

极端干旱区土壤呼吸对储水灌溉和冻融循环的响应

杨世君¹, 高雅玉², 柯浩成², 李泽霞¹

(1.甘肃省水土保持科学研究所, 甘肃 兰州 730020; 2.兰州理工大学, 甘肃 兰州 730000)

摘要: [目的] 揭示中国极端干旱区甘肃省石羊河流域储水灌溉与季节性冻融叠加作用下对土壤呼吸的影响, 为进一步提高极端干旱区灌溉水资源利用效率和节约灌溉水源提供理论基础和技术支撑。[方法] 按照 1 199.4 m³/hm² 低灌溉定额分为灌水和非灌水处理, 将冻融循环分为冻结期、冻融期和解冻期 3 个时间段, 采用 LI-8100 土壤碳通量全自动测量系统对各处理地块的土壤呼吸速率进行观测与分析。[结果] 极端干旱区储水灌溉在季节性冻融作用下农田生态系统土壤呼吸速率增强, 土壤碳排放量增加, 农田生态系统碳循环被改变, 有利于作物的生长和提高粮食产量。不同土地利用方式下土壤呼吸速率对水分和温度的响应程度不同。整个冻融过程中土壤呼吸速率呈现出: 解冻期 > 冻融期 > 冻结期的规律。冻结期、冻融期和解冻期 3 个时期的土壤 CO₂ 都表现为源, 但在夜间极低温度时土壤 CO₂ 由源转化为汇。[结论] 储水灌溉调控了整个冻融期土壤呼吸的过程, 改变了极端干旱区农田生态系统的碳循环。在水分与季节性冻融叠加作用下, 储水灌溉地块土壤呼吸速率相对未储水地块随温度的波动更为剧烈, 但与温度的变化趋势一致, 水分加剧了其随温度的波动。

关键词: 土壤呼吸; 储水灌溉; 季节性冻融循环; 夜间; 极端干旱区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0025-08

中图分类号: S157, S723.6

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.004; Yang Shijun, Gao Yayu, Ke Haocheng, 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.

Response of Soil Respiration to Storage Irrigation and Freeze-thaw Cycles in Extremely Arid Areas

Yang Shijun¹, Gao Yayu², Ke Haocheng², Li Zexia¹

(1. Gansu Institute of Soil & Water Conservation Sciences, Lanzhou, Gansu

730020, China; 2. Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: [Objective] The effects of water storage irrigation and seasonal freezing and thawing on soil respiration were determined in order to improve the utilization efficiency of irrigation water resources, and save irrigation water resources at Shiyang River watershed of Gansu Province in extremely arid regions in China. [Methods] The LI-8100 automatic soil carbon flux measurement system was used to observe and analyze soil respiration rates. Treatments were divided into irrigation and non-irrigated treatments according to the low irrigation quota of 1 199.4 m³/hm². The freeze-thaw cycle was divided into three time periods: freezing period, freeze-thaw period, and thawing period. [Results] Under the effects of seasonal freeze-thaw cycles, soil respiration rate and soil carbon emissions of farmland ecosystems increased and the carbon cycle of farmland ecosystems was changed, resulting in increased crop growth and food production. Soil respiration rates responded differently to moisture and temperature under different land use patterns. During the entire process, soil respiration rate was greater during the thawing period than that of the freezing period and the freeze-thaw period. The soil CO₂ in the three periods of freezing, freeze-thaw, and thawing were all shown to

收稿日期: 2021-11-16

修回日期: 2022-02-28

资助项目: 甘肃省重点研发计划项目“干旱绿洲区农田储水灌溉作用机理评价与节水型储水灌溉技术研究”(18YF1NA031); 甘肃省省级水资源费项目(甘水资源发[2021]105号); 2022年甘肃省水土保持补偿费项目

第一作者: 杨世君(1982—), 男(汉族), 重庆市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水土保持与水利工程方面的研究。Email: 441577293@qq.com。

通讯作者: 高雅玉(1985—), 女(汉族), 天津市人, 博士, 正高级工程师, 主要从事水资源与水土保持方面的研究。Email: gyy@lut.edu.cn。

be sources, but were all converted from sources to sinks at very low night temperature. [Conclusion] Water storage irrigation regulated the process of soil respiration throughout the freezing and thawing period and changed the carbon cycle of farmland ecosystems in extremely arid regions. Under the superimposed action of moisture and seasonal freeze-thaw, the soil respiration rate of storage irrigation plots fluctuated more drastically with temperature than the soil respiration rate of non-storage plots, and this result was consistent with the change trend of temperature, indicating that moisture aggravates soil respiration fluctuations with temperature.

