

川西亚高山云杉林冬季土壤呼吸对雪被去除的短期响应

杨开军 杨万勤 谭羽 贺若阳 庄丽燕 李志杰 谭波 徐振锋*

四川农业大学生态林业研究所, 四川省林业生态工程重点实验室, 成都 611130; 四川农业大学高山森林生态系统定位研究站, 长江上游生态安全协同创新中心, 成都 611130

摘要 季节性雪被是高寒森林冬季土壤呼吸的重要调控因子, 气候变化导致的季节性雪被减少可能对高寒森林冬季土壤呼吸产生显著影响。该研究采用人工去除雪被的方法, 研究雪被去除对川西亚高山云杉(*Picea asperata*)人工林冬季土壤呼吸的影响。结果表明: 与对照相比, 雪被去除加大了土壤温度波动, 使冬季土壤表层和5 cm平均温度分别降低了1.12和0.34 °C, 冻融循环次数分别增加了39和12次; 冬季平均土壤呼吸速率和土壤碳排放通量分别为0.52 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和88.44 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 雪被去除使冬季平均土壤呼吸速率和碳排放通量分别降低了21.02%和25.99%, 雪被效应主要发生在雪被初期; 冬季土壤呼吸与土壤温度存在显著的指数关系, 雪被去除显著降低了冬季土壤呼吸温度敏感性。未来气候变化所引发的季节性雪被减少可能会降低川西亚高山森林冬季土壤碳排放, 从而对亚高山森林土壤碳动态产生深远影响。

关键词 亚高山森林; 季节性雪被; 雪被去除; 土壤呼吸; 温度敏感性; 森林碳汇

引用格式: 杨开军, 杨万勤, 谭羽, 贺若阳, 庄丽燕, 李志杰, 谭波, 徐振锋 (2017). 川西亚高山云杉林冬季土壤呼吸对雪被去除的短期响应. 植物生态学报, 41, 964–971. doi: 10.17521/cjpe.2017.0015

Short-term responses of winter soil respiration to snow removal in a *Picea asperata* forest of western Sichuan

YANG Kai-Jun, YANG Wan-Qin, TAN Yu, HE Ruo-Yang, ZHUANG Li-Yan, LI Zhi-Jie, TAN Bo, and XU Zhen-Feng*

Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering of Sichuan Province, Institute of Ecology & Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; and Long-Term Research Station of Alpine Forest Ecosystems and Collaborative Innovation Center of Ecological Security in the Upper Reaches of Yangtze River, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract

Aims Seasonal snow cover is one of the most important factors that control winter soil respiration in the cold biomes. The warming-induced decreases in snowpack could affect winter soil respiration of subalpine forests. The aim of this study was to explore the effects of snow removal on winter soil respiration in a *Picea asperata* forest.

Methods A snow removal experiment was conducted in a *P. asperata* forest stand in western Sichuan during the winter of 2015/2016. The snow removal treatment was implemented using wooden roof method. Soil temperatures, snow depth and soil respiration rate were simultaneously measured in plots of snow removal and controls during the experimental period.

Important findings Compared to the control, snow removal increased the fluctuations of soil temperatures. The average daily temperature of the soil surface and that at 5 cm depth were 1.12 °C and 0.34 °C lower, respectively, and the numbers of freeze-thaw cycles of the soil surface and that at 5 cm depth were increased by 39 and 12, respectively, in plots of snow removal than in the controls. The average rate of winter soil respiration and CO₂ efflux were 0.52 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ and 88.44 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, respectively. On average, snow removal reduced soil respiration rate by 21.02% and CO₂ efflux by 25.99%, respectively. More importantly, the snow effect mainly occurred in the early winter. The winter soil respiration rate had a significant exponential relationship with soil temperature. However, snow removal significantly reduced temperature sensitivity of the winter soil respiration. Our results suggest that seasonal snow reduction associated with climate change could inhibit winter soil respiration in the subalpine forests of western Sichuan, with significant implications for the carbon dynamics of the subalpine forests.

收稿日期Received: 2017-01-20 接受日期Accepted: 2017-08-26

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: sicauxzf@163.com)

Key words subalpine forest; seasonal snowpack; snow removal; soil respiration; temperature sensitivity; forest carbon sink

Citation: Yang KJ, Yang WQ, Tan Y, He RY, Zhuang LY, Li ZJ, Tan B, Xu ZF (2017). Short-term responses of winter soil respiration to snow removal in a *Picea asperata* forest of western Sichuan. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 964–971. doi: 10.17521/cjpe.2017.0015

冬季土壤呼吸显著影响着高纬度和高海拔生态系统碳收支(Sommerfeld *et al.*, 1993; Hubbard *et al.*, 2005)。高寒森林生态系统冬季土壤呼吸在很大程度上受季节性雪被的调控(王妮等, 2007)。全球气候变化已经并正在改变高寒地区季节性雪被的时空格局(IPCC, 2007)。高寒森林冬季土壤呼吸受土壤生物(如微生物和根系)和非生物因子(如水热条件和冻融循环等)的强烈影响(Monson *et al.*, 2006)。土壤温度、生物活性、冻融循环和水状态与雪被厚度及持续时间密切相关(于小舟等, 2010; Bokhorst *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2013)。未来气候变化所导致的雪被变化可能对高寒森林冬季土壤呼吸产生显著的影响。

