

doi:10.11707/j.1001-7488.20140101

缙云山常绿阔叶林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应*

孙素琪¹ 王玉杰¹ 王云琦¹ 张会兰¹ 李云霞²
于雷¹ 胡波¹ 刘婕¹

(1. 北京林业大学水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室 北京 100083;

2. 江河水利水电咨询中心 北京 100120)

摘 要: 通过原位喷施,设置对照(CK, 0 kgN·hm⁻²a⁻¹)、低氮(T₅₀, 50 kgN·hm⁻²a⁻¹)、中氮(T₁₀₀, 100 kgN·hm⁻²a⁻¹)和高氮(T₁₅₀, 150 kgN·hm⁻²a⁻¹)4个氮沉降处理,研究重庆缙云山常绿阔叶林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应。结果表明:CK, T₅₀, T₁₀₀和T₁₅₀氮沉降处理的土壤呼吸速率分别为(4.31 ± 1.14), (3.42 ± 0.74), (2.81 ± 0.38)和(2.49 ± 0.32) μmol·m⁻²s⁻¹,相对于CK处理,氮沉降处理使土壤呼吸速率显著降低(P < 0.05);土壤呼吸速率与5和10 cm深处土壤温度间均存在显著指数正相关关系(P < 0.01);4个处理5 cm深处的土壤呼吸温度敏感系数Q₁₀值分别为2.07, 1.81, 1.62和1.54, 10 cm深处的Q₁₀值分别为2.11, 1.83, 1.63和1.55;氮沉降处理抑制了土壤呼吸温度敏感性;土壤呼吸速率与土壤含水量之间相关性较弱。

关键词: 氮沉降; 土壤呼吸; Q₁₀值; 常绿阔叶林

中图分类号: S718.55

文献标识码: A

文章编号: 1001-7488(2014)01-0001-08

Responses of Soil Respiration to Simulated Nitrogen Deposition in an Evergreen Broad-Leaved Forest in Jinyun Mountain

Sun Suqi¹ Wang Yujie¹ Wang Yunqi¹ Zhang Huilan¹ Li Yunxia² Yu Lei¹ Hu Bo¹ Liu Jie¹

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Combating Desertification of Ministry of Education

College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University Beijing 100083;

2. Jianghe Consulting Center for Water Resources and Hydropower Beijing 100120)

Abstract: The responses of soil respiration to simulated nitrogen deposition were investigated through in-suit spray with four rising nitrogen concentration levels: control (CK, 0 kgN · hm⁻²a⁻¹), low nitrogen (T₅₀, 50 kgN · hm⁻²a⁻¹), medium nitrogen (T₁₀₀, 100 kgN · hm⁻²a⁻¹) and high nitrogen (T₁₅₀, 150 kgN · hm⁻²a⁻¹). This study was conducted in an evergreen broad-leaved forest in Jinyun mountain, Chongqing City. Results showed that the CK, T₅₀, T₁₀₀ and soil respiration rates were (4.31 ± 1.14), (3.42 ± 0.74), (2.81 ± 0.38) and (2.49 ± 0.32) μmol · m⁻²s⁻¹, respectively, indicating that nitrogen deposition treatments significantly reduced soil respiration rates (P < 0.05). The relationships between soil respiration rates under different nitrogen treatments and soil temperature, and water contents at depths of 5 and 10 cm were analyzed. A remarkable positive correlation was found between soil respiration rates and soil temperature (P < 0.01). The temperature sensitivity coefficients (Q₁₀ value) at 5 cm depth were 2.07 (CK), 1.81 (T₅₀), 1.62 (T₁₀₀) and 1.54 (T₁₅₀) respectively, and at 10 cm depth were 2.11 (CK), 1.83 (T₅₀), 2.163 (T₁₀₀) and 1.55 (T₁₅₀) respectively, which demonstrated that the sensitivity of soil respiration to soil temperature was restrained by nitrogen deposition. However, there was no obvious correlation between soil respiration rate and soil moisture.

Key words: nitrogen deposition; soil respiration; Q₁₀ value; evergreen broad-leaved forest

CO₂ 浓度增加导致全球气候变暖已是不争的事实,威胁着人类的生存和发展。因此,在全球气候变

化背景下,陆地生态系统碳循环与收支研究一直是国内外学者关注的热点问题之一(Takahashi *et al.*,

收稿日期: 2012-12-01; 修回日期: 2013-11-23。

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划课题“长江流域防护林体系整体优化及调控技术研究”(2011BAD38B04)。

* 王玉杰为通讯作者。

2004; 方精云等, 2007)。森林土壤碳库是陆地生态系统中重要的有机碳库, 约占全球土壤碳库的 73% (Post *et al.*, 1982)。土壤呼吸是森林碳循环的主要途径之一 (Caprez *et al.*, 2012; 杨玉盛等, 2004), 在全球尺度, 森林土壤呼吸释放的 CO_2 量为 $77 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ (Raich *et al.*, 1995) ($1 \text{ Pg} = 10^9 \text{ t}$), 仅次于全球总初级生产力 ($100 \sim 120 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$), 大于全球陆地生态系统的净初级生产力 ($50 \sim 60 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$) (Sievering, 1999)。因此, 森林土壤呼吸在全球碳循环中起着极其重要的作用。氮素作为森林生态系统的养分限制因子, 可以直接或间接影响土壤呼吸。近几十年来, 由于矿物燃料燃烧、含氮化肥大量使用及畜牧业迅猛发展等人类活动向大气中排放的含氮化合物越来越多, 使得大气氮沉降量不断增加, 而且在未来几十年将继续增加 (Lu *et al.*, 2012)。因此, 在全球变化背景下研究氮沉降增加对森林土壤呼吸的影响具有重大意义。

