

DOI: 10.5846/stxb201708251537

陈平, 赵博, 闫子超, 杨璐, 赵秀海, 张春雨. 太岳山油松人工林土壤呼吸对模拟氮沉降的短期响应. 生态学报, 2018, 38(22): - .

Chen P, Zhao B, Yan Z C, Yang L, Zhao X H, Zhang C Y. Short-term response of soil respiration to simulated nitrogen deposition in a *Pinus tabulaeformis* plantation on Taiyue Mountain, China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): - .

太岳山油松人工林土壤呼吸对模拟氮沉降的短期响应

陈 平, 赵 博, 闫子超, 杨 璐, 赵秀海, 张春雨*

北京林业大学国家林业和草原局森林经营工程技术研究中心, 北京 100083

摘要:通过对山西太岳山油松人工林进行模拟氮沉降实验,探究土壤呼吸对模拟氮沉降刺激的短期响应动态。2015 年 7—8 月,分 3 次分别对同一样地进行模拟氮沉降处理,水平皆为 $100 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,同时采用 LI-COR8150 土壤碳通量自动观测系统全天候连续监测土壤呼吸动态,探究土壤施氮前后呼吸速率的动态变化以及呼吸速率与土壤温度和湿度的关联。结果表明:3 次氮沉降处理均呈现出相同规律,土壤呼吸值在施氮后 1 d 内达到最大值,随即下降,在施氮后第 3 d 土壤呼吸趋于稳定;第一、二次氮沉降处理 3 d 后土壤呼吸恢复到处理前的状态,并未表现出显著差异 ($P>0.05$)。第三次氮沉降处理后土壤呼吸并未恢复到施氮前的状态,土壤呼吸均值由 $1.99 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 显著上升到 $3.39 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($P<0.05$)。这表明,氮处理对土壤呼吸产生了持续效应。施氮后土壤呼吸与土壤温度呈极显著 ($P<0.001$) 指数相关 ($R_s = ae^{bT}$),随着时间的推移,施氮处理解释土壤呼吸的相对贡献值由 60%—69% 下降到 14%—59%。施氮提高了土壤温度敏感系数 Q_{10} 值;土壤温度和湿度 ($R_s = ae^{bT} W^c$) 能更好的解释土壤呼吸变化,解释率达到 49%—91%。在全球变化的背景下,研究模拟氮沉降对土壤呼吸、 Q_{10} 的影响,可以对进一步模拟、预测全球暖温带地区森林碳循环和碳储量提供理论基础。

关键词:土壤呼吸;氮沉降;连续监测;短期效应;油松林

Short-term response of soil respiration to simulated nitrogen deposition in a *Pinus tabulaeformis* plantation on Taiyue Mountain, China

CHEN Ping, ZHAO Bo, YAN Zichao, YANG Lu, ZHAO Xiuhai, ZHANG Chunyu*

Research Center of Forest Management Engineering of State Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: To investigate the short-term effect of nitrogen (N) deposition on soil respiration (R_s) of a *Pinus tabulaeformis* plantation on Taiyue Mountain, a simulated nitrogen deposition experiment was conducted. Field work was carried out on Shanxi Taiyue mountain from July to August 2015. Simulated N deposition was conducted three times with the level of $100 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ in the same plot, while using the LI-COR8150 automatic soil carbon flux observation system to monitor soil respiration dynamics. The dynamic change of soil respiration rate and its relationship with soil temperature and humidity before and after nitrogen application were studied. The results showed that the three nitrogen deposition events showed the same pattern. The soil respiration reached a maximum in 1 day after N treatment, then decreased. R_s tended to be stable during the third day after N deposition; the ANOVA showed that there were no significance differences in mean soil respiration before and after N treatment for the first and the second treatment ($P>0.05$). However, average soil respiration increased significantly from $1.99 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ to $3.39 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ during the third treatment ($P<0.05$). This indicated that nitrogen treatment showed a continuous effect on soil respiration. The relationship between soil respiration and soil temperature ($R_s = ae^{bT}$) was extremely significant ($P<0.001$), and nitrogen deposition increased the determination

基金项目:国家自然科学基金项目(31340022)

收稿日期:2017-08-25; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zcy_0520@163.com

coefficient R^2 of $R_s = ae^{bT}$ for a short time. The soil temperature at 5 cm depth could explain 60%—69% of the variation in soil respiration. As time passes, nitrogen deposition decreased the determination coefficient R^2 of $R_s = ae^{bT}$. The soil temperature at 5 cm depth could explain 14%—59% of the variation in soil respiration. Furthermore, the nitrogen deposition increased the Q_{10} . Moreover, the two-variable model ($R_s = ae^{bT}W^c$) with soil temperature and moisture appeared to have good precision when used to predict soil respiration compared with the one-variable model. The soil temperature and soil moisture at 5 cm depth could explain 49%—91% of the variation in soil respiration. In the background of global change, studying the effects of simulated N deposition on soil respiration and Q_{10} can provide a theoretical basis for further simulation and prediction of carbon cycling and carbon storage in the warm temperate forests worldwide.