Keywords: soil respiration; storage irrigation; seasonal freeze-thaw cycle; nighttime; extremely arid area

在中国极端干旱农业生态系统中,普遍存在着储水灌溉的传统习惯。储水灌溉是传统绿洲灌溉农业的主要农耕技术,尤其在石羊河流域被广泛应用^[1-2]。储水灌溉目的是保证在播种时土壤有较好的墒情,同时,还具有适时蓄存河道来水于土壤,减小水利工程规模,调节土壤温度,淋洗土壤盐分的作用^[3-4]。大型灌区冬灌一般从 10 月中旬开始至 11 月中旬结束,灌溉期一个月左右。在极端干旱区进入冬季以后,气温降低,河流来水量减少,储水灌溉的水量不足,尤其进入 11 月以后,渠道开始结冰,输水困难,易引起渠道冻胀破坏和部分农田得不到灌溉,大定额灌水,容易造成水分深层渗漏及耕作层土壤养分的流失,污染地下水,形成土壤的盐渍化。储水灌溉存在定额大,灌溉水利用效率不高的缺点,是造极端干旱区农业水资源紧缺的主要原因。因此,需要从机理角度研究储水灌溉对于极端干旱区农田生态系统的影响,探寻适合极端干旱区的储水灌溉定额、灌水方式,提高区域农业水资源的利用效率。

近年来,大多学者对储水灌溉的研究主要集中在水分利用效率与耗水规律^[2,5]、灌溉制度^[2,4-6]与增产情况^[7-9]这几方面,对储水灌溉和免储水灌溉技术的研究起到了推动作用,但就解决储水灌溉定额大、无效蒸发大、大面积推广应用困难等问题和改变极端干旱区储水灌溉水利用效率不高的现状仍然存在一定的差距。然而,极端干旱区在储水灌溉后,要经历从冬季至春季土壤冻结与融化的特殊阶段,季节性冻融过程对土壤结构等物理、化学性质和土壤呼吸速率有显著影响,这种影响有利无利、储水灌溉在其中起何作用等,目前成果较少。现阶段季节性冻融对极端干旱区农田生态系统的影响的研究主要集中在单一的冻融过程中土壤呼吸速率及其影响因素^[10-14]、冻融过程中水热盐的变化^[15-17]和运移规律中^[10,18-19],而对于储水灌溉与季节性冻融叠加作用下对于土壤呼吸的影响的综合性研究及其夜间土壤呼吸的变化情况还未有文献报道。因此,本研究选择甘肃省石羊河流域的民勤灌区,开展了储水灌溉对土壤呼吸速率的试验观测与研究,探究极端干旱农田生态系统在水分作用下土壤呼吸对其的响应,从机理角度揭示了储水灌溉

对土壤呼吸速率的影响和在冻融期内不同时间段内的昼间和夜间变化特征,定量掌握冻融期各阶段水分作用对于土壤呼吸速率的影响,以期为区域储水灌溉制度制定和节水型灌溉定额的提出提供理论基础与技术支持。

1 研究区概况与试验布设

1.1 研究区概况

试验地点选择在甘肃省水利科学研究院民勤节水农业暨生态建设试验示范基地进行。该基地位于民勤县大滩乡(东经 103°05',北纬 38°37')。属大陆性荒漠干旱区,气候干燥,降雨量少,蒸发强烈,昼夜温差大,日照时间长,自然灾害频发。试验区多年平均气温 7.8℃,极端最低气温-27.3℃,极端最高气温 39.5℃。多年平均降水量约 110 mm,且多为作物难以利用的无效降雨,7—9 月的降水占全年降水的 60%,年蒸发量 2 644 mm。日照时数 3 010 h 以上,大于 10℃的积温 3 147.8℃,无霜期 150 d,最大冻土深 115 cm,地下水埋深为 18~25 m。试验地块土壤情况为:0—70 cm 为黏壤土,70 cm 以下由黏壤土逐渐转变为沙壤土,130 cm 以下又逐渐出现黏壤土。土壤养分指标为:全氮 465 mg/kg,速效钾 72 mg/kg,有效磷 21 mg/kg,水解性氮 49 mg/kg,pH 值 7.86。试验基地属民勤县红崖山灌区,灌区总面积 6 792.6 km²,有效灌溉面积 44 482.23 hm²,种植主要作物有小麦、玉米、茴香、瓜类、棉花、蔬菜等,粮食平均单量 9 295.35 kg/hm²左右,经济作物平均公顷产量 479 760.12 kg 左右。区内灌溉水源原以河水灌溉为主,由于上游来水锐减,逐渐演变成以井水灌溉为主、河水作为补充的井河水混合灌区;随着石羊河流域重点治理项目的实施,上游来水量逐年增加,现又变成地表水灌溉为主,地下水灌溉为辅的混合灌区。灌区内已建成著名的沙漠水库—红崖山水库一座,总库容 9.93×10⁷ m³。

1.2 试验布设

干旱绿洲区水分作用下季节性冻融循环对土壤呼吸速率的影响试验于 2019—2020 年度开展,试验

选择干旱绿洲区农田生态系统中最典型的两种土地利用方式——种植小麦和玉米。试验地分别为小麦和玉米免耕留茬覆盖处理(以下分别简称为“小麦地块”和“玉米地块”)。于2019年11月1日,按照 $1\ 199.4\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 的灌溉定额分为灌水处理(冬灌)和非灌水处理,对小麦地块灌水与非灌水、玉米地块灌水与非灌水共计4个试验地块进行,灌水处理采用储水灌溉形式完成。试验地2019年11月至2020年3月逐日气温、土壤温度和土壤水分变化如图1所示,

