

DOI: 10.5846/stxb201501190161

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): - .

Xiang Y B, Huang C D, Hu T X, Tu L H, Zhou S X, Xiao Y X, Gao B D. Effects of simulated nitrogen deposition and precipitation changes on soil respiration in an evergreen broad-leaved forest in a rainy region of Western China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(16): - .

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

向元彬, 黄从德*, 胡庭兴, 涂利华, 周世兴, 肖永翔, 高保丹

四川农业大学林学院, 四川省林业生态工程省级重点实验室, 成都 611130

摘要:从 2013 年 12 月至 2014 年 11 月, 通过野外原位试验, 对华西雨屏区常绿阔叶林进行了模拟氮沉降和降雨试验, 采用 LI-8100 土壤碳通量分析系统 (LI-COR Inc., USA) 测定了对照 (CK)、氮沉降 (N)、减雨 (R)、增雨 (W)、氮沉降+减雨 (NR)、氮沉降+增雨 (NW) 6 个处理水平的土壤呼吸速率, 并通过回归方程分析了温度和湿度与土壤呼吸速率间的关系。结果表明: (1) 氮沉降和增雨抑制了常绿阔叶林土壤呼吸速率, 减雨促进了常绿阔叶林土壤呼吸速率。 (2) 减雨使华西雨屏区常绿阔叶林土壤呼吸年通量增加了 258 g/m^2 , 而模拟氮沉降和增雨使华西雨屏区常绿阔叶林土壤呼吸年通量分别减少了 321 和 406 g/m^2 。 (3) 减雨增加了土壤呼吸的温度敏感性, 模拟氮沉降和增雨降低了土壤呼吸的温度敏感性。 (4) 模拟温度和湿度与土壤呼吸速率间回归方程分析表明, 土壤水分对土壤呼吸速率的影响较小。 (5) 模拟氮沉降和增雨处理减少土壤微生物生物量碳、氮的含量, 减雨处理增加了土壤微生物生物量碳、氮的含量。 (6) 模拟氮沉降和降雨对华西雨屏区土壤 CO_2 释放的影响未表现出明显的交互作用。

关键词: 氮沉降; 降雨改变; 常绿阔叶林; 土壤呼吸; Q_{10} 值

Effects of simulated nitrogen deposition and precipitation changes on soil respiration in an evergreen broad-leaved forest in a rainy region of Western China

XIANG Yuanbin, HUANG Congde*, HU Tingxing, TU Lihua, ZHOU Shixing, XIAO Yongxiang, GAO Baodan

College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Laboratory of Forestry Ecology Engineering, the Provincial Key laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611130, China

Abstract: Nitrogen deposition and changes in precipitation patterns are two primary effects of global climate change. In order to understand the effects of both nitrogen deposition and precipitation changes and their interaction on soil respiration in an evergreen broad-leaved forest, an experiment was conducted *in situ* in a rainy region of Western China. The study included six treatments: a control, nitrogen deposition, water reduction, water addition, nitrogen deposition $\times$ water reduction, and nitrogen deposition $\times$ water addition. From December 2013 to November 2014, soil respiration rates were measured using the LI-8100 (LI-COR Inc., USA) Automated Soil CO_2 Flux System. The relationships among soil moisture, soil temperature, and soil respiration rate were analyzed via regression analyses. The results indicate that (1) nitrogen deposition and water addition significantly inhibit soil respiration, while water reduction increases the soil respiration rate significantly; (2) water reduction increases soil CO_2 flux by $258 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, while nitrogen deposition and water addition

基金项目: 国家“十二五”科技支撑项目 (2010BAC01A11); 国家自然科学基金项目 (31300522)

收稿日期: 2015-01-19; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyxq100@aliyun.com

treatments reduced soil CO_2 flux by 321 and 406 $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$, respectively; (3) water reduction increased the temperature sensitivity of soil respiration, while nitrogen deposition and water addition reduced the temperature sensitivity of soil respiration; (4) soil temperature has a greater influence on soil respiration rate than soil moisture; (5) nitrogen deposition and water addition reduced the carbon and nitrogen content of the soil microbial biomass, while water reduction increased the carbon and nitrogen content of the microbial biomass; and (6) the interaction between nitrogen deposition and precipitation changes did not have a significant effect on the soil CO_2 efflux in this forest ecosystem.

Key Words: nitrogen deposition; precipitation change; evergreen broad-leaved forest; soil respiration; Q_{10} value

自工业革命以来,人类活动加速了全球活性氮的排放和固定^[1],目前,中国已成为三大氮沉降区域之一,仅次于欧洲和北美^[2-3]。大量的活性氮输入改变了陆地生态系统与氮相关的许多物理生物化学过程^[4]。全球气候变化导致了降雨格局的改变,北半球中纬度地区降雨量增大,亚热带地区降水量下降,南半球的降水量均增大^[5-6]。降雨是土壤水分最主要的来源,它能改变土壤通气条件,增加土壤湿度,对地下物理生物化学过程具有重要的调控作用^[7],氮素与水分是影响陆地生态系统的重要因子^[8]。因此,研究氮素与水分交互作用对陆地生态系统的影响具有重要的意义。

