

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.003

王继璇, 兰小桢, 裴志永, 等. 冻融时期库布齐沙柳人工林土壤呼吸对降雪响应[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 130-141, 151.

WANG Jixuan, LAN Xiaozhen, PEI Zhiyong, et al. Response of soil respiration to snowfall in a Kubuqi salix plantation forest during freeze-thaw period[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 130-141, 151.

## 冻融时期库布齐沙柳人工林土壤呼吸对降雪响应

王继璇, 兰小桢, 裴志永, 张钧尧, 王鑫平, 李颖, 王海超, 孙小添, 孙凯

(内蒙古农业大学能源与交通工程学院, 呼和浩特 010018)

**摘要:** [目的] 探究干旱半干旱地区春季冻融时期沙漠生态系统的土壤呼吸变化规律及其与环境因子的关系, 为干旱半干旱地区沙地生态系统的碳收支提供数据支撑。[方法] 在内蒙古鄂尔多斯市达拉特旗沙柳林木种质资源库, 以沙柳为研究对象, 采用 Li-6800 土壤碳水通量测量室测定在无雪处理下, 未整地未平茬 (ww)、未整地平茬 (wp)、整地未平茬 (zw)、整地平茬 (zp) 的土壤呼吸速率, 并同步测定大气温度和土壤温湿度。[结果] 冻融交替时期土壤呼吸的日变化规律呈单峰变化趋势, 峰值出现在 10:00—12:00; 降雪条件加快春季冻融时期的土壤呼吸速率, 增强土壤呼吸温度敏感性 ( $Q_{10}$ ), 但不会改变土壤呼吸的日变化规律; 沙柳平茬后, 土壤呼吸速率减慢,  $Q_{10}$  反而增大, 整地措施整体上降低土壤呼吸日通量, 也降低  $Q_{10}$  值; 各措施处理下土壤呼吸与土壤温度均显著相关, 其单因子模型能够解释土壤呼吸变异的 51%~68% ( $p < 0.001$ ), 但与水分的相关性不显著; 土壤温度和水分的双因子复合模型较单因子能更好地解释土壤呼吸变异, 最高可解释土壤呼吸变异的 81%。结构方程模型 (SEM) 模拟结果表明, 各因子能共同解释土壤呼吸速率变异的 70%, 降雪、平茬直接影响土壤呼吸, 整地通过影响土壤温度和水分间接影响土壤呼吸。[结论] 冬季降雪为早春植被生长提供了水源, 调控干旱半干旱地区的碳收支过程, 平茬、整地对于干旱半干旱地区冻融时期的碳释放起到阻碍作用, 也间接减缓土壤的碳流失, 有助于调节生态系统碳平衡。

**关键词:** 沙柳; 人工林; 冻融; 土壤呼吸; 温度敏感性; 结构方程模型

中图分类号: S714.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)06-0130-12

## Response of Soil Respiration to Snowfall in a Kubuqi Salix Plantation Forest of During Freeze-thaw Period

WANG Jixuan, LAN Xiaozhen, PEI Zhiyong, ZHANG Junyao, WANG Xinping,

LI Ying, WANG Haichao, SUN Xiaotian, SUN Kai

(College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the changes of soil respiration in desert ecosystems and its relationship with environmental factors during the spring freeze-thaw period in arid and semi-arid regions, and to provide data support for the carbon budget of sandy land ecosystems in arid and semi-arid regions. [Methods] Soil respiration rates of salix plantations that were untouched and unlevelled stubble (ww), untouched and levelled stubble (wp), untouched and unlevelled stubble (zw), and levelled and levelled stubble (zp) were measured in the snow-free treatment by using the Li-6800 soil-carbon-water flux measurement chamber in the Salix Forest Germplasm Resource Bank of the Dalate Banner, Ordos, Inner Mongolia, and the atmospheric temperature, soil temperature and humidity were measured simultaneously. [Results] The results showed that the daily change of soil respiration during the freeze-thaw alternation period showed a unimodal trend, with the peak occurring between 10:00 am and 12:00 pm. Snowfall accelerated soil respiration rate and enhanced the temperature sensitivity of soil respiration ( $Q_{10}$ ) during the spring freeze-thaw period, but it did

收稿日期: 2024-05-20

修回日期: 2024-07-05

录用日期: 2024-07-20

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-10-14

资助项目: 国家自然科学基金项目 (52069018); 内蒙古自治区科技重大专项项目 (2021ZD0008); 内蒙古自治区自然科学基金项目 (2024QN03026, 2023QN03029, 2021BS03019)

第一作者: 王继璇 (1998—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事灌木林资源开发与环境研究。E-mail: 15502414112@163.com

通信作者: 裴志永 (1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事灌木林资源开发与环境研究。E-mail: peizhiyong@imau.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

not change the daily change pattern of soil respiration. After stubble levelling of the salix plantation, soil respiration rate slowed down but  $Q_{10}$  increased; land preparation measure reduced the daily flux of soil respiration in general, and it also reduced the  $Q_{10}$  value. Soil respiration was significantly correlated with soil temperature under each treatment, and the single factor model could explain 51%~68% of the variation in soil respiration ( $p < 0.001$ ), but the correlation between soil respiration and soil moisture was not significant. The two-factor composite model of soil temperature and moisture explained soil respiration better than the single factor model, and it explained 81% of the variation in soil respiration. The simulation results of the structural equation modelling (SEM) showed that all factors could jointly explain 70% of the variation in soil respiration rate, snowfall and stubble levelling directly affected soil respiration, and land preparation affected soil respiration indirectly by affecting soil temperature and moisture. [Conclusion] Snowfall in winter can provide water for vegetation growth in early spring, and it regulates the carbon budget in arid and semi-arid regions; stubble levelling and land preparation can impede the release of carbon during the freeze-thaw period in arid and semi-arid areas and indirectly slow down the loss of carbon from the soil, thus contributing to the regulation of the carbon budget of the ecosystem.

**Keywords:** *Salix psammophila*; plantations; freeze-thaw; soil respiration; temperature sensitivity; structural equation modelling

Received: 2024-05-20

Revised: 2024-07-05

Accepted: 2024-07-20

Online(www.cnki.net): 2024-10-14

在自然状态下,流动沙地由于其风蚀严重及固碳能力相对较差,往往在研究陆地生态系统碳收支过程中被忽视,但作为陆地生态系统的重要组成部分,其碳汇功能可以通过人工构建植被而被挖掘<sup>[1]</sup>。我国的人工林种植面积居世界第一,沙柳作为速生植物因其具有很好的防风固沙效果,成为内蒙古地区干旱半干旱地区的主要栽植品种。但是,沙柳随着年限的增加,其各项生理指标逐渐衰退、枝条甚至枯死,进而防风效果减弱,需要人工进行抚育工作,恢复其生长指标<sup>[2-3]</sup>。在中高纬度的干旱半干旱地区,沙漠生态系统的水分相对有限,冬季降雪成为早春植被的重要水源<sup>[4]</sup>,它能够通过调节土壤温度和水分,影响土壤呼吸和植被生长<sup>[5]</sup>。然而,全球气候变化已经对全球水循环产生影响,政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次报告<sup>[6]</sup>指出,全球升温 1.5 °C,可能导致极端气候出现<sup>[6]</sup>,生长季降雨量减少,非生长季降雪量增加<sup>[7]</sup>。相比较降雨对土壤呼吸的影响,国内外研究对于土壤呼吸对降雪响应的认识还远远不够。已有研究<sup>[8]</sup>多集中于生长季土壤呼吸对各项措施的响应,针对非生长季土壤呼吸及其影响因素的研究相对较少。目前针对沙柳土壤呼吸的研究更少。

土壤冻融交替广泛发生于高海拔高纬度地区<sup>[9]</sup>,集中出现在早春和晚秋,土壤随着昼夜温度变化经历周期性冻结和消融。此过程可改变土壤稳定性<sup>[10]</sup>,抑制植物根系呼吸<sup>[11]</sup>,影响底物可利用性和土壤微生物活性<sup>[12-13]</sup>,在许多生态系统中普遍存在<sup>[14]</sup>,包括

高寒草甸、北方针叶林、农田、苔原和泥炭地。但对于内蒙古干旱半干旱地区人工灌木林的研究较少。土壤作为陆地生态系统中最大的碳库<sup>[15]</sup>,用来调节大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度,而森林土壤呼吸在其中起重要作用,其细微的变化都会引起大气中 CO<sub>2</sub> 气体浓度的变化<sup>[16]</sup>。因此,冻融交替土壤周期性的变化,导致土壤团聚体破碎,土壤酶和微生物活性受到影响,而且土壤的物理性质和结构也发生改变<sup>[17]</sup>,势必会对土壤呼吸产生影响。

