

祁连山七一冰川梯度因子四季变化特征与土壤呼吸关联性分析

李元鸿, 赵芯, 袁心洁, 蔡仪威, 李桂英, 安太成

引用本文:

李元鸿, 赵芯, 袁心洁, 蔡仪威, 李桂英, 安太成. 祁连山七一冰川梯度因子四季变化特征与土壤呼吸关联性分析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1610-1618.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1325>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

春季农田地表空气中PM₁₀浓度变化与环境因子关系

武亚堂, 吴建国, 王立

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1792-1802 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0339>

北方农牧交错区不同土地利用方式下土壤呼吸动态特征

杨新明, 韩磊, 庄涛

农业环境科学学报. 2018, 37(8): 1733-1740 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1559>

艾比湖湿地典型植物群落入冬期土壤呼吸日变化特征

赵明亮, 李艳红, 李发东

农业环境科学学报. 2015(12): 2432-2438 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.12.025>

气候变化对谷子生育期土壤碳氮磷转化相关酶活性的影响

王雪松, 郑粉莉, 王婧, 焦健宇, 赵苗苗

农业环境科学学报. 2021, 40(7): 1591-1600 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1442>

博斯腾湖人工和天然芦苇湿地土壤呼吸动态变化规律及其影响因素

王金龙, 李艳红, 李发东

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 167-175 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0744>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李元鸿, 赵芯, 袁心洁, 等. 祁连山七一冰川梯度因子四季变化特征与土壤呼吸关联性分析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1610–1618.

LI Y H, ZHAO X, YUAN X J, et al. Correlation analysis of seasonal variation characteristics of Qiyi glacier gradient factors with soil respiration in Qilian Mountains[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(7): 1610–1618.



开放科学 OSID

祁连山七一冰川梯度因子四季变化特征与土壤呼吸关联性分析

李元鸿¹, 赵芯², 袁心洁², 蔡仪威², 李桂英^{2*}, 安太成²

(1. 甘肃祁连山国家级自然保护区管护中心(大熊猫祁连山国家公园甘肃省管理局张掖分局), 甘肃 张掖 734000; 2. 广东工业大学环境健康与污染控制研究院, 环境科学与工程学院, 粤港澳污染物暴露与健康联合实验室, 广东省环境催化与健康风险控制重点实验室, 广州 510006)

摘要: 为了研究四季变化过程中冰川梯度因子对其表面土壤呼吸强度的影响, 利用七一冰川观测站2020年9月至2021年6月的实时观测数据, 整理分析了观测站地面高度分别为5、10、15、20 m和25 m处观测点的光合有效辐射、空气温度、土壤CO₂浓度等因子在3、6、9、12月份的数据, 以土壤CO₂浓度、土壤水汽浓度表征土壤呼吸强度, 获得了冰川表面土壤呼吸强度变化规律及其影响因素。结果表明: 冬季土壤CO₂浓度稳定在441.3 μmol·mol⁻¹, 在四季中处于较高水平, 而土壤水汽浓度稳定在0.479 mmol·mol⁻¹, 在四季中处于较低水平。夏季土壤呼吸强度与各梯度空气温度呈正相关关系, 与各梯度光合有效辐射值在正午时间段呈正相关关系, 在早晚时间段呈负相关关系。春秋两季土壤呼吸强度与各梯度空气温度呈正相关关系, 春季土壤呼吸强度与各梯度光合有效辐射值的关系因时间段不同而不同。此外春秋两季由于存在逆温现象, 以及融雪、太阳辐射等原因, 其平均空气温度最高在观测点10 m处, 最低在25 m处。研究所得的各梯度因子四季变化情况与土壤呼吸强度的相关性, 显示出祁连山冰川与表面土壤呼吸之间具有一定的科学性关联。

关键词: 七一冰川; 土壤呼吸; 光合有效辐射; 空气温度; 水汽浓度

中图分类号: S154 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)07-1610-09 doi:10.11654/jaes.2021-1325

Correlation analysis of seasonal variation characteristics of Qiyi glacier gradient factors with soil respiration in Qilian Mountains

LI Yuanhong¹, ZHAO Xin², YUAN Xinjie², CAI Yiwei², LI Guiying^{2*}, AN Taicheng²

(1. National Nature Reserve Management and Conservation Center of Qilian Mountain in Gansu Province (Giant Panda Qilian Mountain National Park Gansu Bureau Zhangye Branch), Zhangye 734000, China; 2. Guangdong-Hong Kong-Macao Joint Laboratory for Contaminants Exposure and Health, Guangdong Key Laboratory of Environmental Catalysis and Health Risk Control, School of Environmental Science and Engineering, Institute of Environmental Health and Pollution Control, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: To measure the effects of gradients and factors on soil respiration intensity on the surface of glaciers in the four seasons, this study used real-time observation data from the Qiyi Glacier Observation Station from September 2020 to June 2021 to analyze photosynthetically active radiation, air temperature, soil respiration carbon dioxide concentration, and other factors at 5, 10, 15, 20 m, and

收稿日期: 2021-11-16 录用日期: 2022-02-09

作者简介: 李元鸿(1976—), 男, 甘肃永登人, 本科, 高级工程师, 研究方向为林业资源与环境信息化。E-mail: 120782776@qq.com

赵芯与李元鸿同等贡献。

*通信作者: 李桂英 E-mail: ligy1999@gdut.edu.cn

基金项目: 粤桂联合基金一重点项目(2020B1515420002); 广东省科技计划项目(2021A0505030070); 国家自然科学基金项目(41877363)

Project supported: Key Project of Guangdong-Guangxi Joint Fund(2020B1515420002); Science and Technology Project of Guangdong Province, China (2021A0505030070); The National Natural Science Foundation of China(41877363)

25 m above the observation station in March, June, September, and December. The soil respiration intensity was characterized by the soil respiration carbon dioxide concentration and soil respiration water vapor concentration, and the variation law and influencing factors of soil respiration intensity on the surface of glaciers were obtained. The results showed that the soil respiration carbon dioxide concentration in winter was stable at $441.3 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, which was at a high level in the four seasons, and the soil respiration water vapor concentration was stable at $0.479 \text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$, which was at a low level in the four seasons. Soil respiration intensity positively correlated with the atmospheric temperature of each gradient, positively correlated with the photosynthetically active radiation value of each gradient at noon, and negatively correlated in the morning and evening. A positive correlation between soil respiration intensity and atmospheric temperature of each gradient in spring and autumn, and the relationship between soil respiration intensity and photosynthetically active radiation of each gradient also varied with time. In addition, due to the temperature inversion phenomenon, snow melting and solar radiation in spring and autumn, the average air temperature was the highest at 10 m and the lowest at 25 m at the observation point. The correlation analysis between the changes of each gradient factor in four seasons and soil respiration intensity showed that there was a certain scientific relationship between Qilian Mountain glaciers and surface soil respiration.

