

DOI: 10.5846/stxb201506301367

曾清苹, 何丙辉, 毛巧芝, 秦华军, 李源, 黄祺. 重庆缙云山两种林分土壤呼吸对模拟氮沉降的季节响应差异性. 生态学报, 2016, 36(11): - .  
Zeng Q P, He B H, Mao Q Z, Qin H J, Li Y, Huang Q. Seasonal Responses of Soil Respiration to Simulated Nitrogen Deposition in a Citrus Plantation and Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): - .

## 重庆缙云山两种林分土壤呼吸对模拟氮沉降的季节响应差异性

曾清苹<sup>1</sup>, 何丙辉<sup>1,\*</sup>, 毛巧芝<sup>1</sup>, 秦华军<sup>2</sup>, 李源<sup>3</sup>, 黄祺<sup>4</sup>

1 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

2 贵州省生物研究所, 贵阳 550009

3 重庆市涪陵区林业局, 重庆 4080004 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵阳 550009

**摘要:**氮沉降对土壤呼吸的影响仍然存在着争论, 需要进一步研究。选择重庆缙云山的马尾松林和柑橘林开展了氮添加实验, 分别设置 3 个氮添加水平(低氮  $T_5$ :  $20 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , 中氮  $T_{10}$ :  $40 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  和高氮  $T_{15}$ :  $60 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) 和对照( $T_0$ ,  $0 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) 共 4 个水平的处理, 各林分每个处理各 9 次重复, 每个处理量分 4 次, 在每个季度开始各施 1 次。采用 ACE (Automated Soil  $\text{CO}_2$  Exchange Station, UK) 自动土壤呼吸监测系统测定两林分土壤表层(0—10 cm) 的呼吸、温度和湿度, 分别在当年的 7 月、9 月、11 月、第 2 年的 1 月、2 月、3 月、5 月、6 月各连续测定 4 天, 每天(8:00—18:00) 4 次, 以揭示两种林分土壤呼吸对模拟氮沉降的季节动态响应及其差异性。结果表明:(1) 柑橘林与马尾松林林下土壤表层呼吸表现出一致的季节变化动态趋势: 夏季>春季>秋季>冬季, 但柑橘林土壤呼吸显著高于马尾松林( $P<0.05$ )。(2) 总体上氮沉降抑制了 2 种林分土壤表层呼吸, 而 N 沉降量大抑制程度越高。只在冬季土壤湿度低的马尾松林下氮沉降促进了土壤呼吸。(3) 土壤温度与土壤呼吸有极显著的正相关指数关系( $P<0.01$ ), 而土壤水分与土壤呼吸有显著的二次模型拟合关系, 但均受到氮沉降量处理的影响。综合分析表明, 我们在亚热带山区 2 类森林下的典型案例结果支持氮沉降抑制土壤呼吸的认识。

**关键词:**氮沉降; 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤湿度; 柑橘林; 马尾松林

## Seasonal Responses of Soil Respiration to Simulated Nitrogen Deposition in a Citrus Plantation and Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China

ZENG Qingping<sup>1</sup>, HE Binghui<sup>1,\*</sup>, MAO Qiaozhi<sup>1</sup>, QIN HuaJun<sup>2</sup>, LI Yuan<sup>3</sup>, HUANG Qi<sup>4</sup>

1 Key Laboratory of Three Gorges Region Eco-Environments, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 Guizhou Institute of Biology, Guiyang 550009, China

3 Forestry Administration of Fuling, Chongqing 408000, China

4 Hydro China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550009, China

**Abstract:** Disagreements over the effects of nitrogen deposition on soil respiration still exist, thereby necessitating further studies. In the present study, we designed an experiment to explore the seasonal responses of soil respiration to various levels of nitrogen deposition ( $T_0$ :  $0 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  as the control;  $T_5$ :  $5 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  as the low N treatment;  $T_{10}$ :  $10 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  as the moderate nitrogen treatment; and  $T_{15}$ :  $15 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  as the high nitrogen treatment. All treatments were performed with nine replicates both in the Masson pine forest and in the Citrus plantation at Mt. Jinyun, Chongqing, China.

**基金项目:**国家自然科学基金(41271291); 国家林业局“948”项目(2015-4-42); 重庆市林业重点科技攻关项目(渝林科研 2015-7); 重庆市应用开发计划重点项目(CSTC2014yykFB80015); 西南大学资源环境学院“光炯”创新实验项目(20150104)

收稿日期: 2015-06-30; 修订日期: 2015-10-29

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

The different levels of N addition were applied four times at the beginning of each season from May 2014. We measured soil respiration, soil temperature, and soil moisture simultaneously by using the Automated Soil CO<sub>2</sub> Exchange Station (ACE, UK) for four consecutive days in July, September, November, January, February, March, May, and June, respectively, at four times each day between 8:00 am and 6:00 pm. The results showed that: (1) the two forests underwent similar seasonal changes in soil respiration, with the most change being observed during the summer, followed by spring, autumn, and winter, which yielded the least change. However, the citrus plantation presented significantly higher levels of soil respiration than the Masson pine forest across all seasons ( $P < 0.05$ ). (2) Generally, nitrogen deposition suppressed soil respiration in both forests and these inhibitory effects were strengthened with increasing levels of nitrogen deposition. The only exception in which nitrogen deposition enhanced soil respiration was in the Masson pine forest during the winter, while soil moisture was very low. (3) Soil respiration showed significantly positive exponential relationships with soil temperature ( $P < 0.01$ ) and significant quadratic relationship with soil moisture ( $P < 0.05$ ). Both factors (soil temperature and moisture) are influenced by the levels of nitrogen deposition in subtropical forests. Thus, the results of our study on subtropical forests confirm the theory that nitrogen deposition inhibits soil respiration.

