#### DOI: 10.5846/stxb201311282836

吴迪,张蕊,高升华,付晓,邓红兵,邵国凡,张旭东.模拟氮沉降对长江中下游滩地杨树林土壤呼吸各组分的影响.生态学报,2015,35(3):717-724.

Wu D, Zhang R, Gao S H, Fu X, Deng H B, Shao G F, Zhang X D.Effects of simulated nitrogen deposition on the each component of soil respiration in the *Populus* L. plantations in a riparian zone of the mid-lower Yangtze River. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3):717-724.

# 模拟氮沉降对长江中下游滩地杨树林土壤呼吸各组分 的影响

吴 迪<sup>1,4</sup>,张 蕊<sup>3</sup>,高升华<sup>2</sup>,付 晓<sup>3</sup>,邓红兵<sup>3</sup>,邵国凡<sup>1</sup>,张旭东<sup>2,\*</sup>

1 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021

2 中国林业科学研究院林业研究所,北京 100091

3 中国科学院生态环境研究中心,城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085

4 中国科学院大学,北京 100049

**摘要:**土壤呼吸是土壤碳库向大气输出碳的主要途径,也是大气 CO<sub>2</sub>重要的源。活性氮的生成和沉降速率的增加影响了生态系统的碳循环,研究氮沉降量增加对土壤呼吸各组分的影响,对于了解土壤呼吸在气候变化中的作用有重要意义。以长江中下游滩地杨树人工林为对象,通过定位模拟氮沉降实验,研究了滩地杨树人工林生态系统土壤呼吸的变化特征和土壤呼吸各组分对几种氮沉降量浓度的响应。结果表明:土壤呼吸及其各组分均有明显的季节变化特征,由于试验地发生淹水现象而呈现双峰曲线特征;模拟氮沉降显著抑制了杨树人工林土壤呼吸作用。对照组、低氮水平处理组、中氮水平处理组和高氮水平处理组的土壤总呼吸速率的年均值分别为 3.21、2.82、2.82、2.72  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,相当于每年排放出的 CO<sub>2</sub>的量分别为 42.06、37.06、36.20、35.69 t/hm<sup>2</sup>;各组土壤微生物呼吸的年均值分别为 2.12、2.05、1.96、1.99  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,模拟氮沉降抑制了土壤微生物呼吸作用,但其影响不显著;各组根呼吸的年平均值分别为 1.09、0.77、0.86、0.75  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,模拟氮沉降对根系呼吸有显著的抑制作用。

关键词:土壤呼吸;氮沉降;杨树;滩地;长江中下游

# Effects of simulated nitrogen deposition on the each component of soil respiration in the *Populus* L. plantations in a riparian zone of the mid-lower Yangtze River

WU Di<sup>1,4</sup>, ZHANG Rui<sup>3</sup>, GAO Shenghua<sup>2</sup>, FU Xiao<sup>3</sup>, DENG Hongbing<sup>3</sup>, SHAO Guofan<sup>1</sup>, ZHANG Xudong<sup>2,\*</sup>

1 Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 State Key of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Continuous increasing production and deposition of nitrogen will have a significant impact on carbon cycling of ecosystems. Soil respiration is the important component of carbon cycling in terrestrial ecosystems, the only way to release carbon into atmosphere from soil carbon, and an important source of atmospheric  $CO_2$ . Study on the response of soil respiration to nitrogen deposition is significant for understanding the role of soil respiration in the mitigation of climate change. By using the experimental method of positioning the simulated nitrogen deposition, this research was focused mainly on the variations in soil respiration, and the short-term response of each component of soil respiration to different levels of

收稿日期:2013-11-28; 网络出版日期:2014-07-07

基金项目:国家"十二五"农村领域科技计划子课题(2011BAD38B0405)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhxd@ caf.ac.cn

