

模拟氮沉降对云冷杉红松林土壤呼吸的影响

刘博奇¹, 牟长城¹, 邢亚娟², 王庆贵^{2*}

(1. 东北林业大学生态研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150026; 2. 黑龙江大学农业资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:2011年5月至2011年10月在黑龙江省小兴安岭云冷杉红松林内进行模拟氮沉降试验,使用便携式土壤CO₂通量观测仪LI-8100测定不同氮沉降浓度CK(0)、T_L(50 kg·hm⁻²·a⁻¹)、T_M(100 kg·hm⁻²·a⁻¹)和T_H(150 kg·hm⁻²·a⁻¹)对土壤呼吸的影响。结果表明,氮沉降未显著改变土壤呼吸的日变化和季节性变化规律;对比CK、T_L、T_M和T_H处理,分别使土壤日呼吸速率提高了13.72%、23.22%和5.12%,年呼吸速率提高了13.98%、18.26%和1.12%;土壤呼吸与温度呈极显著的指数相关($P < 0.001$),与土壤湿度无显著相关;CK、T_L、T_M和T_H处理下,土壤呼吸温度敏感系数Q₁₀分别为4.77、5.71、6.62和5.49,氮沉降处理提高了小兴安岭云冷杉红松林的土壤呼吸速率和温度敏感性。

关键词:氮沉降;土壤呼吸;Q₁₀值;云冷杉红松林

中图分类号:S714

文献标识码:A

Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration in Spruce-fir-Korean Pine Forest of Xiaoxing'anling Mountains in China

LIU Bo-qi¹, MU Chang-cheng¹, XING Ya-juan², WANG Qing-gui²

(1. Ecological Research Centre, Northeast Forestry University, Harbin 150026, Heilongjiang, China;

2. College of Agricultural Resource and Environment, Heilongjiang University, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to investigate the effects of simulated nitrogen deposition on soil respiration in spruce-fir-Korean pine forests, a simulated nitrogen deposition experiment was conducted in Xiaoxing'anling Mountains area in Heilongjiang Province from May to October, 2011. The experiment included the Control (0, CK), low-N (50 kg·hm⁻²·a⁻¹, T_L), medial-N (100 kg·hm⁻²·a⁻¹, T_M) and high-N (150 kg·hm⁻²·a⁻¹, T_H) treatment level. The results showed that the nitrogen deposition did not change the daily and seasonal variation patterns of soil respiration. Compared to Control, the T_L, T_M, and T_H treatments increased the soil daily average respiration rates by 13.72%, 23.22% and 5.12%, and 13.98%, 18.26% and 1.12% for soil annual average respiration rates. Significant exponential relationship was found between soil respiration rate and soil temperature, but no significant relationship was found between the soil moisture and soil respiration rates. The Q₁₀ (the respiratory flux at one temperature over the flux at a temperature 10 °C lower) were 4.77, 5.71, 6.62 and 5.49 for soil respiration of the CK, T_L, T_M, and T_H treatments respectively. The findings suggested that nitrogen deposition could promote soil respiration, and increase soil respiration temperature sensitivity in spruce-fir-Korean pine forests.

Key words: nitrogen deposition; soil respiration; Q₁₀ value; spruce-fir-Korean pine forest

收稿日期:2012-04-20

基金项目:国家自然科学基金:气候变化背景下小兴安岭老龄阔叶红松林土壤碳汇变化机理(31070409)、国家自然科学基金:气候变化背景下黑龙江东部山区谷地云冷杉林的衰退机理(30970487)、国家自然科学基金:小兴安岭阔叶红松林生态系统对N沉降增加的响应(31170421)