全球气候变化已成为毋庸置疑的事实^[9],近两个世纪来,人类活动制造的活性氮已经超过了自然陆地过程制造的活性氮^[10]。活性氮主要通过湿沉降和干沉降两种方式沉降陆地和海洋,氮沉降量随着大气中的活性氮的不断增多而升高^[11]。近几十年里全球的降水格局发生了很大的变化,而且雨量的增加是不平衡的,并且季节变化较大^[12-13]。氮沉降的持续增加和降水格局的改变势必会对森林生态系统过程造成影响。所以,我们推测氮沉降和降水格局的改变可能会影响或改变森林生态系统过程中的土壤碳动态。目前,国内外学者展开了一系列模拟氮沉降或施氮对土壤呼吸影响的研究^[14-17]。但由于不同森林类型的差异以及土壤呼吸组成的复杂性,各种森林土壤呼吸过程对模拟氮沉降或施氮的响应并不一致。而降雨对土壤呼吸的研究主要集中在模拟降雨或自然降雨事件后短时间内对土壤呼吸的影响^[18-21],缺乏降雨对土壤呼吸影响的长期原位观测研究。而且目前的模拟氮沉降和降雨试验都是相互独立的研究,忽视了氮沉降和降雨的交互作用对土壤碳动态的影响或改变。

因此本研究以华西雨屏区常绿阔叶林为研究对象,通过野外原位试验,研究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,探讨氮沉降、降雨以及其交互作用对土壤呼吸过程的影响和内在机制,其结果可为预测该区域森林生态系统土壤碳动态对氮沉降增加和降雨格局改变的响应提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区四川省雅安市雨城区碧峰峡(102°90'E, 29°40'N),海拔高度 977.62 m, $\geq 10^\circ\text{C}$ 年积温 5231 $^\circ\text{C}$, 年均气温为 16.2 $^\circ\text{C}$, 最冷月为 1 月, 平均气温 6.1 $^\circ\text{C}$, 最热月为 7 月, 平均气温 25.4 $^\circ\text{C}$, 全年地面均温 18.1 $^\circ\text{C}$ 。日照长度为 1039.6 h, 全年太阳辐射总量为 3640.13 $\text{MJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。无霜期为 304 d, 年平均降水量 1772.2 mm, 年蒸发量为 1011.2 mm, 全年相对湿度为 79 %。气候温和湿润, 属亚热带湿润季风型山地气候。实验区为地带性的偏湿性亚热带常绿阔叶林, 土壤类型以黄壤为主, 土壤厚度大于 60cm, 林地条件基本一致。

1.2 试验地设置

2013 年 10 月在实验地内选取未被破坏的、代表性的林地建立 18 个 3m×3m 的样方进行编号, 每个样方间设 >3m 的缓冲带。试验设置氮沉降和降水 2 个因素, 共 6 种处理, 即对照 (CK: Comparison)、氮沉降 15 $\text{g N m}^{-2} \text{a}^{-1}$ (N: Nitrogen deposition)、减雨 10% (R: Water reduction)、增雨 10% (W: Water addition)、氮沉降 15 $\text{g N m}^{-2} \text{a}^{-1}$ + 减雨 10% (NR: Nitrogen deposition and water reduction)、氮沉降 15 $\text{g N m}^{-2} \text{a}^{-1}$ + 增雨 10% (NW: Nitrogen deposition and water addition), 每种处理重复 3 次, 共 18 个处理。按试验区近年来平均降雨量为

1772mm 计算,增加 10%的降雨量为每年增加 177.2mm 的降雨量;减水使用自制的减雨架进行模拟减水,减雨架遮挡面积为减水样方面积的 10%。各处理样方四周用 PVC 板材围起,将 PVC 板插入地面 15cm,用于阻止地表径流的流入,但不影响深层土壤的水分交流。减雨架上端离地 120—140cm 处,用 5cm 宽的瓦面状透明 PVC 板凹槽搭建相应面积的挡雨面,并均匀分布在减雨架上,形成减水的处理。增水用喷雾器在林地样方 50cm 高度来回均匀喷洒相应的清水量,形成增水处理。用 NH_4NO_3 和清水进行模拟氮沉降和降雨处理。将年降雨量、施氮量平均分成 24 等分,从 2013 年 11 月 10 日至 2014 年 12 月 10 日,每 15 天进行一次处理,施氮的方法是将每个样方所需 NH_4NO_3 溶解在 2 L 水中,用手提式喷雾器在林地样方 50cm 高度来回均匀喷洒,非施氮处理样方喷施 2 L 水。

1.3 土壤呼吸速率、温度、水分及微生物碳氮的测定

2013 年 10 月在每个样方内随机安置 3 个 PVC 连接环,用于土壤呼吸速率的定期测定。土壤呼吸速率的测定采用开路式 CO_2 通量测量系统 LI-8100(LI-COR, Lincoln, NE, USA),分别于每月下旬进行测定。样方模拟氮沉降和降水 2 次处理后进行土壤呼吸速率测定,测定时间为 9:00—18:00,每间隔 3h 测定一次,共测定 4 次,以平均值作为该月土壤呼吸速率平均值。在测定土壤呼吸的同时测定 0—10cm 土壤温度和体积含水量。土壤温度采用 Li-8100 自带温度探头测定;使用时域反射仪测定土壤体积含水量。在氮沉降和降雨后的第 13 个月,采集各处理样方内 0—20cm 土层样品,测定微生物生物量碳、氮含量,微生物生物量碳、氮含量采用氯仿熏蒸提取法测定。