nitrogen deposition, and revealed the relationship between carbon and nitrogen cycling of Populus L. plantations in a riparian zone of Yangtze River. We found that: (1) Soil respiration and its components had significant seasonal variations. presenting bimodal curves because of seasonal flooding. Soil respiration rate showed a downward trend because of rising of groundwater level in June and July, reached the maximum in August and the minimum in December and January. (2) The average of annual total soil respiration of control, low-nitrogen, medium-nitrogen and high-nitrogen treatments in the poplar plantations were 3.21, 2.82, 2.82 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> and 2.72 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> of CO<sub>2</sub>, respectively, equivalent to 42.06, 37.06, 36.21 t/hm<sup>2</sup> and 35.69 t/hm<sup>2</sup> of = CO<sub>2</sub>released annually. The annual amounts of CO<sub>2</sub>released from low-nitrogen, mediumnitrogen and high-nitrogen treatments were reduced by 12.35%, 14.45% and 15.73%, respectively. Nitrogen deposition significantly restrained the function of total soil respiration. (3) The average of annual soil microbial respirations of control, low-nitrogen, medium-nitrogen and high-nitrogen treatments in the poplar plantations were 2.12, 2.05, 1.96 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> and 1.99 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, respectively, equivalent to 27.85, 26.98, 25.24 t/hm<sup>2</sup> and 25.95 t/hm<sup>2</sup> of CO<sub>2</sub> released per annual. The annual amount of CO, released from low-nitrogen, medium-nitrogen and high-nitrogen treatments were reduced by 3. 23%, 9.70% and 7.07%, respectively. The magnitude of the decreases was significantly lower than that for the total soil respiration. Nitrogen deposition restrained the function of soil microbial respiration, and this action is not significant. (4) The average of annual root respirations of control, low-nitrogen, medium-nitrogen and high-nitrogen treatments in the poplar plantations were 1.09, 0.77, 0.86  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> and 0.75  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, respectively, equivalent to 14.22, 10.08, 10.96 t/hm<sup>2</sup> and 9.97 t hm<sup>-2</sup> of CO, released annually. The annual amount of CO, released from low-nitrogen, medium-nitrogen and high-nitrogen treatments were reduced by 30.31%, 23.81% and 31.07%, respectively. Such levels of decreases were significantly higher than those for the total soil respiration and the soil microbial respiration. Nitrogen deposition significantly restrained the root respiration.

Key Words: soil respiration; nitrogen deposition; Populus plantation; riparian zone; the mid-lower Yangtze River

人类活动的增强严重干扰了全球氮循环的平衡,同时对全球的固氮速率和氮收支状况产生了极大的影响。大气氮沉降已经成为三大全球变化现象之一<sup>[1]</sup>。从 1980 年至 2010 年中国陆地生态系统氮素沉降量显著升高,从 1980 年代的 13.2 Kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>增至 2000 年代的 21.1 Kg N hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,过去 30 年间(1980—2010年)我国出现了区域性大气活性氮污染、氮素沉降以及农田与非农田生态系统"氮富集"加剧的现象<sup>[2]</sup>。中国已经成为三大氮沉降区(欧洲、美国和中国)之一<sup>[3]</sup>。氮沉降量的增加影响了各种生态系统过程,并引发了许多严重的生态学问题<sup>[4-9]</sup>。活性氮制造速率的增加和氮沉降量增加的全球化也强烈影响了生态系统的碳循环<sup>[10-11]</sup>,因此森林生态系统碳循环对氮沉降的响应成为了科学工作者关注的焦点<sup>[12]</sup>。

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环过程的重要组成部分,也是土壤碳库向大气输出碳的主要途径和大气 CO<sub>2</sub>重要的源<sup>[13]</sup>,在很大程度上决定着全球气候变化与碳循环间的反馈关系<sup>[14]</sup>。土壤微生物呼吸和根呼吸 是土壤呼吸的主要成分,土壤动物呼吸和化学氧化过程对土壤呼吸的作用较小,通常忽略不计<sup>[15]</sup>。全球每年 因土壤呼吸作用向大气中释放的碳的估算值约为 75—120 Pg<sup>[16]</sup>,是化石燃料燃烧排放量的 10 倍以上<sup>[17]</sup>。 土壤呼吸速率的微小变化就会显著改变大气中 CO<sub>2</sub>浓度和土壤碳素的周转速率<sup>[15]</sup>,进而延缓或加剧气候变 化。因此土壤呼吸已经成为全球碳循环研究的焦点和核心。

我国关于氮沉降对森林生态系统影响的研究还处于起步阶段,关于氮沉降对于土壤呼吸的影响还没有一致的结论<sup>[18-25]</sup>。杨树是我国人工造林面积最大的人工林,到 2009 全国面积已经达到 757.23 万 hm<sup>2[26]</sup>。杨树 被广泛用作长江滩地的防护林<sup>[27]</sup>,关于滩地杨树人工林的温室气体的通量及变化特征的研究已经取得了一定的进展<sup>[28-30]</sup>,但关于杨树人工林碳循环过程对氮沉降响应的研究尚未开展。本文以位于湖南省岳阳市君 山区的长江滩地杨树人工林为研究对象,通过定位模拟氮沉降的实验方法,研究滩地杨树人工林生态系统土 壤呼吸的变化特征,以探讨土壤呼吸各组分对不同氮沉降量的响应特征,揭示碳氮循环过程间的联系和影响,