Key Words: soil respiration; nitrogen deposition; continuous monitoring; short-term effect; *Pinus tabulaeformis* plantation

随着全球气候变化,大气中二氧化碳浓度升高引起了广泛的关注^[1]。森林生态系统是陆地生态系统最大的碳库^[2],碳储量为 1394 Pg,森林碳固存的轻微变化将会加重或减轻全球气候变化^[3]。土壤呼吸是土壤和大气碳交换的关键环节,在全球碳循环中发挥着举足轻重的作用^[4]。土壤呼吸的主要影响因素包括土壤因子^[5-6]、生物因子^[7]和气候因子^[8]等。

由于人口暴增、工业含氮化肥的使用、畜牧养殖业的发展和矿物化石燃料的燃烧,人类活动向大气排放的活性氮数量快速增加^[9]。Vet 等^[10]研究表明,截止到 2014 年,全球氮沉降量从 1990 年的 6.35×10^{13} g/a 增加了近一倍。已有研究表明氮沉降能影响土壤 pH^[11]、土壤微生物活性^[12]、土壤氮淋溶^[13]、植物生长发育^[14]、凋落物分解^[15]等生态学过程,这些过程都与土壤呼吸密切相关^[16]。研究发现,模拟氮沉降对土壤呼吸有促进^[17]、无影响^[18]和抑制^[19]3 种作用,氮沉降对森林生态系统土壤呼吸的影响机制仍不清楚。并且,由于技术设备原因,大部分氮沉降实验都是在施氮后的一个月内进行两次测量,缺少全天候,高频率连续监测数据,土壤呼吸对氮沉降刺激的瞬时响应的研究仍比较薄弱。因此本实验基于 LI-COR8150 土壤碳通量系统对施氮后的土壤呼吸变化进行连续观测,探究 1) 土壤呼吸对模拟氮沉降的瞬时响应动态,2) 及其与环境因子之间的关系。

油松 (*Pinus tabulaeformis*) 是我国暖温带森林的主要建群种,是太岳山地区最主要的造林树种,为用材树种,具有良好的保持水土、涵养水源的作用,也在园林绿化中发挥着重要的作用^[20]。山西为我国煤炭大省,煤炭等化石燃料燃烧增加了大气氮沉降作用。本文探讨了太岳山油松人工林土壤呼吸对氮沉降的短期效应,旨在为太岳山油松人工林群落氮沉降对碳循环过程影响机制提供基础数据,为系统评价油松人工林林地生态系统功能提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地位于“油松之乡”山西太岳山灵空山林场 (112°01′—112°15′E, 36°31′—36°43′N),林区地处太岳林区中部,沁源县西南部,林区平均海拔为 1500 m,该区气候属暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,年平均气温为 6.2℃,年积温 2542℃,年日照时数 2600 h,无霜期 110—125 d。年平均降水量 662 mm,雨量集中在 7—9 月份,土壤主要为淋溶褐土。油松 (*Pinus tabulaeformis*)、辽东栎 (*Quercus liaotungensis*)、白桦 (*Betula platyphylla*) 和山杨 (*Populus davidiana*) 是本区的代表树种,主要灌木植物有虎榛子 (*Ostryopsis davidiana*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、山桃 (*Amygdalus davidiana*) 和黄刺玫 (*Rosa xanthina*) 等,主要草本植物有三穗苔草 (*Carex trisulchata*)、莎草 (*Cyperaceae*) 和蒿 (*Artemisia*) 类等。

1.2 试验地设置

2014 年 10 月在灵空山林场林班内选取未被破坏的立地条件基本一致的 40 a 油松人工林。建立一块 30 m×30 m 的固定样地,海拔 1450 m,坡度 21°,坡向为北,坡位为中位,林分密度为 2213 株/hm²,平均胸径为

15.64 cm。2015 年 5 月在固定样地内同一坡位设置 4 个 1 m×1 m 的小样方,3 个为施氮处理,另一个为对照处理,在每个小样方内布置内径为 20 cm、高为 10 cm 的 PVC 土壤环,土壤环压入土中 7—8 cm。根据试验地氮沉降量背景值 $21.2 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ [21] 设置氮沉降水平为 $100 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,重复 3 次,将应施氮量分成 3 份,分别在 2015 年 7 月 23 日、2015 年 8 月 10 日和 2015 年 8 月 21 日对其进行施氮处理, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 作为氮源,将其溶解在 2L 水中,用喷壶在小样方内均匀喷洒等量水分。

1.3 土壤呼吸速率及温湿度的测定

2015 年 7 月 20 日—8 月 1 日,8 月 7 日—8 月 19 日,8 月 18 日—8 月 30 日测定土壤呼吸,分别定义为第一次、第二次和第三次施氮。将施氮前三天定义为第一阶段,施氮后三天定义为第二阶段,第二阶段后 7 天为第三阶段。每个气室每间隔一小时测量 2 min,全天候连续监测。同时,气室配套的土壤温湿度传感器测定 PVC 环旁 5 cm 处土壤的温度和湿度。

1.4 数据处理

利用 Excel 2007 对基础数据进行预处理,整理施氮前后第一阶段,第二阶段和第三阶段的土壤呼吸速率 (R_s),5 cm 处土壤温度 (T) 和土壤湿度 (W) 的数据。采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和邓肯法 (Duncan) 进行方差分析和多重比较 ($\alpha = 0.05$),比较氮处理后土壤呼吸均值间的差异。拟合施氮第一阶段、第二阶段和第三阶段的 R_s 和 T 的指数模型 $R_s = ae^{bT}$ 。利用 R 3.2.2 拟合 R_s 和 T 、 W 的双变量指数模型 $R_s = ae^{TW^c}$ 。土壤呼吸对温度变化的敏感性通常用 Q_{10} 值描述, Q_{10} 表示土壤温度每增加 10°C 造成土壤呼吸改变的熵。 Q_{10} 值一般根据土壤呼吸速率指数模型中温度反应系数 b 值来计算, $Q_{10} = e^{10b}$ 。将 3 个重复土壤呼吸、土壤温湿度的均值作为结果,利用 SigmaPlot 12.5 进行作图。

