

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.02.004

# 极端降雪对北亚热带-暖温带气候过渡带 人工林土壤呼吸的影响

昝志曼<sup>1</sup>, 刘彦春<sup>2</sup>, 刘银占<sup>2</sup>, 轩娟<sup>2</sup>, 赵威<sup>1\*</sup>

(1. 河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471023; 2. 河南大学生命科学学院, 河南 开封 475004)

**摘要:** [目的] 本研究的主要目的是研究极端降雪对北亚热带-暖温带气候过渡带人工林土壤呼吸的影响机制。[方法] 以信阳市人工林为研究对象, 以 2018 年 1 月信阳市的暴雪为契机, 设置增加雪被、自然降雪、去除雪被的控制试验, 利用 LI-8100 测定了不同厚度雪被处理下土壤呼吸的变化, 并结合土壤温度、土壤湿度、土壤微生物量碳氮含量、土壤可利用性氮含量等变化, 研究土壤呼吸与环境因子之间的关系。[结果] 在试验前期, 增加雪被显著提高了土壤温度, 但增加雪被处理下, 试验中后期土壤温度值及整个试验阶段的土壤温度平均值均显著低于对照处理。增加雪被厚度可使土壤呼吸速率提高 21.57%, 而去除雪被对土壤呼吸速率无显著影响。雪被变化对于微生物量碳氮、土壤可利用性氮含量均无显著影响。增雪处理引起的土壤呼吸速率增加主要由试验前期土壤温度的升高导致的。[结论] 极端暴雪可能提高气候过渡带人工林的土壤呼吸速率, 但这种提高受到降雪量的影响, 30 cm 左右的降雪并未显著影响土壤呼吸速率, 如果积雪深度继续增加, 土壤碳排放速率会有所增强。此外, 积雪深度在不同的融雪阶段对土壤呼吸的影响幅度不一致, 降雪对土壤呼吸的影响主要发生在积雪完全消融之前这一阶段。本结果可为建立气候变化下的生态系统碳循环模型提供部分数据支持。

**关键词:** 极端降雪; 土壤碳通量; 华中地区; 人工林

**中图分类号:** S714

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2020)02-0027-08

近年来, 全球极端气候<sup>[1-2]</sup>的一个非常重要的体现是降雪频度和强度的变化<sup>[3-4]</sup>。研究降雪变化对陆地生态系统碳循环的影响, 对于深入理解陆地生态系统碳循环如何响应气候变化具有非常重要的理论和现实意义。土壤碳库是构成陆地生态系统有机碳库的主体<sup>[5]</sup>, 土壤呼吸是土壤碳库输出的重要过程<sup>[6-7]</sup>, 也是研究全球碳收支最重要的过程之一<sup>[8]</sup>。研究土壤呼吸的影响因素对理解陆地生态系统碳循环途径及其对气候变化的反馈影响都具有重要意义<sup>[9]</sup>。冬季土壤呼吸是土壤碳通量的重要组成部分<sup>[10-13]</sup>, 也是准确评估碳循环的重要参数, 在全球范围内的碳循环过程中扮演着重要的角色。森林

生态系统是调控全球变化背景下生态系统碳循环的主要生态系统类型之一, 其土壤呼吸对降雪变化非常敏感<sup>[10, 14-16]</sup>。与天然林相比, 人工林更易受极端降雪的影响<sup>[17-19]</sup>, 进而改变森林的碳汇格局<sup>[2]</sup>。因此, 人工林被认为是能减缓全球气候变化机制的核心, 受到世界各地的关注<sup>[19]</sup>。目前, 我国是世界人工林面积最大的国家<sup>[4]</sup>, 人工林面积达 6 933 万  $\text{hm}^2$ , 对陆地碳汇增强的贡献率达 39%<sup>[20]</sup>。然而, 在降雪对土壤呼吸影响的研究中, 多数集中在自然生态系统<sup>[13, 15-16]</sup>, 关于人工林生态系统对降雪变化响应的研究相对缺乏。在对人工林土壤呼吸的研究中, 大多仅对生长季土壤呼吸有所研究<sup>[21-22]</sup>, 忽略

收稿日期: 2019-07-21 修回日期: 2019-09-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31670477); 河南科技大学学科提升计划项目(13660001); 河南大学优秀青年基金培育计划项目(yqpy20140031)

\* 通讯作者: 赵威, 博士, 副教授. 主要研究方向: 生态系统碳循环. 电话: 0379-64282340. Email: zhaoweil@haust.edu.cn

