

模拟氮沉降对北亚热带落叶阔叶林土壤呼吸的影响

胡正华¹, 李涵茂¹, 杨燕萍¹, 陈书涛¹, 李岑子¹, 申双和²

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要:于2008年4月~2009年4月在龙王山北亚热带落叶阔叶林地进行模拟氮沉降试验,利用静态箱-气相色谱法测定土壤呼吸,研究氮沉降增加对森林土壤呼吸的影响。结果表明,氮沉降没改变土壤呼吸的季节性变化规律和日变化规律。与对照(CK)相比,低氮(T_L)、中氮(T_M)和高氮(T_H)处理使森林土壤年平均呼吸速率分别降低了8.51%、9.74%和11.24%,使日平均呼吸速率分别降低了4.42%、11.09%和12.17%。森林土壤呼吸与土壤温度存在极显著的指数关系($p < 0.01$),CK、 T_L 、 T_M 和 T_H 的土壤呼吸温度敏感系数(Q_{10})分别为2.53、3.22、2.64和2.92,氮沉降提高了林地土壤呼吸的温度敏感系数。本研究表明,氮沉降显著降低了森林土壤呼吸,但提高了土壤呼吸的温度敏感性。

关键词:氮沉降; 森林土壤; 土壤呼吸; Q_{10} ; 北亚热带

中图分类号:X144 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)08-1726-07

Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration in Northern Subtropical Deciduous Broad-leaved Forest

HU Zheng-hua¹, LI Han-mao¹, YANG Yan-ping¹, CHEN Shu-tao¹, LI Cen-zi¹, SHEN Shuang-he²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract:To investigate the effects of elevated nitrogen deposition on forest soil respiration, a simulated nitrogen deposition field experiment was conducted in northern subtropical deciduous broad-leave forest from April 2008 to April 2009. Nitrogen treatments included the control (no N addition, CK), low-N [$50 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, T_L], medium-N [$100 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, T_M], and high-N [$150 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, T_H]. The respiration rates were measured by a static chamber-gas chromatograph method. Results showed that nitrogen deposition did not change the seasonal and daily variation patterns of soil respiration. Compared to the control, T_L , T_M and T_H treatments reduced soil annual average respiration rates by 8.51%, 9.74% and 11.24%, respectively. Meanwhile, T_L , T_M and T_H treatments decreased daily average soil respiration rates by 4.42%, 11.09% and 12.17%, respectively. Significant relationship was found between soil respiration rate and soil temperature. The Q_{10} (temperature sensitivity coefficients) for soil respiration of CK, T_L , T_M and T_H treatments were 2.53, 3.22, 2.64 and 2.92, respectively. Our findings suggested that nitrogen deposition reduced soil respiration, and increased soil respiration temperature sensitivity in northern subtropical deciduous broad-leave forest.

Key words:nitrogen deposition; forest soil; soil respiration; Q_{10} ; northern subtropical

以气候变暖为标志的全球变化已是不争的事实,其主要原因是大气中温室气体(CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等)浓度的不断增加,其中 CO_2 是最重要的温室气体。大气中 CO_2 的浓度已从工业革命前的 $285 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升到目前的 $379 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[1]。全球约有 $1400 \sim 1500 \text{ Gt}$ 碳储存在土壤中,是陆地植被碳库($500 \sim 600 \text{ Gt}$)的2~3倍,是全球大气碳库(750 Gt)的2倍^[2]。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%^[3]。土壤呼吸是碳循环的重要一部分,土壤呼吸释放到大气中的 CO_2 是化石燃料燃烧释放 CO_2 的10倍以上^[4]。因此,森林土壤呼吸在全球碳循环中起着极其重要的作用。

另一重要环境问题是大气中含活性氮物质迅速增加并向地面沉降^[5],并且严重影响着森林生态系

统的健康发展^[6]。目前,我国一些地区已存在着高氮沉降问题,如广东鼎湖山自然保护区1989~1999年间降水中氮沉降量由 $36 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 上升至 $38 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[7,8];长三角地区南京、常熟和杭州的降水中氮沉降量分别达到23、25和 $30 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[9]。氮沉降量接近欧洲和北美一些高氮沉降区^[10,11],我国已成为继欧洲、美国之后的世界第三大氮沉降集中区^[12]。随着我国经济的进一步发展,氮沉降问题还会越来越严重^[13]。

