

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第11期 Vol.33 No.11 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
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 11 期 2013 年 6 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 新一代 Landsat 系列卫星: Landsat 8 遥感影像新增特征及其生态环境意义 徐涵秋, 唐 菲 (3249)
- 两种自然保护区设计方法——数学建模和计算机模拟 王宜成 (3258)
- 家域研究进展 张晋东, Vanessa HULL, 欧阳志云 (3269)
- 浅水湖泊生态系统稳态转换的阈值判定方法 李玉照, 刘 永, 赵 磊, 等 (3280)
- 辐射传输模型多尺度反演植被理化参数研究进展 肖艳芳, 周德民, 赵文吉 (3291)
- 微囊藻毒素对陆生植物的污染途径及累积研究进展 靳红梅, 常志州 (3298)

个体与基础生态

- 年龄、性别及季节因素对千岛湖岛屿社鼠最大活动距离的影响 叶 彬, 沈良良, 鲍毅新, 等 (3311)
- 寄主大小及寄生顺序对蝇蛹佣小蜂寄生策略的影响 詹月平, 周 敏, 贺 张, 等 (3318)
- 两种苹果砧木根系水力结构及其 PV 曲线水分参数对干旱胁迫的响应
..... 张林森, 张海亭, 胡景江, 等 (3324)
- 三种根系分泌脂肪酸对花生生长和土壤酶活性的影响 刘 苹, 赵海军, 仲子文, 等 (3332)

种群、群落和生态系统

- 象山港春季网采浮游植物的分布特征及其影响因素 江志兵, 朱旭宇, 高 瑜, 等 (3340)
- 洞头海域网采浮游植物的月际变化 朱旭宇, 黄 伟, 曾江宁, 等 (3351)
- 狗牙根与牛鞭草在三峡库区消落带水淹结束后的抗氧化酶活力 李兆佳, 熊高明, 邓龙强, 等 (3362)
- 三亚岩相潮间带底栖海藻群落结构及其季节变化 陈自强, 寿 鹿, 廖一波, 等 (3370)
- 长期围封对不同放牧强度下草地植物和 AM 真菌群落恢复的影响 周文萍, 向 丹, 胡亚军, 等 (3383)
- 北京松山自然保护区森林群落物种多样性及其神经网络预测 苏日古嘎, 张金屯, 王永霞 (3394)
- 藏北高寒草地生态补偿机制与方案 刘兴元, 龙瑞军 (3404)
- 辽东山区次生林生态系统不同林型树干茎流的理化性质 徐天乐, 朱教君, 于立忠, 等 (3415)
- 施氮对亚热带樟树林土壤呼吸的影响 郑 威, 闫文德, 王光军, 等 (3425)
- 人工高效经营雷竹林 CO₂ 通量估算及季节变化特征 陈云飞, 江 洪, 周国模, 等 (3434)
- 新疆典型荒漠区单食性天花吉丁虫磷元素含量对环境的响应 王 晶, 吕昭智, 宋 菁 (3445)
- 双斑长跗萤叶甲越冬卵在玉米田的空间分布型 张 聪, 葛 星, 赵 磊, 等 (3452)
- 舟山群岛四个养殖獐种群遗传多样性和遗传结构 林杰君, 鲍毅新, 刘 军, 等 (3460)

景观、区域和全球生态

- 乡镇尺度金塔绿洲时空格局变化 巩 杰, 谢余初, 孙 朋, 等 (3470)
- 合并与不合并: 两个相似性聚类分析方法比较 刘新涛, 刘晓光, 申 琪, 等 (3480)

资源与产业生态

基于投入产出表的中国水足迹走势分析 王艳阳,王会肖,张 昕 (3488)

基于 MRICES 模型的气候融资模拟分析 朱潜挺,吴 静,王 铮 (3499)

黄东海陆架区沉积物中磷的形态分布及生物可利用性..... 张小勇,杨 茜,孙 耀,等 (3509)

鄱阳湖采砂南移扩大影响范围——多源遥感的证据 崔丽娟,翟彦放,邬国锋 (3520)

温度、盐度及其互作效应对吉富罗非鱼血清 IGF-I 与生长的影响 强 俊,杨 弘,王 辉,等 (3526)

城乡与社会生态

福建省城镇-交通系统的景观分隔效应 张天海,罗 涛,邱全毅,等 (3536)

研究简报

青藏高原高寒草原区工程迹地面积对其恢复植物群落特征的影响 毛 亮,周 杰,郭正刚 (3547)

黄土山地苹果树树体不同方位液流速率分析..... 孟秦倩,王 健,张青峰,等 (3555)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 314 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 33 * 2013-06



封面图说: 清晨的天山马鹿群——家域是动物行为学和保护生物学的重要概念之一,它在动物对资源环境的适应与选择,种群密度及社会关系等生态学过程研究中有着重要的作用。马鹿属于北方森林草原型动物,在选择生境的各种要素中,隐蔽条件、水源和食物的丰富度是最重要的指标。野生天山马鹿是中国的特产亚种,主要分布在北天山深山海拔1500—3800m 地带的森林草原中,在高山至谷地之间不同高度的坡面上,马鹿按季节、昼夜变化的不同进行采食。

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/stxb201203130334

郑威, 闫文德, 王光军, 梁小翠, 张徐源. 施氮对亚热带樟树林土壤呼吸的影响. 生态学报, 2013, 33(11): 3425-3433.

Zheng W, Yan W D, Wang G J, Liang X C, Zhang X Y. Effect of nitrogen addition to soil respiration in *Cinnamomum camphora* forest in subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(11): 3425-3433.

