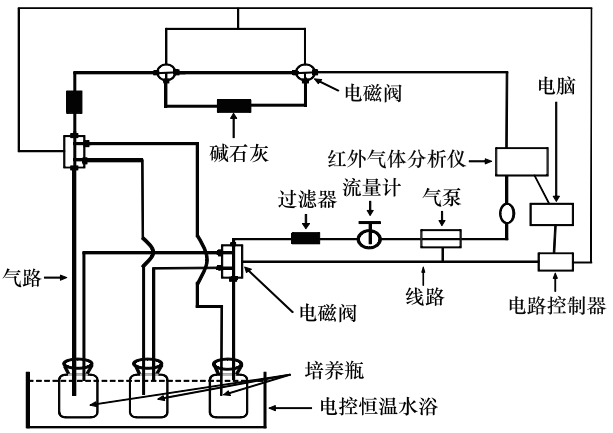

图 1 土壤碳矿化速率快速测定装置示意图

Fig. 1 Sketch map for the measurement system of soil mineralization rate

1.4 实验数据处理与分析

1.4.1 土壤碳矿化速率的计算方法

$$R = \frac{C \times V \times \alpha \times \beta}{m}$$

式中,R 为土壤碳矿化速率或土壤微生物呼吸速率(μg CO_2 g^{-1} 土壤 h^{-1}),C 为测试时间内 CO_2 浓度变化的直线斜率。V 指包括培养瓶和管线等所有气体体积,m 是指培养瓶内的土壤干重,α 和 β 是将土壤微生物呼吸速率转化为标准单位的系数。预实验结果表明直线回归可很好地拟合短期的土壤微生物呼吸速率或土壤碳矿化速率(R^2>0.99,P <0.0001)。

1.4.2 土壤呼吸温度敏感性 Q_{10} 值计算方法

土壤碳矿化速率与温度之间的关系采用指数模型[23]:

$$R = a \times e^{bT}$$

式中, R 为土壤碳矿化速率,T 为温度,a 为温度为 0℃时的土壤呼吸,b 为温度反应系数。

$$Q_{10} = e^{10b}$$

利用 One-way ANOVA 检验不同处理的显著性差异,显著性检验水平为 $P = 0.05$。所有数据统计分析均利用 SAS8.0 软件完成。

2　结果

2.1　温度对土壤碳矿化的影响

随着培养温度的升高,土壤碳矿化量随之升高,30 ℃时达到最高点(图 2)。添加混合凋落物显著提高了土壤碳矿化量,分别是未添加处理土壤样品的 2.8 倍(围封草地)和 3.4 倍(自由放牧草地)。在相同的培养温度下,围封草地的土壤碳矿化量在数值上高于自由放牧土壤,但在 $P = 0.05$ 水平差异不显著。随着培养时间的延长,土壤碳矿化速率逐渐降低,土壤碳矿化速率在后期趋于平缓状态 (图 2)。