早在20世纪80年代中期,欧洲和北美的生态

收稿日期:2009-10-18;修订日期:2010-01-18

基金项目:国家自然科学基金项目(40605029);中国博士后科学基金项目(20070420195);土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目(0812000053)

作者简介:胡正华(1973~),男,博士,副教授,主要研究方向为陆地生态系统温室气体排放与全球变化, E-mail: zhhu@nuist.edu.cn

学家就开始了有关氮沉降对温带森林土壤呼吸影响的研究^[14,15].有关氮沉降对森林土壤呼吸影响的研究日益成为学术界关注的焦点之一^[16].我国在氮沉降对森林土壤呼吸影响方面的研究刚起步,且多集中在南亚热带森林^[17],而北亚热带森林鲜见报道.本研究通过模拟氮沉降试验,探讨了北亚热带落叶阔叶林森林土壤呼吸对氮沉降增加的响应,以期评估该地区在氮沉降增加背景下森林生态系统的固碳能力提供基础.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究样地位于江苏省南京市北郊的龙王山(118°42'E,32°11'N),属北亚热带季风气候区.年平均气温 15.5℃,1 月平均气温 2.2℃,极端低温 -13.3℃,7 月份平均气温 28.2℃,极端高温 40.7℃,无霜期 225 d,年相对湿度为 76%,多年平均降水量 1 019.5 mm.样地地带性植被为亚热带落叶阔叶林,群落郁闭度为 0.9,林冠层主要树种有白栎(*Quercus fabri*)、化香(*Platycarya strobilacea*)、构树(*Broussonetia papyrifera*).林下层主要有白檀(*Symplocos paniculata*)、山胡椒(*Lindera glauca*)、狭叶山胡椒(*L. angustifolia*)、朴树(*Celtis sinensis*)、茶条槭(*Acer ginnala*)等树种.草本层有苔草(*Carex* spp.)、天门冬(*Asparagus cochinchinensis*)、繁缕(*Stellaria media*)等植物.

1.2 试验设计

实验设计参照欧洲 NITREX 项目^[18]和北美 Harvard Forest 等^[19]以及我国学者莫江明等^[17]类似研究的设计.在树木分布均匀区域建立 12 个 4 m × 4 m 样方,样方之间留有缓冲带,以防止相互干扰.土壤有机碳为 32.1 g·kg⁻¹,全氮含量为 2.1 g·kg⁻¹;容重为 1.08; pH(H₂O)为 4.5. 试验设对照 [CK, 0 kg·(hm²·a)⁻¹]、低氮 [T_L, 50 kg·(hm²·a)⁻¹]、中氮 [T_M, 100 kg·(hm²·a)⁻¹]和高氮 [T_H, 150 kg·(hm²·a)⁻¹](不包括大气沉降的氮量)4 种氮处理水平,每种处理有 3 个样方.从 2008 年 4 月开始,于每月初喷施 NH₄NO₃,全年平均喷施.方法是根据氮处理水平,将每个样方每次所需喷施的 NH₄NO₃ 溶解在 3.2 L 水中(全年所增加的水量相当于新增降水 1.2 mm)后,用喷壶在林地人工来回均匀喷洒.对对照样方则喷洒同样多的水,以减少不同处理间因外加的水而造成对森林生物地化循环的影响.除施氮处理外,各样方的管理均一致.

1.3 气样的采集和分析

采用静态箱-气相色谱法测定土壤 CO₂ 排放通量^[20].采样底座为紫砂陶土烧制而成的无底盆钵,高 10 cm,盆钵上口有 1.5 cm 深的凹槽用以在采样时注水与采样箱密封,底座提前安装在土壤中(深 5 cm).采样箱为 PVC 材料的圆柱体,高 1 m,外侧包裹一层海绵和锡箔纸以减小箱内温度变化,采样箱直径与底座凹槽直径一致.气样用带三通阀的塑料针筒采集,每底座采样 3 个,分别于关箱后 0、10、20 min 采集,每次抽样 60 mL.试验于 2008 年 4 月~2009 年 4 月进行,常规采样时间为 08:00~10:00.在 2008-05-21 进行了日变化观测,采样时间为 08:00~18:00,每 2 h 采样一次.

