

DOI: 10.20103/j.stxb.202208152345

夏国威, 汪东方, 朱涛, 姜晓涵, 陈光平, 黄承玲. 氮添加和凋落物去除对黔中喀斯特地区柳杉人工林土壤呼吸的影响. 生态学报, 2023, 43(20): 8587-8597.

Xia G W, Wang D F, Zhu T, Jiang X H, Chen G P, Huang C L. Effects of nitrogen addition and litter removal on soil respiration of *Cryptomeria fortunei* plantation in Karst Area of central Guizhou Province. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20): 8587-8597.

氮添加和凋落物去除对黔中喀斯特地区柳杉人工林土壤呼吸的影响

夏国威^{1,2,*}, 汪东方¹, 朱涛¹, 姜晓涵¹, 陈光平³, 黄承玲^{1,2}

1 贵州民族大学生态环境工程学院, 贵阳 550025

2 贵州民族大学喀斯特环境地质灾害防治国家民委重点实验室, 贵阳 550025

3 贵州省国有龙里林场, 龙里 551200

摘要: 凋落物是土壤呼吸的主要碳源, 日益增加的大气氮沉降通过改变森林凋落物的输入与分解影响土壤呼吸。为揭示氮沉降及凋落物管理对森林土壤呼吸及其组分的影响, 以贵州省国有扎佐林场 15 年生柳杉人工林为研究对象, 设置 4 个氮添加处理: 对照 (CK, 0 gN m⁻² a⁻¹)、低氮 (LN, 15 gN m⁻² a⁻¹)、中氮 (MN, 30 gN m⁻² a⁻¹) 和高氮 (HN, 60 gN m⁻² a⁻¹), 并在每种氮添加处理下设置去除凋落物和保留凋落物两种处理, 于 2021 年 3 月—2022 年 2 月利用 LI-8100 测定土壤呼吸速率, 并分析氮添加及凋落物处理对土壤呼吸速率影响, 确定影响土壤呼吸速率变化的主要因子。结果表明: 氮添加和去除凋落物处理没有改变土壤呼吸速率的时间变化, 土壤呼吸速率月均最大值出现在 7 月, 月均最小值出现在 2 月。氮添加对土壤呼吸速率无显著影响 ($P > 0.05$), 除 CK 外, 去除凋落物处理会显著降低土壤呼吸速率 ($P < 0.05$)。凋落物对土壤总呼吸速率的贡献率为 8.6%—28.5%, 且 LN 处理下凋落物对土壤呼吸速率的贡献率最大。土壤呼吸速率与 5 m 土壤温度呈显著指数相关 ($P < 0.01$), 与 5 cm 土壤湿度呈显著负线性相关 ($P < 0.01$)。土壤温度解释了土壤呼吸速率变异的 58.5%—79.5%, 土壤湿度解释了土壤呼吸速率变异的 26.4%—39.5%, 以土壤温度和湿度构建的双变量模型拟合效果均好于单因子模型, 土壤温湿度共同解释土壤呼吸速率变异的 59.1%—85.8%。结论表明在大气氮沉降增加的背景下, 温度是影响土壤呼吸的主要因素, 凋落物管理是调控土壤呼吸的关键过程。

关键词: 土壤呼吸; 氮添加; 去除凋落物; 土壤温湿度; 柳杉; 结构方程模型

Effects of nitrogen addition and litter removal on soil respiration of *Cryptomeria fortunei* plantation in Karst Area of central Guizhou Province

XIA Guowei^{1,2,*}, WANG Dongfang¹, ZHU Tao¹, JIANG Xiaohan¹, CHEN Guangping³, HUANG Chengling^{1,2}

1 College of Eco-Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China

2 The Karst Environmental Geological Hazard Prevention of Key Laboratory of State Ethnic Affairs Commission, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China

3 State-Owned Longli Forestry Farm of Guizhou Province, Longli 551200, China

Abstract: Litter is the main carbon source for soil respiration. Soil respiration rate is affected by increasing atmospheric nitrogen deposition which through changing the input and decomposition of forest litters. To reveal the effects of nitrogen deposition and litters management on soil respiration rate, a 15-years old *Cryptomeria fortunei* plantation was selected as the

基金项目: 贵州省科技计划项目 (黔科合基础 [2020] 1Y071); 贵州省教育厅青年科技人才成长项目 (黔教合 KY [2018] 133); 贵州省林业科研项目 (黔林科合 60 号)

收稿日期: 2022-08-15; **采用日期:** 2023-09-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xgw-8@163.com

research object in state-owned Zhazuo forestry farm of Guizhou Province. Four nitrogen addition treatments were set up in the *Cryptomeria fortunei* plantation, which were Control plots (CK, $0 \text{ gN m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), low nitrogen plot (LN, $15 \text{ gN m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), medium nitrogen (MN, $30 \text{ gN m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) and high nitrogen (HN, $60 \text{ gN m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), respectively. Meanwhile, litter removal and litter control group (no litter treatment) were designed in each nitrogen addition treatment. Soil respiration rate were measured by Li-8100 from March 2021 to February 2022. The effects of nitrogen deposition and litter treatments on soil respiration rate were analyzed based on the measured data, and the main influence factor was determined according to the analysis. The results showed that the temporal variations of soil respiration rate were not influenced by nitrogen addition and litter removal, the maximal monthly values of soil respiration rates all appeared in July and the minimal monthly values all appeared in February among different nitrogen addition treatments. Nitrogen addition had no significant influences on soil respiration rate ($P>0.05$), whereas litter removal decreased soil respiration rate significantly ($P<0.05$) except CK plot. The contributions of litter to total soil respiration rate were 8.6%—28.5% in different nitrogen addition treatments, and the largest contribution of litter appeared in LN plot. There were significant exponential relationship between soil temperature and soil respiration rate at 5cm soil depth in all nitrogen addition levels, and 58.5%—79.5% variations of soil respiration rate were explained by soil temperature model. The soil respiration rate showed significant negative linear relationships with soil moisture at 5cm soil depth in all nitrogen addition levels, and changes of soil respiration rate could be interpreted 26.4%—39.5% by soil moisture. The determination coefficient of the bivariate model based on soil temperature and soil moisture was larger than single factor model, and 59.1%—85.8% variations of soil respiration rate were explained by the bivariate model in all nitrogen addition plots. It is conclude that temperature is the main factor affecting soil respiration rate, and litter management is the key process to regulate soil respiration under the background of increasing atmosphere nitrogen deposition.