1.4 数据处理

土壤呼吸速率与土壤温度的单因素指数模型为 $R_s = ae^{bt}$, R_s 为土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), t 为土壤温度 ($^{\circ}\text{C}$), a 为 $t=0^{\circ}\text{C}$ 时的土壤呼吸速率, b 为温度反应系数^[22]。

土壤呼吸速率与土壤湿度的单因素模型为一元二次项方程 $R_s = aW^2 + bW + c$, 线性模型为一元一次方程 $R_s = aW + b$, W 为土壤体积含水量, a 、 b 、 c 为常数^[23]。

累计土壤呼吸计算方法为: $R_s(\text{CO}_2) = 44 \times 10^{-6} \times 86400 \times \sum R_{si} D_i$, 以日呼吸速率平均值作为该月土壤呼吸速率的平均值。式中: $R_s(\text{CO}_2)$ 为累计土壤呼吸 (g/m^2); R_{si} 为第 i 月平均土壤呼吸速率 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$); D_i 为第 i 月天数 (d), 其余数值为单位换算系数^[24]。

Q_{10} 值计算方法为 $Q_{10} = e^{10b}$, 其中 b 是土壤呼吸与土壤温度指数模型中温度反应常数^[25]。

为了解氮沉降和降雨共存对土壤呼吸 (R_s) 是否存在交互作用, 采用下式计算土壤呼吸的净变化量 (ΔR_s): $\Delta R_s = (R_{s\text{氮+降雨}} - R_{s\text{CK}}) - (R_{s\text{降雨}} - R_{s\text{CK}}) - (R_{s\text{氮}} - R_{s\text{CK}})$ ^[26]。

利用 Microsoft Excel 2007 完成数据统计分析及图表生成, 然后用 LSD 进行多重比较不同处理间土壤呼吸速率、土壤微生物生物量碳氮的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 模拟氮沉降和降雨对土壤呼吸速率变化的影响

由图 1 可知, 华西雨屏区常绿阔叶林不同的季节土壤呼吸速率差异较大, 从 1 月开始各处理土壤呼吸逐渐增大, 在 7 月达到最大值, 而后逐渐减小。试验期间, CK、N、R、W、NR 和 NW 处理土壤呼吸平均值分别为 1.49、1.26、1.68、1.19、1.34 和 1.01 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 表现为: $R > CK > NR > N > W > NW$ 。2013 年 12 月到 2014 年 11 月, R 处理的 CO_2 释放量比 CK 增加了 12.63%; 而 N、W、NR 和 NW 分别比 CK 降低了 15.76%、19.90%、10.17% 和 32.00%, NW 处理对土壤呼吸的抑制作用最强。整个试验期间, R 与 N 处理土壤呼吸速率差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。同一降雨处理下, 模拟氮沉降处理土壤呼吸速率均值较低; 同一氮沉降处理下, 减雨土壤呼吸速率较高, 增雨土壤呼吸速率较低。重复测量方差分析表明, 氮沉降和增雨抑制了常绿阔叶林土壤呼吸速率, 减雨促进了常绿阔叶林土壤呼吸速率。