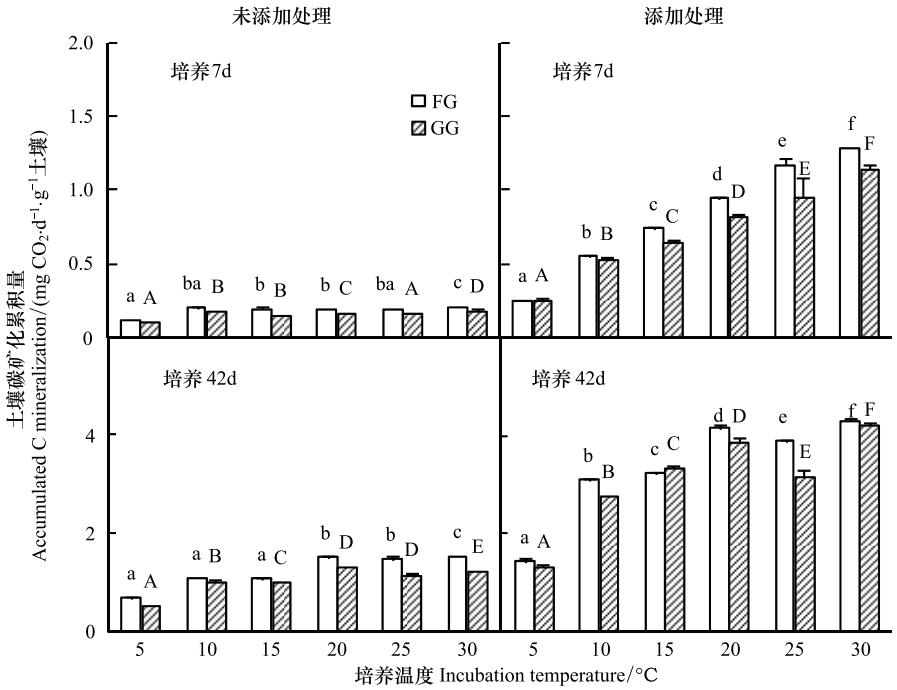

图 2　围封和添加凋落物对土壤碳矿化累积量的影响

Fig. 2　Effect of enclosure and litter addition on the accumulated soil C mineralization

FG, 围封草地 fenced grassland; GG, 自由放牧草地 grazing grassland; 图中小写和大写字母分别是对 FG 和 GG 的检验结果,数据具有相同字母则表示差异不显著 (P =0.05)

2.2　土壤碳矿化的激发效应

在培养期间,未添加处理的土壤碳矿化量相对稳定,而添加凋落物处理显著提高了土壤碳矿化量 (图 3)。凋落物添加的激发效应在培养第 1 周尤为明显;培养温度越高,培养前期的激发效应越强、而后期的土壤碳矿化量降低幅度也越大。

在添加凋落物后土壤碳矿化很快表现出了明显的激发效应,且激发效应随着培养时间的增加而显著降低(图 3)。在培养前 7 d 中,土壤激发效应随温度升高而显著升高(P <0.01);激发效应最大值在 30℃出现(FG 为 6.15,GG 为 6.38)、最小在 5 ℃出现 (图 4)。在培养 42 d 内,温度对土壤激发效应的影响不显著,且土壤激发效应的最大值均出现在 15℃,自由放牧草地土壤激发效应的数值(3.36)高于围封草地的土壤激发效应(3.04)(图 4)。

