

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第7期 Vol.32 No.7 **2012**

中国生态学会
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 32 卷 第 7 期 2012 年 4 月 (半月刊)

目 次

城市生态景观研究的基础理论框架与技术构架	孙然好, 许忠良, 陈利顶, 等 (1979)
拟南芥芥子酸酯对 UV-B 辐射的响应	李 敏, 王 垠, 牟晓飞, 等 (1987)
蛋白核小球藻对 Pb(II) 和 Cd(II) 的生物吸附及其影响因素	姜 晶, 李 亮, 李海鹏, 等 (1995)
梨枣在果实生长期对土壤水势的响应	韩立新, 汪有科, 张琳琳 (2004)
产业生态系统资源代谢分析方法	施晓清, 杨建新, 王如松, 等 (2012)
基于物质流和生态足迹的可持续发展指标体系构建——以安徽省铜陵市为例	
.....	赵卉卉, 王 远, 谷学明, 等 (2025)
河北省县域农田生态系统供给功能的健康评价	白琳红, 王 卫, 张 玉 (2033)
温郁金内生真菌 <i>Chaetomium globosum</i> L18 对植物病原菌的抑菌谱及拮抗机理	
.....	王艳红, 吴晓民, 朱艳萍, 等 (2040)
基于稳定碳同位素技术的华北低丘山区核桃-小麦复合系统种间水分利用研究	
.....	何春霞, 孟 平, 张劲松, 等 (2047)
云贵高原喀斯特坡耕地土壤微生物量 C、N、P 空间分布	张利青, 彭晚霞, 宋同清, 等 (2056)
水稻根系通气组织与根系泌氧及根际硝化作用的关系	李奕林 (2066)
苹果绵蚜对不同苹果品种春梢生长期生理指标的影响	王西存, 于 毅, 周洪旭, 等 (2075)
磷高效转基因大豆对根际微生物群落的影响	金凌波, 周 峰, 姚 涓, 等 (2082)
基于 MODIS-EVI 数据和 Symlet11 小波识别东北地区水稻主要物候期	
.....	徐岩岩, 张佳华, YANG Limin (2091)
基于降水利用比较分析的四川省种植制度优化	王明田, 曲辉辉, 杨晓光, 等 (2099)
气候变暖对东北玉米低温冷害分布规律的影响	高晓容, 王春乙, 张继权 (2110)
施肥对巢湖流域稻季氨挥发损失的影响	朱小红, 马中文, 马友华, 等 (2119)
丛枝菌根真菌对枳根净离子流及锌污染下枳苗矿质营养的影响	肖家欣, 杨 慧, 张绍铃 (2127)
不同 R:FR 值对菊花叶片气孔特征和气孔导度的影响	杨再强, 张 静, 江晓东, 等 (2135)
神农架海拔梯度上 4 种典型森林凋落物现存量及其养分循环动态	刘 蕾, 申国珍, 陈芳清, 等 (2142)
黄土高原刺槐人工林地表凋落物对土壤呼吸的贡献	周小刚, 郭胜利, 车升国, 等 (2150)
贵州雷公山秃杉种群生活史特征与空间分布格局	陈志阳, 杨 宁, 姚先铭, 等 (2158)
LAS 测算森林冠层上方温度结构参数的可行性	郑 宁, 张劲松, 孟 平, 等 (2166)
基于 RS/GIS 的重庆缙云山自然保护区植被及碳储量密度空间分布研究	
.....	徐少君, 曾 波, 苏晓磊, 等 (2174)

模拟氮沉降增加对寒温带针叶林土壤 CO₂ 排放的初期影响 温都如娜,方华军,于贵瑞,等 (2185)

桂江流域附生硅藻群落特征及影响因素..... 邓培雁,雷远达,刘 威,等 (2196)

小浪底水库排沙对黄河鲤鱼的急性胁迫..... 孙麓垠,白音包力皋,牛翠娟,等 (2204)

上海池塘养殖环境成本——基于双边界二分式 CVM 法的实证研究 唐克勇,杨正勇,杨怀宇,等 (2212)

稻纵卷叶螟绒茧蜂对寄主的搜索行为 周 慧,张 扬,吴伟坚 (2223)

农林复合系统中灌木篱墙对异色瓢虫种群分布的影响..... 严 飞,周在豹,王 朔,等 (2230)

苹果脱乙酰几丁质发酵液诱导苹果叶片对斑点落叶病的早期抗性反应.....

..... 王荣娟,姚允聪,戚亚平,等 (2239)

专论与综述

气候变化影响下海岸带脆弱性评估研究进展..... 王 宁,张利权,袁 琳,等 (2248)

外来红树植物无瓣海桑引种及其生态影响 彭友贵,徐正春,刘敏超 (2259)

问题讨论

城市污泥生物好氧发酵对有机污染物的降解及其影响因素..... 余 杰,郑国砥,高 定,等 (2271)

4 种绿化树种盆栽土壤微生物对柴油污染响应及对 PAHs 的修复 闫文德,梁小翠,郑 威,等 (2279)

研究简报

云南会泽铅锌矿废弃矿渣堆常见植物内生真菌多样性..... 李东伟,徐红梅,梅 涛,等 (2288)

南方根结线虫对不同砧木嫁接番茄苗活性氧清除系统的影响 梁 朋,陈振德,罗庆熙 (2294)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 322 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2012-04



封面图说: 站立的仓鼠——仓鼠为小型啮齿类动物,栖息于荒漠、荒漠草原等地带的洞穴之中。白天他们往往会躲在洞穴中睡觉和休息,以避开天敌的攻击,偶尔也会出来走动,站立起来警惕地四处张望。喜欢把食物藏在腮的两边,然后再走到安全的地方吐出来,由此得仓鼠之名。它们的门齿会不停的生长,所以它们的上下门齿必须不断啃食硬东西来磨牙,一方面避免门齿长得太长,妨碍咀嚼,一方面保持门牙的锐利。仓鼠以杂草种子、昆虫等为食。

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

DOI: 10.5846/stxb201110091480

温都如娜, 方华军, 于贵瑞, 程淑兰, 周梅, 高文龙, 张裴雷, 徐敏杰. 模拟氮沉降增加对寒温带针叶林土壤 CO₂ 排放的初期影响. 生态学报, 2012, 32(7): 2185-2195.

Wendu R N, Fang H J, Yu G R, Cheng S L, Zhou M, Gao W L, Zhang P L, Xu M J. Early nitrogen deposition effects on CO₂ efflux from a cold-temperate coniferous forest soil. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2185-2195.

模拟氮沉降增加对寒温带针叶林土壤 CO₂ 排放的初期影响

温都如娜¹, 方华军^{2,*}, 于贵瑞², 程淑兰³, 周梅¹, 高文龙⁴, 张裴雷³, 徐敏杰³

(1. 内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010019; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 研究大气氮沉降增加情景下北方森林土壤 CO₂ 排放通量及其相关控制因子至关重要。在大兴安岭寒温带针叶林区建立了大气氮沉降模拟控制试验, 利用静态箱-气相色谱法测定土壤 CO₂ 排放通量, 同时测定土壤温度、水分、无机氮和可溶性碳含量等相关变量, 分析寒温带针叶林土壤 CO₂ 排放特征及其主要驱动因子。结果表明: 氮素输入没有显著改变森林土壤含水量, 但降低了有机层土壤溶解性无机碳(DIC)含量, 并增加有机层和矿质层土壤溶解性有机碳(DOC)含量。增氮短期内不影响土壤 NH₄⁺-N 含量, 但促进了土壤 NO₃⁻-N 的累积。增氮倾向于增加北方森林土壤 CO₂ 排放。土壤 CO₂ 通量主要受土壤温度驱动, 其次为土壤水分和 DIC 含量。虽然土壤温度整体上控制着土壤 CO₂ 通量的季节变化格局, 但在生长旺季土壤含水量对其影响更为明显。在分析增氮对土壤 CO₂ 通量的净效应时, 除了土壤温度和水分外, 还要考虑土壤有效碳、氮动态的影响。

关键词: 大气氮沉降; 土壤 CO₂ 通量; 土壤无机氮; 土壤可溶性碳; 寒温带针叶林

Early nitrogen deposition effects on CO₂ efflux from a cold-temperate coniferous forest soil