近几年的研究表明, 氮沉降对森林生态系统土壤呼吸的影响主要表现为促进 (Mo *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2013)、抑制 (李仁洪等, 2010) 或无影响 (Samuelson *et al.*, 2009) 3 种作用。Niles 等 (2012) 研究表明, 低氮处理提高了寒带森林的土壤呼吸速率; 莫江明等 (2005) 在鼎湖山对季风常绿阔叶林进行的模拟氮沉降试验也发现, 施氮处理提高了土壤 CO_2 的排放量。然而, Bowden 等 (2004) 在 Harvard 试验林进行的长期施氮试验发现, 施氮处理能够降低土壤呼吸速率, 这与 Janssens 等 (2010) 的研究结果一致。还有学者研究发现氮沉降对森林土壤呼吸无影响, 如 Niles 等 (2012) 对寒带森林进行的模拟氮沉降试验发现, 高氮处理并没有明显改变林地的土壤呼吸速率。可见, 氮沉降增加对各种森林生态系统土壤呼吸的影响存在很大的不确定性。目前国内关于氮沉降增加对森林生态系统土壤呼吸的影响只有少量报道 (Mo *et al.*, 2008; 李仁洪等, 2010), 其所研究的森林类型主要为受人类活动影响较大的温带和亚热带森林 (温都如娜等, 2012), 而且多集中在北亚热带 (胡正华等, 2010) 和南亚热带 (邓琦等, 2007; 莫江明等, 2005), 而对中亚热带森林生态系统的研究较少。

重庆市缙云山自然保护区周边地区的产业结构特征为工农业结合, 以工业为主。近年来, 工业

生产迅速发展, 机动车辆急剧增多, 导致大气中硝态氮含量持续增高; 同时农业生产也不断发展, 当地农民为了提高农业产量, 大量施加氮肥, 使得大气中铵态氮含量相应增多, 最终导致大气氮沉降量升高。袁玲等 (2009) 测得重庆远郊区、近郊区和林区的氮湿沉降量分别为 54.93 , 49.71 和 $40.14 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。本研究以缙云山国家级自然保护区内的常绿阔叶林为对象, 通过模拟氮沉降, 探讨中亚热带森林土壤呼吸的动态特征以及其对氮沉降增加的响应, 为进一步了解氮沉降对森林生态系统的影响和机制提供参考资料, 也为预测该区域大气氮沉降的增加对常绿阔叶林生态系统碳循环的变化提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于重庆市西北部的北碚、沙坪坝等区县境内的缙云山国家级自然保护区 ($106^\circ 17' \sim 106^\circ 24' \text{E}$, $29^\circ 41' \sim 29^\circ 52' \text{N}$)。缙云山占地面积 76 km^2 , 海拔 $350 \sim 951.5 \text{ m}$, 属典型的亚热带季风湿润性气候。年均气温 $13.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 月均最低和最高气温分别为 $3.1 \text{ }^\circ\text{C}$ (1 月) 和 $24.3 \text{ }^\circ\text{C}$ (8 月), 8 月日最高气温达 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上; 年平均相对湿度 87% ; 年均降水量 1611.8 mm , 最高年降水量 1783.8 mm , 干湿季分明, 雨季 (4—9 月) 降水量 1243.8 mm , 占全年的 77.2% , 其中 8 月份是伏旱期, 降雨量小, 蒸发量大; 年均蒸发量 777.1 mm , 月均蒸发量 64.7 mm , 7—8 月蒸发量共 255.4 mm , 占全年的 32.8% ; 土壤呈酸性 (pH 值 $4.0 \sim 4.5$), 主要为黄壤 (自然条件下) 和水稻土 (人为影响下) 2 大类, 伴有少量零星分布的紫色土。区内植物资源丰富, 植被类型较多, 森林覆盖率达 96.6% , 主要植被类型为常绿阔叶林、针阔混交林和竹林。试验地建立在常绿阔叶林内, 该林地有多种具代表性的生态系统, 在一定程度上反映了中亚热带森林生态系统的天然本底, 是一个典型的亚热带常绿阔叶林的生态综合体物种基因库。其主要优势树种有四川大头茶 (*Gordonia acuminata*)、白毛新木姜子 (*Neolitsea aurata*) 和四川山矾 (*Symplocos setchuanensis*) 等, 林分密度 $2200 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均胸径 10.22 cm , 平均树高 12.74 cm , 郁闭度 0.9 , 试验前林内凋落物平均厚度为 3.4 cm , 其干贮量为 $17.84 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。0 ~ 60 cm 土层的基本理化性质见表 1。

表 1 常绿阔叶林土壤基本理化性质 (0 ~ 60 cm)

Tab. 1 Basic physical and chemical properties of soil (0 ~ 60 cm) in the stand of evergreen broad-leaved forest

| 土层 Soil layer/ cm | 密度 Density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 最大持水量 Maximum moisture capacity (%) | 总孔隙度 Total porosity (%) | 速效氮含量 Available nitrogen content/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 全氮含量 Total nitrogen content/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 有机碳含量 Organic carbon content/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) | pH |
|-------------------------|---|--|----------------------------|---|---|--|------|
| 0 ~ 15 | 1.03 | 62.41 | 66.95 | 87.49 | 2.29 | 38.38 | 4.13 |
| 15 ~ 30 | 1.05 | 55.27 | 60.57 | 60.60 | 1.16 | 16.30 | 4.13 |
| 30 ~ 60 | 1.16 | 49.38 | 60.19 | 47.15 | 0.76 | 9.23 | 4.17 |