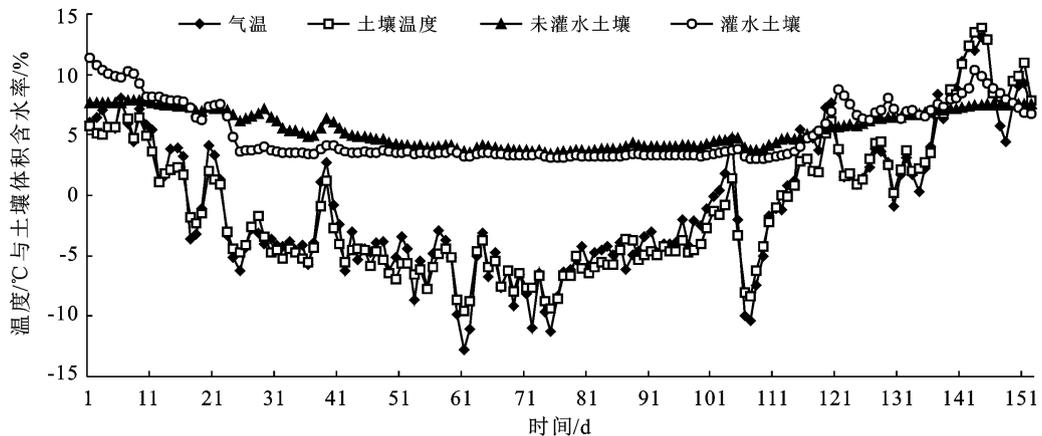


图1 试验地储水灌溉阶段温度与土壤含水率变化

1.3 土壤呼吸速率的测定

在进行灌水处理之后,在不同冻融循环的各个阶段采用LI-8100土壤碳通量全自动测量系统(Li-8100, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA),对4个地块分为冻结期、冻融期和解冻期3个时期的土壤呼吸速率的日变化进行监测。每个地块都设置3个样方,每个样方内有3个样点,且样方之间的距离大于10 m,每个处理有9个样点,最后取平均值作为本次处理的土壤二氧化碳通量值,冻融前、中和后共计测样点180个。在每次测定时,提前1 d将直径20 cm,高13 cm的聚氯乙烯圆柱体测定基座嵌入平均深度约8 cm的土壤中。一般情况下,基座经过24 h的平衡后,土壤呼吸速率会恢复到基座放置前的水平,避免因为安置基座造成的对土壤呼吸速率的扰动,试验观测到的土壤呼吸速率为0—10 cm土层。

1.4 测量时间的确定

采用东方生态公司生产的智墒ET100测量,民勤地区的冻融阶段为2019年11月13日至次年3月17日。根据土壤温度的变化情况分为冻结期、冻融期和解冻期3个时间段,求平均值做作为日间和夜间土壤呼吸速率值进行计算。对这3个时期中的每一天的各个样地进行昼夜不间断观测,其中昼间2 h测定一次(地温最高时再加成测1次),共计7次,分别

土壤温度与气温变化相一致且波动较大、热量交换频繁,而土壤体积含水率的变化与气温和土壤温度的变化趋势基本一致、波动没有气温剧烈,基本都在2020年1月最低,在2019年11月和2020年3月较高,这种变化趋势同时也影响着冻融时期土壤的呼吸速率。灌水处理的土壤体积含水率在灌水后20 d左右就会降到未灌水水平,在冻融期中段灌水后的土壤含水率要低于未灌水土壤,在冻融期后段又有所升高,土壤含水率的这种变化会进一步影响土壤呼吸速率。

为地方时:10:00,12:00,14:00,15:00,16:00,19:00,21:00;夜间3 h测定一次,共计4次,分别为0:00,3:00,6:00,9:00。

2 结果与分析

将整个冻融过程分为冻结期、冻融期和解冻期3个阶段,求平均值作为此阶段土壤呼吸速率值来分析。按照不同土地利用方式探究不同水分条件下各阶段土壤 CO_2 通量的变化情况,从而揭示冬季储水灌溉在季节性冻融循环条件下土壤二氧化碳通量的改变以及其对极端干旱区农田生态系统的影响。

2.1 日间土壤呼吸对储水灌溉和冻融循环的响应

2.1.1 小麦地块 在整个冻融期,小麦地块灌水与非灌水处理的土壤二氧化碳通量变化都跟温度的变化趋势一致,日均土壤二氧化碳通量在整个冻融循环期内解冻期最大,冻结期次之,冻融期最小。土壤二氧化碳的日间变化呈现出温度高,土壤二氧化碳通量大的趋势,日间变换呈现出单峰值的特点。对未灌水小麦地块,解冻期、冻结期和冻融期的日均土壤呼吸速率分别为 $0.33, 0.30$ 和 $0.05\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,呈现出依次变小趋势,与整个冻融循环中温度的变化相一致,在整个冻融循环中小麦地块非灌水处理土壤 CO_2 整体都表现为源。对于灌水处理地块,解冻期、冻结

期和冻融期的日均土壤呼吸速率分别为 0.35, 0.28 和 $0.04 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 解冻期灌水处理高出未灌水处理 6.73%, 冻结期和冻融期分别低于未灌水处理 7.11% 和 25.27% (图 2)。在整个冻融循环中, 小麦地块土壤呼吸速率随温度变化而剧烈地波动, 灌水处理促使小麦地块的土壤呼吸速率随温度变化波动更为剧烈, 呈现出峰值更高, 谷值更低的特点, 白天促使土壤呼吸速率提升, 夜间促进土壤呼吸速率下降, 在夜