**Key Words:** nitrogen deposition; soil respiration; soil temperature; soil moisture; Citrus plantation; Masson pine forest

近年来,全球变暖逐渐成为各界关注的热点问题,IPCC 第 5 次评估报告 (AR5) 指出 2003—2012 年平均温度较 1850—1900 年上升 0.78℃,并表现出加剧的趋势。CO<sub>2</sub> 作为导致全球变暖最主要的气体之一,2011 年其浓度达到 391ppm 比 1750 年高 40%<sup>[1-2]</sup>。而土壤呼吸 (Soil Respiration, Rs) 是大气 CO<sub>2</sub> 的重要来源,约占整个生态系统呼吸的 50%—80%,主要由土壤动物、微生物和根系等呼吸产生<sup>[3-4]</sup>,是陆地生态系统中最重要碳循环过程<sup>[5]</sup>,其产生速度受自然、生物以及各种干扰等因子影响<sup>[6]</sup>。

随着人类社会的发展,氮肥施用、畜牧业快速发展及矿物燃料燃烧等活动使大气含氮化合物增多,导致大气氮沉降量加剧,且变化量有增无减<sup>[7]</sup>。氮素作为林木生长的养分限制因子,它直接或间接影响着森林土壤呼吸。目前,氮沉降引起的土壤呼吸改变逐渐成为各领域学者研究的重点,其中最常用的方法为外源氮添加模拟氮沉降试验,然而研究区域、研究时间不同所得结论各异。吴迪等<sup>[8]</sup>、刘益君等<sup>[9]</sup>、孙素琪等<sup>[10]</sup>及 Sun 等<sup>[11]</sup>模拟氮沉降试验表明氮沉降对土壤呼吸有抑制作用,Tu 等<sup>[12]</sup>的研究结果表明氮沉降对土壤呼吸有促进作用,Hasselquist 等<sup>[13]</sup>则发现氮沉降并没有明显改变林地土壤呼吸。可见,氮沉降对土壤呼吸的影响存在很大的不确定性,需要进一步的深入研究。氮沉降的土壤效应深受植被性质、土壤类型与气候差异的影响<sup>[8-13]</sup>,不同的土壤水热环境也会使土壤呼吸有较大差异。北美<sup>[14]</sup>、欧洲<sup>[15]</sup>关于氮沉降试验开展较早,而国内氮沉降对森林土壤呼吸影响的试验起步较晚,且大部分集中在温带森林系统,涉及热带、亚热带森林相关研究相对较少。

本文选取我国亚热带地区广泛分布的马尾松和柑橘林为研究对象,开展人工氮添加模拟氮沉降试验。探讨不同氮沉降水平对马尾松林和柑橘林土壤呼吸及水热环境的影响,探索该区域马尾松林和柑橘林土壤呼吸的动态特征以及不同林分对氮沉降的响应,为不同林地利用途径的土壤呼吸研究提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区境内缙云山国家级自然保护区 (106°22'E, 29°45'N) 内,距市中心 60 km。缙云山占地面积 76 km<sup>2</sup>,海拔 350—951.5 m,属典型北亚热带温暖湿润季风气候。年平均温度 13.6℃,最热月 (8 月) 平均温度 24.3℃,最高温 43℃,最冷月 (1 月) 平均温度 3.1℃,最低温 -1℃;年平均相对湿度 87%,年平均降雨量 1161.8 mm,年均日照 1293.9 h,干湿季分明。雨季是 4—9 月 (降雨量 1243.8 mm),其中 7—8 月是伏旱期 (蒸发量 255.4 mm),降雨量小,蒸发量大。土壤以酸性黄壤及水稻土为主,伴有少量零星分布的紫色土。

区内植物资源丰富,植被种类繁多,森林覆盖率达 96.6%。试验地建立在海拔为 350—500 m 的柑橘林和马尾松林内,其中柑橘林林下无灌木层,草本层为优势群落,主要优势草本为:兔儿酸(*Polygonum amphibium* L.)、糯米团(*Gonostegia hirta* (Bl.) Miq.)、九层塔(*Ocimum basilicum* L.)、加拿大飞蓬(*Conyza canadensis* (L.) Cronq.)、杠板归(*Polygonum perfoliatum* L.)、稗草(*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.);马尾松林主要优势灌木为:杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、盐肤木(*Rhus chinensis* Mill.)、四川山矾(*Symplocos setchuensis* Brand)、异叶榕(*Ficus heteromorpha* Hemsl.)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oersted)、野桐(*Mallotus japonicus* (Thunb.) Muell. Arg.)、毛桐(*Mallotus barbatus* (Wall.) Muell. Arg.)、朴树(*Celtis sinensis* Pers.)、黄牛奶树(*Symplocos laurina* (Retz.) Wall.)、钝叶柃(*Eurya obtusifolia* H. T. Chang)、白栎(*Quercus fabri* Hance)、慈竹(*Neosinocalamus affinis* (Rendle) Keng f.)等,主要优势草本为:边缘鳞盖蕨(*Microlepia marginata* (Houtt.) C. Chr.)、中华里白(*Hicriopteris chinensis* (Ros.) Ching)、粽叶狗尾草(*Setaria palmifolia* (Koen.) Stapf)、菝葜(*Smilax china* Linn.)、山莓(*Rubus corchorifolius* Linn. f.)、尖叶清风藤(*Sabia swinhonei* Hemsl.)、香花崖豆藤(*Millettia dielsiana* Harms)等。

## 1.2 实验设计

2014 年 5 月,在海拔相近的马尾松林和柑橘林内分别选取 3 块面积为 20 m×20 m 的代表性样地,基本情况如表 1 所示。在每个样地沿对角线确定 3 个点,于每个点各设置 4 个 1 m×1 m 的小样地(间隔>1 m 防相互干扰),作为氮添加处理(不考虑大气氮沉降)样方。氮添加处理设置了 4 个水平:对照( $T_0, 0 \text{ gN m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )、低氮( $T_5, 20 \text{ gN m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )、中氮( $T_{10}, 40 \text{ gN m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )和高氮( $T_{15}, 60 \text{ gN m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )。为消除流水等对样地氮含量造成影响,施氮时保证高浓度样方在低浓度样方之下。同时将长为 16 cm 内径为 23 cm 的 PVC 管随机埋入小样地中并确保管顶距土壤表面 3 cm,去除管内植物和凋落物。在每个季度初期选择晴天将不同浓度  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  溶于 1L 水中,采用手提式喷雾器均匀喷洒在每个小样地内,为排除试验中溶解  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  所需水分对土壤呼吸的影响,在对照样地喷洒了等体积水。