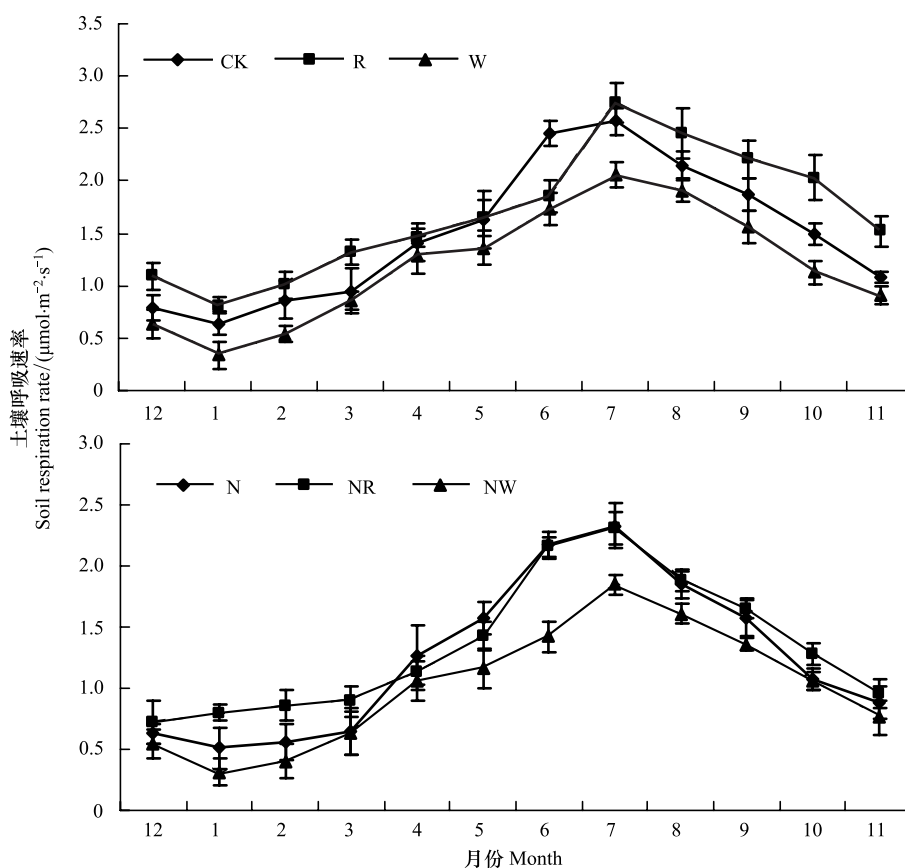


图1 各处理的土壤呼吸速率月动态

Fig.1 Monthly dynamic of soil respiration rate in different treatments

2.2 模拟氮沉降和降雨对累计土壤呼吸的影响

CK、N、R、W、NR 和 NW 处理在试验期间的累计土壤呼吸分别为 2040、1719、2298、1634、1833 和 1387 g/m², 与 CK 相比, R 处理使华西雨屏区常绿阔叶林土壤呼吸年通量增加了 258 g/m², N、W、NR 和 NW 处理分别减少了 321、406、207 和 653 g/m²。表明减雨处理使华西雨屏区常绿阔叶林土壤呼吸年通量增加, 而其他处理使土壤呼吸年通量减少。

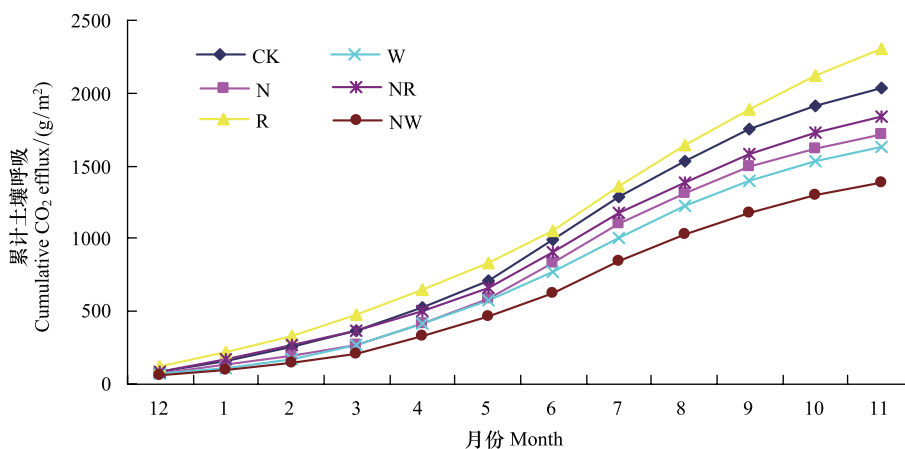


图2 华西雨屏区常绿阔叶林月累计土壤呼吸

Fig.2 Cumulative soil CO₂-efflux among N treatments in an evergreen broad-leaved forest in rainy area of western China

2.3 土壤温度对土壤呼吸速率的影响

华西雨屏区常绿阔叶林 10cm 土壤月平均温度呈单峰曲线,与土壤呼吸月动态变化趋势相似,7 月最高,1 月最低。采用指数模型 $R_s = ae^{bx}$ 拟合土壤呼吸与土壤温度的关系,得出土壤呼吸与温度存在显著指数正相关关系 ($P < 0.01$),方程拟合结果表明可解释土壤呼吸速率月动态变化的 72.05%—89.81%。CK、N、R、W、NR 和 NW 处理土壤呼吸速率的 Q_{10} 值分别为 2.77、2.45、3.18、2.39、2.58 和 2.22。表明减雨增加了土壤呼吸的温度敏感性,而模拟氮沉降和增雨降低了土壤呼吸的温度敏感性。