间极低温度时, 土壤呼吸速率变为负值, 促使二氧化碳由源转化为汇。因此, 在极端干旱区土壤的二氧化碳通量在夜间出现碳汇现象可能与水分作用下冬季低温有关。同时, 土壤呼吸速率的峰值出现在冻结期和解冻期, 并且以解冻期为顶峰, 说明经过多次土壤冻融循环的土壤二氧化碳通量要高于初次土壤冻融循环的, 土壤频繁地发生冻融作用是解冻期土壤二氧化碳通量出现峰值的主要因素。

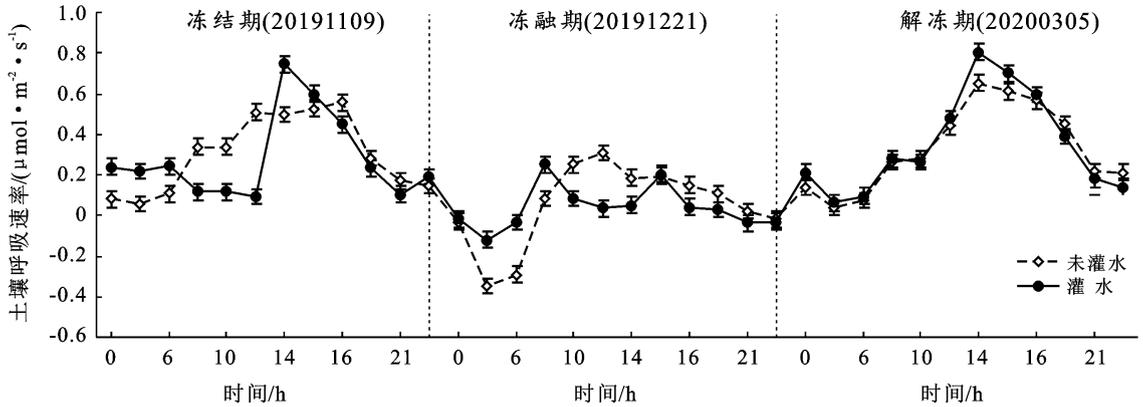


图 2 季节性冻融循环水分作用下小麦地块土壤呼吸速率曲线

2.1.2 玉米地块 在整个冻融时期, 玉米地块灌水与非灌水处理的土壤二氧化碳通量变化与温度变化趋势一致, 日均土壤二氧化碳通量在解冻期最大, 冻结期次之, 冻融期最小。对于土壤二氧化碳的日间变化, 也同样呈现出温度高, 土壤二氧化碳通量大的趋势, 日间变换呈现出单峰值的特点。对于未灌水玉米地块, 解冻期、冻结期和冻融期的日均土壤呼吸速率分别为 $0.36, 0.11$ 和 $0.04 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 呈现出依次变小的趋势, 与整个冻融循环中温度的变化相一致, 在整个冻融循环中小麦地块非灌水处理土壤 CO_2 整体都表现为源。对于对灌水处理的玉米地块, 解冻

期、冻结期和冻融期的日均土壤呼吸速率分别为 $0.21, 0.16$ 和 $0.06 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 变化情况也与冻融循环中温度的变化相一致。玉米灌水处理地块, 冻结期和冻融期分别高于未灌水处理 47.57% 和 35.43%, 解冻期低于未灌水处理 41.51%, 土壤呼吸速率随着温度的变化而剧烈地波动, 灌水处理促使玉米地块的土壤呼吸速率随温度变化波动更为剧烈, 呈现出峰值更高, 谷值更低的特点, 伴随着温度的变化, 白天土壤呼吸速率提升、夜间土壤呼吸速率下降, 在夜间极低温度时, 土壤呼吸速率变为负值, 促使二氧化碳由源转化为汇 (图 3)。

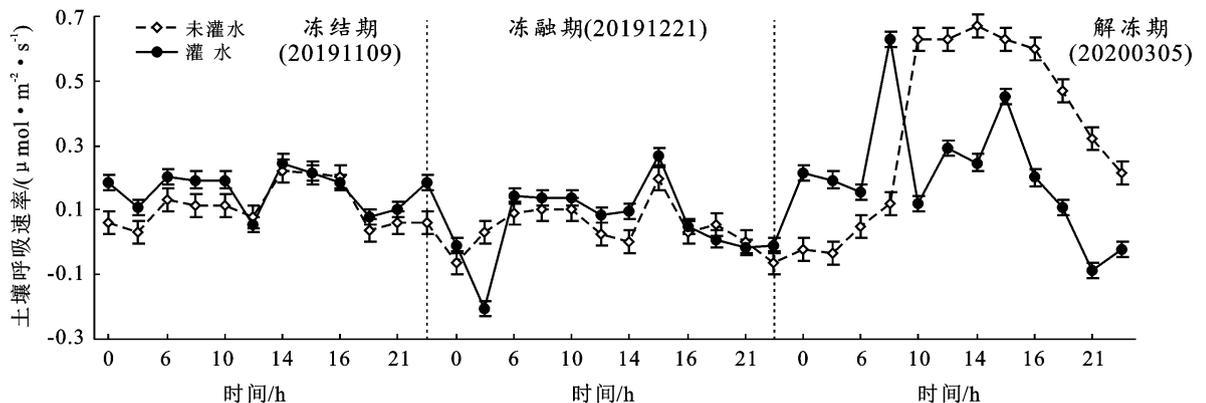


图 3 季节性冻融循环水分作用下玉米地块土壤呼吸速率曲线

2.1.3 不同土地利用方式 图 4 为未灌水季节性冻融循环未灌水处理不同土地利用方式土壤呼吸速率曲线。对于不同土地利用方式,未灌水小麦地块和玉米地块的土壤呼吸速率随着气温的变化而剧烈波动,且变化趋势较为一致,在冻结期小麦的土壤二氧化碳通量的峰值和均值都高于玉米地块的,冻融期小麦地