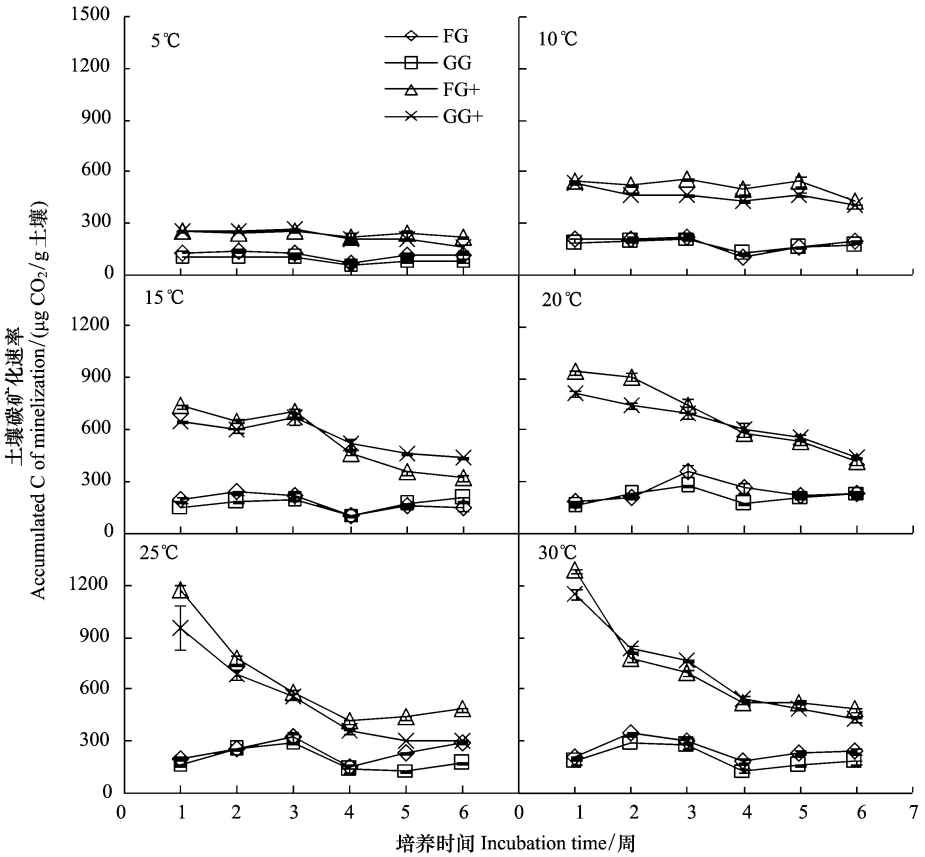

图 3 土壤碳矿化累积量的变化动态

Fig. 3 Dynamics of the accumulation of soil C mineralization with incubation times

FG: 长期封育草地 fenced grassland; FG+: 长期封育草地+混合凋落物 fenced grassland + mixture litter; GG: 自由放牧草地 grazing grassland; GG+: 自由放牧草地+混合凋落物 grazing grassland + mixture litter

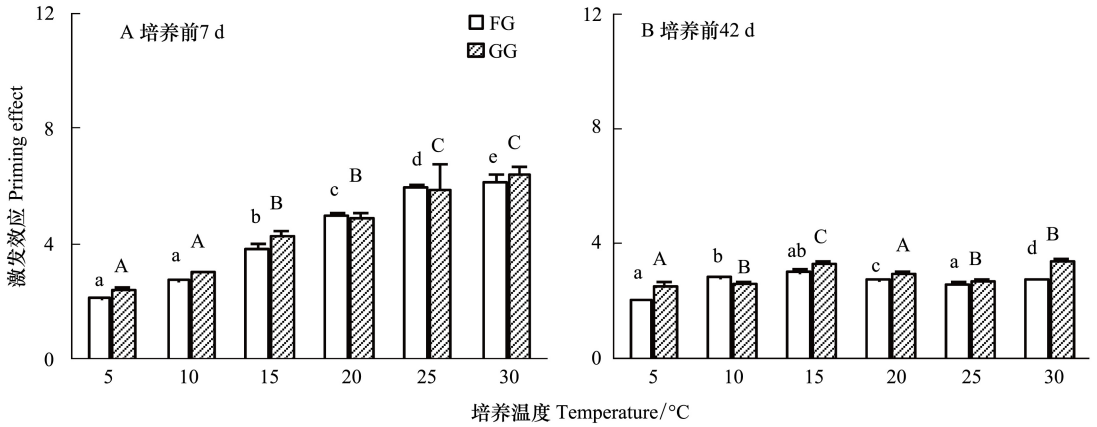

图 4 温度和培养时间对土壤碳矿化激发效应的影响

Fig. 4 Effect of incubation temperature and time on the priming effect of soil C mineralization

FG: 长期封育草地 fenced grassland; GG: 自由放牧草地 grazing grassland; 图中小写和大写字母分别是对 FG 和 GG 的检验结果, 具有相同字母日数据则表示差异不显著 ($P = 0.05$)

2.3 土壤碳矿化的温度敏感性

围封草地和自由放牧草地的土壤碳矿化温度敏感性(Q_{10})差异不显著(表 2)。添加混合凋落物显著增加了土壤碳矿化的温度敏感性($P < 0.05$)。未添加混合凋落物土壤的 Q_{10} 随培养时间的延长而逐渐增大; 添加

混合凋落物土壤的 Q_{10} 值却随着培养时间的延长而降低（表2）。例如,封育和自由放牧草地在不添加凋落物时,培养 42 d 的 Q_{10} 值显著高于培养 7 d 的 Q_{10}(分别高出 15.4% 和 14.0%);相反,添加混合凋落物后,培养 42 d 的 Q_{10} 值显著低于培养 7 天的 Q_{10}。在添加外源有机质后,通过改变底物的质量及其激发效应,影响土壤碳矿化及其温度敏感性。