表 1 重庆缙云山 2 种实验林(马尾松林和柑橘林)的林分与土壤特征基本信息

Table 1 Fundamental information of those two experimental forest and their soil characteristics from Mt. Jinyun, Chongqing

林型 Forest type	林分特征 Stand characteristics					立地特征 Site characteristic				
	林龄 Age/a	郁闭度 Canopy density	平均胸径 (地径) Mean DBH/cm	平均树高 Mean height/m	草本盖度 Herb coverage/%	pH	全氮 Total N/ (g/kg)	全磷 Total P/ (g/kg)	速效钾 Available potassium/ (g/kg)	SOC/ (g/kg <sup>-1</sup> )
柑橘林 Citrus plantation	43	65	D14.2	4.3	85	4.64	18.03	0.74	0.84	48.27
马尾松林 Masson pine forest	45	80	Φ18.6	14.1	504.34	3.18	0.13	0.32	23.64	

## 1.3 土壤呼吸的测定

2014 年 7 月至 2015 年 7 月,夏、秋、冬、春 4 个季节(四季划分以气象学上的公历 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12—次年 2 月为冬季),在施肥 2 天后(所施氮溶液完全渗入土壤后)选择晴朗天气,采用 ACE 自动土壤呼吸监测系统(Automated Soil CO<sub>2</sub> Exchange Station, UK)于 7 月、9 月、11 月、1 月、2 月、3 月、5 月、6 月对两林地土壤呼吸进行测定,各测定 4 天(连续),各个点每天共测定 4 次,测定时间为 8:00—18:00(每次测定间隔 2.5 h)。为了减小安放 PVC 管对土壤呼吸的影响,每个季度埋管与测定土壤呼吸时间间隔保持一致,并在每次测定前一天,将测定管内的地表植被自土壤表层彻底剪除,尽量不破坏土壤,以减少土壤扰动和根系损伤对测量结果的影响。呼吸圈埋好后固定一年。

在测定土壤呼吸的同时用 ACE 自动土壤呼吸监测系统配带的 2 个土壤温度热电阻探头和 2 个土壤水分探头 SM300 分别对土壤 10cm 深处的温度和湿度进行同步测量。

## 1.4 数据处理与统计分析

以每个点每天测定的 4 个数据通过算术平均来代表该林地的当日平均土壤呼吸、土壤温度和土壤湿度。数据处理和统计分析在 SPSS18.0、office Excel 2003、OriginPro9.0 与 MATLAB R2012B 等软件中进行,采用单因素方差分析法(LSD)比较土壤呼吸在不同氮处理、不同季节间的差异水平,采用回归分析方法描述土壤呼吸与温度( $T$ )及湿度( $W$ )的关系。

土壤呼吸与土壤温度之间的关系采用指数模型<sup>[16]</sup>: $R_s = R_0 e^{\beta T}$ ;  $Q_{10}$  值通过下式计算<sup>[17-18]</sup>: $Q_{10} = e^{10\beta}$ ; 采用二次项模型<sup>[19]</sup>: $R_s = a + b_1 W + b_2 W^2$ 与幂函数模型<sup>[20]</sup>: $R_s = a W^b$ 研究土壤呼吸与土壤湿度的相关性;利用线性模型<sup>[21]</sup>: $R_s = a + bT + cW$ 和指数幂函数模型<sup>[22]</sup>: $R_s = a e^{bT} W^c$ 研究土壤温度和土壤湿度交互作用对土壤呼吸的影响。(式中  $R_s$  为土壤呼吸  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $T$  为地温,  $R_0$  是温度为  $0^\circ\text{C}$  时的土壤呼吸,  $\beta$  为温度反应系数,  $Q_{10}$  为土壤呼吸温度敏感性指数,  $W$  为土壤湿度,  $a, b, c$  为待定参数。)

## 2 结果

### 2.1 两种林分土壤呼吸、土壤温度和土壤湿度季节特征

实验期内两林分土壤呼吸和湿度随季节均表现出先减后增的变化趋势,且差异显著(图 1)。 $T_0$  为空白对照,其值反映了两森林生态系统内土壤呼吸特征。柑橘林和马尾松林土壤呼吸最大值出现在夏季,分别为  $(4.947 \pm 0.642)$ 、 $(3.930 \pm 0.378) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 相应的地表土壤温度最大值也出现在夏季,分别为  $(31.10 \pm 6.287)^\circ\text{C}$ 、 $(27.77 \pm 1.575)^\circ\text{C}$ ; 而最小值则出现在冬季,此时两林分的土壤呼吸分别为  $(2.868 \pm 0.695) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $(2.634 \pm 0.413) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 温度则为  $(14.87 \pm 1.600)^\circ\text{C}$  和  $(13.77 \pm 0.429)^\circ\text{C}$ ; 柑橘林  $(43.902 \pm 3.985)\%$  和马尾松林  $(33.259 \pm 4.985)\%$  土壤湿度最大值均出现在春季,最小值出现在秋季  $(20.087 \pm 1.590)\%$ 、 $(15.866 \pm 1.250)\%$  (图 1, 图 2)。