WENDU Runa^{1,2}, FANG Huajun^{2,*}, YU Guirui², CHENG Shulan³, ZHOU Mei¹, GAO Wenlong⁴, ZHANG Peilei³, XU Minjie³

1 College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, 010019

2 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4 School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620

Abstract: It is generally thought that high latitude forests are a massive potential global carbon (C) sink. Nitrogen (N) limitation is thought to be the primary reason why these forests are a ‘missing C sink’ as atmospheric N deposition is shown to significantly promote plant growth and increase C sequestration in forests of these regions. Boreal forests are the second largest biome on earth and are limited by N availability. Soil CO₂ emission is an important process of C cycling in boreal forests and it has shown promotion, no change and inhibition responses to N addition. Therefore studies on the CO₂ flux from boreal forest soils and its control factors under increased atmospheric N deposition are essential. In this study, a manipulative N addition experiment was created in a cold-temperate coniferous forest in the Daxing'anling region to investigate this. NH₄NO₃ fertilizer was added at four rates, each with three replicates: control (0 kg N hm⁻² a⁻¹), low N

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41071166, 31070435, 31130009); 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB833502, 2010CB833501, 2012CB417103); 中国科学院地理资源所“秉维”优秀青年人才基金(2011RC202); 中国科学院战略性先导科技专项资助(XDA05050600)

收稿日期: 2011-10-09; 修订日期: 2012-01-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanghj@igsrr.ac.cn

(10 kg N hm⁻² a⁻¹, the current N deposition level), medium N (20 kg N hm⁻² a⁻¹) and high N (40 kg N hm⁻² a⁻¹). Each plot had an area of 200 m² (10 m × 20 m) and a 10 m isolation band set between them. During the growing season (May to September), soil CO₂ fluxes were measured by the static chamber-gas chromatography method and soil temperature, soil moisture, soil inorganic N and dissolved carbon content (DOC) were simultaneously measured to explore the main factors affecting CO₂ emission. Results showed that N addition did not significantly change soil moisture content but significantly reduced soil dissolved inorganic carbon (DIC) in the organic layer and increased soil DOC in the organic and mineral soil layers. Short-term N addition did not increase soil NH₄⁺-N content, but significantly increased soil NO₃⁻-N content. In control plots, soil CO₂ flux ranged from 195.24 to 544.91 mg CO₂ m⁻² h⁻¹, with an average of (357.33 ± 18.72) mg CO₂ m⁻² h⁻¹. Exogenous N input tended to increase CO₂ emission from the coniferous forest soil by 8.3% to 18.2%. Soil CO₂ flux was primarily driven by soil temperature, followed by soil moisture and DIC content. The decrease in soil DIC caused by soil acidification was an important factor promoting soil CO₂ emission. The overall pattern of soil CO₂ flux was dominated by soil temperature but soil moisture appeared to control variation during peak growth periods. These results show that when investigating effects of N addition on soil CO₂ flux, the roles of available N and C dynamics should be considered as well as soil temperature and moisture. It is therefore hypothesized that chronic atmospheric N deposition will stimulate CO₂ emission from cold-temperate coniferous forest soils in the Daxing'anling region in the short term, which will partially offset C sequestration by plants.

Key Words: atmospheric nitrogen deposition; soil CO₂ flux; soil inorganic nitrogen; soil dissolved carbon; cold-temperate coniferous forest

近几十年来,化石燃料燃烧、化肥使用和畜牧业发展等向大气中排放大量的含氮化合物,伴随着大气氮沉降成比例增加,显著改变了陆地生态系统碳、氮循环^[1]。据估计,人类活动产生的活性氮从1860年15 Tg/a增加到2005年的187 Tg/a,其中60%的活性氮又以干湿沉降的方式到达地表^[1-2]。同期,全球大气氮沉降量从34 Tg/a迅速增加到105 Tg/a,预计在未来25a内大气氮沉降量会加倍^[1,3]。随着经济的快速发展,我国也面临着严重的氮沉降问题,大气氮沉降通量平均为12.9 kgN hm⁻² a⁻¹,显著高于全球平均水平^[4]。由于陆地生态系统碳、氮循环过程紧密耦合在一起,大气氮沉降增加势必会改变陆地生态系统碳循环过程和固碳潜力。但是,有关氮沉降增加对陆地生态系统碳平衡的研究还存在诸多不确定性,包括增加碳汇^[5]、促进碳排放^[6]和无显著影响^[7]。因此,需要更多的野外观测结果来揭示外源性氮素对陆地生态系统碳过程的调节机制。

土壤CO₂排放是陆地生态系统碳循环的重要过程之一,主要由生物(植物根系、土壤动物和微生物)呼吸、凋落物和土壤有机质氧化分解等过程产生的CO₂组成^[8]。由于土壤碳库储量巨大,其储量的微小变化(0.1%)将导致大气CO₂浓度发生明显增加(1 mg/m³)^[9-10]。土壤CO₂排放对大气氮沉降增加的响应也十分敏感,表现出抑制^[11]、促进^[12]和不显著^[13]3种研究结论。观测结果的不一致可归因于以下几个方面:(1)作为一个复杂的生物化学过程,土壤CO₂排放过程受植被、微生物等生物因子的控制,同时还受土壤温度、水分、土壤有机质、pH值以及土壤C/N等非生物因子的制约。(2)土壤CO₂排放通量对增氮的响应还取决于森林类型、土壤有效氮状况、施氮剂量、施氮类型和施氮时间,高剂量施氮试验所得出的理论难以准确地解释低水平氮沉降情景下森林土壤CO₂的排放过程。然而,过去我国有关氮沉降模拟研究主要集中于受人类活动影响较大的温带和亚热带森林生态系统,对有效氮极其匮乏的北方森林(Boreal forest)生态系统关注较少^[8,11]。

北方森林是仅次于热带森林的第二大森林群区,占全球陆地面积的14.5%,其土壤碳储量高于其它森林生态系统,对大气氮沉降输入的响应十分敏感^[5,14]。位于欧亚北方森林群区南缘的我国寒温带针叶林,主要分布在大兴安岭地区,占全国森林总面积的29.9%^[15]。由于地区经济的发展和活性氮的远距离传输,大兴安岭寒温带针叶林区大气氮沉降十分明显(9.87—14.25 kgN hm⁻² a⁻¹),略高于北欧、加拿大和阿拉斯加地区的

北方森林^[4]。长期低水平氮沉降输入将会增加北方森林生态系统氮素的可利用性,影响区域森林生态系统和土壤碳平衡。本文主要目的是研究低剂量的氮素输入对大兴安岭寒温带针叶林土壤 CO₂ 排放量及其主要驱动因子的影响,评价不同施氮水平下土壤 CO₂ 排放量与土壤温度、水分、无机氮、可溶性碳含量等关键驱动因子之间的关系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站以东的开拉气林场。研究区位于大兴安岭西北坡,北纬 50°20′—50°30′,东经 121°45′—122°00′,海拔 826 m。该区属于寒温带半湿润气候,年均气温 -5.4 ℃,年降水量 450—550 mm,其中 60% 集中在 7 月和 8 月。9 月末到翌年 5 月初为降雪期,降雪厚度 20—40 cm,降雪量占全年降水总量的 12%。全年地表蒸发量 800—1200 mm,年均日照 2594 h,无霜期 80 d。土壤为发育于花岗岩残积物上的棕色针叶林土,土层厚度 20—30 cm,石砾较多。该区为大片连续多年冻土带的南缘^[16],土壤腐殖质含量 10%—30%,土壤 pH 值为 4.5—6.5。主要植物为兴安落叶松(*Larix gmelini*)、白桦(*Betula platyphylla*)、杜香(*Ledum palustre*)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)、红豆越橘(*Vaccinium vitis-idaea*)等。本研究区的植被类型为杜香-落叶松林,林龄约 150a。