施氮对亚热带樟树林土壤呼吸的影响

郑 威^{1,3}, 闫文德^{1,2,3,*}, 王光军^{1,4}, 梁小翠^{1,3}, 张徐源^{1,3}

(1. 中南林业科技大学, 长沙 410004; 2. 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004;

3. 城市森林生态湖南省重点实验室, 长沙 410004; 4. 湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站, 会同 418307)

摘要: 人类活动引起全球范围内大气氮沉降量的升高, 增加了陆地生态系统氮输入, 从而影响土壤 CO₂ 排放。为揭示生态系统氮输入升高对土壤呼吸的影响, 2010 年 6 月至 2012 年 1 月, 对亚热带樟树林 (*Cinnamomum camphora*) 进行模拟氮添加试验, 每月上、下旬采用红外分析法测定 4 种氮输入水平 (CK, 0 g m⁻² a⁻¹; 低氮 LN, 5 g m⁻² a⁻¹; 中氮 MN, 15 g m⁻² a⁻¹; 高氮 HN, 30 g m⁻² a⁻¹) 下的土壤呼吸速率。结果表明: (1) 樟树林土壤呼吸存在明显的季节动态, 最高值出现在 6 月, 最小值出现在 1 月。氮添加处理显著抑制了樟树林的土壤呼吸, LN、MN、HN 处理土壤呼吸年累积量分别较对照 CK 下降 37.66%、30.62%、38.95%, 各施氮处理间无显著差异, 施氮对土壤呼吸的抑制作用随时间推移而减弱; (2) 氮添加不影响土壤呼吸昼夜波动特征, 但显著抑制土壤呼吸速率; (3) 土壤呼吸与土壤温度间存在极显著的指数关系, 与土壤湿度相关性不显著, CK、LN 处理 Q₁₀ 相近, MN 处理最小; (4) 氮添加处理促进了土壤中氮的淋失, 且随施氮水平的升高而增大。

关键词: 氮添加; 亚热带; 樟树; 土壤呼吸

Effect of nitrogen addition to soil respiration in *Cinnamomum camphora* forest in subtropical China

ZHENG Wei^{1,3}, YAN Wende^{1,2,3,*}, WANG Guangjun^{1,4}, LIANG Xiaocui^{1,3}, ZHANG Xuyuan^{1,3}

1 Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 National Engineering Laboratory for Applied Technology of Forestry & Ecology in South China, Changsha 410004, China

3 Key Laboratory of Urban Forest Ecology of Hunan Province, Changsha 410004, China

4 Huitong Ecological Station for Chinese Fir Plantation, Huitong 418307, China

Abstract: Increasing global atmospheric deposition of nitrogen caused by human activities has raised nitrogen input to terrestrial ecosystem, and thus influenced carbon dioxide emissions from soil. To explore how soil respiration response to increased nitrogen input, a simulated nitrogen deposition experiment has been conducted in *Cinnamomum camphora* forest in subtropical China between June 2010 and January 2012. Soil respiration rate was measured twice a month under four-levels of N treatments (CK, 0 g m⁻² a⁻¹; LN, 5 g m⁻² a⁻¹; MN, 15 g m⁻² a⁻¹; HN, 30 g m⁻² a⁻¹, experimental inputs) by infrared gas analyzer techniques, and the results showed that soil respiration exhibited a strong seasonal pattern, with the highest rates found in the June (819.31 mgCO₂ m⁻² h⁻¹) and the lowest rates in January (169.70 mgCO₂ m⁻² h⁻¹). Nitrogen addition inhibited soil respiration significantly. Soil respiration in CK group was higher than that in any other treatment group. Annual accumulative soil respiration in LN (2.55 × 10⁴ kg/hm²), MN (2.84 × 10⁴ kg/hm²) and HN (2.50 × 10⁴ kg/hm²) was 37.66%、30.62%、38.95%, respectively, lower than in CK (4.09 × 10⁴ kg/hm²) group,

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划课题 (2011BAD38B0204); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-10-0151); 湖南省科技厅项目 (2010TP4011-3); 湖南省教育厅项目 (湘财教字[2010]70 号); 长沙市科技局项目 (K1003009-61)

收稿日期: 2012-03-13; 修订日期: 2012-09-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: csfuywd@hotmail.com

however, there was no significant difference between nitrogen treatment groups. The inhibitory effect weakened over time. From June to September in year 2010, the mean soil respiration rate of LN, MN and HN were $(386.31 \pm 44.81) \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, $(358.25 \pm 31.55) \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ and $(367.35 \pm 41.72) \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, respectively, which were 49.63%, 53.28% and 52.10% lower than that in CK group $(766.87 \pm 101.60 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1})$. During same time in year 2011, the mean soil respiration of LN, MN and HN group increased to $(512.7 \pm 73.12) \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, $(533.02 \pm 41.80) \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, $(486.20 \pm 50.12) \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, respectively, which were 19.70%, 16.51%, 23.85% lower than that in CK $(638.45 \pm 74.91 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1})$. Nitrogen addition couldn't change the diurnal soil respiration pattern, but depressed magnitude of soil respiration significantly. Soil respiration during daytime was lower than that in night, the minimums appeared in 10:00–14:00 and the maximums were in 22:00–2:00. The diurnal mean soil respiration rate in CK, LN, MN and HN treatment group was $(805.86 \pm 74.95) \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, $(689.29 \pm 66.25) \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, $(778.85 \pm 73.73) \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ and $(609.85 \pm 65.33) \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, respectively, and the mean soil respiration rate in CK group was significantly higher than that in LN and HN group ($P < 0.01$). The differences between each nitrogen addition group were significantly. Soil respiration has the similar seasonal and diurnal pattern with soil temperature at 5cm depth. No matter in seasonal scale or diurnal scale, soil respiration rates showed a positive exponential relationship with soil temperature at 5cm depth, Exponential relationships between temperature and soil respiration were highly significant in all plots. However, almost in treatment, there was no obvious effect of soil moisture on soil respiration. LN group had the largest Q_{10} values (2.01), which similar to CK group (1.99) and higher than MN (1.79) and HN group (1.95). These results indicated that there is a significant decline of soil respiration to N addition in subtropical *Cinnamomum camphora* forest.