Key Words: soil respiration; nitrogen addition; litter removal; soil temperature and moisture; *Cryptomeria fortunei*; structure equation model

土壤呼吸作为陆地与大气之间碳交换的桥梁,对土壤碳储存以及生态系统碳循环有着重要的影响^[1]。森林土壤呼吸是陆地生态系统土壤呼吸的重要组成部分,其动态变化会对全球碳平衡产生深远影响^[2]。近年来,随着全球工业化的迅速发展、化石燃料的燃烧、含氮化肥的生产和使用,使氮的化合物在大气积累^[3-4],并通过干湿沉降的方式输入土壤生态系统,大气氮沉降已成为不可忽略的全球环境问题^[5-6]。大气氮沉降显著提高了土壤可利用氮素浓度,并间接影响森林的环境因子(如土壤温湿度),进而对森林土壤呼吸产生潜在的影响^[7-8]。目前国内外已开展诸多模拟氮沉降对森林土壤呼吸影响的研究,但由于实验时间、环境条件以及生态系统的不同,其结果仍存在较大的争议,主要表现为促进^[9-11]、抑制^[12-14]和无显著影响^[15-16]。其主要原因是氮添加处理对土壤自养和异养呼吸影响大小和方向不一致,进而表现出不同的结果^[17]。因此,研究森林土壤呼吸对氮添加的响应,有助于深入理解全球氮沉降背景下森林生态系统碳储存的变化。

凋落物作为缓冲层覆盖地表,对氮沉降有一定的阻挡作用,会延缓和降低氮素进入土壤^[18],同时也是土壤呼吸的主要碳源。去除凋落物会干扰土壤表层微环境,减少有机质的输入,影响土壤微生物活性,进而影响土壤有机质的分解;同时,去除凋落物会减少土壤异养呼吸,使得土壤呼吸速率降低。土壤温湿度是影响土壤呼吸的主要环境因子,主要通过调节微生物代谢活动、根系生长和凋落物分解速率来影响土壤呼吸^[19]。因此,研究森林土壤呼吸对凋落物去除与微环境变化的响应,有助于深入理解全球环境与气候变化条件下人工林经营管理活动对森林土壤碳库的影响。

本文以柳杉(*Cryptomeria fortunei*)人工林为研究对象,通过研究氮添加与去除凋落物条件下土壤呼吸的变化规律,揭示柳杉人工林生态系统土壤碳库对氮添加与凋落物去除的响应,为黔中喀斯特地区柳杉人工林的科学经营和管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究地位于贵州省国有扎佐林场六屯分场,地处贵州省修文县六屯镇(106°80′—106°81′E, 26°95′—26°96′N),海拔在 1000—1500 m 之间,气候温和,属于亚热带季风性气候。年降雨量约 1200 mm,主要集中在 5—9 月,全年日照时数约 1200 h,无霜期约 280 d。年均气温 14℃,最高气温集中在 7 月,最高可达 34℃,最低气温集中在 2 月,最低至-4℃。总体地势表现为西北高,东南低,土壤为黄壤^[20]。实验地于 2011 年进行第一次林下抚育,植被类型较为单一,主要灌木为火棘(*Pyracantha fortuneana*),主要草本植物为清风藤(*Sabia japonica*)、竹叶草(*Oplismenus compositus*)和蕨类。

1.2 样地设置

2020 年 8 月,在贵州省国有扎佐林场六屯分场选择具有代表性、生长情况相似的 15 年生柳杉人工林,设立 3 块 20 m×20 m 固定样地,样地间隔 5 m 以上;贵州干湿氮沉降总和低于 15 gN m⁻² a⁻¹^[21-22],因此,每样地设置四个氮添加水平,分别为对照 CK(0 gN m⁻² a⁻¹),低氮 LN(15 gN m⁻² a⁻¹),中氮 MN(30 gN m⁻² a⁻¹)和高氮 HN(60 gN m⁻² a⁻¹)。在每一氮添加水平下设置 2 个 1 m×1 m 的独立样方,其中一个保留凋落物,另一个去除凋落物,即清除样方及土壤呼吸环内表面凋落物,并在测量前清除当月新鲜凋落物和杂草。在每一样方中心插入 1 个聚氯乙烯(PVC)土壤呼吸环(直径 20 cm,深度 8 cm),使其裸露地面 2—5 cm,测量期间保持不动。由于大气氮沉降对生态系统的影响是缓慢而持续的,将年施氮量平均分成 4 等份,在每季度末施氮一次,每次均以 CO(NH₂)₂ 作为外源氮,将其溶于 5 L 水中,均匀喷洒在样方内,对照样地喷洒相同体积的水,防止处理过程中水添加对实验造成的影响。自 2021 年 2 月底开始施氮,实验期间共施氮 4 次,土壤呼吸测定时间与施氮时间应间隔一周以上。

1.3 土壤呼吸速率的测定

从 2021 年 3 月至 2022 年 2 月进行野外测定,每月选取晴天或多云天气测定 1—2 次,利用 LI-8100 土壤碳通量自动测量系统测定柳杉人工林土壤呼吸速率,测量时间为 9:00—15:00,每个样方重复测量 3 次,取平均值为当月的月均值^[23]。2021 年 4 月(春季)、7 月(夏季)、9 月(秋季)和 2022 年 1 月(冬季)分别测定柳杉人工林土壤总呼吸速率(保留凋落物处理)日变化,测定时间为 8:00—18:00,每 2 h 测定一次。在每次开始测定前,清除土壤呼吸环内的杂草和苔藓,并尽量保证不破坏土壤及根系,最大程度的降低对实验干扰。在实验进行的同时,使用 LI-8100 配备的土壤温湿度探针,测定 5 cm 处土壤的温湿度。

1.4 数据分析

本研究采用 Van't Hoff 指数模型 $R_s = ae^{bT}$ ^[24-25] 分析土壤呼吸速率与土壤温度的关系,其中 R_s 为土壤呼吸速率, a 为 0℃ 时土壤呼吸速率, b 为温度反应系数,同时,利用温度反应系数 b 计算温度敏感性指数 Q_{10} ,计算方法为 $Q_{10} = e^{10b}$,采用回归分析法研究土壤呼吸速率与土壤温湿度的关系。本研究采用双因素方差分析比较氮添加和月份变化及其交互作用对柳杉人工林土壤呼吸速率的影响;采用嵌套方差分析比较氮添加处理下凋落物的变化对土壤温湿度、土壤呼吸是否存在显著差异,若存在显著差异,使用最小显著差异检验(LSD)法比较不同处理间的差异性;构建结构方程模型比较氮添加处理和凋落物处理及土壤温湿度对土壤呼吸的影响。以上统计分析均使用 SPSS 22.0 和 AMOS 22.0 完成,利用 Origin 2018 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤温湿度及呼吸速率的日变化

从图 1 可以看出,不同氮添加处理下春、夏、秋、冬季土壤 5 cm 处温度的日变化趋势大致相同,均呈现为先逐渐上升后下降的变化趋势,春季和冬季土壤温度最大值出现在 16:00,而夏季和秋季土壤温度最大值出现在 14:00。春季 CK、LN、MN 和 HN 处理土壤温度的日变异系数在 22.3%—25.2%;夏季的日变异系数在