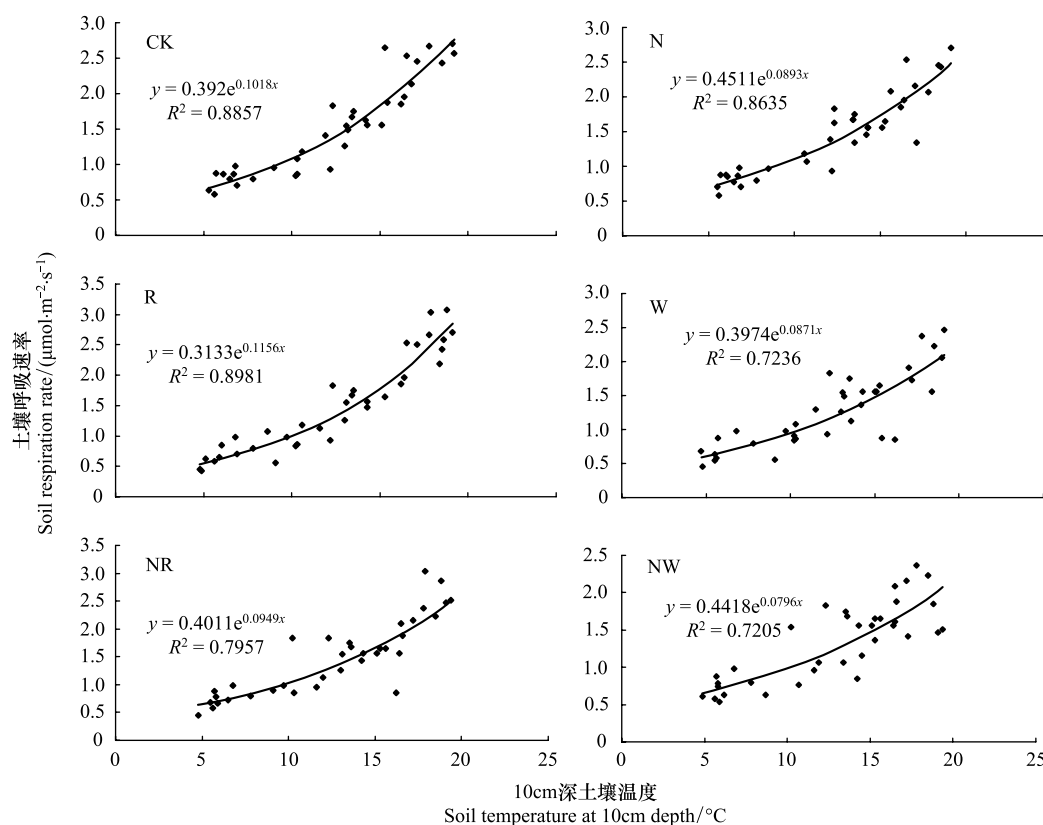


图 3 各处理土壤呼吸速率与 10cm 深土壤温度的关系

Fig.3 Relationship of soil respiration rate and soil temperature at 10cm depth in different treatments

2.4 土壤水分对土壤呼吸速率的影响

土壤水分表现为夏秋季节相对较高,春冬季节相对较低。试验期间,R 处理平均土壤体积含水量为 25.24%;W 处理平均土壤体积含水量为 29.25%。土壤呼吸速率和土壤含水量采用线性、一元二次方程进行回归分析,结果显示线性方程拟合可解释各处理土壤呼吸速率月动态变化的 43.65%—78.54%(表 1),一元二次项方程可解释各处理土壤呼吸速率月动态变化的 43.84%—84.76%。这表明,与土壤温度相比土壤水分对土壤呼吸速率的影响较小。

2.5 模拟氮沉降和降雨对土壤微生物生物量碳、氮的影响

经过连续 1 年 N 沉降后,R 处理土壤微生物生物量 C 和 N 分别比 CK 高 5.98%、8.52%;N 和 W 处理土壤微生物生物量 C 分别比 CK 降低了 14.51%和 17.22%,而土壤微生物生物量 N 分别比 CK 降低了 19.51%和 22.28%。N、W 与 CK、R 处理土壤微生物生物量 C、N 差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。由此可见,模拟氮沉降和增雨处理减少微生物生物量碳、氮的含量(图 5),减雨增加了微生物生物量碳、氮的含量。

2.6 模拟氮沉降和降雨对土壤呼吸的交互作用

如果 $\Delta R_s = 0$,模拟氮沉降和降雨无交互作用; $\Delta R_s > 0$,存在协同作用; $\Delta R_s < 0$,为拮抗作用。由表 2 可知,通过年平均值来看,NR 处理土壤呼吸的净变化量 $\Delta R_s < 0$;NW 处理土壤呼吸的净变化量 $\Delta R_s > 0$ 。但土壤呼吸