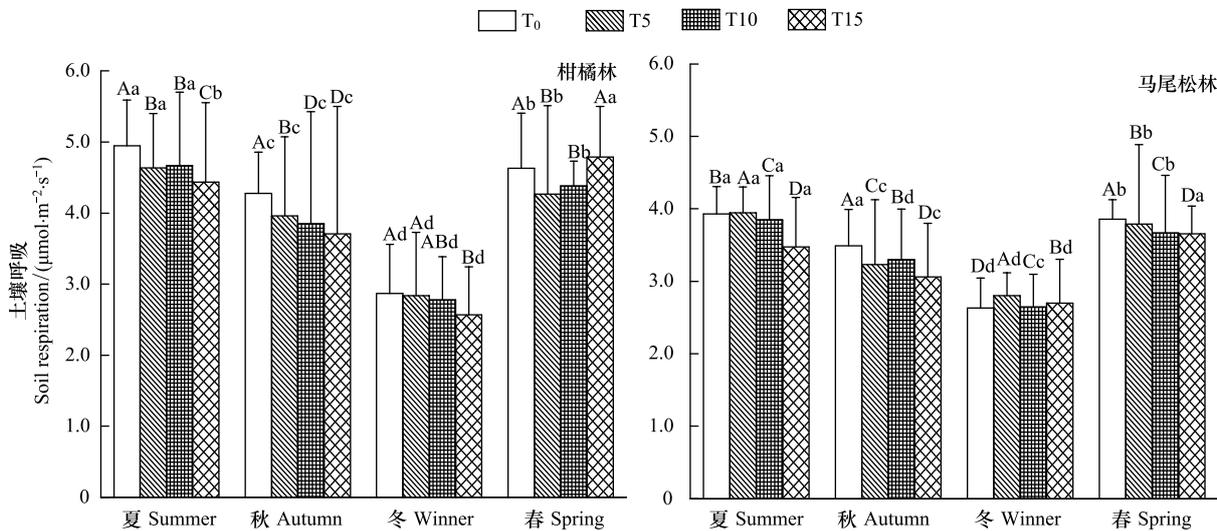


图 1 重庆缙云山马尾松林和柑橘林在不同施氮处理下的土壤呼吸的季节动态变化

Fig.1 Seasonal variation of soil respiration rate under the Masson pine forest and Citrus plantation with various nitrogen addition amount treatments at Mt. Jinyun, Chongqing

图中  $P < 0.05$ , 大写字母表示同一季节不同处理间差异性水平,小写字母表示同一处理不同季节间差异性水平;  $T_0$ : control check, 对照组;  $T_5$ : low nitrogen, 低氮水平;  $T_{10}$ : middle nitrogen, 中氮水平;  $T_{15}$ : high nitrogen, 高氮水平

### 2.2 两种林分土壤呼吸对模拟氮沉降的响应

不同氮沉降处理的土壤呼吸具有一致的变化规律,表现为夏季最高,其次是春季和秋季,冬季最低,且各季度间差异显著(图 1)。在春季,马尾松林土壤呼吸随着模拟的氮沉降量增加呈直线下滑趋势, $T_5$ 、 $T_{10}$  和  $T_{15}$

处理分别比对照  $T_0$  降低了 1.76%、4.86% 及 5.11%, 但柑橘林则表现为先降低后升高的变化趋势, 与对照  $T_0$  相比,  $T_5$ 、 $T_{10}$  和  $T_{15}$  分别降低了 7.87%、降低了 5.36%、升高了 3.38%; 在夏季, 马尾松林土壤呼吸随氮沉降量增加而表现为先升高后降低,  $T_5$ 、 $T_{10}$  和  $T_{15}$  处理分别比对照  $T_0$  升高了 0.44%、降低了 2.11% 和 11.62%, 但柑橘林土壤呼吸基本上呈降低趋势,  $T_5$ 、 $T_{10}$  和  $T_{15}$  处理后的土壤呼吸均比对照  $T_0$  低, 且分别降低 6.34%、5.68% 及 10.30%; 在秋季, 较对照  $T_0$  而言, 两林分土壤呼吸在氮沉降处理后均降低, 马尾松林  $T_5$ 、 $T_{10}$  和  $T_{15}$  处理分别降低了 7.44%、5.50%、12.36%, 而柑橘林  $T_5$ 、 $T_{10}$  和  $T_{15}$  处理则分别降低 7.43%、10.04%、12.34%; 在冬季, 氮沉降处理后马尾松林  $T_5$ 、 $T_{10}$  和  $T_{15}$  处理土壤呼吸比对照  $T_0$  高 6.32%、0.43% 和 2.51%, 而柑橘林  $T_5$ 、 $T_{10}$  和  $T_{15}$  处理土壤呼吸则比对照  $T_0$  低 0.96%、3.11% 和 10.52%。

### 2.3 两种林分土壤呼吸与土壤温度的关系模型对模拟氮沉降的响应

各处理土壤呼吸与土壤温度进行回归分析(图 3)结果可知, 土壤呼吸与土壤温度存在极显著的指数关系 ( $P < 0.01$ ), 柑橘林  $T_0$ 、 $T_5$ 、 $T_{10}$  和  $T_{15}$  处理与 10 cm 深处土壤温度之间拟合方程的决定系数  $R^2$  分别为 0.613、0.358、0.358 和 0.377, 解释了柑橘林土壤呼吸 35%—62% 的变异,  $Q_{10}$  值分别为 1.36、1.35、1.33、1.40; 马尾松林拟合方程的决定系数  $R^2$  分别为 0.558、0.238、0.428 和 0.165, 可解释马尾松林土壤呼吸 16%—56% 的变异,  $Q_{10}$  值分别为 1.32、1.25、1.35、1.19。

### 2.4 两种林分土壤呼吸与土壤湿度的关系模型对模拟氮沉降的响应

将不同处理的土壤呼吸与 10 cm 深处土壤湿度用二次模型和幂函数模型进行拟合, 拟合度  $R^2$  在 0.052—0.233(表 2), 明显低于土壤呼吸与温度关系方程的  $R^2$  值, 且二次模型拟合效果优于幂函数模型。这些结果也说明, 2 种林分条件下的土壤湿度变化显著影响着土壤的呼吸。

表 2 重庆缙云山柑橘林和马尾松林下土壤表层在模拟不同氮沉降处理条件下的呼吸与湿度的关系方程

Table 2 Correlation equations between soil respiration rate and soil moisture at 10cm depth across various nitrogen addition treatments under the Masson pine forest and Citrus plantation at Mt. Jinyun, Chongqing

