

DOI: 10.5846/stxb201311282834

周政达, 张蕊, 高升华, 张旭东, 付晓, 唐明方, 吴钢. 模拟氮沉降对长江滩地杨树林土壤呼吸温度敏感性的影响. 生态学报, 2015, 35(21): - .
Zhou Z D, Zhang R, Gao S H, Zhang X D, Fu X, Tang M F, Wu G. Effects of simulated nitrogen deposition on temperature sensitivity of soil respiration components in *Populus L.* plantations in a riparian zone of the Yangtze River. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21): - .

模拟氮沉降对长江滩地杨树林土壤呼吸温度敏感性的影响

周政达^{1,3}, 张蕊^{1,*}, 高升华², 张旭东², 付晓¹, 唐明方¹, 吴钢¹

1 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

2 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 研究氮沉降量增加对土壤呼吸温度敏感性的影响, 对于研究土壤呼吸在气候变化中的作用有重要意义。本文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的方法, 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的温度敏感性对几种氮沉降量浓度的短期响应。结果表明: (1) 各处理土壤总呼吸、土壤微生物呼吸、根系呼吸与各层次土壤温度均呈显著正相关关系, 和 5cm 层土壤温度相关性最大。5cm 层土壤温度可以解释土壤总呼吸、土壤微生物呼吸和根系呼吸季节变化的比例分别为 50.5%—71.0%、51.5%—73.9%、35.7%—63.2%; (2) 对照组 (CK, 0gN m⁻² a⁻¹) 土壤总呼吸、土壤微生物呼吸与根呼吸的 Q₁₀ 值分别为 2.54、2.72 和 1.94; (3) 在各氮添加水平中, 中氮水平 (MN, 10gN m⁻² a⁻¹) 促进了土壤总呼吸、土壤微生物呼吸和植物根呼吸的温度敏感性。高氮水平 (HN, 20gN m⁻² a⁻¹) 都降低了土壤总呼吸、土壤微生物呼吸和植物根呼吸的温度敏感性, 低氮水平 (LN, 5gN m⁻² a⁻¹) 降低了土壤总呼吸和土壤微生物呼吸的温度敏感性, 促进了根呼吸的敏感性。

关键词: 长江滩地, 杨树人工林, 土壤呼吸温度敏感性, 氮沉降

Effects of simulated nitrogen deposition on temperature sensitivity of soil respiration components in *Populus L.* plantations in a riparian zone of the Yangtze River

ZHOU Zhengda^{1,3}, ZHANG Rui^{1,*}, GAO Shenghua², ZHANG Xudong², FU Xiao¹, Tang Mingfang¹, Wu Gang¹

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

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

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

Abstract: By the end of the 20th century, China has become one of the world's top three regions of nitrogen deposition. Continuous increase in production and deposition of nitrogen has a significant impact on the carbon cycle in the ecosystem. Therefore, the response of the carbon cycle in a forest ecosystem to nitrogen deposition has become a very important scientific issue. Soil respiration is an important component of the carbon cycle in terrestrial ecosystems, and it is also the only path of carbon output into the atmosphere from the soil and an important source of atmospheric CO₂. A study on the response of temperature sensitivity of soil respiration to nitrogen deposition is important for understanding the role of soil respiration in the mitigation of climate change. In this paper, based on the simulations of different quantities of nitrogen depositions, our research was focused on the changes in soil respiration and on the short-term responses in temperature

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划子课题 (2011BAD38B0405)

收稿日期: 2013-11-28; 网络出版日期: 2015-04-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ruiyini@ hotmail.com

sensitivity of each component of soil respiration to several gradients of nitrogen deposition in *Populus L.* plantations in a riparian zone of the Yangtze River. We found that: (1) Soil respiration and its components exhibited significant seasonal variations, in the form of bimodal curves, because of the seasonal flooding. The rate of soil respiration showed a downward trend because of the rise in groundwater level in June and July, which reached the maximum in August and the minimum in December and January. The correlation between soil temperature at different depths (5 cm, 10 cm, and 20 cm) and total soil respiration was significantly positive. The correlation between root respiration and soil temperature at different depths was lower than that between total soil respiration and soil microbial respiration. The correlation was the highest between the soil temperature at a depth of 5 cm and total soil temperature. The soil temperature at a depth of 5 cm explained 50.5%—71.0%, 51.5%—73.9%, and 35.7%—63.2% of total soil temperature, soil microbial respiration, and root respiration, respectively. (2) The Q_{10} values of total soil respiration, soil microbial respiration, and root respiration in the control group (CK, $0\text{gN m}^{-2} \text{a}^{-1}$) were 2.54, 2.72, and 1.94, respectively. (3) The treatment with the medium levels of nitrogen (MN, $10\text{gN m}^{-2} \text{a}^{-1}$) enhanced the temperature sensitivity of total soil respiration, soil microbial respiration, and root respiration, whereas the treatment with high levels of nitrogen (HN, $20\text{gN m}^{-2} \text{a}^{-1}$) reduced their temperature sensitivity. The treatment with low levels of nitrogen (LN, $5\text{gN m}^{-2} \text{a}^{-1}$) also reduced the temperature sensitivity of total soil respiration and soil microbial respiration but enhanced root respiration.