2 结果与分析

2.1 三次施氮前后土壤呼吸速率及土壤温湿度的变化

2.1.1 第一次施氮事件

图 1 是 7 月 20 日—8 月 1 日施氮前后 13 天的土壤呼吸和土壤温度、土壤湿度的动态变化过程。结合图 1 和表 1、表 2,第一次施氮期间施氮处理土壤温度的平均值为 15.75°C ,土壤湿度的平均值为 27.67%;对照处理土壤温度的平均值为 15.76°C ,土壤湿度的平均值为 27.56% (表 1);在此期间土壤温度呈现逐渐上升的趋势,土壤湿度表现为逐渐下降的趋势,施氮未改变两种处理土壤温度和土壤湿度的变化趋势;对照处理土壤呼吸的平均值为 $2.90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,施氮处理土壤呼吸的平均值为 $3.60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,施氮后,土壤呼吸迅速升高,在施氮后 1 d 内达到最大值为 $6.89 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,说明施氮事件迅速激发了土壤呼吸;施氮结束后的 3 d 时间里,土壤呼吸逐渐恢复,其峰值呈现出逐渐减小的趋势,并恢复到了正常值 (图 1);其中第一阶段土壤呼吸的平均值为 $3.02 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,第二阶段土壤呼吸的平均值为 $4.84 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,第三阶段土壤呼吸的平均值为 $3.25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,方差分析表明,第一阶段和第三阶段的土壤呼吸与对照差异不显著 ($P > 0.05$) 而第二阶段的土壤呼吸显著高于对照处理 ($P < 0.05$) (表 2),且施氮处理土壤呼吸的平均值表现为第二阶段 > 第三阶段 > 第一阶段。

2.1.2 第二次施氮事件

图 2 是 8 月 7 日—8 月 19 日施氮前后 13 天的土壤呼吸和土壤温度、土壤湿度的动态变化过程。结合图 2 和表 1、表 2,第二次施氮期间施氮处理土壤温度的平均值为 15.74°C ,土壤湿度的平均值为 25.26%;对照处理土壤温度的平均值为 15.75°C ,土壤湿度的平均值为 27.82% (表 1);在此期间土壤温度表现出平稳态势,土壤湿度表现为逐渐下降的趋势,施氮同样未改变土壤温度和土壤湿度的变化趋势;对照处理土壤呼吸的平均值为 $2.60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,施氮处理土壤呼吸的平均值为 $2.89 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,可以看出,施氮后受到施氮的刺激土壤呼吸迅速升高并在 1 d 内达到最大值 $8.99 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,随后的 3 d 时间里土壤呼吸逐步降低,并达到正常水平 (图 2);其中第一阶段土壤呼吸的平均值为 $2.57 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,第二阶段土壤呼吸的平均值为 $3.87 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,第三阶段土壤呼吸的平均值为 $2.50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,方差分析表明,第一阶段和第三阶段的土壤呼

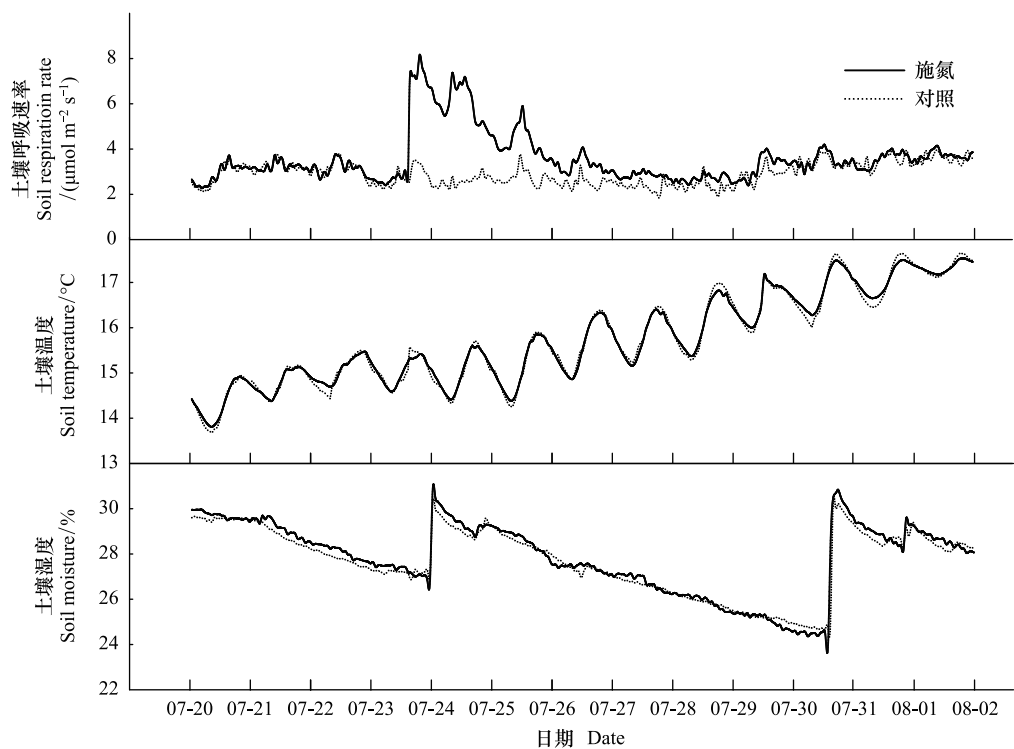


图1 第一次施氮前后,土壤呼吸速率、5 cm处土壤温度和5 cm处土壤湿度的动态变化

Fig.1 Soil respiration rate, soil temperature at 5cm depth and soil moisture at 5cm depth changed with time around with the first nitrogen event

吸与对照差异不显著($P>0.05$)而第二阶段的土壤呼吸显著高于对照处理($P<0.05$)(表2),且土壤呼吸表现为第二阶段>第一阶段>第三阶段。

表1 三次施氮期间5 cm处温度(T)和5 cm处土壤湿度(W)的平均值(平均值 $\pm$ 标准差)

Table 1 Mean values of soil temperature (T) and soil moisture (W) at the 5 cm depth of different nitrogen event (mean $\pm$ sd)			
施氮事件 Nitrogen event	处理 Treatment	土壤温度 Soil temperature/ $^{\circ}\text{C}$	土壤湿度 Soil moisture/%
第一次 First time	对照	15.76 $\pm$ 1.01	27.56 $\pm$ 1.37
	施氮	15.75 $\pm$ 1.00	27.67 $\pm$ 1.51
第二次 Second time	对照	15.75 $\pm$ 0.50	27.82 $\pm$ 1.46
	施氮	15.74 $\pm$ 0.44	25.26 $\pm$ 1.61
第三次 Third time	对照	14.74 $\pm$ 0.72	21.72 $\pm$ 3.30
	施氮	14.74 $\pm$ 0.67	21.69 $\pm$ 3.28