表 2　围封和培养时间对土壤碳矿化温度敏感性(Q_{10})的影响

Table 2　Effects of enclosure and incubation time on the temperate sensitivity (Q_{10}) of soil C mineralization

		$C_{min} = a \times \exp(b \times T)$		
		b	R^2	Q_{10}
培养 7d				
围封草地	FG	0.0155	0.474	1.168±0.02a
	FG+	0.0612	0.888	1.845±0.02b
自由放牧草地	GG	0.0150	0.464	1.162±0.02a
	GG+	0.0545	0.882	1.725±0.02c
培养 42d				
围封草地	FG	0.0300	0.806	1.350±0.02a
	FG+	0.0368	0.702	1.444±0.02b
自由放牧草地	GG	0.0278	0.608	1.320±0.01a
	GG+	0.0358	0.663	1.430±0.01b

具有相同小写字母的实验处理间的差异不显著（$P < 0.05$）

3　讨论与结论

土地利用方式对土壤碳矿化量具有重要的影响[24-27]。长期围封的大针茅草地土壤碳矿化累积量高于自由放牧草地,且高温时(25 ℃和 30 ℃)差异显著,该结论与大部分研究相同[24, 28-29]。然而,在温度较低时,土壤微生物和酶活性受到温度限制,因此表现为围封对土壤碳矿化量影响较小[10, 24, 30];随着温度升高,底物数量和质量对土壤微生物活性起更大作用,促进土壤碳矿化。大量研究已经表明:土壤有机碳含量和微生物群落结构和特征是影响土壤碳矿化速率的重要因素[9, 26, 31]。土地利用变化直接造成了土壤内部结构发生变化,同时植物群落的改变也会间接影响土壤微生物群落种类及其数量,从而对土壤碳矿化产生重要影响。

外源有机物的加入对土壤碳矿化有直接影响,并表现出明显的激发效应[19, 32-34]。温度对激发效应的影响在培养前期表现更为明显,随着培养时间的延长,所添加的凋落物快速被消耗,激发效应所引起的土壤碳矿化速率明显减弱[10, 31],使后期土壤碳矿化量显著降低。培养温度和培养时间是影响激发效应评估的重要因素,从长远而言,中间温度对土壤碳矿化及其激发效应具有明显的促进作用[23, 35],未来应进一步加强温度与激发效应的关系及其内在机理。长期封育草地土壤激发效应低于自由放牧草地,可能是长期封育草地仍然具有碳固持效应的重要机制之一。

长期围封和自由放牧是两种不同的土地利用方式,理论上长期封育草地应比自由放牧草地具有更高的土壤碳矿化的温度敏感性,但实验结果却表明二者间差异不显著。从土壤有机质(或有机碳)含量而言,长期封育草地的土壤质量更高(表 1),从而使其土壤碳矿化的温度敏感性更高;大量研究表明土壤底物质量是决定土壤碳矿化温度敏感性的重要因素[36-37]。长期封育后土壤微生物群落结构和数量发生了显著的变化[10, 23-26],而这种显著变化并不利于土壤碳矿化(或微生物呼吸)及其温度敏感性。

在室内培养状况下,长期围封草地的土壤碳矿化累积量均高于自由放牧草地,但二者土壤碳矿化的温度敏感性影响不大。与长期围封草地相比,添加混合凋落物后自由放牧草地表现出了更高的激发效应。在培养初期,土壤激发效应随温度的升高显著增强;在整个培养期,土壤激发效应的最大值出现在 15 ℃;从更长时间尺度来说,培养温度和培养时间对评估土壤激发效应具有重要的影响。长期封育草地的激发效应更低,可能是长期封育大针茅草地仍然具有固碳能力的重要机制之一。因此,为了更好地揭示内蒙古典型草地的碳固持效应与机理,未来应进一步加强土壤激发效应及其主要控制机制的研究工作。

References:

[1] Cox P M, Betts R A, Jones C D, Spall S A, Totterdell I J. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. Nature, 2000, 408(6813): 750-750.

[2] Woodwell G M, Mackenzie F T, Houghton R A, Apps M, Gorham E, Davidson E. Biotic feedbacks in the warming of the earth. Climatic Change, 1998, 40(3/4): 495-518.