Key Words: Riparian zone of the Yangtze River, *Populus* plantation, Temperature sensitivity of soil respiration, Nitrogen deposition

自工业革命后,人类活动对原本平衡的全球氮循环产生了强烈的干扰,并极大影响了全球的固氮速率和氮收支状况^[1]。在 20 世纪末,中国已经成为三大氮沉降区(欧洲、美国和中国)之一^[1]。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^[2,3],因此森林生态系统碳循环对氮沉降的响应成为了极为重要的科学问题^[4,5]。

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重要的源^[6]。土壤呼吸包括三个生物学过程(土壤微生物呼吸、土壤动物呼吸、根呼吸)和一个非生物学过程(含碳物质的化学氧化过程)^[7]。其中,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^[8],本文也忽略不计。

土壤呼吸受多种因素的综合影响,其中温度是影响土壤呼吸的关键因子。温度敏感性指数(Q_{10})用来表示土壤温度每升高 10°C 所引起的土壤呼吸的变化率,是定量描述土壤呼吸与土壤温度关系的重要指标^[7,9],在很大程度上决定着全球气候变化与碳循环之间的反馈关系^[10]。因此,研究氮沉降量增加对土壤呼吸温度敏感性的影响,有助于分析土壤呼吸对氮沉降量增加的响应,同时对进一步了解气候变化原因具有重要意义。虽然近年来在森林碳氮循环领域开展了一些研究,但已有研究结果未能明确表明氮沉降对土壤呼吸温度敏感性的影响方向及效应的大小。

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^2 ^[11]。杨树被广泛用作长江滩地的防护林^[12],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^[13,14],但杨树人工林碳循环过程对氮沉降增加的响应的研究尚未开展。本文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温度敏感性的变化特征,以探讨土壤呼吸各组分的温度敏感性对不同氮沉降量的响应特征,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呼吸及碳通量的变化提供理论依据和数据支持,并有助于全面了解滩地杨树人工林在气候变化背景下的碳汇功能和准确评估滩地生态系统碳平衡对模拟氮沉降的响应,对进一步了解气候变化原因有重要意义。

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 $29^{\circ}31'40''$,东经 $112^{\circ}51'34''$,海拔 31m 。

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 1200.7mm—1414.6mm。无霜期 263.7d—276.6d,年日照 1644.3h—1813.8h。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 20d—50d,最长可达 130d,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 36d。

研究区内原有 2000 年营造的黑杨派系的欧美杨(*Populus deltoides*),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 5m×6m。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(*Cynodon dactylon*)、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。建立 24 个 2m×2m 大小的样方,分为三个区组,每个区组之间间隔 5m,同一区组两个样方之间设 4m 的缓冲带。在样方内安置 10cm 土壤呼吸环(内径 10cm,高 9cm,插入土壤深度为 7cm)。每个样方内安置 1 个土壤呼吸测定环,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。

用喷洒 NH_4NO_3 模拟氮沉降,湖南地区氮沉降量约为 $2.6\text{g m}^{-2}\text{a}^{-1}$ [15-17],设低氮(LN, $5\text{gN m}^{-2}\text{a}^{-1}$)、中氮(MN, $10\text{gN m}^{-2}\text{a}^{-1}$)和高氮(HN, $20\text{gN m}^{-2}\text{a}^{-1}$) 3 个水平和对照组(CK, $0\text{gN m}^{-2}\text{a}^{-1}$),不包括大气沉降的氮量。每个处理 3 个重复,每个区组内样方的处理模式利用随机数表进行随机安排。

将 NH_4NO_3 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_4NO_3 溶于 0.5L 水中,用自制喷雾器在该样方内来回均匀喷洒,对照组则只喷洒相同量的清水。

用壕沟法进行土壤呼吸组分的分离。在每月喷洒 NH_4NO_3 之前除去样方内的活体植物,以保持样方内没有活体植物,用于土壤微生物呼吸的测定。

2.2 土壤呼吸的测量

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日期进行土壤呼吸观测,代表各月的均值分析土壤呼吸的季节变化特征。一般来说,上午 10 点左右的土壤呼吸速率最接近日平均值 [18,19],故可用此时段的测量值代表土壤呼吸的日平均值 [20],本研究测定时间为 9:00—11:00。

在进行土壤呼吸观测的同时测定土壤温度。采用 LI-8100 配备的温湿度传感器测定 10cm 深处的土壤温度,另用土壤温度测量仪测定 5cm 和 15cm 深处的土壤温度。

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 1 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 数据分析