林型 Forest type	处理 Treatment	$R_s = a + b_1 W + b_2 W^2$					$R_s = a W^b$			
		a	$b_1$	$b_2$	$P$	$R^2$	a	b	$P$	$R^2$
柑橘林 Citrus plantation	$T_0$	5.018	-0.014	-0.001	0.004	0.166	11.110	-0.341	0.002	0.147
	$T_5$	6.036	-0.161	0.003	0.106	0.071	7.828	-0.248	0.047	0.062
	$T_{10}$	4.116	0.019	-0.001	0.137	0.063	8.723	-0.293	0.069	0.052
马尾松林 Masson pine forest	$T_0$	1.157	0.156	-0.001	0.014	0.111	0.504	0.640	0.000	0.172
	$T_5$	3.543	-0.046	0.002	0.025	0.148	2.202	0.145	0.051	0.078
	$T_{10}$	4.104	-0.135	0.005	0.004	0.216	1.509	0.268	0.009	0.136
	$T_{15}$	2.842	0.001	0.001	0.002	0.233	1.570	0.251	0.002	0.186
		1.938	0.086	-0.001	0.006	0.199	1.414	0.270	0.001	0.204

### 2.5 两种林分土壤呼吸与土壤温度、土壤湿度的复合关系模型对模拟氮沉降的响应

分别利用线性模型和指数幂函数模型对土壤呼吸与土壤温度和土壤湿度的复合关系进行分析(表 3)。两林分  $T_0$  处理的指数幂函数模型拟合效果不如线性模型, 其他处理的指数幂函数模型效果均优于线性模型。从指数幂函数模型拟合结果可知, 土壤温度和湿度能够共同解释两林分土壤呼吸季节变化的 56.6%—61.4%。

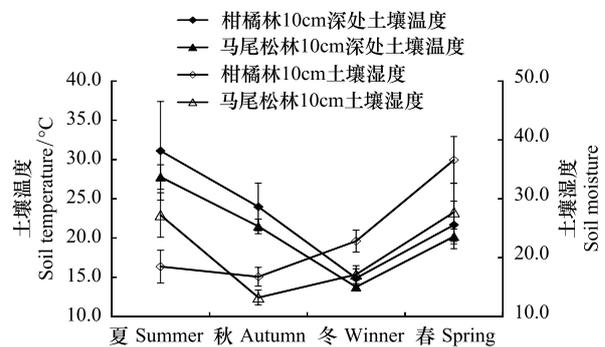


图 2 重庆缙云山柑橘林和马尾松林下土壤的表层温度及湿度的季节动态变化

Fig.2 Seasonal variation of soil temperature and soil moisture under the Masson pine forest and nearby Citrus plantation at Mt. Jinyun, Chongqing