Keywords: Qiyi glacier; soil respiration; photosynthetically active radiation; atmospheric temperature; vapor concentration

研究冰川是探究现代环境和历史气候变化的有效手段,冰川的地质历史时期和近代变化对全球气候有着重要影响。大气中各种自然来源和人为来源的有机无机化合物通过大气循环、降雨等途径沉降在冰川土壤表面,并随各种地质变化作用进入到土壤内部^[1]。冰川的土壤呼吸是指土壤表面释放 CO_2 的过程^[2],也可以指未扰动土壤中产生 CO_2 的所有代谢作用,包括3个生物学过程,即土壤微生物呼吸、土壤动物呼吸、根系呼吸^[3-4],和一个非生物学过程,即含碳矿物质的化学氧化作用。土壤呼吸作用强度常被作为衡量土壤微生物总的活性指标,其也是评价土壤肥力的指标之一。影响土壤微生物活动的诸多因子,如土壤有机质含量、pH、温度、水分以及有效养分含量等均能影响土壤呼吸作用强度,各因子的变化也可从土壤呼吸作用强度的变化中反映出来。因此,通过对冰川表面土壤呼吸强度变化的研究来判别环境中有机质的来源和演化,将有助于推测过去冰川生态环境的变化及未来变化趋势。

土壤呼吸释放 CO_2 是陆地生态系统碳循环的一个重要环节, CO_2 等温室气体不断释放到大气中导致全球气候变暖,进而改变了大气环流和水文循环,其最直接的体现是土壤水分状况的变化^[5]。目前对冰川土壤水分和土壤呼吸的研究很少,参考邓东周等^[6]的研究可粗略得出土壤呼吸强度随土壤水汽浓度的增大而增大。2019年的一项报道显示,如果人类造成的全球变暖在未来几十年内继续无限加剧,那么世界知名高海拔冰川阿尔卑斯山所覆盖的冰川可能在2100年前消失^[7]。实际上,自20世纪60年代以来,所有极地地区就在以明显高于全球平均水平的速度加速变暖,导致永久冻土区大面积融化^[7],土壤有机碳

被微生物降解加剧了土壤呼吸作用,进一步导致全球性气候变化的进程被加剧。因此,研究冰川土壤呼吸强度变化以探索阻止世界冰川融化的关键策略至关重要。在全球气候变暖的背景下,冰川在不断退缩,其表层土壤环境也在不断遭到破坏。根据冰川土壤呼吸强度变化的结果,可以评估各因子对土壤呼吸强度的影响。土壤呼吸受到土壤有机质含量、pH、温度、水分以及有效养分含量等因子的影响,但是这些因子与土壤呼吸强度的具体相关性目前仍未被阐明,其潜在的调控机制也未得到解释。因此,研究梯度因子四季变化特征与土壤呼吸关联性对阐释土壤呼吸强度的调控机制至关重要。为了进一步研究祁连山冰川土壤的现状和未来变化,为其保护提供一定的科学依据,本研究探究了不同时间段下祁连山冰川土壤中冰川梯度与冰川表面土壤呼吸强度的关联性,在观测时间段内分别选取4个月份代表春、夏、秋、冬4个季节,从各梯度因子在4个月份中的光合有效辐射值和空气温度两个变量入手,深入研究了这两个变量对土壤 CO_2 浓度和土壤水汽浓度的影响,进而间接表征土壤呼吸强度,以期评估不同季节下各梯度因子对冰川生态系统土壤呼吸强度的影响。通过对梯度因子四季变化特征与土壤呼吸关联性的研究,进一步阐明梯度因子对土壤呼吸的调控机理,为通过控制土壤呼吸来阻止冰川融化提供新的见解。

1 研究方法

1.1 研究区概况

七一冰川位于甘肃省张掖市肃南裕固族自治县祁丰藏族乡的祁连山腹地,面积为 2.698km^2 ,长 3.4km ,末端海拔 4304m ,平均海拔 4807m ,最高峰海拔

5 159 m, 海拔跨度 855 m。该冰川规模小, 其形态属于冰川-山谷型冰川, 根据冰川的物理性质划分属于大陆型冰川^[8]。自 2017 年以来, 祁连山国家公园张掖分局克服海拔高、施工难度大、无通讯网络等实际困难, 在七一冰川东侧海拔 4 600 m 的山峰上建设了 1 座塔高 25 m 的生态定位观测站。该塔挂载激光雷达扫描仪、智能变频多普勒流速流量剖面仪、5 层梯度多因子气象观测设备、碳廓线观测设备、土壤呼吸测量仪等国内外先进仪器设备 20 多台套, 可以对七一冰川的动态变化规律、冰川融面变化情况、土壤裸露情况、植被分布情况及野生动物活动情况进行全方位观测监测。

1.2 数据与处理方法

数据资料在 2020 年 9 月至 2021 年 6 月考察期间获取。自动生态定位观测塔塔群平台搭载的 AP200 大气廓线系统包括 CO₂/H₂O 浓度、空气温度、风速、土壤体积含水率和土壤温度廓线, 是国际首个具有上述扩展功能的 AP200 系统。AP200 CO₂ & H₂O 廓线系统能够测量垂直剖面上 CO₂ 和 H₂O 的含量, 及它们从地表到冠层的传输和交换规律, 并分析其在森林空间中的时序分布。观测塔还配备了与 CPEC310 和 AP200 兼容且可实时数据通讯的土壤 CO₂ 通量系统以及与氮素相关的痕量气体分析仪等^[9]。观察站点所在的位置为 97°45'45.36"E, 39°15'47.52"N。观测塔可对冰川梯度为 5、10、15、20 m 和 25 m 处的风速、风向、光合有效辐射、空气温度等数据进行记录, 数据自动获取, 采集频率为每 30 min 一次。由于设备数量有限, 未设置采样重复。七一冰川是整个亚洲地区距离城市最近的冰川, 其融化必然对人类活动造成巨大影响, 因此在七一冰川上设置采样点进行的研究极具代表意义。考虑数据的完整性, 本研究分别选取 2020 年的 9、12 月与 2021 年的 3、6 月作为秋、冬、春、夏 4 个季度的代表月份, 探究各月份不同梯度的光合有效辐射值对土壤 CO₂ 浓度的影响、空气温度对土壤水汽浓度的影响, 从而间接分析梯度与土壤呼吸强度的关联性。