8.5%—9.4%;秋季的日变异系数在 14.6%—15.2%;冬季的日变异系数在 26.9%—47.5%,冬季由于土壤温度日均值较小,但因为测量先后的顺序的差别,使得 CK 处理下土壤温度变化不大,日变异系数低于其它氮添加处理。除夏季外,不同氮添加水平下土壤 5 cm 处湿度的日变化趋势与温度相反,大都呈现为先下降后上升的变化趋势,在 5 cm 处土壤温度达到最高时,土壤湿度达到或接近最小值。春季 CK、LN、MN 和 HN 处理土壤湿度的日变异系数在 11.2%—13.2%;夏季的日变异系数在 3.7%—5.1%;秋季的日变异系数在 10.3%—13.0%;冬季的日变异系数在 6.1%—7.1%。

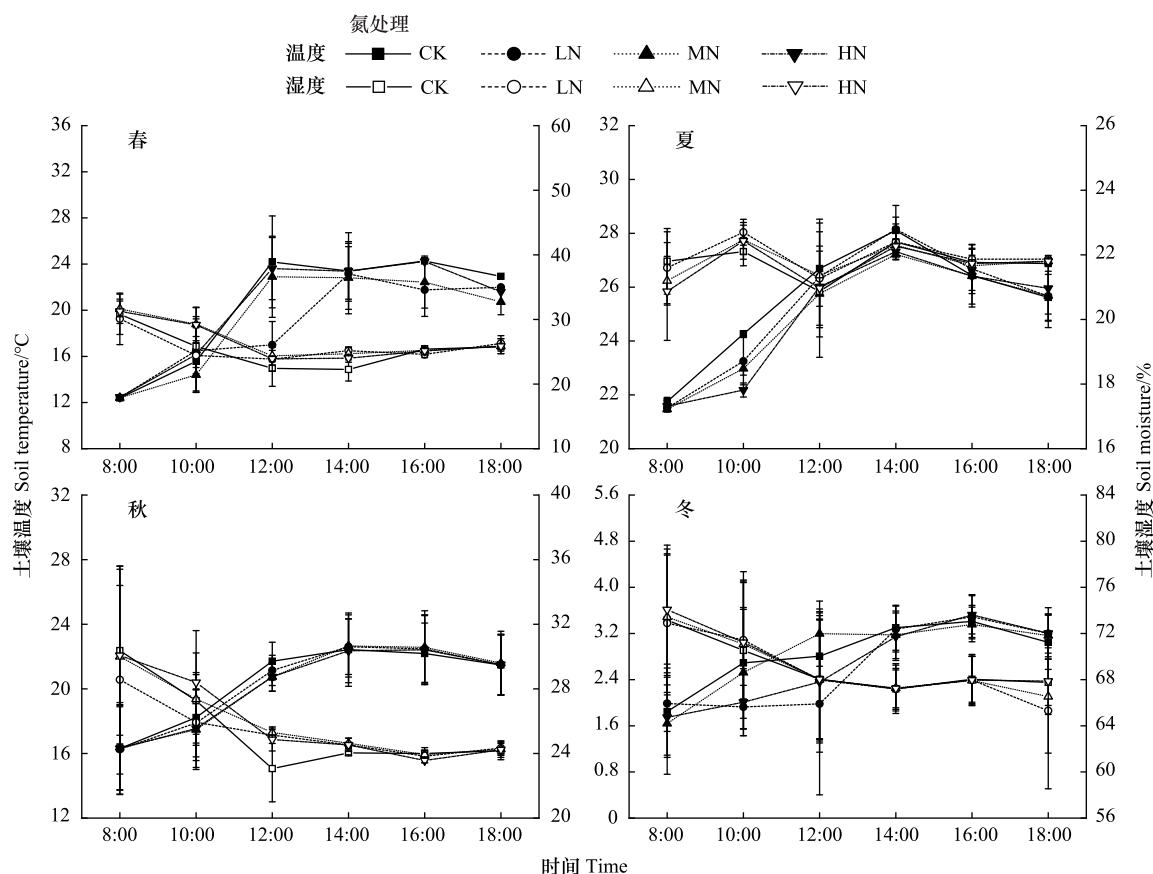


图 1 不同氮添加处理下土壤呼吸速率的日变化 (均值±标准误)

Fig.1 Diurnal variation of soil respiration rate under different nitrogen addition treatments (Mean±SE)

从图 2 可以看出,不同氮添加处理水平下春、夏、秋、冬季土壤呼吸速率日变化与土壤温度变化相似,大都表现为单峰曲线,除冬季外,其它季节土壤呼吸速率均在 12:00—16:00 达到峰值。春季 CK、LN、MN 和 HN 处理土壤呼吸速率的日变异系数在 26.3%—31.8%;夏季的日变异系数在 19.1%—28.5%;秋季的日变异系数在 12.6%—23.9%;冬季的日变异系数在 14.3%—22.4%。

2.2 氮添加及凋落物处理对土壤呼吸和 5 cm 土壤温湿度的季节变化影响

双因素方差分析表明(表 1),月份显著改变了土壤呼吸速率($P < 0.05$),而氮添加对土壤呼吸速率无显著影响($P > 0.05$);且氮添加处理与月份的交互作用对土壤呼吸速率也无显著影响($P > 0.05$)。

由图 3 可知,保留与去除凋落物条件下,不同氮添加处理下柳杉人工林土壤温度具有相似的季节性特征,最大值出现在 7 月,最小值出现在翌年 1 月,保留凋落物处理土壤温度月份变化范围在 2.25—25.93℃,去除凋落物处理在 2.57—25.17℃。不同氮添加处理下柳杉人工林土壤湿度亦具有相似的季节变化趋势,在 1 月达到最大值,5 月降至最小值,保留凋落物处理土壤湿度月份变化范围在 20.63%—68.87%,去除凋落物处理土在 20.17%—68.98%。嵌套方差分析结果表明,氮添加和氮添加下凋落物处理对土壤温湿度均无显著影响($P > 0.05$)。

