

DOI: 10.5846/stxb201710121823

郭朝霞, 马文瑛, 赵传燕, 李进军, 汪有奎, 席亚丽, 魏生龙. 积雪对祁连山亚高山草甸土壤呼吸速率的影响. 生态学报, 2019, 39(9): - .
Guo Z X, Ma W Y, Zhao C Y, Li J J, Wang Y K, Xi Y L, Wei S L. The effect of snow on soil respiration rate in subalpine meadows of the Qilian Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): - .

积雪对祁连山亚高山草甸土壤呼吸速率的影响

郭朝霞¹, 马文瑛¹, 赵传燕^{1,*}, 李进军², 汪有奎², 席亚丽³, 魏生龙³

1 兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室; 兰州大学农业农村部畜牧业创新重点实验室; 兰州大学草地农业科技学院; 兰州 730020

2 甘肃祁连山自然保护区管理局, 张掖 734000

3 河西学院甘肃省应用真菌工程实验室, 张掖 734000

摘要: 草地作为陆地生态系统的重要组成部分, 是分布最广的植被类型之一, 全球草地面积约占陆地面积的 1/4, 土壤碳储量约占全球总碳储量的 1/5, 在气候变化和陆地生态系统的碳循环方面起着重要作用。我国各类天然草原面积近 4 亿 hm^2 , 约占国土面积的 41.7%, 草地的总碳储量约占陆地生态系统总碳储量的 16.7%, 其中土壤层占 93.1%, 在碳储量中占有重要的地位。土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的主要环节, 其中草地土壤呼吸占陆地土壤呼吸量的 5.6%, 因此草地土壤碳库正成为草地生态系统研究的热点。祁连山草地资源丰富, 亚高山草甸是祁连山自然保护区的基质景观。积雪作为冰冻圈的重要组成部分, 对土壤温度和土壤水分具有调控作用, 是影响土壤呼吸的重要因素, 但是目前关于积雪对土壤呼吸的影响研究少见。研究区选择祁连山中部天涝池流域, 利用 LI-8100 开路式土壤碳通量测定系统, 探讨了土壤不同融化状态下积雪对祁连山亚高山草甸生态系统呼吸速率和土壤呼吸速率的影响, 并分析了地表温度和土壤温度、地表空气相对湿度和土壤体含水量对土壤呼吸的影响。结果表明: (1) 雪覆盖降低了生态系统呼吸和土壤呼吸速率, 但当日融化的积雪对次日生态系统呼吸有促进作用; (2) 呼吸速率与土壤温度和地表温度呈显著指数关系 ($P < 0.01$), 与地表空气相对湿度呈线性相关关系。降雪后, 全融土壤中呼吸速率与温度和地表空气相对湿度间的相关性好; (3) 温度较高时, 温度对呼吸速率的作用强; 温度较低时, 温度对呼吸速率的影响不大。

关键词: 积雪; 土壤湿度; 亚高山草甸; 土壤呼吸速率; 祁连山

The effect of snow on soil respiration rate in subalpine meadows of the Qilian Mountains

GUO Zhaoxia¹, MA Wenying¹, ZHAO Chuanyan^{1,*}, LI Jinjun², WANG Youkui², XI Yali³, WEI Shenglong²

1 State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems; Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

2 The Management of Gansu Qilian Mountains National Nature Reserve, Zhangye 734000, China

3 Gansu Engineering Laboratory of Applied Mycology, Hexi University, Zhangye 734000, China

Abstract: As an important component of terrestrial ecosystems, grasslands are one of the most widespread vegetation types worldwide, covering nearly a quarter of the world's land surface. The soil carbon reserves amount to one fifth of the global total; thus, grasslands play a significant role in climate change and the global carbon cycle. The area of different kinds of natural grasslands in China is approximately 400 million hm^2 , accounting for approximately 41.7% of the land area. The total carbon reserves of grasslands account for approximately 16.7% of the total carbon reserves of the terrestrial ecosystems, of which the soil accounts for 93.1%; thus, soil carbon reserves occupy an important position in the global carbon reserves. Soil respiration is the main link in the carbon cycle of terrestrial ecosystems, in which grassland soil respiration accounts for

基金项目: 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金 (lzujbky-2017-it09, lzujbky-2018-3)

收稿日期: 2017-10-12; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nanzhr@lzb.ac.cn

5.6% of terrestrial soil respiration. Therefore, scholars have paid attention to carbon storage of grassland ecosystems. The Qilian Mountains have abundant grassland resources. Subalpine meadows are the dominant ecosystem in the Qilian Mountains Nature Reserve. Snow, as a significant component of the cryosphere, is one of the most important factors that affects soil respiration because of its regulation and control of soil temperature and soil water content. At present, research on soil respiration in the subalpine meadows is lacking, and research regarding the effect of snow on soil respiration is also limited. The Tianlaochi catchment was selected as our study area. We observed respiration rate (R_s) under snow cover with three different soil melting states (soil non-frozen state, soil frozen state, soil melt and frozen state) in subalpine meadows of the Qilian Mountains through five snow events using a soil carbon flux automatic measurement system LI-8100 (LI-COR, USA). The effect of snow at different soil melting states on R_s was analyzed. The results showed that: (1) snow decreases R_s in the ecosystem and in bare soil, but it improves R_s in the ecosystem on the following day if snow is melted in one day; (2) The relation of R_s with temperature exhibits an exponential function ($P < 0.01$), which with the relative surface humidity expresses a linear function. During snow cover, the correlation between R_s and temperature in the non-frozen soil was the best. (3) The effect of temperature on respiration rate was strong when the temperature was high, whereas the effect was a weak when the temperature was low.

Key Words: snow; soil water content; subalpine meadow; soil respiration rate; Qilian Mountains

土壤呼吸是土壤中生命和非生命过程产生 CO_2 并向大气排放的过程^[1], 大约可抵消掉植物通过光合作用所固定碳的四分之一^[2]。目前, 大多数学者认为土壤呼吸主要包括根系呼吸, 微生物呼吸和动物呼吸^[3-4], 主要受环境因子(温度和水分)的影响^[5-8]。冬季土壤呼吸因为气温低, 土壤呼吸弱而被认为研究意义不大^[9], 但是近年来的研究表明, 冬季土壤生物的代谢活动仍在进行, 土壤呼吸占全年土壤呼吸量的 14%—30%^[10]。这一量值使得冬季土壤呼吸不容忽视, 尤其是在高海拔和高纬度地区, 冬季土壤呼吸显著影响着生态系统碳收支^[11-12], 而影响冬季土壤呼吸的重要因素之一便是雪况^[13-14]。