表2 三次施氮期间不同阶段土壤呼吸速率(R_s)平均值(平均值 $\pm$ 标准差)

Table 2 Mean values of soil respiration (R_s) for all nitrogen event at different time periods (mean $\pm$ sd)				
施氮阶段 Nitrogen stage	处理 Treatment	土壤呼吸 Soil respiration/($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		
		第一次 First time	第二次 Second time	第三次 Third time
第一阶段 First stage	对照	2.97 $\pm$ 0.44a	2.54 $\pm$ 0.26a	2.04 $\pm$ 0.20a
	施氮	3.02 $\pm$ 0.36a	2.57 $\pm$ 0.21a	1.99 $\pm$ 0.19a
第二阶段 Second stage	对照	2.61 $\pm$ 0.29a	2.81 $\pm$ 0.29a	2.31 $\pm$ 0.12a
	施氮	4.84 $\pm$ 1.49b	3.87 $\pm$ 1.64b	3.25 $\pm$ 0.74b
第三阶段 Third stage	对照	3.01 $\pm$ 0.58a	2.52 $\pm$ 0.49a	2.17 $\pm$ 0.19a
	施氮	3.25 $\pm$ 0.48a	2.50 $\pm$ 0.53a	3.39 $\pm$ 0.32b

不同小写字母代表不同施氮阶段不同处理土壤呼吸均值间具有显著差异($P<0.05$)

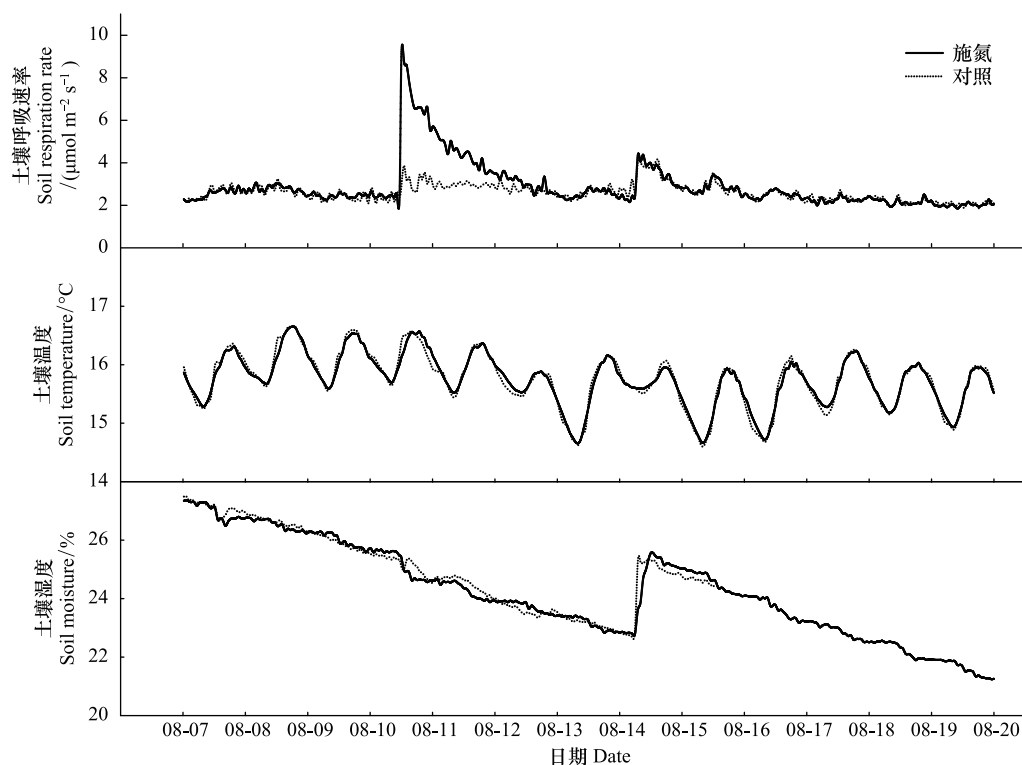


图2 第二次施氮前后,土壤呼吸速率、5 cm处土壤温度和5 cm处土壤湿度的动态变化

Fig.2 Soil respiration rate, soil temperature at 5 cm depth and soil moisture at 5 cm depth changed with time around with the second nitrogen event

2.1.3 第三次施氮事件

图3是8月18日—8月30日施氮前后13天的土壤呼吸和土壤温度、土壤湿度的动态变化过程。结合图3和表1、表2,第三次施氮期间施氮处理土壤温度的平均值为 14.74°C ,土壤湿度的平均值为 21.69% ;对照处理土壤温度的平均值为 14.74°C ,土壤湿度的平均值为 21.72% (表1);在此期间土壤温度表现出先降低后升高的趋势,土壤湿度表现出降低的趋势,施氮并未改变土壤温度和土壤湿度的变化趋势;对照处理土壤呼吸的平均值为 $2.17\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$,施氮处理土壤呼吸的平均值为 $2.99\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$,可以看出,同前两次施氮事件一样,施氮后土壤呼吸迅速升高,并在1 d内达到最大值 $6.99\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$,随后的3d时间里土壤呼吸逐步降低,但是并未达到施氮前的水平(图3);其中第一阶段土壤呼吸为 $1.99\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$,第二阶段土壤呼吸为 $3.25\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$,第三阶段土壤呼吸为 $3.39\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$,方差分析表明,第一阶段的土壤呼吸与对照相比差异不显著($P>0.05$)而第二阶段和第三阶段的土壤呼吸显著高于对照处理($P<0.05$)(表3)。土壤呼吸表现为第三阶段>第二阶段>第一阶段。这表明第三次氮处理可能改变了土壤的性质,同时可能与第三阶段出现降雨事件有关。