2 研究方法

2.1 试验设计

在氮沉降试验中,参照北美 Harvard Forest (Fenn *et al.*, 1998) 和欧洲 NITREX 项目 (Gundersen *et al.*, 1998) 以及国内类似研究的设计 (莫江明等, 2005), 并结合本地区的氮沉降情况, 在常绿阔叶林设置 12 个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 样方, 每个样方之间距离 $> 1\text{ m}$, 以防相互之间造成干扰。试验分 4 个施氮水平组进行外加氮处理 (不考虑大气氮沉降量), 分别为 CK (对照, $0\text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)、 T_{50} (低氮处理, $50\text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)、 T_{100} (中氮处理, $100\text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$) 和 T_{150} (高氮处理, $150\text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)。为消除偶然误差的影响, 每个处理组重复 3 次, 并保证浓度相对较高的样方在较低的样方下面, 避免因降雨等因素使施加的氮素从高浓度流向低浓度。试验 (施肥) 时段为 2012 年 4—9 月, 该时段植物正好处于生长阶段。自 2012 年 4 月开始, 每月月初喷施 NH_4NO_3 , 具体喷施方法为: 将每个样方每次所需要喷施的 NH_4NO_3 溶解于 1 L 水中后, 用手提式喷雾器在林地人工来回均匀喷洒, 对照样方则喷洒同样多的水。除施氮处理外, 各样方的其余处理措施均保持一致, 施肥 2 天后 (所施氮溶液完全渗入土壤后) 进行土壤呼吸速率测定。

在土壤呼吸速率的试验中, 将土壤环布设在样方的中心位置, 土壤环用规格为外径 20 cm、内径 19.5 cm、高 12 cm 的 PVC 管制成。将 PVC 土壤环直接插入土壤表面, 不扰动地表凋落物, 保持土壤环截面与竖轴垂直, 露出地面高度不等, 并保持土壤环在整个测定期间位置不变。本试验采用美国 LI-COR 公司生产的 Li-8100 开路式土壤碳通量测量系统 (LI-COR, Lincoln, NE, USA) 测定常绿阔叶林自然状态下的土壤呼吸速率 R_s (每个样方土壤呼吸速率测定设 2 个点), 在每月上、中、下旬各选择 4 日晴朗天气进行测定, 若无晴天则选择阴天, 测定时间为 8:00—18:00 (每次测定间隔 2 h), 并将每月测得的数据通过算术平均来代表该林地的月平均土壤呼吸

速率。测定土壤呼吸的同时, 用 TWS-II 型土壤温湿度记录仪分别测定土壤环附近 5 和 10 cm 深处的土壤温度以及 0 ~ 5 和 5 ~ 10 cm 深处的土壤含水量, 并用 IQ150 土壤原位 pH 计测定土壤环附近 5 和 10 cm 深处的土壤 pH 值。

2.2 数据处理

土壤呼吸速率 (R_s)、土壤温度 (T) 和土壤含水量 (W) 对土壤呼吸的影响以及土壤呼吸对温度变化响应的敏感程度 Q_{10} 值等的计算参照黄承才等 (1999) 和杨玉盛等 (2005) 的方法。采用 Microsoft Excel 2007 对数据进行处理及作图, 并利用 SPSS 18.0 软件进行 One-way ANOVA 统计分析, 然后用 LSD 多重检验法检验土壤呼吸速率在不同处理间的差异显著性。

3 结果与分析

3.1 常绿阔叶林土壤温度和土壤呼吸动态特征

由于对照样地没有进行任何模拟氮沉降处理, 故其在一定程度上反映了本研究森林生态系统内未经处理下的土壤呼吸特征。图 1, 2 表明: 在试验期内常绿阔叶林土壤呼吸速率与土壤温度均表现出先增后减的变化趋势; 土壤呼吸速率和土壤温度的最小值均出现在 4 月, 此时呼吸速率为 $(3.06 \pm 0.08)\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$, 5 和 10 cm 深处土壤温度分别为 14.8 和 14.1 $^{\circ}\text{C}$; 土壤呼吸速率最大值出现在 7 月, 其呼吸速率为 $(6.10 \pm 0.40)\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$, 土壤温度最大值则出现在 8 月, 此时 5 和 10 cm 深处的土壤温度分别为 22.7 和 22.3 $^{\circ}\text{C}$ 。4—7 月, 本试验区土壤温度不断升高, 降雨量也逐渐增多, 良好的水热条件不仅有利于植物的生长发育, 促进植物根系呼吸, 而且可以加快凋落物分解速度, 增强微生物种群数量及其活性, 进而提高土壤微生物呼吸; 8 月份正好处于伏早期, 降雨量明显减少, 土壤含水量在整个试验期处于最低值, 使得土壤微生物的代谢活性受到影响, 降低了土壤呼吸速率, 最终导致土壤呼吸速率最大值出现在 7 月而不是 8 月, 8 月正好是全年最热月, 此时土壤温度也达到最高。