土地整理<sup>[18]</sup>和植被变化<sup>[19]</sup>改变原有生态系统的碳收支过程。目前,已有学者<sup>[21]</sup>就不同措施调控下的森林土壤呼吸碳排放对冻融交替的响应进行了广泛的研究。在不同地区、不同土壤类型、不同植被类型等,针对地上植被及土壤分别开展试验,包括降雪条件<sup>[20]</sup>、氮添加、凋落物添加或去除、植被去除<sup>[21]</sup>和间伐<sup>[22]</sup>等。有研究<sup>[23-24]</sup>表明,平茬后地上植被减少,一方面有更多阳光直射地面,影响土壤温湿度;另一方面地上植被的减少对于地下碳输入减少,同时,根系储存的碳也会上移供植被生长复壮,对于土壤根系呼吸和微生物、动物呼吸均可造成影响。整地对土壤进行剧烈扰动,以往研究<sup>[25]</sup>多发生在农田生态系统,不同耕作措施下土壤呼吸的变化规律,对于人为干扰下沙地生态系统土壤呼吸的变化规律及影响因素的报道较少<sup>[26]</sup>,且内在机制也有待进一步挖掘。

本研究以内蒙古鄂尔多斯市沙柳人工林作为研究对象,采用野外原位连续测定的方法,测定分析早

春冻融阶段土壤呼吸的变化特征,同步测定大气温度和土壤温湿度。认识冬季降雪对于早春冻融时期土壤的影响,结合整地、平茬进一步分析冻融时期土壤呼吸的动态变化规律,以及对环境因子的响应并进行拟合,为评估干旱区沙地生态系统 CO<sub>2</sub> 气体排放通量提供数据支撑。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 试验区概况

选择内蒙古鄂尔多斯市达拉特旗沙柳林木种质资源库(40°00′44″N—110°30′19″E)作为研究区,该研究区属于温带大陆性季风气候,处于中温带干旱半干旱区。年平均气温 6.1~7.1 °C,昼热夜冷,昼夜温差较大,最高月平均气温 22.8 °C,最低月平均气温 -13.4 °C,观测期(2023 年 12 月至 2024 年 3 月)内极端最低气温达到 -24 °C,最高气温 19 °C。年平均降水量为 240~360 mm,冬季平均降水量为 13~18 mm,仅占全年降水量的 5%~6%。该地区主要土壤类型为草甸风沙土,研究对象为沙柳人工林。

### 1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 2023 年初,选择适宜进行沙柳平茬的季节(通常在每年 3 月)。在研究区域内选取同一种源的沙柳地作为试验区。采用随机区组设计,根据处理方式划分 4 个不同处理组合,分别为未整地未平茬(ww)、未整地平茬(wp)、整地未平茬(zw)、整地平茬(zp),每个处理组合设 6 次重复,2023 年降雪前,对上述所布置样方,进行遮挡处理,分无雪处理和正常降雪(对照),每种处理设 3 次重复,便于后续 2024 年春季冻融时期的监测。

采用铧式犁对沙柳地进行统一整理,沙柳的平茬方式和留茬高度保持一致,都采用圆盘式 80 齿,贴地 0 cm。尽可能避免对于土壤的扰动,将采用 PVC 材料制作,外径 20 cm,高度 10 cm 的土壤呼吸环于 2023 年 3 月平茬后放置于距沙柳根部 50 cm 处,东南西北各放置 1 个,环嵌入土中 7 cm,留地上 3 cm。便于后续将 Li-6800 土壤呼吸室底座置于上方测定土壤呼吸值。

1.2.2 野外原位土壤呼吸速率、CO<sub>2</sub> 通量及其他指标测定 2023 年冬季降雪(12 月)后,从 2024 年 1 月开始,每个月随机选 3 个晴天 9:00—11:00 进行土壤呼吸速率的测定<sup>[27]</sup>,从春季易发生冻融交替的时间段开始(3 月 7 日),在前期、中期、后期及解冻期各选取 1 天,进行 24 h 昼夜连续监测,具体安排为:白天 6:00—18:00 每隔 2 h 进行 1 次测定,21:00 至翌日 3:00 每隔 3 h 进行 1 次测定。以此研究土壤呼吸的日变化特征。从开始监测到冻融期结束,中途每隔 3 天 8:00—18:00

白天进行监测,测到土壤完全解冻(3 月 25 日)以观测整个冻融期土壤呼吸的变化规律。

本研究 CO<sub>2</sub> 释放速率采用土壤碳水通量测量室 Li-6800 测定,在每次测定土壤呼吸值的同时,系统同步测定大气温度(T<sub>a</sub>),并通过连接的热敏电阻型气温传感器同步测定地下 5 cm 处土壤温湿度。

土壤呼吸 CO<sub>2</sub> 气体通量的计算公式为:

$$F = 10V \times P_0 \times \frac{1 - W_0}{1000} \times \frac{B + \frac{C_0 dC}{dt}}{8.314A \times (T_0 + 273.15)} \quad (1)$$

式中:F 为单位时间单位面积静态箱 CO<sub>2</sub> 气体摩尔质量的变化[μmol/(m<sup>2</sup>·s)];V 为呼吸室总体积(cm<sup>3</sup>);P<sub>0</sub> 为初始气压值(kPa);W<sub>0</sub> 为初始水蒸气摩尔分数(mmol/mol);B 为截距;C<sub>0</sub> 为最初的干燥 CO<sub>2</sub> 浓度(μmol/mol); $\frac{dC}{dt}$  为测定过程 CO<sub>2</sub> 浓度变化斜率;8.314 为气体常数;A 为呼吸室覆盖面积(cm<sup>2</sup>);T<sub>0</sub> 为大气温度(°C)。

土壤呼吸的温度敏感性(Q<sub>10</sub>)是指温度每增加 10 °C 所造成的呼吸速率的改变<sup>[28]</sup>,利用土壤温度和土壤呼吸的指数模型,计算公式为:

$$R_s = a e^{bT} \quad (2)$$

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (3)$$

式中:R<sub>s</sub> 为土壤呼吸速率[μmol/(m<sup>2</sup>·s)];a、b 为方程系数。

土壤呼吸 CO<sub>2</sub> 日累计通量计算公式<sup>[29]</sup>为:

$$F_c = \sum_{i=2}^n \left( \frac{F_i + F_{i-1}}{2} \right) \times 3600 \Delta t_{i-1} \quad (4)$$

式中:F<sub>c</sub> 为 CO<sub>2</sub> 气体日累计通量(μmol/m<sup>2</sup>);F<sub>i</sub> 和 F<sub>i-1</sub> 为第 i 时和第 i-1 时测量的气体通量[μmol/(m<sup>2</sup>·s)];Δt<sub>i-1</sub> 为间隔小时;n 为观测次数。

### 1.3 数据处理

本研究采用多因素方差分析比较不同处理及其交互作用对土壤呼吸产生影响的差异性,采用 Pearson 相关性分析土壤呼吸速率(R<sub>s</sub>)与土壤温度(T<sub>s</sub>)、大气温度(T<sub>a</sub>)和土壤水分(M)之间的相关性。利用线性插值法计算在冻融期不同处理下的土壤呼吸日累积通量。土壤呼吸通量与温度和湿度之间的拟合关系使用 Python 软件进行分析。构建结构方程模型 SEM,认识影响土壤呼吸的各因子及其关系。图形的绘制在 Origin 2022 pro 软件中完成,SEM 的构建运用 SPSS 27.0 软件结合 AMOS 28.0 软件完成。

## 2 结果与分析

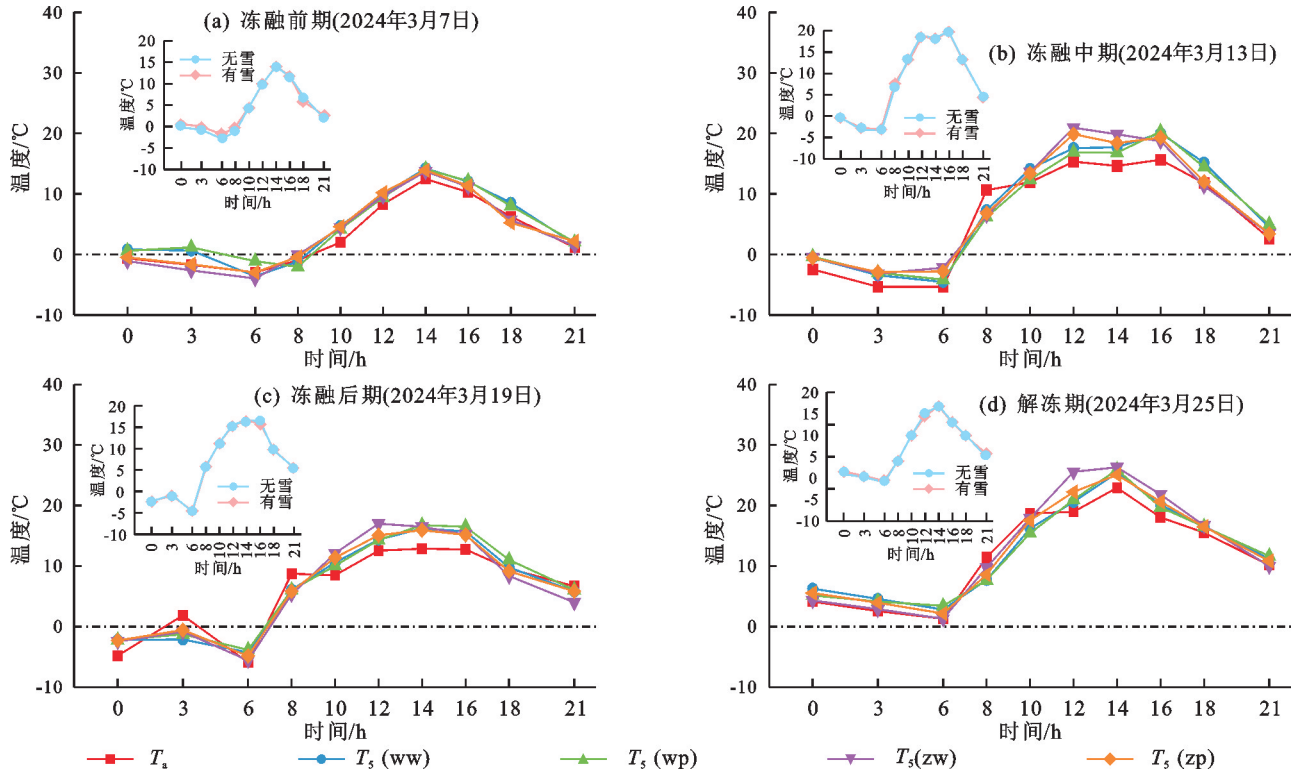
### 2.1 环境因子差异性

由图 1 可知,在整个冻融阶段 4 个全天监测期



内,降雪条件及各项措施并未改变土壤温度的日变化规律,总体上呈单峰趋势,1 天内最高温度出现在 12:00—16:00,最低温度出现在 0:00—6:00。在降雪条件下,土壤温度变化方面并未呈现出显著变化规律,大气温度在整个监测阶段整体上均低于土壤