采集的气样用改装的 Agilent-6890N 气相色谱仪分析 CO₂ 的浓度.色谱仪器所用载气为 99.999% 高纯氮.色谱分离柱为不锈钢柱,其填料为 Porapak Q,工作时柱温 55℃.CO₂ 在镍触媒催化下转化为 CH₄,继而以 FID 检测器测定,检测温度为 200℃.以 HP 软件分析求得气体的浓度.通过对每组 3 个样品的 CO₂ 混合比与相对应的采样间隔时间进行直线回归,可求得 CO₂ 的排放速率.继而根据大气压力、气温、普适气体常数、采样箱的有效高度、CO₂ 分子量等,求得单位面积的 CO₂ 排放量,即土壤呼吸速率.

1.4 环境因子测定

每次采集气样的同时测定空气温度、10 cm 深土壤温度,称重法测定土壤湿度.

1.5 数据分析

数据分析利用 SPSS 13.0 (SPSS Inc., Chicago, USA)、Office Excel 2003 等软件完成.

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸日变化特征

图 1 是 2008-05-21 土壤呼吸日变化观测结果.由图 1 可见,各处理的土壤呼吸具有相似的日变化规律,土壤呼吸速率在 08:00 和 18:00 较低,在 14:00~16:00 间达到最大值.氮沉降没有改变土壤呼吸的日变化规律. CK、T_L、T_M、T_H 的土壤呼吸日平均速率分别为 (342.23 ± 53.50)、(327.11 ± 28.84)、(304.29 ± 76.29) 和 (300.59 ± 41.12) mg·(m²·h)⁻¹.与 CK 相比,T_L、T_M 和 T_H 处理使土壤呼吸日平均排放速率分别降低了 4.42%、11.09% 和 12.17%.本研究中的日变化平均值略高于 08:00~10:00 采样平均值,但周存宇等^[21]研究

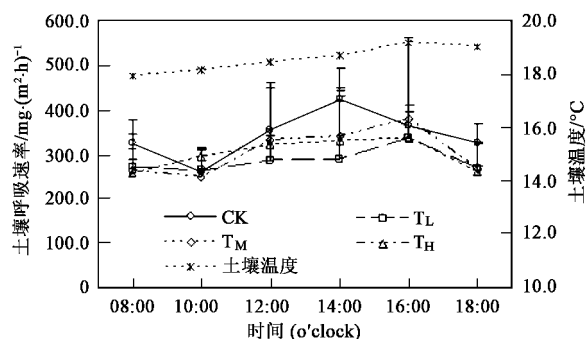


图1 土壤呼吸日变化特征

Fig. 1 Daily variation pattern of soil respiration

表明 08:00 ~ 10:00 时段的土壤呼吸值与土壤呼吸全天平均值接近。

2.2 土壤呼吸季节动态

图 2 是 2008 年 4 月 ~ 2009 年 4 月间土壤呼吸速率,各处理的土壤呼吸具有相同的季节性变化规律,土壤呼吸速率在夏季最高,春秋季次之,冬季最低. 氮沉降没有改变土壤呼吸的季节性变化规律. 从图 2 中还可看出,土壤呼吸与土壤温度显著相关,二者的变化规律相似,而土壤呼吸与土壤重量含水量之间的相关性不明显。