块的土壤二氧化碳通量的峰值和均值也都高于玉米地块的、但谷值低于玉米地块,解冻期小麦的土壤二氧化碳通量的峰值和均值都高于玉米地块的。整个冻融循环期,小麦地块的土壤二氧化碳通量均值比玉米地块高出 33.60%,两种未灌水土利用方式在整个冻融循环期土壤 CO₂ 整体都表现为源。

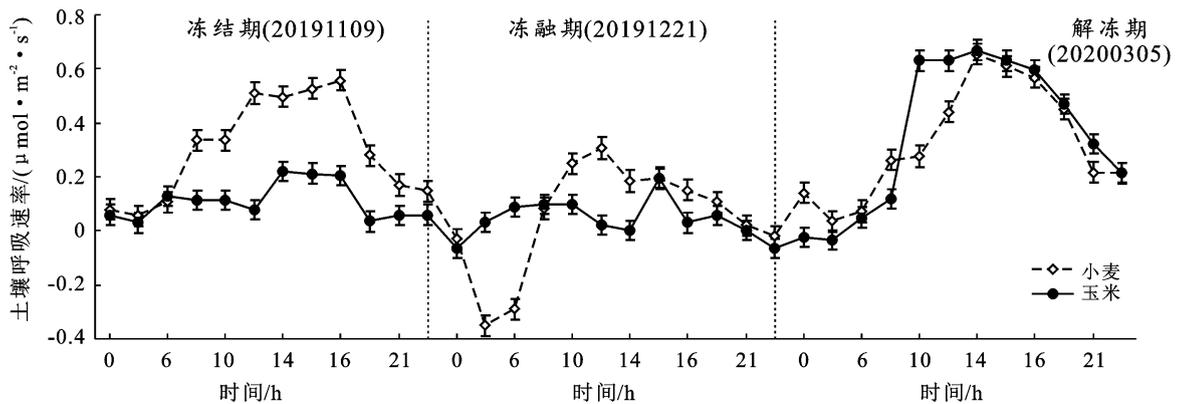


图 4 未灌水季节性冻融循环未灌水处理不同土地利用方式土壤呼吸速率曲线

灌水处理的小麦和玉米地块其土壤呼吸速率伴随着气温的变化而剧烈波动,且变化趋势一致。在冻结期小麦的土壤二氧化碳通量峰值和均值都高于玉米地块的、且峰值显著高于玉米地块,冻融期小麦地块的土壤二氧化碳通量均值和峰值都低于玉米地块、谷值高于玉米地块,解冻期小麦的土壤二氧化碳通量

峰值和均值都高于玉米地块、谷值高于玉米地块,说明解冻期在水分作用下小麦地块随温度的变化更为剧烈。整个冻融循环期,小麦地块的土壤二氧化碳通量均值比玉米地块高出 56.08%,两种土地利用方式在灌水处理作用下整个冻融循环期土壤 CO₂ 整体都表现为源(图 5)。

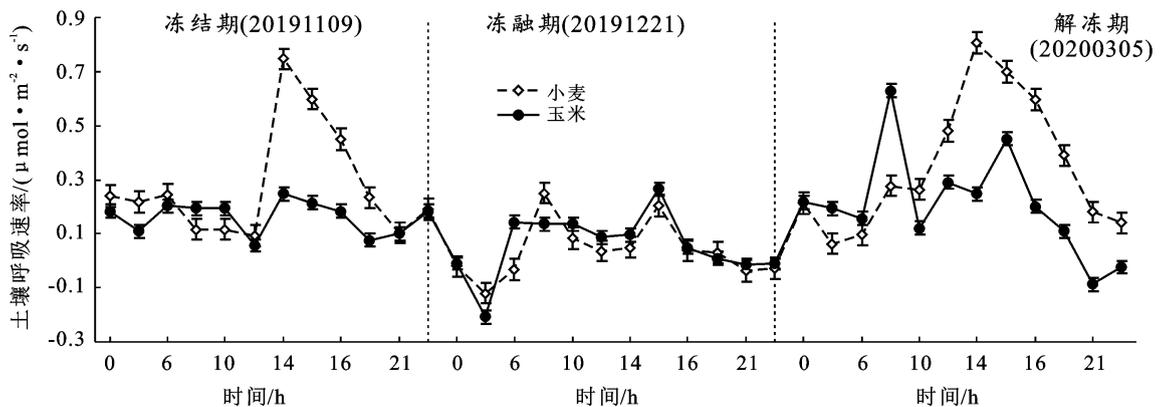


图 5 灌水处理季节性冻融循环灌水处理不同土地利用方式土壤呼吸速率曲线

2.2 夜间土壤呼吸对储水灌溉和冻融循环的响应

由于日间和夜间的光照和温度变化有显著差异,因此,试验同样监测了夜间土壤呼吸速率的变化情况,冻结期、冻融期和解冻期选择的时间点分别监测 0:00, 3:00, 6:00, 9:00 时的土壤呼吸速率,再求 3 次的平均值来分析灌水与非灌水处理的不同土地利用方式的夜间的土壤呼吸速率变化规律。