温度,整地后土壤温度的变化最为显著。冻融前期土壤温度在早上 8:00 仍为零下,冻结时间在 1 天内持续时间较长,冻融中期只有 0:00—6:00 土壤冻结。3 月 25 日土壤温度全天均为零上,表明冻融期结束。



注:  $T_a$  为空气温度( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_5$  为地表以下 5 cm 土壤温度。

图 1 冻融期温度的日变化特征

Fig.1 Characteristics of daily changes in temperature during the freeze-thaw period

相对应的土壤水分,在冻融交替阶段,降雪条件对土壤水分的影响最大,降雪组的土壤含水量较无雪组较高,而在解冻期二者差异逐渐缩小(图 2)。在冻融前期(2024 年 3 月 7 日)由于温度较低土壤冻结时间较长,传感器无法插入土壤,导致土壤水分有段时间(8:00—14:00)数据缺失(图 2a)。本研究发现,整地对土壤水分的影响较大,整地后的土壤水分较整地前较小,说明整地加速土壤水分的流失。平茬后土壤水分也会减小,但整地后平茬组的土壤水分出现相反现象,其比未平茬沙柳地土壤水分高,可能未平茬沙柳的根系需要吸收更多的水分来制造有机物,是由消耗更多的水分造成的。

## 2.2 土壤呼吸对冻融过程的响应

### 2.2.1 积雪对冻融期土壤呼吸通量的日变化影响

早春整个冻融阶段,从前期到结束 4 个观测日,降雪组与无雪组土壤呼吸速率均表现出明显的昼夜变化规律,由图 3 可知,降雪组和无雪组土壤呼吸速率均在 10:00—14:00 出现最大值,即早晨温度升高土壤发生冻融后的 10:00 左右,或是全天温度最高的 12:00—

14:00 时间段,最小值则出现在 21:00—6:00。在冻融前期,由于温度相对较低,尤其是在夜间(21:00—3:00)温度由零上转为零下时,观测到土壤呼吸速率出现负值,说明温度较低时,土壤冻结出现负通量。在整个冻融观测期间,土壤仍表现为碳源。

通过对图 3 和图 4 数据的综合分析可知,在整个冻融阶段,降雪组的土壤呼吸速率普遍高于无雪组,且降雪组的土壤呼吸日通量均高于无雪组(图 4)。但是,冻融前期在 10:00—16:00 无雪组的土壤呼吸速率大于有雪组,而且整个冻融阶段 12:00 的土壤呼吸速率也均表现如此,可能原因是中午大气温度升高,土壤温度随之升高,土壤对温度的敏感性高于水分,进而温度占据主要作用。在冻融前期,由于日平均气温较低,土壤呼吸的日通量最小;而在冻融中期和后期,随着温度的升高,土壤呼吸速率显著增加,日通量水平呈迅猛增长趋势,随着冻融进程的进行,土壤呼吸速率逐渐趋于相近水平。当解冻期温度升高且土壤完全融化时,土壤呼吸释放量进一步增加,进一步促使土壤呼吸速率的增加。

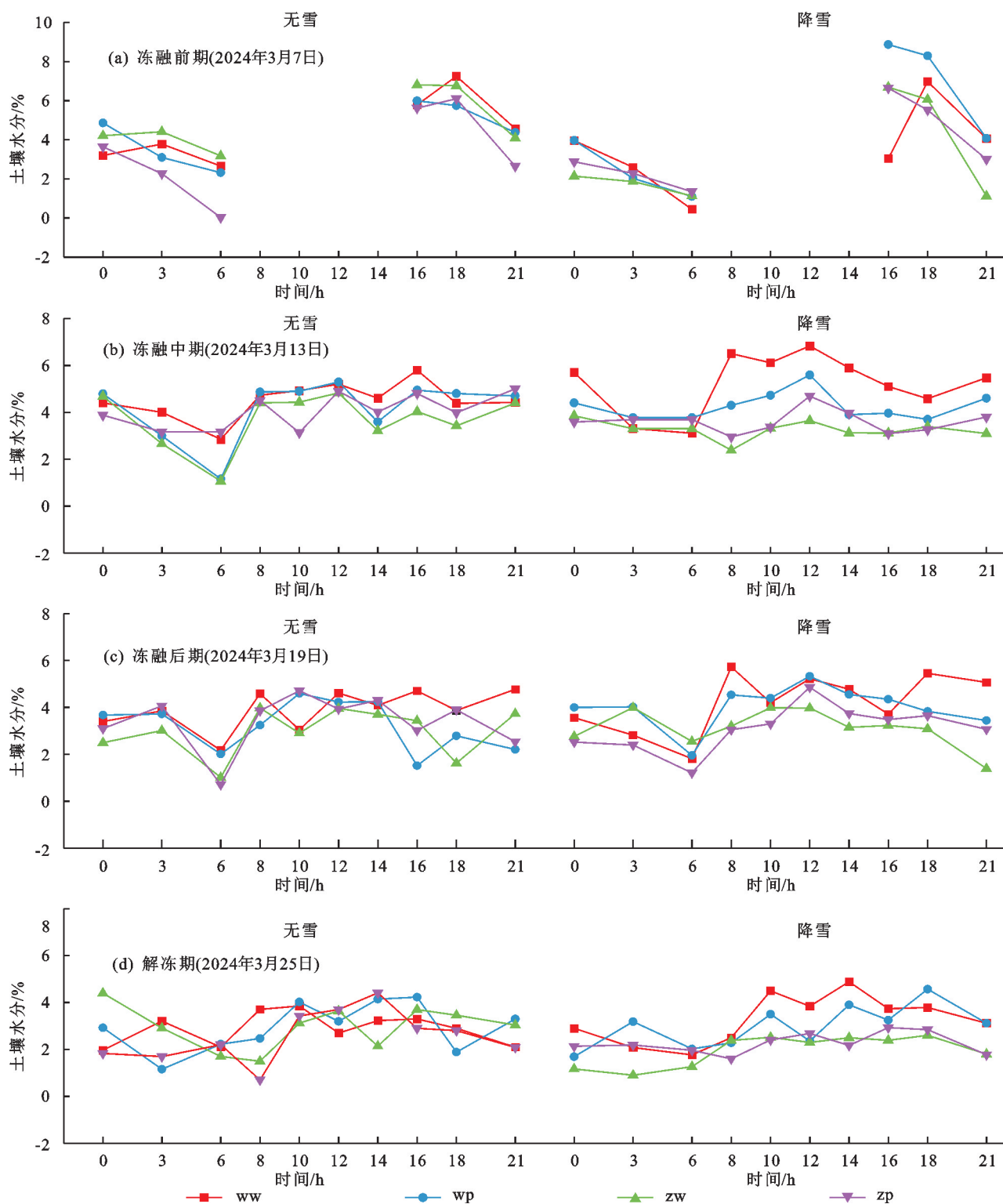


图 2 冻融期土壤水分的日变化特征

Fig.2 Characteristics of daily changes in soil moisture during the freeze-thaw period

2.2.2 不同管理措施对冻融期土壤呼吸的影响 冻融阶段在平茬和整地措施的影响下,土壤呼吸的日通量均减少(图 4),土壤呼吸速率表现出不一致的结果。

由图 5 可知,平茬后的沙柳,进一步进行整地措施后加快了土壤呼吸速率,但其土壤呼吸日通量表现为最小,在一定程度上说明冻融阶段 9:00—11:00 不能代表全天的土壤呼吸速率,其值较大。而在未平茬

沙柳地,冻融前期与上述平茬后结果保持一致,加快了土壤呼吸速率,但是在解冻后未整地土壤呼吸速率增大趋势回升,说明在冻融阶段 1 天内土壤呼吸速率随温度变化呈现较明显的变化规律。由图 5 和图 7 可知,在整个冻融阶段,从前期到结束,土壤呼吸速率总体呈上升趋势,特别在冻融中期,即 3 月 13 日开始,呼吸速率开始显著上升,而在此之前,呼吸速率