本研究采用 Van't Hoff 指数模型($R=ae^{bT}$)研究土壤呼吸和土壤温度之间的关系。其中,R 为土壤呼吸速率,a 为温度 0℃时土壤呼吸速率,b 为温度反应常数。 Q_{10} 值计算方法为: $Q_{10}=e^{10b}$ 。式中 b 是 Van't Hoff 指数模型($R=ae^{bT}$;)中的温度反应常数。

本文所有数据采用软件 SPSS 18.0 进行统计分析,通过 One-way ANOVA 在 95%置信度水平上分析,用 LSD 法比较不同处理间的差异显著性。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

土壤呼吸的季节变化如图 1 所示,由此可以看出土壤呼吸具有明显的季节变化,由于试验地发生淹水现

象而出现特殊的变化规律,呈现双峰曲线特征。研究区域发生季节性水淹现象,6月份地下水位开始逐渐上涨,7月6日超过地表面,将试验地淹没,并于8月10日退水。由图1可以看出,4月和5月土壤总呼吸随着土壤温度的上升而呈现上升趋势,6月土壤呼吸有所下降,这和地下水位的升高有关,由于7月发生季节性水淹,水淹时相当于对土壤进行封闭,故淹水期间土壤呼吸速率为 $0\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。水退后8月底9月初土壤总呼吸速率达到最大值,之后随着土壤温度的下降而逐渐降低,在12月至1月间达到最小值,2月和3月随着土壤温度的升高土壤呼吸速率也逐渐升高。土壤呼吸夏季普遍高于冬季。年平均土壤呼吸速率为 $3.21\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$,最大值为 $6.82\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$,最小值为 $1.1\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

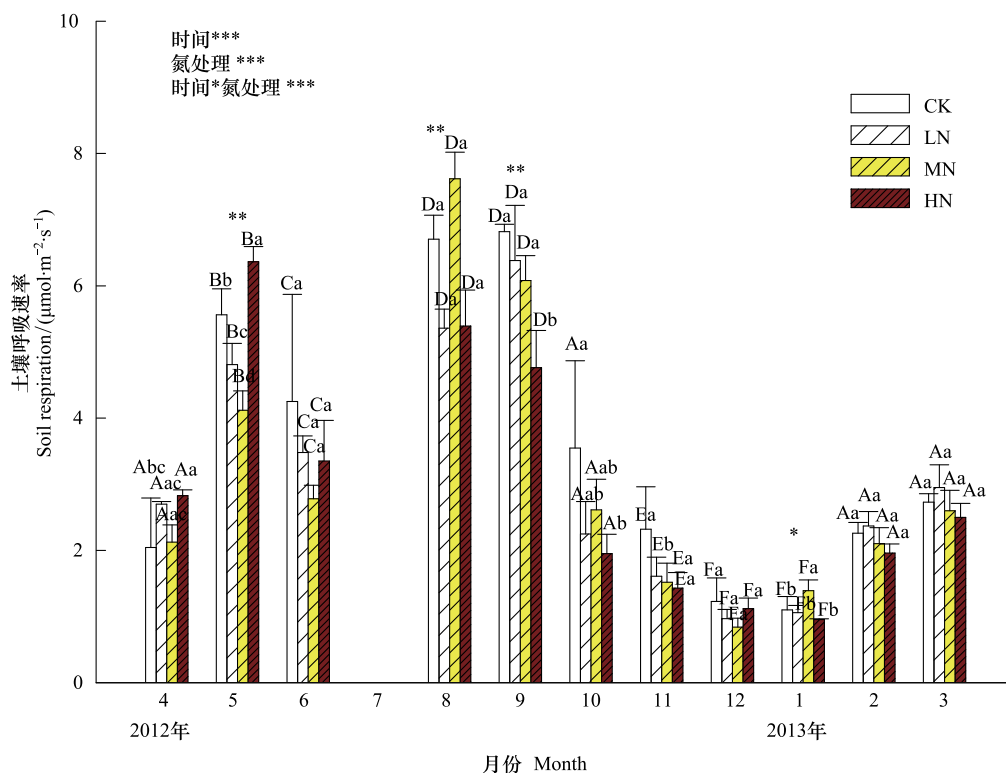


图1 杨树人工林土壤呼吸速率的季节变化(平均值±标准差, $n=3$)

Fig. 1 Seasonal variations of soil respiration in a poplar plantation (Mean $\pm$ SE, $n=3$)

注: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月各处理间差异显著(单因素方差分析, LSD多重比较, $\alpha=0.05$)

3.2 土壤呼吸与土壤温度的相关性分析

土表5cm、10cm、15cm深度的土壤温度的季节变化如图2所示,对土壤呼吸和各层次土壤温度进行相关性分析。

土壤总呼吸与各层次土壤温度的相关性分析结果见表1。研究表明,各处理土壤呼吸与5cm、10cm、15cm深度的土壤温度都呈显著正相关关系,和5cm层土壤温度最相关。在各处理组中,对照组与三个深度的土壤温度相关性最大,且均达到极显著水平。高氮处理水平土壤呼吸速率与各层次的土壤温度相关性相对最小。土壤微生物呼吸与各层次土壤温度的相关性分析结果见表2,土壤微生物呼吸速率与各层次土壤温度均呈显著正相关关系。各处理组均和5cm层土壤温度相关性最大。对照组和中氮水平处理组与各层次土壤温度相关关系都达到极显著水平。对照组与各层次土壤温度的相关性最大。