为预测在氮沉降量增加的背景下滩地杨树人工林生态系统土壤碳通量的变化提供理论依据和数据支持,以准确评估滩地生态系统碳平衡对模拟氮沉降的响应,为杨树人工林的可持续发展和科学经营管理提供依据。

#### 1 研究区概况

研究区位于湖南省岳阳市君山区广兴洲镇的长江外滩,位于北纬 29°31′40″,东经 112°51′34″,海拔 31 m。 本区位于中亚热带向北亚热带过渡气候区,具有典型的亚热带湿润季风气候特征,春夏多雨、秋季多旱、冬季 严寒。年均气温 16.5—17.0 ℃,降雨量 1200.7—1414.6 mm。无霜期 263.7—276.6 d,年日照 1644.3— 1813.8 h。土壤为江湖滩地特有的潮土类型。滩地每年汛期平均淹水时间为 20 —50 d,最长可达 130 d,其淹 水退水受制于长江水位。2012 年夏季,长江水位较高,滩地发生淹水,从 7 月 6 日一直持续至 8 月 10 日,共计 36 d。

研究区内原有 2000 年营造的黑杨派系的欧美杨(Populus dettoides),于 2011 年皆伐,并于 2012 年 1 月再 次营造杨树林,品种仍为欧美黑杨。株行距为 5 m×6 m。林下由于季节性的水淹,只有草本植物,主要优势种 为狗牙根(Cynodondactylon)、益母草(Leonurus artemisia)等。

## 2 研究方法

## 2.1 样地设置

2012年2月,在杨树人工林内选择具有代表性、立地条件基本一致的地段,按照随机区组实验设计方法 设置实验。用人工添加 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>模拟氮沉降,湖南地区氮沉降量约为 2.6 g m<sup>-2</sup> a<sup>-1[31-33]</sup>,因此设低氮(LN,5 gN m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)、中氮(MN,10 gN m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)和高氮(HN,20 gN m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>)3个水平和对照组(CK,0 gN m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>),不包括大 气沉降的氮量。每个处理 3 个重复,共建立 24 个 2 m×2 m 大小的样方。每个区组之间间隔 5 m,同一区组两 个样方之间设 4 m 的缓冲带。

用壕沟法进行土壤呼吸组分的分离。由于土壤动物呼吸和化学氧化过程对土壤呼吸的作用较小,本文忽略不计。本文在样方四周挖壕深至1m(植物根系分布层以下),壕内用铝板隔离样方周围的根系。再除去样方内所有活体植物,用于土壤微生物呼吸的测定,土壤总呼吸与土壤微生物呼吸之差为根系呼吸。

每个样方内安置1个土壤呼吸测定环(内径10 cm,高9 cm,插入土壤深度为7 cm),样地内共设置24个 PVC 土壤呼吸测定环,安装后不再移动,用以测定土壤呼吸速率。

将 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>的年施用量平均分成 12 等份,从 2012 年 2 月开始,每月末对各样方进行定量模拟氮沉降处 理,将各个样方每月所需的 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>溶于 0.5 L 水中,用自制喷雾器在样方内均匀喷洒在土壤表面,对照组则 只喷洒相同量的清水。

# 2.2 土壤呼吸的测定

采用动态封闭气室法,使用 LI-8100(LI-COR Inc.)土壤碳通量自动测量系统观测土壤呼吸。2012 年 4 月 至 2013 年 3 月,每月中旬选择一个最接近本月平均天气状况的典型天气进行土壤呼吸观测,代表各月的均值 分析土壤呼吸的季节变化特征。一般来说,10:00 左右的土壤呼吸速率最接近日平均值<sup>[34-35]</sup>,故可用此时段 的测量值代表土壤呼吸的日平均值<sup>[36]</sup>,本研究测定的时间段为 9:00—11:00。

为了减小安放土壤呼吸测定环对土壤呼吸速率的影响,土壤呼吸测定环埋好之后固定永久放置,并且在 每次测定前一天,将测定点土壤呼吸测定环内的地表植被自土壤表层彻底剪除,尽量不破坏土壤,以减少土壤 扰动及根系损伤对测量结果的影响。