2.2 三次施氮事件不同阶段土壤呼吸和土壤温度、土壤湿度之间的关系

图4为三次施氮不同阶段土壤呼吸与土壤温度之间的指数关系模型,分析表明,土壤温度解释了土壤呼吸变化的14%—69%。从每次施氮事件来看,施氮处理能提高土壤温度对土壤呼吸的解释力度,分阶段分析发现,第二阶段土壤温度对土壤呼吸的解释力度最高,并且从整体上看施氮前大于施氮后。在生态学中, Q_{10} 是指温度每增加 10°C 土壤呼吸所增加的倍数。经计算,施氮能提高 Q_{10} 值,第二阶段的 Q_{10} 值最大,且从整体上看第一阶段小于第三阶段。从表3、图4可知,三次施氮事件各个阶段的双因素模型的拟合效果均好于单因素模型,说明土壤温度和土壤湿度的复合模型对土壤呼吸的拟合程度较高,表明该油松林土壤呼吸受到土壤温度和土壤湿度的共同影响,二者共同作用为植物和微生物呼吸提供了适宜的环境。

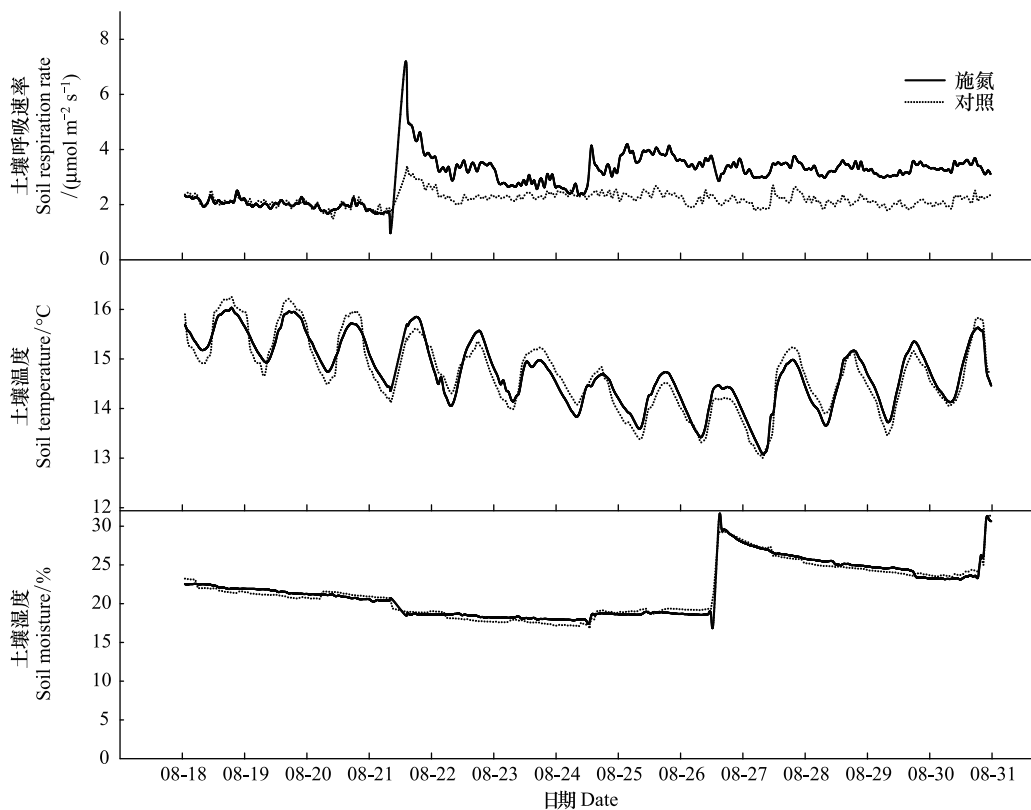


图 3 第一次施氮前后,土壤呼吸速率、5 cm 处土壤温度和 5 cm 处土壤湿度的动态变化

Fig.3 Soil respiration rate, soil temperature at 5 cm depth and soil moisture at 5 cm depth changed with time around with the third nitrogen event

表 3 三次施氮期间不同阶段,土壤呼吸速率(R_s)与 5 cm 处土壤温度(T)和 5 cm 处土壤湿度(W)的复合关系模型($R_s=a e^{b T} W^c$)

Table 3 Combined relationships between soil respiration rate(R_s) and soil temperature(T) as well soil moisture(W) of 5cm depth at different stages of three nitrogen events

施氮事件 Nitrogen event	处理 Treatment	施氮过程 Process	参数 Parameters				
			a	b	c	P	R^2
第一次 First time	对照	第一阶段	—	0.03	−3.85	<0.001	0.63
		第二阶段	0.69	0.08	0.08	<0.001	0.41
		第三阶段	0.05×10^{-1}	0.07	1.52	<0.001	0.68
	施氮	第一阶段	—	0.04	−2.24	<0.001	0.49
		第二阶段	2.83×10^{-13}	0.07	8.83	<0.001	0.85
		第三阶段	1.60×10^{-2}	0.10	1.08	<0.001	0.71
	第二次 Second time	第一阶段	0.02	0.12	0.93	<0.001	0.63
		第二阶段	0.06×10^{-1}	0.07	1.50	<0.001	0.70
		第三阶段	0.07×10^{-1}	0.09	1.34	<0.001	0.62
第二次 Second time	对照	第一阶段	0.02	0.12	0.93	<0.001	0.63
		第二阶段	0.06×10^{-1}	0.07	1.50	<0.001	0.70
		第三阶段	0.07×10^{-1}	0.09	1.34	<0.001	0.62
	施氮	第一阶段	1.02×10^{-1}	0.19	0.06	<0.001	0.59
		第二阶段	1.44×10^{-7}	0.24	11.15	<0.001	0.91
		第三阶段	1.87×10^{-5}	0.12	3.18	<0.001	0.71
	第三次 Third time	第一阶段	0.02×10^{-1}	0.06	1.83	<0.001	0.69
		第二阶段	0.21	0.07	0.37	<0.001	0.59
		第三阶段	1.54	0.09	−0.20	<0.001	0.52
第三次 Third time	对照	第一阶段	4.00×10^{-3}	0.13	1.41	<0.001	0.74
		第二阶段	4.28×10^{-12}	0.21	5.47	<0.001	0.71
		第三阶段	1.80×10^{-1}	0.02	−0.63	<0.001	0.82
	施氮	第一阶段	4.00×10^{-3}	0.13	1.41	<0.001	0.74
		第二阶段	4.28×10^{-12}	0.21	5.47	<0.001	0.71
		第三阶段	1.80×10^{-1}	0.02	−0.63	<0.001	0.82