积雪作为冰冻圈的重要组成部分, 其面积占全球面积的 20%^[15]。积雪在全球气候变化和生态水文功能中发挥着重要作用, 相关研究已有大量报道^[16-17], 在美国西部山区, 几十年来积雪一直在下降, 预计未来下降速度会进一步加快, 使得土壤呼吸对积雪的响应成为影响生态系统碳循环的一个潜在的重要因素^[18]。但是国内有关积雪对土壤呼吸影响的报道比较鲜见^[19-20]。在中纬度地区冬季土壤呼吸是生态系统碳损失的主要途径, 其冬季土壤碳动态往往具有浅雪覆盖的特征^[21]。高纬度冬季土壤 CO_2 排放是区域和全球尺度年度碳收支的重要组成部分^[22]。在寒冷的高海拔区域, 积雪覆盖在土壤与大气间形成了良好的隔离层, 积雪特性如积雪厚度、积雪时间以及积雪密度均会影响土壤呼吸的强弱。一种观点认为积雪能够防止土壤冻结并提供有效水分, 从而维持微生物的活力^[23-24]。融雪期间, 水分持续渗入, 其作用在一定程度上相当于一场大的降雨过程, 且增加的土壤水分较生长季的降水更大、更持久, 从而提高了土壤呼吸速率^[25]。另一种观点认为积雪隔绝了土壤呼吸的气体交换, 阻碍了土壤呼吸速率的测定, 从而得到较低的土壤呼吸速率。Tucker 等在美国怀俄明州蒿草草原的研究表明浅层积雪通过多种机制抑制了土壤呼吸^[18]。随着全球变暖加剧, 冬季气温逐渐上升, 雪被覆盖面积逐渐减少。据统计, 在过去的 100 年里, 雪被覆盖面积已减少 10%^[26], 这将会显著影响全球尺度上的碳收支平衡。而积雪对亚高山草甸的土壤呼吸影响的研究几乎没有, 为了理解积雪对亚高山草甸的土壤呼吸的影响, 并进一步了解全球气候变化下土壤呼吸的变化规律, 我们以祁连山天涝池流域的亚高山草甸为研究对象, 通过观测降雪事件来分析积雪覆盖对土壤呼吸的影响, 以期评估积雪对草地生态系统碳循环的贡献提供依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于祁连山中部国家级自然保护区天涝池小流域(38°20'—38°30' N, 99°44'—99°59' E), 海拔

2600—4450 m,面积 12.8 km²。流域气候类型属于高寒半干旱、半湿润山地森林草原气候^[27],无霜期 90 d,年均气温 0.2℃,最高温度为 25.7℃,最低气温为-23.4℃,年降水量 450—550 mm,降水主要集中在 5—9 月份,占全年降水量的 89.2%,潜在蒸发量 1051.7 mm,年日照时数 1892.6 h,年平均相对湿度为 56.9%^[27]。物候期为 5 月末植物开始萌发,6、7、8 月份植物生长旺盛,9 月初植物开始枯黄、凋落,9 月偶有降雪^[28],清晨地表出现凝霜现象,降雪发生在 10 月至次年的 4 月,在 5、6 月份也偶有降雪事件。

亚高山草甸群落分布在海拔 2800—3100 m 处,选择海拔 3070 m,地势平坦、植被分布均一、具有代表性的草地为试验样地。物种组成有苔草(*Carex tristachya*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、紫花针茅(*Stipa purpurea*)、蒲公英(*Herba Taraxaci*)、车前(*Plantago asiatica*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)等,盖度接近 100%,草本植物平均高度为 30 cm 左右。土壤厚度大约 50 cm,其中有 5 cm 的地被层(A₀),根系深度 20 cm 左右,50 cm 以下有大量砾石分布,土壤类型为亚高山草甸土。52 cm 厚度土壤平均容重 1.34 g/cm³,土壤孔隙度 40.81%,不同土层取样后混合观测,土壤砂粒、粉粒和粘粒含量分别为 370.12 g/kg,434.53 g/kg 和 196.71 g/kg^[29]。

1.2 试验设计

在亚高山草甸布设 20×20 m²的标准样地,在样地内随机布设 12 个聚氯乙烯(PVC)管(内径 20 cm,高 12 cm),将 PVC 管尖锐一端楔入土壤,另一端露出地面 3 cm 左右。对 12 个 PVC 管进行两种处理,随机选取其中 6 个不做任何处理,保持原有状态,另外 6 个进行齐地面剪草处理。随机选取 3 个不做处理的和 3 个剪草的作为未降雪组,其余的作为降雪组。在降雪前用塑料布盖住未降雪组,在降雪事件完成后对降雪组和未降雪组处理同时进行呼吸速率观测,并且测定每次降雪的雪密度。呼吸速率(R_s)用 LI-8100 土壤碳通量自动测量系统(LI-8100A,LI-COR, Lincoln, USA)观测,测量时为保证仪器的气密性和内部雪层厚度的准确性,将靠近 PVC 管内侧的积雪进行适当处理。同时获取地表温度(LI-8100 呼吸罩里的温度,记为 T_a)和地表空气相对湿度(LI-8100 呼吸罩里的湿度,记为 RH),每隔一小时观测一次。雪密度通过取 PVC 管外单位体积积雪称重得出。采用 LI-8100 自带的温度探头测定 10 cm 处土壤温度(T_s),利用 5TE 土壤水分传感器(EM50, Decagon CO., Ltd. USA)获得 10 cm 处土壤体积含水量(VWC)。

此次试验共观测到 5 次降雪,分别在 2013 年 11 月 25 日,2014 年 4 月 21 日,2015 年 5 月 10 日,5 月 11 日和 6 月 4 日。前两次降雪事件中,雪层厚度均为 5.0 cm,密度相等。后 3 次降雪中雪层厚度分别为 3.5,1.5,6.3 cm,积雪密度分别为 0.0868,0.0713,0.0904 g/cm³。当土层厚度在 10 cm 内土壤的全日温度在 0℃ 以下为土壤全冻状态;当土层厚度在 10 cm 内土壤的全日温度在 0℃ 以上为土壤全融状态;当土层厚度在 10 cm 内土壤的全日温度既有 0℃ 以上又有 0℃ 以下为土壤冻融状态。根据 5TE 中温度记录,2013 年 11 月 25 日土壤处于全冻状态,2014 年 4 月 21 日土壤处于冻融状态,2015 年 5 月 10 日,5 月 11 日和 6 月 4 日土壤处于全融状态,后 3 次观测的平均值用于土壤全融状态下的呼吸速率分析。

1.3 数据处理与分析

对有雪处理的生态系统组、土壤组和无雪处理的生态系统组、土壤组的平行样分别取平均值,获得不同处理下小时步长的呼吸速率数据,同时获得小时步长的温湿度数据。利用 Excel 2007 和 SPSS 13.0 软件进行数据的整理,统计分析降雪事件后呼吸速率与土壤的冻融状态和土壤温湿度的关系,通过 Sigmaplot 12.5 软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 降雪后全冻土壤的呼吸速率和环境因子的动态变化

2013 年 11 月 25 日土壤处于全冻状态,测量结果显示见图 1。

在观测时间段内,无论是否有雪覆盖,生态系统呼吸速率随时间的变化均呈现单峰曲线,随时间的变化先增大后减小,15:00 时达到最大值;地表温度与呼吸速率的变化趋势一致,与呼吸速率同时达到最大值;土壤

温度随时间的变化均呈现增长的趋势;地表空气相对湿度在有雪覆盖时首先急剧减小,12:00后随着积雪的融化呈现波动变化,在无雪覆盖时呈现先减小后增大的动态变化,15:00时达到最小值。

土壤呼吸速率在有雪覆盖时随时间的变化持续增大,无雪覆盖时先增大后减小,12:00达到最大值;土壤温度在有雪覆盖时都呈持续增大的趋势;地表温度随时间的变化先增大后减小,14:00—15:00间达到最大值;地表空气相对湿度在有雪覆盖时先增大后减小,在地表温度达到最大时达到最大值,无雪覆盖时随时间先增大,12:00时达到最大,后随着温度的升高而减小,15:00达到最小值。