1.2 试验设计

为了模拟 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 输入,参照大兴安岭地区实际大气氮沉降通量(8.5 kgN hm⁻² a⁻¹),设置对照(Control, 0 kgN hm⁻² a⁻¹)、低氮(Low-N, 10 kgN hm⁻² a⁻¹)、中氮(Medium-N, 20 kgN hm⁻² a⁻¹)和高氮(High-N, 40 kgN hm⁻² a⁻¹)等 4 种水平的 NH₄NO₃ 氮肥(分析纯)处理,每个处理设置 3 次重复,分别模拟未来大气氮沉降增加 1 倍、2 倍和 4 倍情景下,寒温带针叶林生态系统碳氮循环关键过程的变化。样方大小 20 m×10 m,间隔 10 m,共 12 个。在 2010 年生长季(5—9 月),于每月月初将氮肥溶于 20 L 水中,用喷雾器均匀喷洒于各样方内。在非生长季(10—4 月),由于研究区气温较低,10 月初将各月的施氮量一次性输入到样方中。对照样方则喷洒相同数量的水,以减少处理间因外加的水而造成对森林生物地球化学循环的影响。

1.3 土壤 CO₂ 排放通量监测

土壤 CO₂ 排放量采用静态箱-气相色谱法测定^[17]。静态箱由不锈钢材料制成,盖箱长、宽、高分别为 50 cm、50 cm 和 40 cm,10 cm 高的底座埋入地下,采样时注水密封。盖箱外部覆盖白色防水面罩以减少取样时太阳辐射对箱内温度的影响,并在内部安装直径为 15 cm 的风扇以确保箱内气体均匀混合。采样频率为每旬 1 次,采样时间为早晨 9:00—11:00,代表土壤 CO₂ 通量的日均值^[18]。扣上盖箱后,分别在 0, 10, 20 min 和 30 min 时段内采样 4 次放入铝箔气袋(Delin, China),然后运回实验室利用气相色谱仪(Agilent 7890, USA)进行分析。测定 CO₂ 时气相色谱的柱箱温度为 55 ℃,检测器 FID 的温度为 250 ℃;载气(干空气及高纯 H₂)流量分别为 300 mL/min 和 50 mL/min,尾吹气(N₂)流量为 10 mL/min。采集气体时利用电子温度计(JM624, China)记录大气温度、箱内温度、地下 10 cm 温度值。利用土壤水分仪(TDR200, USA)测定 10 cm 土壤体积含水量。土壤 CO₂ 排放通量根据箱内气体浓度随着时间的变化率计算^[17],线性相关系数(r^2)大于 0.9。

1.4 土壤采集与分析

生长季每月中旬,按照有机层和矿质层分别采集土壤样品,移除有机层后,矿质土层以 10 cm 间隔进行采样,采样深度 30 cm。在每个处理样方中,沿着对角线用土钻(直径为 2.5 cm)随机采集 5 个土壤样品,均匀混合成一个样品。土样采集后,立即利用 2 mm 筛去除土壤中砾石和植物根系,然后放回冰箱冷藏。利用万分之一分析天平称取 15g 新鲜土样,加入 100 mL 0.2 mol/L 的 KCl 溶液振荡 1 h,经定量滤纸过滤,利用连续流动注射分析仪(Bran Luebbe, Germany)测定滤液中的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度。另外,称取 15 g 左右新鲜土样,加入 100 mL 高纯水振荡 1 h,经 0.45 μm 滤膜抽滤,利用总有机碳分析仪(Elementar, Germany)测定滤液中的溶解性无机碳(DIC)和溶解性有机碳(DOC)浓度。

1.5 统计分析

利用双因素方差分析(Two-way ANOVA)比较不同施氮水平和月份下土壤温度、土壤含水量、无机氮、溶

解性碳含量和土壤 CO_2 通量的差异,利用 Tukey's HSD 进行多重比较。利用多元回归方法分析土壤 CO_2 通量与土壤环境因子之间的联系,分析过程中将施氮水平作为分类变量来处理。利用 SPSS 16.0 软件进行统计分析,利用 SigmaPlot 10.0 软件进行统计绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤温度、水分和 CO_2 通量的变化

整个生长季,不同处理表层 10 cm 土壤温度总体上呈单峰式的季节变化特征,最高值和最低值分别出现在 7 月末和 9 月末。0—10 cm 层土壤体积含水量呈波动变化,在 6 月初冻融期间以及 7 月和 8 月中旬的降水集中期土壤含水量形成 3 个峰值,在 6 月末和 9 月初降水相对较少的干燥期土壤含水量较低。整个生长季,不同处理土壤 10 cm 温度测定值差异显著 ($P=0.05$, 表 1),但各月土壤温度平均值变化范围为 8.81—9.30 $^{\circ}\text{C}$,差异不明显(表 2)。不同处理表层 10 cm 土壤含水量平均值变化范围为 11.07—13.62 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$,不同处理间差异不显著($P=0.46$, 表 1 和表 2)(图 1)。

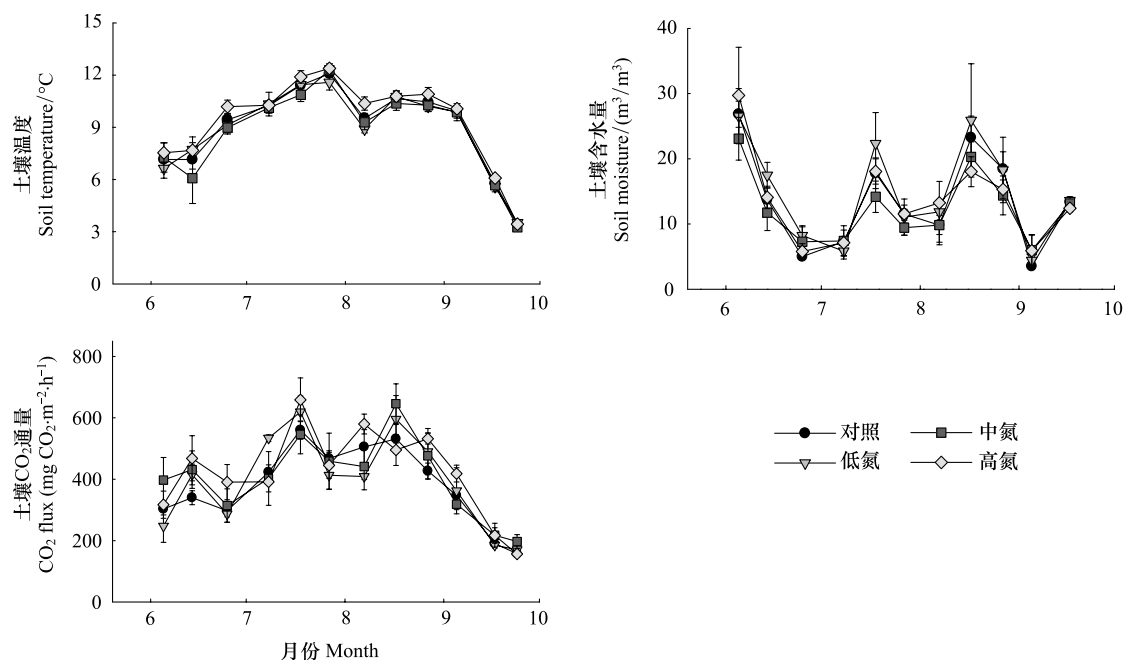


图 1 土壤 10cm 温度、含水量和 CO_2 通量的季节变化及其对增氮的响应

Fig. 1 Seasonal variation and responses to N addition of soil temperature, soil moisture at the 10cm depth and soil CO_2 fluxes

表 1 测定时间、施氮水平及其交互作用对土壤变量和 CO_2 通量影响的双因素方差分析

Table 1 Results of two-way ANOVA on the effects of month, N level and their interactions on soil variables and soil CO_2 fluxes

变异来源 Source of variation	土壤温度 Soil temperature	土壤含水量 Soil moisture	土壤 CO_2 通量 Soil CO_2 flux	土壤 DIC 含量 Soil DIC content		土壤 DOC 含量 Soil DOC content		土壤 NO_3^- -N 含量 Soil NO_3^- -N content		土壤 NH_4^+ -N 含量 Soil NH_4^+ -N content	
	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i> _{O layer}	<i>P</i> _{M layer}	<i>P</i> _{O layer}	<i>P</i> _{M layer}	<i>P</i> _{O layer}	<i>P</i> _{M layer}	<i>P</i> _{O layer}	<i>P</i> _{M layer}
月份 Month	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.009	0.72	0.17	0.001	0.001	<0.001
施氮水平 N Level	0.05	0.46	0.05	0.01	0.15	0.001	0.02	0.31	0.005	0.86	0.14
月份×施氮水平 Month × N level	0.99	0.94	0.06	0.26	0.97	0.37	0.98	0.67	0.99	0.43	0.73