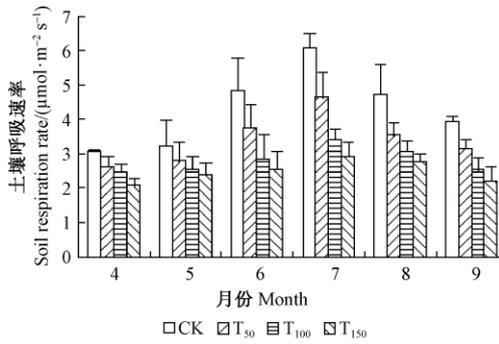


图1 不同处理土壤呼吸速率的月变化

Fig. 1 Monthly variation of soil respiration rate in different treatments

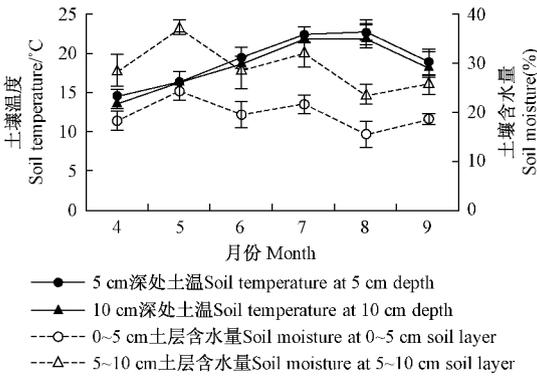


图2 土壤温度和土壤含水量的月变化趋势

Fig. 2 Monthly variation of soil temperature and soil moisture

3.2 常绿阔叶林土壤呼吸速率对模拟氮沉降的响应

由图1可知,不同处理的土壤呼吸速率具有一致的变化规律,4—7月呈上升趋势,8—9月呈下降趋势。在氮沉降处理初期(2012年4月),CK, T_{50} , T_{100} 和 T_{150} 的土壤呼吸速率分别为 (3.06 ± 0.08) , (2.64 ± 0.29) , (2.45 ± 0.26) 和 $(2.09 \pm 0.20) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,其中 T_{150} 显著低于CK ($P < 0.05$), T_{50} 和 T_{100} 也低于CK,但无显著差异;7月份(处理中期)时,CK, T_{50} , T_{100} 和 T_{150} 土壤呼吸速率分别为 (6.10 ± 0.40) , (4.65 ± 0.72) , (3.42 ± 0.31) 和 $(2.93 \pm 0.41) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, T_{50} , T_{100} 和 T_{150} 均显著

低于CK ($P < 0.01$);9月份(处理后)时,不同处理的土壤呼吸速率分别为 (3.92 ± 0.17) , (3.12 ± 0.28) , (2.53 ± 0.37) 和 $(2.21 \pm 0.41) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, T_{50} , T_{100} 和 T_{150} 均显著低于CK ($P < 0.01$)。从整体来看,不同处理的土壤呼吸速率表现为 $\text{CK} > T_{50} > T_{100} > T_{150}$,氮沉降初期对常绿阔叶林土壤呼吸的降低作用不明显,随着处理时间的延长其影响程度有明显增强趋势,待达到最高值之后,其影响程度又开始减弱。

整个试验期间,不同氮沉降处理的平均土壤呼吸速率如图3所示:CK为 $(4.31 \pm 1.14) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, T_{50} 为 $(3.42 \pm 0.74) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, T_{100} 为 $(2.81 \pm 0.38) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, T_{150} 为 $(2.49 \pm 0.32) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与CK相比, T_{50} , T_{100} 和 T_{150} 处理分别使土壤呼吸速率降低了20.88%,34.80%和42.23%,其影响(降低作用)表现为 $T_{150} > T_{100} > T_{50}$,与CK处理进行方差分析表明, T_{50} , T_{100} 和 T_{150} 处理与CK均达到了显著差异 ($P < 0.05$),这说明 T_{50} , T_{100} 和 T_{150} 处理显著降低了常绿阔叶林土壤呼吸速率。这可能是施氮处理导致土壤溶液浓度过高,渗透压变大而抑制微生物的生长;而且通过对样地土壤pH值的测定显示,氮沉降会增加土壤酸度,降低土壤pH值(表2),进而影响土壤微生物的活动强度,最终造成土壤呼吸速率降低。

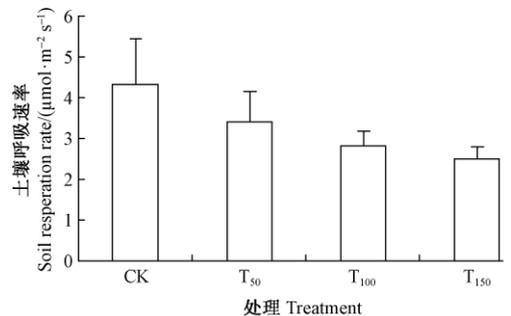


图3 不同处理的平均土壤呼吸速率

Fig. 3 Average soil respiration rate in different treatments

表2 土壤5和10 cm深处pH值的月变化

Tab. 2 Monthly variation of soil pH value at 5 and 10 cm depth

| 月份 Month | 5 cm 深处土壤 pH 值 Soil pH value at 5 cm depth | | | | 10 cm 深处土壤 pH 值 Soil pH value at 10 cm depth | | | |
|-------------------------|--|-------------|-------------|-------------|--|-------------|-------------|-------------|
| | CK | T_{50} | T_{100} | T_{150} | CK | T_{50} | T_{100} | T_{150} |
| 模拟前 Before simulated | 4.15 ± 0.02 | 4.16 ± 0.01 | 4.15 ± 0.01 | 4.13 ± 0.03 | 4.14 ± 0.04 | 4.16 ± 0.02 | 4.16 ± 0.01 | 4.15 ± 0.05 |
| 4 | 4.10 ± 0.04 | 3.99 ± 0.11 | 3.88 ± 0.19 | 3.79 ± 0.22 | 4.13 ± 0.02 | 4.08 ± 0.05 | 4.00 ± 0.10 | 3.90 ± 0.12 |
| 5 | 4.17 ± 0.07 | 4.03 ± 0.16 | 3.94 ± 0.13 | 3.75 ± 0.27 | 4.20 ± 0.01 | 4.13 ± 0.08 | 3.91 ± 0.12 | 3.82 ± 0.09 |
| 6 | 4.07 ± 0.12 | 3.96 ± 0.17 | 3.85 ± 0.26 | 3.72 ± 0.18 | 4.12 ± 0.07 | 3.92 ± 0.19 | 3.85 ± 0.12 | 3.76 ± 0.17 |
| 7 | 3.97 ± 0.05 | 3.89 ± 0.18 | 3.78 ± 0.13 | 3.66 ± 0.08 | 4.07 ± 0.11 | 3.95 ± 0.14 | 3.78 ± 0.18 | 3.66 ± 0.24 |
| 8 | 4.11 ± 0.06 | 3.88 ± 0.15 | 3.81 ± 0.14 | 3.70 ± 0.29 | 3.97 ± 0.22 | 3.83 ± 0.17 | 3.70 ± 0.17 | 3.62 ± 0.20 |
| 9 | 4.08 ± 0.09 | 3.86 ± 0.19 | 3.79 ± 0.17 | 3.68 ± 0.24 | 4.16 ± 0.04 | 3.90 ± 0.15 | 3.88 ± 0.08 | 3.71 ± 0.10 |