每月的净变化量 ΔR_s 变化规律不明显。模拟氮沉降和降雨对华西雨屏区土壤 CO_2 释放的影响,未表现出明显的交互作用。

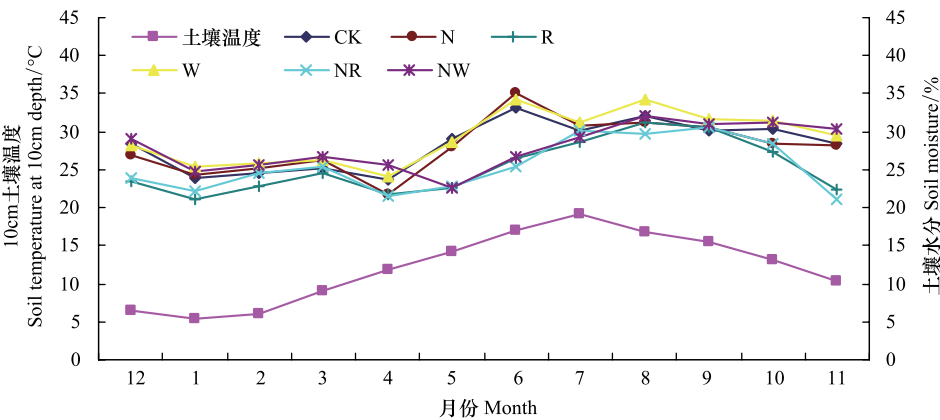


图 4 土壤温度和土壤含水量的月变化

Fig.4 Monthly variation of soil temperature and soil moisture

表 1 土壤呼吸速率与 10cm 土壤湿度不同关系模型参数

处理 Treatment	$Rs = aW^2 + bW + c$				$Rs = aW + b$		
	a	b	c	R^2	a	b	R^2
CK	0.0212	-1.0295	13.4300	0.6730	0.1589	-2.9970	0.6007
N	0.0115	-0.5221	6.6969	0.6135	0.1307	-2.4111	0.5287
R	-0.0026	0.2825	-3.7623	0.8476	0.1465	-2.0179	0.7854
W	0.0122	-0.5957	8.0633	0.5748	0.1185	-2.274	0.5279
NR	0.0083	-0.3272	4.1935	0.4523	0.1050	-1.3356	0.4367
NW	-0.0047	0.4003	-6.5443	0.4384	0.1310	-2.7533	0.4365

CK: 代表对照处理 stands for the comparison treatmentN: 代表氮沉降处理 stands for the nitrogen deposition treatmentR: 代表减雨处理 stands for the water reduction treatmentW: 代表增雨处理 stands for the water addition treatmentNR: 代表氮沉降+减雨处理 stands for the nitrogen deposition and water reductionNW: 代表氮沉降+增雨处理 stands for the nitrogen deposition and water addition

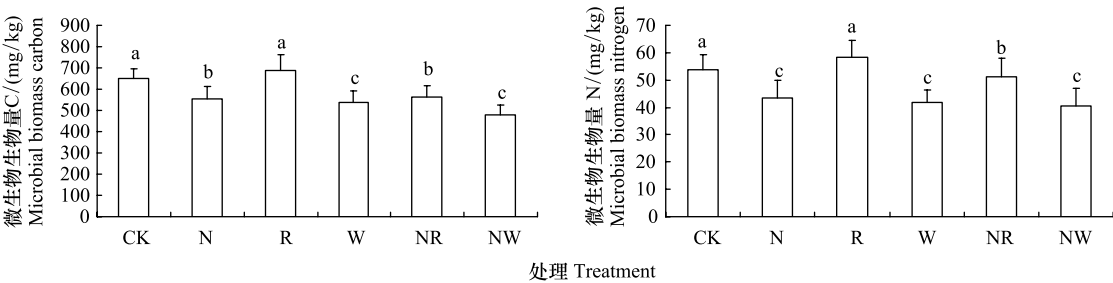


图 5 各处理微生物生物量 C、N

Fig.5 Microbial biomass carbon and nitrogen in different treatments

表 2 不同土壤呼吸速率的净变化量

处理 Treatment	月份 Month											
	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
NR	-0.21	0.12	0.15	-0.13	-0.19	-0.16	0.60	-0.19	-0.29	-0.27	-0.33	-0.36
NW	0.06	0.10	0.16	0.07	-0.09	-0.14	-0.02	0.03	-0.01	0.09	0.36	0.05

3 讨论

3.1 模拟氮沉降和降雨对土壤呼吸的影响

研究表明,模拟氮沉降对土壤呼吸具有促进、抑制或无影响 3 种作用^[17,27-28],本研究表明,在模拟氮沉降 12 个月里,氮沉降处理抑制了 CO₂ 的释放。氮沉降处理使华西雨屏区常绿阔叶林土壤向大气释放的 CO₂ 减少 15.76%。这与一些研究结果相同^[15,28]。但也有研究表明模拟氮沉降促进了土壤呼吸速率。刘博奇^[29]对云冷杉红松林研究表明,氮沉降能使土壤中氮素的形态和含量发生变化,增加土壤中铵态氮(NH₄⁺)、硝态氮(NO₃⁻)的水平,使根系对氮素的利用能力增加^[30],从而使土壤呼吸速率表现为促进作用。而吴迪^[31]等对长江中下游滩地杨树林的研究表明,氮沉降通过减少了根生物量、加速滩地土壤酸化、降低外生菌根真菌的物种丰富度和数量、抑制了与有机质分解有关的微生物、酶的数量及活性,使得土壤呼吸速率受到抑制。因此,不同的森林类型、立地条件以及不同的时空尺度上,氮沉降对土壤呼吸速率的作用也会有差异。

土壤水分是影响土壤呼吸速率的一个重要因素^[32]。目前,降雨对土壤呼吸影响的研究主要有两种:实验室培养和野外原位试验。实验室培养得到的结果比较一致,基本都表现为土壤呼吸速率随着土壤含水量的增加而增大。但在野外自然条件下,土壤水分对土壤呼吸的影响结果不同^[33]。有研究表明土壤呼吸随土壤含水量的增加呈线性增加^[34]。而本研究土壤呼吸速率年平均值表现为 R 处理高于 W 处理。李寅龙^[23]等研究表明,短花针茅草原的整个生长季,增雨 30% 处理显著增加土壤呼吸速率($P < 0.05$)。而 Oberbauer 等^[35]在北极冻原的研究表明随着土壤地下水位的下降,土壤呼吸逐渐增加,主要原因是因为土壤地下水位下降改善了通气状况。可见,土壤水分对土壤呼吸的影响是一个复杂的过程,由于土壤温度、湿度、降水、植被、立地条件等环境因子的较大差异,使不同的区域以及同一区域的不同时期,土壤水分对土壤呼吸的影响结果不同。