根系呼吸与各层次土壤温度的相关性分析结果见表2,根系呼吸与各层次的土壤温度均呈正相关关系。对照组、低氮、中氮和高氮处理组的根呼吸与各层次土壤温度相关关系基本达到显著水平。各处理中,低氮处

理组与 5cm 层温度相关性最大,对照组与 10cm 层土壤温度相关性最大。土壤根呼吸与各层次的相关性明显低于土壤总呼吸与土壤微生物呼吸。

由于 5cm 层土壤温度与各土壤呼吸的相关性最大,故采用 5cm 层土壤温度进行拟合。

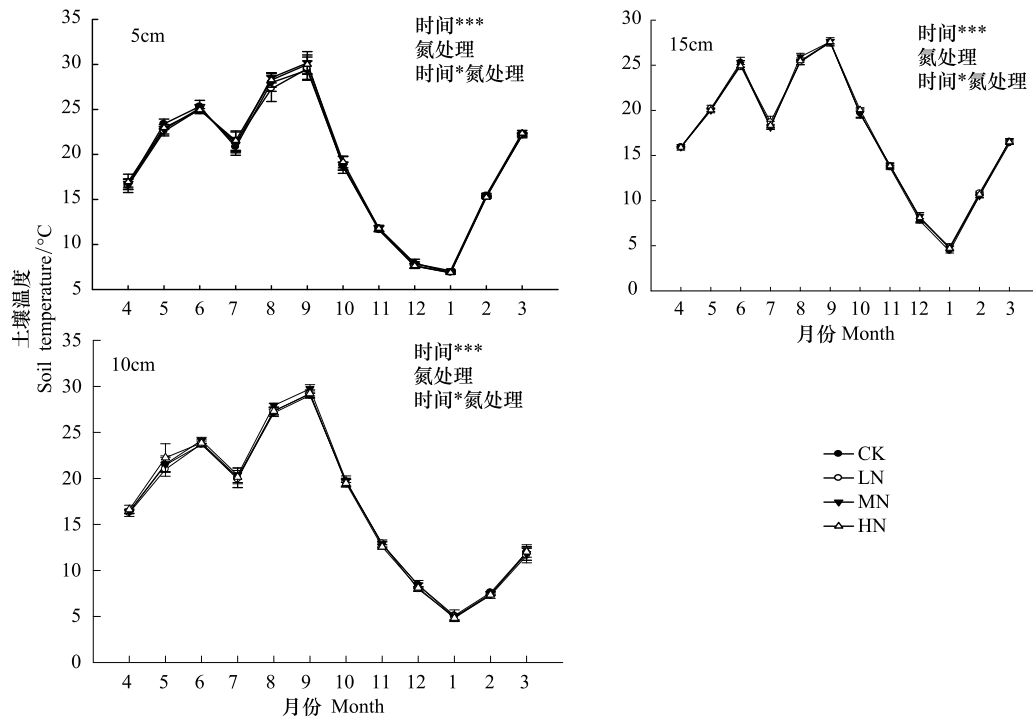


图 2 5cm、10cm、15cm 土壤温度季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of 5cm, 10cm, 15cm depth soil temperature in the poplar plantation

表 1 土壤总呼吸与各层次土壤温度的相关性

Table 1 The correlation between soil respiration and every depth soil temperature

处理 Treatment	5cm	10cm	15cm
CK	0.770 **	0.760 **	0.775 **
LN	0.760 **	0.712 **	0.738 *
MN	0.740 **	0.707 **	0.716 **
HN	0.686 **	0.677 **	0.662 **

注:CK;对照组;LN;低氮;MN;中氮;HN 高氮。* 显著水平为 0.05, ** 显著水平为 0.01

表 2 土壤呼吸各组分与各层次土壤温度的相关性

Table 2 The correlation between each component of soil respiration and soil temperature at each depth

土壤呼吸组分 Component of soil respiration	处理 Treatment	5cm	10cm	15cm
土壤微生物呼吸 Soil microbial respiration	CK	0.765 **	0.747 **	0.759 **
	LN	0.708 **	0.706 *	0.699 *
	MN	0.756 **	0.721 **	0.720 **
	HN	0.667 *	0.659 *	0.637 *
根系呼吸 Plant root respiration	CK	0.629 *	0.687 *	0.723 *
	LN	0.717 **	0.603 *	0.670 *
	MN	0.634 *	0.634 *	0.643 *
	HN	0.624 *	0.565	0.624 *