由于雪被覆盖期间野外调查的困难和研究方法的局限性, 以往关于高寒生态系统土壤呼吸的研究几乎都集中在生长季(Wang *et al.*, 2010a)。有限的研究多关注冬季自然雪被环境条件下的土壤呼吸动态(王妮等, 2007)。雪被具有明显的隔离保温作用。有研究表明, 积雪厚度大于30 cm能有效地隔离寒冷气温, 为地下生命活动提供相对稳定的生存环境(Mikan *et al.*, 2002; Uchida *et al.*, 2005)。因而, 冬季土壤呼吸主要来自异养微生物呼吸, 其主要在特定微生物群落和土壤酶参与下完成(Monson *et al.*, 2006)。水分是微生物生命活动必不可少的物质, 当土壤存在液态水时, 即使在 -6°C 也可能存在微生物活动(Mikan *et al.*, 2002)。伴随着全球气候变化加剧, 冬季季节性降雪减少, 土壤冻结强度和冻融循环加剧(Groffman *et al.*, 2011), 植物根系和土壤微生物死亡率增加(Gaul *et al.*, 2008), 从而可能使冬季土壤呼吸下降。

地处青藏高原东缘的亚高山森林是我国第二大林区的主体, 在区域气候调节、水土保持和生物多样性保育等方面具有不可替代的作用(刘庆, 2002)。青藏高原是世界范围内对全球气候变化最敏感的区域, 未来该地区冬季极端气候发生的几率高, 季节性降雪的时空格局可能发生巨大改变。受青藏高原隆起及季风的影响, 川西亚高山森林季节性雪被时间长达4–6个月(Wu *et al.*, 2010)。这为研究雪被对亚

高山森林土壤呼吸影响提供了天然实验平台。最近研究发现川西亚高山森林冬季土壤温度约 -1°C , 且冬季土壤微生物生物量相对较高(Tan *et al.*, 2014); 另外, 季节性雪被时期凋落叶分解占年质量损失的60%以上(Wu *et al.*, 2010), 这暗示季节性雪被覆盖下川西亚高山森林土壤仍存在显著的生物活性和土壤碳排放。本研究以川西亚高山地区广泛分布的云杉(*Picea asperata*)林为研究对象, 采用人工遮雪方法, 研究雪被去除对云杉林冬季土壤呼吸的影响。基于已有的报道, 我们假设: (1)雪被去除将降低冬季土壤温度, 增加土壤温度波动; (2)雪被去除将降低冬季土壤呼吸速率。本研究旨在为深入认识该区森林冬季土壤生态过程及其对气候变暖的响应提供基础数据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省阿坝藏羌自治州理县毕棚沟四川农业大学高山森林生态系统定位研究站。地处青藏高原—四川盆地过渡地带的四姑娘山北麓, 属丹巴—松潘半湿润气候。区域内年平均气温为 $2-4^{\circ}\text{C}$, 最高气温(7月) 23.7°C , 最低气温(1月) -18.1°C 。年降水量850 mm。区域内季节性雪被覆盖时间长达4–6个月(因海拔和坡向而不同)。本研究位于 102.93°E , 31.30°N , 以海拔3 061 m处的云杉人工纯林为研究对象。云杉林基本特征如下, 林龄约60年, 郁闭度0.8; 林下灌木主要有三颗针(*Berberis diaphana*)、红毛花楸(*Sorbus rufopilosa*)和扁刺蔷薇(*Rosa sweginzowii*)等; 草本植物主要有蟹甲草(*Parasenecio forrestii*)、青茅(*Deyeuxia arundinacea*)和草玉梅(*Anemone rivularis*)等。土壤类型属于森林暗棕壤, 表层土壤(0–20 cm)有机碳、全氮、全磷和pH值分别为 $88.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $7.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和6.4。

1.2 样地设置

2015年11月上旬, 在云杉林内搭建6套底面积 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$, 高2 m的通风遮雪棚(木制骨架, 并用透光率约90%的聚乙烯塑料薄膜进行覆盖), 遮雪棚之

间距离15–20 m。同时,在每个遮雪棚旁设置自然降雪对照样方(用木桩和细绳标明),遮雪棚和对照样方距离3–5 m。遮雪棚去除整个冬季季节性降雪,在晚冬时期(翌年3月下旬)把遮雪棚移除。

1.3 环境因子监测

在林下离地面2 m高处以及处理样方中心土壤表层和5 cm处分别安置纽扣式温度传感器(DS1921-F5#, Maxim/Dallas Semiconductor, Dallas, USA)对近地面空气温度和土壤温度进行同步监测,测定频率为每小时1次。土壤温度低于0 °C的时间超过3 h,随后回升到0 °C以上持续时间超过3 h的动态过程作为1次冻融循环(Konestabo *et al.*, 2007)。雪被隔离效应用于表征雪被对土壤的保温作用,即为同一深度对照组土壤温度减去雪被去除土壤温度的差值。2015年11月中下旬至2016年4月上旬,每2周用直尺对每个对照样方内雪被厚度进行测量。