了非生长季的土壤碳输出。此外,少数研究降雪对人工林土壤呼吸的影响大部分集中在全球积雪时间较长的高海拔地区<sup>[14]</sup>或高纬度地区<sup>[23]</sup>,对温暖地区,尤其是气候过渡带(北亚热带-暖温带)这一敏感地区<sup>[24-26]</sup>的研究较缺乏。因此,开展关于气候过渡带人工林土壤呼吸对于极端降雪事件响应的影响,具有非常重要的理论和现实意义。基于以上问题,本试验选取位于北亚热带-暖温带气候过渡带的信阳市为研究地区,以2018年1月4-7日信阳市的一次极端降雪为研究契机,根据信阳气象局数据资料,信阳平均累计降雪51.9 mm,平均积雪深度达29 cm,为1951年有气象记录以来该地降雪的历史最高值,这为研究极端降雪对人工绿地土壤呼吸的影响提供了机会。研究该区域土壤呼吸对气候变化的响应更有助于了解人工绿地碳排放对气候变化的响应,可为精确评估与模拟未来气候变化背景下陆地碳循环过程提供数据支持,具有非常重要的理论和现实意义。

## 1 试验地概况

试验地点位于河南大学信阳森林生态系统定位研究站附近的一处面积约75 hm<sup>2</sup>的人工林内(114°0'31"E, 32°8'18"N),海拔109.4 m。该地区年均气温15.3℃,年最低月均气温1.9℃(1月),

最高月均气温27.5℃(7月),年均降水量1 061.7 mm,多集中于5-9月。土壤类型为酸性黄棕壤。植被类型为人工林,林龄10 a,乔木树种以马褂木(*Liriodendron chinense* (Hemsl.) Sargent)为主,马褂木密度约1 100株·hm<sup>-2</sup>,树高约15 m,胸径8~15 cm。林下植被以细叶苔草(*Carex duriuscula* C. A. Mey. subsp. *stenophylloides* (V. I. Krecz.) S. Y. Liang & Y. C. Tang)、山麦冬(*Liriope spicata* (Thunb.) Lour.)、野胡萝卜(*Daucus carota* L.)等草本植物为主。

## 2 研究方法

### 2.1 样地选择与设置

在研究地内,根据样地背景情况以及前期观察到的融雪情况,在保证处理间不相互干扰的原则下,选取3个8 m×5 m的区域,在每个区域内选定3个2 m×1.5 m的样方,相邻区域间隔5 m以上。分别进行以下处理:A、去除雪被(减雪),将地上积雪全部去除;B、增加雪被(增雪),将减雪样地去除的雪被添加到样方;C、对照,自然雪被,不做处理。在每个样地中间区域放置3个直径为11 cm的PVC土壤呼吸环,每个呼吸环的总高度为5 cm,埋入地下3 cm,留2 cm在地上。样地布置见图1。

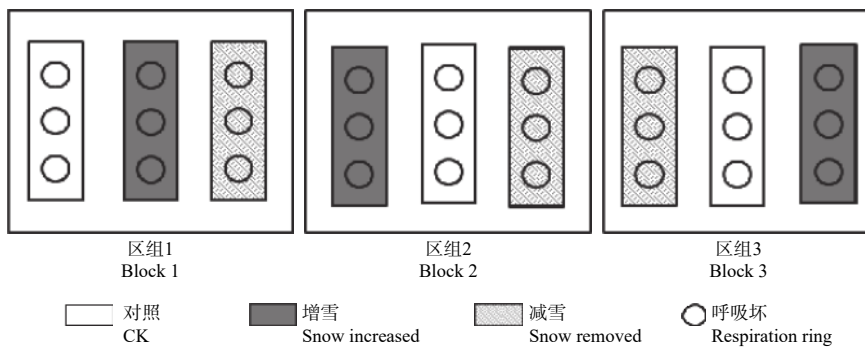


图1 样地布置图

Fig. 1 Layout of sample plots

### 2.2 测定指标及方法

整个试验测定从2018年1月9日降雪停止后开始,23日所有处理积雪融化完成1周后结束。利用LI-8100(美国LI-cor公司)每1~2 d测定1次土壤呼吸,按照测定时间内温度相对稳定、对积雪干扰比较小、测定时间内积雪融化程度比较低的原则,测定时间统一选择上午10:00-11:00,且

每次每个呼吸环测定时间为1.5 min。

每次测定土壤呼吸时,利用LI-8100自带的热电偶温度测量装置测定10 cm处的土壤温度,利用TDR200(美国Spectrum公司)测定10 cm处的土壤湿度。

在融雪后每个样地利用5 cm土钻采集3钻0~20 cm的土壤混匀,过2 mm筛,用手检法去除

石块和根系后,放入冰盒内带回实验室,并进行如下测定:

**2.2.1 土壤铵态氮、硝态氮含量的测定** 将采集到的土壤用 KCl 浸提后,利用比色法,采用 AMS 全自动化学分析仪(法国 Alliance 公司)测定土壤铵态氮、硝态氮含量,并利用二者之和作为可利用性氮含量。

**2.2.2 土壤微生物量碳、氮含量的测定** 利用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提法测定土壤微生物量碳、微生物量氮含量。定量称取 2 份 20 g 鲜土分别进行熏蒸、未熏蒸,再分别用 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0.5 mol·L<sup>-1</sup>) 溶液振荡浸提,浸提液用滤纸过滤,用总有机碳(总氮)分析仪(德国 Elementar 公司)测定总碳、总氮,根据测得指标计算土壤微生物量碳、氮含量。

### 2.3 数据分析

采用重复测量方差分析时间及改变降雪处理对土壤呼吸的交互影响。因为部分结果显示处理与时间之间存在显著的交互作用,因此,采用单因素方差分析及 LSD 多重比较分析不同处理间土壤呼吸、土壤温度、土壤湿度、土壤可利用性氮、土壤微生物量碳、氮含量的差异性。为了突出降雪的主效应,对不同处理的平均值进行计算和比较。为了进一步区分不同时期内雪被变化对土壤呼吸的影响,展现交互作用,整个试验阶段被分成前期(对照处理雪被融化完之前)、(对照处理雪被融化完成、增雪处理雪被融化完之前)、后期(所有雪被融化完成之后),并利用单因素方差分析对每个时期不同处理下的土壤呼吸的差异性进行检验。利用皮尔逊相关分析土壤呼吸与其它指标间的关系。以上分析采用 SPSS 16.0 (IBM) 完成,应用 Excel2013 软件绘图。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤温度与湿度

不同降雪处理下土壤温度均表现出显著的时间

表 1 降雪处理及测定时间对土壤温度、土壤湿度和土壤呼吸影响的方差分析结果

Table 1 Results of ANOVA on the effects of snowfall treatment and time on soil temperature, moisture and soil respiration

因子 Factor	土壤温度 Soil temperature/°C		土壤湿度 Soil moisture/%		土壤呼吸速率 Soil respiration/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	
	F	P	F	P	F	P
时间Time	109.441	<0.001	49.822	<0.001	16.084	<0.001
处理Snow	18.018	<0.001	0.401	0.674	7.642	<0.001
时间×处理Time×Snow	52.327	<0.001	3.505	<0.001	14.596	<0.001

波动(表 1),即土壤温度随降雪的融化而变化;随着试验进行,土壤温度呈升高趋势(图 2a)。表 2 表明:不同处理下,土壤温度存在差异,在增雪处理下土壤平均温度显著低于其它 2 种处理。时间阶段与处理间有交互作用(表 1、图 2b),在试验前期,减雪处理下土壤温度显著低于其余 2 种处理;试验中期,减雪处理下土壤温度最高,增雪处理下土壤温度最低;试验后期,增雪处理下土壤温度显著低于其余 2 种处理。

不同时间阶段下土壤湿度有显著变化,在试验中期,土壤湿度显著高于其余 2 个时期;不同处理下土壤湿度无显著差异(表 1、2),且处理与时间阶段有显著交互作用(表 1、图 2b)。