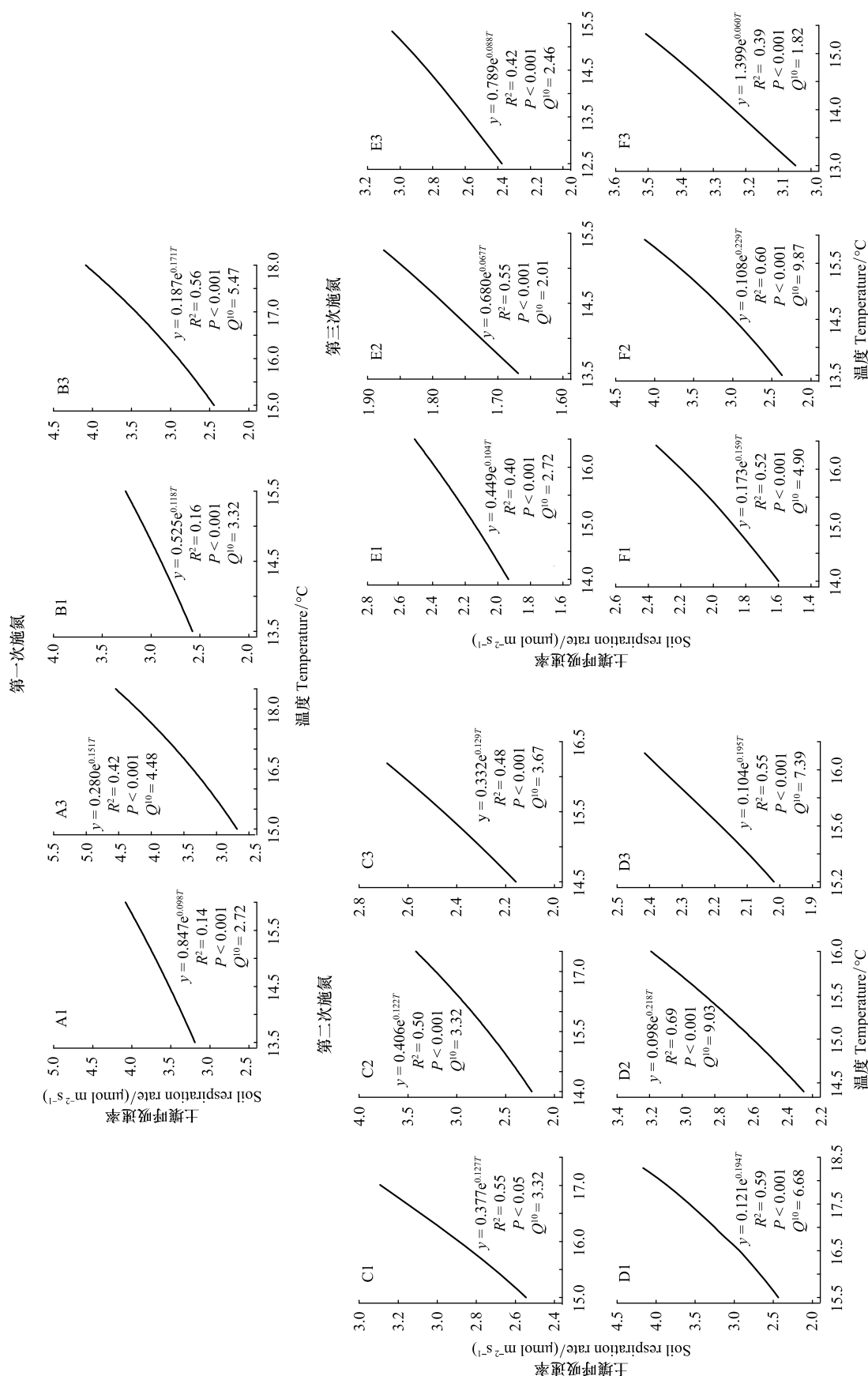


图 4 三次施氮期间不同阶段, 土壤呼吸速率(R_s)与 5cm 土壤温度(T)的指数关系模型($R_s = a e^{bT}$)
 A1、A3:第一次对照处理第一阶段和第三阶段土壤温度拟合土壤呼吸; B1、B3:第一次施氮处理第一阶段和第三阶段土壤温度拟合土壤呼吸; C1、C2、C3:第二次对照处理第一阶段、第二阶段和第三阶段土壤温度拟合土壤呼吸; D1、D2、D3:第二次施氮处理第一阶段、第二阶段和第三阶段土壤温度拟合土壤呼吸; E1、E2、E3:第三次对照处理第一阶段、第二阶段和第三阶段土壤温度拟合土壤呼吸; F1、F2、F3:第三次施氮处理第一阶段、第二阶段和第三阶段土壤温度拟合土壤呼吸, Third nitrogen treatment Phase 1, Phase 2, and Phase 3 Soil Temperature Fit Soil Respiration