1.4 土壤呼吸的测定

2015年11月上旬,在每个样方随机布置2个PVC管(直径20 cm,高6 cm),2–3 cm嵌入土壤,作为土壤呼吸测定基座。土壤呼吸速率测定采用LI-8100自动土壤CO₂通量系统(LI-COR, Lincoln, USA)。测定时间为2015年11月底至2016年4月初,每2周测定1次,每次测定在9:00–12:00完成。为便于确定雪被下对照组土壤环位置,采用钢签(尾部缠有红色布条)进行标注,每次测定前刨开积雪,测定完成后,用铁锹回填积雪。

1.5 温度敏感性和冬季通量估算

根据已测量的数据,冬季土壤温度与土壤呼吸呈现指数关系:

$$R = ae^{bT}, Q_{10} = e^{10b}$$

式中, R 表示土壤呼吸速率($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), T 表示土壤温度(°C), a 代表土壤温度为0 °C时的土壤呼吸速率, b 代表土壤呼吸的温度敏感性参数; Q_{10} 代表土壤呼吸的温度敏感性。

基于土壤5 cm处连续测得的土壤温度,通过土壤呼吸和土壤温度指数关系估算每个小时的土壤呼吸速率,再累计加和估算整个冬季的CO₂通量(Wang *et al.*, 2014)。本研究中,利用对照5 cm的土壤温度估算冬季长度,即连续5天土壤温度日均值 ≤ 5 °C为冬季开始,以5天中第一天低于5 °C为冬季开始日,连续5天土壤温度日均值 ≥ 5 °C为冬季结束,其最后一天为冬季结束日。冬季从2015年11月初到

2016年4月初,共151天。

1.6 数据分析

用重复测量方差分析(repeated measure ANOVA)检验雪被去除和测定日期及其交互作用对土壤呼吸的影响,用独立样本 t 检验比较每个监测时期雪被去除和对照组之间土壤呼吸速率的差异显著性;所有数据均采用SPSS 20.0软件进行统计分析,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。使用SigmaPlot 12.5完成制图。

2 结果

2.1 雪被去除和土壤环境因子变化

整个冬季试验期间,空气平均温度为 -1.61 °C,温度波动为 25.13 °C,最低温度为 -14.08 °C(图1A),在2015年12月初首次观察到降雪。雪被对冬季土壤具有明显的保温作用。随着雪被厚度的增加,对照样地土壤表层和5 cm处温度逐渐保持在0 °C左右。而雪被去除使土壤表层和5 cm处的平均温度分别比对照组低 1.12 °C和 0.34 °C(图1B、1C)。土壤温度波动和空气温度变化表现出一致性。尽管雪被去除缩短了土壤冻结天数,但显著增加了土壤冻融循环次数(表1)。冬季雪被对不同土壤层次的保温效果存在较大差异。土壤表层温度波动较大,雪被隔离效应明显(图2),而地下5 cm土壤温度相对稳定。

2.2 冬季土壤呼吸变化

对照组冬季平均土壤呼吸速率为 $0.52 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,雪被去除组冬季平均土壤呼吸速率为 $0.41 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (图3),雪被去除使冬季土壤呼吸速率降低了21.02%。自11月初至雪被初期,雪被去除和对照土壤呼吸速率均快速下降,雪被去除使土壤呼吸速率降低27.3% ($p < 0.05$, 图3);土壤冻结期间,雪被去除样地土壤呼吸相对稳定;3月下旬,雪被去除和对照组土壤呼吸速率均出现快速增加的特征。重复测量方差分析表明,冬季土壤呼吸随时间变化差异显著($p < 0.001$),雪被显著影响冬季土壤呼吸速率($p < 0.01$),而雪被和时间的交互作用对土壤呼吸影响不显著($p = 0.153$)。

2.3 冬季土壤呼吸与温度的关系

冬季土壤呼吸速率对土壤温度较为敏感,与土壤温度表现出显著的指数关系(图4)。雪被去除后,增大了土壤温度变化幅度,减弱了土壤呼吸与土壤温度指数关系。此外,雪被去除显著降低了冬季土壤呼吸温度敏感性(Q_{10})(表2)。