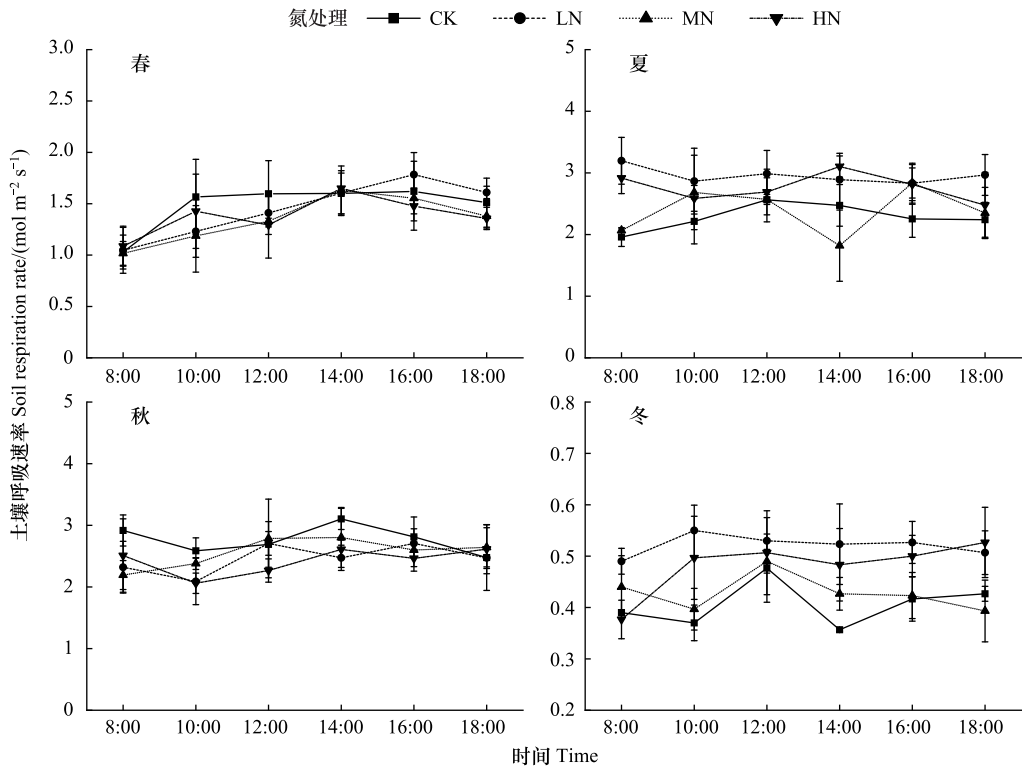


图 2 不同氮添加处理下土壤温湿度的日变化 (均值±标准误)

Fig.2 Diurnal variation of soil temperature and soil moisture under different nitrogen addition treatments (Mean±SE)

CK:对照(0 gN m⁻² a⁻¹);LN:低氮(15 gN m⁻² a⁻¹);MN:中氮(30 gN m⁻² a⁻¹);HN:高氮(60 gN m⁻² a⁻¹)

表 1 氮添加和月份变化对土壤呼吸速率影响的双因素方差分析

Table 1 Two-way ANOVA of the effects of different nitrogen addition and season on soil respiration rate

处理 Treatments	因素 Factors	df	均方差 Mean square	F	P
去除凋落物 Remove litter	氮添加	3	0.896	1.039	0.375
	月份	9	27.494	160.325	0.000
	氮添加×月份	27	0.171	0.997	0.473
保留凋落物 Keep litter	氮添加	3	0.500	0.974	0.405
	月份	9	16.974	203.439	0.000
	氮添加×月份	27	0.114	1.370	0.108

由图 4 可以看出,保留与去除凋落物条件下,不同氮添加处理下柳杉人工林土壤呼吸速率具有明显的季节动态,其变化规律与土壤温度相似,与土壤湿度大致相反,最大值出现在 7 月,最小值出现在 2 月。就全年数据而言,保留凋落物样地 CK、LN、MN 和 HN 处理的土壤呼吸速率均值分别为 1.35,1.52,1.26,1.51 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,去除凋落物样地 CK、LN、MN 和 HN 处理的土壤呼吸速率均值分别为 1.20,1.07,1.12,1.06 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。凋落物呼吸亦有明显的月份变化,凋落物呼吸速率在春夏季达到最高,在冬季降到最低。凋落物对土壤总呼吸速率的贡献率为 8.6%—28.5%,其中 CK 处理下凋落物对土壤呼吸速率的贡献率最小,LN 处理下贡献率最大,HN 和 MN 次之,这一结果也说明了氮添加可以促进微生物对凋落物的分解速率。嵌套方差分析结果表明,氮添加对土壤呼吸速率无显著影响($P>0.05$);除 CK 外,氮添加下去除凋落物处理均显著降低了土壤呼吸速率($P<0.001$)。