2.3 氮沉降对土壤呼吸的影响

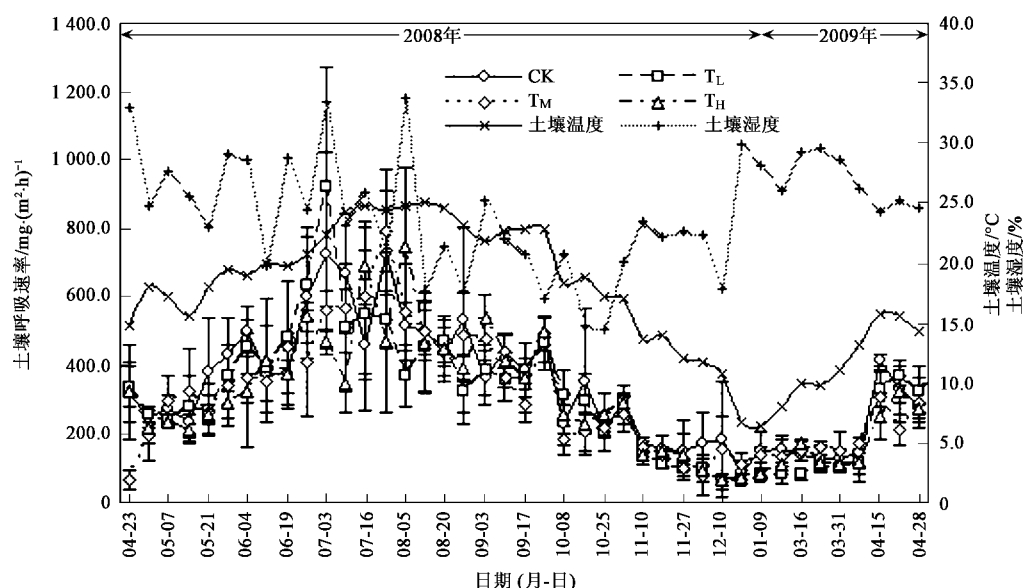


图2 土壤呼吸速率、土壤温度和土壤湿度

Fig. 2 Soil respiration rate, soil temperature and soil moisture

如图 3(a)所示,CK、 T_L 、 T_M 和 T_H 的土壤呼吸年平均速率分别为 (339.50 ± 16.85) 、 (310.62 ± 43.96) 、 (306.43 ± 15.33) 和 (301.35 ± 18.17) $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 与 CK 相比,氮沉降降低了土壤呼吸速率. T_L 、 T_M 和 T_H 处理使土壤呼吸速率分别降低了 8.51%、9.74% 和 11.24%,且 T_M 和 T_H 处理与 CK 的差异均达到了显著水平(p 为 0.033、0.028).

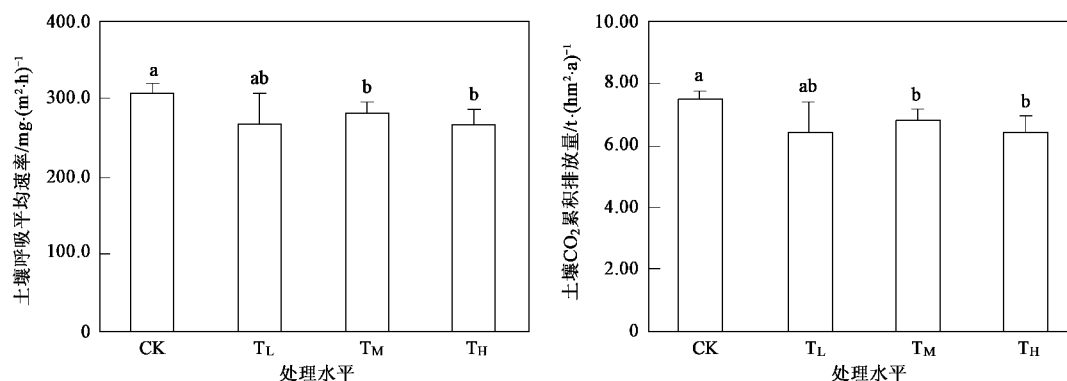
由图 3(b)可见,CK、 T_L 、 T_M 和 T_H 的土壤 CO_2 累积排放量(以 C 计)分别为 (7.46 ± 0.26) 、 (6.50 ± 0.92) 、 (6.84 ± 0.35) 和 (6.50 ± 0.45) $\text{t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 氮沉降处理降低了土壤 CO_2 累积排放量,且 T_M 和 T_H 处理与 CK 的差异达到了显著水平(p 为 0.035、0.016).