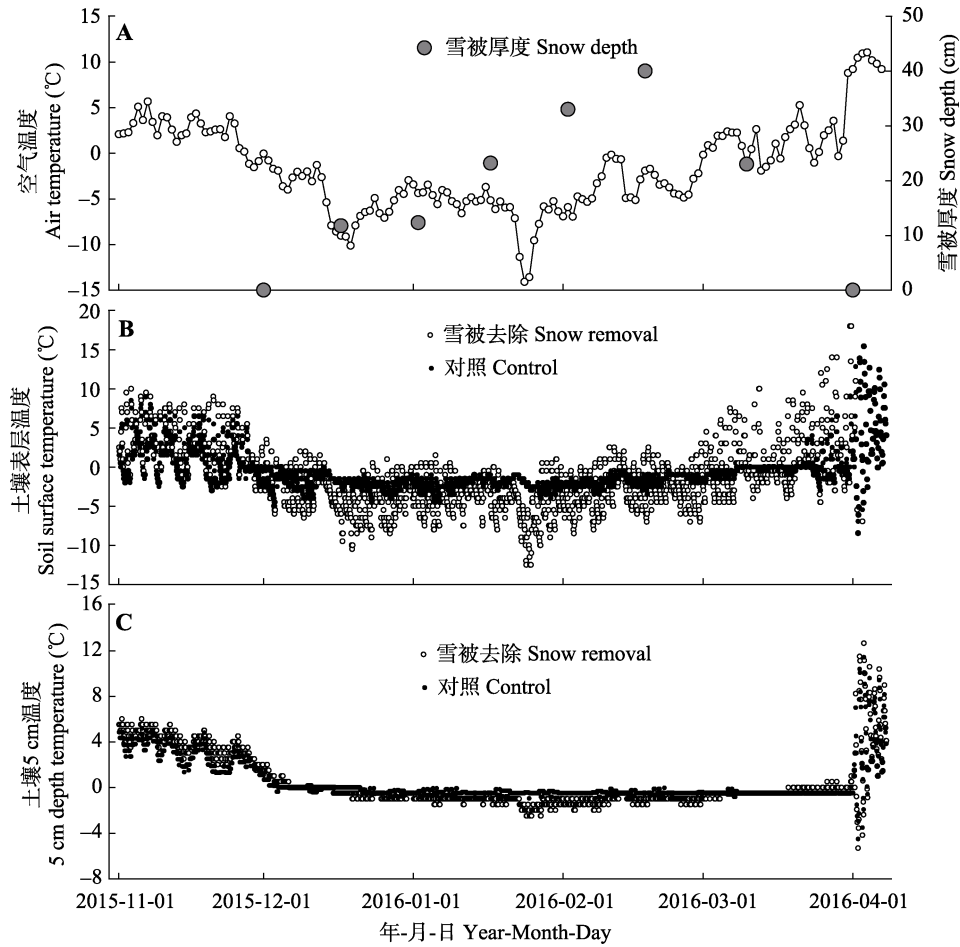


图1 雪被去除对土壤温度的影响。
Fig. 1 Effects of snow removal on soil temperature.

表1 不同处理条件下土壤冻结时间及冻融次数
Table 1 Timing of freezing and freeze-thaw cycles under different treatments

土壤深度 Soil depth (cm)	处理 Treatment	日平均温度(°C) Daily mean temperature (°C)	最低温度(°C) Minimum temperature (°C)	土壤冻结天数 Duration of frozen soil (d)	冻融次数 Freeze-thaw cycle
0	雪被去除 Snow removal	-2.15	-9.1	103	63
	对照 Control	-0.71	-2.2	122	24
5	雪被去除 Snow removal	-0.61	-1.6	83	25
	对照 Control	-0.28	-0.5	99	13

2.4 冬季土壤通量

基于土壤5 cm处连续测得的土壤温度, 通过土壤呼吸和土壤温度指数关系, 估算每个小时的土壤呼吸速率, 再累计加和估算整个冬季时期CO₂通量。对照组冬季土壤CO₂通量为88.44 g·m⁻², 雪被去除使冬季土壤CO₂通量下降25.99% (图5)。

3 讨论

冬季土壤呼吸是高寒生态系统碳收支不可忽略的重要组成部分(王妮等, 2007)。已有研究均发现森

林生态系统在冬季存在明显的土壤呼吸迹象, 并在年CO₂通量中占有相当的比重(表3)。本研究中, 川西亚高山云杉林冬季平均土壤呼吸速率为0.52 μmol·m⁻²·s⁻¹, 这与前人研究结果(熊沛等, 2010)相近, 高于我国温带森林(Wang *et al.*, 2010b; Wang *et al.*, 2013)、日本寒温带森林(Mo *et al.*, 2005)和美国亚高山森林(Hubbard *et al.*, 2005), 但低于我国大兴安岭针叶林(Du *et al.*, 2013)和美国艾达华温带混交林(Mcdowell *et al.*, 2000)。这可能是冬季太阳辐射、季节性雪况和土壤可利用碳底物质量及活性等共同

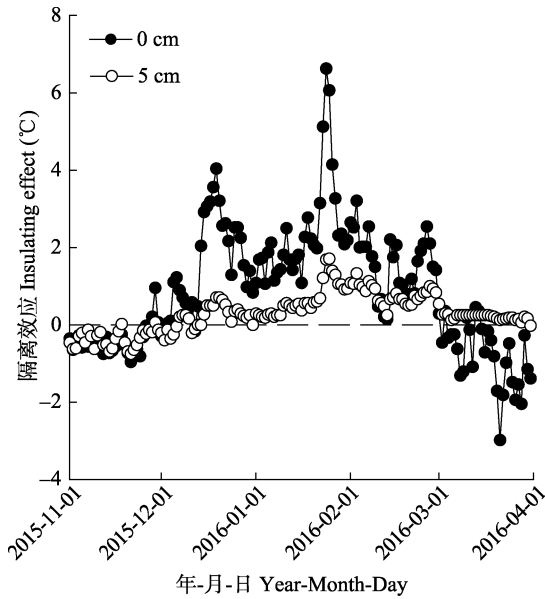


图2 雪被对土壤0 cm和土壤5 cm的隔离效应。
Fig. 2 The insulation effects of snow on soil surface and at 5 cm depth.