注: * 显著水平为 0.05, ** 显著水平为 0.01

3.3 土壤总呼吸的温度敏感性及其对氮沉降的响应

土壤总呼吸与 5cm 层土壤温度的指数模型拟合结果见表 3 和图 3。结果表明, Van't Hoff 指数模型能较好的表达土壤温度与土壤总呼吸的相关性。回归分析结果表明土壤温度可以解释 71.0%—50.5% 的土壤总呼吸。分析可得, 对照组土壤总呼吸的 Q_{10} 值为 2.54, 各处理水平中, 中氮水平处理温度敏感性指数最高, 提高了土壤呼吸的温度敏感性, 低氮水平和高氮水平处理均降低了土壤呼吸的温度敏感性。

表 3 土壤总呼吸与 5cm 层土壤温度的相关关系模型

Table 3 Best fitted equations of soil respiration against soil temperature in 5cm depth				
处理 Treatment	a	b	R^2	Q_{10}
CK	0.451	0.093	0.710	2.535
LN	0.439	0.089	0.682	2.435
MN	0.306	0.102	0.700	2.773
HN	0.603	0.073	0.505	2.075

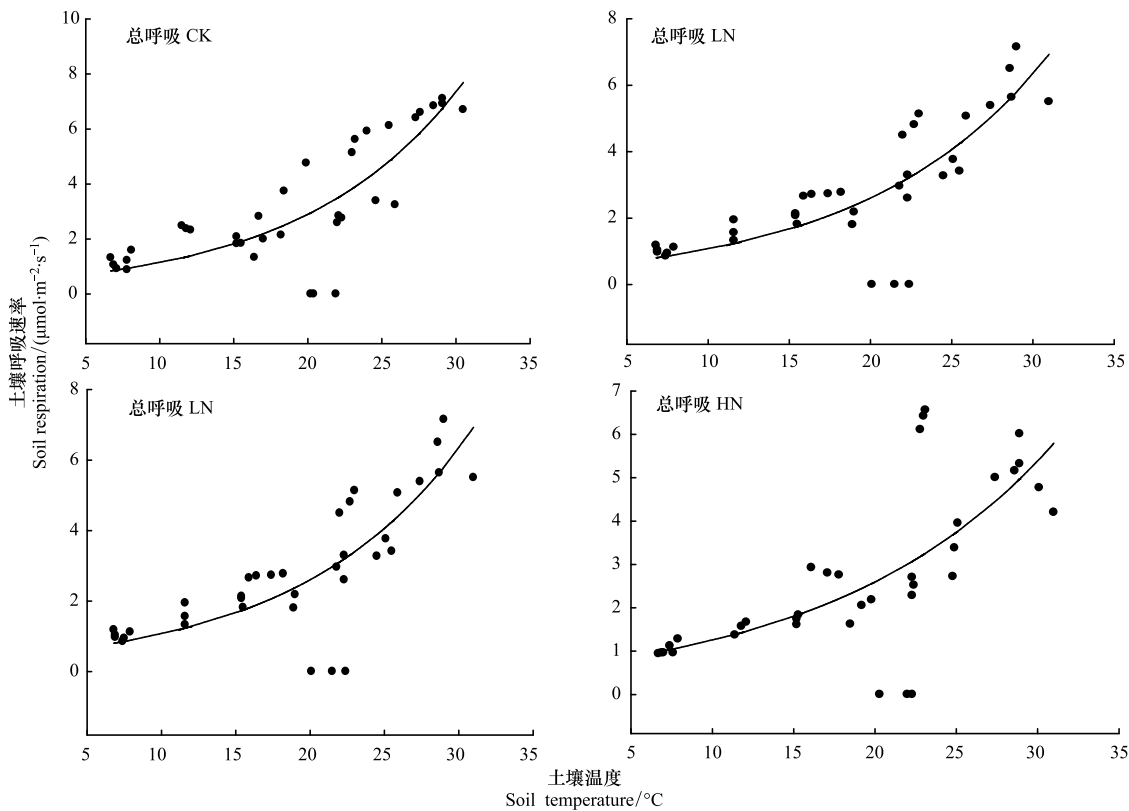


图 3 杨树人工林土壤呼吸速率与 5cm 土壤温度的关系

Fig. 3 Relationships, for each treatment, between total soil respiration rate and soil temperatures in 5 cm in a poplar plantation

3.4 土壤呼吸各组分的温度敏感性及其对氮沉降的响应

土壤微生物呼吸与 5cm 土壤温度的模型拟合结果见表 4 和图 4, 土壤温度能解释 73.9%—51.5% 的土壤微生物呼吸, Van't Hoff 指数模型能较好的表达土壤微生物呼吸与 5cm 层土壤温度之间的关系。对照组土壤微生物呼吸的温度敏感性指数为 2.72, 高于土壤总呼吸。中氮水平处理提高了土壤微生物呼吸的温度敏感性, 低氮水平和高氮水平均降低了土壤微生物呼吸的温度敏感性。除低氮水平外, 其他处理的土壤微生物呼吸温度敏感性均高于土壤总呼吸。