作者简介:刘博奇,硕士研究生。主要研究方向:全球气候变化与生态系统响应。E-mail:liuboqi@live.cn

* 责任作者:王庆贵,博士,教授。主要研究方向:全球气候变化与生态系统响应。E-mail:qgwang1970@163.com

由温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等)排放增加而引起的全球气候变化引起了人们广泛的关注。根据2007年IPCC的报告,大气中的 CO_2 浓度已从工业革命开始前的 $285 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至 $379 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$,由此引起的上世纪的全球平均气温增加值为 $0.74 \text{ }^\circ\text{C}$ ($0.56 \sim 0.92 \text{ }^\circ\text{C}$)^[1-2]。其中全球土壤中的碳排放量可达 $6.8 \times 10^{13} \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[3],而全球的化石燃料燃烧的碳排放量约为 $5.2 \times 10^{12} \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$,全球土壤的碳排放量是化石燃料碳排放量的10多倍^[4]。森林土壤碳库约占全球土壤碳库的73%^[5],因此森林土壤的碳排放在全球碳循环中起着至关重要的作用,土壤呼吸是森林土壤碳库的输出途径和碳排放源,其相关研究越来越受到关注。

碳排放的同时,氮沉降增加问题也表现出严重的全球化趋势。在工业化开始较早的欧洲和北美地区,氮沉降量的不断增加改变了生态系统的氮循环,如在美国东北部地区,当前氮沉降水平比本底值增加了10~20倍,大大超过了森林的年需要量^[6-7]。上世纪80年代中期,欧美等地开始了一系列氮沉降长期定位研究,欧洲的NITRIX(Nitrogen Saturation Experiments)项目共涉及到7个国家的10个试验项目^[8-9],北美也于十多年前开展了Harvard Forest氮沉降模拟试验^[10]。随着经济的不断发展,我国也开始出现高氮沉降问题,如在广东省鼎湖山保护区的降水(1989—1999年)内的氮沉降量由 $35.57 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,变为 $38.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[11-12]。我国的活性氮排放量从1961年的 $1.4 \times 10^{10} \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 升至2000年的 $6.8 \times 10^{10} \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$,继欧美之后,我国成为世界第三大氮沉降区^[13-14]。国内外的生态学家相继展开了一系列氮沉降对土壤呼吸影响的研究^[8-10,15-16],我国在该领域的研究相对较晚,且研究地点主要集中在南方地区^[17-19]。阔叶红松林是我国北方地区的典型地带性群落,截至目前,针对氮沉降对其土壤呼吸影响的相关研究甚少。本研究通过模拟氮沉降试验,分析了小兴安岭典型地带性群落云冷杉红松林生态系统的土壤碳排放动态机制,为了解氮沉降增加背景下北方森林的碳循环规律提供依据。

1 研究方法

1.1 试验样地概况

试验样地位于黑龙江省伊春市五营区丰林国家级自然保护区($128^\circ 58' \sim 129^\circ 15' \text{E}$, $48^\circ 02' \sim 48^\circ$

$12' \text{N}$),属黑龙江省东北部小兴安岭南坡北段,地处北半球气候变化敏感区域。该区为坡状的低山丘陵地段和宽广谷地,坡度 $10^\circ \sim 25^\circ$,年均温 $-0.5 \text{ }^\circ\text{C}$,无霜期120 d左右,多年平均降水量为650 mm(1961—2003年),区内水系成树枝状。地带性植被为温带针阔叶混交林,属中国东北区长白植物区系小兴安岭亚区。地带性土壤类型为暗棕壤,土壤pH值为5.6,有机质含量为 $(407.501 \pm 66.512) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效氮含量为 $(354.561 \pm 52.124) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有岛状永冻层分布。云冷杉红松林是小兴安岭的典型地带性群落,平均林龄大于200年,群落郁闭度90%,林冠层主要树种有红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)、臭冷杉(*Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim.)、红皮云杉(*Picea koraiensis* Nakai)、鱼鳞云杉(*P. jezoensis* Carr.)、落叶松(*Larix gmelini* (Rupr.) Rupr.),伴生树种主要有白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、色木槭(*Acer mono* Maxim.)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica* Rupr.)、枫桦(*Betula costata* Trautv.)等,林冠层下主要有黄花忍冬(*Lonicera chrysantha* Turcz.)、毛榛(*Corylus mandshurica* Maxim.)、花楷槭(*Acer ukurunduense* Trautv. et Mey.)、青楷槭(*Acer tegmentosum* Maxim.)、春榆(*Ulmus japonica* (Rehd.) Sarg.)等。草本层主要有为四花苔草(*Carex quadriflora* (Kukenth) Ohwi)、粗茎鳞毛蕨(*Dryopteris crassirhizoma* Nakai)、猴腿蹄盖蕨(*Athyrium multidentatum* (Doell.) Ching)、兴安鹿药(*Smilacina dahurica* Turcz. ex Mey.)等。