2.3 数据处理方法

本文所有数据采用软件 SPSS 18.0 进行统计分析,使用软件 Sigmaplot 10.0 进行作图。

# 3 结果与分析

3.1 土壤呼吸的季节变化特征

各组土壤呼吸的季节变化如图1所示,不同氮添加水平的土壤呼吸均有明显的季节变化特征,各组的变

化特征相似,由于试验地发生淹水而呈现双峰曲线特征。5月达到第1个小高峰,6月由于地下水位的升高, 土壤呼吸有所下降。8月底9月初达到第2个高峰,7月由于发生季节性水淹,认为其土壤呼吸速率为0 $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>。12月—1月间为第2个低峰。土壤呼吸夏季高于冬季。对照组、低氮水平、中氮水平和高氮水平土 壤总呼吸最高值分别为6.82、6.30、7.62、6.36 $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>。12月至1月期间土壤呼吸达到最低,4组水平的 土壤呼吸速率最小值分别为1.1、0.97、0.84、0.95 $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>。



**图1 杨树人工林土壤呼吸速率的季节变化**(平均值±标准差,n=3)

月各处理间差异显著(单因素方差分析, LSD 多重比较, α=0.05); CK: control check, 对照组; LN: low nitrogen, 低氮水平; MN: middle

**Fig.1** Seasonal variations of soil respiration in a poplar plantation (Mean±SE, n=3) 文字表示多元素方差分析(LSD 多重比较法, $\alpha=0.05$ )结果差异显著性(时间效应,氮处理效应,时间和氮处理交互效应;\*\*P < 0.01;\*\*\* P < 0.001);星号表示各月份氮处理效应的差异显著性,\*P < 0.05;\*\*P < 0.01;不同大写字母表示月份间差异显著,不同小写字母表示每

# 3.2 氮沉降对土壤总呼吸的影响

nitrogen, 中氮水平;HN: high nitrogen, 高氮水平

对全年土壤呼吸数据分析可知,中氮水平土壤呼吸波动最强烈(变异系数 *C* = 0.78、变化幅度 *a* = 2.41), 高氮水平其次(*C* = 0.71、*a* = 1.99),对照组(*C* = 0.69、*a* = 1.77)和低氮水平(*C* = 0.67、*a* = 1.89)的变化幅度 相差不大。

由观测结果可知,对照组、低氮水平组、中氮水平组和高氮水平组的土壤总呼吸速率的年平均值分别为 3.21、2.82、2.82、2.72  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,各组土壤呼吸量分别为11.47、10.11、9.87、9.73 t C hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,相当于每年排 放出的 CO<sub>2</sub>的量分别为42.06、37.06、36.21、35.69 t/hm<sup>2</sup>。由此可知,低氮、中氮和高氮水平的土壤呼吸速率年 均值都低于对照组,全年尺度来看,模拟氮沉降整体抑制了杨树人工林的土壤呼吸作用,且随着氮浓度的增加 抑制作用增强。低氮、中氮和高氮处理每年排放的 CO<sub>2</sub>量分别减少了 5.01,5.86 t/hm<sup>2</sup>和 6.38 t/hm<sup>2</sup>,减少的幅 度分别为 12.35%,14.45%和 15.73%。

方差分析表明,氮处理效应对土壤总呼吸有极显著的影响(P=0.001),各组与对照之间均有极显著性差 异(P=0.001、0.002、0.000)。从各月份的单因素方差分析可以看出,5月、8月、9月、1月各组间差异显著,4 月、6月、10月、11月、12月、2月、3月各组间没有显著差异。因此,相对于非生长季节,生长季节氮处理对土 壤呼吸的影响更为显著。

#### 3.3 氮沉降对土壤微生物呼吸的影响

土壤微生物呼吸具有明显的季节变化,季节变化特征和土壤总呼吸总体一致,呈明显的双峰曲线趋势,如图2所示。生长季的土壤微生物呼吸高于非生长季,且生长季波动范围大于非生长季。对照组、低氮水平组、中氮水平组和高氮水平组一年之内土壤微生物呼吸的最大值分别为4.85、4.40、5.03、4.65  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,最小值分别为4.85、4.40、5.03、4.65  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,最小值分别为0.75、0.81、0.61、0.76  $\mu$ mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>。和土壤总呼吸相似,中氮水平组的波动最强烈(*C*=0.77、*a*=2.26),其次为高氮组(*C*=0.77、*a*=1.96),对照处理(*C*=0.74、*a*=1.93)稍高于低氮组(*C*=0.67、*a*=1.75)。各水平组土壤微生物呼吸占土壤总呼吸的比例分别平均为65.23%、73.32%、69.76%、72.10%。