Key Words: nitrogen addition; subtropical zone; *Cinnamomum camphora*; soil respiration

土壤呼吸是全球碳循环中 CO_2 从陆地生态系统至大气的一个主要途径^[1],排放量达到 $68 \times 10^{15} - 77 \times 10^{15} \text{ gC/a}$ ^[2-4]。陆地土壤呼吸的微小波动将会影响大气 CO_2 浓度及土壤碳汇^[5],进而对全球气候造成影响,所以对土壤呼吸及其控制因子的研究极为重要。

过去的—个世纪里,施肥、燃料消耗及耕作等人类活动引起的全球氮沉降量增加了 3—5 倍^[6],且有逐年递增的趋势。低水平的氮沉降能促进植物生长而增加对大气中 CO_2 的固定,但氮沉降超出森林生态系统的生物需求时会引起土壤氮饱和,将会造成生物多样性降低、土壤酸化、氮淋溶等多种负面影响^[7-8];这些过程将直接或间接影响土壤呼吸等碳循环及贮存过程^[9]。学者们通常采用氮添加的方法研究高氮土壤对土壤呼吸的影响。多数研究表明氮添加会显著影响森林土壤呼吸,但是结论却不一致^[10]:包括促进^[11-12],抑制^[13-15],无影响^[16]等。这些差异表明土壤呼吸对氮添加的响应会受到氮添加水平、土壤特性及植被状况等因素的影响。

中国为全球三大氮沉降区之一,年均氮沉降达到 $12.9 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其中我国中南地区为我国氮沉降通量主要贡献源^[17]。此地区的氮沉降严重,许多森林监测数据达到 $25 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,即欧洲森林氮饱和临界值^[18]。因此,在该地区开展氮添加对土壤呼吸影响的实验显得极为紧要。欧美国家的相关研究开展较早,但主要集中于温带森林中,热带及亚热带地区相对较少^[14]。近年来,我国学者也在华南、西南及蒙古草原等地区进行了相关研究^[19-23],但对我国中南地区的亚热带常绿阔叶林的研究尚未见诸报道。

樟树为亚热带代表性植被,广泛分布我国中南地区。本研究采用氮添加实验,选取樟树林人工林为对象,研究不同氮添加水平对土壤呼吸的影响;揭示氮添加对土壤呼吸的影响机理,为评估未来我国亚热带地区的碳循环及排放提供依据。

1 试验地概况

试验地位于湖南省长沙市南郊的湖南省森林植物园($113^\circ 01' - 113^\circ 02' \text{ E}$, $28^\circ 06' - 28^\circ 07' \text{ N}$),核心区

面积约 4 356 hm²,海拔 46—114 m,坡度为 5°—25°。年平均气温 17.2 ℃。1 月平均气温 4.7 ℃;7 月平均气温 29.4 ℃;无霜期为 270—300 d,年均日照时数 1677.1 h;年平均降雨量 1 422 mm。属典型的亚热带湿润季风气候,年氮沉降量为 31.4 g m⁻² a⁻¹[24]。

样地所处樟树林于 1979—1982 年间营造,后经自然更新而成。2009 年 4 月调查的林分基本情况见表 1。林下植被有白栎 (*Quercus fabri*)、毛泡桐 (*Paulownia tomentosa*)、苦槠 (*Castanopsis sclerophylla*)、山矾 (*Symplocos caudata*)、糙叶树 (*Aphananthe aspera*) 和柘树 (*Cudrania tricuspidata*),草本植物以淡竹叶 (*Lophatherum gracile*)、酢浆草 (*Oxalis corniculata*)、鸡矢藤 (*Paederia scandens*) 和商陆 (*Phytolacca acinosa*) 等。

表 1 樟树林的林分特征、土壤理化特性

Table 1 Stand characteristics and soil physical chemical properties in camphor forest

树龄 Age/a	密度 Stem density /(株/hm ²)	胸径 DBH /cm	树高 Height /m	郁闭度 Crown density	有机碳 Organic carbon /(mg/g)	全氮 Total nitrogen /(mg/g)	容重 Soil bulk density /(g/cm ³)	pH
20	1600	14.92 (1.21)	12.55 (1.03)	0.9	13.18 (0.51)	1.27 (0.03)	1.50 (0.11)	4.00 (0.03)

括号内为标准误差值

2 研究方法

2.1 施氮处理

首次施氮于 2010 年 5 月下旬进行,依据当地氮沉降水平及参考同类试验[14],共设置 CK (不加 N 肥),低氮 LN (5 g N m⁻² a⁻¹),中氮 MN (15 g N m⁻² a⁻¹),高氮 HN (30 g N m⁻² a⁻¹) 4 种氮添加水平,添加氮素为 NH₄NO₃。各水平设置 3 个重复样地,样地大小为 20 m×20 m,样地间保留 10 m 宽缓冲带。将每个样地需要的采用 NH₄NO₃ 混合 20 L 自来水,采用喷雾器均匀喷洒至样地,对照样地仅施加 20 L 自来水。每年施氮分两次进行[11],分别于 5 月、10 月等量施加。

2.2 土壤呼吸、温度及湿度的测定

在每个样地随机选择 3 个样点分别安放 PVC 环 (Φ21 cm×H8 cm),环插入土壤 4 cm 左右,测量期间环不再移动。施氮处理 2 周后开始土壤呼吸测定,测定频率为 2 周 1 次,时间为 2010 年 6 月—2012 年 1 月。土壤呼吸的昼夜动态测定选择在植物生长旺季 7 月份进行,在上、中、下旬各选择一天进行,测定间隔为 2h。采用 LI-8100 进行土壤呼吸测定。测定每个样点土壤呼吸速率的同时,采用 Li-8100-201 Omega、Li-8100-202 同步测定 5 cm 处土壤温度、湿度。

2.3 土壤理化性质

土壤有机碳采用重铬酸钾-外加热法测定;全氮采用半微量凯氏定氮法;pH 值采用电位法测定;土壤容重采用环刀法测定。

2.4 土壤氮淋失速率

2011 年 4 月,采用树脂芯法原位测定土壤 15 cm 处氮淋失。将 PVC 管 (内径 4.0 cm,高 17 cm) 打入地下 0—17 cm 土层后取出,去除底部约 2 cm 厚的土壤,放入 1 张滤纸后放置阴离子交换树脂袋 (氯型,强碱性,上海汇脂树脂厂 717#树脂),再放置 1 张滤纸,然后放置中部带孔石膏垫,避免 PVC 管下方土壤溶液中的 NO₃⁻-N 被树脂交换吸附,同时石膏塞上的孔也能确保土壤溶液的及时排出[25]。30 d 后测定树脂袋中硝态氮含量。