1.2 试验方法

试验样地选在低山东坡,平均坡度小于3度,在统一海拔高度范围内(319~234 m)共设置12个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的试验样地,每两个样地间缓冲带宽为10 m。样地四周用PVC板镶嵌至土壤矿质层,不同施N量的样方处在相同坡位,以避免地表径流或壤中流造成样地间的氮连通。参照欧洲NITREX项目^[8-9]和北美Harvard Forest^[10]以及我国广东省鼎湖山^[20]等地类似研究的试验设计,共设4个梯度3个重复的施氮处理,即对照(CK)、低氮(T_L)、中氮(T_M)和高氮(T_H),分别按0、50、100和 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 进行外加氮(NH_4NO_3)处理(不包含大气氮沉降量)。根据氮处理水平,于2011年5月起,在植物生长季内(5—10月)的每个月的月初将各样方所施的 NH_4NO_3 溶解于32 L纯净水中(即年均降水量相当于新增降水量0.48 mm)后,以背式喷雾器人

工均匀喷洒在林地上。对照处理则喷洒等量水分,以避免林地水分差异。

在 20 m × 20 m 样地中部的 15 m × 15 m 设置 3 个土壤呼吸底座 (Soil Collar), 每个 Collar (直径 20 cm, 高度 12 cm) 距最近树干 1.5 m 左右, 深入土壤至露出地面 2 cm, 保留其中的枯枝落叶自然状态, 但需定期去除 Collar 内的生长植物, 安装完毕稳定 24 h 以上开始测定。

1.3 土壤呼吸、温度、湿度测定

生长季内 (5—10 月) 的月初与中旬每两周测定一次土壤呼吸, 测定时间为每天的 8:00—11:00 或 14:00—18:00, 2011 年 7 月 17 日 08:00—18:00 之间每 2 h 测定一次土壤呼吸, 观测土壤呼吸的夏季日进程。由于实验区在 11 月初至次年 5 月阶段封山, 土壤冻结, 故试验时间定为 5 月至 10 月。测定土壤碳通量的同时, 在 Collar 附近选取 3 个位置, 用 LI 8100 自带的 TDR 土壤水分速测仪和土壤温度传感器分别测定 10 cm 的土壤含水量和土壤温度。

1.4 数据分析

数据处理使用 SPSS17.0 (SPSS Inc., Chicago, USA) 软件。采用相关性分析和曲线拟合回归分析对相应指标的相关性进行分析, 并建立指数回归方程; 采用 SPSS 对土壤呼吸与不同氮梯度温、湿度的相关性进行平均值、标准差和单因素方差分析 (One-way ANOVA); 利用 Office Excel 2003 等软件辅助作图。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸动态变化

2.1.1 土壤呼吸日变化动态 图 1 为 2011 年 7 月 17 日土壤呼吸速率的日变化观测结果。由图 1 可见, 各处理浓度下土壤呼吸的日变化规律相似, 土壤

呼吸速率在 10:00 和 12:00 之间较低, 在 14:00—16:00 间土壤呼吸速度达到最大值。各氮沉降处理浓度下土壤呼吸的日平均速率分别为 (430.34 ± 24.60) 、 (489.48 ± 29.05) 、 (530.57 ± 29.05) 以及 (452.97 ± 28.07) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。与 CK 相比, T_L 、 T_H 浓度处理下差异性不显著, T_M 浓度处理下差异性显著。相对 CK 处理, T_L 、 T_M 、 T_H 浓度处理下的土壤呼吸速率均有不同程度的增加, 分别提高了 13.72%、23.22% 和 5.12%。土壤呼吸的日均值略高于 8:00—10:00 期间的土壤呼吸值, 但与 8:00—10:00 期间的土壤呼吸值最为接近。