对照组、低氮水平组、中氮水平组和高氮水平组的 土壤微生物呼吸速率的年平均值分别为 2.12、2.05、 1.96、1.99 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>。由于发生季节性水淹,水淹时 相当于对土壤进行封闭,淹水期间土壤呼吸速率为 0 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>。各水平处理组土壤微生物呼吸的呼吸



**图 2 杨树人工林土壤微生物呼吸的季节变化**(平均值±标准差, *n*=3)

Fig. 2 Seasonal variations of soil microbial respiration in a *Poplar* plantation (Mean $\pm$ SE, n=3)

文字表示多元素方差分析(LSD 多重比较法,α=0.05)结果差异显著性(时间效应,氮处理效应,时间和氮处理交互效应;\*\*P<0.01;\*\*\*P<0.001);星号表示各月份间氮处理效应的差异显著性,\*P<0.05;\*\*P<0.01

量分别为 7.59、7.36、6.88、7.08 t C hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,相当于每年排放出 CO<sub>2</sub>的量为 27.85、26.98、25.24、25.95 t/hm<sup>2</sup>。 低氮、中氮和高氮水平组每年排放的 CO<sub>2</sub>量分别减少了 0.87、2.61、1.90 t/hm<sup>2</sup>,减少的幅度分别为 3.23%, 9.70%,7.07%,减少的幅度明显小于土壤总呼吸。各水平的氮处理降低了土壤微生物呼吸速率,模拟氮沉降 抑制了土壤微生物呼吸作用。

方差分析表明,模拟氮沉降对土壤微生物呼吸的影响不显著(P=0.713),各水平处理组与对照之间均无显著差异。从各月份的单因素方差分析可以看出,只有4月和6月各处理间有显著差异(P=0.001、0.035),

可能与特殊的土壤条件有关,土壤温度和土壤湿度都较高,土壤孔隙度较小,土壤活动不旺盛,养分消耗较少, 故氮浓度的增加对土壤微生物呼吸的抑制作用较明显。

3.4 氮沉降对根系呼吸的影响

根系呼吸的季节变化如图 3 所示,与土壤总呼吸和 土壤微生物呼吸相同,具有明显的季节变化特征,变化 特征较为相似,各水平处理组根系呼吸均基本表现出双 峰曲线趋势。根系呼吸生长季整体高于非生长季,且生 长季比非生长季的波动范围大。对照、低氮水平、中氮 水平、高氮水平根系呼吸的最大值分别为 2.44、1.90、 2.59、1.71 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,最小值分别为 0.35、0.16、 0.23、0.26 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>。中氮水平的波动在各组中波 动最强烈(C = 0.84、a = 2.75),其次为低氮水平组 (C = 0.73、a = 2.26),对照组(C = 0.67、a = 1.92)比与 高氮水平组(C = 0.69、a = 1.93)相差不大。土壤总呼 吸、土壤微生物呼吸和根系呼吸,中氮水平处理的波动





文字表示多元素方差分析(LSD 多重比较法,α=0.05)结果差异 显著性(时间效应,氮处理效应,时间和氮处理交互效应;\*\*,P< 0.01;\*\*\*,P<0.001);星号表示各月氮处理效应的差异显著性, \*,P<0.05;\*\*,P<0.01 均为最强烈,且三者相比根系呼吸的波动最强烈。各水平组根系呼吸占土壤总呼吸比例的平均值分别为 34.77%、26.68%、30.24%、28.39%,由于为幼龄林,根系正处于生长阶段,地下根系量较少,故土壤根系呼吸的 比例较小。

对照组、低氮水平组、中氮水平组和高氮水平组的根系呼吸的年平均值分别为 1.09、0.77、0.86、0.75 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>。各组根系呼吸的呼吸量分别为 3.88、2.75、2.99、2.72 t C hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,相当于每年排放的 CO<sub>2</sub>的量分 别为 14.22、10.08、10.96、9.97 t/hm<sup>2</sup>。低氮、中氮和高氮水平每年排放的 CO<sub>2</sub>量分别减少了 4.14、3.25、4.24 t/ hm<sup>2</sup>,减少幅度分别为 30.31%、23.81%、31.07%,减少幅度明显高于土壤呼吸与土壤微生物呼吸。与土壤呼吸和土壤微生物呼吸相同,各水平的氮添加降低了根系呼吸速率,模拟氮沉降对根系呼吸有明显的抑制作用。

方差分析表明,氮添加处理对根呼吸产生了显著的影响(P=0.041)。低氮水平处理、高氮水平处理与对 照之间的差异达到显著水平(P=0.010、0.017),中氮水平处理与对照之间差异不显著(P=0.081)。对每个 月进行单因素方差分析,结果表明只有 8 月份各组之间差异显著,其他各月份各组之间的差异均不显著。