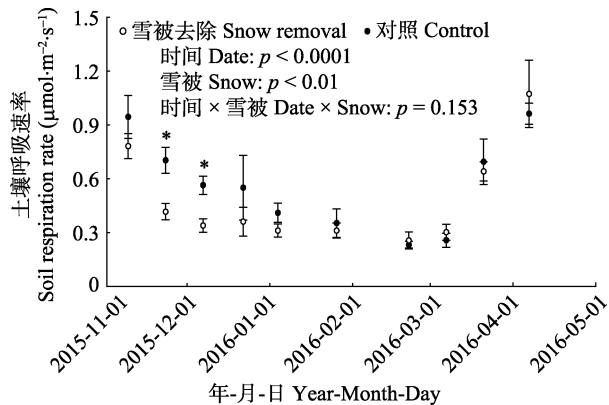


图3 雪被去除对冬季土壤呼吸速率的影响(平均值±标准误差)。*表示同一时期雪被去除和对照处理冬季土壤呼吸差异显著($\alpha = 0.05$)。
Fig. 3 Effects of snow removal on winter soil respiration rate (mean \pm SE). “*” indicates significant difference of winter soil respiration between the snow removal and control at the same period ($\alpha = 0.05$).

作用的结果(Elberling, 2007)。有研究表明, 积雪厚度大于30 cm时, 雪被能有效地隔离土壤和空气温度热量传导, 为地下生命活动提供相对稳定的生存环境(Mikan *et al.*, 2002; Uchida *et al.*, 2005), 有利于冬季土壤微生物呼吸(Schimel *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2013); 而雪被较薄(< 20 cm)时, 雪被对土壤保温效果差, 土壤冻结强度大, 从而抑制土壤CO₂排放(Du *et al.*, 2013)。例如, 我国温带森林冬季降雪通常小于30 cm, 冬季平均土壤温度可低至−5.71 °C, 冬季平均土壤呼吸速率仅为0.21 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Wang

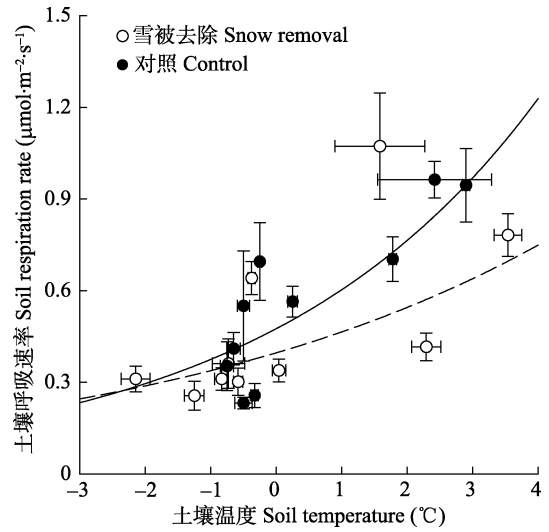


图4 土壤呼吸速率与土壤温度的关系(平均值±标准误差)。
Fig. 4 The relationship between soil respiration rate and soil temperature (mean \pm SE).

表2 土壤呼吸速率与土壤温度统计参数(平均值±标准误差)
Table 2 Statistics of soil respiration rate in relation to soil temperature (mean \pm SE)

处理 Treatment	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>Q</i> ₁₀	<i>R</i> ²	<i>p</i>
雪被去除 Snow removal	0.39	0.16	4.95 \pm 0.69	0.54	<0.05
对照 Control	0.48	0.24	11.02 \pm 0.72	0.65	<0.01

*a*和*b*表示拟合参数; *Q*₁₀表示土壤呼吸的温度敏感性。
a and *b* indicate the fitting parameters; *Q*₁₀ indicates the temperature sensitivity of soil respiration.

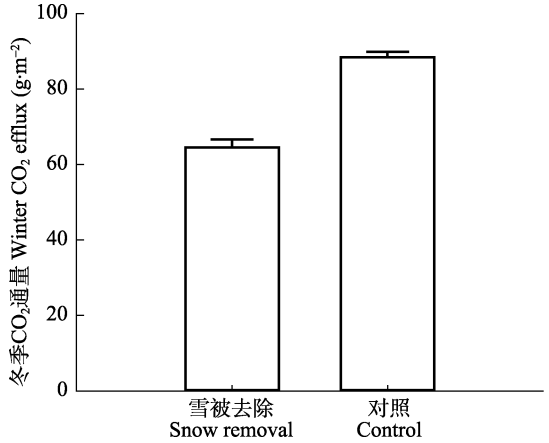


图5 雪被去除和对照样方冬季土壤CO₂通量(平均值±标准误差)。
Fig. 5 Winter soil CO₂ efflux in the snow removal and control plots (mean \pm SE).

et al., 2010b)。相反, 美国温带森林平均雪被厚度为65 cm, 冬季土壤温度可以维持1 °C左右, 冬季平均土壤呼吸速率高达0.8 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Mcdowell *et al.*, 2000)。本研究中, 整个冬季平均雪被厚度约为17 cm, 冬季土壤温度维持在−0.5 °C左右, 土壤呼吸速率为0.52 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此外, 研究方法不同也可能造成