根系呼吸与 5cm 土壤温度的模型拟合结果见表 4 和图 5,根系呼吸与 5cm 层土壤温度之间的关系能通过 Van't Hoff 指数模型得到较好的表达。土壤温度能解释 35.7%—63.2% 的根系呼吸,和土壤总呼吸和土壤微生物呼吸相比,土壤温度对根系呼吸变化的贡献率明显较低。土壤根呼吸对照处理组的温度敏感性指数为 1.935,低于土壤总呼吸和土壤微生物呼吸,因此根呼吸对土壤温度变化不敏感。各处理土壤根呼吸的温度敏感性指数大小顺序为高氮<对照<中氮<低氮,低氮和中氮水平促进了土壤根呼吸的温度敏感性,低氮水平处理温度敏感性最高。

表 4 土壤呼吸各组分与土壤温度的相关关系模型

Table 4 Best fitted equations of each component of soil respiration against soil temperature

土壤呼吸组分 Components of soil respiration	处理 Treatment	a	b	R^2	Q_{10}
土壤微生物呼吸 Microbial respiration	CK	0.254	0.100	0.718	2.718
	LN	0.405	0.079	0.594	2.203
	MN	0.171	0.112	0.739	3.065
	HN	0.313	0.088	0.515	2.411
根系呼吸 Plant root respiration	CK	0.286	0.066	0.424	1.935
	LN	0.088	0.100	0.632	2.718
	MN	0.109	0.097	0.500	2.638
	HN	0.251	0.055	0.357	1.733

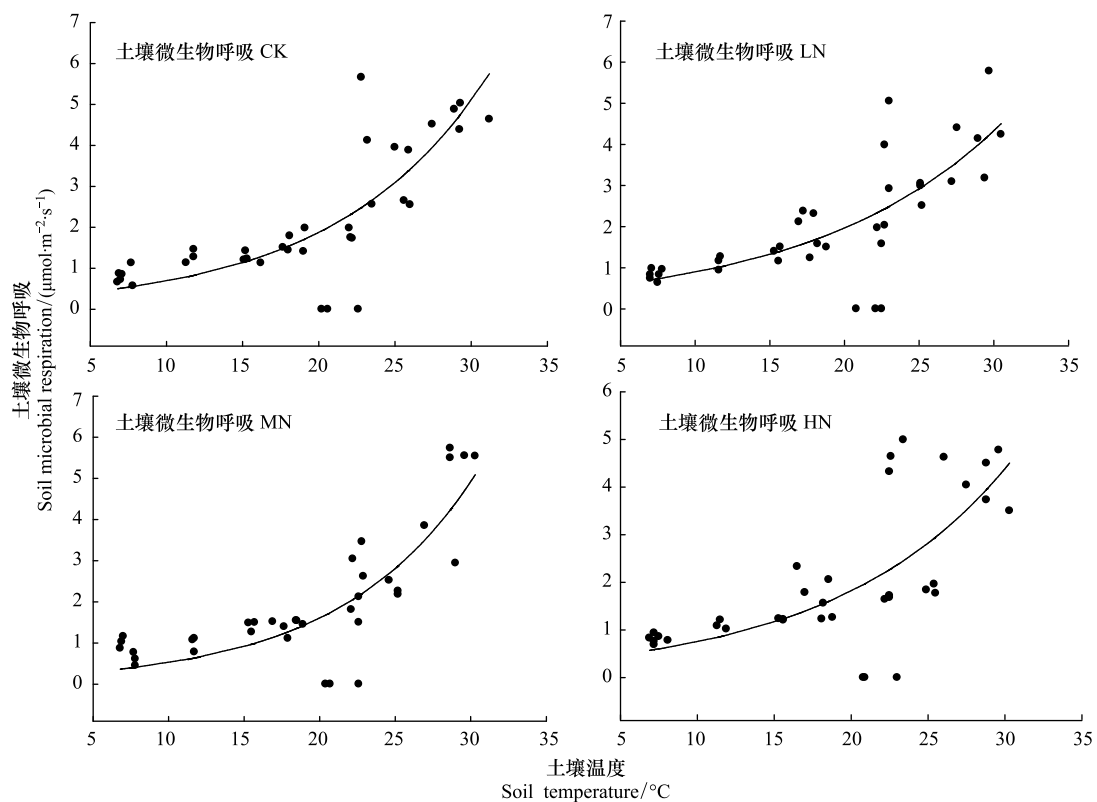


图 4 杨树人工林土壤微生物呼吸速率与 5cm 土壤温度的关系

Fig. 4 Relationships, for each treatment, between soil microbial respiration rate and soil temperatures in 5 cm in a poplar plantation