#### 4 讨论与结论

#### 4.1 讨论

氮沉降对森林土壤碳排放的影响主要表现为抑制、促进和不显著三种效果。在本研究中,模拟氮沉降加强了土壤呼吸的昼夜变化,抑制了滩地杨树人工林土壤呼吸作用。与许多研究结果一致<sup>[37-41]</sup>。但也有研究表明氮沉降对土壤呼吸作用有促进作用<sup>[42-44]</sup>。涂利华等<sup>[9]</sup>对华西雨屏区苦竹林的研究表明,氮沉降使细根生物量和代谢强度增加,并通过增加微生物活性促进了土壤碳的排放,莫江明等<sup>[24]</sup>发现模拟氮沉降增加了鼎湖山苗圃和主要森林土壤 CO<sub>2</sub>的排放。而李仁洪等<sup>[23]</sup>发现氮沉降抑制了华西雨屏区慈竹林土壤呼吸。胡正华等<sup>[45]</sup>的研究表明氮沉降显著降低了北亚热带落叶阔叶林的土壤呼吸。贾淑霞等<sup>[19]</sup>发现,氮沉降对落叶松和水曲柳的土壤呼吸均表现为抑制,在生长季中土壤呼吸速率分别下降了 30%和 24%,张徐源等<sup>[46]</sup>研究发现氮沉降初期明显抑制了樟树人工林土壤呼吸,与本文研究结果一致。Franklin<sup>[47]</sup>对一块连续施氮 20a 的针叶林样地研究后,得出施氮样地的土壤总呼吸量要比对照样地低 40%左右,并认为当土壤氮含量超过一定程度,例如达到饱和状态后,过量的氮沉降就会对土壤呼吸产生抑制的作用,与 Maier 和 Kress<sup>[48]</sup>的结论一致。

氮沉降通过改变土壤微生物活性和土壤或凋落物的 C/N 比,进而改变土壤碳排放速率。在氮素缺乏的 森林中,氮沉降对土壤碳排放的影响不显著,促进和抑制碳排放都有报道,在氮饱和的森林中,氮沉降多为减 少土壤碳的排放。长江滩地属于氮素丰富立地,特别是每年的水淹等于是给杨树人工林一次施肥,因此,氮沉 降引起土壤呼吸减弱的原因可能是,首先是减少了根生物量,抑制了植物根系的活性,从而抑制了根呼吸,使 得土壤呼吸速率降低;其次是氮沉降增加了土壤氨态氮及硝态氮含量,抑制了与有机质分解有关的酶的数量 及活性,从而使得土壤 CO<sub>2</sub>排放减少;第三是氮沉降加速滩地土壤酸化,导致土壤 pH 值降低,抑制植物根系生 长,从而影响土壤呼吸;第四是氮沉降能降低外生菌根真菌的物种丰富度和数量,改变其群落组成,降低微生 物多样性指数,从而降低凋落物的分解速率,限制了土壤呼吸。

杨树林人工林生态系统对氮沉降的响应研究只是在研究其响应特征,但对于土壤呼吸对氮添加的响应的 调控机制理解得还远远不够。添加氮能促进凋落物和土壤有机质中纤维素或其他更容易分解的化合物的分 解,而会抑制木质素和其他更难分解的化合物的分解。这使得氮添加对土壤呼吸的影响会随着地点、土壤类 型和植被盖度的不同而不同。根系生物量的变化、凋落物的分解和土壤有机质的变化都受到氮沉降的影响, 同时也是影响土壤呼吸的重要因素。土壤呼吸是一个复杂的生物学过程,其对氮沉降的响应包含了很多的化 学和生物学过程,土壤呼吸的各组分的底物供应和所需的土壤环境条件也不相同,因此应通过土壤理化性质 和植物的特性指标的监测来探讨土壤呼吸各组分对氮沉降响应的调控机制。

4.2 结论

(1) 土壤呼吸及其各组分均具有明显的季节变化,由于试验地发生淹水现象而呈现双峰曲线特征。杨树

人工林年平均土壤呼吸速率为 3.21 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,土壤呼吸量为 11.47 tC hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,相当于每年排放出 CO<sub>2</sub>的 量为 42.06 t/hm<sup>2</sup>。土壤微生物呼吸占土壤总呼吸的比例平均为 65.23%,根系呼吸所占比例为 34.77%。