2.3 不同处理下土壤呼吸速率与土壤温湿度的关系

由表 2 可知,不同处理下柳杉人工林土壤呼吸与土壤温度均呈现极显著指数相关($P<0.001$),土壤温度

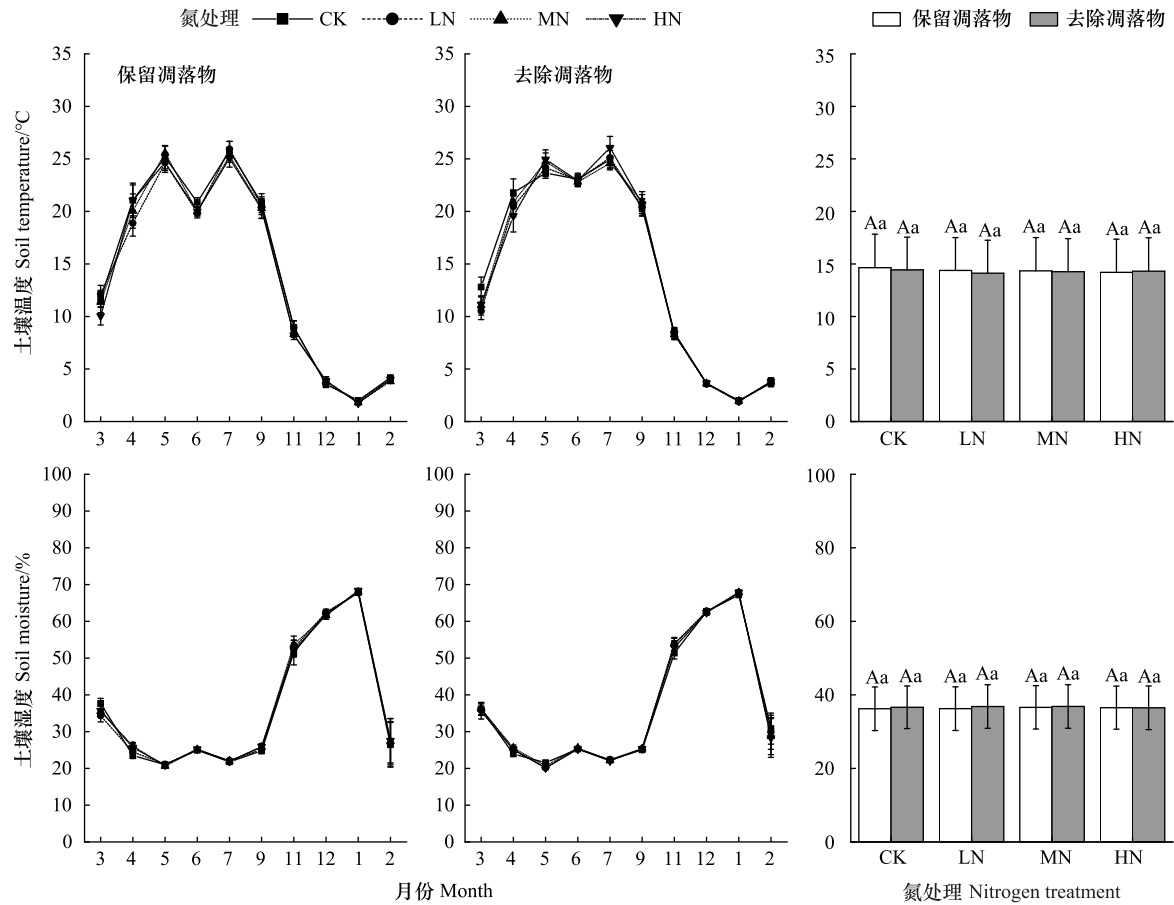


图3 不同氮添加处理下土壤温湿度的月变化(均值±标准误)

Fig.3 Month variations of soil temperature and soil moisture under different nitrogen addition treatments(Mean±SE)

不同大写字母表示同一凋落物处理不同氮添加水平之间差异显著性,不同小写字母表示相同氮添加水平不同凋落物处理之间差异显著性

可以解释土壤呼吸速率变异的 58.5%—79.5%。 Q_{10} 反应土壤呼吸速率对温度的敏感性,保留和去除凋落物处理下不同氮添加处理的 Q_{10} 值没有明显变化;除 HN 处理外,去除凋落物的 Q_{10} 值要高于相同氮添加处理下保留凋落物的 Q_{10} 值。

表 2 土壤呼吸速率与 5 cm 深度处土壤温度的指数关系模型($R_s = ae^{bT}$)

Table 2 Exponential relationship between soil respiration rate and soil temperature at 5 cm depth

凋落物处理 Litter treatments	氮处理 Nitrogen treatments	模型参数 a Model parameter a	模型参数 b Model parameter b	决定系数 R^2 Determination coefficient R^2	温度敏感指数 Q_{10} Temperature sensitive index Q_{10}	P
保留凋落物 Keep litter	CK	0.496	0.058	0.622	1.79	0.000
	LN	0.585	0.057	0.631	1.77	0.000
	MN	0.487	0.060	0.621	1.82	0.000
	HN	0.539	0.062	0.746	1.86	0.000
去除凋落物 Remove litter	CK	0.327	0.065	0.733	1.92	0.000
	LN	0.400	0.059	0.585	1.80	0.000
	MN	0.357	0.065	0.694	1.92	0.000
	HN	0.403	0.058	0.795	1.79	0.000

CK:对照($0\text{ gN m}^{-2}\text{ a}^{-1}$) Control check;LN:低氮($15\text{ gN m}^{-2}\text{ a}^{-1}$) Low nitrogen;MN:中氮($30\text{ gN m}^{-2}\text{ a}^{-1}$) Middle nitrogen;HN:高氮($60\text{ gN m}^{-2}\text{ a}^{-1}$) High nitrogen

由表 3 可知,土壤呼吸与土壤湿度存在显著负相关关系($P<0.001$),土壤湿度可以解释土壤呼吸变异的

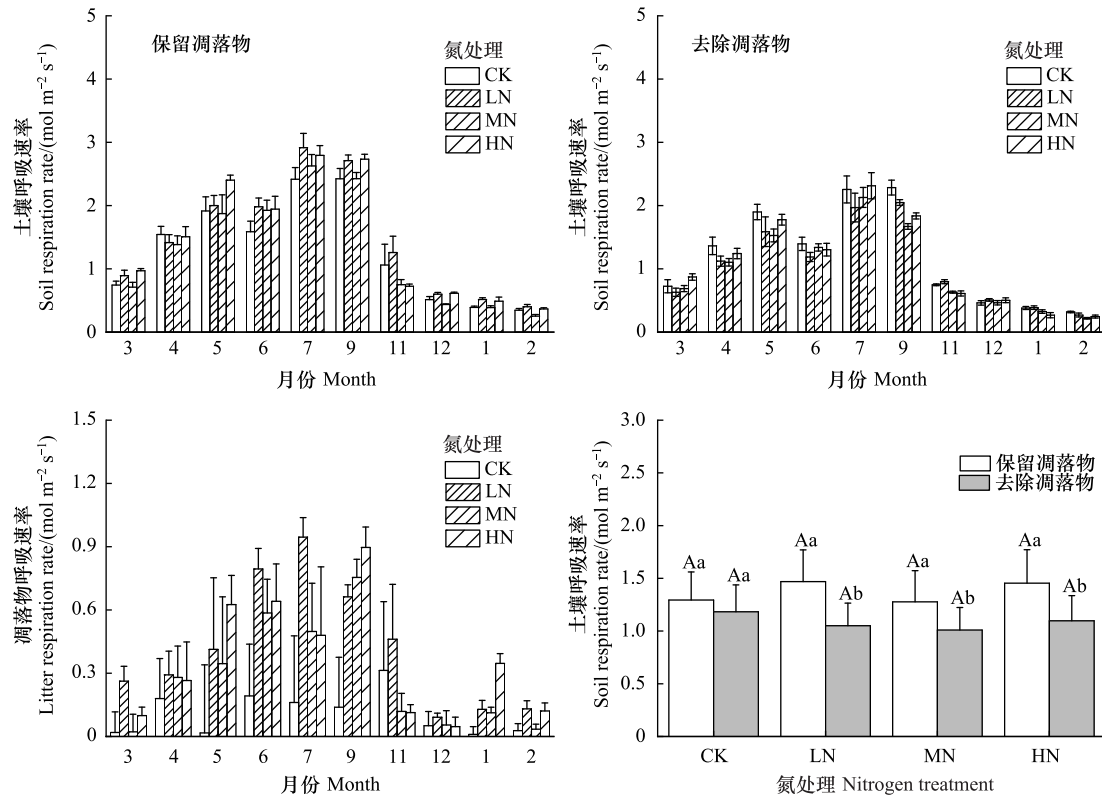


图4 不同氮添加处理下土壤呼吸速率的月变化(均值±标准误)

Fig.4 Month variations of soil respiration rate under different nitrogen addition treatments (Mean±SE)

26.4%—39.5%,明显低于与土壤温度的指数模型。利用线性和非线性双变量模型对土壤呼吸速率与土壤温湿度关系进行分析(表4),结果表明土壤温度和湿度能够共同解释土壤呼吸季节变化的59.1%—85.8%。在一定程度上,土壤温度和湿度的双变量模型预测土壤呼吸的准确性更高,这表明土壤呼吸受土壤温湿度的协同作用。