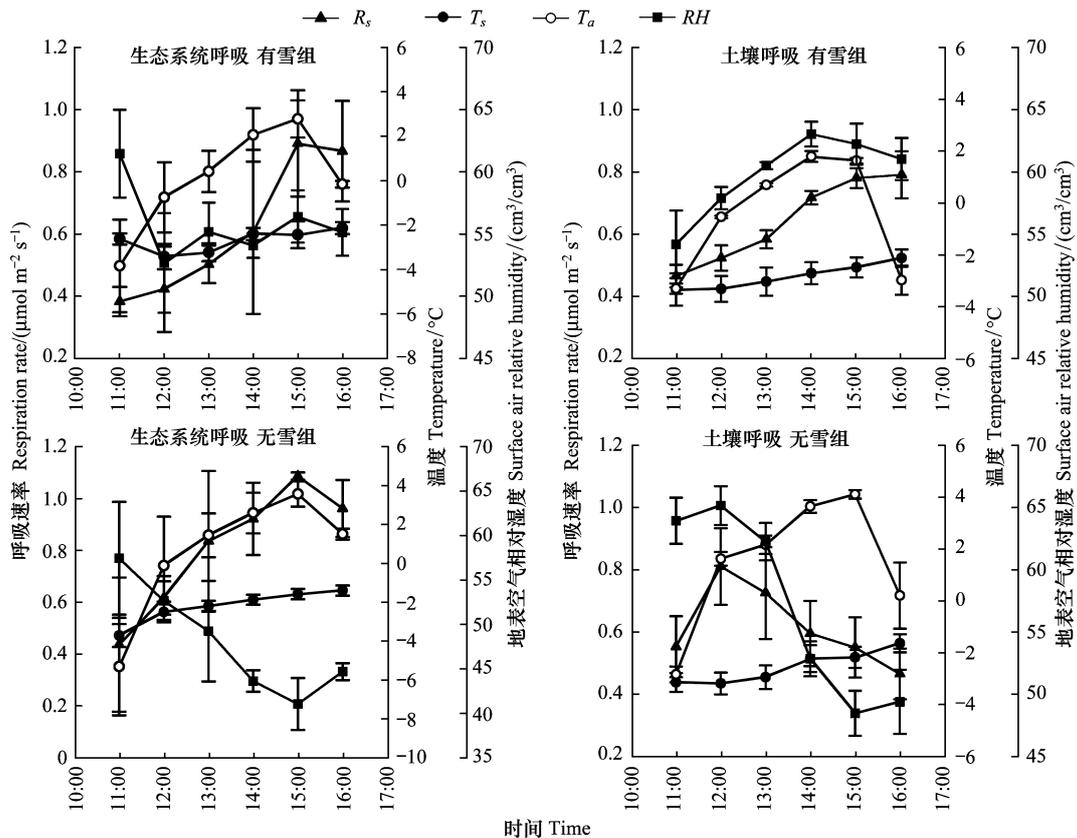


图1 降雪后全冻土壤的呼吸速率和环境因子的动态变化

Fig.1 Variation of R_s and environmental factors after snowfall under frozen soil

R_s :呼吸速率 respiration rate, T_s :5 cm处土壤温度 soil temperature at 5 cm, T_a :地表温度 soil surface temperature, RH :地表空气相对湿度 surface air relative humidity

2.2 降雪后冻融土壤的呼吸速率和环境因子的动态变化

2014年4月21日土壤处于冻融状态,其结果显示见图2。

观测的时间段中,生态系统呼吸速率均表现为先增大后减小的趋势,15:00达到最大值;土壤温度在观测时间段呈持续升高的趋势;地表温度先急剧升高,经短暂降低后再升高,15:00达到最大值,之后再降低;地表空气相对湿度在有雪覆盖时呈现先减小后增大再减小的波动趋势,12:00时达到最小值,13:00时达到最大值,无雪覆盖时持续减小。呼吸速率的变化趋势与地表温度的变化趋势一致。

土壤呼吸速率在有雪覆盖时持续增大,在无雪覆盖时先增大后减小,13:00达到最大;土壤温度持续升高;地表温度先升高后降低;地表空气相对湿度在有雪覆盖时先增大后减小,无雪覆盖时先增大后减小再增大。

在全冻和冻融条件下,分析两次降雪观测数据发现,无雪覆盖时土壤呼吸和生态系统呼吸速率均大于有雪覆盖,可能由于积雪的存在隔绝了 CO_2 的释放,导致有雪覆盖时呼吸速率的值较小。地表温度和土壤温度

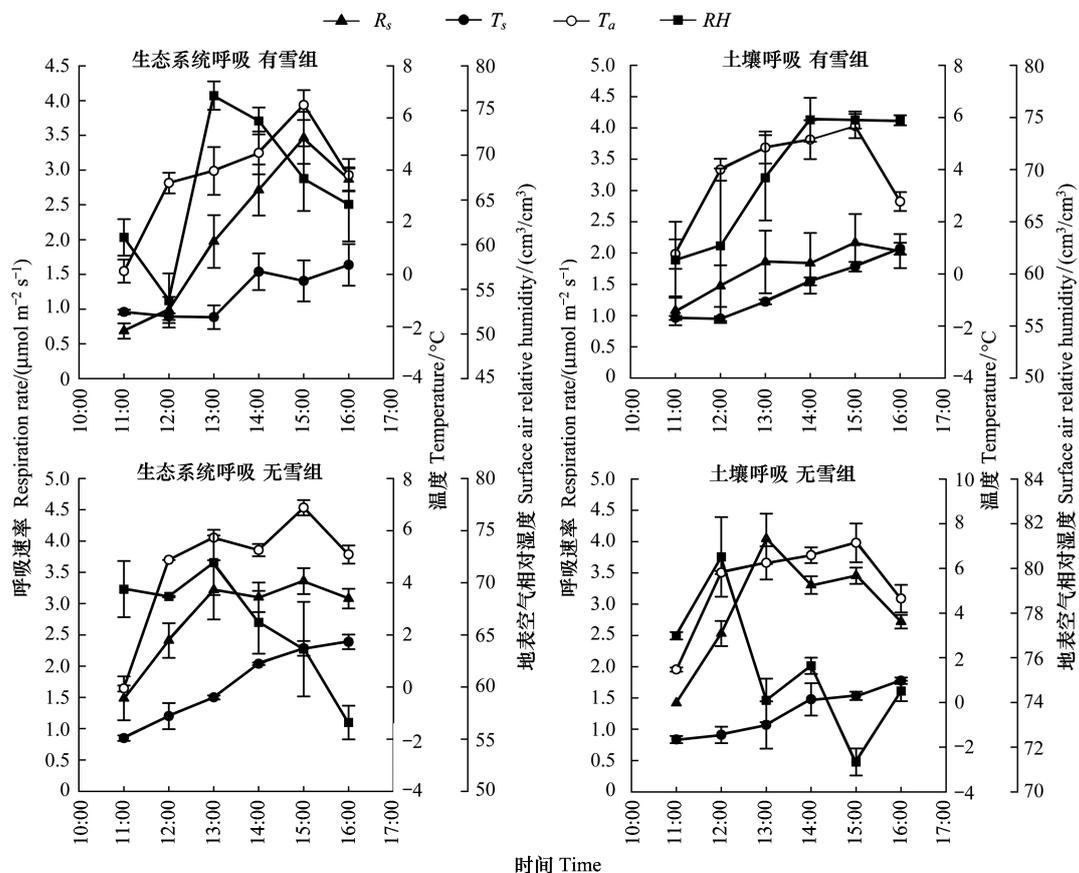


图2 降雪后冻融土壤的呼吸速率和环境因子的动态变化

Fig.2 Variation of R_s and environmental factors after snowfall under frozen and thawed soil