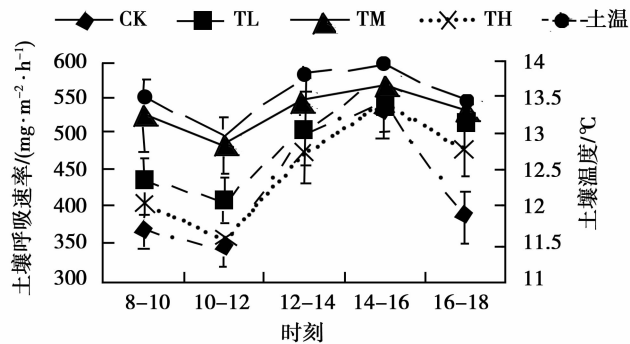


图 1 土壤呼吸日变化特征

2.1.2 土壤呼吸季节变化动态 图 2 为 2011 年 5 月—2011 年 10 月期间云冷杉红松林内的土壤呼吸速率变化。由图 2 可见, 各浓度处理的土壤呼吸具有相同的季节性变化规律, 且土壤呼吸速率与土壤温度之间显著相关, 在云冷杉红松林土温最高的 7、8 月中, 其呼吸速率较高; 而后随着土壤温度的下降其速率也显著下降, 且各浓度氮沉降处理没有改变土壤呼吸的季节性变化规律。同时, 土壤呼吸速率对湿度的响应不显著。

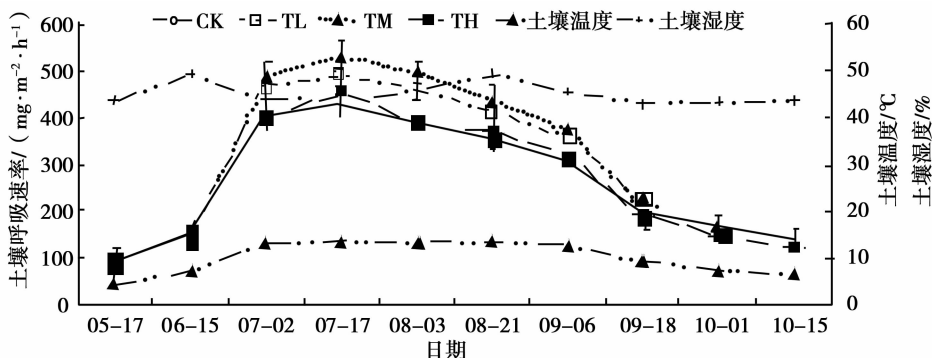
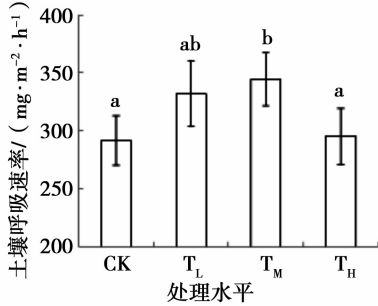


图 2 生长季内土壤呼吸速率变化

2.2 模拟氮沉降对土壤呼吸的影响

如图3所示, CK、 T_L 、 T_M 、 T_H 处理浓度下土壤呼吸的年平均速率分别为 291.35 ± 43.00 、 332.08 ± 21.81 、 344.56 ± 29.12 、 $295.04 \pm 20.82 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。与CK相比,各氮沉降浓度处理下土壤的呼吸速率均有增加。 T_L 、 T_M 、 T_H 处理使年土壤呼吸速率分别增加了13.98%、18.26%和1.12%,相对CK($P < 0.05$), T_M 处理浓度下差异性显著。



注:不同字母表示处理间存在差异显著性($P < 0.05$)