表3 已发表的关于季节性雪被覆盖森林冬季土壤CO₂通量数据Table 3 Values of winter CO₂ efflux from seasonally snow-covered forests in literature

位置 Location	纬度 Latitude	经度 Longitude	冬季CO ₂ 通量 Winter CO ₂ efflux (g·m ⁻² ·a ⁻¹)	平均土壤呼吸速率 Mean soil respiration rate (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	参考文献 References
加拿大 Canada	55.37°–56.24° N	97.24°–99.05° W	40–55	0.1–0.8	Winston <i>et al.</i> , 1997
中国黑龙江 Heilongjiang, China	50.93° N	121.50° E	/	0.7	Du <i>et al.</i> , 2013
中国黑龙江 Heilongjiang, China	45.40° N	127.66° E	51.7	0.21	Wang <i>et al.</i> , 2013
奥地利 Austria	47.56° N	11.63° E	62	0.24–0.64	Schindlbacher <i>et al.</i> , 2007
美国爱达荷州 Idaho, America	46.08° N	116.08° W	132	0.8	Mcdowell <i>et al.</i> , 2000
中国河北 Hebei, China	42.17°–42.83° N	117.20°–117.50° E	31.64	0.21	Wang <i>et al.</i> , 2010b
美国科罗拉多州 Colorado, America	39.07° N	105.87° W	71	0.34	Hubbard <i>et al.</i> , 2005
日本 Japan	36.13° N	137.42° E	84	0.48	Mo <i>et al.</i> , 2005
中国四川 Sichuan, China	31.68° N	103.88° E	/	0.51	Xiong <i>et al.</i> , 2010
中国四川 Sichuan, China	31.25° N	102.88° E	88.44	0.52	本研究 This study

“/”表示无数据。

"/" indicates no data.

冬季土壤呼吸的不确定性。有研究对比雪被下和雪被表面的CO₂排放速率,发现差异显著(Mcdowell *et al.*, 2000)。显然,这将进一步增加冬季土壤呼吸研究的不确定性。此外,大量研究表明,冬季土壤呼吸的温度敏感性(Q_{10})明显高于生长季(Schmidt *et al.*, 2009)。Mikan等发现冬季土壤呼吸 Q_{10} 高达60–200,而在零上温度时, Q_{10} 的最大值仅为9 (Mikan *et al.*, 2002)。本研究中,在自然雪被条件下,川西亚高山云杉林冬季土壤呼吸温度敏感性 Q_{10} 达11.02,显著高于生长季土壤呼吸 Q_{10} 值(Xu *et al.*, 2010)。

对高寒森林而言,季节性雪被是土壤的保温层,能有效地减缓冬季严寒气温的影响,显著调控土壤碳排放。本研究结果表明,雪被覆盖减少了空气与土壤间的热量交换。进入冬季后,雪被去除和对照组土壤都处于失热降温状态,但雪被具有较强的绝热能力和低热传导率特性,能有效地减缓土壤与空气之间的热量流动,从而减缓土壤热量散失(Campbell *et al.*, 2005)。相比于土壤,雪被热容量更大,对温度变化的敏感性较低,同样有利于冬季土壤温度稳定(Sun *et al.*, 1999)。本研究发现,雪被去除降低了冬季土壤温度,增加了土壤温度波动和冻融循环频率,这与以往的研究(Bokhorst *et al.*, 2013; Tan *et al.*, 2014)类似。

本研究中,雪被去除处理使冬季平均土壤呼吸速率降低21.02%,且前期下降尤为显著。这可能主要归因于以下几个方面:首先,初冬时期通常会有强的寒潮事件,大气温度急剧下降,而季节性雪被能在很大程度上缓冲酷寒,在雪被去除后,土壤冰

冻更强烈,从而限制了土壤微生物和根系活动,进而导致土壤呼吸速率降低。其次,雪被去除降低了冬季土壤呼吸温度敏感性,这可能会反馈于冬季呼吸速率(Aanderud *et al.*, 2013)。研究表明雪被去除能降低冬季土壤呼吸的温度敏感性,而雪被添加能提高冬季土壤呼吸的温度敏感性,且雪被去除较雪被添加的冬季土壤呼吸速率显著降低(Aanderud *et al.*, 2013; Kurganova *et al.*, 2017)。本研究中,与对照相比,雪被去除显著降低了冬季土壤呼吸温度敏感性 Q_{10} ($p < 0.001$, t 检验)。再者,在科罗拉多亚高山森林研究发现,当温度在–3 °C至–0.3 °C时,某些优势微生物与温度呈现高度的指数关系(Schmidt *et al.*, 2009)。已有研究发现,雪被去除抑制了冬季土壤微生物和根系活性(Gaul *et al.*, 2008; Aanderud *et al.*, 2013),从而可能引发土壤呼吸速率下降。本研究也发现,雪被去除显著降低了雪被初期土壤微生物磷脂脂肪酸含量(未发表数据),这也在一定程度引起冬季土壤呼吸速率下降。