在氮添加水平中,中氮水平促进了土壤总呼吸、土壤微生物呼吸和植物根呼吸的温度敏感性。高氮水平都降低了土壤总呼吸、土壤微生物呼吸和植物根呼吸的温度敏感性,低氮水平降低了土壤总呼吸和土壤微生物呼吸的温度敏感性,促进了根呼吸的敏感性。

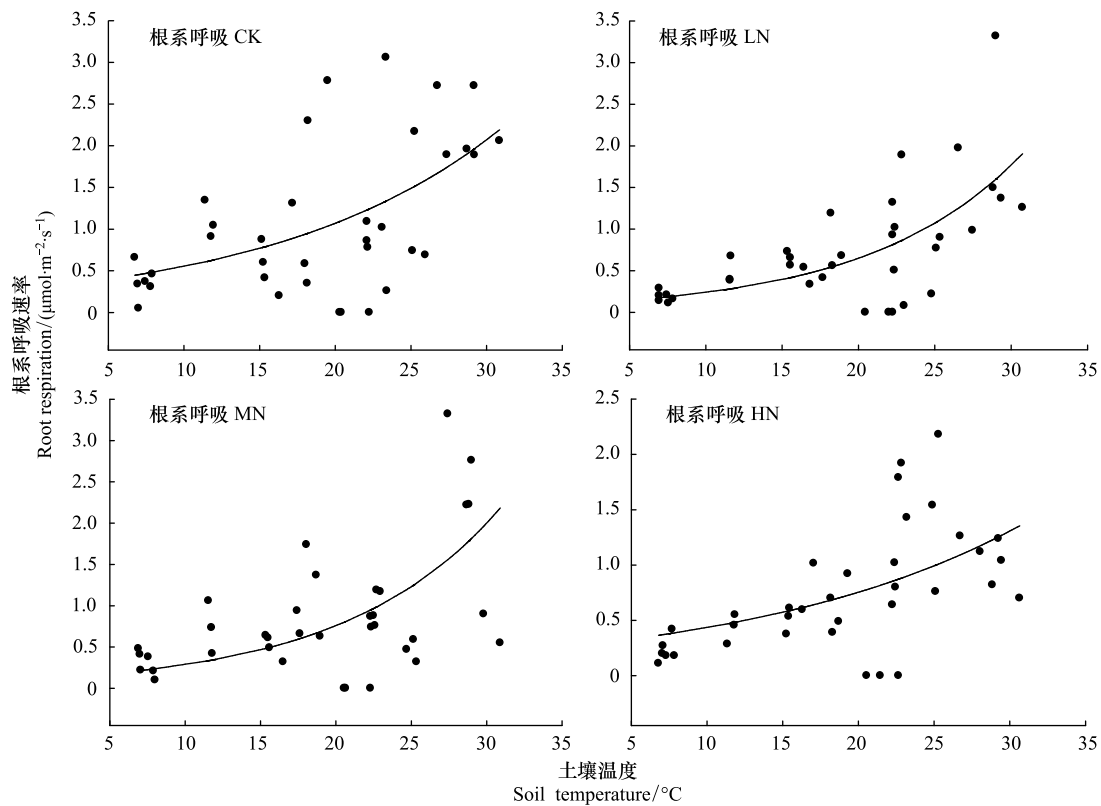


图5 杨树人工林根系呼吸速率与5cm土壤温度的关系

Fig. 5 Relationships, for each treatment, between root respiration rate and soil temperatures in 5 cm in a poplar plantation

4 结论与讨论

4.1 结论

各处理土壤总呼吸、土壤微生物呼吸、根系呼吸与各层次土壤温度均呈显著正相关关系,和5cm层土壤温度相关性最大。

Van't Hoff 指数模型能较好的表达土壤温度与土壤呼吸及土壤呼吸各组分的相关关系。5cm层土壤温度可以解释土壤总呼吸、土壤微生物呼吸和根系呼吸季节变化的比例分别为50.5%—71.0%、51.5%—73.9%、35.7%—63.2%。土壤温度对根系呼吸变化的贡献率最低,对土壤微生物呼吸变化的贡献率最高。

对照组土壤总呼吸、土壤微生物呼吸与根呼吸的 Q_{10} 值分别为2.54、2.72和1.94。土壤微生物呼吸的温度敏感性最高,根呼吸的温度敏感性最低。在各氮添加水平中,中氮水平促进了土壤总呼吸、土壤微生物呼吸和植物根呼吸的温度敏感性。高氮水平都降低了土壤总呼吸、土壤微生物呼吸和植物根呼吸的温度敏感性,低氮水平降低了土壤总呼吸和土壤微生物呼吸的温度敏感性,促进了根呼吸的敏感性。