3.3 不同氮处理常绿阔叶林土壤呼吸速率与温度的关系

土壤呼吸速率 R_s 与土壤温度 T 之间的关系常用指数模型 $R_s = ae^{bT}$ 来表示 (Fang *et al.*, 2001) (a, b 为待定参数, a 为温度为 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时的土壤呼吸速率, b 为温度反应系数), 而且多数研究者经常采用 Q_{10} 值来表征土壤呼吸过程对土壤温度的敏感性 (唐燕飞, 2006; Craine *et al.*, 2013), Q_{10} 值是温度每增加 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 土壤呼吸速率变为初始值的倍数, 其计算公式为 $Q_{10} = e^{10b}$ 。经过 6 个月的试验, 将不同处理的土壤呼吸速率与土壤温度进行回归分析, 结果 (图 4, 5) 表明, 不同处理的土壤呼吸速率与 5 和 10 cm 深处土壤温度之间均存在极显著指数正相关关系 ($P < 0.01$), 与 5 cm 深处土壤温度间的相关程度更高: CK, T_{50} , T_{100} 和 T_{150} 与 5 cm 深处土壤温度之间拟合方程的决定系数 R^2 分别为 0.548, 0.527, 0.546 和 0.530, Q_{10} 值分别为 2.07, 1.81, 1.62 和 1.54; CK, T_{50} , T_{100} 和 T_{150} 与 10 cm 深处土壤温度之间拟合方程的决定系数 R^2 分别为 0.544, 0.522, 0.527 和 0.522, 且 Q_{10} 值分别为 2.11, 1.83, 1.63 和 1.55。由此可见, 氮沉降

处理会降低土壤呼吸的温度敏感性, 但是不同的处理水平对温度敏感性无显著性差异 ($P > 0.05$)。

3.4 不同氮处理常绿阔叶林土壤呼吸速率与土壤含水量的关系

整个试验期测得的不同处理的土壤呼吸速率与 0~5 和 5~10 cm 土层土壤含水量之间的关系用二次曲线拟合最好 (表 3), 其决定系数 R^2 分别为 0.039~0.088 和 0.008~0.099, 明显低于土壤呼吸速率与土壤温度关系方程的 R^2 值, 这表明土壤呼吸速率与土壤含水量之间的相关性较弱, 中氮和高氮处理能够略微提高二者之间的相关性, 但是其影响 (提高作用) 并不明显, 低氮处理反而降低了二者之间的相关性。其主要原因可能是缙云山地区属于亚热带季风湿润性气候特征, 降水比较丰富, 即使在 8 月份伏旱期, 土壤含水量仍很高 (图 1), 而且林分郁闭度大, 林地蓄水持水能力较强, 从整个试验期来看缙云山地区土壤含水量保持在相对较高的状态, 导致水分不是限制土壤呼吸的关键因子 (冯华敏, 2012), 土壤含水量对土壤呼吸的影响远小于土壤温度对土壤呼吸的影响。