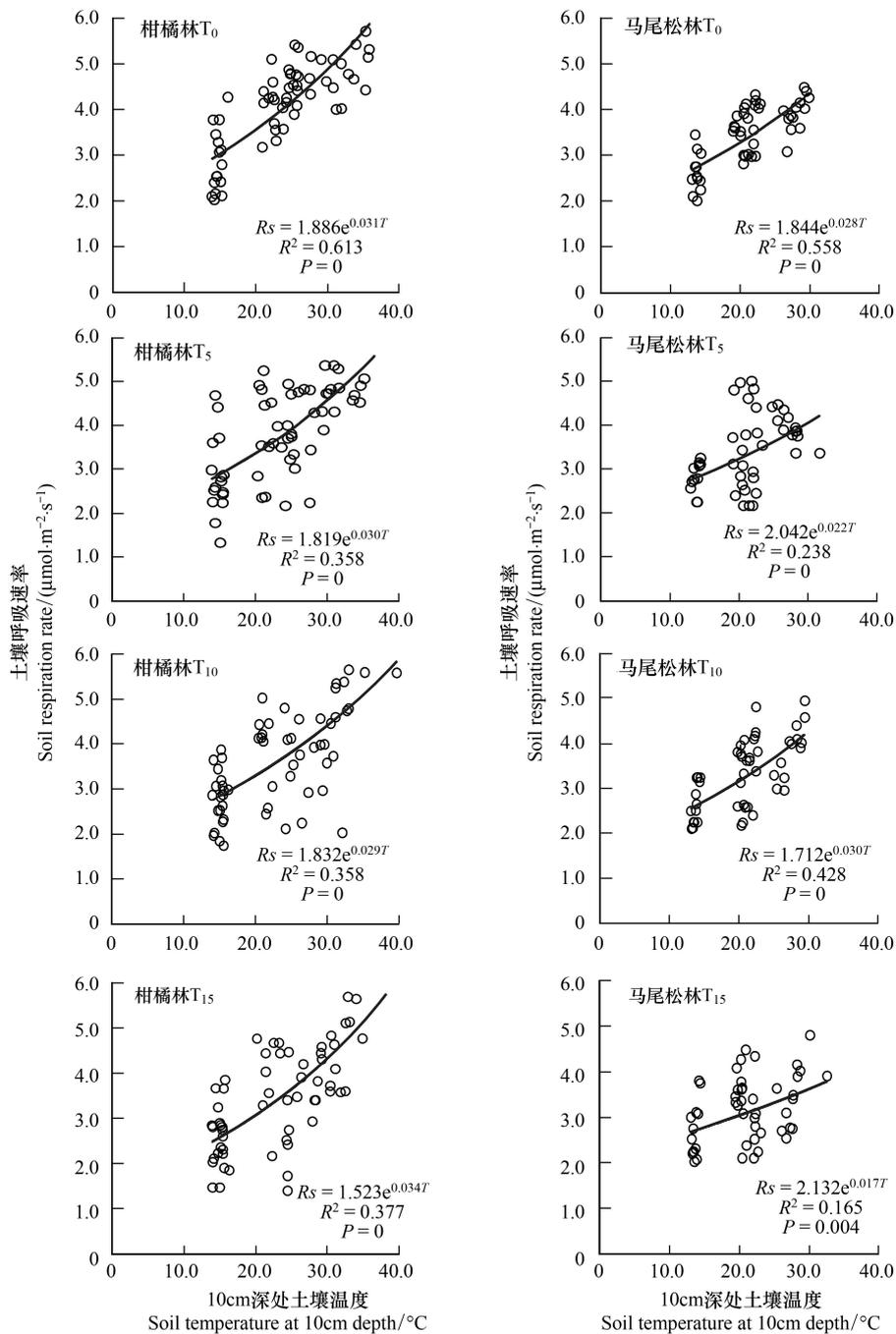


图3 重庆缙云山柑橘林和马尾松林在不同氮沉降模拟条件下土壤 10cm 深处的呼吸与温度的关系

Fig.3 Relationship between soil respiration and soil temperature at 10 cm depth with various nitrogen addition amount treatments under the Masson pine forest and Citrus plantation from Mt. Jinyun, Chongqing

不同氮沉降处理下马尾松和柑橘林土壤呼吸受土壤温度和土壤湿度影响程度不一样,两林分 T<sub>0</sub>拟合度 R<sup>2</sup>均高于氮沉降 T<sub>5</sub>、T<sub>10</sub>和 T<sub>15</sub>组,氮沉降处理下土壤温度和土壤湿度仅能解释土壤呼吸 28.0%—47.8%的变异。

### 3 讨论

土壤呼吸与植被类型、林下温湿度、pH、土壤质地及有机质含量等密切相关<sup>[23-25]</sup>。不同植被的凋落物质量、数量和纤维素含量各异,这些均可影响土壤中微生物和酶等分解凋落物的强度和时问<sup>[26]</sup>。植被不同,其叶面积指数、根生物量等均有差异,叶面积大小可影响植被覆盖下土壤微型气候,Sims 等<sup>[27]</sup>发现土壤 CO<sub>2</sub>通

量值和同时测量的叶面积指数值有显著的相关性。Althea 等<sup>[28]</sup>在研究本宁堡松树林时发现土壤呼吸与距离最近的松树成负相关,与根生物量成正相关。本实验中柑橘林土壤呼吸显著高于马尾松林,原因可能是柑橘林郁闭度低、凋落物输入量大,柑橘树根细、量多且分布广,同时有机肥添加和采果、剪枝等人为活动促进了土壤养分积累与转化,加之林下良好的光、热、水等环境条件促进了土壤微生物和根系生长与代谢,增加了微生物活性与数量,加快了土壤有机质分解速度,因此产生 CO<sub>2</sub> 的速率加快。

表 3 重庆缙云山柑橘林和马尾松林林下模拟氮沉降各处理情况下土壤呼吸与 10cm 深度温度 (T) 及湿度 (W) 的复合关系方程

Table 3 Combined relationships between soil respiration and soil temperature as well soil moisture at 10 cm depth across different nitrogen addition amount treatments under the Masson pine forest and Citrus plantation at Mt. Jinyun, Chongqing

林型 Forest type	处理 Treatment	$R_s = a + bT + cW$					$R_s = ae^{bT}W^c$				
		a	b	c	P	R <sup>2</sup>	a	b	c	P	R <sup>2</sup>
柑橘林 Citrus plantation	T <sub>0</sub>	1.234	0.002	0.121	0.000 **	0.619	0.625	0.032	0.003	0.000 **	0.614
	T <sub>5</sub>	1.311	0.109	0.003	0.000 **	0.333	0.649	0.03	-0.015	0.000 **	0.359
	T <sub>10</sub>	1.186	0.112	0.002	0.000 **	0.350	0.52	0.03	0.026	0.000 **	0.358
	T <sub>15</sub>	-0.135	0.118	0.054	0.000 **	0.395	-1.021	0.033	0.489	0.000 **	0.478
马尾松林 Masson pine forest	T <sub>0</sub>	1.389	0.088	0.01	0.000 **	0.558	0.495	0.028	0.047	0.000 **	0.566
	T <sub>5</sub>	1.49	0.06	0.034	0.000 **	0.257	0.316	0.019	0.163	0.000 **	0.283
	T <sub>10</sub>	1.244	0.086	0.015	0.000 **	0.426	0.366	0.027	0.084	0.000 **	0.444
	T <sub>15</sub>	1.73	0.038	0.033	0.001 **	0.231	0.244	0.013	0.214	0.001 **	0.280

\*\* 表示在 0.01 显著水平下的差异性; \* 表示在 0.05 显著水平下的差异性

土壤呼吸有明显的季节性变化,丁访军等<sup>[29]</sup>在研究喀斯特地区的灌木林、阔叶混交林和针阔混交林土壤呼吸时发现:土壤呼吸呈夏季>秋季>春季>冬季的变化规律。这与刘春霞等<sup>[30]</sup>研究结论一致。而本实验结果为夏季>春季>秋季>冬季,春季>秋季的结论与丁访军、刘春霞等研究不一致,原因可能是研究对象、处理空间和测定时间的异质性导致的。实验区夏季土壤呼吸最大,夏季光照充足、温度较高、降雨量也最丰富,良好环境条件有利于植物生长发育,促进根系呼吸,同时加快凋落物分解,增加微生物种群数量及其代谢活性并使土壤中聚集较高的土壤酶活性,进而使土壤微生物呼吸、土壤动物呼吸及土壤中氧化还原反应产生 CO<sub>2</sub> 的速度加快。