4.2 讨论

土壤呼吸过程对温度变化的敏感性通常用 Q_{10} 来表示,不同区域和生态系统类型的 Q_{10} 有较大的差异^[21,22]。Raich&Schlesinger研究得出全球森林 Q_{10} 的中间值为2.4^[23],并在1.3—3.3之间波动。本文所测杨树人工林自然状态下土壤呼吸的 Q_{10} 为2.54,接近全球的中间值和亚热带热带湿润森林(2.6)^[24],比温带硬木森林的3.9要低^[19]。北京大兴杨树人工林的 Q_{10} 为1.63^[25],江西大岗山毛竹林的 Q_{10} 为1.84,明显低于本文研究,和其生长环境和土壤条件有关^[26]。长江流域樟树人工林的 Q_{10} 为2.9^[27],华西雨屏区巨桉人工林和苦竹林的 Q_{10} 为2.6和2.9^[28,29],和本文研究相接近。

本文研究表明土壤呼吸各组分对温度的敏感性不同,根呼吸的土壤敏感性最低,土壤微生物呼吸的敏感

性最高。土壤各组分的温度敏感性强烈程度的大小排列有所不同,Boone 等的研究表明,根呼吸的 Q_{10} 值为 4.6,除去根系后土壤呼吸的 Q_{10} 值为 2.5,带根系时土壤呼吸的 Q_{10} 值为 3.5^[30]。Lee 等在寒温带落叶林中的研究发现,土壤根系呼吸与土壤温度并无相关性,但土壤微生物呼吸与土壤温度则相关性显著^[31]。姜艳等在江西大岗山毛竹林中的研究表明土壤微生物呼吸比土壤根呼吸的敏感性更高^[26],和本文结果一致。

土壤呼吸及其各组分 Q_{10} 对模拟氮沉降响应的研究相对较少,本文研究发现中氮水平促进了土壤呼吸及其各组分的温度敏感性,相反高氮水平降低了其温度敏感性,低氮水平降低了土壤总呼吸和土壤微生物呼吸的温度敏感性,促进了根呼吸的敏感性。Mo 等研究表明,高氮处理显著降低了土壤呼吸的 Q_{10} ^[24],涂利华发现氮沉降对华西雨屏区苦竹林土壤总呼吸的影响不显著,但显著降低了其组分的温度敏感性^[32]。时空尺度、土壤呼吸不同组分以及活性氮等对温度敏感性的影响尚需要进一步的研究。

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,感谢邵国凡教授对本文撰写工作的指导。

参考文献 (References):

- [1] 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, Vöösmary C J. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153-226.
- [2] 陈浩,莫江明,张伟,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.
- [3] 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.
- [4] Vitousek P M. Beyond global warming: ecology and global change. *Ecology*, 1994, 75(7): 1861-1876.
- [5] Hobbie S E. Nitrogen effects on decomposition: a five-year experiment in eight temperate sites. *Ecology*, 2008, 89(9): 2633-2644.
- [6] 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.
- [7] Luo Y Q, Zhou X H. *Soil Respiration and the Environment*. New York: Academic Press, 2010.
- [8] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [9] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积. 北京: 气象出版社, 2003.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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, 2005.
- [17] 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.
- [18] Larionova A A, Rozanova L N, Samoilov T I. Dynamics of gas exchange in the profile of a gray forest soil. *Soviet Soil Science*, 1989, 3: 104-110.
- [19] 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.
- [20] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO_2 efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 2001, 7(6): 667-677.
- [21] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, 8(3): 315-323.
- [22] Chen H, Harmon M E, Griffiths R P, Hicks W. Effects of temperature and moisture on carbon respired from decomposing woody roots. *Forest Ecology and Management*, 2000, 138(1-3): 51-64.
- [23] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 1992, 44

- (2): 81-99.
- [24] 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.
- [25] 谭炯锐, 查同刚, 张志强, 孙阁, 戴伟, 方显瑞, 徐枫. 土壤温湿度对北京大兴杨树人工林土壤呼吸的影响. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 2308-2315.
- [26] 姜艳, 王兵, 汪玉如. 江西大岗山毛竹林土壤呼吸时空变异及模型模拟. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2010, 34(6): 47-52.
- [27] 王光军, 田大伦, 朱凡, 闫文德, 郑威, 李树战. 长沙樟树人工林生长季土壤呼吸特征. *林业科学*, 2008, 44(10): 20-24.
- [28] 向元彬, 胡庭兴, 张健, 涂利华, 李仁洪, 雒守华, 黄立华, 戴洪忠. 华西雨屏区不同密度巨桉人工林土壤呼吸特征. *自然资源学报*, 2011, 26(1): 79-88.
- [29] 田祥宇, 涂利华, 胡庭兴, 张健, 何远洋, 肖银龙. 华西雨屏区苦竹人工林土壤呼吸各组分特征及其温度敏感性. *应用生态学报*, 2012, 23(2): 293-300.
- [30] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, Kaye J P. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 1998, 396(6711): 570-572.
- [31] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, Koizumi H. Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest. *Plant and Soil*, 2003, 255(1): 311-318.
- [32] 涂利华, 戴洪忠, 胡庭兴, 张健, 雒守华. 模拟氮沉降对华西雨屏区撑绿杂交竹林土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 829-836.