相对稳定。

在没有进行整地的情况下,平茬措施降低了土壤呼吸速率(图 5)。这可能是由于地上生物量减少,导致地

下植物根系的碳输送相应减少,影响植物根系呼吸。同样,对于进行整地后的沙柳地,未平茬的植株土壤呼吸速率整体上高于平茬后的沙柳地(图 5)。

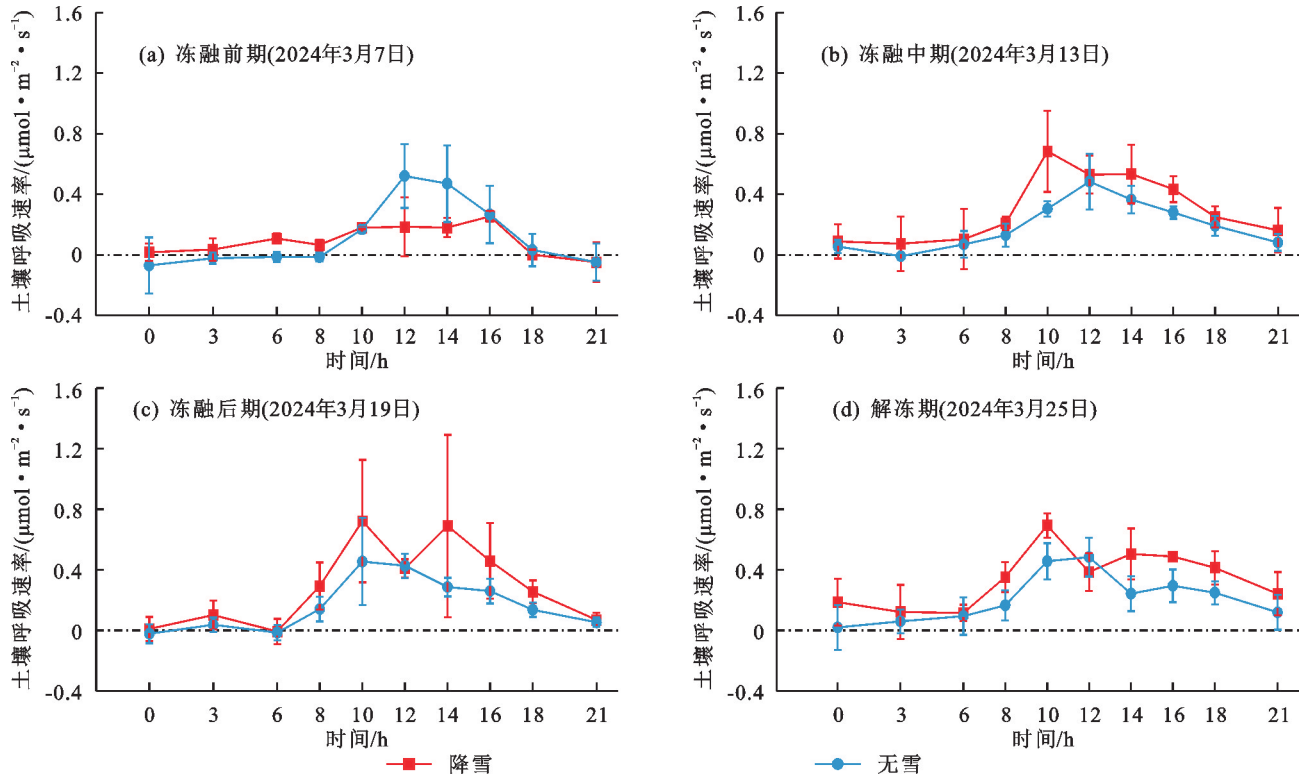


图 3 土壤呼吸对积雪的日变化

Fig.3 Daily variation in soil respiration in response to snow cover

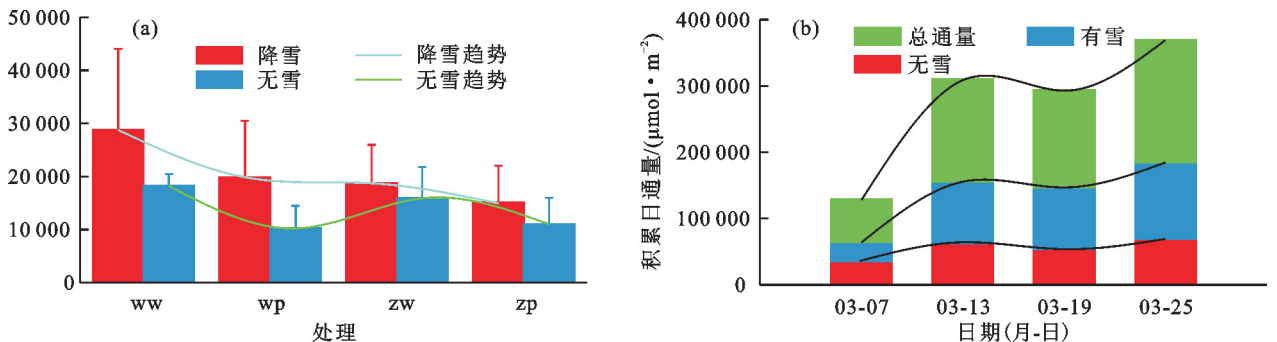


图 4 土壤呼吸日通量

Fig.4 Daily flux of soil respiration

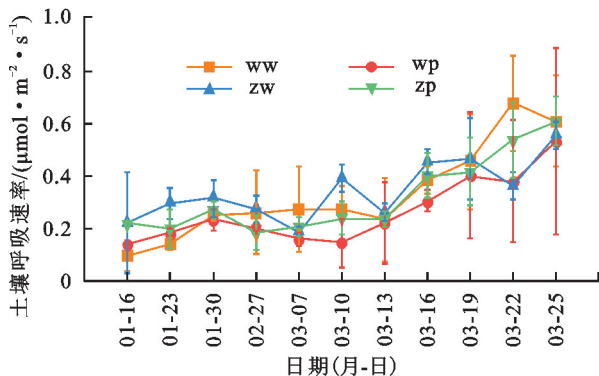


图 5 早春冻融阶段不同措施间土壤呼吸速率对比

Fig.5 Comparison of soil respiration rates under different measures in early spring freeze-thaw period

在整地和平茬措施的影响下,同样也未改变土壤呼吸速率的日变化特征(图 6),随着温度的变化整体上也呈单峰趋势,与土壤温度的变化规律整体相似。方差分析(表 1)表明,降雪显著改变土壤呼吸速率( $p < 0.001$ ),降雪增加土壤呼吸速率;平茬和整地也显著影响土壤呼吸速率( $p < 0.001$ ),平茬和整地措施均降低土壤呼吸速率。降雪和整地的交互作用对土壤呼吸的影响呈显著水平,二者虽然是逆向反馈,降雪的促进作用显著高于整地的负反馈,所以整体上仍然加快土壤呼吸速率。

### 2.3 水热因子在冻融过程中的作用

由图 7 可知,在整个冻融观测期间,大气温度和和

相应地下 5 cm 处土壤温度呈逐步上升趋势。与此同时,土壤水分在整个冻结时期保持较低水平,但在冻融中期达到最高点,随着大气温度的进一步升高,土壤中的水分逐渐蒸发,导致土壤中含水量逐渐下降。因此,降雪组和无雪组的土壤水分逐渐趋于一致,差异逐渐缩小。在整个观测阶段土壤呼吸速率随温度的逐渐升高,整体呈上升趋势,与大气温度、土壤温度

的变化趋势接近,但与土壤水分的变化趋势存在差异。结合全冻时期的数据,土壤呼吸速率在全冻时期和冻融前期无明显波动。从冻融中期(3月13日)开始,随着大气温度的显著升高,土壤呼吸速率开始明显上升,表明土壤呼吸与土壤温湿度存在明显的相关关系。在土壤消融后,降雪效应逐渐显现出来,降雪组的土壤呼吸速率高于无雪处理。