O layer: 有机层; M layer: 矿物质层

土壤 CO_2 排放通量的变化格局整体上与土壤温度一致,呈单峰式的季节变化;同时在生长旺季(7—8月),土壤 CO_2 排放通量的变化趋势与土壤含水量表现出高度的相似性,在 7 月和 8 月中旬两个观测日期内也呈现出双峰特征(图 1)。不同处理土壤 CO_2 通量平均变化范围为 357.33—422.53 $\text{mgCO}_2 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$,表现出

随着施氮剂量增加而增加的趋势(表 2);方差结果表明,不同氮素处理与对照边缘显著($P=0.05$,表 1)。

表 2 不同处理下主要土壤环境变量和土壤 CO₂ 通量的平均值和标准误差

Table 2 Mean and standard error of key soil variables and soil CO₂ fluxes at the different treatment plots

施氮水平 Level	土壤温度 * Soil Temperature /℃	土壤含水量 Soil moisture /(m ³ /m ³)	土壤 CO ₂ 通量 Soil CO ₂ flux (mgCO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	DIC 含量 DIC content / (mg/kg)		DOC 含量 DOC content / (mg/kg)		NO ₃ ⁻ -N 含量 NO ₃ ⁻ -N content / (mg/kg)		NH ₄ ⁺ -N 含量 NH ₄ ⁺ -N content / (mg/kg)	
				有机层	矿质层	有机层	矿质层	有机层	矿质层	有机层	矿质层
对照 Control	8.88a	12.09 a	357.33 a	384.22ab	113.73 a	859.18 a	218.03 a	2.05 a	0.27 a	100.37 a	17.23 a
	(0.35)	(1.15)	(18.72)	(26.97)	(2.58)	(57.34)	(6.52)	(0.29)	(0.03)	(12.59)	(1.49)
低氮 Low N	8.81 a	13.62 a	387.08 a	420.85b	119.70 a	1212.34 b	263.60 b	3.05 a	0.48b	100.23 a	19.15 a
	(0.59)	(2.66)	(40.37)	(38.88)	(6.74)	(148.63)	(24.72)	(1.79)	(0.07)	(26.31)	(2.21)
中氮 Medium N	8.82 a	11.07 a	383.80 a	414.52b	116.81a	1208.69 b	260.23b	1.85 a	0.31 a	95.63 a	18.54 a
	(0.64)	(1.51)	(35.38)	(64.52)	(5.35)	(168.45)	(13.67)	(0.46)	(0.05)	(22.44)	(3.04)
高氮 High N	9.30 a	12.55 a	422.53 a	347.56 a	110.42 a	961.51 ab	227.05 ab	2.88 a	0.24 a	121.40 a	11.92 a
	(0.60)	(1.53)	(33.45)	(46.02)	(4.28)	(91.47)	(9.51)	(1.25)	(0.06)	(38.75)	(1.78)
平均 Average	8.93	12.23	378.11	391.72	114.94	995.22	234.58	2.44	0.31	101.98	17.18
	(0.25)	(0.78)	(14.00)	(19.98)	(2.08)	(53.54)	(6.50)	(0.39)	(0.03)	(9.89)	(1.06)

* 不同字母表示不同氮素输入水平间增氮效应应有显著差异

2.2 土壤可溶性碳含量的变化

有机层土壤 DIC 含量呈显著的季节变化,6 月份最低,8 月份最高;矿质层土壤 DIC 含量季节变化与有机层相似,但波动幅度相对较小($P<0.001$,表 1)。总体上,不同处理有机层土壤 DIC 含量变化范围为 347.56—420.85 mg/kg,低氮处理倾向于增加而中氮和高氮处理倾向于降低有机层土壤 DIC 含量($P=0.01$,表 1 和表 2)。但是,不同处理矿质层土壤 DIC 含量变化范围较小(110.42—119.70 mg/kg),施氮没有显著改变矿质土壤 DIC 含量($P=0.15$,表 1)(图 2)。

对照样方有机层土壤 DOC 含量季节变化与 DIC 并不一致,表现为 6 月份最低,7 月份最高,不同月份 DIC 含量差异显著($P<0.001$,表 1);矿质层土壤 DOC 变化幅度不大($P=0.72$,表 1)。不同处理有机层和矿质层土壤 DOC 含量变化范围分别为 859.18—1212.34 mg/kg 和 218.03—263.60 mg/kg,前者是后者的 4.2 倍(表 1)。施氮改变了有机层和矿质土壤 DOC 含量,低氮和中氮处理显著增加了矿质层和有机层土壤 DOC 含量($P=0.02$ 和 0.001,表 1)(图 2)。

2.3 土壤无机氮含量的变化

自然状态下寒温带针叶林有机层土壤 NO₃⁻-N 含量较低(1.10—2.89 mg/kg),不同月份土壤 NO₃⁻-N 含量变化不显著($P=0.17$,表 2)。矿质层土壤 NO₃⁻-N 含量更低(0.10—0.31 mg/kg),但季节差异明显,7 月最高,9 月最低,与土壤温度变化一致(表 1, $P=0.001$)。方差分析表明,施氮不改变有机层土壤 NO₃⁻-N 含量,而显著增加矿质层土壤 NO₃⁻-N 含量(表 1, $P=0.005$)(图 2)。

虽然有机层和矿质层土壤 NH₄⁺-N 含量季节变化均十分显著,但格局不同。自然状态下有机层土壤 NH₄⁺-N 含量最大值和最小值分别出现在 7 月和 9 月,与土壤温度变化一致,体现出受温度支配下的矿化作用所驱动。而在矿质土层,土壤 NH₄⁺-N 含量最小值和最大值分别出现在 7 月和 8 月,反映了植物吸收和矿化的联合作用。寒温带针叶林土壤无机氮以 NH₄⁺-N 为主,自然状态下有机层和矿质层土壤 NH₄⁺-N 含量分别是 NO₃⁻-N 含量的 49 倍和 64 倍(表 2)。另外,施氮不显著影响有机层和矿质层土壤 NH₄⁺-N 含量($P=0.86$ 和 $P=0.14$,表 1)(图 2)。