2.4 土壤呼吸温度敏感性

将各处理的土壤呼吸速率与土壤温度进行回归分析(图 4),结果可见土壤呼吸速率与土壤温度存在极显著的指数关系($p < 0.01$),CK、 T_L 、 T_M 和 T_H 的拟合方程的决定系数 R^2 分别为 0.665、0.726、0.607 和 0.749. 根据指数方程计算得到的土壤呼吸温度敏感性系数 Q_{10} 值(温度每增加 10°C 呼吸速率变为初始值的倍数)有明显差异,分别为 2.53、3.22、2.64 和 2.92. 氮沉降有增加土壤呼吸 Q_{10} 值的趋势,但其增加程度并不显著。

2.5 土壤呼吸与土壤湿度

由图 5 可见,各处理的土壤呼吸与土壤湿度没有明显的相关性. 表明土壤含水量在 15% ~ 35% 时,土壤呼吸与土壤湿度的关系不显著,氮沉降处理没有改变这种关系。



不同字母表示处理间差异性显著 ($p < 0.05$)

图3 土壤呼吸年平均速率和 CO_2 累积排放量

Fig. 3 Soil average respiration rate and CO_2 cumulative emissions

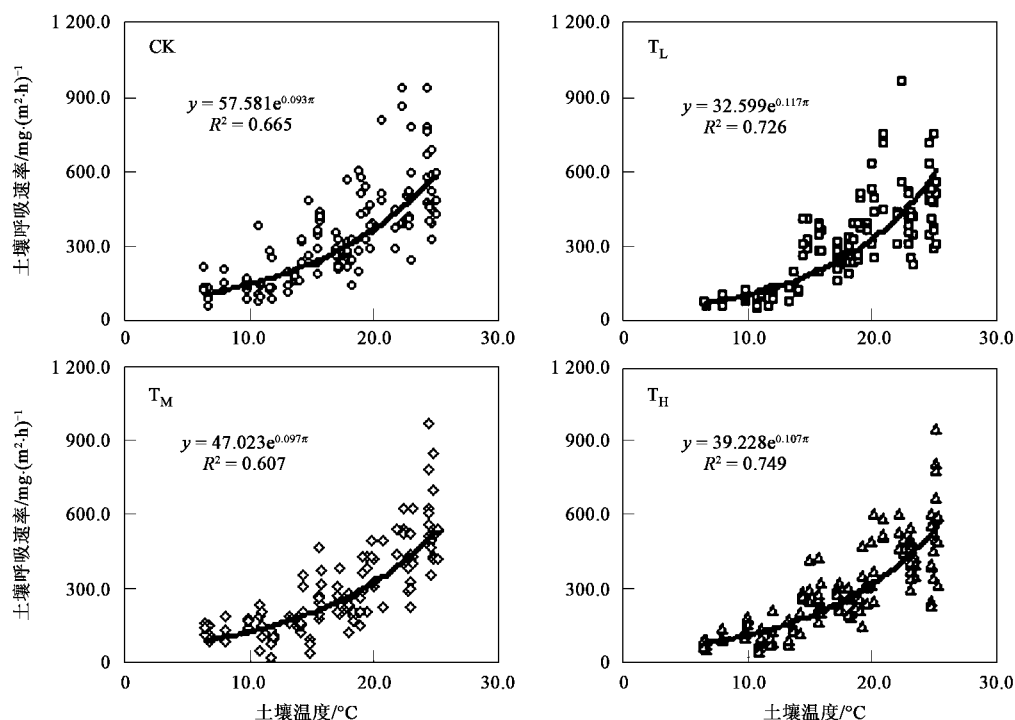


图4 土壤呼吸与土壤温度的关系

Fig. 4 Relationship between soil respiration rate and soil temperature

3 讨论

3.1 北亚热带落叶阔叶林土壤呼吸特征

试验过程中对照样方没有进行氮沉降处理,基本处于自然状态,其土壤呼吸在一定程度上反映了本研究区森林土壤呼吸的特征. 本研究的林地土壤呼吸 CO_2 排放量(以 C 计,下同)为 $(7.46 \pm 0.26) \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 低于南亚热带鼎湖山季风常绿阔叶林的 $10.80 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ [22], 与北亚热带-南暖温带过

渡区锐齿栎老林的 $7.79 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ [23] 和北亚热带北缘锐齿栎林的 $7.71 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ [24] 相当. 说明亚热带森林土壤呼吸与纬度地带性的温度变化有一定的相关性,土壤呼吸的差异可能与气候状况、植被类型、树龄和立地条件等因素有关.