[3] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. Tellus B, 1992, 44(2): 81-99.

[4] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. Soil Biology and Biochemistry, 1995, 27(6): 753-760.

[5] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO_2 efflux on temperature. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(2): 155-165.

[6] Mansson K F, Falkengren-Grerup U. The effect of nitrogen deposition on nitrification, carbon and nitrogen mineralisation and litter C: N ratios in oak (*Quercus robur* L.) forests. Forest Ecology and Management, 2003, 179(1/3): 455-467.

[7] Bai J B, Xu X L, Song M H, He Y T, Jiang J, Shi P L. Effects of temperature and added nitrogen on carbon mineralization in alpine soils on the Tibetan Plateau. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(5): 855-859.

[8] Chen C M, Xie Z B, Zhu J G. Advances in research on priming effect of soil organic carbon. Soils, 2006, 38(4): 359-365.

[9] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, Wallace L L. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. Nature, 2001, 413(6856): 622-625.

[10] Yang Q P, Xu M, Liu H S, Wang J S, Liu L X, Chi Y G, Zheng Y P. Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8): 2301-2311.

[11] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. Functional Ecology, 1994, 8(3): 315-323.

[12] Perkins D M, Yvon-Durocher G, Demars B O L, Reiss J, Pichler D E, Friberg N, Trimmer M, Woodward G. Consistent temperature dependence of respiration across ecosystems contrasting in thermal history. Global Change Biology, 2012, 18(4): 1300-1311.

[13] Mary B, Fresneau C, Morel J L, Mariotti A. C-cycling and N-cycling during decomposition of root mucilage, roots and glucose in soil. Soil Biology and Biochemistry, 1993, 25(8): 1005-1014.

[14] Riga A, Fischer V, Van Praag H J. Fate of fertilizer nitrogen applied to winter-wheat as $Na^{15}NO_3$ and $(^{15}NH_4)_2SO_4$) studied in microplots through a four-course rotation. Ⅰ. Influence of fertilizer splitting on soil and fertilizer nitrogen. Soil Science, 1980, 130(2): 88-99.

[15] Shen S M. The Effect of mineral nitrogen on the minieralization and immobilization of soil nitrogen. Acta Pedologica Sinica, 1986, 22(1): 10-15.

[16] Dalenberg J W, Jager G. Priming effect of some organic additions to ^{14}C-labeled soil. Soil Biology and Biochemistry, 1989, 21(3): 443-448.

[17] Sun L J, Zeng H, Guo D L. Effects of litter and mineral nitrogen input on soil organic carbon decomposition in subtropical mixed forest in Dinghu Mountain, South China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(12): 3087-3093.

[18] Wang G J, Tian D L, Yan W D, Zhu F, Xiang W H, Liang X C. Effects of aboveground litter exclusion and addition on soil respiration in a cunninghamia lanceolata plantation in China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(4): 739-747.

[19] Lü D Q, Zhang S L, Yang X Y. Effect of supplying C and N on the mineralization, immobilization and priming effect of soil nitrogen. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(2): 223-229.

[20] He N P, Yu Q, Wu L, Wang Y S, Han X G. Carbon and nitrogen store and storage potential as affected by land-use in a *Leymus chinensis* grassland of northern China. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(12): 2952-2959.

[21] He N P, Wu L, Wang Y S, Han X G. Changes in carbon and nitrogen in soil particle-size fractions along a grassland restoration chronosequence in northern China. Geoderma, 2009, 150(3/4): 302-308.

[22] He N P, Zhang Y H, Yu Q, Chen Q S, Pan Q M, Zhang G M, Han X G. Grazing intensity impacts soil carbon and nitrogen storage of continental steppe. Ecosphere, 2011, 2(1): art8, doi: 10.1890/ES10-00017.1.

[23] Chen Q S, Li L H, Han X G, Yan Z D, Wang Y F, Zhang Y, Xiong X G, Chen S P, Zhang L X, Gao Y Z. Temperature sensitivity of soil respiration in relation to soil moisture in 11communities of typical temperate steppe in Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 831-836.