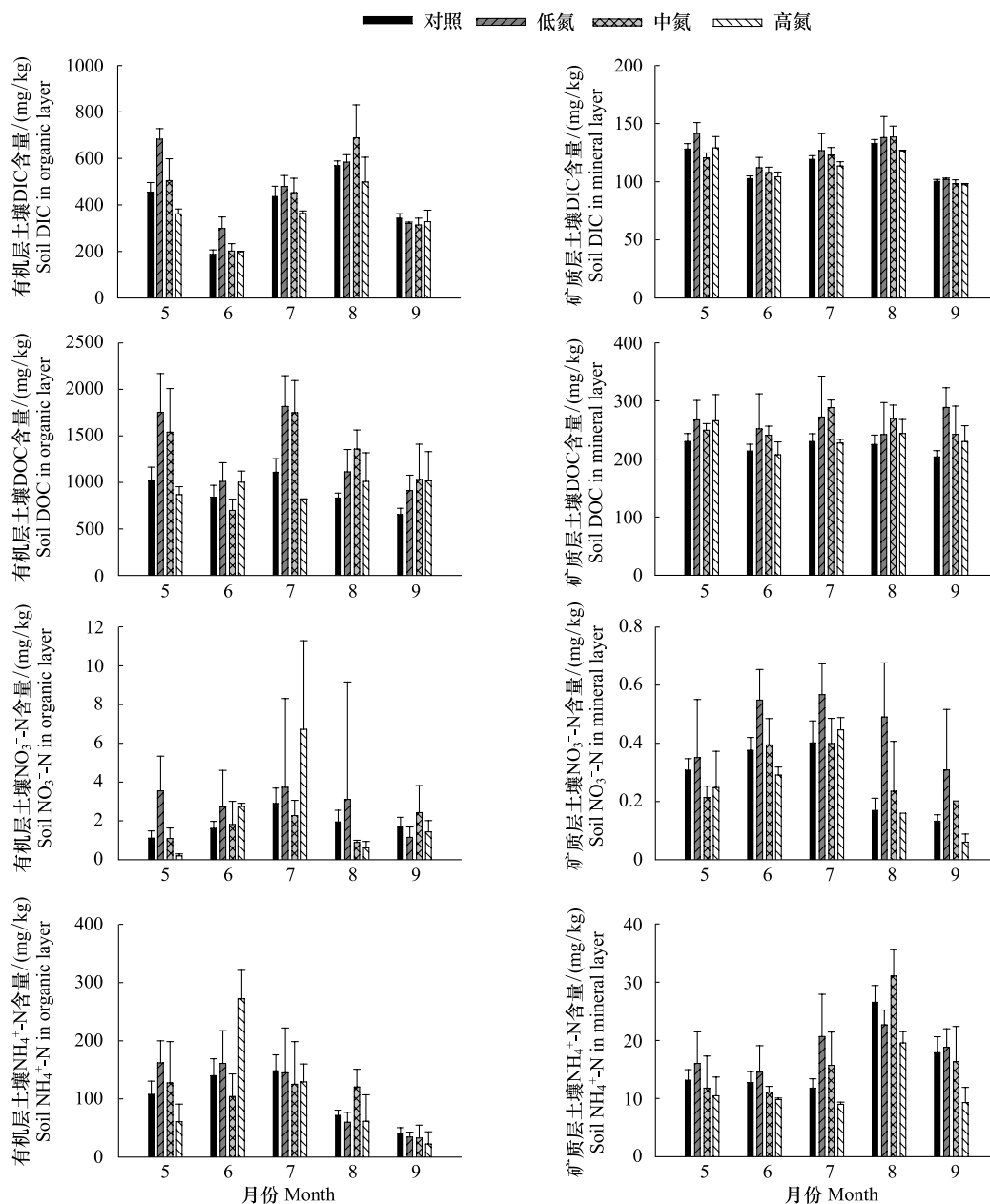


图2 有机层和矿质层土壤无机氮和可溶性碳含量的月变化及其对增氮的响应

Fig. 2 Monthly variation and responses to N addition of soil inorganic N and soil dissolved C contents at the organic layer and the mineral soil layer

2.4 土壤 CO₂ 通量与土壤变量之间的关系

在自然状态下,土壤 CO₂ 通量与 10 cm 土壤温度显著正相关,其关系可以通过指数增加方程来拟合,据此计算的温度敏感性系数(Q_{10})值为 3.74。土壤 CO₂ 通量和 10 cm 土壤含水量显著正相关,其关系可以通过线性方程来拟合,且施氮倾向于增加线性回归方程的斜率。另外,不同处理土壤 CO₂ 通量与有机层、矿质层土壤 DIC 含量显著正相关,且高氮处理与对照存在显著性差异(表 3);而与有机层 DOC 含量边缘相关(表 3, $P=0.06$)。但是,土壤 CO₂ 通量与不同土层 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量的相关性不显著。综合考虑土壤环境因子和施氮水平(分类变量),土壤 CO₂ 通量主要受土壤温度控制,其次为土壤水分和有机层的 DIC 含量,三者能够解释土壤 CO₂ 通量变异的 80.7%(表 3)(图 3)。

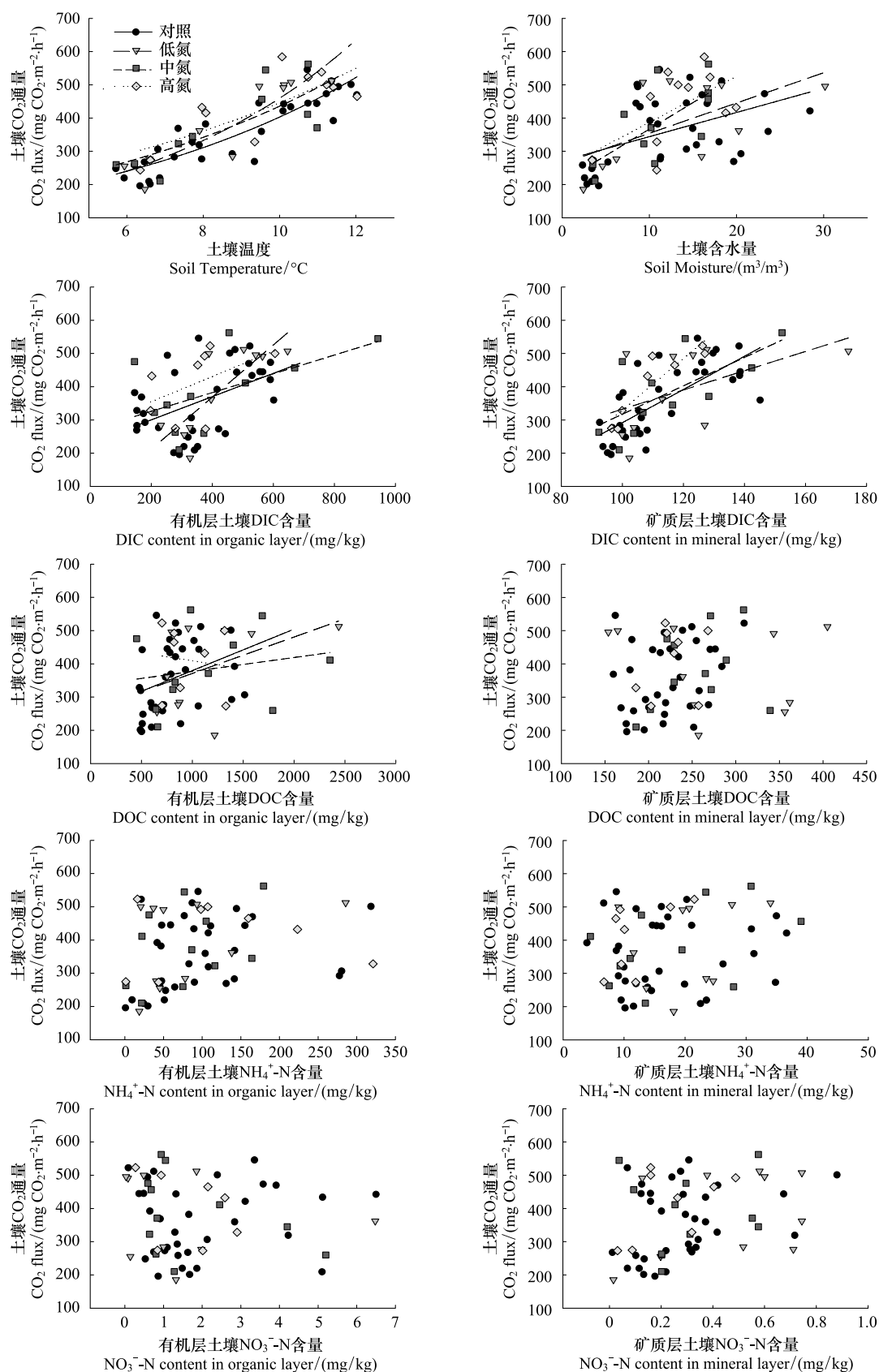
图3 土壤 CO₂ 通量与土壤环境变量之间的关系Fig. 3 Relationships between soil CO₂ fluxes and soil variables

表 3 土壤 CO₂ 通量与土壤环境变量间的回归模型Table 3 Regression models between the soil CO₂ fluxes and the environmental variables