2.2.1 小麦地块 小麦地块冻结期夜间土壤呼吸速率随温度变化而波动,土壤呼吸速率最低值出现在 3:00,灌水处理的夜间平均土壤呼吸速率为 0.20 μmol/(m²·s),比非灌水处理高出 34.48%,且除 9:00 外,夜间各个时段都高于非灌水处理的地块。在冻结期,小麦地块灌水与非灌水处理土壤 CO₂ 整体都表现为源。冻融期土壤呼吸速率随温度的变化比

冻结期更加剧烈,夜间土壤呼吸速率基本为负值,灌水处理的夜间平均土壤呼吸速率为 $0.02 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,非灌水处理为 $-0.15 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,低于灌水处理的土壤呼吸速率,灌水与非灌水处理的土壤呼吸速率最低值都出现在 3:00,未灌水处理的土壤呼吸速率达到了 $-0.35 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,夜间各个时段灌水处理的土壤呼吸速率都高于非灌水处理的。在冻融期,小麦地块的灌水处理土壤 CO_2 整体都表现为源,非灌水处理表现为汇。解冻期灌水与非灌水处理地块的土壤呼吸速率随温度的变化而波动,最小值都出现在 3:00 时相应的温度也是最低值。灌水处理的夜间平均土壤呼吸速率为 $0.16 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,比非灌水处理高出 23.38%,且夜间各个时段都高于非灌水处理的地块。在解冻期,小麦地块的灌水与非灌水处理土壤 CO_2 整体都表现为源(图 6)。整个冻融时期,除冻结期 9:00 非灌水处理土壤呼吸速率高于灌水处理外,其余时段灌水处理的土壤呼吸速率均高于非灌水处理地块,说明土壤水分的增加有效提高了小麦地块的土壤呼吸速率,整个冻融期小麦地块的灌水与非灌水处理土壤 CO_2 整体都表现为源。

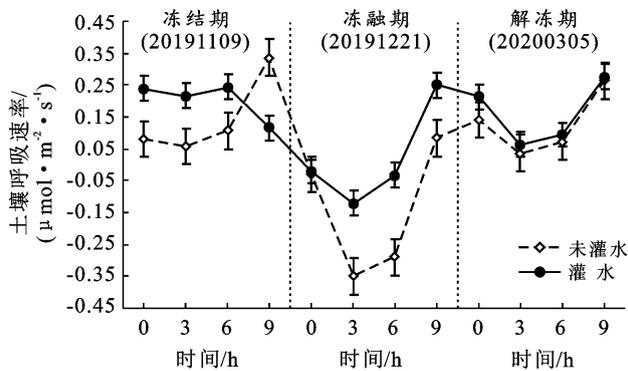


图 6 季节性冻融循环小麦地块水分作用下夜间土壤呼吸速率曲线

2.2.2 玉米地块 玉米地块灌水与非灌水处理地块土壤呼吸速率随温度的变化规律一致,土壤呼吸速率的最低值均出现在 3:00 时,灌水处理的夜间平均土壤呼吸速率为 $0.17 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,比非灌水处理高出 107%,且夜间各个时段都高于非灌水处理的地块。在冻结期,玉米地块的灌水与非灌水处理土壤 CO_2 整体都表现为源。在冻融期土壤的呼吸速率随温度的变化比冻结期更加剧烈,灌水处理夜间平均土壤呼吸速率为 $0.02 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,非灌水处理为 $0.04 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,高于灌水处理 100%,灌水与非灌水处理的土壤呼吸速率最低值都出现在 3:00 时,灌水处理的土壤呼吸速率达到了 $-0.21 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,除

3:00 时外,夜间各个时段灌水处理的土壤呼吸速率都高于非灌水处理的,说明灌水处理地块土壤呼吸速率随温度变化比非灌水处理更为剧烈,灌水处理提高了玉米地块夜间的土壤呼吸速率。在冻融期,玉米地块灌水与非灌水处理土壤 CO_2 整体都表现为源。解冻期灌水处理土壤呼吸速率随着温度的波动较非灌水处理显著,且灌水处理最大值出现在 9:00,为 $0.63 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,最小值出现在 6:00 为 $0.16 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,非灌水处理最小值出现在 3:00,为 $-0.03 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。最小值都出现在 3:00 时相应的温度也是最低值。灌水处理的夜间平均土壤呼吸速率为 $0.30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,比非灌水处理高出 956%,且夜间各个时段都显著高于非灌水处理的地块,灌水处理显著提高了土壤呼吸速率。在解冻期,小麦地块的灌水与非灌水处理土壤 CO_2 整体都表现为源。整个冻融时期,除冻结期 3:00 非灌水处理土壤呼吸速率高于灌水处理外,其余时段灌水处理的土壤呼吸速率均高于非灌水处理地块,说明土壤水分的提高有效地提高了小麦地块的土壤呼吸速率,灌水处理的土壤呼吸速率随着温度的变化,波动更为剧烈、对温度的响应更为明显。整个冻融期小麦地块的灌水与非灌水处理土壤 CO_2 整体都表现为源(图 7)。