[24] Liu Y P, Tang Y P, Lu Q, Gao R. Effects of temperature and land use change on soil organic carbon mineralization. Journal of Anhui Agricultural Science, 2011, 39(7): 3896-3927.

[25] Jing F, Yang H, Zhao Q G. Progress in the research on soil organic carbon storage and its influencing factors. Soils, 2000, 32(1): 11-17.

[26] Zhang J B, Song C C, Yang W Y. Temperature sensitivity of soil respiration and its effecting factors in the different land use. Acta Scientiae

Circumstantiae, 2005, 25(11): 1537-1542.

[27] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Land use induced changes of organic carbon storage in soils of China. Global Change Biology, 2003, 9(3): 305-315.

[28] Zhang L H, Chen Y L, Zhao R F, Li W H. Impact of temperature and soil water content on soil respiration in temperate deserts, China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(5): 936-949.

[29] Chen Q S, Li L H, Han X G, Dong Y S, Wang Z P, Xiong X G, Yan Z D. Acclimatization of soil respiration to warming. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2649-2655.

[30] Mikan C J, Schimel J P, Doyle A P. Temperature controls of microbial respiration in arctic tundra soils above and below freezing. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(11): 1785-1795.

[31] Gershenson A, Bader N E, Cheng W X. Effects of substrate availability on the temperature sensitivity of soil organic matter decomposition. Global Change Biology, 2009, 15(1): 176-183.

[32] Hu L N, Su Y R, He X Y, Li Y, Wang Y H, Wu J S. Effect to the turnover of soil organic carbon in three typical soils in karst area by adding ^{14}C-labelled organic matter. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(11): 2368-2373.

[33] Hua L, Jing S S, Tang Z G. Effect of bio-charcoal on release of carbon dioxide in soil. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(11): 6501-6503.

[34] Wang J S, Zhao X H, Zhang C Y, Kang F F, Shang B S, Chi Q J. Changes of carbon input influence soil respiration in a Pinus tabulaeformis plantation. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(9): 2768-2777.

[35] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. Nature, 2006, 440(7081): 165-173.

[36] Kuzyakov Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(9): 1363-1371.

[37] Zhou J Z, Xue K, Xie J P, Deng Y, Wu L Y, Cheng X L, Fei S F, Deng S P, He Z L, van Nostrand J D, Luo Y Q. Microbial mediation of carbon-cycle feedbacks to climate warming. Natutr Climate Change, 2012, 2(2): 106-110.

参考文献:

[7] 白洁冰, 徐兴良, 宋明华, 何永涛, 将婧, 石培礼. 温度和氮素输入对青藏高原三种高寒草地土壤碳矿化的影响. 生态环境学报, 2011, 20(5): 855-859.

[8] 陈春梅, 谢祖彬, 朱建国. 土壤有机碳激发效应研究进展. 土壤, 2006, 38(4): 359-365.

[10] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 王劲松, 刘丽香, 迟永刚, 郑云普. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性. 生态学报, 2011, 31(8): 2301-2311.

[15] 沈善敏. 无机氮对土壤氮矿化与固定的影响——兼论土壤氮的"激发效应". 土壤学报, 1986, 22(1): 10-15.

[17] 孙丽娟, 曾辉, 郭大力. 鼎湖山亚热带常绿针阔叶混交林凋落物及矿质氮输入对土壤有机碳分解的影响. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3087-3093.

[18] 王光军, 田大伦, 闫文德, 朱凡, 项文化, 梁小翠. 改变凋落物输入对杉木人工林土壤呼吸的短期影响. 植物生态学报, 2009, 33(4): 739-747.

[19] 吕殿青, 张树兰, 杨学云. 外加碳、氮对土壤氮矿化、固定与激发效应的影响. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 223-229.

[23] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 阎志丹, 王艳芬, 张焱, 熊小刚, 陈世苹, 张丽霞, 高英志. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系. 生态学报, 2004, 24(4): 831-836.

[24] 刘燕萍, 唐英平, 卢茜, 高人. 温度和土地利用变化对土壤有机碳矿化的影响. 安徽农业科学, 2011, 39(7): 3896-3927.

[25] 金峰, 杨浩, 赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展. 土壤, 2000, 32(1): 11-17.