2.5 数据分析

采用单因素方差分析和多重比较检验土壤呼吸的昼夜、季节变化、不同处理间土壤呼吸、温度、湿度的差异性。采 Sigmaplot 软件作图。采用指数方程拟合土壤呼吸与温度的关系: $R = \alpha \exp(bT)$, R 为土壤呼吸, α 是土壤温度为 0 ℃时的土壤呼吸速率, b 为温度反应系数[26]。土壤呼吸温度敏感性采用 Q_{10} 值: $Q_{10} = \exp(10b)$ [27], b 同上式。

3 结果与分析

3.1 氮添加对土壤呼吸季节变化的影响

对照样地土壤呼吸代表了樟树林自然的呼吸动态(图1)。樟树林土壤呼吸季节变化明显,最大值出现在6月($819.31 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$),最小值出现在1月($169.70 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)。樟树林 CO_2 的年释放量为 $4.09 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ 。

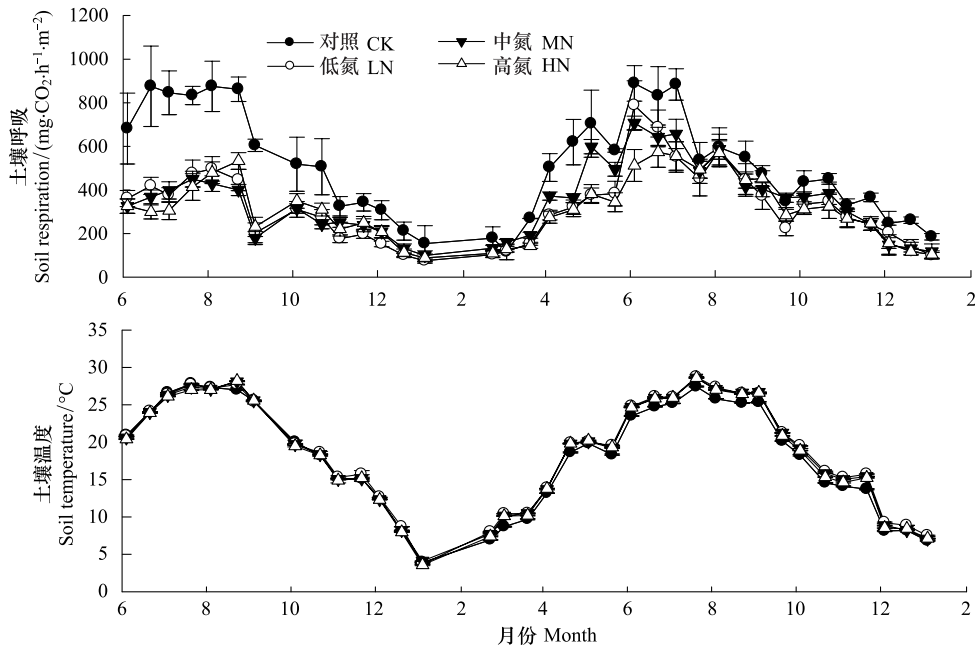


图1 土壤呼吸和土壤温度的季节动态

Fig. 1 Seasonal pattern of soil respiration and soil temperature at 5cm depth

氮添加处理抑制了樟树林土壤呼吸,对照处理的土壤呼吸显著高于各施氮处理, LN、MN、HN 处理的土壤呼吸年累积量为 $2.55 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ 、 $2.84 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ 和 $2.50 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$, 分别较对照处理降低 37.66%、30.62% 和 38.95%。各施氮处理土壤呼吸间无显著差异(One-way ANOVA, LSD, $P > 0.05$)。通过两个生长季土壤呼吸的比较,可以发现随时间推移,氮添加对土壤呼吸的抑制作用逐渐减弱。2010 年 6 月—9 月, LN、MN、HN 处理土壤呼吸均值为 $(386.31 \pm 44.81) \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、 $(358.25 \pm 31.55) \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、 $(367.35 \pm 41.72) \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 分别较 CK 样地 ($(766.87 \pm 101.60) \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) 低 49.63%、53.28%、52.10%; 2011 年 6—9 月, LN、MN、HN 处理土壤呼吸均值 ((512.7 ± 73.12)), (533.02 ± 41.80) , $(486.20 \pm 50.12) \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) 较 2010 年 6 月—9 月显著升高,而同时对对照样地 ($(638.45 \pm 74.91) \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) 呼吸却显著降低, LN、MN、HN 处理较 CK 处理分别低 19.70%、16.51%、23.85% (图2)。

3.2 氮添加对土壤呼吸昼夜变化的影响

氮添加处理未改变樟树林土壤呼吸的昼夜动态,各处理样地中土壤呼吸均存在明显的昼夜波动现象(图

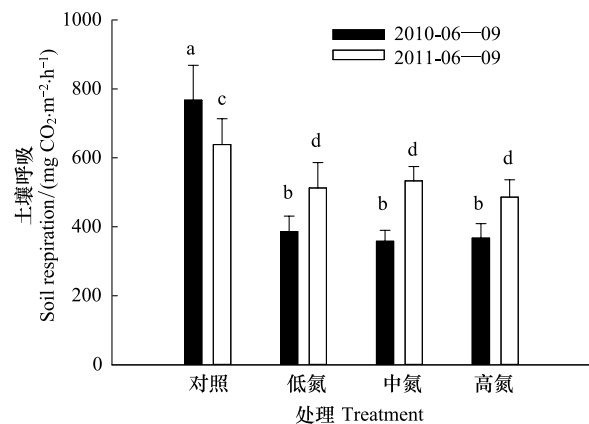


图2 2010 年、2011 年 6—9 月土壤呼吸均值

Fig. 2 Mean soil respiration rates during June to September in 2010 and 2011

3), 白天土壤呼吸小于夜晚, 最小值出现在 10:00—14:00, 最大值出现在 22:00—2:00。在昼夜尺度上, 施氮处理同样抑制樟树林的土壤呼吸作用, 各处理日均土壤呼吸速率为: CK (805.86 ± 74.95) $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) > MN (778.85 ± 66.25) $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) > LN (689.29 ± 73.73) $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) > HN (609.85 ± 65.33) $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), 方差分析表明 CK 处理日均土壤呼吸显著高于 LN、HN, 与 MN 差异不显著; LN、MN、HN 处理差异均为显著。