图3 土壤呼吸年均速率变化

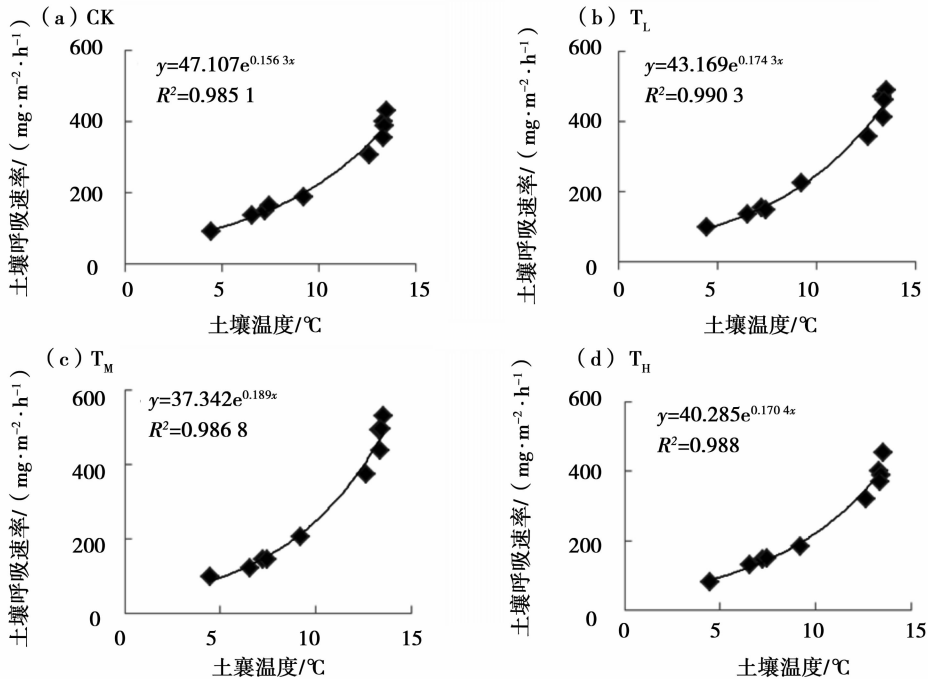


图4 土壤呼吸速率与土壤温度的关系

2.3.2 土壤呼吸与土壤湿度 将各处理浓度下的土壤呼吸速率与土壤湿度进行一元回归分析。试验结果表明,各处理浓度下土壤湿度与土壤呼吸速率没有显著的相关性。表明土壤含水量在43.02%~49.2%时,土壤呼吸与土壤湿度之间关系不显著,可能与本研究中土壤湿度较高有关,土壤湿度并非是土壤呼吸的限制因子。

2.3 土壤呼吸的影响因素

2.3.1 土壤呼吸的温度敏感性 土壤呼吸速率对土壤温度的响应关系,一般采用指数方程及其敏感指数 Q_{10} (即温度每增加 10°C 呼吸速率变为初始值的倍数)来估测,即 $y = ae^{bx}$ 。式中: y 为土壤温度呼吸速率; x 为距地表 10 cm 处的土壤温度; a 为 0°C 时的土壤呼吸速率; b 为温度反应系数。 Q_{10} 的表达式为 $Q_{10} = e^{10b}$ 。将各 CK、 T_L 、 T_M 、 T_H 浓度的土壤呼吸速率与土壤温度进行一元指数回归分析,结果如图4。结果表明在 CK、 T_L 、 T_M 、 T_H 浓度处理下,土壤呼吸速率与土壤温度存在极显著的指数关系($p < 0.001$),各处理浓度下的拟合方程的决定系数 R^2 分别为 0.9851、0.9903、0.9868 和 0.988。利用各处理浓度下土壤呼吸速率与土温之间的指数方程可得到土壤呼吸温度敏感系数 Q_{10} 分别为 4.77、5.71、6.62 和 5.49。这一结果表明各处理浓度下的氮沉降都增加了土壤呼吸的温度敏感性。相对 CK 处理, T_M 处理显著的增加 Q_{10} 值。