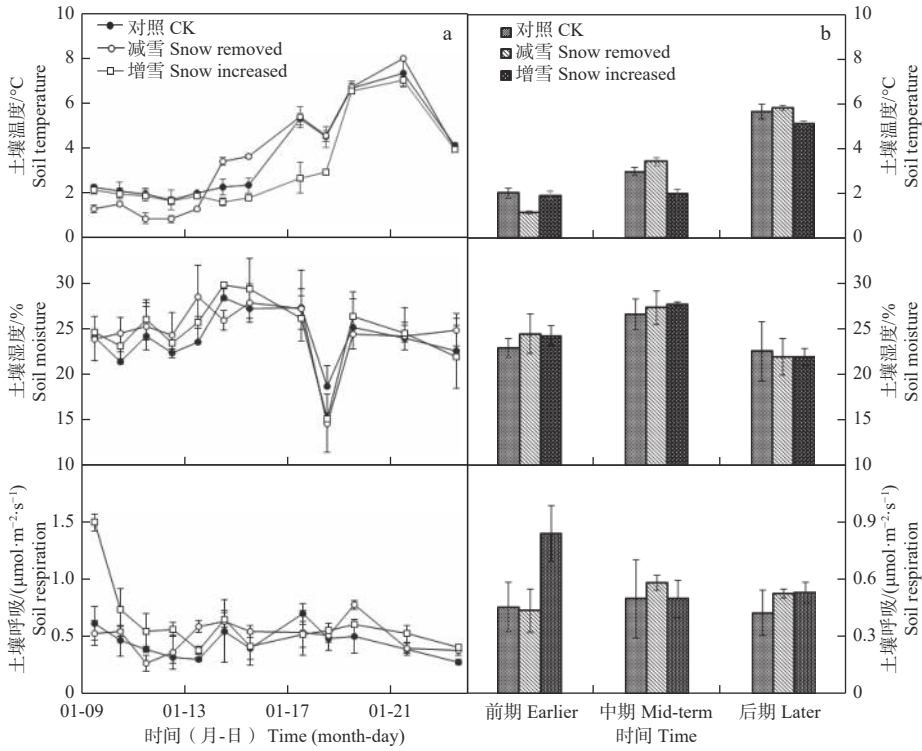
### 3.2 土壤呼吸对降雪改变的响应

对比 3 个试验阶段,土壤呼吸有显著的时间波动,各处理显著影响了土壤呼吸(表 1)。综合整个试验过程,增雪处理下,土壤呼吸速率比去除雪被和对照处理下分别提高了 0.11、0.16  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (表 2)。此外,改变降雪处理对土壤呼吸的影响在不同试验阶段并不一致,即改变降雪与处理时间之间存在显著的交互作用(表 1)。在试验前期,增雪处理下土壤呼吸速率显著高于减雪处理和对照处理;在试验中期和后期,增减雪处理对土壤呼吸均无显著影响(图 2b)。

### 3.3 降雪变化对铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、可利用性氮(Available-N)、微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)的影响

图 3 表明:改变降雪对土壤铵态氮(P=0.92)、硝态氮(P=0.40)含量均无显著影响,但与对照相比,减雪、增雪处理下硝态氮、铵态氮含量均有增加;可利用性氮含量在不同处理下差异也不显著(P=0.33),但增、减雪处理下均提高了可利用性氮的含量。

与对照相比,在增、减雪处理下,人工林土壤微生物量碳(MBC)含量有微弱的提高,而微生物



注：图中不同小写字母表示同一时间段不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Notes: Different lowercase letters in the figure indicate significant differences between different treatments in the same time period ( $P < 0.05$ ).

图2 降雪改变对土壤温度、土壤湿度和土壤呼吸的影响

Fig. 2 Impacts of snowfall change on soil temperature, moisture and soil respiration

表2 不同处理下土壤温度、土壤湿度和土壤呼吸均值 ( $\pm$ 标准误)

Table 2 Mean values ( $\pm$ SE) of soil temperature, moisture and respiration under different treatments

处理 Treatments	土壤温度 Soil temperature /°C	土壤湿度 Soil moisture /%	土壤呼吸 Soil respiration /( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
对照CK	3.55 $\pm$ 0.18a	23.99 $\pm$ 1.92a	0.46 $\pm$ 0.05b
减雪 Snow removed	3.46 $\pm$ 0.07a	24.56 $\pm$ 1.99a	0.51 $\pm$ 0.02b
增雪 Snow increased	3.01 $\pm$ 0.11b	24.61 $\pm$ 0.63a	0.62 $\pm$ 0.02a

注：表中同列不同字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Notes: Different letters in the same column in the table indicate significant differences between different processing. ( $P < 0.05$ ).

物量氮 (MBN) 含量在减雪下减少, 在增雪下有微弱的提高, 但在不同处理下, MBC ( $P=0.56$ ) 或 MBN ( $P=0.20$ ) 的含量变化并不显著 (图3)。

### 3.4 土壤呼吸与其它因子之间的关系

表3表明: 在试验早期, 土壤呼吸与土壤温度之间存在接近显著的正相关关系, 但在试验中期或后期, 土壤呼吸与土壤温度之间无显著相关性。综合整个试验, 土壤呼吸与土壤温度间存在显著的负相关关系。不管在试验的各个阶段, 还是整个试验

过程中, 土壤呼吸均不受土壤湿度的调控。整个试验过程土壤呼吸的平均值与微生物量碳之间存在接近显著的正相关关系 (表3), 土壤呼吸与微生物量氮、铵态氮、硝态氮、可利用性氮含量之间均无显著的相关关系。