表3 土壤呼吸速率与5 cm深度处土壤湿度的线性关系模型($R_t = aW + b$)

Table 3 Linear relationship between soil respiration rate and soil moisture at 5 cm depth

凋落物处理 Litter treatments	氮处理 Nitrogen treatments	模型参数 a Model parameter a	模型参数 b Model parameter b	决定系数 R^2 Determination coefficient R^2	P
保留凋落物 Keep litter	CK	-2.868	2.331	0.334	0.000
	LN	-2.924	2.527	0.302	0.000
	MN	-2.849	2.332	0.303	0.000
	HN	-3.363	2.689	0.395	0.000
去除凋落物 Remove litter	CK	-2.478	1.880	0.351	0.000
	LN	-2.201	1.866	0.264	0.000
	MN	-2.397	1.937	0.322	0.000
	HN	-1.879	1.739	0.298	0.000

结构方程模型表明(图5),凋落物移除并非通过改变土壤温湿度来影响土壤呼吸速率,而是通过减少碳源供应显著抑制土壤呼吸速率;氮添加通过直接或间接效应没有显著改变土壤呼吸速率。土壤温度和湿度两者之间有显著的负相关关系,其中土壤温度对土壤呼吸有显著的正向影响,而土壤湿度对土壤呼吸速率无显著影响。模型各变量共同解释了土壤呼吸变异的63.3%。

表 4 土壤呼吸速率与 5 cm 深度处土壤温湿度的关系方程

Table 4 Relationships between soil respiration rate and soil temperature and soil moisture at 5 cm depth

凋落物处理 Litter treatments	氮处理 Nitrogen treatments	线性模型 Linear model	决定系数 R^2 Determination coefficient R^2	指数模型 Exponential model	决定系数 R^2 Determination coefficient R^2
		$\ln R_s = a + bT + cW + dTW$		$R_s = ae^{bT}W^c$	
保留凋落物 Keep litter	CK	$\ln R_s = -1.001 + 0.011T - 0.884W + 0.329TW$	0.703	$R_s = 0.503e^{0.058T}W^{0.017}$	0.622
	LN	$\ln R_s = -1.190 + 0.051T + 0.001W + 0.177TW$	0.716	$R_s = 0.623e^{0.060T}W^{0.081}$	0.633
	MN	$\ln R_s = -2.039 + 0.064T + 1.114W + 0.174TW$	0.772	$R_s = 0.557e^{0.067T}W^{0.202}$	0.627
	HN	$\ln R_s = -1.201 + 0.091T + 0.709W - 0.047TW$	0.810	$R_s = 0.522e^{0.061T}W^{-0.040}$	0.746
去除凋落物 Remove litter	CK	$\ln R_s = -0.541 + 0.223T + 3.605W + 0.044TW$	0.858	$R_s = 0.352e^{0.067T}W^{0.092}$	0.734
	LN	$\ln R_s = -0.513 + 0.216T + 3.983W + 0.202TW$	0.819	$R_s = 0.459e^{0.066T}W^{0.212}$	0.591
	MN	$\ln R_s = -0.036 + 0.208T + 3.098W + 0.174TW$	0.826	$R_s = 0.390e^{0.069T}W^{0.124}$	0.695
	HN	$\ln R_s = -2.391 + 0.103T + 2.377W - 0.024TW$	0.848	$R_s = 0.458e^{0.063T}W^{0.171}$	0.801

R_s : 总土壤呼吸速率 Total soil respiration rate/($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); T : 土壤温度 Soil temperature/°C; W : 土壤湿度 Soil moisture/%

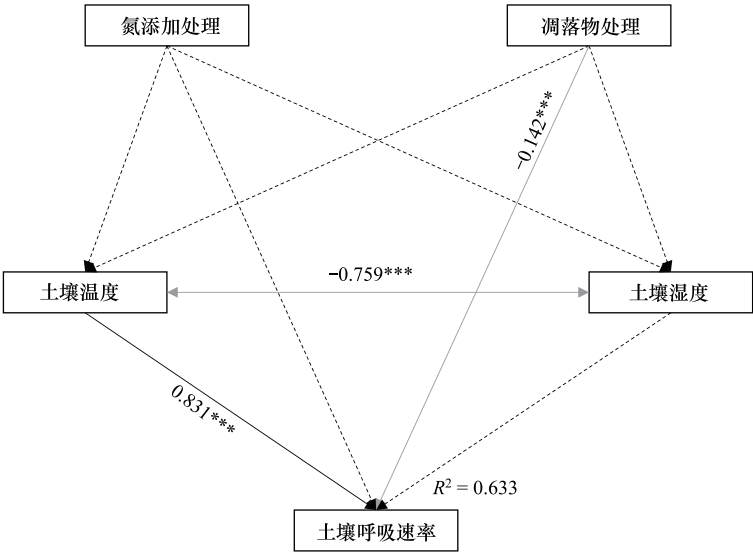


图 5 氮添加处理和凋落物处理对土壤呼吸速率影响的结构方程模型分析

Fig.5 The structural equation model for the effects of nitrogen addition and litter treatment on soil respiration rate

实线箭头表示显著的正相关路径 ($P < 0.05$), 灰色箭头表示显著的负相关路径, 虚线箭头表示不显著的路径; 箭头上的数字表示标准化路径系数; 模型模拟的结果为: 卡方 $\chi^2 = 0.552$; 卡方自由度比 $\chi^2/df = -0.087$; 拟合优度指数, $GFI = 1.000$; 调整拟合优度指数, $AGFI = 1.001$; 近似误差均方根, $RMSEA = 0.000$; R^2 表示模型对该变量的解释程度; * * *, $P < 0.001$

3 讨论

3.1 氮添加对土壤呼吸的影响

本研究发现,氮添加没有改变土壤呼吸的季节性变化趋势,并在 7 月达到最大值,之后随着土壤温度的下降,土壤呼吸速率也随之降低,在 2 月降至最小,与土壤温度的季节变化大致相同,这与多数研究结果一致^[26–27]。这是因为土壤温湿度是解释土壤呼吸季节性变化的主要环境因子,土壤温湿度的变化可以直接影响土壤微生物呼吸、凋落物的分解速率以及根系的活性,进而影响土壤呼吸速率,导致土壤呼吸呈显著的季节性变化^[28]。本研究中,土壤呼吸的季节性变化没有受到氮添加的影响,原因是土壤温湿度的季节变化没有受到氮添加的影响,所以无法对柳杉人工林土壤呼吸的季节性变化产生影响。