冬季土壤呼吸显著影响着高纬度和高海拔生态系统碳收支(Sommerfeld *et al.*, 1993; Hubbard *et al.*, 2005)。高寒森林生态系统冬季土壤呼吸在很大程度上受季节性雪被调控(王妮等, 2007)。本研究中,川西亚高山森林冬季土壤CO₂通量为88.44 g·m⁻²,高于加拿大北方森林(40–55 g·m⁻²)(Winston *et al.*, 1997)和奥地利高山森林(62 g·m⁻²)(Schindlbacher *et al.*, 2007),低于美国温带混交林(132 g·m⁻²)(Mcdowell *et al.*, 2000)和亚高山森林(232 g·m⁻²)(Sommerfeld *et al.*, 1996)。本研究表明,与对照相比,雪被去

doi: 10.17521/cjpe.2017.0015

除使冬季土壤碳通量下降20.6%。川西亚高山森林作为我国西南林区的主体,土壤有机质丰富,是我国重要的森林土壤碳库,冬季土壤CO₂通量占年通量的15.4%–16.5% (Xu *et al.*, 2015)。显然,在未来气候变化情景下,季节雪被变化对亚高山森林土壤碳循环有着深远的生态学意义。本研究只是一个冬季监测的结果,季节性雪被在年际间存在明显的差异,因此进一步监测十分必要。

基金项目 国家自然科学基金(31570601、31570445和31500509)和中国博士后科学基金(2014T70880)。

致谢 感谢四川农业大学生态林业研究所杨帆硕士在野外试验过程中给予的长期帮助,感谢刘群和李婷婷师妹在室内试验给予的帮助,感谢郑海峰硕士和游成铭博士对我数据处理给予的帮助。

参考文献

- Aanderud ZT, Jones SE, Schoolmaster DR, Fierer N, Lennon JT (2013). Sensitivity of soil respiration and microbial communities to altered snowfall. *Soil Biology & Biochemistry*, 57, 217–227.
- Bokhorst S, Metcalfe DB, Wardle DA (2013). Reduction in snow depth negatively affects decomposers but impact on decomposition rates is substrate dependent. *Soil Biology & Biochemistry*, 62, 157–164.
- Campbell JL, Mitchell MJ, Groffman PM, Christenson LM, Hardy JP (2005). Winter in northeastern North America: A critical period for ecological processes. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 3, 314–322.
- Du EZ, Zhou Z, Li P, Jiang L, Hu XY, Fang JY (2013). Winter soil respiration during soil-freezing process in a boreal forest in northeast China. *Journal of Plant Ecology*, 6, 349–357.
- Elberling B (2007). Annual soil CO₂ effluxes in the high Arctic: The role of snow thickness and vegetation type. *Soil Biology & Biochemistry*, 39, 646–654.
- Gaul D, Hertel D, Borken W, Matzner E, Leuschner C (2008). Effects of experimental drought on the fine root system of mature Norway spruce. *Forest Ecology and Management*, 256, 1151–1159.
- Groffman PM, Hardy JP, Fashu-Kanu S, Driscoll CT, Cleavitt NL, Fahey TJ, Fisk MC (2011). Snow depth, soil freezing, and nitrogen cycling in a northern hardwood forest landscape. *Biogeochemistry*, 102, 223–238.
- Hubbard RM, Ryan MG, Elder K, Rhoades CC (2005). Seasonal patterns in soil surface CO₂ flux under snow cover in 50 and 300 year old subalpine forests. *Biogeochemistry*, 73, 93–107.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Konestabo HS, Michelsen A, Holmstrup M (2007). Responses of springtail and mite populations to prolonged periods of soil freeze-thaw cycles in a sub-Arctic ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 36, 136–146.
- Kurganova I, de Gerenyu VL, Khoroshaev D, Blagodatskaya E (2017). Effect of snowpack pattern on cold-season CO₂ efflux from soils under temperate continental climate. *Geoderma*, 304, 28–39.
- Liu Q (2002). *Ecological Research on Subalpine Coniferous Forests in China*. Sichuan University Press, Chengdu. (in Chinese) [刘庆 (2002). 亚高山针叶林生态学研究. 四川大学出版社, 成都.]
- Mcdowell NG, Marshall JD, Hooker TD, Musselman R (2000). Estimating CO₂ flux from snowpacks at three sites in the Rocky Mountains. *Tree Physiology*, 20, 745–753.
- Mikan CJ, Schimel JP, Doyle AP (2002). Temperature controls of microbial respiration in arctic tundra soils above and below freezing. *Soil Biology & Biochemistry*, 34, 1785–1795.
- Mo W, Lee MS, Uchida M, Inatomi M, Saigusa N, Mariko S, Koizumi H (2005). Seasonal and annual variations in soil respiration in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 134, 81–94.
- Monson RK, Lipson DL, Burns SP, Turnipseed AA, Delany AC, Williams MW, Schmidt SK (2006). Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition. *Nature*, 439, 711–714.
- Schimel JP, Billbrough C, Welker JM (2004). Increased snow depth affects microbial activity and nitrogen mineralization in two Arctic tundra communities. *Soil Biology & Biochemistry*, 36, 217–227.
- Schindlbacher A, Zechmeister-Boltenstern S, Glatzel G, Jandl R (2007). Winter soil respiration from an Austrian mountain forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 146, 205–215.
- Schmidt SK, Wilson KL, Monson RK, Lipson DA (2009). Exponential growth of “snow molds” at sub-zero temperatures: An explanation for high beneath-snow respiration rates and Q₁₀ values. *Biogeochemistry*, 95, 13–21.
- Sommerfeld RA, Massman WJ, Musselman RC, Mosier AR (1996). Diffusional flux of CO₂ through snow: Spatial and temporal variability among alpine-subalpine sites. *Global Biogeochemical Cycles*, 10, 473–482.
- Sommerfeld RA, Mosier AR, Musselman RC (1993). CO₂, CH₄ and N₂O flux through a Wyoming snowpack and implications for global budgets. *Nature International Weekly Journal of Science*, 361, 140–142.
- Sun S, Jin J, Xue Y (1999). A simple snow-atmosphere-soil