氮沉降对森林土壤呼吸的影响主要有 3 种:促进、抑制和不显著。总的来说,本实验除冬季氮沉降促进马尾松林土壤呼吸外,其余均表明氮沉降抑制土壤呼吸。这与国内外很多研究结果一致。比如,吴迪等<sup>[8]</sup>在研究长江中下游欧美杨 (*Populus deltoides*) 人工林时发现低氮、中氮和高氮处理使 CO<sub>2</sub> 排放量分别减少 12.35%、14.45% 和 15.73%。刘益君等<sup>[9]</sup>发现,氮沉降显著抑制了湿地松林分的土壤呼吸且抑制作用第 1 年显著大于第 2 年,施氮处理后第一年低、中、高处理土壤呼吸分别比对照降低了 31.3%、27.4% 和 24.5%,第二年则分别降低 24.0%、16.5% 和 25.3%。孙素琪等<sup>[10]</sup>于 2012 年研究缙云山常绿阔叶林对模拟氮沉降的响应时发现低、中、高氮处理分别使土壤呼吸降低了 20.88%、34.80% 和 42.23%。Sun 等<sup>[11]</sup>在研究河北塞罕坝国家森林公园落叶松林土壤呼吸时发现低氮处理使土壤呼吸降低 10.0%,高氮则降低 12.5%,与本文结果基本一致但与冬季马尾松林处理后所得结果相异。也有研究表明氮沉降对土壤呼吸有促进作用,Tu 等<sup>[12]</sup>在研究竹林生态系统时发现氮沉降显著增加了土壤呼吸。Hasselquist 等<sup>[13]</sup>研究结果则表明氮沉降对土壤呼吸无影响。这可能跟植被、土壤性质、施氮处理方式、处理与测定时间间隔长度以及气候条件等不同有关。

氮沉降使土壤呼吸降低的原因可能是:①氮沉降增加了土壤铵态氮和硝态氮含量,高浓度氮氮含量降低微生物活性和数量,产生抑制物质或影响土壤酶系统,从而阻碍凋落物分解和养分释放,进而减慢土壤碳释放速度。②氮沉降加强土壤硝化作用,使森林土壤 pH 值降低,加速土壤酸化<sup>[31]</sup>,降低植物根系生长和根生物量,致使根际分泌物减少,进而抑制植物根系呼吸<sup>[10]</sup>。③在氮素丰富的地区,当森林土壤氮含量达到饱和状态后,过量的氮沉降就会对土壤呼吸产生抑制的作用<sup>[32-33]</sup>。

缙云山两林分土壤表层呼吸受土壤温度和湿度共同影响。图 4 是基于指数幂函数模型的土壤呼吸对温

湿度协同变化的响应趋势面。该响应趋势面表明:第一,土壤呼吸随温度升高而加强;第二,低温下,土壤呼吸受土壤湿度影响较小,高温时,土壤呼吸则受温度和湿度协同控制;第三,土壤湿度对马尾松林土壤呼吸影响较明显,但对柑橘林土壤呼吸影响较小。Zeng 等<sup>[34]</sup>在研究太行山洋槐林、黄荆林及铁杆蒿地时发现土壤呼吸主要受土壤温度驱动而与土壤湿度仅有微弱的关系。Chen 等<sup>[35]</sup>研究北京奥林匹克公园时发现土壤呼吸年周期主要受温度控制,而夏季土壤呼吸主要受湿度控制,这均与本研究结论一致。说明土壤呼吸受土壤温度影响更大,而多数情况下土壤呼吸受土壤温度及湿度共同控制。

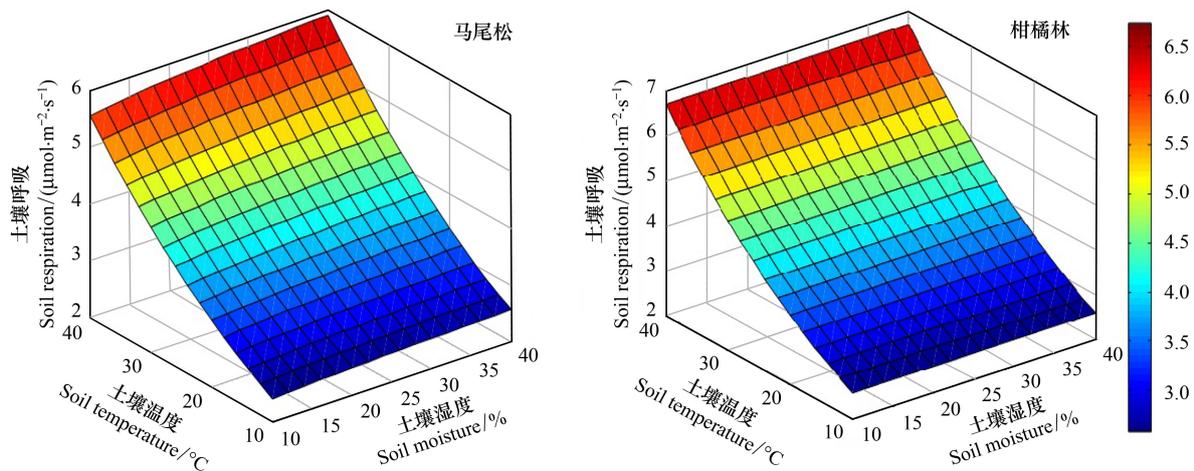


图4 柑橘林和马尾松林土壤呼吸的温湿度响应趋势面

Fig.4 Response surface of soil respiration to soil temperature and soil moisture in Masson pine forest and Citrus plantation

#### 4 结论

(1) 两林分土壤呼吸均具有明显的季节变化规律,其中夏季土壤呼吸最高,其次是春季和秋季,最低为冬季,且柑橘林土壤呼吸明显高于马尾松林,不同季度观测的土壤呼吸平均值之间差异显著( $P < 0.05$ )。