[26] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 不同土地利用下土壤呼吸温度敏感性差异及影响因素分析. 环境科学学报, 2005, 25(11): 1537-1542.

[28] 张丽华, 陈亚宁, 赵锐锋, 李卫红. 温带荒漠中温度和土壤水分对土壤呼吸的影响. 植物生态学报, 2009, 33(5): 936-949.

[29] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 董云社, 王智平, 熊小刚, 阎志丹. 土壤呼吸对温度升高的适应. 生态学报, 2004, 24(11): 2649-2655.

[32] 胡乐宁, 苏以荣, 何寻阳, 李杨, 王媛华, 吴金水. 添加^{14}C 标记稻草对喀斯特典型土壤有机碳矿化的影响. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2368-2373.

[33] 花莉, 金素素, 唐志刚. 生物质炭输入对土壤 CO_2 释放影响的研究. 安徽农业科学, 2012, 40(11): 6501-6503, 6540-6540.

[34] 汪金松, 赵秀海, 张春雨, 康峰峰, 尚宝山, 池青俊. 改变 C 源输入对油松人工林土壤呼吸的影响. 生态学报, 2012, 32(9): 2768-2777.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 12 Jun., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

Research on the disturbance of frost damage to forests ····· LI Xiufen, ZHU Jiaojun, WANG Qingli, et al (3563)

Advances in salt-tolerance mechanisms of *Suaeda* plants ····· ZHANG Aiqin, PANG Qiuying, YAN Xiufeng (3575)

Autecology & Fundamentals

Simulation and prediction of spatial patterns of *Robinia pseudoacacia* flowering dates in eastern China's warm temperate zone ····· XU Lin, CHEN Xiaoqiu, DU Xing (3584)

Response of leaf functional traits of *Betula ermanii* saplings to the altitudinal Variation ····· HU Qipeng, GUO Zhihua, SUN Lingling, et al (3594)

Analysis of genetic diversity of chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) natural secondary forest populations and correlation with theirs habitat ecological factors ····· LI Ming, WANG Shuxiang, GAO Baojia (3602)

Nitrogen addition affects root growth, phosphorus and nitrogen efficiency of three provenances of *Schima superba* in barren soil ····· ZHANG Rui, WANG Yi, JIN Guoqing, et al (3611)

Effect of enclosure on soil C mineralization and priming effect in *Stipa grandis* grassland of Inner Mongolia ····· WANG Ruomeng, DONG Kuanhu, HE Nianpeng, et al (3622)

Effects of slope position on gax exchange charateristics of main tree species for vegetation restoration in dry-hot valley of Jingsha River ····· DUAN Aiguo, ZHANG Jianguo, HE Caiyun, et al (3630)

Impacts of biodegradation on desorption of phenol adsorbed on black carbon and soil ····· HUANG Jiexun, MO Jianmin, LI Feili, et al (3639)

Physiological and biochemical responses to different soil drought stress in three tree species ····· WU Qin, ZHANG Guangcan, PEI Bin, et al (3648)

The ear-leaf ratio of population is related to yield and water use efficiency in the water-saving cultivation system of winter wheat ····· ZHANG Yongping, ZHANG Yinghua, HUANG Qin, et al (3657)

Effects of ozone stress on photosynthesis, dry matter production and yield of rice under different seedling quality and plant density ····· PENG Bin, LI Panlin, ZHOU Nan, et al (3668)

Effects of water and nitrogen under root restriction on photosynthetic characters of cotton plants grown with under-mulch drip irrigation ····· TAO Xianping, LUO Honghai, ZHANG Yali, et al (3676)

The influence of light and growth stage on oxygen diffusion capacity of *Acorus calamus* roots ····· WANG Wenlin, WANG Guoxiang, WAN Yinjing, et al (3688)

Isolation, screening and characterization of phytopathogen antagonistic endophytes from wild *Artemisia argyi* ····· XU Yajun, ZHAO Longfei, CHEN Pu, et al (3697)

Performance of the two host-biotypes of *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) on different cucurbitaceous host plants ····· XIAO Yunli, YIN Xiangchu, LIU Tongxian (3706)