(2)模拟氮沉降加强了土壤呼吸的昼夜变化,抑制了滩地杨树人工林土壤呼吸作用。相对于非生长季节,生长季节氮处理对土壤呼吸的影响更为显著。氮处理效应对土壤总呼吸和根系呼吸有显著影响,土壤微 生物呼吸的影响不显著。有关氮沉降对土壤呼吸的影响作用和调控机理仍需进一步研究。

**致谢:**感谢湖南省林科院在野外观测工作中给予的支持,感谢中国林科院林业所申贵仓在野外观测和数据处 理中给予的帮助。

#### 参考文献(References):

- [1] Vitousek P M. Beyond global warming: ecology and global change. Ecology, 1994, 75(7): 1861-1876.
- [2] Liu X J, Zhang Y, Han W X, Tang A H, Shen J L, Cui Z L, Vitousek P, Erisman J W, Goulding K, Christie P, Fangmeier A, Zhang F S. Enhanced nitrogen deposition over China. Nature, 2013, 494(7438): 459-462.
- [3] 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, Vöosmarty C J. Nitrogen cycles: past, present and future. Biogeochemistry, 2004, 70(2): 153-226.
- [4] Rabalais N N. Nitrogen in aquatic ecosystems. Ambio, 2002, 31(2): 102-112.
- 5] Hall S J, Matson P A. Nitrogen oxide emissions after nitrogen additions in tropical forests. Nature, 1999, 400(6740): 152-155.
- [6] Köchy M, Wilson S D. Nitrogen deposition and forest expansion in the northern great plains. Journal of Ecology, 2001, 89(5): 807-817.
- [7] 莫江明, 薛璟花, 方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的响应. 生态学报, 2004, 24(7): 1413-1420.
- [8] 宋学贵, 胡庭兴, 鲜骏仁, 李伟, 武卫国, 肖春莲. 川西南常绿阔叶林凋落物分解及养分释放对模拟氮沉降的响应. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2167-2172.
- [9] 涂利华, 胡庭兴, 黄立华, 李仁洪, 戴洪忠, 雒守华, 向元彬. 华西雨屏区苦竹林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应. 植物生态学报, 2009, 33(4): 728-738.
- [10] 陈浩,莫江明,张炜,鲁显楷,黄娟. 氮沉降对森林生态系统碳吸存的影响. 生态学报, 2012, 32(21): 6864-6879.
- [11] 王晶苑,张心昱,温学发,王绍强,王辉民.氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制.生态学报,2013,33(5): 1337-1346.
- [12] Hobbie S E. Nitrogen effects on decomposition: a five-year experiment in eight temperate sites. Ecology, 2008, 89(9): 2633-2644.
- [13] 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.生态学报,1997,17(5):469-476.
- [14] 杨庆朋,徐明,刘洪升,王劲松,刘丽香,迟永刚,郑云普.土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性.生态学报,2011,31(8): 2301-2311.
- [15] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 7-20.
- [16] Hibbard K A, Law B E, Reichstein M, Sulzman J. An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems. Biogeochemistry, 2005, 73(1): 29-70.
- [17] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of IPCC. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
- [18] 涂利华, 胡庭兴, 张健, 何远洋, 田祥宇, 肖银龙. 模拟氦沉降对华西雨屏区苦竹林细根特性和土壤呼吸的影响. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2472-2478.
- [19] 贾淑霞,王政权,梅莉,孙月,全先奎,史建伟,于水强,孙海龙,谷加存.施肥对落叶松和水曲柳人工林土壤呼吸的影响.植物生态学报,2007,31(3):372-379.
- [20] Jia S X, Wang Z Q, Li X P, Sun Y, Zhang X P, Liang A Z. N fertilization affects on soil respiration, microbial biomass and root respiration in Larix gmelinii and Fraxinus mandshurica plantations in China. Plant and Soil, 2010, 333(1/2): 325-336.
- [21] 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.
- [22] 方运霆,莫江明, Gundersen P, 周国逸, 李德军. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应. 生态学报, 2004, 24(7): 1523-1531.
- [23] 李仁洪, 涂利华, 胡庭兴, 张健, 鲁洋, 刘文婷, 雒守华, 向元彬. 模拟氮沉降对华西雨屏区慈竹林土壤呼吸的影响. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1649-1655.
- [24] 莫江明,方运霆,徐国良,李德军,薛璟花. 鼎湖山苗圃和主要森林土壤 CO<sub>2</sub>排放和 CH<sub>4</sub>吸收对模拟 N 沉降的短期响应. 生态学报, 2005, 25(4): 682-690.
- [25] 肖辉林. 大气氮沉降对森林土壤酸化的影响. 林业科学, 2001, 37(4): 111-116.
- [26] 国家林业局. 中国森林资源报告: 第七次全国森林资源清查. 北京: 中国林业出版社, 2009.
- [27] 张旭东,彭镇华,周金星.抑螺防病林生态系统抑螺机理的研究进展.世界林业研究. 2006, 19(3): 38-43.
- [28] 王妍,彭镇华,江泽慧,刘杏娥,张旭东,周金星,孙启祥.长江滩地杨树林生态系统的碳通量特征.林业科学,2009,45(11):156-160.