3 讨论

3.1 氮沉降对油松人工林土壤呼吸的短期效应

本研究表明,三次施氮事件均使土壤呼吸速率迅速增加,在 1 d 之内,土壤呼吸均达到峰值,这与李化山等^[21]对太岳山油松天然林模拟氮沉降的研究结果一致。土壤呼吸主要由自养呼吸(主要是根系呼吸)和异养呼吸(主要是微生物呼吸)组成^[22],因此可以从这两方面探讨氮沉降对土壤呼吸的影响。当氮素成为限制因子时,外源性氮的输入短暂的提高了土壤中有效氮的含量,提高了土壤酶活性,为微生物生命活动提供充足的底物,从而在短时间内达到促进土壤呼吸的作用^[23]。然而随着时间的推移,这种促进作用会逐渐减弱甚至消失^[4],因此本研究中土壤呼吸表现出的“激发效应”可能是由于施氮促进了土壤中微生物数量和活性的提高。在施氮结束后的 3 d 时间里,随着时间的推移,土壤呼吸逐步恢复到正常水平。方差分析表明,第一阶段和第三阶段的土壤呼吸没有表现出显著差异(第三次除外),第一阶段和第三阶段的土壤呼吸与第二阶段的土壤呼吸表现出显著差异,此时氮沉降对土壤呼吸无影响。Liu 等^[24]通过荟萃分析法分析了十种不同类型生态系统的 410 篇氮沉降对土壤呼吸影响的文章发现,氮沉降并未显著影响土壤呼吸;Kelly 等^[25]通过对 3 种不同种类的土壤施加 6 种不同形式的氮来模拟氮沉降对土壤呼吸的影响,研究发现这 6 种氮对土壤呼吸都有抑制作用,并且都抑制了土壤微生物的呼吸;Kelly 还发现,在实验开始的初期,对于使用 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 作为氮源的土壤,施氮处理明显促进 3 种土壤的土壤呼吸;方差分析显示,在施氮后的第 17 d,施氮处理的土壤呼吸与对照处理的土壤呼吸差异不显著,造成这种现象的原因可能是由于尿素提供的碳是不稳定的,施氮后很快被消耗掉。这与本研究所表现出的现象一致。根系呼吸是土壤呼吸的重要组成部分,Hanson 等研究表明,森林生态系统中根呼吸占土壤呼吸比例的全球平均值为 45.80%^[26]。有学者研究发现,土壤中细根生物量随着氮沉降量的增加而增加,土壤呼吸与细根生物量呈显著正相关^[27-28]。本研究期间,氮沉降前后两个时期的土壤呼吸并没有显现出明显的差异,可能是由于氮沉降对自养呼吸的积极作用和其对异养呼吸的消极作用相互抵消造成的。总之氮沉降对土壤呼吸的影响非常复杂,各学者研究结果不尽相同。本研究只是通过全天候连续监测了施氮后土壤呼吸的变化,为了能从机理上解释土壤呼吸对氮沉降的瞬时响应,未来应该对施氮前后土壤以及根的动态变化做积极研究。

3.2 土壤呼吸与土壤温度、土壤湿度的关系及氮沉降对温度敏感性的影响

在温带森林生态系统中,土壤温度和水分对土壤呼吸的影响已经受到了学者的广泛研究^[29]。李雅红等^[30]对西天目山毛竹林土壤呼吸的研究表明,土壤呼吸与土壤温度呈极显著的指数关系,土壤湿度与土壤呼吸的关系并不确定。本研究表明,氮添加后土壤呼吸与 5 cm 处土壤温度呈现显著指数相关($P < 0.001$),土壤呼吸速率与土壤温度的指数关系未因氮添加而变化,土壤温度可以解释土壤呼吸变化的 14%—69%。这与其他学者^[31-32]的研究结果一致。分段分析表明,每次施氮第二阶段土壤温度对土壤呼吸的解释力度最高,且第三阶段的决定系数大于第一阶段的决定系数(第一次除外)。原因可能是氮添加短暂增加了土壤中可利用氮的数量,促进了土壤呼吸,提高了氮添加对油松人工林土壤呼吸的影响程度,另一方面也提升了温度对土壤呼吸的解释程度,全权等^[33]在东灵山所做的研究也得出相似的结论;随着时间的推移,实验用尿素很快被消耗掉,土壤呼吸回归到正常水平,此时表现为施氮降低指数关系模型的决定系数。研究表明,土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸有交互影响^[34-35],本研究中 5 cm 处土壤温度、土壤湿度的非线性双因子模型的决定系数为 49%—91%,相比于单因子模型都有一定程度的提高。金冠一等^[36]对太岳山油松人工林土壤呼吸对强降雨的响应研究表明,当土壤湿度低于临界土壤湿度时,土壤湿度的增加会促进土壤呼吸。总体来说,在本研究时间段内,土壤湿度较为稳定,此时影响土壤呼吸的关键因子为土壤温度和土壤湿度。 Q_{10} 不仅依地理位置和生态系统类型的变化而改变,而且在时间和空间上也存在着差异,从接近于 1(不敏感)到大于 20(极度敏感)^[37]。本研究之中,总体上来看,施氮期间第二阶段的温度敏感性最高,且第三阶段大于第一阶段,说明施氮提高了土壤呼吸对温度的敏感性。这与涂利华等^[8]的研究结果一致。第三次施氮第三阶段的温度敏感性

小于第一阶段的温度敏感性,可能是由于此时该地正值雨季,土壤湿度对温度敏感性的影响较大^[37]。综上所述,氮处理对土壤呼吸具有激发作用,在 1 d 内达到最大值后逐渐下降,经过约 3 d 的时间恢复到施氮前的状态。氮沉降、土壤温度、土壤湿度是影响土壤呼吸的关键因子。

参考文献 (References):