比有雪覆盖时高,由于积雪的保温效果,使得温度在有积雪覆盖时短时间内保持较低的状态。地表空气相对湿度有雪覆盖时大于无雪覆盖(表1)。由于无雪覆盖处理组地表温度和土壤温度较高,所以呼吸速率一开始略大于有雪处理组,但是随着有雪覆盖处理组积雪的融化,地表空气相对湿度随之增大,呼吸速率的增长率大于无雪处理组,表现为生态系统呼吸速率的平均增长率在无雪和有雪覆盖时分别为18.59%和28.67%,土壤呼吸速率的平均增长率在无雪和有雪覆盖时分别为9.82%和12.97%。

表1 在土壤全冻和冻融条件下有无雪覆盖呼吸速率及环境要素的对比

Table 1 Comparison of R_s and environmental factors under frozen soil and frozen and thawed soil between snow-covered and snow-free

观测环境 Observation conditions	无雪覆盖 Snow-free				有雪覆盖 Snow-covered			
	R_s / ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	T_s /°C	T_a /°C	RH/%	R_s / ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	T_s /°C	T_a /°C	RH/%
生态系统 Ecosystem	1.79	3.30	1.53	57.08	1.36	-1.74	1.91	60.96
土壤 Soil	1.76	3.55	1.74	66.23	1.19	-0.74	3.94	64.70

R_s :呼吸速率 respiration rate, T_s :5 cm处土壤温度 soil temperature at 5 cm, T_a :地表温度 soil surface temperature, RH:地表空气相对湿度 surface air relative humidity

2.3 降雪事件后全融土壤的呼吸速率和环境因子的动态变化

土壤处于全融状态下的呼吸速率和环境因子的动态变化如图3。

有雪覆盖时,生态系统和土壤呼吸速率均表现为波动式单峰曲线,呼吸速率、土壤温度、地表温度和地表空气相对湿度的变化趋势一致。生态系统呼吸速率从8:00开始随着土壤温度和地表温度的升高逐渐增加,15:00达到最大值,随后又开始下降;土壤温度和地表温度随着时间推移逐渐增加,分别在18:00和17:00达

到最大值;地表空气相对湿度从观测开始逐渐增加,14:00 达到最大值后开始下降,直至 19:00 又开始增加。土壤呼吸速率在 15:00 达到最大值,土壤温度和地表温度均在 17:00 达到最大值,地表空气相对湿度在 15:00 增加到最大值后逐渐下降,直至 18:00 又开始增加。

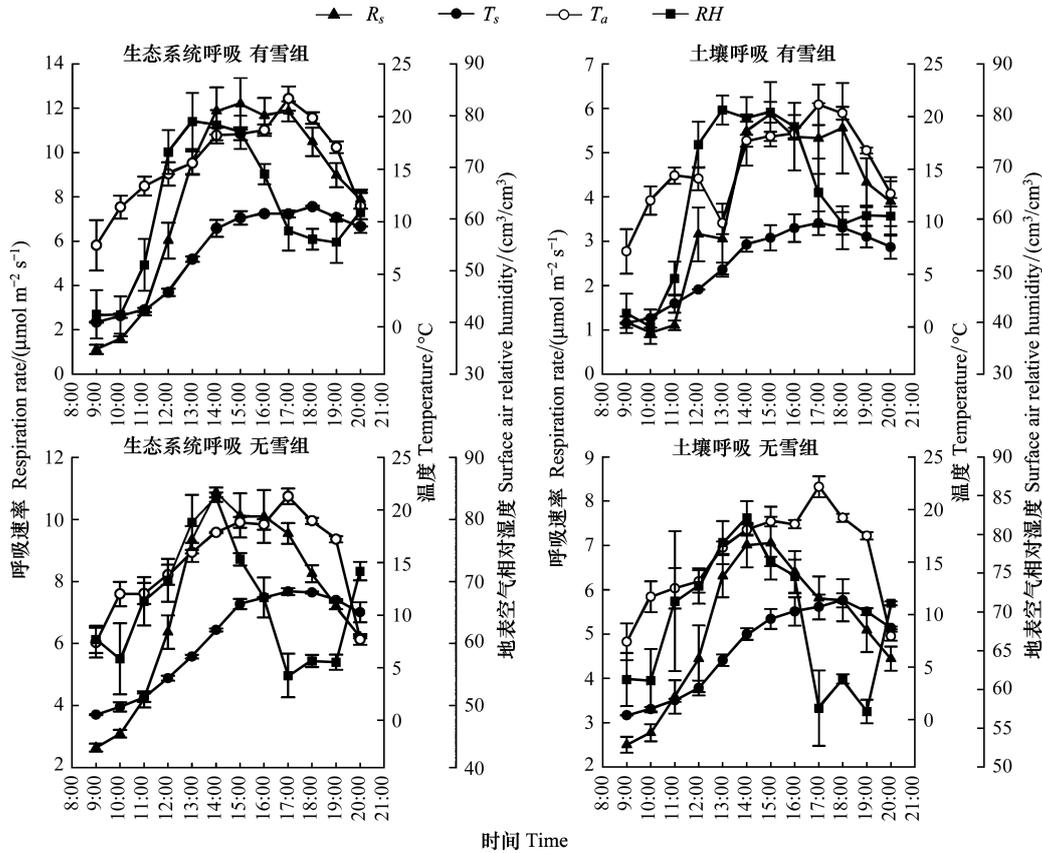


图3 降雪后融化土壤的呼吸速率和环境因子的动态变化

Fig.3 Variation of R_s and environmental factors after snowfall under melting soil

无雪覆盖时,生态系统和土壤呼吸速率、土壤温度,地表温度和地表空气相对湿度的变化趋势与有雪覆盖时一致。生态系统呼吸速率在 14:00 达到最大值,土壤温度和地表温度分别在 17:00 和 15:00 达到最大值,地表空气相对湿度在 14:00 波动增加到最大值后开始下降,直至 18:00 重新增加;土壤呼吸速率在 15:00 达到最大值,土壤温度和地表温度分别在 18:00 和 17:00 达到最大值,地表空气相对湿度在 14:00 增加到最大值后开始下降,直至 19:00 又开始重新增加。土壤体积分含水量的变化见图 4,在早晨保持一定时间的恒定,12:00 后开始显著增加,在 14:00 达到最大值后开始下降。

通过对三次降雪事件的观测,我们发现无论是有雪状态还是无雪状态,生态系统呼吸速率均大于土壤呼吸速率,并且生态系统呼吸速率在有雪状态下高于无雪状态,而土壤呼吸速率在无雪状态下高于有雪状态,土壤温度和地表空气相对湿度在无雪状态下大于有雪状态,而地表温度在有雪状态下大于无雪状态,但是差异不