(2) 总体而言,氮沉降抑制了两林分土壤表层呼吸,抑制程度随氮沉降增加而升高,只在土壤湿度低的冬季,氮沉降对马尾松林土壤呼吸有促进作用。

(3) 土壤呼吸与土壤温度存在极显著的指数关系,与土壤呼吸有显著的二次模型拟合关系,但均受氮沉降量处理的影响。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis; Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5), Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment. [2015-06-28]. [http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5\\_SPM\\_FINAL.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf)
- [ 2 ] 唐秀萍. 碳汇 拓展林业外部空间. 中国林业, 2005, (22): 11-17.
- [ 3 ] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [ 4 ] Sehmel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology*, 1995, 1(1): 77-91.
- [ 5 ] Chen S T, Zou J W, Hu Z H, Chen H S, Lu Y Y. Global annual soil respiration in relation to climate, soil properties and vegetation characteristics; Summary of available data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 198-199: 335-346.
- [ 6 ] 魏书精, 罗碧珍, 孙龙, 魏书威, 刘芳芳, 胡海清. 森林生态系统土壤呼吸时空异质性及影响因子研究进展. *生态环境学报*, 2013, 22(4): 689-704.
- [ 7 ] Lu C Q, Tian H Q, Liu M L, Ren W, Xu X F, Chen G S, Zhang C. Effect of nitrogen deposition on China's terrestrial carbon uptake in the context of multifactor environmental changes. *Ecological Applications*, 2012, 22(1): 53-75.
- [ 8 ] 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.

- [ 9 ] 闫文德, 徐旺明, 郑威, 王光军, 张徐源, 梁小翠, 高超. 施氮对湿地松(*Pinus elliottii*)林土壤呼吸及其相关因子的消减效应. 生态学报, 2016, 36(2), doi:10.5846/stxb201311192767.
- [ 10 ] 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 李云霞, 于雷, 胡波, 刘婕. 缙云山常绿阔叶林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应. 林业科学, 2014, 50(1): 1-8.
- [ 11 ] Sun Z Z, Liu L L, Ma Y C, Yin G D, Zhao C, Zhang Y, Piao S L. The effect of nitrogen addition on soil respiration from a nitrogen-limited forest soil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 197: 103-110.
- [ 12 ] Tu L H, Hu T X, Zhang J, Li X W, Hu H L, Liu L, Xiao Y L. Nitrogen addition stimulates different components of soil respiration in a subtropical bamboo ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58: 255-264.
- [ 13 ] Hasselquist N J, Metcalfe D B, Högborg P. Contrasting effects of low and high nitrogen additions on soil CO<sub>2</sub> flux components and ectomycorrhizal fungal sporocarp production in a boreal forest. *Global Change Biology*, 2012, 18(12): 3596-3605.
- [ 14 ] Gundersen P, Emmett B A, Kjønaas O J, Koopmans C J, Tietema A. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: a synthesis of NITREX data. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101(1/3): 37-55.
- [ 15 ] Fenn M E, Poth M A, Aber J D, Baron J S, Bormann B T, Johnson D W, Lemly A D, McNulty S G, Ryan D F, Stottliemyer R. Nitrogen excess in North American ecosystems: predisposing factors, ecosystem responses, and management strategies. *Ecological Applications*, 1998, 8(3): 706-733.
- [ 16 ] Fang C, Moncrief J B. The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(2): 155-165.
- [ 17 ] Bowden R D, Nadelhoffer K J, Boone R D, Melillo J M, Garrison J B. Contributions of aboveground litter, belowground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, 23(7): 1402-1407.
- [ 18 ] Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, De Parri I, Jarvis P G, Valentini R. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in central Italy. *Global Change Biology*, 2002, 8(9): 851-866.
- [ 19 ] Sotta E D, Meir P, Malhi Y, Nobre A D, Hodnett M, Grace J. Soil CO<sub>2</sub> efflux in a tropical forest in the central Amazon. *Global Change Biology*, 2004, 10(5): 601-617.
- [ 20 ] 姜艳, 王兵, 汪玉如, 杨清培. 亚热带林分土壤呼吸及其与土壤温湿度关系的模型模拟. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1641-1648.
- [ 21 ] Wildung R E, Garland T R, Buschbom R L. The interdependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1975, 7(6): 373-378.
- [ 22 ] 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.
- [ 23 ] Song X Z, Peng C H, Zhao Z Y, Zhang Z T, Guo B H, Wang W F, Jiang H, Zhu Q. Quantification of soil respiration in forest ecosystems across China. *Atmospheric Environment*, 2014, 94: 546-551.
- [ 24 ] Shabaga J A, Basiliko N, Caspersen J P, Jones T A. Seasonal controls on patterns of soil respiration and temperature sensitivity in a northern mixed deciduous forest following partial-harvesting. *Forest Ecology and Management*, 2015, 348: 208-219.
- [ 25 ] 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.
- [ 26 ] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展. 地球科学进展, 2005, 20(7): 778-785.
- [ 27 ] Sims P L, Bradford J A. Carbon dioxide fluxes in a southern plains prairie. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109(2): 117-134.
- [ 28 ] ArchMiller A A, Samuelson L J. Intra-annual variation of soil respiration across four heterogeneous longleaf pine forests in the southeastern United States. *Forest Ecology and Management*, 2015, doi:10.1016/j.foreco.2015.05.016.
- [ 29 ] 丁访军, 高艳平, 吴鹏, 崔迎春, 胡隼. 喀斯特地区 3 种林型土壤呼吸及其影响因子. 水土保持学报, 2010, 24(3): 217-221, 237-237.
- [ 30 ] 刘春霞, 王玉杰, 王云琦, 冯华敏, 胡波. 重庆缙云山 3 种林型土壤呼吸及其影响因子. 土壤通报, 2013, 44(3): 587-593.
- [ 31 ] 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.
- [ 32 ] Franklin O, Högborg 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.
- [ 33 ] Maier C A, Kress L W. Soil CO<sub>2</sub> evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations as affected by moisture and nutrient availability. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30(3): 347-359.
- [ 34 ] Zeng X H, Zhang W J, Shen H T, Cao J S, Zhao X. Soil respiration response in different vegetation types at Mount Taihang, China. *Catena*, 2014, 116: 78-85.
- [ 35 ] Chen W J, Jia X, Zha T S, Wu B, Zhang Y Q, Li C Y, Wang X P, He G M, Yu H Q, Chen G P. Soil respiration in a mixed urban forest in China in relation to soil temperature and water content. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 54: 63-68.