土壤环境变量 Soil variables	回归方程 Equation	R ²	P
土壤温度 (Ts)	$F_{CO_2} = 108.02 \exp(0.13Ts) + 36.84 \text{ Low N} + 30.00 \text{ Medium N} + 40.99 \text{ High N}$	0.74	<0.001
土壤含水量 (Ms)	$F_{CO_2} = 247.72 + 9.27Ms + 13.16 \text{ Low N} + 33.51 \text{ Medium N} + 58.56 \text{ High N}$	0.32	<0.001
有机层土壤 DIC 含量 Soil DIC ₀	$F_{CO_2} = 221.51 + 0.37DIC_0 + 7.23 \text{ Low N} + 10.86 \text{ Medium N} + 59.57 \text{ High N}$	0.31	<0.001
矿质层土壤 DIC 含量 Soil DIC _M	$F_{CO_2} = -147.24 + 4.46DIC_M + 4.11 \text{ Low N} + 15.56 \text{ Medium N} + 65.84 \text{ High N}^*$	0.48	<0.001
有机层土壤 DOC 含量 Soil DOC ₀	$F_{CO_2} = 290.99 + 0.08 \text{ DOC}_0 + 3.56 \text{ Low N} - 0.94 \text{ Medium N} + 42.44 \text{ High N}$	0.03	0.06
矿质层土壤 DOC 含量 Soil DOC _M	$F_{CO_2} = 297.40 + 0.27 \text{ DOC}_M + 15.02 \text{ Low N} + 17.29 \text{ Medium N} + 52.32 \text{ High N}$	0.04	0.37
有机层土壤 NO ₃ ⁻ -N 含量 Soil NO ₃ ⁻ -N ₀	$F_{CO_2} = 347.57 + 4.93 \text{ NO}_3\text{-N}_0 + 23.93 \text{ Low N} + 27.85 \text{ Medium N} + 49.34 \text{ High N}$	0.05	0.34
矿质层土壤 NO ₃ ⁻ -N 含量 Soil NO ₃ ⁻ -N _M	$F_{CO_2} = 313.74 + 155.58 \text{ NO}_3\text{-N}_M + 1.54 \text{ Low N} + 23.35 \text{ Medium N} + 60.13 \text{ High N}$	0.11	0.03
有机层土壤 NH ₄ ⁺ -N 含量 Soil NH ₄ ⁺ -N ₀	$F_{CO_2} = 321.57 + 0.36 \text{ NH}_4\text{-N}_0 + 36.32 \text{ Low N} + 33.27 \text{ Medium N} + 45.60 \text{ High N}$	0.09	0.05
矿质层土壤 NH ₄ ⁺ -N 含量 Soil NH ₄ ⁺ -N _M	$F_{CO_2} = 311.93 + 2.67 \text{ NH}_4\text{-N}_M + 21.19 \text{ Low N} + 23.55 \text{ Medium N} + 67.40 \text{ High N}$	0.07	0.12
综合 Combined	$F_{CO_2} = 74.72 \exp(0.14Ts) + 3.41Ms + 0.15DIC_0 + 20.71 \text{ Low N} + 22.04 \text{ Medium N} + 30.44 \text{ High N}$	0.81	<0.001

* 表示不同施氮水平与对照之间差异显著

3 讨论

3.1 土壤环境变量对氮素输入的响应

虽然研究发现施氮倾向于增加部分月份表层 10 cm 土壤温度,但这不是施氮产生的真实效应。由于土壤温室气体样品采集在 9:00—11:00 进行,因样方数目较多(12 个)和面积较大(20 m×10 m),按低氮、中氮和高氮样方顺序测定,后测定的高氮处理样方的气温和地温均会略高于先测定的低氮样方,但整个生长季差异不明显。施氮不改变土壤体积含水量。理论上,样地尺度土壤含水量取决于大气降水输入和土壤水分损失(植物蒸腾、土壤蒸发、地表径流)之间的平衡^[18]。由于不同处理样方大气降水量一致,施氮能够通过促进植物蒸腾、降低土壤蒸发和地表径流损失来改变土壤含水量^[8]。由于研究区处于大兴安岭寒温带针叶林区,多年平均降水量 500 mm 左右,且 80% 以上集中在生长季;而由于气温较低,全年地表蒸发量仅 900 mm,加上林下有机层较厚,导致森林土壤水分含量较高,对增氮的响应并不敏感。这一点与干旱和半干旱草地生态系统完全不同^[8,19]。

土壤无机氮库的变化是外源性氮输入、植物吸收、淋溶和气态排放等过程的综合反映^[20]。由于该区气温较低,土壤无机氮中 98% 以上为 NH₄⁺-N(表 2),土壤 NO₃⁻-N 淋溶和 N₂O 排放量均很低^[21],所以土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量的变化主要取决于外源性氮输入和植物吸收两者之间的平衡。施氮没有显著增加有机层和矿质层土壤 NH₄⁺-N 含量,但显著增加了有机层的 NO₃⁻-N 含量。研究表明,一方面施加的 NH₄NO₃ 可直接增加表面有机层 NO₃⁻-N 的含量,或施加的 NH₄⁺ 通过硝化作用间接增加有机层 NO₃⁻-N 含量;另一方面,研究结果说明施加的氮素短期内被截留在有机层,并没有到达下部的矿质土层,因此植物吸收利用也很少,这与盛文萍^[22]利用¹⁵N 同位素示踪技术研究沉降氮在寒温带针叶林生态系统中运移规律所得出的结论相一致。

土壤 DOC 主要来源于植物根系分泌物以及凋落物和土壤有机质的分解。增氮对土壤 DOC 含量的影响也有增加^[23]、不变^[24]和下降^[25]3 种结论,取决于植物残体的生物降解、根系分泌物产生的 DOC 输入和土壤微生物消耗输出之间的平衡^[26]。本研究发现,低剂量和高剂量氮输入显著增加有机层和矿质层土壤 DOC 含量,这可能与施氮刺激了土壤微生物活性,加速了土壤有机质分解有关^[27]。但是,施氮剂量过高,或随着施氮

时间延长,这种对 DOC 产生的促进作用会减弱甚至转变成抑制作用^[8]。结果显示高氮处理对土壤 DOC 的促进效应明显小于低氮和中氮处理。土壤 DIC 主要包括 CO₂、碳酸、碳酸氢根和碳酸根离子,来源于 CO₂、水反应生成的富含 H₂CO₃ 和 HCO₃⁻ 溶液。由于施加硝酸铵会导致土壤酸化(土壤 pH 值由对照的 5.2 降低到高氮处理的 4.8),H⁺ 增加势必会使原有的平衡反应向右推进($H^+ + HCO_3^- \rightleftharpoons 2H^+ + CO_3^{2-} \rightleftharpoons H_2O + CO_2$),潜在地增加土壤 CO₂ 的排放,这与高氮显著降低有机层 DIC 含量相吻合。

3.2 土壤 CO₂ 排放通量的控制因子

增氮是促进、抑制还是不改变森林土壤 CO₂ 排放通量,取决于森林生态系统有效氮状态^[28]。在贫氮的森林和草地生态系统中,在施氮初期以促进效应居多^[8,29-30]。本研究施氮一年即发现寒温带针叶林土壤 CO₂ 通量随着施氮剂量的增加有增加的趋势,尽管在统计学上只通过边缘显著检验(表 1 和表 2)。可能的原因有:①施氮时间较短以及施氮剂量较低(10—40 kgN hm⁻² a⁻¹),大多数施加的氮肥被截留在表面有机层,腐殖质层中的微生物利用较少;②另外,施加的氮一部分被地下层草本植物所利用,植物生长导致被分配到根系的碳很少,降低了根系呼吸的比例^[29]。Fang 等^[8]也发现低剂量(10 kgN hm⁻² a⁻¹)施氮短期内会抑制高寒草甸土壤 CO₂ 排放通量,强调该现象主要是根系呼吸降低所致。随着施氮剂量的增加以及施氮时间的延长,土壤中的有效氮开始累积,可能会增加土壤微生物量及活性、增加根系生物量、降低凋落物 C/N 并增加其分解速率,进而会显著促进森林土壤 CO₂ 的排放^[28]。