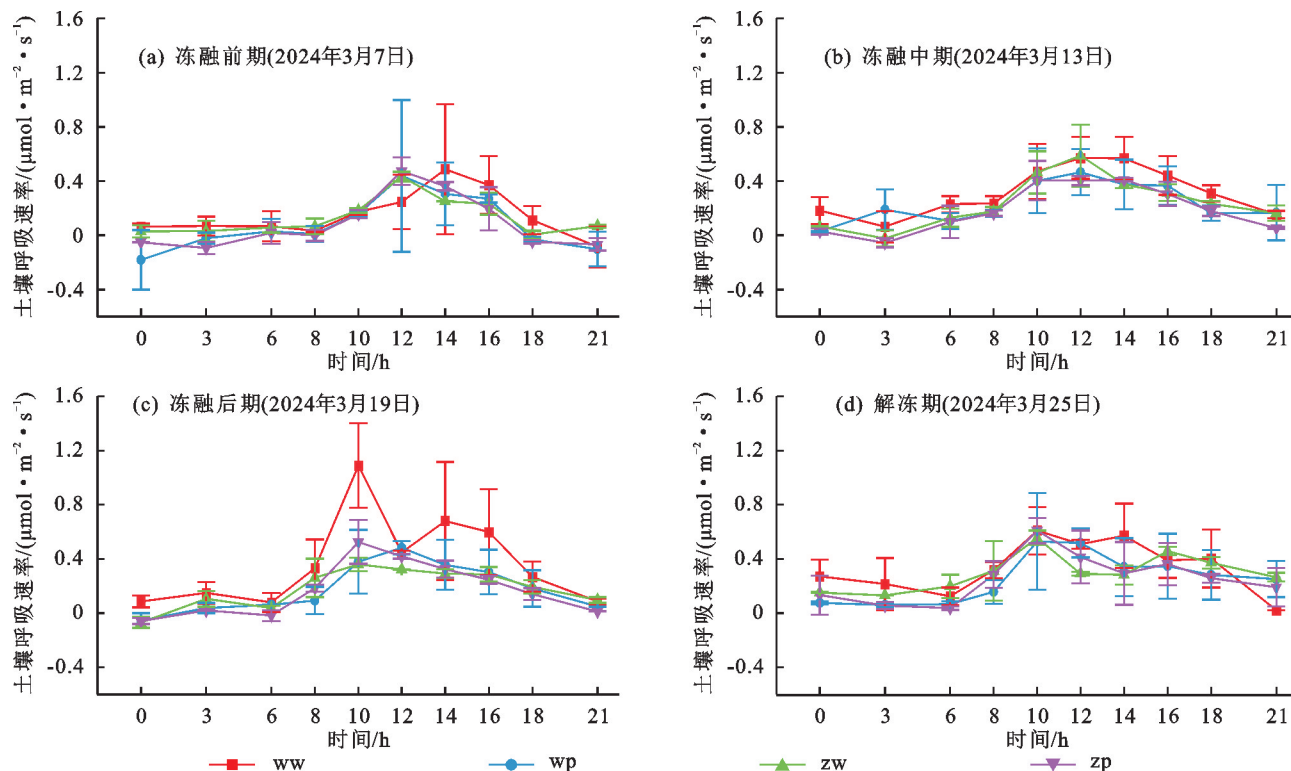


图 6 不同措施下土壤呼吸速率日变化特征

Fig.6 Characteristics of daily changes in soil respiration rate under different measures

表 1 不同处理下土壤呼吸方差分析结果

Table 1 Results of analysis of variance (ANOVA) for soil respiration under different measures

处理	自由度	均方差	F	p
降雪	1	0.103	28.166	0***
整地	1	0.058	15.824	0.001***
平茬	1	0.049	13.470	0.001***
降雪×整地	1	0.041	11.141	0.003**
降雪×平茬	1	0	0.120	0.732
整地×平茬	1	0.011	2.972	0.099
降雪×整地×平茬	1	0.002	0.519	0.479

注:\*\*\*表示显著性水平  $p < 0.001$ , \*\*表示显著性水平  $p < 0.01$ 。

## 2.4 土壤呼吸和温湿度的回归分析

2.4.1 温度 本试验使用指数方程  $R_s = a e^{bT}$  拟合土壤呼吸速率与地下 5 cm 处土壤温度的关系(图 8),不同处理方式下土壤呼吸和土壤温度均呈显著正相关( $p < 0.05$ )(表 2),随温度的升高指数上涨,地下 5 cm 土壤温度可以解释土壤呼吸速率的 54%~68%,

除对照组(ww)无雪覆盖条件下土壤呼吸速率与土壤温度的相关性高于有雪覆盖外,其余处理中均表现为有雪覆盖条件下二者的相关性较高。说明在人为干扰措施下,干旱区降雪能够对春季冻融时期土壤呼吸产生显著影响。

根据温度的指数回归方程计算土壤呼吸的温度敏感性( $Q_{10}$ )。由表 2 可知,呼吸速率在有雪覆盖下的温度敏感性大于无雪覆盖,说明有雪覆盖情况下可以通过水分的改变影响温度变化。整地降低土壤呼吸的温度敏感性,平茬后沙柳地的土壤温度敏感性增强,且对土壤温度的变化最敏感( $Q_{10} = 3.53$ )。

2.4.2 水分 本试验使用一元二次方程  $R_s = aW^2 + bW + c$  拟合土壤呼吸与土壤水分,回归分析见图 9。测定的土壤  $CO_2$  排放速率与同时测定的土壤水分呈二次方程回归关系,降雪组和无雪组均表现为随土壤水分的增加先增大后减小,说明水分过高过低都在一定程度上抑制土壤中  $CO_2$  的释放,但降雪组随土壤水分的变化更敏感。降雪组在土壤水分 3%~5% 达到峰



值,无雪组峰值在 3%~4%。虽然拟合曲线的决定系数 ( $R^2$ )最小值为 0.31,最大值为 0.66,能解释土壤呼吸和土

壤水分之间的相关关系,但是显著性水平  $p > 0.05$ (表 3),说明二者的关系在统计学上不显著。

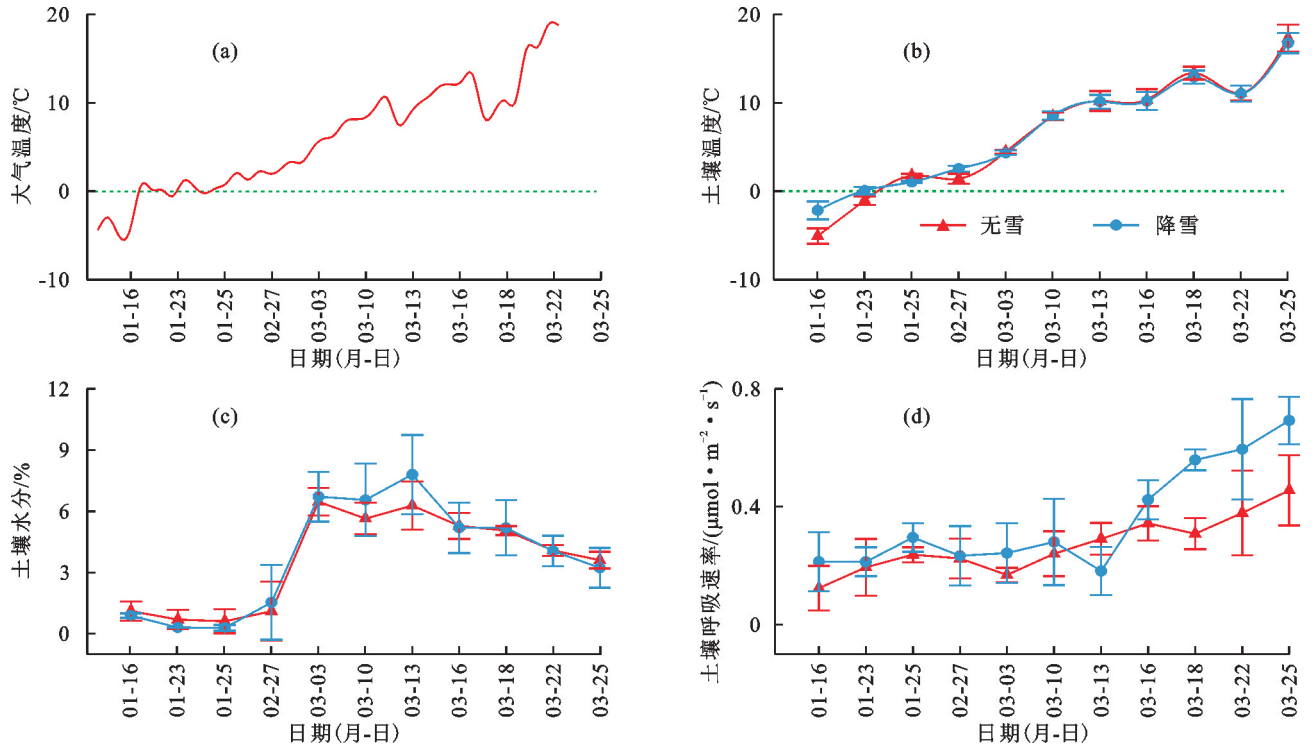


图 7 早春冻融阶段土壤呼吸与环境因子的动态变化特征

Fig.7 Characteristics of the dynamics of soil respiration and environmental factors in early spring freeze-thaw period