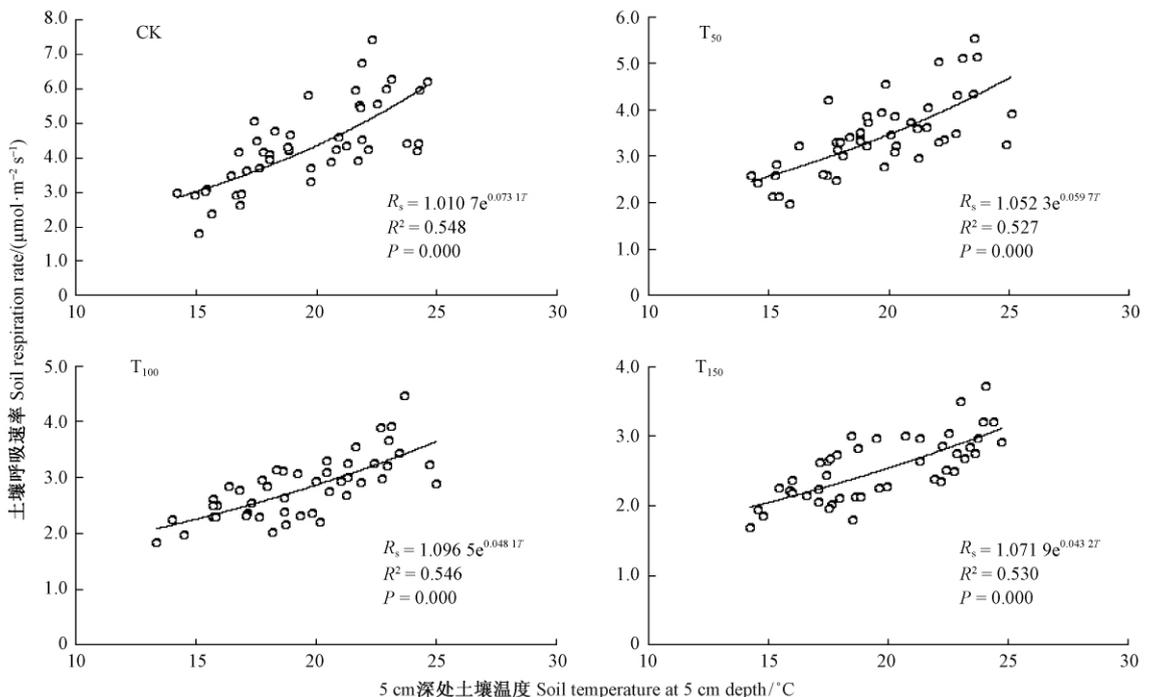


图 4 土壤呼吸速率与 5 cm 深处土壤温度的关系

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

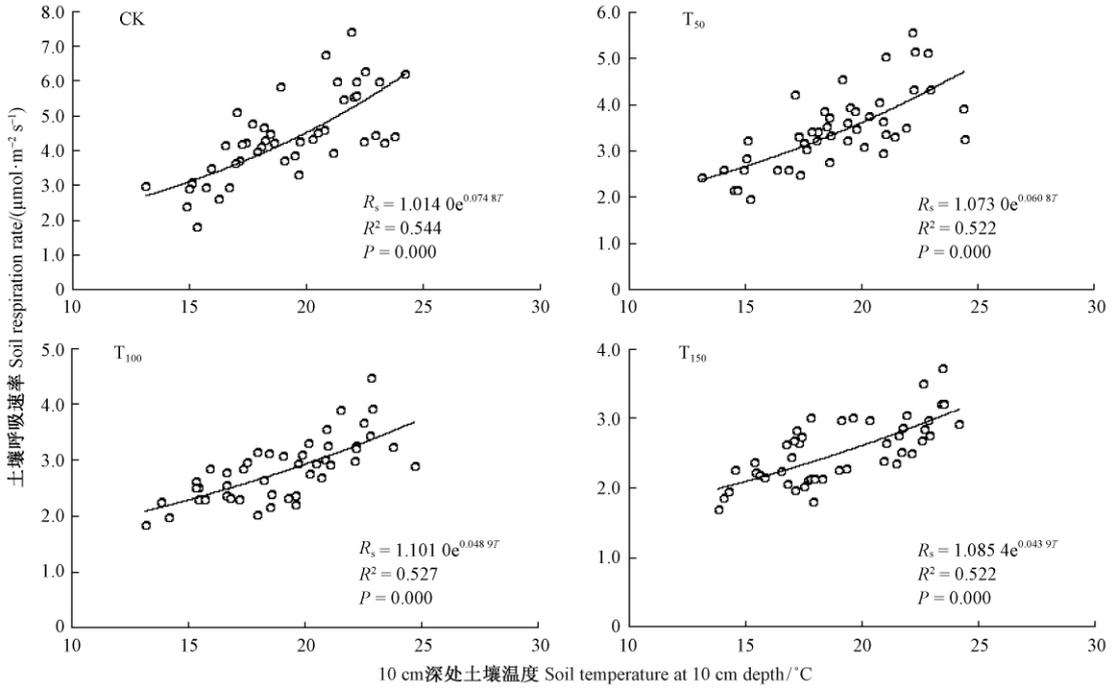


图5 土壤呼吸速率与 10 cm 深处土壤温度的关系

Fig. 5 Relationship between soil respiration rate and soil temperature at 10 cm depth

表3 土壤呼吸速率与 0~5 和 5~10 cm 土层土壤含水量的关系方程

Tab. 3 Correlation equations between soil respiration rate and soil moisture at 0~5 and 5~10 cm depth

| 处理水平 Treatment level | 0~5 cm 土层土壤含水量 Soil moisture at 0-5 cm soil layer | | | | 5~10 cm 土层土壤含水量 Soil moisture at 5-10 cm soil layer | | | |
|-------------------------|--|-------|-------|--|--|-------|-------|--|
| | 关系方程 Relational equation | R^2 | P | | 关系方程 Relational equation | R^2 | P | |
| CK | $R_s = -0.015 1W^2 + 0.583 3W - 1.017 6$ | 0.046 | 0.368 | | $R_s = -0.012 4W^2 + 0.722 8W - 5.711 4$ | 0.095 | 0.117 | |
| T_{50} | $R_s = 0.006 5W^2 - 0.209 1W + 4.997 6$ | 0.039 | 0.429 | | $R_s = -0.006 0W^2 + 0.419 2W - 3.902 0$ | 0.008 | 0.168 | |
| T_{100} | $R_s = 0.000 1W^2 + 0.017 3W + 2.246 3$ | 0.059 | 0.273 | | $R_s = 0.002 0W^2 - 0.094 4W + 3.803 9$ | 0.099 | 0.105 | |
| T_{150} | $R_s = -0.009 9W^2 - 0.005 6W + 2.284 8$ | 0.088 | 0.141 | | $R_s = -0.000 1W^2 + 0.030 1W + 1.635 9$ | 0.095 | 0.116 | |

4 结论与讨论

本研究在试验期内土壤呼吸速率与 5 和 10 cm 深处土壤温度之间均存在极显著指数正相关关系 ($P < 0.01$), 表明温度是影响常绿阔叶林土壤呼吸速率的主导因子, 这与国内外多数研究结果 (Takahashi *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2013; 雒守华等, 2010; 张徐源等, 2012) 一致。这可能是由于土壤温度的变化对植物根系活性和土壤微生物代谢活动产生了影响, 从而使得土壤呼吸发生变化。在一定范围内, 随着温度的升高, 土壤微生物活性增强, 土壤呼吸速率也会随之增大。

在研究期内, 自然状态下土壤 5 和 10 cm 深处的土壤呼吸温度敏感性系数 Q_{10} 值分别为 2.07 和 2.11, 高于全球森林植被的土壤呼吸速率 Q_{10} 平均值 1.57 (刘绍辉等, 1997) 和南亚热带鼎湖山季风常绿阔叶林 Q_{10} 值 1.73 (邓琦等, 2007), 低于北亚热带落叶阔叶林 Q_{10} 值 2.53 (胡正华等, 2010) 和我国森