在土壤 CO₂ 通量的控制因子研究方面,许多研究表明土壤温度和水分是影响森林土壤 CO₂ 排放最主要的两个因素^[11]。当土壤水分为非限制因素时,土壤 CO₂ 通量随温度变化的指数方程能够解释土壤 CO₂ 排放的大部分变异^[31]。在大兴安岭寒温带针叶林生态系统中,土壤温度和土壤含水量能够分别解释土壤 CO₂ 通量变异的 74% 和 32%(表 3)。由于气温较低、土壤有机质含量较高,寒温带针叶林土壤 CO₂ 通量对温度的敏感性系数 Q_{10} 值(3.74)显著高于温带和亚热带森林生态系统(1.79—2.49)^[32-33]。值得注意的是,本研究还发现土壤 DIC 和 DOC 含量变化也是影响土壤 CO₂ 通量的重要因子之一。土壤有机碳的解聚和溶解是其矿化的先决条件,有机碳在转化为 CO₂ 和 CH₄ 前,必须先进入溶液中^[34]。这主要是由于 DOC 较易为微生物利用,而固相中的有机碳较难分解^[35]。李忠佩等^[36]研究发现,土壤有机碳的矿化速率动态与 DOC 含量的变化趋势相一致。刘德燕等^[37]研究表明外源磷输入改变了湿地土壤 DIC 含量和土壤有机碳的矿化量,土壤 DIC 含量与有机碳的累积矿化量呈显著线性正相关关系。

4 结论

(1) 土壤 CO₂ 通量的季节变化格局受土壤温度和土壤含水量的联合控制,整体上与土壤温度的单峰格局相同,在生长旺季却与土壤含水量的变化有高度的一致性。

(2) 增氮不改变土壤含水量,倾向于降低有机层土壤 DIC 含量,增加有机层和矿质层土壤 DOC 含量。增氮短期内不改变土壤 NH₄⁺-N 含量,但会显著导致土壤 NO₃⁻-N 累积。

(3) 增氮短期内倾向于增加大兴安岭北方森林土壤 CO₂ 排放。土壤 CO₂ 通量主要受土壤温度驱动,其次为土壤水分和 DIC 含量。

References:

- [1] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, Bekunda M, Cai Z C, Freney J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [2] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, Boyer E W, Howarth R W, Seitzinger S P, Asner G P, Cleveland C C, Green P A, Holland E A, Karl D M, Michaels A F, Porter J H, Townsend A R, Vorosmarty C J. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153-226.
- [3] Neff J C, Townsend A R, Gleixner G, Lehman S J, Turnbull J, Bowman W D. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. *Nature*, 2002, 419(6910): 915-917.
- [4] 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: D22S05, doi: 10.1029/2006JD007990.
- [5] Magnani F, Mencuccini M, Borghetti M, Berbigier P, Berninger F, Delzon S, Grelle A, Hari P, Jarvis P G, Kolari P, Kowalski AS, Lankreijer H, Law BE, Lindroth A, Loustau D, Manca G, Moncrieff JB, Rayment M, Tedeschi V, Valentini R, Grace J. The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature*, 2007, 447(7146): 848-850.
- [6] Bragazza L, Freeman C, Jones T, Rydin H, Limpens J, Fenner N, Ellis T, Gerdol R, Hájek M, Hájek T, Iacumin P, Kutnar L, Tahvanainen T, Toberman H. Atmospheric nitrogen deposition promotes carbon loss from peat bogs. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(51): 19386-19389.
- [7] De Vries W, Solberg S, Dobbervin M, Sterba H, Laubhahn D, Reinds G J, Nabuurs G J, Gundersen P, Sutton M A. Ecologically implausible carbon response? *Nature*, 2008, 451(7180): E1-E3.
- [8] Fang H J, Cheng S L, Yu G R, Zheng J J, Zhang P L, Xu M J, Li Y N, Yang X M. Responses of CO₂ efflux from an alpine meadow soil on the Qinghai Tibetan Plateau to multi-form and low-level N addition. *Plant and Soil*, 2012, 351(1/2): 177-190.
- [9] Eswaran H, van den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(1): 192-194.
- [10] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 2010, 464(7288): 579-582.
- [11] 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*, 2007, 14(2): 403-412.
- [12] Magill A H, Aber J D, Hendricks J J, Bowden R D, Melillo J M, Steudler P A. Biogeochemical response of forest ecosystems to simulated chronic nitrogen deposition. *Ecological Applications*, 1997, 7(2): 402-415.
- [13] Micks P, Aber J D, Boone R D, Davidson E A. Short-term soil respiration and nitrogen immobilization response to nitrogen applications in control and nitrogen-enriched temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 57-70.
- [14] Allison S D, Hanson C A, Treseder K K. Nitrogen fertilization reduces diversity and alters community structure of active fungi in boreal ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(8): 1878-1887.
- [15] Fang J Y, Piao S L, Zhao S Q. The carbon sink: the role of the middle and high latitudes terrestrial ecosystems in the northern hemisphere. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(5): 594-602.
- [16] Zhou M. Study on the Hydrological Law of Daxinganling Forest Ecosystem. Beijing: China Science and Technology Press, 2003: 23-27.
- [17] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(5): 842-844.
- [18] Yepez E A, Huxman T E, Ignace D D, English N B, Weltzin J F, Castellanos A E, Williams D G. Dynamics of transpiration and evaporation following a moisture pulse in semiarid grassland: a chamber-based isotope method for partitioning flux components. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 132(3/4): 359-376.
- [19] Inouye R. Effects of shrub removal and nitrogen addition on soil moisture in sagebrush steppe. *Journal of Arid Environments*, 2006, 65(4): 604-618.
- [20] Ammann C, Neftel A, Spirig C, Leifeld J, Fuhrer J. Nitrogen balance of hay meadows with and without fertilization. *Agrarforschung*, 2009, 16(9): 348-353.
- [21] Fu M J, Wang C K, Wang Y, Liu S, Ding S. Effects of climate warming on the N₂O emission from *Larix gmelinii* forest soils at different latitudes during soil thawing period. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1635-1642.
- [22] Sheng W P. Nitrogen deposition and its contribution to carbon sequestration in forest ecosystem along NSTEC [D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [23] Guggenberger G. Acidification effects on dissolved organic matter mobility in spruce forest ecosystems. *Environment International*, 1994, 20(1): 31-41.
- [24] McDowell W H, Currie W S, Aber J D, Yano Y. Effects of chronic nitrogen amendments on production of dissolved organic carbon and nitrogen in forest soils. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1998, 105(1/2): 175-182.
- [25] Chantigny M H, Angers D A, Prévost D, Simard R R, Chalifour F P. Dynamics of soluble organic C and C mineralization in cultivated soils with varying N fertilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(4): 543-550.
- [26] Pregitzer K S, Zak D R, Burton A J, Ashby J A, MacDonald N W. Chronic nitrate additions dramatically increase the export of carbon and nitrogen from northern hardwood ecosystems. *Biogeochemistry*, 2004, 68(2): 179-197.
- [27] Liu W Q, Liu B Y, Wang J, Lei C Y. Responses of soil microbial communities to moss cover and nitrogen addition. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1691-1698.
- [28] Cheng S L, Fang H J, Ma Y. Effects of nitrogen input on sequestration and depletion of organic carbon of forest soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(5): 82-85.

- [29] 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.
- [30] Zhu T H, Cheng S L, Fang H J, Yu G R, Zheng J J, Li Y N. Early responses of soil CO₂ emission to simulating atmospheric nitrogen deposition in an alpine meadow on the Qinghai Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10): 2687-2696.
- [31] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 2001, 7(6): 667-677.
- [32] Zheng Z M, Yu G R, Fu Y L, Wang Y S, Sun X M, Wang Y H. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: a trans-China based case study. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(7): 1531-1540.
- [33] Li K, Jiang H, You M N, Zeng B. Effect of simulated nitrogen deposition on the soil respiration of *Lithocarpus glabra* and *Castanopsis sclerophylla*. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(1): 82-89.
- [34] Ellert B H, Gregorich E G, McFee W, Kelly J. Management-induced changes in the actively cycling fractions of soil organic matter // McFee W W, Kelly J M, eds. *Carbon Forms and functions in Forest Soils*. Madison: Soil Science Society of America, 1995: 119-138.
- [35] Marschner B, Bredow A. Temperature effects on release and ecologically relevant properties of dissolved organic carbon in sterilised and biologically active soil samples. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(4): 459-466.
- [36] Li Z P, Zhang T L, Cheng B Y. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 544-552.
- [37] Liu D Y, Song C C. Effects of phosphorus enrichment on mineralization of organic carbon and contents of dissolved carbon in a freshwater marsh soil. *China Environmental Science*, 2008, 28(9): 769-774.