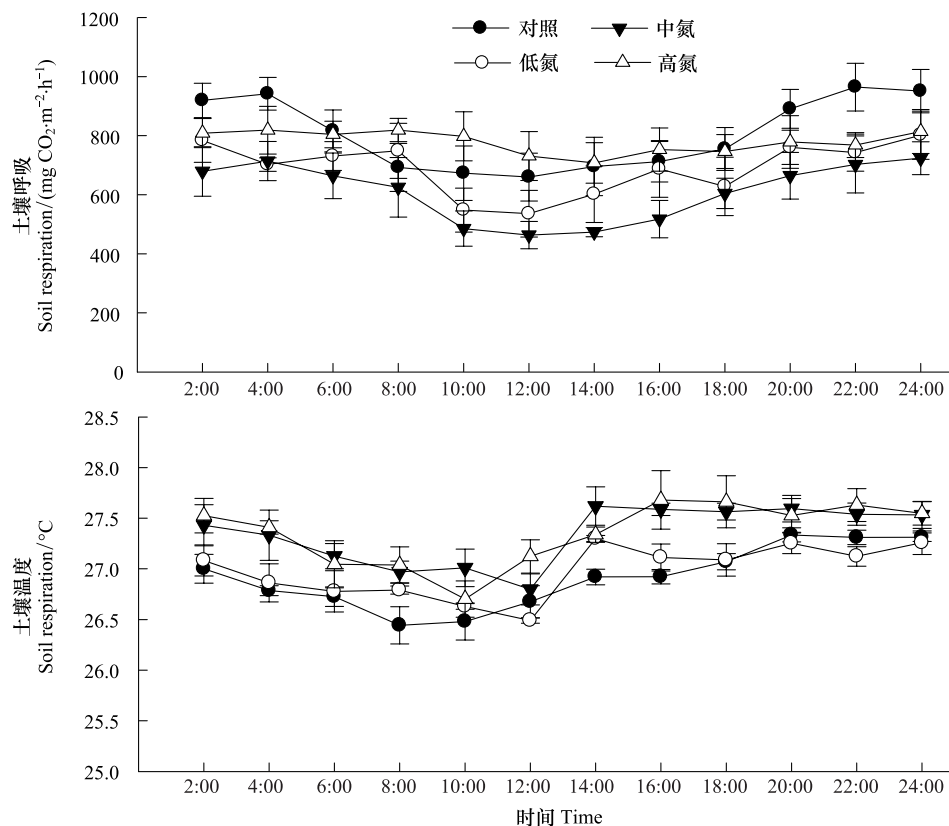


图3 土壤呼吸的昼夜变化

Fig. 3 Diurnal pattern of soil respiration

3.3 土壤温度、湿度与土壤呼吸的关系

土壤温度与土壤呼吸拥有相同的季节动态特征(图1)。各处理 5 cm 处土壤温度与土壤呼吸间存在正相关关系, 其相关系数范围为 0.634—0.678 ($P < 0.001$) (表2)。采用单因素指数模型进行回归分析可得各处理 5 cm 处土壤温度与土壤呼吸的指数回归方程(图2), 土壤温度解释了土壤呼吸速率变异的 49.39%—51.98% (图4)。在昼夜变化尺度上, 土壤温度与土壤呼吸也具有相似性, 两者之间存在极显著正相关关系, 范围为 0.344—0.614 ($P < 0.001$) (表2)。

表2 土壤呼吸与土壤温度、土壤湿度间的相关分析

Table 2 Correlations of temperature at 0.05m with soil CO_2 flux rates

呼吸类型 Respiration types	因子 Factors	相关系数 R Correlation coefficient R			
		CK	LN	MN	HN
R_s	T	0.634 **	0.643 **	0.652 **	0.678 **
	M	0.121	0.192 **	0.112	0.098
R_D	T	0.384 **	0.535 **	0.614 **	0.344 *
	M	0.221	0.199	0.373	0.409

R_D : 昼夜尺度土壤呼吸; R_s : 季节尺度土壤呼吸; T : 5cm 处土壤温度; M : 5cm 处土壤湿度; Pearson 相关分析, 双侧检验

Q_{10} 值反映了土壤呼吸对温度变化的敏感性。通过土壤呼吸与 5 cm 处土壤温度的指数方程计算得到 CK、LN、MN、HN 处理的 Q_{10} 值分别为 1.99、2.01、1.79、1.95。