本研究中,氮添加对土壤呼吸无显著影响 ($P > 0.05$)。土壤微生物的异养呼吸和植物根系的自养呼吸对

氮添加处理的响应决定了对土壤呼吸的变化。有研究表明,氮添加通过增加土壤氮素含量,影响植物根系生长活动和土壤微生物的活性,间接影响土壤呼吸^[29]。而土壤氮素存在着“氮饱和”点,未达到氮饱和时,外加氮素会促进土壤呼吸作用,而随着施氮的浓度的提高和时间的延续,土壤氮素富集超过氮饱和,氮添加会抑制土壤呼吸作用^[30—31]。本研究中,生长季节氮添加处理在一定程度上促进了土壤呼吸,这一结果也说明了实验区域土壤尚未达到氮饱和;在去除凋落物处理下,氮添加处理会降低土壤呼吸,凋落物对土壤总呼吸速率的贡献率表现为 LN 最大,HN 和 MN 次之,CK 最小,这一结果说明了氮添加可以促进凋落物的分解速率,增加凋落物呼吸对土壤总呼吸的贡献率,这与太岳山油松(*Pinus tabulaeformis*)^[32]、北方针叶林^[33]的研究一致。因此,氮添加对土壤呼吸无显著影响可能是因为施氮抑制了土壤自养和异养呼吸中的矿质土壤呼吸,从而与促进凋落物分解速率的积极作用抵消,这一结果与陈平等^[1]研究相似。

3.2 凋落物处理对土壤呼吸的影响

凋落物对林地土壤呼吸的贡献可分为直接贡献和间接贡献,直接贡献为凋落物分解产生 CO₂ 的过程,间接贡献则为凋落物的厚度、密度等,可能促使环境因子发生变动,从而对土壤呼吸产生影响^[34]。Zhang 等^[8]研究发现,凋落物处理对土壤呼吸速率有直接的积极影响,通过微生物的分解作用直接产生 CO₂。本研究中,去除凋落物对土壤温湿度影响不显著($P>0.05$),但去除凋落物使土壤呼吸减弱进而降低土壤呼吸速率,对土壤呼吸的影响极其显著($P<0.01$),与陈毅等^[35]研究一致。凋落物对土壤呼吸速率贡献为 8.6%—28.5%,这一结果与马尾松(*Pinus massoniana*)的 22%和热带山地云雾林 37%研究结果均有差异^[36—37],这与不同林型、不同气候类型以及土壤结构相关。氮添加处理会促进凋落物分解速率,从而增加凋落物的贡献率,这与白英辰等^[38]对华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)研究相似;去除凋落物后,由于减少了土壤碳源,在一定程度上降低了土壤呼吸速率。有研究表明,去除凋落物会明显增加土壤温度,土壤温度的升高有利于微生物的生长繁殖,当土壤温度的变化对土壤呼吸起绝对作用时,去除凋落物也可以增加土壤呼吸^[39]。

3.3 土壤温湿度对土壤呼吸的影响

土壤温度是影响土壤呼吸的主要因子,在一定的温度范围内,土壤呼吸速率随着土壤温度的升高呈指数增加^[40]。本研究表明,不同处理下土壤呼吸速率与温度均呈极显著指数正相关($P<0.001$),土壤温度可以解释土壤呼吸变异的 51.6%—62.9%。土壤湿度是影响土壤呼吸的另一重要因子,柳杉人工林土壤呼吸速率与土壤湿度呈显著的负线性关系,土壤湿度可以解释土壤呼吸变异的 27.2%—38.7%,这一结果高于湖南樟树(*Cinnamomum camphora*)人工林的 0.3%—14.1%^[35],是因为实验地处于不同地区和气候类型,本实验地土壤湿度较高,对土壤呼吸的抑制程度较明显。在本研究中,对土壤呼吸速率和土壤温湿度的关系分别进行线性和非线性回归分析,相对于温度模型和湿度模型,多元回归模型对土壤呼吸解释能力有一定提高,达到 53.8%—66.1%。

Q_{10} 反应的是土壤呼吸速率对温度的敏感性,本实验不同处理下的 Q_{10} 值均低于全球森林 Q_{10} 的中间值 2.4^[41]。去除凋落物后的 Q_{10} 值除 HN 外,均高于保留凋落物处理,这与汪金松等^[42]对油松人工林研究有所不同,原因是去除凋落物后对外界变化抵御能力不同,使得土壤呼吸的温度敏感性变化不同。在本实验保留凋落物处理中,氮添加没有明显改变 Q_{10} 值;去除凋落物处理中,氮添加会略微减少 Q_{10} 值,是因为氮添加改变了土壤微生物数量和群落结构,降低了土壤酶活性^[43]。

参考文献 (References):

- [1] 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): 8184-8193.
- [2] 王泽西, 陈倩妹, 黄允优, 邓慧妮, 湛贤, 唐实玉, 张健, 刘洋. 川西亚高山森林土壤呼吸和微生物生物量碳氮对施氮的响应. 生态学报, 2019, 39(19): 7197-7207.
- [3] Peng Y, Chen G T, Li S, Hu H L, Hu T X, Liu L, Tang Y, Tu L H. Nitrogen additions reduce rhizospheric and heterotrophic respiration in a subtropical evergreen broad-leaved forest. Plant and Soil, 2018, 431(1-2): 449-463.