## 4 讨论

已有研究表明, 土壤物理性质 (温度、湿度)、化学性质 (养分含量)、与生物环境 (微生物生物量与微生物活性) 均会调控土壤呼吸<sup>[6-7, 10]</sup>。不同生态系统及处理下生物与非生物环境因子的差异均可引起土壤呼吸的变化, 因此, 关于土壤呼吸改变机理研究是一个非常复杂的问题。本研究的观测数据显示, 对照样地平均冬季土壤呼吸速率为  $0.29\sim 0.70 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 整个试验期平均土壤呼吸速率为  $0.46 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (表2), 占本地区水杉人工林旱季土壤呼吸速率<sup>[26]</sup> 的 30.5%, 占天然林生长季平均土壤呼吸速率<sup>[27]</sup> 的 18.3%, 足以说明非生长季土壤呼吸在该地区土壤碳排放中占有相当重要的地位, 需要引起足够的重视。本研究中的土壤呼

吸速率与北美亚高山森林生态系统<sup>[10]</sup>、奥地利高山针叶林<sup>[11]</sup>、美国哈佛森林<sup>[13]</sup>、川西亚高山针叶林<sup>[14]</sup>、岷江华山松人工林<sup>[28]</sup>等地进行的观测结果基本一致, 但高于 Wang 等<sup>[11]</sup>在我国塞罕坝北方针叶林生态系统的测定结果 ( $0.15\sim 0.28 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 和 Gao 等<sup>[23]</sup>在沈阳落叶松林的结果 ( $0.32 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。土壤呼吸速率这一地域差异的可能原因有以下几点: 首先, 大量研究证实, 土壤呼吸速率与温度有关<sup>[2, 13, 28-29]</sup>, 此次试验地区冬季土壤均温  $3.6^{\circ}\text{C}$ , 显著高于塞罕坝地区 ( $-5^{\circ}\text{C}$ ) 和沈阳地区 ( $-10.5^{\circ}\text{C}$ ), 故在本研究中土壤呼吸速率较高; 其次, 信阳的年均降水 ( $1\,061.7 \text{ mm}$ ) 显著高于塞罕坝地区 ( $450.1 \text{ mm}$ ) 和沈阳地区 ( $726 \text{ mm}$ ), 较高的年度降水量和土壤湿度也可能是本研究中土壤呼吸速率较高的原因之一。此外, 不同研究地生物群落、土壤结构与质地的差异也会导致土壤呼吸的地区性差异。

本研究结果表明, 增雪显著提高了土壤呼吸, 这一结果与多数已有研究的结果一致<sup>[15, 23, 29]</sup>。增加雪被提高土壤呼吸的主要原因有以下几点: 第一, 增加雪被提高土壤温度和土壤湿度, 进而提高土壤呼吸<sup>[15, 23]</sup>; 第二, 增加雪被可以提高植物根系与微生物的活性<sup>[15, 30]</sup>, 进而提高土壤呼吸速率。第三, 单次降雪事件对土壤呼吸的影响, 通常体现在融雪产生的土壤呼吸脉冲效应, 通常融雪量越大, 脉冲效应越明显<sup>[15]</sup>, 这与文中的试验现象一致。本研究中, 增雪处理下土壤呼吸速率的提高主要发生在试验前期, 所有积雪融化之前, 在此阶段增雪处理下土壤温度、土壤呼吸速率均高于无雪被的处理, 且土壤温度与土壤呼吸在该阶段为接近显著的正相关关系, 表明增雪后土壤温度的变化是土壤呼吸的主要调控因子。由于本研究地点位于亚热带-暖温带

气候过渡带, 总体环境温度较高, 积雪时间短, 融雪速度快, 除了在试验前期有积雪的处理 (对照与增雪) 土壤温度高于雪被去除处理之外, 其它试验阶段有积雪处理的土壤温度反而更低, 这一现象与哀牢山亚热带常绿阔叶林雪灾后的土壤温度波动是一致的<sup>[4]</sup>。虽然较长的积雪融化时间造成增雪处理