2 结果与分析

2.1 土壤 CO₂ 浓度和土壤水汽浓度的相关性

生物在土壤中呼吸可产生 CO₂, 故土壤中 CO₂ 浓度可直接表征土壤呼吸强度。此外, 影响土壤呼吸强度的因素还包括土壤温度、含水量、碳氮含量和 pH 等。其中土壤水汽浓度是一个重要因素, 其对土壤呼吸的影响作用较为复杂, 通常认为过高或过低的土壤含水量均会抑制土壤生物活性^[10]。土壤呼吸对土壤

水汽响应的研究通常侧重于土壤呼吸对降水、灌溉和地下水的响应^[11]。降雨或灌溉可以导致土壤呼吸速率被激发, 土壤 CO₂ 排放量激增, 该现象称为“Birch 效应”^[12]。通过一系列不同土壤含水量的室内控制试验也可以发现增湿后土壤的呼吸速率比干土高^[13]。本研究 4 个季节中土壤水汽浓度和土壤 CO₂ 浓度之间的相关性显著 ($r=-0.215^*$, $P=0.017$, $n=122$), 说明土壤水汽浓度变化可影响土壤 CO₂ 浓度, 从而间接影响土壤呼吸强度。因此本研究重点以土壤 CO₂ 浓度和土壤水汽浓度作为表征土壤呼吸强度的因子, 探究冰川梯度因子四季变化特征与土壤呼吸强度间的关联性。

2.2 光合有效辐射与土壤呼吸强度的关系

光合有效辐射是绿色植物进行光合作用时, 吸收的太阳辐射中使叶绿素分子呈激发状态的那部分光谱能量, 可用于表征植被光合作用能力和生长状态, 是反映全球气候变化的重要因子之一^[14]。从图 1 可看出各梯度的光合有效辐射值整体趋势为 6:00—13:00 呈逐渐上升的趋势, 并在 13:00 左右达到最大值, 秋、冬、春、夏 4 个季度在 5、10、15、20 m 和 25 m 梯度层的平均光合有效辐射最大值分别为 1 712.6、974.12、1 557.4、1 958 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; 14:00—19:00 呈下降趋势, 随后辐射值趋向于 0, 即光合有效辐射值早、晚时间段较低, 正午前后最高且稳定。12 月份的光合有效辐射值明显低于其他参考月份, 而光合有效辐射最高值出现在 6 月份, 因此可以得出光合辐射值夏季偏高、冬季偏低的结论, 这也符合生物体季节性呼吸的一般规律。对 4 个季节中不同梯度的光合有效辐射值进行分析发现, 冰川观测塔 15 m 层的光合有效辐射值最大, 25 m 层的光合有效辐射值最小。进一步选取 2021 年 3 月份某天不同梯度的光合有效辐射值进行分析 (图 1b), 可以直观看出在光合有效辐射值达到最高峰的时间段, 冰川观测塔上 15 m 高度处的光合有效辐射值为 1 657 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 略高于其他高度处的光合有效辐射值, 25 m 层的光合有效辐射值为 1 319 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 是各梯度层光合有效辐射值中的最低值, 其原因可能是 25 m 处的空气温度低且稀薄, 生物成活率低, 符合一般规律。15 m 层的光合有效辐射值略高的可能原因: ①数据误差, 风向、气候等外在因素导致仪器测量的光合有效辐射值无法达到精确水平, 且各层之间的高度差异对于对流层来说可以忽略; ②太阳辐射可直接提升 15 m 层处的光合有效辐射值, 该假设待后续相关海拔经纬度数据辅助研究。

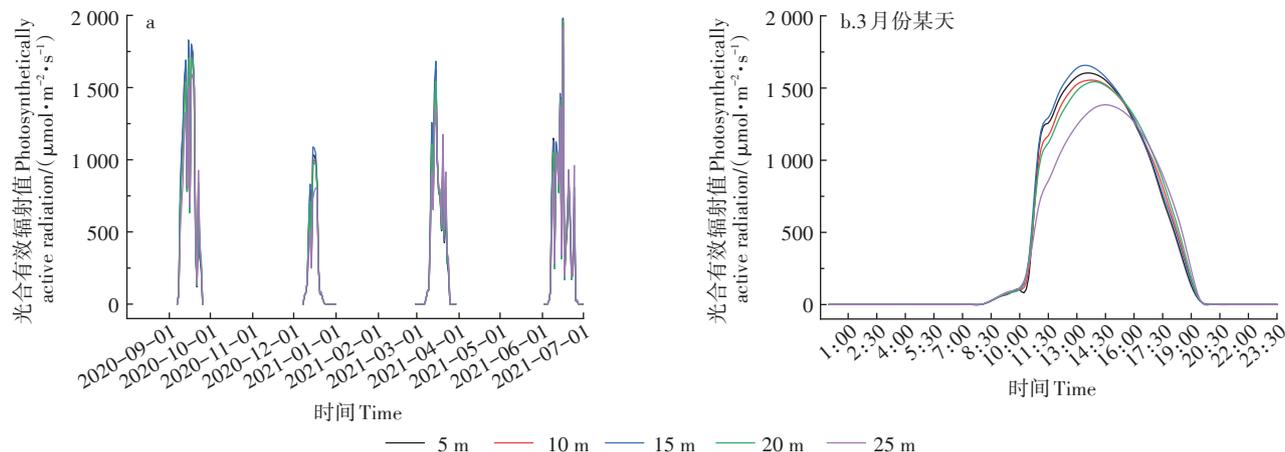


图1 光合有效辐射值与时间的关系

Figure 1 The relation diagram of photosynthetic ally active radiation with the time

从各季节土壤CO₂浓度随时间的变化(图2)可以看出,4个代表月份土壤CO₂浓度为12月(平均值为441.3 μmol·mol⁻¹)≈9月(平均值为441.6 μmol·mol⁻¹)>3月(平均值为418.1 μmol·mol⁻¹)>6月(平均值为413.2 μmol·mol⁻¹),表明土壤CO₂浓度在秋、冬季较高。同时发现在一天内,秋、冬两个季节土壤CO₂浓度的变化幅度较春、夏两个季节小,说明秋、冬季节可能存在外界因素的影响,导致其CO₂浓度值稳定在较高水平。