林 Q_{10} 的平均值 2.65 (陈光水等, 2008), 也低于世界森林 Q_{10} 的中值 2.4 (Raich *et al.*, 1992)。其原因可能是由于不同地区的降雨量不同, 而且土壤理化特性存在较大差异, 使得土壤呼吸对温度敏感性的响应不同。但是施氮处理的 Q_{10} 值明显低于对照组的 Q_{10} 值, 表明氮沉降处理降低了土壤呼吸的温度敏感性, 这很可能与氮沉降抑制了植物根系呼吸和土壤微生物活性有关。

本研究中, 土壤呼吸速率与土壤含水量之间的相关性较弱, 而且氮沉降处理也没有明显改变这种关系。这可能是由于缙云山降水比较丰富, 整个研究期的土壤含水量保持相对较高状态, 不会限制土壤动物、微生物和树木根系等的活动, 使得水分对土壤呼吸速率的影响较小。

大气氮沉降可以改变土壤的 C/N、影响微生物活性、提高土壤氮矿化速率, 从而影响土壤中 CO_2 的释放, 如 Gundersen 等 (1998) 的研究表明, 氮沉降能够通过改变土壤 C/N 来引起微生物变化进而改

变土壤呼吸速率; Berg (2000) 则发现氮沉降能通过影响凋落物的分解来影响微生物呼吸; 也有研究表明氮沉降是通过改变植物细根生物量影响细根呼吸导致土壤呼吸的变化 (Majdi, 2001)。但是氮沉降对森林土壤呼吸的影响并不确定, 目前关于氮沉降对森林土壤呼吸的影响作用主要有 3 种: 促进、抑制或无影响。本研究结果表明, 氮沉降抑制了森林的土壤呼吸, 而且不同氮沉降处理的土壤呼吸速率表现为 $T_{50} > T_{100} > T_{150}$ 。这与国内外的一些研究结果 (Bowden *et al.*, 2004; Janssens *et al.*, 2010; Rousk *et al.*, 2011; 胡正华等, 2010; 雒守华等, 2010) 相似, 而与莫江明等 (2005) 的研究结果相反, 其研究发现, 氮沉降显著促进了南亚热带常绿阔叶林土壤呼吸。

外加氮处理降低土壤呼吸速率的原因可能是: 第一, 氮沉降会使土壤硝化作用增强, 导致土壤 pH 值降低, 加速森林土壤酸化 (肖辉林, 2001), 从而抑制植物根系呼吸; 第二, 氮沉降会减少微生物数量以及微生物群落的多样性 (Carfrae *et al.*, 2006), 并且会抑制其活性, 进而抑制了土壤微生物的呼吸; 第三, 氮沉降会增加土壤中铵态氮和硝态氮的含量, 进而抑制了有机质分解有关酶的数量及活性, 从而阻碍凋落物的分解及养分的释放 (Compton *et al.*, 2004), 使得土壤呼吸受到抑制。本研究模拟氮沉降对常绿阔叶林土壤呼吸产生了抑制作用, 其可能原因有: 1) 氮沉降的增加增强了土壤酸度, 经过对样地土壤 pH 值的测定显示, 随着外加氮的增加土壤 pH 值呈下降趋势 (表 2), 这可能降低植物根系生长和根系生物量进而使土壤呼吸速率受到抑制 (Persson *et al.*, 1998); 2) 持续进行外加氮处理可能导致土壤达到氮饱和状态, 对土壤动物和微生物的活性和数量产生负效应, 从而对土壤呼吸产生抑制作用 (雒守华, 2010)。

总之, 氮沉降对森林土壤呼吸速率的影响存在很大的不确定性, 不同区域、不同森林类型、不同氮沉降处理水平以及研究时间长短等都会对森林土壤呼吸速率产生不同的影响。本试验只是在较短时间内研究了氮沉降对缙云山中亚热带常绿阔叶林土壤呼吸的影响, 对于长期效应的探索还需要开展进一步研究, 以深入了解该地区森林生态系统土壤呼吸速率对氮沉降的响应机制。

参 考 文 献

陈光水, 杨玉盛, 吕萍萍, 等. 2008. 中国森林土壤呼吸模式. 生态学报, 28 (4): 1748 - 1761.