本研究中,土壤呼吸与土壤温度存在显著相关性,土壤呼吸的温度敏感性系数 Q_{10} 为 2.53, 高于全球土壤 Q_{10} 的平均值 (1.57) [25] 和南亚热带鼎湖山季风常绿阔叶林 Q_{10} 值 (1.73) [22], 与北亚热带-南

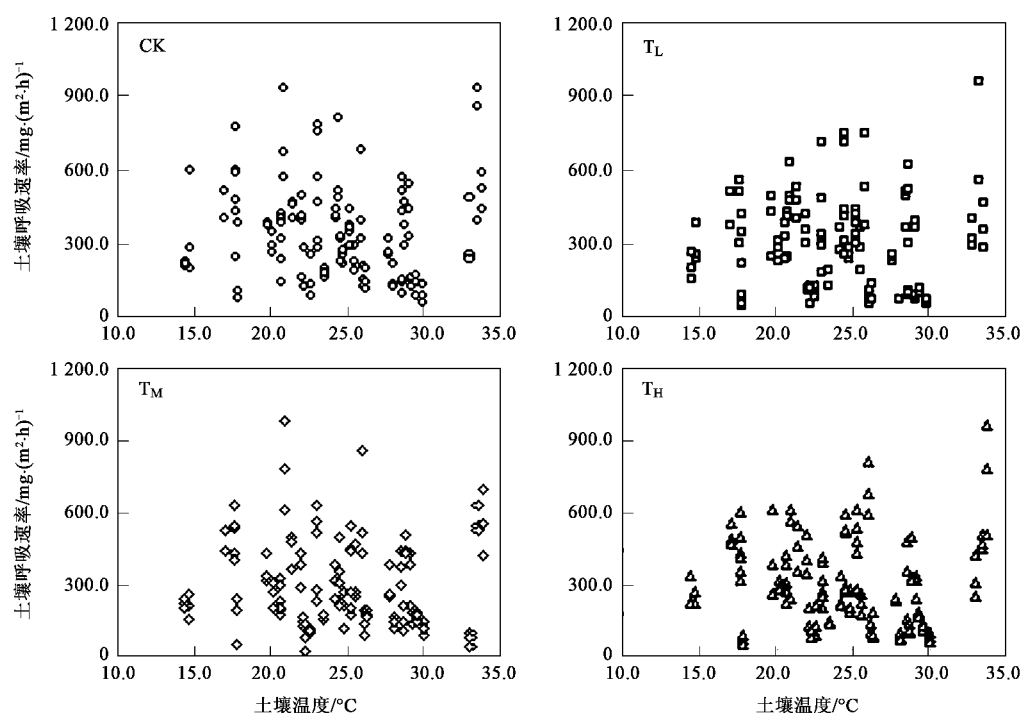


图5 土壤呼吸与土壤温度的关系

Fig.5 Relationship between soil respiration rate and soil moisture

暖温带过渡区锐齿栎幼林 Q_{10} 值(2.44)、锐齿栎老林 Q_{10} 值(2.30)^[23] 和我国森林土壤 Q_{10} 平均值(2.65)^[26] 相接近. 可见, 亚热带森林土壤呼吸的温度敏感性与纬度地带性的温度变化有一定的相关性, 气候变暖对北亚热带森林土壤呼吸的影响比对南亚热带森林土壤呼吸的影响更大.

3.2 氮沉降对北亚热带林地土壤呼吸的影响

在模拟氮沉降试验的第1 a, 氮沉降处理使土壤 CO_2 排放速率降低了 8.51% ~ 11.24%, 且这种抑制作用在中氮和高氮处理条件下达到了显著水平. 氮沉降处理降低了林地土壤的 CO_2 累积排放量, 相当于增加了土壤碳储量 0.62 ~ 0.96 $\text{t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 氮沉降降低林地土壤呼吸的原因可能是: ①氮沉降增加了土壤氮含量, 抑制了与有机质分解有关的酶的数量及活性^[32,27], 从而减少土壤 CO_2 排放; ②氮沉降降低了根生物量^[28], 抑制了植物根系的活性^[29], 从而降低了根呼吸, 使土壤呼吸减小; ③氮沉降能降低外生菌根真菌的数量和物种丰富度, 改变群落^[30], 降低微生物多样性指数^[31], 从而降低凋落物的分解速率^[13,32], 限制了土壤呼吸; ④氮沉降加速森林土壤酸化^[33], 土壤 pH 值降低, 抑制植物根系生长, 从而影响土壤呼吸.