结合各月份不同梯度光合有效辐射值与土壤CO₂浓度变化结果可知,12月份的光合有效辐射值波动最小,各时间点土壤CO₂浓度值平稳且保持在一个较高水平,即冬季各梯度的光合有效辐射值与土壤呼吸强度之间的关联性较小。秋季在正午土壤CO₂浓度出现最高峰时对应的各梯度光合有效辐射值也会出现小高峰,在21:00左右土壤CO₂浓度值达到最低峰时各梯度光合有效辐射值也回落至最低值,随后趋向平稳,即秋季各梯度光合有效辐射值与土壤呼吸强度之间具有一定的正相关关系(21:00后, $P < 0.01$)。夏季的土壤CO₂浓度在4个季节中相对较低;在早晚时间段,土壤CO₂浓度与各梯度光合有效辐射值呈负相关关系(0:00—7:00, $P < 0.01$; 19:00—20:30, $P < 0.05$),即在0:00—7:00,土壤CO₂浓度从451.0 μmol·mol⁻¹下降至398.7 μmol·mol⁻¹,对应的光合有效辐射值(以15 m梯度层为例)从0上升至88.90 μmol·m⁻²·s⁻¹,在19:00—20:30,土壤CO₂浓度从392.8 μmol·mol⁻¹上升至434.4 μmol·mol⁻¹,对应的光合有效辐射值(以15 m梯度层为例)从671.80 μmol·m⁻²·s⁻¹下降至27.12 μmol·m⁻²·s⁻¹,随后趋于平稳;在正午时间段,

土壤CO₂浓度与各梯度光合有效辐射值呈正相关关系(12:30—13:00, $P < 0.05$),即在12:30—13:00,随着土壤CO₂浓度升高,各梯度光合有效辐射值也升高,且均在12:30达到一个小高峰。春季早上,从0:00—10:00,土壤CO₂浓度稳定在426.7 μmol·mol⁻¹,各梯度光合有效辐射值波动较小且较稳定(13.36 μmol·m⁻²·s⁻¹);10:00—11:30,土壤CO₂浓度值急速下降,光合有效辐射值急速上升,在11:30左右光合有效辐射值达到一个高峰,土壤CO₂浓度达到一个低峰;在11:30—13:30,土壤CO₂浓度随各梯度光合有效辐射值升高而下降,两者呈显著负相关关系($P < 0.05$);在正午时分过后,土壤CO₂浓度与各梯度光合有效辐射值无显著相关性(14:00—23:30, $P > 0.05$);18:00之后,光合有效辐射值呈下降趋势,但土壤CO₂浓度仍在415.9 μmol·mol⁻¹上下小范围波动。整体而言:秋季各梯度光合有效辐射值与土壤呼吸强度之间呈正相

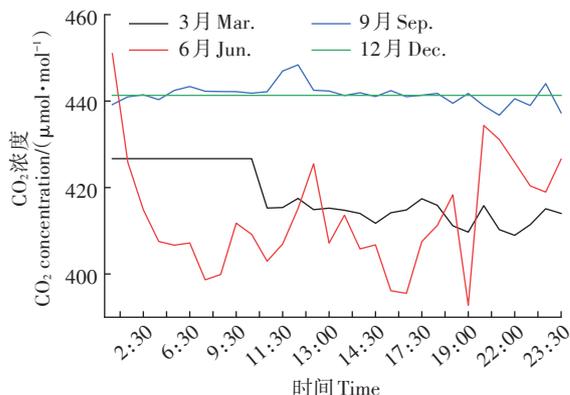
图2 各季节土壤CO₂浓度随时间的变化

Figure 2 Variation of soil respiration carbon dioxide concentration with the time in each season

关系;冬季各梯度光合有效辐射值与土壤呼吸强度之间关联性较小;春季早上光合有效辐射值与土壤呼吸强度呈负相关,正午时间段过后两者无显著相关性;夏季在早晚时间段的光合有效辐射值与土壤呼吸强度呈负相关关系,在正午时间段两者呈正相关关系。为了验证结论的准确性,进一步选取6月份光合有效辐射值与土壤CO₂浓度进行分析(图3),由于在同一月份内各天的同一时间点的光合有效辐射值和土壤CO₂浓度趋于稳定,故选取一个月各天不同时间点作为样本更具代表性。从图中可以清晰观察到上述土壤CO₂浓度与各梯度光合有效辐射值之间的关联性。

2.3 空气温度与土壤呼吸强度的关系

从图4可以看出,3、6、9月份土壤水汽浓度均随空气温度波动而变化,而12月份土壤水汽浓度稳定在0.479 mmol·mol⁻¹。同时发现夏季冰川不同海拔间的气温梯度绝对值小于冬季,这是因为夏季降水量略大于冬季,降水梯度小,不同海拔间的温差绝对值较冬季小,而冬季风速相对较大,降水量少,降水梯度较夏季大,气温梯度比夏季大,这与晋子振等^[15]的研究结果一致。进一步分析发现4个季节中冰川最低温出现在12月份的25 m层(-23.43 ℃),最高温出现在9月份的5 m层(7.73 ℃)。祁连山冰川冬季温度低符合一般规律,但最高温出现在秋季可能受到外界因素的影响。

结合各月份不同梯度空气温度与土壤水汽浓度变化可知:12月份空气温度最高值出现在12月25日15:00,温度为-11.16 ℃,在此时间点10 m层的温度最高,25 m层的温度最低;空气温度最低值出现在12

月29日2:30,温度为-24.59 ℃,在此时间点10 m层的温度最高,5 m层的温度最低。同时发现整个月份内土壤水汽浓度与土壤呼吸强度均无变化,若排除观测站数据录入不精准原因,则可认为冬季各梯度空气温度与土壤呼吸强度之间无相关性。

9月份空气温度最高值出现在9月7日16:30,温度为9.63 ℃,此时5 m层温度最高,20 m层温度最低;空气温度最低值出现在9月22日8:00,温度为-6.68 ℃,此时10 m层温度最高,25 m层温度最低。土壤水汽浓度与各梯度空气温度呈正相关关系($P < 0.05$),即水汽浓度随温度升高而增大,随温度下降而减小。土壤水汽浓度在9月7日16:00达到最高值,在9月26日10:00达到最低值,此时空气温度也会相应的达到小高峰与小低峰。

6月份空气温度最高值出现在6月26日19:30,温度为9.24 ℃,此时5 m层温度最高,25 m层温度最低;空气温度最低值出现在6月3日6:30,温度为-3.45 ℃,此时10 m层温度最高,25 m层温度最低。2021年6月份各梯度空气温度与土壤水汽浓度变化曲线见图5,可明显看出土壤水汽浓度与各梯度空气温度的变化趋势一致,在水汽浓度达到最高峰时各梯度空气温度也相应达到一个高峰值,水汽浓度达到最低峰时各梯度空气温度也相应达到一个低峰值。