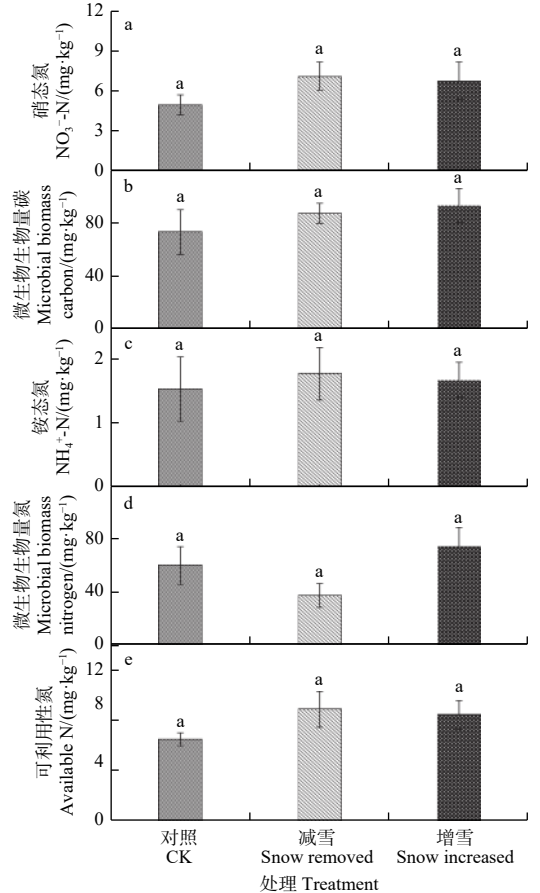


图3 降雪改变对土壤硝态氮、铵态氮、可利用氮、微生物量碳及微生物量氮的影响

Fig. 3 Impacts of changing snowfall on soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and Available-N, MBC and MBN

表3 土壤呼吸与环境因子之间的相关分析结果 (R 值与 P 值)

Table 3 Results (R and P value) between soil respiration and other environmental factors

自变量 Dependent variables	早期 Earlier		中期 Mid-term		后期 Later		平均 Mean	
	R	P	R	P	R	P	R	P
土壤温度 Soil temperature	0.333	0.090	0.185	0.357	-0.117	0.562	-0.740	0.000
土壤湿度 Soil moisture	-0.012	0.953	0.224	0.262	0.238	0.232	0.240	0.228
微生物量碳 MBC	-	-	-	-	0.291	0.141	0.351	0.073
微生物量氮 MBN	-	-	-	-	0.051	0.799	0.291	0.140
铵态氮含量 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N content	-	-	-	-	0.137	0.496	0.174	0.385
硝态氮含量 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N content	-	-	-	-	-0.037	0.856	-0.039	0.848
可利用性氮含量 Available N content	-	-	-	-	0.120	0.553	0.154	0.443

的土壤温度低于其它处理,但这一时期土壤温度对土壤呼吸并无显著的调控作用,这些整体变化趋势也符合积雪的土壤呼吸脉冲效应规律。由于本地降雨多,土壤湿度大,降雪对土壤湿度无显著影响。因此,土壤呼吸速率的变化不能归因于湿度的变化。此外,已有研究表明,土壤呼吸底物的变化主要是由凋落物变化引起的<sup>[31-32]</sup>。该地人工林定期进行一定的管理,对凋落物进行清理,枯枝落叶很少,且降雪时树叶早已经凋落并清理完毕,因此,本研究中降雪引起的土壤呼吸变化与降雪引起的底物变化基本无关。结合土壤呼吸的调控因子,尽管大量数据表明微生物与根系活性可以调控土壤呼吸<sup>[6-7, 10]</sup>,理论上降雪会影响微生物活动,进而影响微生物量碳氮及土壤可利用性氮,但这种影响在单次降雪事件下非常微小,可以忽略不计,因此,本研究中土壤呼吸的变化与土壤微生物量无关。

前人多数雪被去除试验结果表明,去除雪被之后,土壤温度降低<sup>[10, 14-15]</sup>,冻融循环次数增加<sup>[14]</sup>,凋落物分解速率及氮矿化速率降低<sup>[30]</sup>,底物浓度降低<sup>[15]</sup>,最终导致土壤呼吸速率下降;但也有研究表明,雪被去除之后,土壤冻结程度大大提高,植物根系死亡率上升,死亡的根系对土壤呼吸的激发效应提高了土壤呼吸速率<sup>[33]</sup>。本研究中,去除雪被对土壤呼吸速率无显著影响,这与以上研究结果均不一致<sup>[14-15, 23, 30, 33]</sup>,但这一结果与一项在亚高山草地进行的研究结果具有相同的趋势<sup>[16]</sup>。与前期的大量研究不同的是,本次降雪之后本地的土壤温度均在 0℃ 以上,积雪处于持续融化阶段,雪被去除对土壤温度并未带来显著影响;较高的环境温度也决定了雪被去除不可能通过冻害影响植物根系的死亡率。此外,由于人工林树木密度大,林下植被结构单一,积雪对底物输入的影响不大。因此,土壤呼吸速率并未随雪被去除而发生变化。结合以上结果及本地较少的降雪频率和较低的降雪强度,可以推测,在北亚热带-暖温带气候过渡带,降雪的减少对土壤碳排放的影响不大。

需要说明的是,本次降雪是在 1 月 4 日至 7 日发生,试验设置开始于 1 月 9 日,未在降雪前进行减雪设置挡雪装置,缺少一个天然无降雪对照处理。无法完全消除自然降雪过程对土壤湿度的影响,因此,关于此问题的研究有待于后期更详细的试验论证。