3 讨论

3.1 云冷杉红松林的土壤呼吸特征

本研究表明云冷杉红松林土壤呼吸与土壤温度显著相关,而与土壤湿度相关不显著。土壤呼吸的年平均速率为 $291.35 \pm 43.00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 低于北方混交林的平均值 $397 \pm 41.80 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

h^{-1} [21]。土壤呼吸的温度敏感性系数 Q_{10} 为 4.77, 明显高于全球土壤 Q_{10} 的平均值 (1.57) [22], 也高于我国森林土壤 Q_{10} 平均值 (2.65) [23], 与欧美同纬度地区的年均 Q_{10} 值 (2.0 ~ 6.3) 较为接近 [24-25]。由于本试验样地选择在小兴安岭南坡北段, 全年均温 $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 故该地区的温度明显低于整个北方以及全国的温度均值, 土壤的温度为该地区土壤呼吸的主要限制因子, 土壤呼吸对温度变化的响应更为敏感, 因此其所测得的年均土壤呼吸值明显低于上述地区土壤呼吸的年均速率, 温度敏感性系数 Q_{10} 高于上述地区的 Q_{10} 平均值。由纬度地带性引起的温度差异, 以及气候、植被群落类型的差异 [26], 使云冷杉红松林的土壤呼吸与其他森林群落类型的土壤呼吸相比, 有显著的差异性。

3.2 氮沉降对云冷杉红松林土壤呼吸的影响

本试验中的土壤呼吸速率的测定是在模拟氮沉降的第 1 年内进行的。在氮沉降模拟的早期, 森林群落对其响应机制较明显, 随着时间的推移和氮沉降量的增加, 氮素对土壤呼吸的影响作用大小有显著的变化 [27]。在本试验中, 与 CK 相比, T_L 、 T_M 以及 T_H 浓度处理下所测得的土壤呼吸年均速率都较 CK 有很大程度的提高, 分别为 13.98%、18.26% 和 1.12%, 表明在模拟氮沉降的早期云冷杉红松林群落的土壤呼吸对氮沉降有显著的响应, 本试验所得出的结论与上述观点一致。因氮沉降能使土壤中氮素的形态和含量发生变化, 增加土壤中硝态氮 (NO_3^-)、铵态氮 (NH_4^+) 的水平, 从而促进了根系细胞对氮素的利用能力 [27], 所以氮沉降有促进土壤的呼吸作用, 本试验中氮沉降明显增加了云冷杉红松林土壤的 C 排放能力, 进而证明在本群落类型中氮沉降增加能促进土壤的呼吸作用。随着氮沉降的不断增多, 其对云冷杉红松林土壤呼吸有如何的影响、影响的程度如何, 这些问题都值得进一步关注。

土壤呼吸主要受土壤微生物、根系和土壤动物呼吸的影响, 氮沉降对土壤呼吸作用的影响, 也是通过对这几种呼吸过程的影响而实现的。在一定范围内氮素有促进土壤呼吸的作用 [29], 但当氮素不为主要限制因子时, 氮沉降可能对土壤呼吸起到抑制作用 [18-19]。高浓度的氮素沉降可加快土壤中盐基离子的淋溶, 使土壤养分有效性降低, 进而对植物根系呼吸起到限制作用, 其结果就可能导致土壤呼吸受到抑制 [28-29]。本试验中的土壤呼吸对不同浓度的氮沉降响应程度有显著差异, 在 CK、 T_L 、 T_M 、 T_H