3月份空气温度最高值出现在3月15日15:30,温度为3.90 ℃,此时5 m层温度最高,25 m层温度最低;空气温度最低值出现在3月1日10:00,温度为-18.06 ℃,此时10 m层温度最高,5 m层温度最低。在3月10日前土壤水汽浓度均稳定在0处附近,此后,水汽浓度与各梯度空气温度波动趋势一致。

综上可知,冬季各梯度空气温度与土壤呼吸强度之间无相关性,秋、夏季二者呈正相关关系,春季二者前期无相关性,后期趋势保持一致。

3 讨论

受气温、雪深变化、融雪情况、微生物活性和土壤裸露面积等的影响,温度、水分和光照对冰川土壤呼吸的调节作用尤其重要^[16]。CONTOSTA等^[16]在对森林生态土壤呼吸的研究中阐明了表层土壤温度对冬季CO₂通量产生正影响,土壤湿度对冬季CO₂通量产生负影响,土壤湿度和温度的变化由气温和雪深的变化驱动;郭朝霞等^[2]在对草原生态系统土壤呼吸的研究中发现积雪会降低生态系统呼吸速率和土壤呼吸速率,土壤呼吸速率与积雪、温度、空气相对湿度密切

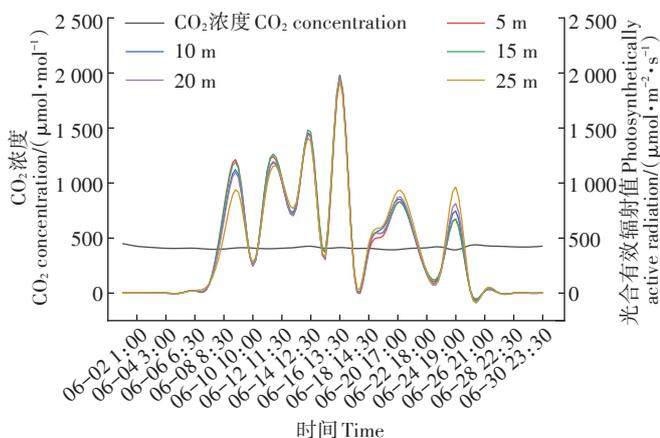


图3 2021年6月份各梯度光合有效辐射与土壤CO₂浓度关系
Figure 3 Relationship between photosynthetically active radiation of each gradient and soil respiration carbon dioxide concentration in June, 2021

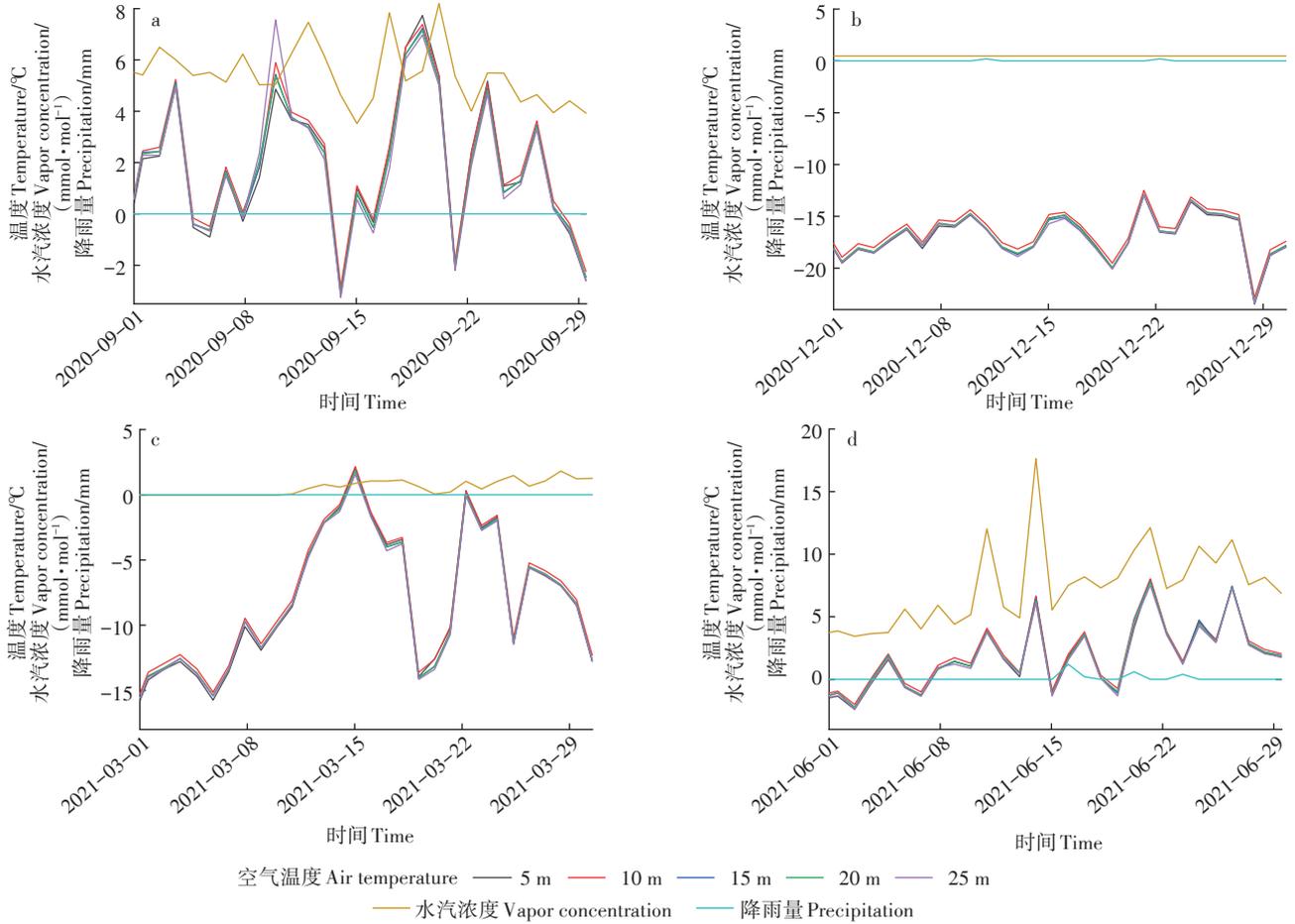


图4 土壤水汽浓度、降雨量与各梯度空气温度的关系

Figure 4 Relationship between soil respiration water vapor concentration, precipitation and air temperature of each gradient