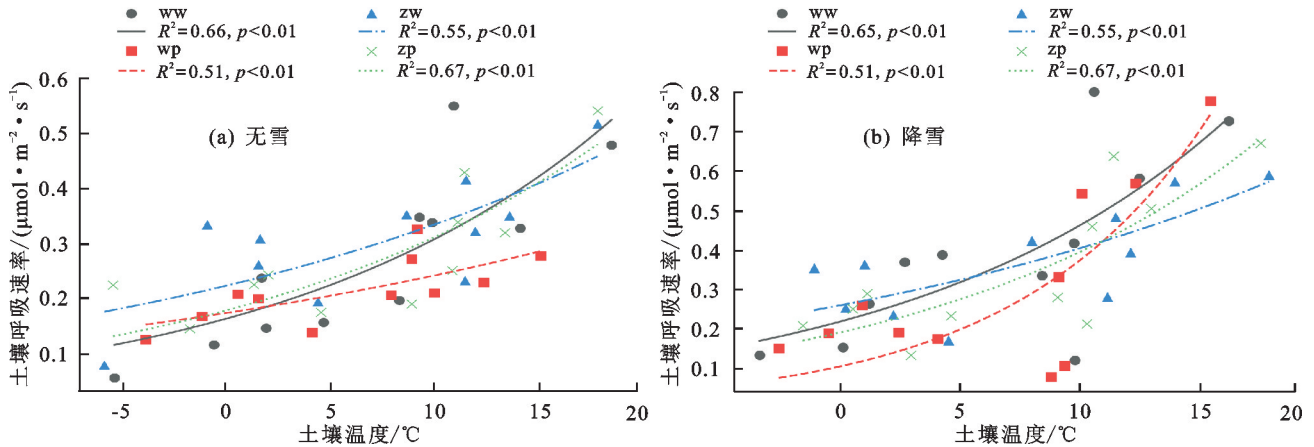


图 8 土壤呼吸速率与土壤温度的关系

Fig.8 The relationship between soil respiration rate and soil temperature

2.4.3 温度和水分的综合作用 分别使用多元线性和非线性回归进行土壤呼吸速率与土壤温湿度的拟合,拟合结果见表 4,土壤温度和水分能够共同解释土壤呼吸的 49%~81%,2 个模型拟合结果  $R^2$  较单因子模型均有不同程度的提高,且均达到显著水平 ( $p < 0.01$ ),说明土壤温度和水分协同作用较单因子能更好地解释土壤呼吸。其中指数一幂函数拟合结果中降雪和无雪的差异较大,降雪条件下土壤呼吸对土壤温湿度的响应程度较无雪条件较大, $R^2$  最高可达 0.81。

模型拟合结果均表现为土壤呼吸速率对土壤温湿度的响应最低( $R^2 = 0.469, R^2 = 0.492$ ),说明平茬措施下土壤温湿度的协同影响机制有待进一步研究。

整地后土壤呼吸速率对于土壤温湿度的响应普遍高于未整地。在无雪覆盖条件下进行平茬措施后,2 个

SEM 模型拟合结果(图 10)表明,整地通过影响土壤温度和水分间接影响土壤呼吸速率,但其对于土壤水分的影响较为显著,而降雪条件和平茬措施可直接影响土壤呼吸,并非通过土壤温度和水分间接效果,尽管其与土壤温度和水分存在显著相关关系。土壤温度和水分之间存在显著正相关关系,而且土壤温度对土壤呼吸速率有促进作用,但土壤水分对土壤呼吸无显著影响。模型各变量共同解释了土



壤呼吸变异的 70%。

### 3 讨论

#### 3.1 冻融过程积雪对土壤呼吸的影响

通过全天内连续性监测和前后阶段性监测发现,降雪组的土壤呼吸速率及日通量均大于无雪组,可能是因为是在冻融期间,气温逐渐升高土壤开始融化,降雪组的土壤水分较无雪组较高,促进植物根系和微生物活动<sup>[6]</sup>,导致碳释放明显增强。也有研究<sup>[4]</sup>表明,降雪条件增加早春的土壤水分和养分有效性,从而增加土壤呼吸速率。还有研究<sup>[9]</sup>表明,去除雪被土壤温度受大气温度的变化影响较为显著,冻融交替阶段随温度变化冻融循环次数增加,底物氮矿化速率降低<sup>[13]</sup>,进而存在无雪组的土壤呼吸速率小于有雪组。

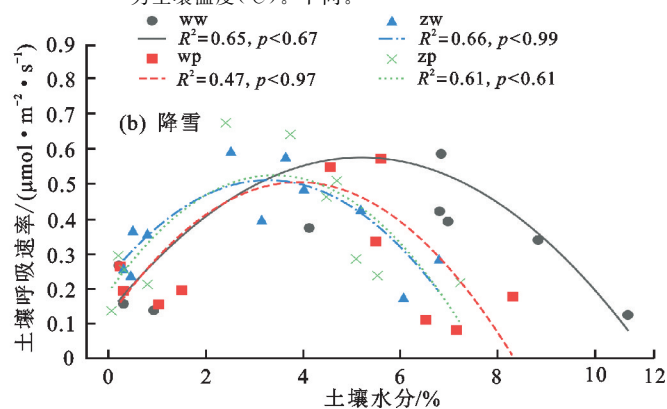
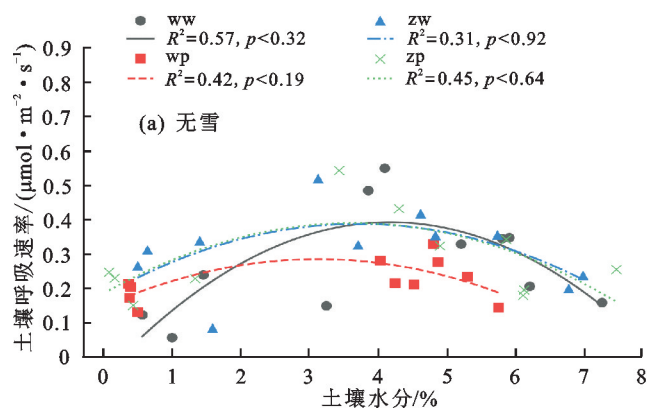


图 9 土壤呼吸速率与土壤水分的关系

Fig.9 The relationship between soil respiration rate and soil moisture

表 3 土壤呼吸与土壤水分的多项式关系模型

Table 3 The model of the polynomial relationship between soil respiration and soil moisture

措施	降雪/ 无雪	$R_s = aW^2 + bW + c$			$R^2$	$p$
		$a$	$b$	$c$		
ww	降雪	-0.02	0.17	0.13	0.66	0.67
	无雪	-0.03	0.21	0.06	0.57	0.32
wp	降雪	-0.03	0.20	0.11	0.47	0.99
	无雪	-0.01	0.09	0.14	0.42	0.92
zw	降雪	-0.03	0.17	0.23	0.66	0.97
	无雪	-0.02	0.11	0.18	0.31	0.19
zp	降雪	-0.03	0.20	0.19	0.61	0.61
	无雪	-0.02	0.11	0.18	0.45	0.64

注:W 为土壤水分(%)。

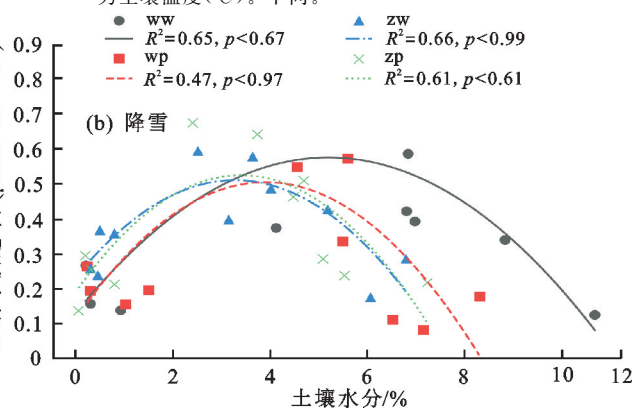
冻融初期降雪条件对土壤呼吸速率产生的影响并没有显现,可能是由于土壤仍处于冻结状态,土壤微生物活性较低,植物根部呼吸没有开始<sup>[1]</sup>。在夜间温度较低时土壤出现的碳吸收现象可能与干旱区低温条件相关<sup>[30]</sup>。冻融中后期,土壤呼吸速率显著增大,可能是因为夜间土壤冻结土壤微生物释放的CO<sub>2</sub>被冻结在土壤中,白天温度升高时所释放的显著

表 2 土壤呼吸与温度的指数关系模型

Table 2 The model of the exponential relationship between soil respiration and temperature

措施	降雪/ 无雪	$R_s = a e^{bT}$				$Q_{10}$
		$a$	$b$	$R^2$	$p$	
ww	降雪	0.22	0.07	0.54	0.01	2.11
	无雪	0.17	0.06	0.66	<0.01	1.86
wp	降雪	0.11	0.13	0.56	0.01	3.53
	无雪	0.18	0.07	0.55	0.01	2.06
zw	降雪	0.26	0.04	0.64	0.02	1.55
	无雪	0.23	0.04	0.51	0.01	1.49
zp	降雪	0.19	0.07	0.68	<0.01	2.06
	无雪	0.18	0.05	0.67	<0.01	1.73

注:R<sub>s</sub> 为土壤呼吸速率[μ mol/(m<sup>2</sup>·s)];a、b 为模拟参数;T 为土壤温度(°C)。下同。



变化现象。在融化期,土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率及通量均有明显增加,峰值集中出现在融化后,与朱文煜等<sup>[31]</sup>对艾比湖湿地研究冻融时期土壤呼吸得出的结论一致,温度升高,土壤中微生物活性酶活性均提高,使得土壤碳释放增加。

#### 3.2 冻融过程不同管理措施对土壤呼吸的影响

平茬后,地上植被缺失,植物光合作用受到影响,导致根系碳输送发生变化,进而影响根系呼吸。已有研究<sup>[19]</sup>表明,刈割显著降低土壤呼吸速率,刈割后储存在根系中的碳上移运用于植物的再生,植物根系分配的碳相应减少<sup>[24]</sup>,导致根系呼吸降低。平茬后地面植被减少导致土壤温度的显著性变化也影响土壤微生物及动物呼吸,本研究发现,平茬措施显著降低土壤呼吸速率,说明冻融阶段,温度相对较低土壤微生物动物呼吸较小,加之植物根系呼吸的减少,造成整体上土壤呼吸速率的降低。还有学者<sup>[19]</sup>在研究增温和刈割对高寒草甸土壤呼吸的影响时发现,刈割并未对土壤呼吸产生明显影响,可能因为该研究是生长季草地的土壤呼吸,土壤本身受温度的影响较为显著。