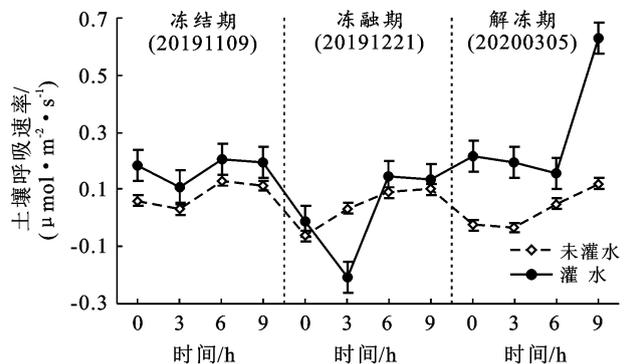


图 7 季节性冻融循环玉米地块水分作用下夜间土壤呼吸速率曲线

2.2.3 不同土地利用方式 对于不同的土地利用方式,未灌水处理小麦和玉米地块随温度的变化而波动,小麦地块的波动更加剧烈,整个冻融阶段小麦地块夜间的平均土壤呼吸速率为 $0.04 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,低于玉米地块 19.74%。小麦地块夜间土壤呼吸速率最大值为 $0.34 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 出现在冻结期,最小值为 $-0.35 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,出现在冻融期;玉米地块夜间土壤呼吸最大值为 $0.13 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,出现在冻结期,最小值为 $-0.06 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,出现在冻融期,未灌水处理小麦地块波动大于玉米地块。在冻结

期除 6:00 时外,其余时段小麦地块夜间土壤呼吸速率均高于玉米地块;冻融期 3:00 时和 6:00 的小麦地块土壤呼吸速率远低于玉米地块,但在 0:00 时和 9:00 时玉米地块略高于小麦地块;解冻期夜间各个时段小麦地块的土壤呼吸速率均高于玉米地块。说明在相同的土壤温度和水分条件下,土地利用方式对土壤呼吸速率具有一定的影响,未灌水小麦地块夜间土壤呼吸速率对温度的波动要显著于玉米地块,小麦地块的夜间土壤呼吸速率低于玉米(图 8)。

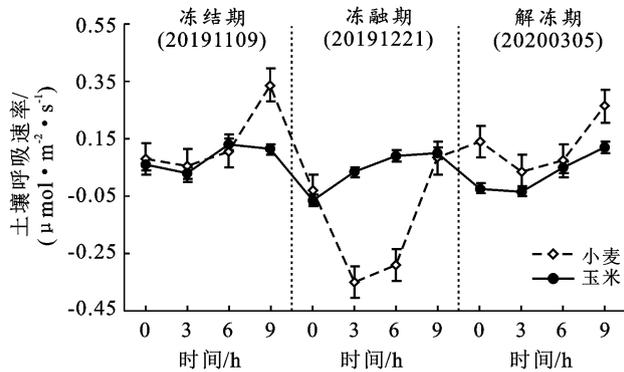


图 8 季节性冻融循环未灌水处理不同土地利用方式夜间土壤呼吸速率曲线

如图 9 所示,灌水处理的小麦地块和玉米地块随温度变化而波动,玉米地块的波动更加剧烈,土壤水分变化改变了不同土地利用方式的土壤呼吸速率波动。整个冻融阶段灌水处理小麦地块夜间平均土壤呼吸速率为 $0.13\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,低于玉米地块 26.49%。小麦地块夜间土壤呼吸最大值为 $0.25\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,最小值为 $-0.12\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,均出现在冻融期,玉米地块夜间土壤呼吸最大值为 $0.63\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,出现在冻融期,最小值为 $-0.21\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,出现在冻结期,灌水处理小麦地块的波动小于玉米地块。在冻结期除 9:00 时外,其余时段小麦地块夜间土壤呼吸速率均低于玉米地块;冻融期 0:00 时和 6:00 的小麦地块的土壤呼吸速率低于玉米地块,但在 3:00 时和 9:00 时小麦地块高于玉米地块;解冻期夜间各个时段小麦地块的土壤呼吸速率均低于玉米地块,尤其在 9:00 时,小麦地块显著低于玉米地块。在相同的土壤温度和水分条件下,土地利用方式对土壤呼吸速率具有一定的影响,灌水玉米地块夜间土壤呼吸速率对温度的波动显著于小麦地块,小麦地块的夜间土壤呼吸速率低于玉米地块。

3 讨论

在极端干旱农田生态系统的冻融循环过程中,土

壤呼吸速率随温度变化而剧烈波动,且变幅很大,同时与温度的变化趋势一致,与辛贵民、秦璐等^[20-23]的研究成果一致。不同的土地利用方式,在水分的作用下,土壤呼吸速率都呈现出解冻期大于冻结期大于冻融期的规律,早春冻土融化阶段的土壤呼吸速率要明显高于深冬冻结期的呼吸速率。对于灌水处理的地块,明显地表现出在水分作用下土壤二氧化碳通量随着温度的波动更加剧烈,对比未灌水处理地块呈现出峰值更高、谷值更低的趋势。不同土地利用方式的土壤呼吸速率变化趋势一致,但呼吸速率值有一定的差异,小麦地块大于玉米地块(图 10)。同时,冻融循环期土壤 CO_2 整体都表现为源^[21],在夜间极低温度时,土壤呼吸速率变为负值,促使二氧化碳由源转化为汇,在极端干旱区土壤的二氧化碳通量出现碳汇现象可能与水分作用下冬季低温有关。