- [4] Gao Q, Bai E, Wang J S, Zheng Z M, Xia J Y, You W H. Effects of litter manipulation on soil respiration under short-term nitrogen addition in a subtropical evergreen forest. *Forest Ecology and Management*, 2018, 429: 77-83.
- [5] 朱湾湾, 许艺馨, 余海龙, 王攀, 黄菊莹. 降水量与氮添加对荒漠草原生态系统碳交换的影响. *生态学报*, 2021, 41(16): 6679-6691.
- [6] Eberwein J, Shen W J, Jenerette G D. *Michaelis-Menten* kinetics of soil respiration feedbacks to nitrogen deposition and climate change in subtropical forests. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1752-1752.
- [7] 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): 3244-3252.
- [8] Zhang X Y, Li Y, Ning C, Zheng W, Zhao D Y, Li Z Q, Yan W D. Litter management as a key factor relieves soil respiration decay in an urban-adjacent camphor forest under a short-term nitrogen increment. *Forests*, 2020, 11(2): 216-216.
- [9] Fu R X, Xu X Y, Yu Y C, Zhang Y B, Sun Z L, Tao X. Forest soil respiration response to increasing nitrogen deposition along an urban-rural gradient. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 27: e01575.
- [10] Sun S Q, Wu Y H, Zhang J, Wang G X, DeLuca T H, Zhu W Z, Li A D, Duan M, He L. Soil warming and nitrogen deposition alter soil respiration, microbial community structure and organic carbon composition in a coniferous forest on eastern Tibetan Plateau. *Geoderma*, 2019, 353: 283-292.
- [11] Zhang J B, Li Q, Wu J S, Song X Z. Effects of nitrogen deposition and biochar amendment on soil respiration in a *Torreya grandis* orchard. *Geoderma*, 2019, 355: 113918.
- [12] Zhou S X, Xiang Y B, Tie L H, Han B H, Huang C D. Simulated nitrogen deposition significantly reduces soil respiration in an evergreen broadleaf forest in Western China. *PLoS One*, 2018, 13(9): e0204661.
- [13] He Y L, Qi Y C, Peng Q, Dong Y S, Guo S F, Yan Z Q, Li Z L. Carbon availability affects soil respiration response to drying-rewetting cycles in semiarid grasslands of China under nitrogen deposition. *European Journal of Soil Biology*, 2019, 93: 103089.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 余景松, 付若仙, 俞元春, 李春涛, 陶晓. 氮沉降对北亚热带麻栎林土壤呼吸及其温度敏感性的影响. *生态学杂志*, 2021, 40(4): 1029-1037.
- [17] Zhou L Y, Zhou X H, Zhang B C, Lu M, Luo Y Q, Liu L L, Li B. Different responses of soil respiration and its components to nitrogen addition among biomes: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 2014, 20(7): 2332-2343.
- [18] Subke J A, Hahn V, Battipaglia G, Linder S, Buchmann N, Cotrufo M F. Feedback interactions between needle litter decomposition and rhizosphere activity. *Oecologia*, 2004, 139(4): 551-559.
- [19] 郭健, 康永祥, 夏国威, 周威, 邢振杰, 王富, 王玉东. 毛白杨人工林生长季根呼吸特征研究. *西北林学院学报*, 2016, 31(2): 15-19, 44.
- [20] 彭艳, 李心清, 程建中, 邢英, 闫慧. 贵阳喀斯特地区植被类型与季节变化对土壤微生物生物量和微生物呼吸的影响. *地球化学*, 2010, 39(3): 266-273.
- [21] 黄路婷, 刘济明, 李佳, 陈梦, 廖晓锋. 氮添加对米槁林下土壤养分及酶活性的影响. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(6): 122-130.
- [22] 刘济明, 唐子燕, 李佳, 陈梦, 刘欢. 氮沉降对米槁凋落叶分解过程中土壤养分的影响. *甘肃农业大学学报*, 2021, 56(1): 102-108, 117.
- [23] 杨泽, 嘎玛达尔基, 谭星儒, 游翠海, 王彦兵, 杨俊杰, 韩兴国, 陈世苹. 氮添加量和施氮频率对温带半干旱草原土壤呼吸及组分的影响. *植物生态学报*, 2020, 44(10): 1059-1072.
- [24] 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): 6947-6956.
- [25] 康永祥, 夏国威, 刘建军, 周威, 陈光平. 秦岭小陇山锐齿栎林皆伐迹地土壤呼吸特征. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 342-350.
- [26] 向元彬, 黄从德, 胡庭兴, 涂利华, 周世兴, 肖永翔, 高保丹. 模拟氮沉降和降雨对华西雨屏区常绿阔叶林土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2016, 36(16): 5227-5235.
- [27] 孙海燕, 赵俊平, 肖艳玲, 冯建伟, 张占贵. 模拟氮沉降对武夷山亚热带常绿阔叶林土壤呼吸的影响. *生态环境学报*, 2018, 27(9): 1632-1638.
- [28] Liu W X, Zhang Z, Wan S Q. Predominant role of water in regulating soil and microbial respiration and their responses to climate change in a semiarid grassland. *Global Change Biology*, 2009, 15(1): 184-195.
- [29] 王会来, 刘娟, 姜培坤, 周国模, 李永夫, 吴家森. 森林土壤呼吸对人为干扰因子的响应. *自然资源学报*, 2017, 32(7): 1240-1255.
- [30] 杨璐, 汪金松, 赵博, 赵秀海. 长期施氮对暖温带油松林土壤呼吸及其组分的影响. *林业科学*, 2021, 57(1): 1-11.
- [31] Wang C, Lu X K, Mori T K, Mao Q G, Zhou K J, Zhou G Y, Nie Y X, Mo J M. Responses of soil microbial community to continuous experimental nitrogen additions for 13 years in a nitrogen-rich tropical forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 121: 103-112.

- [32] 李化山, 汪金松, 赵秀海, 康峰峰, 张春雨, 刘星, 王娜, 赵博. 模拟氮沉降下去除凋落物对太岳山油松林土壤呼吸的影响. 生态学杂志, 2014, 33(4): 857-866.
- [33] Forsmark B, Nordin A, Maaroufi N I, Lundmark T, Gundale M J. Low and high nitrogen deposition rates in northern coniferous forests have different impacts on aboveground litter production, soil respiration, and soil carbon stocks. *Ecosystems*, 2020, 23(7): 1423-1436.
- [34] 李亚非, 胡宗达, 余昊, 胡璟, 刘兴良, 罗明霞, 欧定华, 吴德勇. 改变凋落物输入对川西亚高山天然次生林土壤呼吸的影响. 生态学报, 2021, 41(7): 2687-2697.
- [35] 陈毅, 闫文德, 郑威, 廖菊阳, 盘昱良, 梁小翠, 杨坤. 模拟氮沉降凋落物管理对樟树人工林土壤呼吸的影响. 生态学报, 2018, 38(21): 7830-7839.
- [36] Yan W D, Chen X Y, Tian D L, Peng Y Y, Wang G J, Zheng W. Impacts of changed litter inputs on soil CO₂ efflux in three forest types in central South China. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(7): 750-757.
- [37] Zimmermann M, Meir P, Bird M, Malhi Y, Ccahuana A. Litter contribution to diurnal and annual soil respiration in a tropical montane cloud forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(6): 1338-1340.
- [38] 白英辰, 陈晶, 康峰峰, 程小琴, 韩海荣, 朱江. 模拟氮沉降下不同凋落物处理对太岳山华北落叶松林土壤呼吸的影响. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(4): 92-99.
- [39] 付淑月, 王天秀, 张清月, 杨改河. 刺槐林凋落物输入量变化对土壤有机碳的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2021, 49(6): 18-26.
- [40] 张雪, 梅莉, 宋利豪, 刘力诚, 赵泽尧. 模拟氮沉降对马尾松土壤微生物群落结构及温室气体释放的影响. 生态学报, 2019, 39(6): 1917-1925.
- [41] 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.
- [42] 汪金松, 赵秀海, 张春雨, 康峰峰, 尚宝山, 池青俊. 改变 C 源输入对油松人工林土壤呼吸的影响. 生态学报, 2012, 32(9): 2768-2777.
- [43] Ma Y C, Zhu B, Sun Z Z, Zhao C, Yang Y, Piao S L. The effects of simulated nitrogen deposition on extracellular enzyme activities of litter and soil among different-aged stands of larch. *Journal of Plant Ecology*, 2014, 7(3): 240-249.