参考文献:

- [15] 方精云, 朴世龙, 赵淑清. CO₂ 失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 594-602.
- [16] 周梅. 大兴安岭森林生态系统水文规律研究. 北京: 中国科学技术出版社, 2003: 23-27.
- [21] 傅民杰, 王传宽, 王颖, 刘实, 丁爽. 气候暖化对解冻期不同纬度兴安落叶松林土壤氧化亚氮释放的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1635-1642.
- [22] 盛文萍. 中国东部南北样带森林生态系统氮沉降及其固碳贡献[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2010.
- [27] 刘蔚秋, 刘滨扬, 王江, 雷纯义. 不同环境条件下土壤微生物对模拟大气氮沉降的响应. *生态学报*, 2010, 30(7): 1691-1698.
- [28] 程淑兰, 方华军, 马艳. 氮输入对森林土壤有机碳截存与损耗过程的影响. *水土保持学报*, 2007, 21(5): 82-85.
- [30] 朱天鸿, 程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 郑娇娇, 李英年. 青藏高原高寒草甸土壤 CO₂ 排放对模拟氮沉降的早期响应. *生态学报*, 2011, 31(10): 2687-2696.
- [33] 李凯, 江洪, 由美娜, 曾波. 模拟氮沉降对石栎和苦槠幼苗土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2011, 31(1): 82-89.
- [36] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系. *土壤学报*, 2004, 41(4): 544-552.
- [37] 刘德燕, 宋长春. 磷输入对湿地土壤有机碳矿化及可溶性碳组分的影响. *中国环境科学*, 2008, 28(9): 769-774.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 7 April, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Theoretical framework and key techniques of urban ecological landscape research	SUN Ranhao, XU Zhongliang, CHEN Liding, et al (1979)
Response of sinapate esters in <i>Arabidopsis thaliana</i> to UV-B radiation	LI Min, WANG Yin, MU Xiaofei, et al (1987)
Biosorption of lead (II) and cadmium (II) from aqueous solution by <i>Chlorella pyrenoidsa</i> and its influential factors	JIANG Jing, LI Liang, LI Haipeng, et al (1995)
Response of pear jujube trees on fruit development period to different soil water potential levels	HAN Lixin, WANG Youke, ZHANG Linlin (2004)
An approach for analyzing resources metabolism of industrial ecosystems	SHI Xiaoqing, YANG Jianxin, WANG Rusong, et al (2012)
Establishment of environmental sustainability assessment indicators based on material flow and ecological footprint model in Tongling City of Anhui Province	ZHAO Huihui, WANG Yuan, GU Xueming, et al (2025)
Health status evaluation of the farmland supply function at county level in Hebei Province	BAI Linhong, WANG Wei, ZHANG Yu (2033)
Inhibition effects and mechanisms of the endophytic fungus <i>Chaetomium globosum</i> L18 from <i>Curcuma wenyujin</i>	WANG Yanhong, WU Xiaomin, ZHU Yanping, et al (2040)
Water use of walnut-wheat intercropping system based on stable carbon isotope technique in the low hilly area of North China	HE Chunxia, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (2047)
Spatial heterogeneity of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in sloping farmland in a karst region on the Yunnan-Guizhou Plateau	ZHANG Liqing, PENG Wanxia, SONG Tongqing, et al (2056)
Relationship among rice root aerenchyma, root radial oxygen loss and rhizosphere nitrification	LI Yilin (2066)
Effects of <i>Eriosoma lanigerum</i> (Hausmann) on physiological indices of different apple cultivars	WANG Xicun, YU Yi, ZHOU Hongxu, et al (2075)
Effects of P-efficient transgenic soybean on rhizosphere microbial community	JIN Lingbo, ZHOU Feng, YAO Juan, et al (2082)
Detecting major phenological stages of rice using MODIS-EVI data and Symlet11 wavelet in Northeast China	XU Yanyan, ZHANG Jiahua, YANG Limin (2091)
Cropping system optimization based on the comparative analysis of precipitation utilization in Sichuan Province	WANG Mingtian, QU Huihui, YANG Xiaoguang, et al (2099)
The impacts of global climatic change on chilling damage distributions of maize in Northeast China	GAO Xiaorong, WANG Chunyi, ZHANG Jiquan (2110)
Effect of fertilization on ammonia volatilization from paddy fields in Chao Lake Basin	ZHU Xiaohong, MA Zhongwen, MA Youhua, et al (2119)
Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on net ion fluxes in the roots of trifoliate orange (<i>Poncirus trifoliata</i>) and mineral nutrition in seedlings under zinc contamination	XIAO Jiaxin, YANG Hui, ZHANG Shaoling (2127)
The effect of red:far red ratio on the stomata characters and stomata conductance of <i>Chrysanthemum</i> leaves	YANG Zaiqiang, ZHANG Jing, JIANG Xiaodong, et al (2135)
Dynamic characteristics of litterfall and nutrient return of four typical forests along the altitudinal gradients in Mt. Shennongjia, China	LIU Lei, SHEN Guozhen, CHEN Fangqing, et al (2142)
Aboveground litter contribution to soil respiration in a black locust plantation in the Loess Plateau	ZHOU Xiaogang, GUO Shenli, CHE Shengguo, et al (2150)
Life history and spatial distribution of a <i>Taiwania flousiana</i> population in Leigong Mountain, Guizhou Province, China	CHEN Zhiyang, YANG Ning, YAO Xianming, et al (2158)
The feasibility of using LAS measurements of the turbulence structure parameters of temperature above a forest canopy	ZHENG Ning, ZHANG Jinsong, MENG Ping, et al (2166)
Spatial distribution of vegetation and carbon density in Jinyun Mountain Nature Reserve based on RS/GIS	XU Shaojun, ZENG Bo, SU Xiaolei, et al (2174)
Early nitrogen deposition effects on CO ₂ efflux from a cold-temperate coniferous forest soil	WENDU Runa, FANG Huajun, YU Guirui, et al (2185)
Epilithic diatom assemblages distribution in Gui River basin, in relation to chemical and physiographical factors	DENG Peiyan, LEI Yuanda, LIU Wei, et al (2196)
Acute stress caused by sand discharging on Yellow River Carp (<i>Cyprinus carpio</i>) in Xiaolangdi Reservoir	SUN Luyin, Baiyinbaoligao, NIU Cuijuan, et al (2204)
Environmental cost of pond aquaculture in Shanghai: an empirical analysis based on double-bounded dichotomous CVM method	TANG Keyong, YANG Zhengyong, YANG Huaiyu, et al (2212)
Host searching behaviour of <i>Apanteles cypris</i> Nixon (Hymenoptera: Braconidae) ...	ZHOU Hui, ZHANG Yang, WU Weijian (2223)
The effect of hedgerows on the distribution of <i>Harmonia axyridis</i> Pallas in agroforestry systems	YAN Fei, ZHOU Zaibao, WANG Shuo, et al (2230)
Induction of early resistance response to <i>Alternaria alternata</i> f. sp. <i>mali</i> in apple leaves with apple and chitosan fermentation broth ...	WANG Rongjuan, YAO Yuncong, QI Yaping, et al (2239)
Review and Monograph	
Research into vulnerability assessment for coastal zones in the context of climate change	WANG Ning, ZHANG Liquan, YUAN Lin, et al (2248)
Introduction and ecological effects of an exotic mangrove species <i>Sonneratia apetala</i>	PENG Yougui, XU Zhengchun, LIU Minchao (2259)
Discussion	
Degradation of organic contaminants with biological aerobic fermentation in sewage sludge dewatering and its influencing factors	YU Jie, ZHENG Guodi, GAO Ding, et al (2271)
Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using four greening tree species	YAN Wende, LIANG Xiaocui, ZHENG Wei, et al (2279)
Scientific Note	
Diversity of endophytic fungi from six dominant plant species in a Pb-Zn mine wasteland in China	LI Dongwei, XU Hongmei, MEI Tao, et al (2288)
Effects of <i>Meloidogyne incognita</i> on scavenging system of reactive oxygen species in tomato seedlings grafted with different rootstocks ...	LIANG Peng, CHEN Zhende, LUO Qingxi (2294)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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

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 32 卷 第 7 期 (2012 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 7 2012

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	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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:1000717	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@csbg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@csbg.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 70.00 元