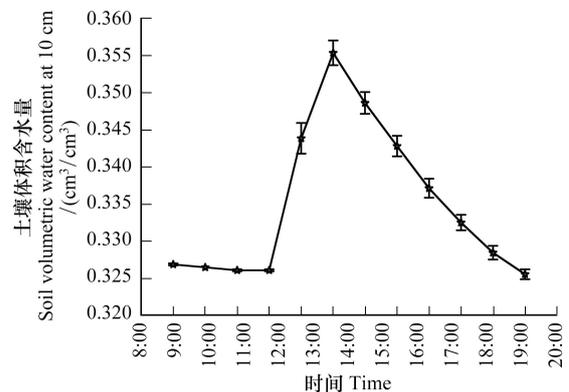


图4 降雪后土壤体积分含水量的动态变化

Fig.4 Variation of soil volumetric water content at 10 cm after snowfall

明显(表 2)。生态系统呼吸速率在有雪覆盖时起初低于无雪覆盖,但是随着温度的升高和土壤体积含水量的增加,呼吸速率逐渐超过无雪覆盖。有雪覆盖时,生态系统呼吸速率从 $1.12 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 增加到 $12.20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (图 3),增加了 9.9 倍,平均增加率为 25.34%,无雪覆盖时,生态系统呼吸速率从 $2.64 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 增加到 $10.87 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (图 3),增加了 3.1 倍,平均增加率为 10.45%。土壤呼吸速率在有雪覆盖时差异不大,但在有雪覆盖时的增加幅度要大于无雪覆盖。有雪覆盖时,土壤呼吸速率从 $1.17 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 增加到 $5.87 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,增加了 4.0 倍,平均增加率为 20.89%,无雪覆盖时,土壤呼吸速率从 $2.50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 增加到 $7.05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,增加了 1.8 倍,平均增加率为 6.74%。

表 2 在土壤全融条件下有无雪覆盖呼吸速率及环境要素的对比

Table 2 Comparison of R_s and environmental factors under melting soil between snow-covered and snow-free

观测环境 Observation condition	无雪覆盖 Snow-free				有雪覆盖 Snow-covered			
	$R_s/$ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	$T_s/^\circ\text{C}$	$T_a/^\circ\text{C}$	RH/%	$R_s/$ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	$T_s/^\circ\text{C}$	$T_a/^\circ\text{C}$	RH/%
生态系统 Ecosystem	5.24	7.62	15.14	66.66	5.42	7.11	15.66	61.68
土壤 Soil	3.47	6.75	15.28	68.87	2.66	6.13	15.22	64.05

3 次降雪事件积雪厚度分别为 3.5、1.5、6.3 cm,积雪密度分别为 0.0868、0.0713、0.0904 g/cm^3 ,相对应的生态系统呼吸速率日平均值分别为 2.701、5.558、8.007 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。经相关性分析,积雪厚度和密度与生态系统呼吸速率的相关系数分别为 0.2959 和 0.0178,表明积雪厚度和密度的变化对生态系统呼吸速率的影响并不明显。

2.4 呼吸速率与土壤温湿度的关系

2.4.1 全冻土壤的呼吸速率与温度和地表空气相对湿度的关系

将小时步长的呼吸速率与地表温度、土壤温度和地表空气相对湿度进行相关性分析(表 3 和表 4),结果表明,无论是无雪还是有雪覆盖,土壤呼吸和生态系统呼吸速率均与土壤温度和地表温度呈显著指数关系($P < 0.01$)。表 1 显示,有雪覆盖时呼吸速率与土壤温度的相关性大于地表温度,无雪覆盖时呼吸速率与地表温度的相关性明显好于与土壤温度的相关性。 Q_{10} 值代表呼吸速率对温度变化的敏感性,从分析结果可以看出呼吸速率在无雪覆盖时对温度的敏感性明显大于有雪覆盖。有无雪覆盖时土壤呼吸和生态系统呼吸速率与地表空气相对湿度呈显著线性相关关系(表 4)。有雪覆盖时土壤呼吸速率与地表空气相对湿度呈线性正相关,说明在有雪覆盖时地表空气相对湿度由于雪融化而迅速增大,此时呼吸速率也就随之增大。

表 3 全冻土壤的呼吸速率与温度间的相关性分析

Table 3 Regression models between R_s and temperature under frozen soil

呼吸速率 Respiration rate/($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		10 cm 处土壤温度 Soil temperature at 10 cm/ $^\circ\text{C}$			地表温度 Surface temperature/ $^\circ\text{C}$		
		模型 Model	R^2	Q_{10}	模型 Model	R^2	Q_{10}
有雪 Snow-covered	土壤呼吸	$R_s = 1.16e^{0.24 T_s}$	0.83	11.02	$R_s = 0.58e^{0.11 T_a}$	0.82	3.00
	生态系统呼吸	$R_s = 1.71e^{0.21 T_s}$	0.76	8.17	$R_s = 0.60e^{0.18 T_a}$	0.77	6.05
无雪 Snow-free	土壤呼吸	$R_s = 1.57e^{0.31 T_s}$	0.56	22.19	$R_s = 0.65e^{0.16 T_a}$	0.88	4.95
	生态系统呼吸	$R_s = 1.56e^{0.29 T_s}$	0.87	18.17	$R_s = 0.78e^{0.15 T_a}$	0.91	4.48

$P < 0.01$ 为极显著相关, $0.01 < P < 0.05$ 为显著相关

2.4.2 全融土壤的呼吸速率与温度、地表空气相对湿度和土壤体积含水量的关系

将 3 次全融土壤测量的呼吸速率平均值与温度进行相关性分析,建立关系式,如表 5 所示:呼吸速率与土壤温度和地表温度呈极显著指数关系。有雪覆盖时,生态系统和土壤呼吸速率均与土壤温度的相关性高于与地表温度的相关性,而无雪覆盖时,生态系统和土壤呼吸速率与地表温度的相关性均稍高于与土壤温度的相关性,有雪覆盖的 Q_{10} 值高于无雪覆盖。呼吸速率与地表空气相对湿度呈负线性关系(表 6),但只有在有雪覆盖

时达到极显著。

表 4 全冻土壤的呼吸速率与地表空气相对湿度间的相关性分析

Table 4 Regression models between R_s and soil surface relative humidity under frozen soil

呼吸速率 Respiration rate/ $(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$		地表空气相对湿度 Relative surface humidity/%	
		模型 Model	R^2
有雪 Snow-covered	土壤呼吸	$R_s = 0.05RH - 2.04$	0.82
	生态系统呼吸	$R_s = -0.20RH + 12.84$	0.72
无雪 Snow-free	土壤呼吸	$R_s = -0.04RH + 3.25$	0.66
	生态系统呼吸	$R_s = -0.06RH + 4.59$	0.79

$P < 0.01$ 为极显著相关, $0.01 < P < 0.05$ 为显著相关

将生态系统呼吸速率与土壤体积含水量做相关性分析, 关系模型如下:

$$R_s = 2.29 + 10.31e^{[-0.5 \times (\frac{VWC - 31.45}{1.09})]^2}, R^2 = 0.65, P < 0.01。$$