3.3 氮沉降对土壤呼吸温度敏感性的影响

本研究表明, 土壤呼吸速率随土壤温度呈现明显的季节变化规律. 本试验得到的土壤呼吸速率对土壤温度的响应指数函数, 具有极其显著的相关性 ($p < 0.01$), 与国内外许多研究结果相同^[34,35]. 土壤呼吸的温度敏感系数 (Q_{10}) 反映了土壤呼吸对温度变化的响应规律, 对了解全球变暖情况下陆地生态系统碳排放通量变异规律具有一定的参考价值. 本研究结果表明, 氮沉降增加了土壤呼吸的温度敏感性, 这与涂利华等^[36] 的研究结果相一致. 其可能原因是, 氮沉降改变了土壤微生物数量和群落结构^[30,31], 如果受氮沉降影响比较小的那些微生物类群对温度响应比较敏感, 则可能导致土壤呼吸的 Q_{10} 值相应增大. 但也有研究发现氮沉降对 Q_{10} 影响不大, 认为氮沉降没有改变根系组织氮含量, 从而保持了较恒定的细胞呼吸^[28].

氮沉降降低了土壤呼吸却增加了土壤温度敏感性. 其可能原因是, 氮沉降改变了土壤微生物数量和群落结构^[30,31], 降低了土壤呼吸. 但如果对温度敏感较小的微生物未受氮沉降影响, 当温度增加, 氮沉降处理下的土壤呼吸增加相对量较对照要明显, 从而表现出较强的温度敏感性.

3.4 土壤呼吸与土壤湿度

土壤湿度对土壤呼吸的影响比较重要也较为复杂. 在土壤湿度过大或涝灾时, 土壤呼吸量剧减, 而

土壤过于干旱也会导致土壤呼吸量锐减^[37]. 土壤水分过低,影响根系或微生物活动所必需的生存环境,产生的 CO₂ 量将会减少;如果土壤水分过高,土壤孔隙减小,异氧呼吸所需氧气的进入以及呼吸产物 CO₂ 的排放都会受到限制. 在水分不成为限制因子的条件下,土壤呼吸和土壤含水量不相关^[38]. 本试验中,各处理的土壤湿度维持在 15% ~ 35% 之间,没有到达极端情况,不足以影响微生物和树木根系活动,因而土壤呼吸与土壤湿度的关系不显著.

未来在氮沉降持续增加和全球气候变暖的背景下,氮沉降和温度升高复合作用对森林土壤碳收支的影响如何? 由于氮沉降对土壤呼吸的影响可能存在阶段性,长期氮沉降条件下,森林土壤碳库和土壤呼吸的温度敏感性如何变化? 这些问题都有待于进一步研究.

4 结论

(1) 氮沉降并未改变北亚热带森林土壤呼吸的季节变化规律与日变化规律,其主要受土壤温度所驱动.

(2) 氮沉降降低了森林土壤呼吸年平均速率和日平均速率,降低了土壤的 CO₂ 累积排放量,且氮沉降强度越大对土壤呼吸的抑制效应越明显.

(3) 氮沉降提高了北亚热带森林土壤呼吸的温度敏感性.

(4) 森林土壤湿度在 15% ~ 35% 时,氮沉降没有改变土壤呼吸与土壤湿度的关系.

参考文献:

- [1] IPCC. 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]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soil[J]. Nature, 1990, **348**: 232-234.
- [3] Post W M, Emanuel W R. Soil carbon pools and world life zones[J]. Nature, 1982, **298**: 156-159.
- [4] Rain J W, Potter C S. Global patterns of Carbon dioxide emissions from soil[J]. Global Biogeochem Cy, 1995, **9**: 2-26.
- [5] Kaiser J. The other global pollute nitrogen proves tough to curb[J]. Science, 2001, **294**: 1268-1269.
- [6] Vitousek P M, Aber J D, Capone D G, et al. Human alteration of the global nitrogen cycle. Sources and Consequences[J]. Ecol Appl, 1997, **7**(3): 737-750.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 谢迎新. 人为影响下稻田生态系统环境来源氮解析[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2006.
- [10] Binkley D, Son Y, Valentine D W. Do forest receive occult inputs of nitrogen? [J]. Ecosystem, 2000, **3**: 321-331.
- [11] Lovett G M, Reiners W A, Olsen R K. Cloud droplet deposition in subalpine balsam fir forests: Hydrological and chemical inputs[J]. Science, 1982, **218**: 1303-1304.
- [12] 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.
- [13] Mo J, Brown S, Xue J, et al. Response of Litter Decomposition to Simulated N Deposition in Disturbed, Rehabilitated and Mature Forests in Subtropical China[J]. Plant Soil, 2006, **282**(1): 135-151.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Jenkinson D S, Goulding K, Powlson D S, et al. Nitrogen deposition and carbon sequestration[J]. Nature, 1999, **400**: 629.
- [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] Gundersen P, Emmett B A, Kjønaas O J, et al. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forest: a synthesis of NITREX data[J]. Forest Ecol Manag, 1998, **101**: 37-55.
- [19] Aber J D, McDowell W, Nadelhoffer K J, et al. Nitrogen saturation in Northern forest ecosystems, hypotheses revisited[J]. Bioscience, 1998, **48**: 921-934.
- [20] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, **20**(5): 842-844.
- [21] 周存宇, 张德强, 王跃思, 等. 鼎湖山针阔叶混交林地表温室气体排放的日变化[J]. 生态学报, 2004, **24**(8): 1742-1745.
- [22] 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.
- [23] 常建国, 刘世荣, 史作民, 等. 北亚热带-南暖温带过渡区典型森林生态系统土壤呼吸及其组分分离[J]. 生态学报, 2007, **27**(5): 1791-1802.
- [24] 刘建军, 王得祥, 雷瑞德, 等. 秦岭天然油松、锐齿栎林地土壤呼吸与 CO₂ 释放[J]. 林业科学, 2003, **39**(2): 8-13.
- [25] 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.

- [26] 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.
- [27] Compton J, Watrud L S, Porteus L A, *et al.* Response of soil microbial biomass and community composition to chronic nitrogen additions at Harvard forest[J]. Forest Ecol Manag, 2004, **196**: 143-158.
- [28] 贾淑霞, 王政权, 梅莉, 等. 施肥对落叶松和水曲柳人工林土壤呼吸的影响[J]. 植物生态学报, 2007, **31**(3): 372-379.
- [29] Persson H, Ahlström K, Clemensson-Lindell A. Nitrogen addition and removal at Gårdsjön-effects on fine-root growth and fine-root chemistry [J]. Forest Ecol Manag, 1998, **101**:199-206
- [30] 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]. Environ Pollut, 2006, **141**(1): 131-138.
- [31] Egerton-Warburton L M, Allen E B. Shifts in arbuscular mycorrhizal communities along an anthropogenic nitrogen deposition gradient[J]. Ecol Appl, 2000, **10**: 4842-496.
- [32] Micks P, Down M R, Magill A H, *et al.* Decomposition litter as a sink for ¹⁵N-enriched additions to an oak forest and a red pine plantation[J]. Forest Ecol Manag, 2004, **196**: 71-87.
- [33] 肖辉林. 大气氮沉降对森林土壤酸化的影响[J]. 林业科学, 2001, **37**(4): 111-116.
- [34] Takahashi A, Hiyama T, Takahashi H A, *et al.* Analytical estimation of the vertical distribution of CO₂ production within soil application to a Japanese temperate forest [J]. Agr Forest Meteorol, 2004, **126**: 223-235.
- [35] 陈宝玉, 刘世荣, 葛剑平, 等. 川西亚高山针叶林土壤呼吸速率与不同土层温度的关系[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(6): 1219-1224.
- [36] 涂利华, 胡庭兴, 黄立华, 等. 华西雨屏区苦竹林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应[J]. 植物生态学报, 2009, **33**(4): 728-738.
- [37] Linn D M, Doran J W. Effects of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils [J]. Soil Sci Soc Am J, 1984, **48**: 1267-1272.
- [38] Fortin M C, Rochette P, Patey E. Soil carbon dioxide fluxes from conventional and no-tillage small-grain cropping systems[J]. Soil Sci Soc Am J, 1996, **60**: 1541-1547.