土壤微生物生物量 C、N 在一定程度上反映土壤中微生物数量和活性。本研究结果表明,经过 12 个月的模拟氮沉降和降雨处理,除 R 处理外,各处理土壤微生物生物量 C、N 有所降低,其趋势与土壤总呼吸对氮沉降和降雨的响应一致。这可能是模拟氮沉降和降雨改变了植物根系生物量和微生物的繁殖速度,改变了土壤微生物生物量 C、N 含量,进而影响有机质的分解速率和微生物呼吸,导致处理间的土壤呼吸速率不同。

3.2 不同处理下土壤呼吸与温度、湿度的关系

Q₁₀ 值作为土壤呼吸对温度变化的敏感性指标被广泛应用^[22]。本研究利用指数模型 $R_s = ae^{bT}$ 拟合土壤呼吸与土壤温度的关系,计算得出 CK、N、R、W、NR 和 NW 处理土壤呼吸速率的 Q₁₀ 值,分别为 2.77、2.45、3.18、2.39、2.58 和 2.22。表明减雨增加了土壤呼吸的温度敏感性,模拟氮沉降和增雨降低了土壤呼吸的温度敏感性。原因可能是华西雨屏区常绿阔叶林地下微生物、植物根系、土壤动物的代谢作用受到了氮沉降、降雨和湿度的刺激而影响了土壤呼吸速率,改变了 Q₁₀ 值。

将土壤呼吸速率作为因变量,土壤含水量做为自变量的模型广泛应用于土壤呼吸速率受土壤含水量影响研究中^[36-37]。有研究表明,土壤呼吸与温度呈极显著相关性,但与土壤湿度的相关性较差^[38]。本研究用土壤呼吸速率与土壤含水量进行回归分析,结果显示线性方程拟合可解释各处理土壤呼吸速率月动态变化的 43.65%—78.54%,一元二次项方程可解释各处理土壤呼吸速率月动态变化的 43.84%—84.76%。这表明,与土壤温度相比土壤水分对土壤呼吸速率的影响较小。与线性模型相比,一元二次方程对土壤呼吸速率月动态变化的解释有一定增加。

3.3 模拟氮沉降和降雨对土壤呼吸的交互作用

本研究表明,华西雨屏区常绿阔叶林模拟氮沉降和降雨交互处理土壤呼吸每月的净变化量 ΔRS 变化规律不明显,对土壤 CO₂ 释放的影响未表现出明显的交互作用。李伟等^[39]对施氮和降水格局改变对土壤 CH₄ 和 CO₂ 通量的影响的研究表明,对长白山阔叶红松林连续 4 年的模拟氮沉降和降水格局改变后,施氮和降水对土壤 CO₂ 释放未出现明显的交互作用,与本研究结果相似。土壤是个极其复杂的系统,参与影响土壤呼吸速率的因素多,比如温度、氮素、水分、土壤孔隙度、养分、凋落物、根系和微生物等等,而这些因素是相互作用

的,共同作用于土壤呼吸。模拟氮沉降和降雨对土壤呼吸的交互作用包含了许多土壤物理生物化学过程,受其他因素的影响,其产生的效应是综合各种因素的共同结果,故规律性不是很强,其机理有待进一步深入研究。

参考文献 (References):