土壤体积含水量可以解释生态系统呼吸速率变异的 65%, 当 $VWC < 31.4\%$ 时, 呼吸速率随土壤体积含水量的增加而升高, 当 $VWC > 31.4\%$ 时, 呼吸速率随土壤体积含水量的增加而下降。

表 5 全融土壤的呼吸速率与温度间的相关性分析

Table 5 Regression models between R_s and temperature under melting soil

呼吸速率 Respiration rate/ $(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$		10 cm 处土壤温度 Soil temperature at 10 cm/ $^{\circ}\text{C}$			地表温度 Surface temperature/ $^{\circ}\text{C}$		
		模型 Model	R^2	Q_{10}	模型 Model	R^2	Q_{10}
有雪 Snow-covered	土壤呼吸	$R_s = 1.16e^{0.17T_s}$	0.91	5.47	$R_s = 0.63e^{0.11T_a}$	0.74	3.00
	生态系统呼吸	$R_s = 2.45e^{0.13T_s}$	0.87	3.67	$R_s = 0.75e^{0.14T_a}$	0.76	4.06
无雪 Snow-free	土壤呼吸	$R_s = 3.00e^{0.07T_s}$	0.66	2.01	$R_s = 1.98e^{0.06T_a}$	0.67	1.82
	生态系统呼吸	$R_s = 3.26e^{0.08T_s}$	0.73	2.23	$R_s = 1.66e^{0.08T_a}$	0.75	0.73

$P < 0.01$ 为极显著相关, $0.01 < P < 0.05$ 为显著相关

表 6 全融土壤的呼吸速率与湿度间的相关性分析

Table 6 Regression models between R_s and soil surface relative humidity under melting soil

呼吸速率 Respiration rate/ $(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$		地表空气相对湿度 Relative surface humidity/%		
		模型 Model	R^2	P
有雪 Snow-covered	土壤呼吸	$R_s = -2.61RH + 0.10$	0.55	$P = 0.0009$
	生态系统呼吸	$R_s = -5.21RH + 0.20$	0.47	$P = 0.0032$
无雪 Snow-free	土壤呼吸	$R_s = -1.20RH + 0.08$	0.17	$P = 0.1094$
	生态系统呼吸	$R_s = -1.53RH + 0.11$	0.15	$P = 0.1337$

$P < 0.01$ 为极显著相关, $0.01 < P < 0.05$ 为显著相关

3 讨论

3.1 积雪对全冻和冻融土壤的呼吸速率的影响

积雪是影响土壤呼吸速率的重要因素之一。高海拔地区在冬季常存在季节性雪被覆盖, 雪覆盖具有绝热保温作用, 并提供有效水分, 从而维持了土壤微生物的活力, 雪下土壤因此能够通过呼吸作用向大气中持续排放 CO_2 等温室气体, 使土壤呼吸速率发生很大的动态变化^[10,30]。刘琪璟等^[31]研究表明: 积雪较厚的土壤温度呈恒温状态, 积雪的保温作用使土壤微生物一直保持生命活动, 因而雪斑土壤具有较大的土壤呼吸。而本研究中有雪覆盖的土壤呼吸速率低于无雪覆盖的土壤呼吸速率, 有可能是因为积雪的空隙较小影响了 CO_2 的释放。Monson 等^[24]研究表明: 积雪厚度对冬季土壤呼吸的影响非常显著, 雪覆盖的减少降低了土壤呼吸速率。吴琴等^[19]对 2 次积雪厚度分别为 5 cm 和 15 cm 进行观测时得到: 生态系统呼吸分别达到 $0.707 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

和 $0.653 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 土壤呼吸速率则达到 $0.516 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $0.567 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 均明显高于气温相差不大的其他无雪观测日的生态系统和土壤呼吸速率。而本研究中, 5 cm 厚度的降雪降低了全冻土壤和冻融土壤的呼吸速率, 其原因可能是积雪因累积时间过长而变得密实, 从而阻碍了土壤中 CO_2 向大气中的排放; 另一个原因可能是 5 cm 的积雪厚度并没有对土壤起到保温作用。Bertrand 等^[32] 在成熟的糖械林中的研究发现, 积雪厚度达到 30 cm 才能够有效防止植物根冻结和死亡。Decker 等^[33] 在北部森林中的研究也发现了同样的现象。即 30 cm 以上的积雪能够形成有效的保温层, 因此厚层积雪能增加土壤的呼吸, 而浅的暂时性积雪不能起到良好的保温作用, 不能增加土壤的呼吸作用。胡红宇^[34] 在亚高山地区进行 0, 30, 100 cm 的雪厚度处理来研究积雪对土壤呼吸速率的影响, 结果表明: 0, 30, 100 cm 雪覆盖下的土壤呼吸速率分别为 (2.59 ± 3.45) , (2.66 ± 3.40) , $(1.47 \pm 1.54) \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。本研究选自祁连山亚高山草地的积雪覆盖日进行了呼吸速率及环境因子的观测, 在 11 月和 4—6 月间祁连山的积雪覆盖属于浅层积雪覆盖。研究结果与上述报道一致, 即浅层积雪对呼吸速率的影响并不明显。

研究表明当土壤处于全冻状态和冻融状态时, 生态系统呼吸速率均小于土壤呼吸速率, 这可能是因为土壤呼吸处理组为了适应表面环境的迅速变化而改变了土壤微生物的种类和活性, 使其对温度等环境因子的改变不是十分敏感, 也有可能是生态系统呼吸处理组的地上凋落物阻碍了 CO_2 从土壤深层向外排放。

3.2 积雪对融化土壤的呼吸速率的影响

土壤水分是微生物和根系代谢活动的重要控制因素, 因此能够对土壤呼吸产生重要影响, 而雪覆盖会通过积雪融化补充土壤水分。谢继萍等^[25] 研究表明, 积雪融化对土壤呼吸具有显著的激发效应, 早春积雪变化将对土壤呼吸速率产生重要影响。2015 年的 5、6 月份观察到的 3 次降雪中, 积雪因为量小, 且气温上升较快所以在降雪当日就已融化完毕。5 月 10 日观察到生态系统有无雪覆盖下呼吸速率分别为 2.70 、 $3.31 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 6 月 4 日观察到生态系统有无雪覆盖下呼吸速率分别为 8.01 、 $8.33 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 无雪状态下的呼吸速率都大于有雪状态, 但 5 月 11 日观察到生态系统呼吸有无雪覆盖下呼吸速率却分别为 5.56 、 $4.09 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。由此可见, 雪覆盖会降低生态系统呼吸速率, 但对次日及以后的呼吸速率会有促进效应。将 3 次降雪事件求取平均值, 得到生态系统呼吸速率在有雪覆盖时分别为 $5.42 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $5.24 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 总体来说, 降雪会增加呼吸速率, 这与谢继萍^[25] 和杨开军^[35] 的研究结果一致。无雪覆盖的平均土壤呼吸速率高于有雪覆盖的土壤呼吸速率, 其原因可能是雪覆盖降低了土壤温度。一般来说, 积雪厚度越大, 补充到土壤中的水分越多, 对土壤呼吸的促进作用也越大。但是此次试验中 3.5 cm 雪厚度下的土壤呼吸速率反而低于 1.5 cm 雪厚度下的土壤呼吸速率, 分析原因可能是: 此两次降雪为连续降雪事件, 5 月 10 日的降雪增加了土壤水分, 5 月 11 日的降雪在前天降雪的基础上又加大了土壤水分, 因此对土壤呼吸的激发效应更明显。有研究显示降雪前后生态系统 CO_2 通量日变化规律差别不大, 但是降雪后 CO_2 日总释放量增多^[36]。本研究结果与上述报道一致, 即降雪后呼吸速率增大。