- [1] Rustad L E, Huntington T G, Boone R D. Controls on soil respiration: Implications for climate change. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 1-6.
- [2] 魏书精, 罗碧珍, 魏书威, 孙龙, 文正敏, 胡海清. 森林生态系统土壤呼吸测定方法研究进展. *生态环境学报*, 2014, 23(3): 504-514.
- [3] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [4] 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.
- [5] Widen B. Seasonal variation in forest-floor CO₂ exchange in a Swedish coniferous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(4): 283-297.
- [6] Flanagan L B, Sharp E J, Letts M G. Response of plant biomass and soil respiration to experimental warming and precipitation manipulation in a Northern Great Plains grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 173: 40-52.
- [7] 刘颖, 韩士杰. 长白山四种森林土壤呼吸的影响因素. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 1061-1065.
- [8] 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.
- [9] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, Bekunda M, Cai Z, Freney J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [10] Vet R, Artz R S, Carou S, Shaw M, Ro C U, Aas W, Baker A, Bowersox V C, Dentener F, Galy-Lacaux C, Hou A, Pienaar J J, Gillett R, Forti M C, Gromov S, Hara H, Khodzher T, Mahowald N M, Nickovic S, Rao P S P, Reid N W. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus. *Atmospheric Environment*, 2014, 93: 3-100.
- [11] 袁颖红, 樊后保, 李燕燕, 刘文飞, 廖迎春, 沈芳芳, 黄荣珍. 模拟氮沉降对土壤酸化和土壤盐基离子含量的影响. *应用与环境生物学报*, 2011, 17(4): 461-466.
- [12] Tian D, Jiang L, Ma S H, Fang W J, Schmid B, Xu L C, Zhu J X, Li P, Losapio G, Jing X, Zheng C Y, Shen H H, Xu X N, Zhu B, Fang J Y. Effects of nitrogen deposition on soil microbial communities in temperate and subtropical forests in China. *Science of The Total Environment*, 2017, 607-608: 1367-1375.
- [13] 段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全. 模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响. *环境科学*, 2013, 34(6): 2422-2427.
- [14] Wang G L, Liu F. Carbon allocation of Chinese pine seedlings along a nitrogen addition gradient. *Forest Ecology and Management*, 2014, 334: 114-121.
- [15] Zhang W D, Wang S. Effects of NH₄⁺ and NO₃⁻ on litter and soil organic carbon decomposition in a Chinese fir plantation forest in South China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 47: 116-122.
- [16] Magnani F, Mencuccini M, Borghetti M, Berbigier P, Berninger F, Delzon S, Grelle A, Hari P, Jarvis P G, Kolari P, Kowalski A S, Lankreijer H, Law B E, Lindroth A, Loustau D, Manca G, Moncrieff J B, Rayment M, Tedeschi V, Valentini R, Grace J. The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature*, 2007, 447(7146): 849-851.
- [17] 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.
- [18] Allison S D, Czimczik C I, Treseder K K. Microbial activity and soil respiration under nitrogen addition in Alaskan boreal forest. *Global Change Biology*, 2008, 14(5): 1156-1168.
- [19] 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.
- [20] 吴刚, 冯宗炜. 中国油松林群落特征及生物量的研究. *生态学报*, 1994, 14(4): 415-422.
- [21] 李化山, 汪金松, 刘星, 蒋思思, 张春雨, 赵秀海. 模拟氮沉降对太岳山油松林土壤呼吸的影响及其持续效应. *环境科学学报*, 2014, 34(1): 238-249.
- [22] Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(3): 425-448.
- [23] Carfrae J A, Skene K R, Sheppard L J, Ingleby K, Crossley A. Effects of nitrogen with and without acidified sulphur on an ectomycorrhizal community in a Sitka spruce (*Picea sitchensis* Bong. Carr) forest. *Environmental Pollution*, 2006, 141(1): 131-138.

- [24] Liu L L, Greaver T L. A global perspective on belowground carbon dynamics under nitrogen enrichment. *Ecology Letters*, 2010, 13(7): 819-828.
- [25] Ramirez K S, Craine J M, Fierer N. Nitrogen fertilization inhibits soil microbial respiration regardless of the form of nitrogen applied. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(12): 2336-2338.
- [26] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, Andrews J A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 115-146.
- [27] Davidson E A, Ishida F Y, Nepstad D C. Effects of an experimental drought on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical. *Global Change Biology*, 2004, 5(10): 718-730.
- [28] Tu L H, Hu T X, Zhang J, Li R H, Dai H Z, Luo S H. Short-term simulated nitrogen deposition increases carbon sequestration in a *Pleioblastus amarus* plantation. *Plant and Soil*, 2011, 340(1/2): 383-396.
- [29] 刘博奇, 牟长城, 邢亚娟, 韩士杰, 姜思领, 王庆贵. 小兴安岭典型温带森林土壤呼吸对强降雨的响应. *北京林业大学学报*, 2016, 38(4): 77-85.
- [30] 李雅红, 江洪, 原焕英, 刘源月, 周国模, 余树全. 西天目山毛竹林土壤呼吸特征及其影响因子. *生态学报*, 2010, 30(17): 4590-4597.
- [31] Ruehr N K, Knohl A, Buchmann N. Environmental variables controlling soil respiration on diurnal, seasonal and annual time-scales in a mixed mountain forest in Switzerland. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 153-170.
- [32] 张娇, 郝龙飞, 王庆成, 付娇娇, 朱凯月. 模拟氮沉降对落叶松人工林土壤呼吸的影响. *植物研究*, 2016, 36(4): 596-604.
- [33] 全权, 张震, 何念鹏, 苏宏新, 温学发, 孙晓敏. 短期氮添加对东灵山三种森林土壤呼吸的影响. *生态学杂志*, 2015, 34(3): 797-804.
- [34] Gaumont-Guay D, Black T A, Griffis T J, Barr A G, Jassal R S, Nesic Z. Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a boreal aspen stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140(1/4): 220-235.
- [35] 严俊霞, 秦作栋, 张义辉, 李洪建. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2009, 29(12): 6366-6376.
- [36] 金冠一, 赵秀海, 康峰峰, 汪金松. 太岳山油松人工林土壤呼吸对强降雨的响应. *生态学报*, 2013, 33(6): 1832-1841.
- [37] 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.