- transfer model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104, 19587–19597.
- Tan B, Wu FZ, Yang WQ, He XH (2014). Snow removal alters soil microbial biomass and enzyme activity in a Tibetan alpine forest. *Applied Soil Ecology*, 76, 34–41.
- Uchida M, Mo W, Nakatsubo T, Tsuchiya Y, Horikoshi T, Koizumi H (2005). Microbial activity and litter decomposition under snow cover in a cool-temperate broad-leaved deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 134, 102–109.
- Wang CK, Han Y, Chen JQ, Wang XC, Zhang QZ, Bond-Lamberty B (2013). Seasonality of soil CO₂ efflux in a temperate forest: Biophysical effects of snowpack and spring freeze-thaw cycles. *Agricultural and Forest Meteorology*, 177, 83–92.
- Wang T, Ciais P, Piao S, Otle C, Brender P, Maignan F, Arain A, Gianelle D, Gu L, Lafleur P, Laurila T, Margolis H, Montagnani L, Moors E, Nobuko S, Vesala T, Wohlfahrt G, Reichstein M, Migliavacca M, Ammann C, Aubinet M, Barr A, Bernacchi C, Bernhofer C, Black T, Davis K, Dellwik E, Dragoni D, Don A, Flanagan L, Foken T, Granier A, Hadley J, Hirata R, Hollinger D, Kato T, Kutsch W, Marek M, Matamala R, Matteucci G, Meyers T, Monson R, Munger J, Oechel W, Paw UKT, Rebmann C, Tuba Z, Valentini R, Varlagin A, Verma S (2010a). Controls on winter ecosystem respiration at mid- and high-latitudes. *Biogeosciences Discussions*, 7, 6997–7027.
- Wang W, Peng SS, Wang T, Fang JY (2010b). Winter soil CO₂ efflux and its contribution to annual soil respiration in different ecosystems of a forest-steppe ecotone, North China. *Soil Biology & Biochemistry*, 42, 451–458.
- Wang W, Wang T, Peng SS, Fang JY (2007). Review of winter CO₂ efflux from soils: A key process of CO₂ exchange between soil and atmosphere. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 31, 394–402. (in Chinese with English abstract) [王妮, 汪涛, 彭书时, 方精云 (2007). 冬季土壤呼吸: 不可忽视的地气CO₂交换过程. 植物生态学报, 31, 394–402.]
- Wang YH, Liu HY, Chung H, Yu LF, Mi ZR, Geng Y, Jing X, Wang SP, Zeng H, Cao GM, Zhao XQ, He JS (2014). Non-growing-season soil respiration is controlled by freezing and thawing processes in the summer monsoon-dominated Tibetan alpine grassland. *Global Biogeochemical Cycles*, 28, 1081–1095.
- Winston GC, Sundquist ET, Stephens BB, Trumbore SE (1997). Winter CO₂ fluxes in a boreal forest. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102, 28795–28804.
- Wu FZ, Yang WQ, Jian Z, Deng RJ (2010). Litter decomposition in two subalpine forests during the freeze-thaw season. *Acta Oecologica*, 36, 135–140.
- Xiong P, Xu ZF, Lin B, Liu Q (2010). Short-term response of winter soil respiration to simulated warming in a *Pinus armandii* plantation in the upper reaches of the Minjiang River, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 1369–1376. (in Chinese with English abstract) [熊沛, 徐振锋, 林波, 刘庆 (2010). 岷江上游华山松林冬季土壤呼吸对模拟增温的短期响应. 植物生态学报, 34, 1369–1376.]
- Xu ZF, Wan C, Xiong P, Tang Z, Hu R, Cao G, Liu Q (2010). Initial responses of soil CO₂ efflux and C, N pools to experimental warming in two contrasting forest ecosystems, eastern Tibetan Plateau, China. *Plant and Soil*, 336, 183–195.
- Xu ZF, Zhou FF, Yin HJ, Liu Q (2015). Winter soil CO₂ efflux in two contrasting forest ecosystems on the eastern Tibetan plateau, China. *Journal of Forestry Research*, 26, 679–686.
- Yu XZ, Yuan FH, Wang AZ, Wu JB, Guan DX (2010). Effects of snow cover on soil temperature in broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21, 3015–3020. (in Chinese with English abstract) [于小舟, 袁凤辉, 王安志, 吴家兵, 关德新 (2010). 积雪对长白山阔叶红松林土壤温度的影响. 应用生态学报, 21, 3015–3020.]

责任编辑: 贺金生 责任编辑: 王 葳



扫码向作者提问