本研究中土壤处于全冻、冻融和全融状态时, 生态系统呼吸速率在有雪覆盖的条件下分别为 0.61 、 $2.11 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 和 $5.42 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 有雪覆盖条件下土壤处于全融状态时的生态系统呼吸速率高于土壤处于冻融状态的生态系统呼吸速率, 土壤处于冻融状态时的生态系统呼吸速率高于土壤处于全冻状态的生态系统呼吸速率, 可能是因为土壤处于全融和冻融状态时水分补给较充足从而增大了呼吸速率。本文结论可为寒区生态系统碳循环中冻结土壤在积雪作用下的碳排放研究提供理论基础。

3.3 降雪对土壤呼吸速率与温湿度关系和温度敏感性的影响

大多数研究表明, 指数模型能够较好地模拟土壤呼吸速率与温度之间的关系^[37-38]。本研究中降雪并未改变这种关系, 温度可解释呼吸速率变化的 56%—91%。本试验中积雪提高了呼吸速率与土壤温度的相关性, 这可能是因为积雪的融化补充了土壤水分进而促进了呼吸。有研究表明, 一定的土壤湿度是保证土壤呼吸对温度响应的必要条件^[39]。降雪提高了呼吸速率与地表空气相对湿度间的相关性, 由此说明水分是影响土壤呼吸的关键因素。杨开军等^[36] 的研究表明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

循环速率。本研究中积雪改变了温度和水分,从而影响了呼吸速率与温度和水分的相关性。

Q_{10} 值是用于评价生态系统和土壤呼吸对温度敏感性的指标^[40]。有研究表明:生态系统或土壤呼吸的温度敏感性指数随着温度的降低而增加^[41-42]。 Q_{10} 值受诸多因素影响,如温度、水分、光照,而降雪可以同时影响这些因素。本研究中,积雪覆盖降低了土壤温度,在全融土壤中, Q_{10} 值表现为: $Q_{10}(\text{无雪-土壤}) = 2.01 < Q_{10}(\text{无雪-生态系统}) = 2.23 < Q_{10}(\text{有雪-生态系统}) = 3.67 < Q_{10}(\text{有雪-土壤}) = 5.47$,与前人研究结果一致。而在全冻土壤中, Q_{10} 值表现为: $Q_{10}(\text{无雪-土壤}) = 22.19 > Q_{10}(\text{无雪-生态系统}) = 18.17 > Q_{10}(\text{有雪-土壤}) = 11.02 > Q_{10}(\text{有雪-生态系统}) = 8.17$,与前人研究结果相反。总体看来,温度是决定 Q_{10} 的主要因子,全冻土壤的 Q_{10} 要明显大于全融土壤的 Q_{10} ,但土壤水分含量也会影响 Q_{10} 。土壤干旱会降低土壤呼吸的温度敏感性,一定范围内随着土壤体积含水量的增加,土壤呼吸对温度的敏感性也会增加^[43]。由此看来,降雪不止通过影响温度来影响 Q_{10} ,它还可能通过改变土壤水分、基质有效性、土壤微生物活性等因素来影响 Q_{10} ^[44]。

本研究分析了在土壤不同冻融状态下生态系统呼吸速率和土壤呼吸速率的日变化动态,处理了呼吸速率与温度和水分的相关关系,得出了积雪通过影响温度和水分进而对呼吸速率产生一定的影响。有研究表明,0、30 cm 和 100 cm 3 种雪厚度处理下 5 cm 土壤温度之间节律不同^[34]。雪层的绝缘效果导致 30 cm 和 100 cm 雪层厚度处理组的温度变化幅度相对较小,在这两种雪处理梯度中土壤温度的最大值、最小值和平均值呈现基本一致的变化趋势;受空气温度日变化的波动影响程度较大,因此无雪覆盖处理组中土壤温度变幅较大^[34]。也有研究表明,当湿地草甸土起始含水量不同时,融雪过程中积雪厚度对湿地土壤 CO_2 的排放规律存在一定差异^[45]。积雪融化过程中,土壤水分会得到补充,尤其是地表土壤,含水量的增加可以缓冲土壤温度的变化,朱新萍等研究表明土壤湿度增加会刺激土壤 CO_2 排放,与以往的研究具有一致性^[45-47]。未来关于祁连山亚高山草甸积雪对呼吸速率影响的研究有待于融入积雪厚度、温度状态等因素开展。

4 结论

(1) 在祁连山亚高山草甸,积雪将影响呼吸速率。雪覆盖会降低生态系统的呼吸速率和土壤呼吸速率,在积雪当日融化的条件下,积雪对次日的呼吸速率有促进作用。

(2) 有无积雪,控制呼吸速率的关键因子不同。无雪覆盖时,呼吸速率与地表温度的相关性较好,有雪覆盖时,呼吸速率与土壤温度的相关性最好;降雪可以提高呼吸速率与土壤温度间的相关性。降雪可以提高呼吸速率与地表空气相对湿度两者之间的相关性。

(3) 积雪影响土壤的湿度,从而影响土壤的呼吸速率。在土壤全融条件下的降雪对生态系统呼吸的影响实质上是湿度的控制。生态系统呼吸与土壤体积含水量关系呈高斯函数,当土壤体积含水量小于 31.4% 时,呼吸速率随土壤体积含水量的增加而增加,当土壤体积含水量大于 31.4% 时,呼吸速率随土壤体积含水量的增加而减小。

(4) 低温下的 Q_{10} 并不一定高于高温下的 Q_{10} , Q_{10} 的值不仅受温度的影响。降雪会通过影响土壤温度、土壤水分等因素来影响 Q_{10} 。

参考文献 (References):

- [1] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 2010, 464(7288): 579-582.
- [2] Riley W J, Randerson J T, Foster P N, Lueker T J. Influence of terrestrial ecosystems and topography on coastal CO_2 measurements: a case study at Trinidad Head, California. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 110(G1): G01005.
- [3] 陈宝玉, 王洪君, 杨建, 刘世荣, 葛剑平. 土壤呼吸组分区及其测定方法. *东北林业大学学报*, 2009, 37(1): 96-99.
- [4] 王兵, 姜艳, 郭浩, 赵广东, 白秀兰. 土壤呼吸及其三个生物学过程研究. *土壤通报*, 2011, 42(2): 483-490.
- [5] Davidson E A, Verchot L V, Catt nio J H, Ackerman I L, Carvalho J E M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 53-69.
- [6] Burton A J, Pregitzer K S. Field measurements of root respiration indicate little to no seasonal temperature acclimation for sugar maple and red pine.