氮沉降处理浓度下测得的土壤呼吸的年平均速率分别为 291.35 ± 43.00 、 332.08 ± 21.81 、 344.56 ± 29.12 、 $295.04 \pm 20.82\text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 与 CK 相比, 分别增加了 13.98%、18.26% 和 1.12%, 其土壤呼吸速率明显随氮沉降浓度的不同而变化, T_M 处理对土壤呼吸的年均速率增加最大。由此可知, 在云冷杉红松林群落内 T_M 浓度处理对土壤呼吸的促进作用最大; T_L 次之; 当浓度继续增大到 T_H 时, 其对土壤呼吸的促进作用较 CK 相比只提高了 1.12%, 继续增大浓度反而可能使土壤呼吸作用受到抑制。在同纬度地区氮沉降研究中, 氮沉降早期表现为对土壤呼吸的促进作用 [30], 而长期的氮输入则对土壤呼吸均表现为抑制作用 [31-32], 在我国的南方高氮沉降地区 [11-12], 其所测得的氮沉降对土壤呼吸的影响也往往表现为抑制趋势 [18-19], 氮沉降对土壤呼吸的作用机理也随群落特点而显著不同 [17-19, 21]。原因也是由于与北方地区相比 [33], 其他地区的氮沉降水平较高 [11-12, 31-32], 低浓度的氮素可促进土壤呼吸, 而高浓度的氮沉降可以使土壤呼吸受到抑制。在目前的大气氮沉降水平下 [12, 33], 我国北方森林的土壤呼吸可能对氮沉降的响应表现为促进作用, 而对高氮沉降地区表现为抑制作用。

4 结论

在模拟氮沉降的第一年内, 氮沉降并未改变云冷杉红松林森林群落内土壤呼吸的季节变化规律与日变化规律, 土壤呼吸速率主要受土壤温度影响, 土壤湿度与土壤呼吸速率的季节性变化没有显著的相关性。

氮沉降增加了云冷杉红松林森林群落内土壤呼吸的年平均速率和日平均速率, T_M 处理显著增强了土壤呼吸的速率。

在模拟氮沉降的第一年内, 氮沉降促进了云冷杉红松林土壤的碳排放能力。

在全球气候变化和氮沉降不断增多的背景下, 北方森林土壤的碳源碳汇功能尚不明确, 为更好地确定氮沉降对土壤碳排放的影响, 应继续进行土壤呼吸对氮沉降响应的相关研究。因土壤呼吸对氮沉降的响应可能存在阶段性, 北方森林土壤的呼吸作用对长期氮沉降条件以及各环境因子变化的响应机制尚不明确, 因此应长期观测, 以阐明未来氮沉降对土壤碳氮循环影响的相关机制。此外, 还应针对土壤呼吸产生的生理学机制上, 研究土壤自养和异养

呼吸对氮沉降的响应机制。

参考文献:

- [1] Fang J Y, Zhu J L, Wang S P, *et al.* Global warming, human-induced carbon emissions, and their uncertainties[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54: 1458 - 1468
- [2] Solomon S, Qin D, Manning M, *et al.* Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. New York: Cambridge University Press, 2007, 285
- [3] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relation to vegetation and climates [J]. *Tellus*, 1992, 44 (B): 81 - 99
- [4] Detwiler R P, Hall C A S. Tropical forest and the global carbon cycle [J]. *Science*, 1988, 239: 42 - 47
- [5] Post W M, Emanuel W R. Soil carbon pools and world life zones [J]. *Nature*, 1982, 298: 156 - 159
- [6] Peter M, Vitousek, John D Aber, *et al.* Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences [J]. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 737 - 750
- [7] Magill A H, Aber J D, Hendricks J J, *et al.* Biogeochemical response of forest ecosystems to simulated chronic nitrogen deposition [J]. *Ecological Applications*, 1997, 7(2): 402 - 41
- [8] Tietema A, Wright R F, Blank K, *et al.* NITREX: The timing of response of coniferous forest ecosystems to experimentally changed deposition of nitrogen [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, 85: 1623 - 1628
- [9] Wright R F, Roelofs J G M, Bredemeier M, *et al.* NITREX: Responses of coniferous forest ecosystems to experimentally changed deposition of nitrogen [J]. *Forest Ecology and Management*, 1995, 71: 163 - 169
- [10] Aber J D, McDowell W H, Nadelhoffer K J, *et al.* Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems: hypotheses revisited [J]. *Bio Science*, 1998, 48: 921 - 934
- [11] 黄忠良, 丁明懋, 张祝平, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林的水文学过程及其氮素动态 [J]. *植物生态学报*, 1994, 18(2): 194 - 199
- [12] 周国逸, 闫俊华. 鼎湖区域大气降水特征和物质元素输入对森林生态系统存在和发育的影响 [J]. *生态学报*, 2001, 21(12): 2002 - 2012
- [13] Zheng X H, Fu C B, Xu X K, *et al.* The Asian nitrogen cycle case study [J]. *AMBIO*, 2002, 31(2): 79 - 87
- [14] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change [J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2002, 31(2): 64 - 71
- [15] Flanagan P W, Van C K. Nutrient cycling in relation to decomposition and organic-matter quality in taiga ecosystems [J]. *Can J Forest Res*, 1983, 13(5): 795 - 817
- [16] Brumme R, Beese F. Effects of liming and nitrogen fertilization on emissions of CO₂ and N₂O from a temperate forest [J]. *J Geophys Res*, 1992, 97(12): 12851 - 12855
- [17] 莫江明, 方运霆, 徐国良, 等. 鼎湖山苗圃和主要森林土壤 CO₂ 排放和 CH₄ 吸收对模拟 N 沉降的短期响应 [J]. *生态学报*, 2005, 25(4): 682 - 690
- [18] 胡正华, 李涵茂, 杨艳萍, 等. 模拟氮沉降对北亚热带落叶阔叶林土壤呼吸的影响 [J]. *环境科学*, 2010, 31(8): 1541 - 1547
- [19] 李仁洪, 徐立华, 胡庭兴, 等. 模拟氮沉降对华西南屏丝竹林土壤呼吸的影响 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1649 - 1655
- [20] Zhang W, Mo J M, Zhou G Y, *et al.* Methane uptake responses to nitrogen deposition in three tropical forests in southern China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: 111 - 116
- [21] 王传宽, 杨金燕. 北方森林土壤呼吸和木质残体分解释放出的 CO₂ [J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 633 - 637
- [22] 陈光水, 杨玉盛, 吕萍萍, 等. 中国森林土壤呼吸模式 [J]. *生态学报*, 2008, 28(4): 1748 - 1761
- [23] 邓琦, 刘世忠, 刘菊秀, 等. 南亚热带森林凋落物对土壤呼吸的贡献及其影响因素 [J]. *地球科学进展*, 2007, 22(9): 976 - 986
- [24] Cline J S, Schinel J P. Microbial activity of tundra and taiga soils at sub-zero temperatures [J]. *Soil Biology Biochemistry*, 1995, 27: 1231 - 1234
- [25] Davidson E A, Beik E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4: 217 - 227
- [26] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响 [J]. *生态学报*, 1997, 17(5): 461 - 476
- [27] Emmett B, Ashmore M, Belyazid S, *et al.* Annual report to DEFRA for the DEFRA - NERC Terrestrial Umbrella [R]. UK: Centre for ecology & Hydrology, 2009
- [28] Persson H, Ahlström K, Clemensson-Lindell A. Nitrogen addition and removal at Gkdsjijn-effects on fine-root growth and fine-root chemistry [J]. *Forest Ecol Manag*, 1998, 101: 199 - 206
- [29] Carfrae J A, Skene K R, Sheppard L J, *et al.* Effects of nitrogen with and without acidified sulphur on an ectomycorrhizal community in a Sitka spruce. (*Picea sitchensis* Bong. Carr) forest [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 141(1): 131 - 138
- [30] Vestgarden L S. Carbon and N turnover in early stage of Scots pine (*Pinus sylvestris*) needle litter decomposition: Effects of internal and external N [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 465 - 474
- [31] Franklin O G, Högherg P G., Ekblad A G, *et al.* Pine forest floor carbon accumulation in response to 10 N and P K additions: Bomb ¹⁴C modeling and respiration studies [J]. *Ecosystems*, 2003, 6: 644 - 658
- [32] Bowden R D, Davidson E, Savage K. *et al.* Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196: 43 - 56
- [33] 刘世荣. 兴安落叶松人工林生态系统营养元素生物地球化学循环特征 [J]. *生态学杂志*, 1992, 11: 1 - 6