The effects of gender and temperature on the wintering behavior of Chinese merganser ····· ZENG Binbin, SHAO Mingqin, LAI Hongqing, et al (3712)

Population, Community and Ecosystem

Assessment indicators system of forest ecosystem health based on the disturbance in Wangqing forestry ····· YUAN Fei, ZHANG Xingyao, LIANG Jun (3722)

Heterogeneity evaluation of forest ecological system spatial structure in Dongting Lake ····· LI Jianjun, LIU Shuai, ZHANG Huiru, et al (3732)

Landscape, Regional and Global Ecology

Climate-growth relationships of *Abies faxoniana* from different elevations at Miyaluo, western Sichuan, China ····· XU Ning, WANG Xiaochun, ZHANG Yuandong, et al (3742)

Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010 …… MU Shaojie, LI Jianlong, ZHOU Wei, et al (3752)
Influences of topographic features on the distribution and evolution of landscape in the coastal wetland of Yancheng …… HOU Minghang, LIU Hongyu, ZHANG Huabing, et al (3765)
Vegetation landscape pattern change and characteristics of spatial distribution in south edge of Mu Us Sandy Land …… ZHOU Shuqin, JING Yaodong, ZHANG Qingfeng, et al (3774)
Climate change recorded mainly by pollen from baixian lake during the last 5.5kaB. P. …… DU Rongrong, CHEN Jing'an, ZENG Yan, et al (3783)
Characteristics of temperature field, humidity field and their eco-environmental effects in spring in the typical valley-city …… LI Guodong, ZHANG Junhua, WANG Naiang, et al (3792)
Spatial and temporal variation of surface water vapor over northern and southern regions of Qinling Mountains …… JIANG Chong, WANG Fei, YU Xiaoyong, et al (3805)
Spatial variation of landscape eco-risk in open mine area …… WU Jiansheng, QIAO Na, PENG Jian, et al (3816)
The comparision of ecological geographica regionlization in China based on Holdridge and CCA analysis …… KONG Yan, JIANG Hong, ZHANG Xiuying, et al (3825)

Resource and Industrial Ecology

Agricultural eco-efficiency evaluation in China based on SBM model …… PAN Dan, YING Ruiyao (3837)
The emergy analysis of large yellow croaker(*Larimichthys crocea*) aquaculture system around Dongji island in Zhoushan …… SONG Ke, ZHAO Sheng, CAI Huiwen, et al (3846)
Optimum stripe arrangement for inter-cropping and mixed-cropping of different maize (*Zea mays* L.) genotypes …… ZHAO Yali, KANG Jie, LIU Tianxue, et al (3855)
Effects of climate and soil on the carotenoid and cuticular extract content of cured tobacco leaves …… CHEN Wei, XIONG Jing, CHEN Yi, et al (3865)

Urban, Rural and Social Ecology

Carbon sequestration and oxygen release as well as cooling and humidification efficiency of the main greening tree species of Sha River, Chengdu …… ZHANG Yanli, FEI Shimin, LI Zhiyong, et al (3878)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科研工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科研人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933　　CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号　**电　话**:(010)62941099;62843362

E-mail:shengtaixuebao@rcees.ac.cn　**网　址**:www.ecologica.cn

本期责任副主编　吴文良　　**编辑部主任**　孔红梅　　**执行编辑**　刘天星　段　靖

生　态　学　报
(SHENGTAI　XUEBAO)
(半月刊　1981 年 3 月创刊)
第 33 卷　第 12 期　(2013 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 33　No. 12 (June, 2013)

编　辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	**Edited** by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主　编	王如松	**Editor-in-chief**	WANG Rusong
主　管	中国科学技术协会	**Supervised** by	China Association for Science and Technology
主　办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	**Sponsored** by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出　版	科学出版社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	**Published** by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
印　刷	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发　行	科学出版社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	**Distributed** by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订　购	全国各地邮局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	**Foreign**	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营许可证	京海工商广字第 8013 号		

ISSN 1000-0933

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q　　**国内外公开发行**　　**国内邮发代号** 82-7　　**国外发行代号** M670　　**定价** 90.00 元