表 4 土壤呼吸速率和土壤温湿度的多元回归

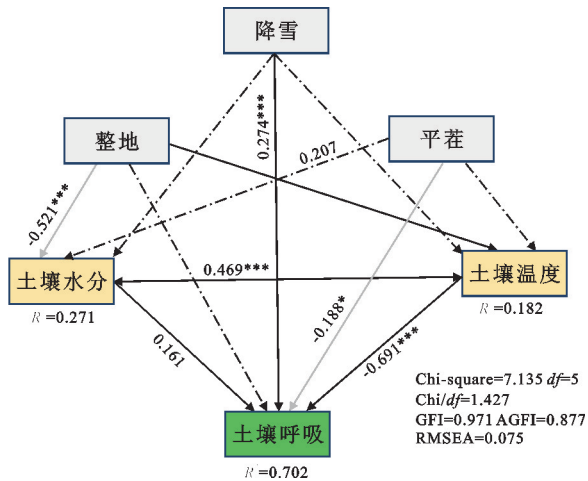
Table 4 Multiple regression of soil respiration rate and soil temperature and humidity

措施	降雪/ 无雪	$R_s = a + bT + cW$					$R_s = a e^{bT} W^c$				
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	$R^2$	<i>p</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	$R^2$	<i>p</i>
ww	降雪	0.298	0.041	-0.035	0.608	0.010	0.250	0.104	-0.082	0.591	0.012
	无雪	0.192	0.022	-0.018	0.703	0.003	0.136	0.092	-0.027	0.534	0
wp	降雪	0.249	0.042	-0.051	0.663	0.005	0.233	0.115	-0.169	0.762	0.022
	无雪	0.190	0.010	-0.010	0.469	0.032	0.186	0.053	-0.060	0.492	0.012
zw	降雪	0.311	0.021	-0.029	0.619	0.009	0.304	0.056	-0.087	0.653	0.013
	无雪	0.289	0.016	-0.026	0.675	0.005	0.249	0.064	-0.088	0.615	0.010
zp	降雪	0.226	0.032	-0.032	0.672	0.005	0.230	0.058	-0.071	0.806	0.008
	无雪	0.247	0.018	-0.024	0.679	0.004	0.217	0.079	-0.063	0.710	0.004

已有研究<sup>[18]</sup>表明,在进行土地整理后土壤碳排放有所增加,本试验发现,整个冻融阶段,整地对于土壤呼吸速率的影响没有表现出一致规律,在完全解冻前整地加快土壤呼吸速率,完全解冻后土壤呼吸速率反而降低。可能原因为,整地增大土壤间隙,内蒙古地区春季风沙较大,加快土壤蒸发,从而减少土壤的水分<sup>[23]</sup>,导致土壤呼吸速率下降。整地后土壤呼吸的方差分析结果  $p < 0.01$ ,说明整地对土壤呼吸存在显著性影响。

者之间呈一元二次非线性关系。本研究结果表明,指数模型能较好地模拟土壤呼吸速率与温度的关系,土壤温度可以解释土壤呼吸速率的 51%~68%。与许多已有研究<sup>[23,26]</sup>结论保持一致。在观测期间,昼夜温差可达 21.6 °C,大温差引起的冻融导致土壤团聚体的破碎,影响底物的可利用性<sup>[12]</sup>,而且土壤中的酶和微生物活性也受温差影响<sup>[9]</sup>,进而对土壤根系及微生物呼吸产生影响,此类结论在干旱半干旱地区的研究<sup>[13]</sup>中多次被证明。

本研究发现,土壤水分与土壤呼吸速率可以通过一元二次方程较好地拟合说明,随着水分的增加先增大后减小,但其相关性并不显著( $p > 0.05$ ),有研究<sup>[9]</sup>报道,低温环境下土壤呼吸受土壤水分的影响较小,本研究监测阶段,土壤水分的变化为 1%~8%,含量较小,因此,可能是冻融期气温相对较低,一部分水变成水晶,与液态水对土壤呼吸的作用效果并不一致,导致土壤呼吸速率对于土壤水分的影响不显著。除水分含量的多少外,水的状态,以及土壤表层冻结形成的冰膜对地下根系、微生物呼吸的阻断都是引起土壤呼吸变化的因素。有研究<sup>[32]</sup>也表明,非生长季土壤水分与土壤呼吸之间的关系很复杂,在研究半干旱区草地的土壤呼吸时发现土壤呼吸和水分呈正相关,在研究旱区农田土壤呼吸与水热因子的关系中得到土壤呼吸随土壤水分呈先减小后增大趋势<sup>[25]</sup>。可见,在干旱半干旱地区土壤水分对于非生长季土壤呼吸通量有重要影响,其影响机制需深入研究。土壤温湿度对土壤呼吸的协同作用高于单因子,且指数—幂函数拟合结果最高可解释土壤呼吸的 81%,与张丁辰等<sup>[25]</sup>研究不同耕作措施下旱作农田土壤呼吸与水热因子的关系中的结论一致。



注:\*\*\*表示  $p < 0.01$ ;实线箭头表示正相关路径,虚线箭头表示无显著相关路径,灰色实线箭头表示负相关路径,箭头上数字代表标准化路径系数, $R^2$ 为模型对该变量的解释程度。Chi-square 为卡方; $df$ 为自由度;GFI为拟合优度指数;AGFI为调整拟合优度指数;RMSEA为近似误差均方根。

图 10 降雪条件下不同措施对土壤呼吸影响的结构方程模型  
Fig.10 Structural equation model of the effects of different measures on soil respiration under snowfall conditions

### 3.3 冻融过程土壤呼吸与土壤温湿度的关系及对土壤温度的敏感性

土壤温度作为影响土壤呼吸的一个重要因子,二者存在明显的正相关,土壤呼吸速率随温度的升高线性升高<sup>[31]</sup>或指数上升<sup>[23]</sup>,还有少数研究<sup>[11]</sup>表明,二

$Q_{10}$ 能够反映土壤呼吸对温度的敏感性,本试验中有雪覆盖的土壤呼吸温度敏感性大于无雪覆盖,与前人<sup>[20]</sup>研究积雪对祁连山草甸土壤呼吸的影响中得

出的结论一致。有研究<sup>[33]</sup>表明,土壤温度敏感性随温度的升高而减小,土壤干旱也降低土壤呼吸的温度敏感性,随着土壤水分的增加,土壤呼吸的温度敏感性增加<sup>[34]</sup>。本研究中降雪并未对土壤温度造成明显的影响,但降雪增加土壤水分,由此可知,本试验中冻融阶段降雪主要通过影响土壤水分来影响  $Q_{10}$ 。整地降低土壤呼吸的温度敏感性,可能原因是整地破坏土壤团聚体,造成底物可利用性降低,而且改变了土壤结构,土壤较未整地升温较快。之前在研究森林生态系统的  $Q_{10}$  及其影响因素时发现,  $Q_{10}$  随土壤有机碳(SOC)的减少而降低<sup>[17]</sup>,因此,还可能是土壤中微生物活性受到影响而造成呼吸温度敏感性的下降。本研究发现,平茬后土壤温度敏感性增加,与前人<sup>[19]</sup>研究刈割对草地土壤呼吸的影响中得到的结论相反。可能是平茬后,地上植被减少,土壤接受太阳光照的面积增大,受到温度的影响变大有关。

## 4 结论

冻融阶段土壤呼吸的日变化呈单峰趋势,降雪条件加快土壤呼吸速率。整地对土壤呼吸的影响不显著,平茬减慢土壤呼吸。土壤呼吸与温度的单因子指数模型能解释土壤呼吸的 51%~68% ( $p < 0.05$ ),但与水分的相关性并不显著。 $Q_{10}$  的影响因素不仅是温度,降雪通过影响土壤水分来影响  $Q_{10}$ 。整地后,破坏土壤团聚体,土壤结构发生改变,降低土壤水分,从而降低  $Q_{10}$ ,平茬减少地上生物量,同时也去除植被遮挡,土壤接受太阳直射增加,使得  $Q_{10}$  增大。