## 5 结论

本研究发现,极端暴雪可能提高气候过渡带人工林的土壤呼吸速率,但这种提高受到降雪量的影响,30 cm 左右的降雪并未显著影响土壤呼吸速率,但是如果积雪深度继续增加,土壤碳排放速率会有所增强。此外,本研究发现,积雪深度在不同的融雪阶段对土壤呼吸的影响幅度不一致,降雪对土壤呼吸的影响主要发生在积雪完全消融之前这一阶段。因此,降雪量及融雪时间对土壤碳通量的影响是未来生态系统碳循环评估中需要考虑的重要问题之一。

## 参考文献:

- [1] Coumou D, Rahmstorf S. A decade of weather extremes[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(7): 491-496.
- [2] Reichstein M, Bahn M, Ciais P, *et al.* Climate extremes and the carbon cycle[J]. *Nature*, 2013, 500(7462): 287-295.
- [3] Kapnick S B, Delworth T L. Controls of global snow under a changed climate[J]. *Climate Dynamics*, 2013, 26(15): 5537-5562.
- [4] 汤显辉,张一平,武胜胜,等. 哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤温湿度对极端降雪响应[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(6): 1833-1840.
- [5] Williams C A, Vanderhoof M K, Khomik M, *et al.* Post-clearcut dynamics of carbon, water and energy exchanges in a midlatitude temperate, deciduous broadleaf forest environment[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(3): 992-1007.
- [6] Tucker C L, Bell J, Pendall E, *et al.* Does declining carbon-use efficiency explain thermal acclimation of soil respiration with warming[J]. *Global Change Biology*, 2012, 19(1): 252-263.
- [7] Vicca S, Bahn M, Estiarte M, *et al.* Can current moisture responses predict soil CO<sub>2</sub> efflux under altered precipitation regimes? A synthesis of manipulation experiments[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(3): 2991-3013.
- [8] Fei P, Xu M, You Q, *et al.* Different responses of soil respiration and its components to experimental warming with contrasting soil water content[J]. *Arctic Antarctic & Alpine Research*, 2015, 47(2): 359-368.
- [9] Houghton R A. Balancing the global carbon budget[J]. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 2007, 35(1): 313-347.
- [10] Monson R K, Lipson D L, Burns S P, *et al.* Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition[J]. *Nature*, 2006, 439(7077): 711-714.
- [11] Wang W, Peng S S, Wang T, *et al.* Winter soil CO<sub>2</sub> efflux and its contribution to annual soil respiration in different ecosystems of a forest-steppe ecotone, north China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42(3): 451-458.
- [12] Brooks P D, Grogan P, Templer P H, *et al.* Carbon and nitrogen cyc-