- [1] 张璐, 黄建辉, 白永飞, 韩兴国. 氮素添加对内蒙古羊草草原净氮矿化的影响. 植物生态学报, 2009, 33(3): 563-569.
- [2] Bashkin V N, Park S U, Choi M S, Lee C B. Nitrogen budgets for the Republic of Korea and the Yellow Sea region. Biogeochemistry, 2002, 57-58 (1): 387-403.
- [3] Galloway J N. The global nitrogen cycle: changes and consequences. Environmental Pollution, 1998, 102(S1): 15-24.
- [4] 张乃莉, 郭继勋, 王晓宇, 马克平. 土壤微生物对气候变暖和大气 N 沉降的响应. 植物生态学报, 2007, 31(2): 252-261.
- [5] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Summary For Policymakers. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [6] 王冀, 姜德君, 曲金华, 张凯. IPCC-AR4 模式资料对东北地区气候及可利用水资源的预估研究. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1647-1656.
- [7] Austin A T, Yahdjian L, Stark J M, Belnap J, Porporato A, Norton U, Ravetta D A, Schaeffer S M. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. Oecologia, 2004, 141(2): 221-235.
- [8] 王杰, 李刚, 修伟明, 宋晓龙, 赵建宁, 杨殿林. 氮素和水分对贝加尔针茅草原土壤酶活性和微生物量碳氮的影响. 农业资源与环境学报, 2014, 31(3): 237-245.
- [9] Oreskes N. The scientific consensus on climate change. Science, 2004, 306(5702): 1686-1686.
- [10] 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.
- [11] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, Likens G E, Matson P A, Schindler D W, Schlesinger W H, Tilman D G. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. Ecological Applications, 1997, 7(3): 737-750.
- [12] Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. Climate Change: IPCC Scientific Assessments: The IPCC Scientific Assessments. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [13] 张金屯. 全球气候变化对自然土壤碳、氮循环的影响. 地理学报, 1998, 18(5): 465-471.
- [14] 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 CO₂ 排放和 CH₄ 吸收对模拟 N 沉降的短期响应. 生态学报, 2005, 25(4): 682-690.
- [15] 宋学贵, 胡庭兴, 鲜骏仁, 肖春莲, 刘文婷. 川西南常绿阔叶林土壤呼吸及其对氮沉降的响应. 水土保持学报, 2007, 21(4): 168-192.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 阎志丹, 王艳芬, 张焱, 熊小刚, 陈世苹, 张丽霞, 高英志, 唐芳, 杨晶, 董云社. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系. 生态学报, 2004, 24(4): 831-836.
- [19] Reichstein M, Rey A, Freibauer A, Tenhunen J, Valentini R, Banza J, Casals P, Cheng Y F, Grünzweig J M, Irvine J, Joffre R, Law B E, Loustau D, Miglietta F, Oechel W, Ourcival J -M, Pereira J S, Peressotti A, Ponti F, Qi Y, Rambal S, Rayment M, Romanya J, Rossi F, Tedeschi V, Tirone G, Xu M, Yakir D. Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. Global Biogeochemistry Cycles 2003, 17(4): 1104-1118.
- [20] 张丽华, 陈亚宁, 李卫红, 赵锐锋, 王永辉. 准噶尔盆地两种荒漠群落土壤呼吸速率对人工降水的响应. 生态学报, 2009, 29(6): 2819-2826.
- [21] 吕海波, 梁宗锁. 黄土区刺槐林土壤含水量变化对土壤呼吸强度的影响. 水土保持通报, 2013, 33(1): 44-48, 52.
- [22] 向元彬, 黄从德, 胡庭兴, 涂利华, 杨万勤, 李仁洪, 胡畅. 华西雨屏区巨桉人工林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应. 林业科学, 2014, 50(1): 21-26.
- [23] 李寅龙, 红梅, 白文明, 韩国栋, 王海明, 周萌. 水、氮控制对短花针茅草原土壤呼吸的影响. 生态学报, 2015, 35(6): 1727-1733.
- [24] 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.

- [25] 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.
- [26] 周芙蓉, 王进鑫, 杨楠, 张青. 水分和铅胁迫对土壤酶活性的影响. 草地学报, 2013, 21(3): 479-484.
- [27] Schulze E -D. Biological control of the terrestrial carbon sink. Biogeosciences, 2006, 3: 147-166.
- [28] 贾淑霞, 王政权, 梅莉, 孙玥, 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.
- [29] 刘博奇, 牟长城, 邢亚娟, 王庆贵. 模拟氮沉降对云冷杉红松林土壤呼吸的影响. 林业科学研究, 2012, 25(6): 767-772.
- [30] 方运霆, 莫江明, 周国逸, Per Gundersen, 李德军, 江远清. 南亚热带林土壤有效氮含量及其对模拟氮沉降增加的初期响应. 生态学报, 2004, 24(11): 2353-2359.
- [31] 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.
- [32] Tang X L, Fan S H, Qi L H, Guan F Y, Cai C J, Du M Y. Soil respiration and carbon balance in a Moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla* (Carr.) *Mitford* cv. *Pubescens*) forest in subtropical China. iForest-Biogeosciences and Forestry, 2015: e1-e9, doi: 10.3832/for1360-007.
- [33] 邓东周, 范志平, 王红, 孙学凯, 高俊刚, 曾德惠, 张新厚. 土壤水分对土壤呼吸的影响. 林业科学研究, 2009, 22(5): 722-727.
- [34] 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.
- [35] Oberbauer S F, Gillespie C T, Cheng W, Gebauer R, Serra A S, Tenhunen J D. Environmental effects on CO₂ efflux from riparian tundra in the northern foothills of the Brooks Range, Alaska, USA. Oecologia, 1992, 92(4): 568-577.
- [36] 李凌浩, 王其兵, 白永飞, 周广胜, 邢雪荣. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究. 植物生态学报, 2000, 24(6): 680-686.
- [37] 张丽华, 陈亚宁, 赵锐锋, 李卫红, 谢忠奎. 干旱区杨树、榆树人工防护林地土壤 CO₂ 释放通量研究. 植物生态学报, 2010, 34(5): 526-534.
- [38] 刘霞, 胡海清, 李为海, 孙程坤, 黄超, 赵希宽, 孙龙. 寒温带岛状林沼泽土壤呼吸速率和季节变化. 生态学报, 2014, 34(24): 7356-7364.
- [39] 李伟, 白娥, 李善龙, 孙建飞, 彭勃, 姜萍. 施氮和降水格局改变对土壤 CH₄ 和 CO₂ 通量的影响. 生态学杂志, 2013, 32(8): 1947-1958.