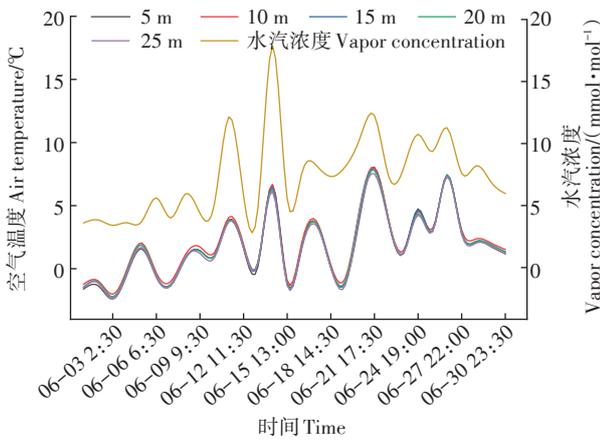


图5 2021年6月份各梯度空气温度与土壤水汽浓度变化曲线

Figure 5 Curves of air temperature and soil respiration water vapor concentration in each gradient in June, 2021

相关。在相近研究中发现积雪对土壤呼吸有着重要影响,因此本研究不可忽略积雪这一外在因素。

通过本研究的数据发现,土壤 CO₂ 浓度为冬季

(平均值为 441.3 μmol·mol⁻¹)≈秋季(平均值为 441.6 μmol·mol⁻¹)>春季(平均值为 418.1 μmol·mol⁻¹)>夏季(平均值为 413.2 μmol·mol⁻¹),土壤水汽浓度为夏季(平均值为 9.5 mmol·mol⁻¹)>春季(平均值为 2.8 mmol·mol⁻¹)>秋季(平均值为 2.3 mmol·mol⁻¹)>冬季(平均值为 0.2 mmol·mol⁻¹),即12月份的土壤 CO₂ 浓度比较稳定且在四季中处于较高水平,土壤水汽浓度也较为稳定但在四季中处于较低水平。为了核实该结果,本研究通过比对冬季12、1、2月份的数据,发现与土壤呼吸相关的参数具有相似的趋势且较为稳定。

通过查阅资料,可以得出两种解释。第一种是考虑气候、冰雪覆盖、融雪等外界因子对冰川表面土壤呼吸强度的影响^[17]。冰雪期的低温可能会抑制大部分微生物活性^[18],使其处于休眠状态,但有些耐低温生物可以存活下来,因此冬季的土壤呼吸强度并不为零^[19-20]。在生物过程驱动下,冰雪融化期的微生物生物量高于冻结期,因此融化期的土壤呼吸速率高于冻结期,从而导致融化期间 CO₂ 通量激增^[2,21]。但是结

合观测站所得的温度数据(冬季平均温度为 $-12.62\text{ }^{\circ}\text{C}$, 秋季为 $-1.16\text{ }^{\circ}\text{C}$, 春季为 $-1.12\text{ }^{\circ}\text{C}$, 夏季为 $8.18\text{ }^{\circ}\text{C}$)可知, 冰雪融化期在夏季, 冬季不存在冰雪融化现象, 因此排除第一种解释。

第二种解释是地下土壤水分有效度和地表温度也是冬季土壤 CO_2 动态变化的主要驱动力^[22]。谢继萍等^[23]的研究得出融雪期土壤含水量与最大土壤呼吸速率具有显著正相关关系的结论。HIRANO^[24]和SCHINDLBACHER等^[25]均认为地下土壤水分有效度与寒温带森林冬季土壤呼吸呈正相关, 且均认为融雪将不稳定碳源带入土壤, 缓解了水分和土壤底物的限制, 从而提高了土壤呼吸速率。来自高寒和亚高山地区的研究也表明, 在主要融雪季节之前, 冬季土壤呼吸作用会随着土壤水汽浓度的增加而增加^[26]。然而DAVIDSON等^[27]研究发现, 如果充满水的孔隙降低了 O_2 的可用性并减缓了 CO_2 的扩散, 则水分也会减少呼吸作用, 即过多的水分会在一定程度上抑制土壤呼吸作用。本研究数据表明, 夏季土壤呼吸相关参数之间的关系与冬季的相反, 即夏季的土壤 CO_2 浓度平均值在四季中处于最低水平, 而土壤水汽浓度平均值在四季中处于最高水平。土壤含水量过低无法满足植物光合作用所需的水分, 导致植物的光合作用减弱, 另外土壤含水量过高会抑制植物的呼吸作用, 从而影响蒸腾作用和光合作用的某些途径^[16, 28-29]。这也表明了在本研究区域内, 夏季处于冰雪融化期, 土壤中较高的水分含量会刺激土壤表层附近的呼吸, 抑制土壤剖面深处的呼吸, 因此夏季的土壤 CO_2 浓度在四季中最低; 而秋、冬两季土壤水分含量适合微生物生长, 在一定程度上促进了土壤呼吸, 因此秋、冬两季土壤 CO_2 浓度在四季中处于最高水平。

由本研究数据可知, 在6月份, 早晚时间段土壤 CO_2 浓度与各梯度光合有效辐射值呈负相关关系, 正午时间段土壤 CO_2 浓度与各梯度光合有效辐射值呈正相关关系。四季中各梯度光合有效辐射最大值在6月份, 同时6月份正午时间段的温度普遍高于早晚时间段, 因此太阳辐射量越大, 土壤呼吸速率越大, 加之植物光合作用会固碳, 所以土壤 CO_2 浓度也随之增大^[30]。9月份的光合有效辐射和土壤 CO_2 浓度变化趋势与6月份一致。当土壤中植物的呼吸作用强于光合作用时, 土壤 CO_2 浓度增加; 当植物进行的光合作用强度大于呼吸作用强度时, 土壤 CO_2 浓度降低^[31]。6月份早晚时间段光合有效辐射值下降并趋近于零, 此时植物没有进行光合作用或者进行微弱的光合作

用, 土壤 CO_2 消耗量下降, 植物的呼吸作用强于光合作用, 因此出现土壤 CO_2 浓度与各梯度光合有效辐射值呈负相关的现象, 这与3月份早晚时间段的光合有效辐射和土壤 CO_2 浓度变化趋势一致。