- 邓 琦, 刘世忠, 刘菊秀, 等. 2007. 南亚热带森林凋落物对土壤呼吸的贡献及其影响因素. 地球科学进展, 22 (9): 976 - 986.
- 方精云, 郭兆迪. 2007. 寻找失去的陆地碳汇. 自然杂志, 29 (1): 1 - 6.
- 冯华敏. 2012. 重庆市缙云山 4 种典型林分的土壤呼吸特征研究. 北京: 北京林业大学硕士学位论文.
- 胡正华, 李涵茂, 杨燕萍, 等. 2010. 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, 31 (8): 1726 - 1732.
- 黄承才, 葛 滢, 常 杰, 等. 1999. 中亚热带东部三种主要木本群落土壤呼吸的研究. 生态学报, 19 (3): 324 - 328.
- 李仁洪, 涂利华, 胡庭兴, 等. 2010. 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, 21 (7): 1649 - 1655.
- 刘绍辉, 方精云. 1997. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响. 生态学报, 17 (5): 469 - 476.
- 雒守华, 胡庭兴, 张 健, 等. 2010. 华西雨屏区光皮桦林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应. 农业环境科学学报, 29 (9): 1834 - 1839.
- 雒守华. 2010. 模拟氮沉降对华西雨屏区光皮桦林凋落物分解、土壤酶活性和土壤呼吸的影响. 四川: 四川农业大学硕士学位论文.
- 莫江明, 方运霆, 徐国良, 等. 2005. 鼎湖山苗圃和主要森林土壤 CO_2 排放和 CH_4 吸收对模拟 N 沉降的短期响应. 生态学报, 25 (4): 682 - 690.
- 唐燕飞. 2006. 下蜀次生栎林和人工火炬松林土壤呼吸动态变化研究. 南京: 南京林业大学硕士学位论文.
- 温都如娜, 方华军, 于贵瑞, 等. 2012. 模拟氮沉降对寒温带针叶林土壤 CO_2 排放的初期影响. 生态学报, 32 (7): 2185 - 2195.
- 肖辉林. 2001. 大气氮沉降对森林土壤酸化的影响. 林业科学, 37 (4): 111 - 116.
- 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 等. 2005. 中国亚热带森林转换对土壤呼吸动态及通量的影响. 生态学报, 25 (7): 1684 - 1690.
- 杨玉盛, 董 彬, 谢锦升, 等. 2004. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应. 生态学报, 24 (3): 583 - 591.
- 袁 玲, 周鑫斌, 辜夕容, 等. 2009. 重庆典型地区大气湿沉降氮的时空变化. 生态学报, 29 (11): 6095 - 6101.
- 张徐源, 闫文德, 马秀红, 等. 2012. 模拟氮沉降对樟树人工林土壤呼吸的短期效应. 中南林业科技大学学报, 32 (3): 109 - 113.
- Berg B. 2000. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soil. *Forest Ecology and Management*, 133 (1): 13 - 22.
- Bowden R D, Davidson E, Savage K, *et al.* 2004. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest. *Forest Ecology and Management*, 196 (1): 43 - 56.
- Caprez R, Niklaus P A, Körner C. 2012. Forest soil respiration reflects plant productivity across a temperature gradient in the Alps. *Oecologia*, 170 (4): 1143 - 1154.
- Carfrae J A, Skene K R, Sheppard L J, *et al.* 2006. Effects of nitrogen with and without acidified sulphur on an ectomycorrhizal community in a Sitka spruce (*Picea sitchensis* Bong. Carr) forest. *Environmental Pollution*, 141 (1): 131 - 138.
- Chen W W, Zheng X H, Chen Q, *et al.* 2013. Effects of increasing precipitation and nitrogen deposition on CH_4 and N_2O fluxes and ecosystem respiration in a degraded steppe in Inner Mongolia, China. *Geoderma*, 192 (24): 335 - 340.
- Compton J E, Watrud L S, Porteous L A, *et al.* 2004. Response of soil

- microbial biomass and community composition to chronic nitrogen additions at Harvard forest. *Forest Ecology and Management*, 196 (1) : 143 – 158.
- Craine J M, Fierer N, McLaughlan K K, *et al.* 2013. Reduction of the temperature sensitivity of soil organic matter decomposition with sustained temperature increase. *Biogeochemistry*, 113 (1/3) : 359 – 368.
- Fang C, Moncrief J B. 2001. The dependence of soil CO₂ flux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 33 (2) : 155 – 165.
- Fenn M A, Poth M A, Aber J D, *et al.* 1998. Nitrogen excess in North American ecosystems: predisposing factors, ecosystem responses, and management strategies. *Ecological Applications*, 8 (3) : 706 – 733.
- Gundersen P, Emmett B A, Kjonaas O J, *et al.* 1998. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forest: a synthesis of NITREX data. *Forest Ecology and Management*, 101 (1/3) : 37 – 55.
- Janssens I A, Dieleman W, Luyssaert S, *et al.* 2010. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition. *Nature Geoscience*, 3 (5) : 315 – 322.
- Lu C Q, Tian H Q, Liu M L, *et al.* 2012. Effect of nitrogen deposition on China's terrestrial carbon uptake in the context of multifactor environmental changes. *Ecological Application*, 22 (1) : 53 – 75.
- Majdi H. 2001. Changes in fine root production and longevity in relation to water and nutrient availability in a Norway spruce stand in northern Sweden. *Tree Physiology*, 21 (14) : 1057 – 1061.
- Mo J M, Zhang W, Zhu W X, *et al.* 2008. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China. *Global Change Biology*, 14 (2) : 403 – 412.
- Niles J H, Daniel B M, Peter H. 2012. Contrasting effects of low and high nitrogen additions on soil CO₂ flux components and ectomycorrhizal fungal sporocarp production in a boreal forest. *Global Change Biology*, 18 (12) : 3596 – 3605.
- Persson H, Ahlstr K, Clemensson-Lindell A. 1998. Nitrogen addition and removal at Gårdsjön-effects on fine-root growth and fine-root chemistry. *Forest Ecology and Management*, 101 (1/3) : 199 – 205.
- Post W M, Emanuel W R. 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 298 (7) : 156 – 159.
- Raich J W, Potter C S. 1995. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 9 (1) : 23 – 36.
- Raich J W, Schlesinger W H. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 44 (2) : 81 – 99.
- Rousk J, Brookes P C, Bååth E. 2011. Fungal and bacterial growth responses to N fertilization and pH in the 150-year 'Park Grass' UK grassland experiment. *FEMS Microbiology Ecology*, 76 (1) : 89 – 99.
- Samuelson L, Mathew R, Stokes T, *et al.* 2009. Soil and microbial respiration in a loblolly pine plantation in response to seven years of irrigation and fertilization. *Forest Ecology and Management*, 258 (11) : 2431 – 2438.
- Sievering H. 1999. Nitrogen deposition and carbon sequestration. *Nature*, 400 (6745) : 629 – 630.
- Takahashi A, Hiyama T, Takahashi H A, *et al.* 2004. Analytical estimation of the vertical distribution of CO₂ production within soil: application to a Japanese temperate forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126 (3) : 223 – 235.

(责任编辑 于静娴)