土壤湿度对土壤呼吸未产生明显的影响作用。在季节动态中,只有 LN 处理中土壤呼吸与湿度间存在显著相关性;在昼夜动态中,土壤呼吸与土壤湿度间无显著相关性。

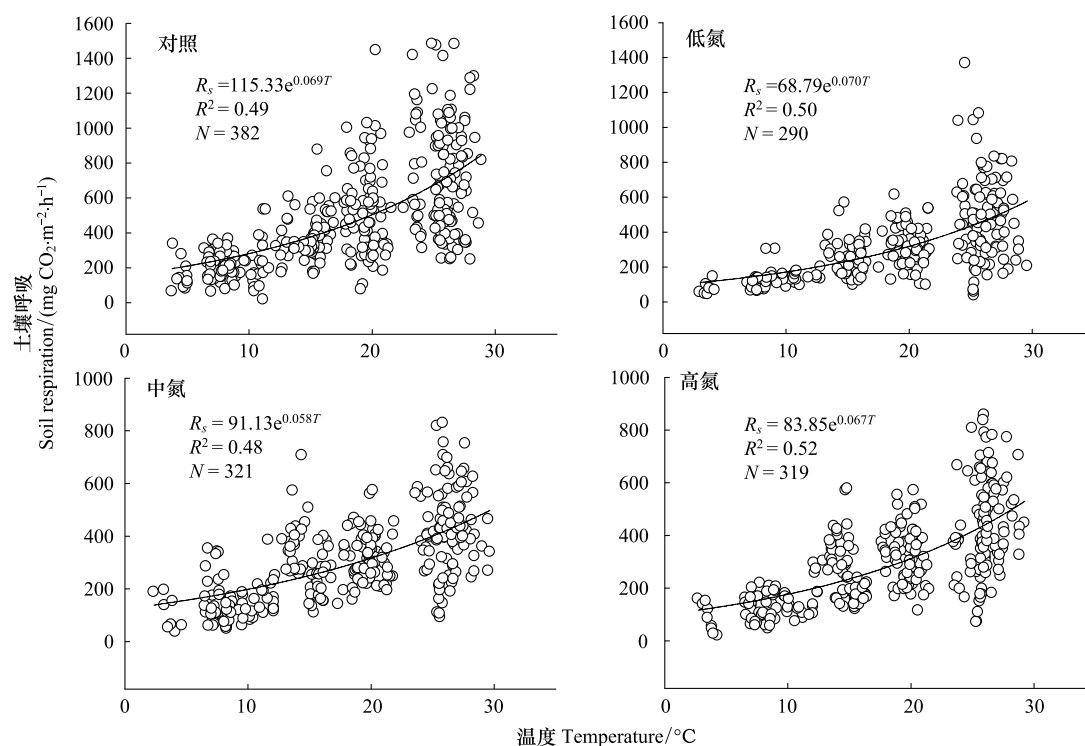


图4 土壤呼吸与 5 cm 处土壤温度的关系

Fig. 4 Relationships between soil respiration and soil temperature at 5 cm depth

3.4 施氮对土壤氮淋失的影响

氮添加处理促进了土壤中氮的淋失。LN、MN 及 HN 处理中 0—15 cm 土壤硝态氮淋失量分别高出对照处理 0.87%、27.48% 及 34.21%, 氮淋失随施氮水平的升高而增大, 但各处理间氮淋失量无显著差异 (图 5)。

4 讨论

氮沉降显著抑制樟树林的土壤呼吸, 整个研究期间 LN、MN、HN 施氮处理使樟树林的 CO_2 年累积量分别降低了 37.66%、30.62%、38.95%。莫江明^[14]、Cusack 等的^[15]的研究中同样存在此抑制作用, 在中国西南慈竹林, 与本研究相同 LN、MN、HN 氮添加量使其 CO_2 年累积量分别降低 23.6%、46.7%、50.5%, 与本研究接近^[28]。Ramirez 指出不同类型的氮素添加都存在这种抑制作用^[29]。世界范围内, 多数试验中氮添加均显著抑制了土壤呼吸^[6], 少数施氮实验的初期阶段会促进土壤呼吸^[5,30], 但随后便转为抑制作用。土壤呼吸主要有根系呼吸的自养呼吸和微生物的异养呼吸组成。研究表明, 在氮限制的温带、寒温带森林生态系统中或在森林幼林阶段, 低水平的氮沉降可以短期内促进森林生产力^[31-34], 主要通过增强植物光合作用, 促进植物的

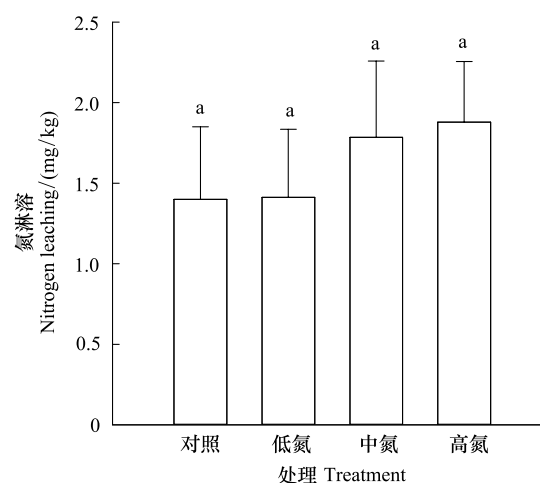


图5 氮添加对土壤氮淋失的影响

Fig. 5 Effect of nitrogen addition on nitrogen leaching

抑制了土壤呼吸^[6], 少数施氮实验的初期阶段会促进土壤呼吸^[5,30], 但随后便转为抑制作用。土壤呼吸主要有根系呼吸的自养呼吸和微生物的异养呼吸组成。研究表明, 在氮限制的温带、寒温带森林生态系统中或在森林幼林阶段, 低水平的氮沉降可以短期内促进森林生产力^[31-34], 主要通过增强植物光合作用, 促进植物的

生长及凋落物的增加,同时使更多的碳分配至地下部分,增强了自养和异养呼吸^[5-6],从而引起土壤呼吸的增加;但在热带、亚热带地区,由于风化强烈、土壤发育充分,土壤中含有充足的氮素,此类生态系统的限制因子多为非氮的其他元素,过量的氮素添加会减少植物体分配碳素至营养吸收系统的需求,从而减少了地下根系碳素分配^[35]、降低根际及菌根共生系统的活性^[36],直接导致自养呼吸的降低及间接影响异养呼吸,进而降低土壤呼吸^[37]。施氮减少细根生物量的现象在莫江明等^[14]的研究中得到证实。此外,氮添加可通过改变微生物食物结构,使得弱氮依赖性群体被氮依赖性强的群落取代,Li 等^[38]的研究中,氮添加显著的降低了土壤微生物碳、氮,这意味着氮添加可能会抑制土壤微生物,造成土壤呼吸的降低^[39]。

研究中,低、中及高氮添加虽然均抑制樟树林土壤呼吸,但各处理间无显著差异。由土壤表层 15 cm 处的氮淋失可知,氮添加处理增加土壤硝态氮的淋失,原因可能在于该研究区土壤有效氮相对丰富,过量的氮素添加会造成表层土壤氮处于饱和而发生流失。另者,该区降水丰富,带来氮湿沉降的同时,客观上也加速了氮的流失,从而使得各氮添加处理土壤呼吸未有显著差异。

氮素添加对樟树林土壤呼吸抑制效果的显现极其迅速,施氮两周后的土壤呼吸就出现显著降低,且持续整个生长季。在莫江明^[14,40]、涂利华^[41]等的试验中,施氮初期土壤呼吸未受到明显影响,其抑制或促进作用在数月后开始出现。分析原因可能在于 Mo、涂利华等的实验开始于生长季的结束,施氮后便进入植物的非生长季,较低温度使得植物微生物活动减弱,施氮措施对土壤呼吸的影响难以体现。第 2 年生长季节开始,旺盛的生命活动使得氮添加对土壤呼吸的抑制或刺激作用得以显现。这种施氮对土壤呼吸负面作用迅速呈现并持续数年的现象在许多的氮添加实验中都有所体现^[6,42]。