- ling in snow-covered environments[J]. *Geography Compass*, 2011, 5(9): 682-699.
- [13] Contosta A R, Frey S D, Cooper A B. Seasonal dynamics of soil respiration and N mineralization in chronically warmed and fertilized soils[J]. *Ecosphere*, 2011, 2(3): 1-21.
- [14] 杨开军, 杨万勤, 谭羽, 等. 川西亚高山云杉林冬季土壤呼吸对雪被去除的短期响应[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(9): 964-971.
- [15] Aanderud Z T, Jones S E, Schoolmaster D R, *et al.* Sensitivity of soil respiration and microbial communities to altered snowfall[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 57(3): 217-227.
- [16] Gavazov K, Buttler A, Gleixner G, *et al.* Winter ecology of a sub-alpine grassland: Effects of snow removal on soil respiration, microbial structure and function[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 590: 316-324.
- [17] 王鹤松, 张劲松, 孟平, 等. 华北山区非主要生长季典型人工林土壤呼吸变化特征[J]. *林业科学研究*, 2007, 20(6): 820-825.
- [18] Huang K, Wang S, Zhou L, *et al.* Effects of drought and ice rain on potential productivity of a subtropical coniferous plantation from 2003 to 2010 based on eddy covariance flux observation[J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(3): 35021.
- [19] Marland G, Garten J C T, Post W M, *et al.* Studies on enhancing carbon sequestration in soils[J]. *Energy*, 2004, 29(9): 1643-1650.
- [20] Li X Y, Tang H P. Carbon sequestration: manners suitable for carbon trade in China and function of terrestrial vegetation[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(2): 200-209.
- [21] Tian F, Shi Y, Yu H U, *et al.* Research advance on carbon storage of artificial grassland in China[J]. *Asian Agricultural Research*, 2013, 5(9): 81-84, 87.
- [22] Yang Z, Hao H M, Wang D, *et al.* Revegetation of artificial grassland improve soil organic and inorganic carbon and water of abandoned mine[J]. *Journal of Soilence & Plant Nutrition*, 2014, 15(3): 629-638.
- [23] Gao D, Hagedorn F, Lei Z, *et al.* Small and transient response of winter soil respiration and microbial communities to altered snow depth in a mid-temperate forest[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 40-49. Decai G, Frank H, Lei Z, *et al.* Small and transient response of winter soil respiration and microbial communities to altered snow depth in a mid-temperate forest[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 40-49.
- [24] Mahlstein I, Daniel J S, Solomon S. Pace of shifts in climate regions increases with global temperature[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(8): 739-743.
- [25] IPCC. *Climate Change 2013: The physical science basis*[R]. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the inter-governmental panel on climate change. Cambridge University Press: Cambridge, 2013: 1132-1132.
- [26] 胡梦君, 王佳丽, 尚晴, 等. 鸡公山麻栎林和水杉林不同凋落物处理下土壤呼吸对降雨强度的响应[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(2): 166-173.
- [27] Liu Y, Shang Q, Wang L, *et al.* Effects of understory shrub biomass on variation of soil respiration in a temperate-subtropical transitional oak forest[J]. *Forests*, 2019, 10(2): 88.
- [28] 熊沛, 徐振锋, 林波, 等. 岷江上游华山松林冬季土壤呼吸对模拟增温的短期响应[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(12): 1369-1376.
- [29] 刘胜, 丁九敏, 徐涵涓, 等. 雪灾对毛竹林土壤呼吸与微生物生物量碳的影响[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2010, 34(3): 126-130.
- [30] Baptist F, Yoccoz N G, Choler P. Direct and indirect control by snow cover over decomposition in alpine tundra along a snowmelt gradient[J]. *Plant & Soil*, 2010, 328(1-2): 397-410.
- [31] 周利军, 陈剑桥, 曾红娟. 针阔混交林凋落物对土壤呼吸的影响[J]. *湖南林业科技*, 2014, 41(1): 81-86.
- [32] 王光军, 田大伦, 闫文德, 等. 马尾松林土壤呼吸对去除和添加凋落物处理的响应[J]. *林业科学*, 2009, 45(1): 27-30.
- [33] Reinmann A B, Templer P H. Increased soil respiration in response to experimentally reduced snow cover and increased soil freezing in a temperate deciduous forest[J]. *Biogeochemistry*, 2018, 140(3): 359-371.

# Effect of Extreme Snowfall on Soil Respiration of Plantations in North Subtropics-Warm Temperature Transition Zone

ZAN Zhi-man<sup>1</sup>, LIU Yan-chun<sup>2</sup>, LIU Yin-zhan<sup>2</sup>, XUAN Juan<sup>2</sup>, ZHAO Wei<sup>1</sup>

(1. College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, He'nan, China; 2. School of Life Sciences, Henan University, Kaifeng 475004, He'nan, China)

**Abstract:** [Objective] To study the effect of extreme snowfall on soil respiration of plantations in north subtropics-warm temperate transition zone. [Method] A controlled experiment including snow addition, natural snowfall and snow remove was conducted in a plantation after a heavy snowfall in January 2018 in Xinyang, He'nan Province. The soil respiration variations under different treatments were measured with LI-8100 in different snow cover depths. The soil temperature, soil moisture, microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, and soil available nitrogen contents were detected to determine the relationships between soil respiration and environmental factors. [Result] The results showed that the snow addition significantly elevated soil temperature in the earlier stage of the experiment. However, the soil temperature under snow addition treatment was significantly lower than that in the control during the middle and later stage, and across the whole experiment, respectively. Snow addition elevated the soil respiration rate by 21.57%, but snow remove did not affect the soil respiration. The change of snowfall did not affect the contents of microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen and soil available nitrogen. The elevated soil respiration was mainly ascribed to the elevation of soil temperature in the early stage of the experiment. [Conclusion] Extreme snowfall may increase soil respiration rate in plantations in the climate transitional zone, but it is affected by snowfall. The snowfall with the depth of about 30 cm will not significantly affect soil respiration rate. If snow depth continues to increase, the soil carbon emission rate will increase. In addition, the impact of snow depth on soil respiration at different stages of snowmelt is not consistent, and the impact of snow on soil respiration mainly occurs before the snow melts completely. This study can provide partial data supporting the establishment of ecosystem carbon cycle model under climate change scenario.

**Keywords:** extreme snowfall; soil carbon flux; central China; plantation

(责任编辑: 徐玉秀)