- [29] 魏远,张旭东,江泽平,周金星,汤玉喜,吴立勋,黄玲玲,高升华.湖南岳阳地区杨树人工林生态系统净碳交换季节动态研究.林业科 学研究,2010,23(5);656-665.
- [30] 高升华,张旭东,汤玉喜,张蕊,唐洁,张雷,申贵仓,魏远.滩地美洲黑杨人工林皆伐对地表甲烷通量的短期影响.林业科学,2013,49 (1):7-13.
- [31] 张龚,曾光明,蒋益民,刘鸿亮. 湖南省大气湿沉降化学研究. 中国环境监测, 2003, 19(5): 7-11.
- [32] 蒋益民. 湖南省城市与森林的大气湿沉降化学及其作用机理 [D]. 长沙: 湖南大学, 2004.
- [33] 杜春艳. 中亚热带韶山森林的大气沉降特征及对酸沉降的生态响应研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [34] Larionova A A, Rozonova L N, Samoylov T I. Dynamics of gas exchange in the profile of a grey forest soil. Soviet Soil Science, 1989, 21(3): 104-110.
- [35] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. Global Change Biology, 1998, 4(2): 217-227.
- [36] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. Global Change Biology, 2001, 7(6): 667-677.
- [37] 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.
- [38] Burton A J, Pregitzer K S, Crawford J N, Zogg G P, Zak D R. Simulated chronic NO<sub>3</sub> deposition reduces soil respiration in northern hardwood forests. Global Change Biology, 2004, 10(7): 1080-1091.
- [39] Olsson P, Linder S, Giesler R, Högberg P. Fertilization of boreal forest reduces both autotrophic and heterotrophic soil respiration. Global Change Biology, 2005, 11(10): 1745-1753.
- [40] Wallenstein M D, McNulty S, Fernandez I J, Boggs J, Schlesinger W H. Nitrogen fertilization decreases forest soil fungal and bacterial biomass in three long-term experiments. Forest Ecology and Management, 2006, 222(1): 459-468.
- [41] Mo J M, Zhang W, Zhu W X, Gundersen P, Fang Y T, Li D J, Wang H. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China. Global Change Biology, 2008, 14(2): 403-412.
- [42] Craine J M, Wedin D A, Reich P B. The response of soil CO<sub>2</sub> flux to changes in atmospheric CO<sub>2</sub>, nitrogen supply and plant diversity. Global Change Biology, 2001, 7(8): 947-953.
- [43] Reich P B, Knops J, Tilman D, Craine J, Ellswor D, Tjoelker M, Lee T, Wedin D, Naeem S, Bahauddin D, Hendrey G, Jose S, Wrage K, Goth J, Bengston W. Plant diversity enhances ecosystem responses to elevated CO<sub>2</sub> and nitrogen deposition. Nature, 2001, 410(6830): 809-810.
- [44] Cleveland C C, Townsend A R. Nutrient additions to a tropical rain forest drive substantial soil carbon dioxide losses to the atmosphere. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(27): 10316-10321.
- [45] 胡正华,李涵茂,杨燕萍,陈书涛,李岑子,申双和.模拟氮沉降对北亚热带落叶阔叶林土壤呼吸的影响.环境科学,2010,31(8): 1726-1732.
- [46] 张徐源, 闫文德, 马秀红, 郑威, 王光军, 梁小翠. 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, 2012, 32 (3): 109-113.
- [47] Franklin O, Högberg P, Ekblad A, Ågren G I. Pine forest floor carbon accumulation in response to N and PK additions: bomb <sup>14</sup>C modelling and respiration studies. Ecosystems, 2003, 6(7): 644-658.
- [48] Maier C A, Kress L W. Soil CO<sub>2</sub> evolution and root respiration in 11 year-old loblolly Pine (*Pinus taeda*) Plantations as affected by moisture and nutrient availability. Canadian Journal of Forest Research, 2000, 30(3): 347-359.