在空气温度方面, 3月份的平均空气温度为 $-8.43\text{ }^{\circ}\text{C}$, 6月份的平均空气温度为 $1.81\text{ }^{\circ}\text{C}$, 9月份的平均空气温度为 $1.21\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此不可忽略积雪融化对土壤呼吸的影响。随着空气温度升高, 表层土壤的融雪现象使得土壤水汽浓度增加, 因此3、6、9月份各梯度空气温度与土壤水汽浓度均呈正相关关系。由于夏季降水量大, 降水梯度小, 因此夏季气温梯度小于冬季^[15]。由于对流层的热量主要直接来自地面辐射, 所以其空气温度会随着海拔升高而降低^[32]。但根据本研究的数据: 3月份5 m层平均空气温度为 $-8.52\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 m层平均空气温度为 $-8.14\text{ }^{\circ}\text{C}$, 9月份5 m层平均空气温度为 $1.16\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 m层平均空气温度为 $1.41\text{ }^{\circ}\text{C}$, 即春、秋季节平均气温最高在海拔为10 m处, 平均气温最低在海拔为25 m处。因此结合本文研究区所在的位置(祁连山中段北坡), 可初步判断5 m层平均空气温度低于10 m层可能是发生了逆温现象^[33], 同时也可能是受到了太阳辐射、积雪厚度、融雪、冰川碎片等因素的影响^[34]。

4 结论

(1) 春季各梯度光合有效辐射值和空气温度在一定程度上分别通过影响冰川表面土壤 CO_2 浓度和土壤水汽浓度来影响土壤呼吸强度。由于冰川表层有融雪现象, 各梯度空气温度与土壤水汽浓度趋势大致相似, 当空气温度升高时土壤水汽浓度也会增大, 即春季各梯度空气温度可影响冰川表面土壤水汽浓度值, 从而导致土壤呼吸强度的变化。

(2) 夏季降水量大, 降水梯度小, 不同海拔间的温差绝对值较冬季小, 因此夏季气温梯度小于冬季。加之冰川表层有融雪现象, 土壤水汽浓度会随着空气温度升高而增加, 即夏季各梯度的空气温度与冰川表面土壤水汽浓度呈正相关关系, 各梯度的空气温度变化可通过影响土壤水汽浓度从而影响土壤呼吸强度。

(3) 秋季的平均空气温度较高, 因此随着各梯度光合有效辐射值的增加, 土壤 CO_2 浓度值升高, 即各梯度光合有效辐射值与土壤呼吸强度呈正相关; 冰川表层有融雪现象, 因此空气温度与土壤水汽浓度值呈正相关。

(4) 在冬季, 各梯度因子的光合有效辐射值与空

气温度的变化对表层土壤呼吸强度影响较小,表层土壤呼吸强度主要受积雪、融雪、生物活性等其他因子的影响。冰川表面土壤的积雪,土壤层耐低温生物的存在使得土壤呼吸强度不为零。冬季存在冰雪融化现象,导致冬季的土壤呼吸强度略高于春、秋季。较高的土壤水分总体上会抑制土壤呼吸,因此冬季的土壤CO₂浓度较高且较为稳定,相应的土壤水汽浓度较低且为定值。

参考文献:

- [1] 李全莲, 王宁练, 武小波, 等. 祁连山七一冰川区表层沉积物中生物标志化合物的组成特征及来源研究[J]. 地球化学, 2008, 37(6): 533-541. LI Q L, WANG N L, WU X B, et al. Composition and sources of biomarkers from surface sediments in Qiyi glacier, Qilian Mountains[J]. *Geochimica*, 2008, 37(6): 533-541.
- [2] 郭朝霞, 马文瑛, 赵传燕, 等. 积雪对祁连山亚高山草甸土壤呼吸速率的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(9): 3297-3308. GUO Z X, MA W Y, ZHAO C Y, et al. The effects of snow on soil respiration rate in sub-alpine meadows in the Qilian Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(9): 3297-3308.
- [3] 姚雪雯, 陈书涛, 王君, 等. 不同作物农田的土壤呼吸与高光谱的关系[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1140-1149. YAO X W, CHEN S T, WANG J, et al. Relationships between soil respiration and hyperspectrum in different croplands[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5): 1140-1149.
- [4] 张旭, 陈书涛, 陈桂发, 等. 模拟酸雨及秸秆添加对农田土壤微生物呼吸及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 823-832. ZHANG X, CHEN S T, CHEN G F, et al. Effects of simulated acid rain and straw amendment on soil microbial respiration and the enzyme activities of farmland soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(4): 823-832.
- [5] 罗辑, 李伟, 廖晓勇, 等. 近百年海螺沟冰川退缩区域土壤CO₂排放规律[J]. 山地学报, 2004, 22(4): 421-427. LUO J, LI W, LIAO X Y, et al. CO₂ emissions from soils of the deglaciated region on Hailuoguo glacier in the past 100 years[J]. *Journal of Mountain Science*, 2004, 22(4): 421-427.
- [6] 邓东周, 范志平, 王红, 等. 土壤水分对土壤呼吸的影响[J]. 林业科学研究, 2009, 22(5): 722-727. DENG D Z, FAN Z P, WANG H, et al. Influences of soil moisture on soil respiration[J]. *Forest Research*, 2009, 22(5): 722-727.
- [7] ZEKOLLARI H, HUSS M, FARINOTTI D. Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble[J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(4): 1125-1146.
- [8] 宋高举, 王宁练, 蒋熹, 等. 气候变暖背景下祁连山七一冰川融水径流变化研究[J]. 水文, 2010, 30(2): 84-88. SONG G J, WANG N L, JIANG X, et al. Study on glacial melt-water change of Qiyi glacier in climate warming of Qilian Mountain[J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(2): 84-88.
- [9] 高添, 于立忠, 于丰源, 等. 中国科学院清原森林生态系统观测研究站塔群平台的功能和应用[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 695-705. GAO T, YU L Z, YU F Y, et al. Functions and applications of multi-tower platform of Qingyuan Forest Ecosystem Research Station of Chinese Academy of Sciences[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(3): 695-705.
- [10] 王融融, 余海龙, 李诗瑶, 等. 干湿交替对土壤呼吸和土壤有机碳矿化的影响述评[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 78-85. WANG R R, YU H L, LI S Y, et al. Review on the effects of soil alternate drying-rewetting cycle on soil respiration and soil organic carbon mineralization[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(1): 78-85.
- [11] 吕国红, 温日红, 谢艳兵, 等. 不同土壤水分控制对东北地区玉米农田土壤呼吸的影响[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(5): 76-81. LÜ G H, WEN R H, XIE Y B, et al. Effects of water controls at different levels on soil respiration characteristics of maize farmland in northeast China[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2017, 33(5): 76-81.
- [12] BIRCH H F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability[J]. *Plant and Soil*, 1958, 10(1): 9-31.
- [13] 董彬. 中亚热带森林土壤呼吸对水分的响应[D]. 福州: 福建农林大学, 2004. DONG B. Responses of forest soil respiration to water content in mid-subtropical China[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2004.
- [14] 贺巧宁, 朱朔晨, 李鑫川, 等. 2001—2018年淮河流域植被光合有效辐射吸收比(FAPAR)时空变化格局分析[J]. 淮阴师范学院学报(哲学社会科学版), 2021, 43(4): 360-365. HE Q N, ZHU S C, LI X C, et al. Spatiotemporal patterns of photosynthetically active radiation absorption ratio(FAPAR) of vegetation in the Huaihe Basin during 2001—2018[J]. *Journal of Huaiyin Teachers College (Social Sciences Edition)*, 2021, 43(4): 360-365.
- [15] 晋子振, 秦翔, 孙维君, 等. 祁连山西段冰川区与非冰川区气温梯度年内变化特征[J]. 冰川冻土, 2019, 41(2): 282-292. JIN Z Z, QIN X, SUN W J, et al. Monthly variations of temperature gradient in glacierized and non-glacierized areas of the western Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(2): 282-292.
- [16] CONTOSTA A R, BURAKOWSKI E A, VARNER R K, et al. Winter soil respiration in a humid temperate forest: The roles of moisture, temperature, and snowpack[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(12): 3072-3088.
- [17] GAO D C, HAGEDORN F, ZHANG L, 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, 130: 40-49.
- [18] SCHAEITZL R J, LUEHMANN M D, ROTHSTEIN D. Pulses of podzolization: The relative importance of spring snowmelt, summer storms, and fall rains on spodosol development[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(1): 117-131.
- [19] 房世杰, 常玮, 王伟, 等. 新疆喀纳斯湖区、一号冰川耐低温细菌多样性研究初报[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(1): 59-62. FANG S J, CHANG W, WANG W, et al. Preliminary studies on diversity of psychrotolerant bacteria in Kanas Lake spot and No. 1 Glacier in Xinjiang