- Tree Physiology, 2003, 23(4): 273-280.
- [7] 王新源, 李玉霖, 赵学勇, 毛伟, 崔夺, 曲浩, 连杰, 罗永清. 干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展. 生态学报, 2012, 32(15): 4890-4901.
- [8] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 阎志丹. 水分对土壤呼吸的影响及机理. 生态学报, 2003, 23(5): 972-978.
- [9] 孙倩, 方海兰, 刘鸣达, 梁晶, 郝瑞军. 上海典型植物群落冬季土壤呼吸特征及其影响因子. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2009, 27(3): 231-234, 241-241.
- [10] Jones H G. The ecology of snow-covered systems; a brief overview of nutrient cycling and life in the cold. Hydrological Processes, 1999, 13(14/15): 2135-2147.
- [11] Sommerfeld R A, Mosier A R, Musselman R C. CO₂, CH₄ and N₂O flux through a Wyoming snowpack and implications for global budgets. Nature, 1993, 361(6408): 140-142.
- [12] Hubbard R M, Ryan M G, Elder K, Rhoades C C. Seasonal patterns in soil surface CO flux under snow cover in 50 and 300 year old subalpine forests. Biogeochemistry, 2005, 73(1): 93-107.
- [13] 刘胜. 雪灾对毛竹林土壤呼吸和土壤微生物量的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.
- [14] 王妮, 汪涛, 彭书时, 方精云. 冬季土壤呼吸: 不可忽视的地气 CO₂ 交换过程. 植物生态学报, 2007, 31(3): 394-402.
- [15] Lemke P, Ren J W, Alley R B, Allison I, Carrasco J, Flato G, Fujii Y, Kaser G, Mote P, Thomas R H, Zhang T J. Observations: changes in snow, ice and frozen ground//Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L, eds. Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 337-383.
- [16] 杨兴国, 秦大河, 秦翔. 冰川/积雪-大气相互作用研究进展. 冰川冻土, 2012, 34(2): 392-402.
- [17] 李栋梁, 王春学. 积雪分布及其对中国气候影响的研究进展. 大气科学学报, 2011, 34(5): 627-636.
- [18] Tucker C L, Tamang S, Pendall E, Ogle K. Shallow snowpack inhibits soil respiration in sagebrush steppe through multiple biotic and abiotic mechanisms. Ecosphere, 2016, 7(5): e01297.
- [19] 吴琴, 胡启武, 曹广民, 李东. 高寒矮嵩草草甸冬季 CO₂ 释放特征. 生态学报, 2011, 31(18): 5107-5112.
- [20] 陶娜, 张馨月, 曾辉, 王妮. 积雪和冻结土壤系统中的微生物碳排放和碳氮循环的季节性特征. 微生物学通报, 2013, 40(1): 146-157.
- [21] Contosta A R, Burakowski E A, Varner R K, Frey S D. Winter soil respiration in a humid temperate forest: the roles of moisture, temperature, and snowpack. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2016, 121(12): 3072-3088.
- [22] Kim Y, Kodama Y, Fochesatto G J. Environmental factors regulating winter CO₂ flux in snow-covered black forest soil of Interior Alaska. Geochemical Journal, 2017, 51(4): 359-371.
- [23] Brooks P D, McKnight D, Elder K. Carbon limitation of soil respiration under winter snowpacks: potential feedbacks between growing season and winter carbon fluxes. Global Change Biology, 2005, 11(2): 231-238.
- [24] Monson R K, Lipson D L, Burns S P, Turnipseed A A, Delany A C, Williams M W, Schmidt S K. Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition. Nature, 2006, 439(7077): 711-714.
- [25] 谢继萍, 钟文昭, 黄刚, 李彦, 吴林峰. 准噶尔盆地南缘梭梭群落春季融雪期的土壤呼吸动态. 干旱区研究, 2013, 30(3): 430-437.
- [26] 高峰, 孙成权, 曲建升. 全球气候变化研究的新认识——IPCC 第三次气候评价报告第一工作组报告概要. 地球科学进展, 2001, 16(3): 442-445.
- [27] 高云飞, 赵传燕, 彭守璋, 马文瑛, 李文娟, 袁亚鹏. 黑河上游天涝池流域草地蒸散发模拟及其敏感性分析. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1338-1345.
- [28] 解欢欢, 马文瑛, 赵传燕, 高云飞, 王清涛. 祁连山中部亚高山草地土壤呼吸及其组分研究. 冰川冻土, 2016, 38(3): 653-661.
- [29] 王超. 黑河上游天老池流域植被变化对降雨径流过程影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [30] Uchida M, Mo W H, Nakatsubo T, Tsuchiya Y, Horikoshi T, Koizumi H. Microbial activity and litter decomposition under snow cover in a cool-temperate broad-leaved deciduous forest. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 134(1/4): 102-109.
- [31] 刘琪璟, 张国春, 徐倩倩, 王义东, 王辉民. 长白山高山苔原季节性雪斑土壤呼吸对温度响应的模拟研究. 植物生态学报, 2010, 34(5): 447-487.
- [32] Bertrand A, Robitaille G, Nadeau P, Boutin R. Effects of soil freezing and drought stress on abscisic acid content of sugar maple sap and leaves. Tree Physiology, 1994, 14(4): 413-425.
- [33] Decker K L M, Wang D, Waite C, Scherbatskoy T. Snow removal and ambient air temperature effects on forest soil temperatures in northern Vermont. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(4): 1234-1242.
- [34] 胡红宇. 不同雪况与添加凋落物对亚高山地区冬季土壤呼吸的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2011.
- [35] 杨开军, 杨万勤, 谭羽, 贺若阳, 庄丽燕, 李志杰, 谭波, 徐振锋. 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, 2017, 41(9): 964-971.
- [36] 李新玉, 耿绍波, 赵淑琴, 佟志彬, 王晶, 张俊英. 淮北平原农林复合生态系统非生长季 CO₂ 通量变化特征. 水土保持研究, 2011, 18(5): 132-138, 143-143.
- [37] 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.
- [38] 彭家中, 常宗强, 冯起. 温度和土壤水分对祁连山青海云杉林土壤呼吸的影响. 干旱区资源与环境, 2008, 22(3): 165-169.
- [39] 陈骥, 曹军骥, 魏永林, 刘吉宏, 马扶林, 陈迪超, 冯嘉裕, 夏瑶, 岑燕. 青海湖北岸高寒草甸草原非生长季土壤呼吸对温度和湿度的响应. 草业学报, 2014, 23(6): 78-86.
- [40] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, Kaye J P. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 1998, 396(6711): 570-572.
- [41] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, Wallace L L. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413(6856): 622-625.
- [42] Oechel W C, Vourlitis G L, Hastings S J, Zulueta R C, Hinzman L, Kane D. Acclimation of ecosystem CO₂ exchange in the Alaskan Arctic in response to decadal climate warming. *Nature*, 2000, 406(6799): 978-981.
- [43] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of organic-matter decomposition—still a topic of debate. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2510-2518.
- [44] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 王劲松, 刘丽香, 迟永刚, 郑云普. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性. 生态学报, 2011, 31(8): 2301-2311.
- [45] 朱新萍, 贾宏涛, 古再丽努尔·艾买提, 赵成义, 蒋平安. 雪被厚度对冻融过程中土壤 CO₂ 短期排放的影响. 干旱区资源与环境, 2018, 32(10): 130-134.
- [46] 常娟, 王根绪, 高永恒, 王一博. 青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响. 生态学报, 2012, 32(23): 7289-7301.
- [47] Priemé A, Christensen S. Natural perturbations, drying-wetting and freezing-thawing cycles, and the emission of nitrous oxide, carbon dioxide and methane from farmed organic soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(15): 2083-2091.