本研究中,土壤呼吸与土壤温度间存在极显著指数回归关系,随着温度增长,土壤呼吸呈指数增长,这与国内外许多研究结果一致^[14,23,30,41]。土壤呼吸反映了地下微生物、植物根系、土壤动物的代谢作用,土壤温度通过影响上述生理活动来影响土壤呼吸。长沙地处亚热带地区,湿润多雨,土壤湿度能满足土壤呼吸的需要,所以土壤湿度与土壤呼吸间无显著相关关系,土壤温度为樟树林土壤呼吸的主要驱动因子。昼夜尺度下,何娜^[43]、张剑锋^[44]研究得出土壤温度与土壤呼吸间存在显著相关性,但涂利华等的结论却相反^[41]。Tang^[45]等在确定土壤温度为主要驱动因子的同时,指出在昼夜尺度上存在植物光合对土壤呼吸的调节作用,土壤呼吸与植物光合间存在极高的线性回归关系(R^2 范围为 0.86—0.93)。植物光合产物通过疏导组织向根系传输,与此同时产生的压力、浓度波将先于溶液本身抵达根部,从而刺激土壤呼吸增加^[46],两者之间存在 7—12h 的延迟^[45],导致夜晚土壤呼吸速率要高于白天,这与本研究结论一致。

References:

- [1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [2] Schlesinger W H. Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1977, 8(1): 51-81.
- [3] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(1): 23-36.
- [4] 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.
- [5] Bowden R, Davidson E, Savage K, Arabia C, Steudler P. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 43-56.
- [6] Janssens I A, Dieleman W, Luyssaert S, Subke J, Reichstein M, Ceulemans R, Ciais P, Dolman A J, Grace J, Matteucci G, Papale D, Piao S L, Schulze E, Tang J, Law B E. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 315-322.
- [7] Höglberg P, Fan H, Quist M, Binkley D, Tamm C O. Tree growth and soil acidification in response to 30 years of experimental nitrogen loading on boreal forest. *Global Change Biology*, 2006, 12(3): 489-499.
- [8] Dise B N, Rothwell J J, Gauci V, van der Salm C, de Vries W. Predicting dissolved inorganic nitrogen leaching in European forests using two independent databases. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(5): 1798-1808.
- [9] Throop H L, Holland E A, Parton W J, Ojima D S, Keough C A. Effects of nitrogen deposition and insect herbivory on patterns of ecosystem-level carbon and nitrogen dynamics: results from the CENTURY model. *Global Change Biology*, 2004, 10(7): 1092-1105.

- [10] Peng Y Y, Thomas S C. Influence of non-nitrogenous soil amendments on soil CO₂ efflux and fine root production in an N-saturated northern hardwood forest. *Ecosystems*, 2010, 13(8): 1145-1156.
- [11] Cleveland C C, Townsend A R. Nutrient additions to a tropical rain forest drive substantial soil carbon dioxide losses to the atmosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(27): 10316-10321.
- [12] Samuelson L, Mathew R, Stokes T, Feng Y, Aubrey D, Coleman M. Soil and microbial respiration in a loblolly pine plantation in response to seven years of irrigation and fertilization. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(11): 2431-2438.
- [13] Bowden R D, Davidson E, Savage K, Arabia C, Steudler P. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 43-56.
- [14] Mo J M, Zhang W, Zhu W X, Gundersen P, Fang Y T, Li D J, Wang H. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China. *Global Change Biology*, 2008, 14(2): 403-412.
- [15] Cusack D F, Torn M S, McDowell W H, Silver W L. The response of heterotrophic activity and carbon cycling to nitrogen additions and warming in two tropical soils. *Global Change Biology*, 2010, 16(9): 2555-2572.
- [16] Koehler B, Corre M D, Veldkamp E, Sueta J P. Chronic nitrogen addition causes a reduction in soil carbon dioxide efflux during the high stem-growth period in a tropical montane forest but no response from a tropical lowland forest on a decadal time scale. *Biogeosciences*, 2009, 6(12): 2973-2983.
- [17] Lü C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: synthesis of observational data. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(D22): D22S-D25S.
- [18] Fang Y T, Gundersen P, Vogt R, Koba K, Chen F S, Chen X Y, Yoh M. Atmospheric deposition and leaching of nitrogen in Chinese forest ecosystems. *Journal of Forest Research*, 2011, 16(5): 341-350.
- [19] Cao Y S, Lin Y B, Rao X Q, Fu S L. Effects of artificial nitrogen and phosphorus depositions on soil respiration in two plantations in southern China. *Journal of Tropical Forest Science*, 2011, 23(2): 110-116.
- [20] Yan L M, Chen S P, Huang J H, Lin G H. Differential responses of auto-and heterotrophic soil respiration to water and nitrogen addition in a semiarid temperate steppe. *Global Change Biology*, 2010, 16(8): 2345-2357.
- [21] Hu Z H, Li H M, Yang Y P, Chen S T, Li C Z, Shen S H. Effects of simulated nitrogen deposition on soil respiration in Northern subtropical deciduous broad-leaved forest. *Environmental Science*, 2010, 31(8): 1726-1732.
- [22] Mo J M, Zhang W, Zhu W X, Gundersen P, Fang Y T, Li D J, Wang H. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China. *Global Change Biology*, 2008, 14(2): 403-412.
- [23] Deng Q, Zhou G, Liu J, Liu S, Duan H, Zhang D. Responses of soil respiration to elevated carbon dioxide and nitrogen addition in young subtropical forest ecosystems in China. *Biogeosciences*, 2010, 7(1): 315-328.
- [24] Du C Y, Zeng G M, Zhang G, Tang L, Li X D, Huang D L, Huang L, Jiang Y M. Input - output budgets for inorganic nitrogen under acid rain in a subtropical evergreen mixed forest in central-south China. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2008, 190(1): 171-181.
- [25] Wang G J, Tian D L, Zhu F, Yan W D, Li S Z. Net nitrogen mineralization in soils under four forest communities in Hunan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1607-1615.
- [26] Li Y L, Otieno D, Owen Q, Tenhunen J, Zhang Y, Lin Y B, Rao X Q. Temporal variability in soil CO₂ emission in an Orchard forest ecosystem. *Pedosphere*, 2008, 18(3): 273-283.
- [27] Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(3): 687-696.
- [28] Li R H, Tu L H, Hu T X, Zhang J, Lu Y, Liu W T, Luo S H, Xiang Y B. Effects of simulated nitrogen deposition on soil respiration in a *Neosinocalamus affinis* plantation in Rainy Area of West China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1649-1655.
- [29] Ramirez K S, Craine J M, Fierer N. Nitrogen fertilization inhibits soil microbial respiration regardless of the form of nitrogen applied. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(12): 2336-2338.
- [30] Burton A J, Pregitzer K S, Crawford J N, Zogg G P, Zak D R. Simulated chronic NO₃-deposition reduces soil respiration in northern hardwood forests. *Global Change Biology*, 2004, 10(7): 1080-1091.
- [31] Pregitzer K S, Burton A J, Zak D R, Talhelm A F. Simulated chronic nitrogen deposition increases carbon storage in Northern Temperate forests. *Global Change Biology*, 2008, 14(1): 142-153.
- [32] Reay D S, Dentener F, Smith P, Grace J, Feely R A. Global nitrogen deposition and carbon sinks. *Nature Geoscience*, 2008, 1(7): 430-437.
- [33] Ciais P, Schelhaas M J, Zaehle S, Piao S L, Cescatti A, Liski J, Luysaert S, Le-Maire G, Schulze E D, Bouriaud O, Freibauer A, Valentini R, Nabuurs G J. Carbon accumulation in European forests. *Nature Geoscience*, 2008, 1(7): 425-429.
- [34] Quinn Thomas R, Canham C D, Weathers K C, Goodale C L. Increased tree carbon storage in response to nitrogen deposition in the US. *Nature*