- [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2009, 46(1): 59-62.
- [20] 胡霞, 吴宁, 尹鹏, 等. 川西高原季节性雪被覆盖下凋落物输入对土壤微生物数量及生物量的影响[J]. *生态科学*, 2013, 32(3): 359-364. HU X, WU N, YIN P, et al. Effects of snowpack and litter input on soil microbial count and biomass in the eastern Tibetan Plateau [J]. *Ecological Science*, 2013, 32(3): 359-364.
- [21] GAO D C, LIU Z P, BAI E. Effects of *in situ* freeze-thaw cycles on winter soil respiration in mid-temperate plantation forests[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 793: 148567.
- [22] 王雪玲, 胡霞. 高山冬季不同海拔对土壤养分特征和微生物生物量的影响[J]. *南方农业*, 2020, 14(3): 153-154. WANG X L, HU X. Effects of different altitudes on soil nutrient characteristics and microbial biomass in alpine winter[J]. *South China Agriculture*, 2020, 14(3): 153-154.
- [23] 谢继萍, 钟文昭, 黄刚, 等. 准噶尔盆地南缘梭梭群落春季融雪期的土壤呼吸动态[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(3): 430-437. XIE J P, ZHONG W Z, HUANG G, et al. Dynamic change of soil respiration in *Haloxylon ammodendron* community in southern edge of Junggar Basin in snowmelt season[J]. *Arid Zone Research*, 2013, 30(3): 430-437.
- [24] HIRANO T. Seasonal and diurnal variations in topsoil and subsoil respiration under snowpack in a temperate deciduous forest[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, 19(2): GB2011.
- [25] SCHINDLBACHER A, JANDL R, SCHINDLBACHER S. Natural variations in snow cover do not affect the annual soil CO₂ efflux from a mid-elevation temperate forest[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(2): 622-632.
- [26] LIPTZIN D, WILLIAMS M W, HELMIG D, et al. Process-level controls on CO₂ fluxes from a seasonally snow-covered subalpine meadow soil, Niwot Ridge, Colorado[J]. *Biogeochemistry*, 2009, 95(1): 151-166.
- [27] DAVIDSON E A, BELK E, BOONE R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 217-227.
- [28] 童翠芸, 王占林, 张得芳, 等. 土壤水分含量和光照强度对青海云杉光合特性的影响[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(6): 22-26. TONG C Y, WANG Z L, ZHANG D F, et al. Effects of soil moisture content and light intensity on the photosynthetic characteristics of *Picea crassifolia*[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2020, 41(6): 22-26.
- [29] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 972-978. CHEN Q S, LI L H, HAN X G, et al. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 972-978.
- [30] 郭雅蓉, 侯扶江, 于应文. 祁连山北坡3个季节性牧场夏季的土壤呼吸[J]. *草业科学*, 2017, 34(8): 1561-1570. GUO Y R, HOU F J, YU Y W. Soil respiration in three types of seasonal pastures in summer on the northern slope of Qilian Mountains[J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(8): 1561-1570.
- [31] 鲁洋, 黄从德, 李海涛, 等. 不同采伐强度柳杉人工林的夏季土壤呼吸日变化[J]. *浙江林业科技*, 2009, 29(2): 19-23. LU Y, HUANG C D, LI H T, et al. Diurnal variation of soil respiration in summer at *Cryptomeria fortunei* forest with different intensity of cut[J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2009, 29(2): 19-23.
- [32] 辛惠娟, 何元庆, 李宗省, 等. 玉龙雪山东坡气温和降水梯度年内变化特征[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2012, 37(增刊): 188-194. XIN H J, HE Y Q, LI Z X, et al. Inter-annual variation of temperature and precipitation gradient at the eastern slope of Yulong Snow Mountain[J]. *Earth Science*, 2012, 37(Suppl): 188-194.
- [33] 张东启, 明镜, 魏文寿. 天山乌鲁木齐河源1号冰川致冷效应的小气候观测[J]. *干旱区地理*, 2011, 34(3): 449-457. ZHANG D Q, MING J, WEI W S. Microclimate measurements related to glacier cooling effect at No.1 glacier, headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountains[J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(3): 449-457.
- [34] STEINER J F, PELLICCIOTTI F. Variability of air temperature over a debris-covered glacier in the Nepalese Himalaya[J]. *Annals of Glaciology*, 2015, 57(71): 295-307.

(责任编辑:李丹)