### 参考文献:

- [1] 海龙.毛乌素沙地杨柴人工灌木林土壤有机碳与呼吸作用特征研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.  
HAI L. Study on soil organic carbon and respiration characteristics of poplar-firewood artificial shrub in Mu Us Sandy Land[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [2] 肖建明,关利峰,张泽宁,等.榆林毛乌素沙地沙柳人工林生长状况调查研究[J].陕西林业科技,2020,48(1):42-44.  
XIAO J M, GUAN L F, ZHANG Z N, et al. Investigation on growth of *Salix psammophila* plantation in Mu US Sandy Land[J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2020, 48(1): 42-44.
- [3] 海龙,王晓江,张文军,等.毛乌素沙地人工沙柳(*Salix psammophila*)林平茬复壮技术[J].中国沙漠,2016,36(1):131-136.  
HAI L, WANG X J, ZHANG W J, et al. Stumping rejuvenation technology of *Salix psammophila* artificial shrubbery in the Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(1): 131-136.
- [4] LI P, SAYER E J, JIA Z, et al. Deepened winter snow cover enhances net ecosystem exchange and stabilizes plant community composition and productivity in a temperate grassland[J]. Global Change Biology, 2020, 26(5):3015-3027.
- [5] AANDERUD Z T, JONES S E, SCHOOLMASTER D R, et al. Sensitivity of soil respiration and microbial communities to altered snowfall[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57:217-227.
- [6] MASSON-DELMOTTE V, ZHAI P, PÖRTNER H-O, et al. Global Warming of 1.5 C: IPCC special report on impacts of global warming of 1.5 C above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [7] HAJEK O L, KNAPP A K. Shifting seasonal patterns of water availability: Ecosystem responses to an unappreciated dimension of climate change[J]. New Phytologist, 2022, 233(1):119-125.
- [8] 王瑶,张利敏,徐胜楠,等.帽儿山 3 种森林生态系统土壤动物与土壤呼吸及其相互关系研究[J].生态学报, 2021, 41(1):172-183.  
WANG Y, ZHANG L M, XU S N, et al. Analysis on soil animals, soil respiration and the correlation in three forest ecosystems in Maershan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1):172-183.
- [9] 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.  
YANG K J, YANG W Q, TAN Y, et al. Short-term responses of winter soil respiration to snow removal in a *Picea asperata* forest of western Sichuan[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(9):964-971.
- [10] 杨震,李超,冀鸿兰,等.冻融期黄河堤岸土体温湿度变化特征及影响因素研究[J].干旱区资源与环境, 2021, 35(1):76-83.  
YANG Z, LI C, JI H L, et al. Characteristics and influencing factors of soil temperature and moisture of the Yellow River bank during freeze-thaw period[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(1):76-83.
- [11] 辛贵民,赵清竹,尹航,等.冻融交替对长白山不同林型土壤两种温室气体排放的影响[J].生态学杂志, 2021, 40(3):644-653.  
XIN G M, ZHAO Q Z, YIN H, et al. Effects of freeze-thaw process on the emission of two greenhouse gases from different forest soils in Changbai Mountain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(3):644-653.

- [12] QI Y C, LIU X C, DONG Y S, et al. Differential responses of short-term soil respiration dynamics to the experimental addition of nitrogen and water in the temperate semi-arid steppe of Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(4): 834-845.
- [13] 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 and Soil*, 2010, 328(1): 397-410.
- [14] 杨世君, 高雅玉, 柯浩成, 等. 极端干旱区土壤呼吸对储水灌溉和冻融循环的响应[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(4): 25-32.
- YANG S J, GAO Y Y, KE H C, et al. Response of soil respiration to storage irrigation and freeze-thaw cycles in extremely arid areas[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(4): 25-32.
- [15] LIU Y, WEN X F, ZHANG Y H, et al. Widespread asymmetric response of soil heterotrophic respiration to warming and cooling[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 423-431.
- [16] JENKINSON D S, ADAMS D E, WILD A. Model estimates of CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to global warming[J]. *Nature*, 1991, 351: 304-306.
- [17] 郑甲佳, 黄松宇, 贾昕, 等. 中国森林生态系统土壤呼吸温度敏感性空间变异特征及影响因素[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(6): 687-698.
- ZHENG J J, HUANG S Y, JIA X, et al. Spatial variation and controlling factors of temperature sensitivity of soil respiration in forest ecosystems across China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(6): 687-698.
- [18] 郭义强, 鄢文聚, 黄妮, 等. 土地整理工程对土壤碳排放的影响[J]. *土壤通报*, 2016, 47(1): 36-41.
- GUO Y Q, YUN W J, HUANG N, et al. The effect of land consolidation projects on soil carbon emissions[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(1): 36-41.
- [19] 蒙程, 牛书丽, 常文静, 等. 增温和刈割对高寒草甸土壤呼吸及其组分的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(18): 6405-6415.
- MENG C, NIU S L, CHANG W J, et al. Effects of warming and clipping on soil respiration and its components in an alpine meadow[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6405-6415.
- [20] 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 effect of snow on soil respiration rate in subalpine meadows of the Qilian Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(9): 3297-3308.
- [21] 李炎真, 谢尧, 张晶玲, 等. 氮添加及林下植被去除对沙地樟子松人工林土壤呼吸组分的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(10): 2997-3006.
- LI Y Z, XIE Y, ZHANG J L, et al. Effects of nitrogen addition and understory removal on soil respiratory components in a sandy *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(10): 2997-3006.
- [22] 程传鹏, 徐明洁, 刘慧峰. 间伐对亚热带马尾松人工林碳动态及碳固定经济价值的影响[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(8): 1499-1509.
- CHENG C P, XU M J, LIU H F. Effects of thinning on carbon dynamics and economic value of carbon fixation in subtropical *Pinus massoniana* plantation[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(8): 1499-1509.
- [23] 李光敏, 陈伏生, 徐志文, 等. 间伐和林下植被剔除对毛竹林土壤氮矿化速率及其温度敏感性的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(11): 4106-4115.
- LI G M, CHEN F S, XU Z W, et al. Effects of thinning and understory removal on soil nitrogen mineralization rate and temperature-sensitivity in a moso-bamboo plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11): 4106-4115.
- [24] DETLING J K, DYER M I, WINN D T. Net photosynthesis, root respiration, and regrowth of *Bouteloua gracilis* following simulated grazing [J]. *Oecologia*, 1979, 41(2): 127-134.
- [25] 张丁辰, 蔡典雄, 代快, 等. 旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应[J]. *生态学报*, 2013, 33(6): 1916-1925.
- ZHANG D C, CAI D X, DAI K, et al. Soil respiration and its responses to soil moisture and temperature under different tillage systems in dryland maize fields[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(6): 1916-1925.
- [26] 沈健, 何宗明, 董强, 等. 轻度火烧对滨海沙地人工林土壤呼吸速率和非生物因子的影响[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(7): 1032-1042.
- SHEN J, HE Z M, DONG Q, et al. Effects of mild fire on soil respiration rate and abiotic factors in coastal sandy plantation[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(7): 1032-1042.
- [27] 王迎红. 陆地生态系统温室气体排放观测方法研究、应用及结果比对分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院(大气物理研究所), 2005.
- WANG Y H. Research, application and comparative analysis of greenhouse gas emission observation methods in terrestrial ecosystems[D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [28] LLOYD J, TAYLOR J A. On the temperature dependence of soil respiration[J]. *Functional Ecology*, 1994, 8(3): e315.



- 46(1):156-162.
- SHENG Y F, LI Y Y, XU Y, et al. Prediction of rainfall-type landslides based on effective rainfall intensity and logistic regression[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2019, 46(1):156-162.
- [27] 高华喜,殷坤龙.降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. *岩土力学*, 2007, 28(5):1055-1060.
- GAO H X, YIN K L. Discuss on the correlations between landslides and rainfall and threshold for landslide early-warning and prediction [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(5):1055-1060.
- [28] SEGONI S, PICIULLO L, GARIANO S L. A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence[J]. *Landslides*, 2018, 15(8):1483-1501.
- [29] 李长江,麻土华,李炜,等.滑坡频度-降雨量的分形关系[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2010, 21(1):87-93.
- LI C J, MA T H, LI W, et al. Fractal relation of landslide frequency and rainfall[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2010, 21(1):87-93.
- [30] 黄发明,陈佳武,范宣梅,等.降雨型滑坡时间概率的逻辑回归拟合及连续概率滑坡危险性建模[J]. *地球科学*, 2022, 47(12):4609-4628.
- HUANG F M, CHEN J W, FAN X M, et al. Logistic regression fitting of rainfall-induced landslide occurrence probability and continuous landslide hazard prediction modelling[J]. *Earth Science*, 2022, 47(12):4609-4628.
- (上接第 141 页)
- [29] 董茹月,彭琴,贺云龙,等.冻融期温带草地土壤呼吸和土壤异养呼吸的日变化特征及对水氮添加的响应[J]. *土壤通报*, 2021, 52(5):1129-1139.
- DONG R Y, PENG Q, HE Y L, et al. Diurnal variation characteristics of soil respiration and heterotrophic respiration in freeze-thaw period of temperate grassland and its response to water and nitrogen addition[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(5):1129-1139.
- [30] LEE M S, NAKANE K, NAKATSUBO T, et al. Effects of rainfall events on soil CO<sub>2</sub> flux in a cool temperate deciduous broad-leaved forest[J]. *Ecological Research*, 2002, 17(3):401-409.
- [31] 朱文煜,李艳红,李发东,等.艾比湖湿地季节性冻融土壤温室气体排放规律研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(4):549-556.
- ZHU W Y, LI Y H, LI F D, et al. Greenhouse gas emission from seasonal frozen-thawed soil in Ebinur Lake wetland[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2020, 56(4):549-556.
- [32] 张琳焱.半干旱区草地土壤呼吸特征及其影响因子的观测研究[D].兰州:兰州大学, 2022.
- ZHANG L H. Observation and study on grassland soil respiration characteristics and its influencing factors in semi-arid area[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.
- [33] LUO Y, WAN S, HUI D, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001, 413(6856):622-625.
- [34] KIRSCHBAUM M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(6):753-760.