- Geoscience, 2010, 3(1): 13-17.
- [35] Litton C M, Raich J W, Ryan M G. Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology*, 2007, 13(10): 2089-2109.
- [36] Treseder K K. A meta-analysis of mycorrhizal responses to nitrogen, phosphorus, and atmospheric CO₂ in field studies. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 347-355.
- [37] Phillips R P, Fahey T J. Fertilization effects on fineroot biomass, rhizosphere microbes and respiratory fluxes in hardwood forest soils. *New Phytologist*, 2007, 176(3): 655-664.
- [38] Li L J, Zeng D H, Yu Z Y, Fan Z P, Mao R. Soil microbial properties under N and P additions in a semi-arid, sandy grassland. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(6): 653-658.
- [39] Ågren G I, Bosatta E, Magill A H. Combining theory and experiment to understand effects of inorganic nitrogen on litter decomposition. *Oecologia*, 2001, 128(1): 94-98.
- [40] Mo J, Zhang W, Zhu W, Fang Y, Li D, Zhao P. Response of soil respiration to simulated N deposition in a disturbed and a rehabilitated tropical forest in southern China. *Plant and Soil*, 2007, 296(1/2): 125-135.
- [41] Tu L H, Hu T X, Huang L H, Li R H, Dai H Z, Luo S H, Xiang Y B. Response of soil respiration to simulated nitrogen deposition in pleioblastus amarus forest, rainy area of West China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(4): 728-738.
- [42] Dentener F, Drevet J, Lamarque J F, Bey I, Eickhout B, Fiore A M, Hauglustaine D, Horowitz L W, Krol M, Kulshrestha U C, Lawrence M, Galy-Lacaux C, Rast S, Shindell D, Stevenson D, Van Noije T, Atherton C, Bell N, Bergman D, Butler T, Cofala J, Collins B, Doherty R, Ellingsen K, Galloway J, Gauss M, Montanaro V, Müller J F, Pitari G, Rodriguez J, Sanderson M, Solomon F, Strahan S, Schultz M, Sudo K, Szopa S, Wild O. Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: a multimodel evaluation. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(4): B4003, doi: 10.1029/2005GB002672.
- [43] He N, Wang L H, Meng C. Effects of compaction on diurnal variation of soil respiration in *Larix gmellinii* plantation in summer. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(12): 3070-3076.
- [44] Zhang J F, Yan W D, Tian D L, Zheng W. Soil respiration and its influential factors in China fir plantation on different ground utilizations. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2007, 27(2): 13-16.
- [45] Tang J, Baldocchi D D, Xu L. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale. *Global Change Biology*, 2005, 11(8): 1298-1304.
- [46] Thompson M V, Holbrook N M. Scaling phloem transport: information transmission. *Plant, Cell and Environment*, 2004, 27(4): 509-519.

参考文献:

- [21] 胡正华, 李涵茂, 杨燕萍, 陈书涛, 李岑子, 申双和. 模拟氮沉降对北亚热带落叶阔叶林土壤呼吸的影响. *环境科学*, 2010, 31(8): 1726-1732.
- [28] 李仁洪, 涂利华, 胡庭兴, 张健, 鲁洋, 刘文婷, 雒守华, 向元彬. 模拟氮沉降对华西雨屏区慈竹林土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1649-1655.
- [25] 王光军, 田大伦, 朱凡, 闫文德, 李树战. 湖南省4种森林群落土壤氮的矿化作用. *生态学报*, 2009, 29(3): 1607-1615.
- [41] 涂利华, 胡庭兴, 黄立华, 李仁洪, 戴洪忠, 雒守华, 向元彬. 华西雨屏区苦竹林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应. *植物生态学报*, 2009, 33(4): 728-738.
- [43] 何娜, 王立海, 孟春. 压实对落叶松人工林夏季土壤呼吸日变化的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3070-3076.
- [44] 张剑锋, 闫文德, 田大伦, 郑威. 杉木人工林土壤呼吸日变化及其影响因素分析. *中南林业科技大学学报*, 2007, 27(2): 13-16.

《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工作者,探索自然奥秘,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 朱永官

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 11 期 (2013 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 11 (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
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