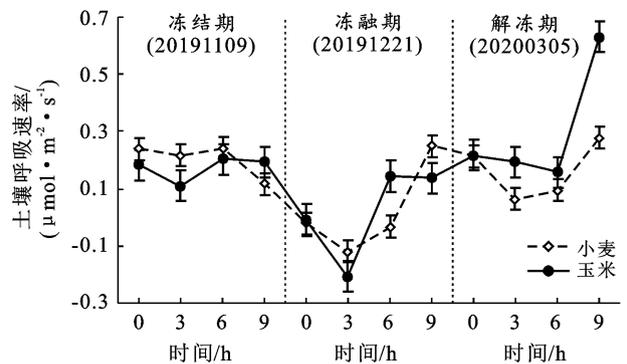


图 9 季节性冻融循环灌水处理不同土地利用方式夜间土壤呼吸速率曲线

河西地区的冬灌即冻融前灌水叠加季节性的冻融循环作用,促使土壤含水量增加、伴随着间接性的融雪水将地面营养物质带入土壤中,可有效促进土壤微生物的活性^[24],从而增加土壤的呼吸速率。在水分的作用下的冻融循环作用,会促使土壤团聚体破碎、并释放出大量的活性有机碳供微生物利用,促进矿化作用的发生,促进了微生物的活性,会进一步增加土壤呼吸速率^[25-27],因此在水分作用下的季节性冻融循环过程非常有利于作物的生长,提高粮食的产量。同时,水分作用下的冻融循环过程会明显增加土壤的碳排放,从而增加土壤向大气中排放的二氧化碳,改变了极端干旱区农田生态系统的碳循环,在未来的研究中可继续探究不同灌水量和灌水时间对土壤碳循环的影响,为极端干旱区农田生态系统碳循环的研究与模型的构建提供科学的理论与实践基础。而全球的持续变暖也同样影响着极端干旱区冬季土壤的冻融过程,温度的上升加上冻融交替作用会促使

土壤呼吸速率增加,在灌水作用下,会促使土壤呼吸速率进一步增加,因此会消耗更多地土壤碳储量,势必会增加空气中的二氧化碳含量,来进一步加剧全球变暖,水分作用下的冻融循环正反馈影响着全球的升温趋势^[28-29]。因此,极端干旱区农田生态系统在水分作用下的冻融循环过程会促使土壤呼吸速率增加,有效提高微生物活性,对作物生产与增产十分有利,但同时会消耗更多地土壤碳储量,增加了向空气中排放的二氧化碳量。本次试验观测土壤呼吸是有时间间隔的,在后续的野外试验中若采取不间断监测,将会为土壤呼吸变化规律研究和储水灌溉机理揭示提供更有力的数据支撑。

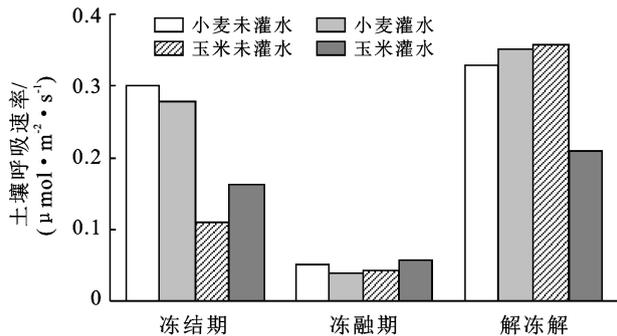


图 10 不同水分条件下各土地利用方式和冻融循环期的土壤呼吸速率

4 结论

(1) 水分作用下的季节性冻融交替循环作用,促使极端干旱区农田生态系统土壤呼吸速率增强,增加了土壤的碳排放;储水灌溉促使土壤二氧化碳通量具有随温度波动更加剧烈、峰值更高、谷值更低的特点,储水灌溉调控了整个冻融期土壤呼吸的过程,改变了极端干旱区农田生态系统的碳循环。

(2) 在极端干旱区农田生态系统冻融循环过程中,土壤呼吸速率随温度变化而剧烈波动、且变幅很大,与温度的变化趋势一致。不同土地利用方式在水分的作用下,土壤呼吸速率都呈现出解冻期大于冻结期大于冻融期的规律。不同的土地利用方式对水分和温度的响应程度不同,玉米土壤呼吸速率对灌水处理的响应比小麦明显,玉米地块灌水处理后土壤呼吸速率的提升要快于小麦地块。

(3) 冻融循环期土壤 CO₂ 整体都表现为源,灌水与未灌水处理的小麦和玉米地块在冻结期、冻融期和解冻期 3 种时期内土壤 CO₂ 都表现为源,但在冻融期非灌水处理的小麦地块则表现为汇。在夜间极低温度时,土壤呼吸速率变为负值,促使二氧化碳由源转化为汇。

(4) 在夜间未灌水处理小麦地块和玉米地块随温度的变化而波动,小麦地块的波动比玉米地块更加剧烈,整个冻融阶段小麦地块夜间平均土壤呼吸速率低于玉米地块 19.74%。在相同的土壤温度和水分条件下,土地利用方式对土壤呼吸速率具有一定影响,未灌水小麦夜间土壤呼吸速率对温度的波动要显著于玉米,灌水玉米地块夜间土壤呼吸速率对温度的波动要显著于小麦地块的。

[参 考 文 献]

- [1] 张新民,马忠民,胡想全,等.节水型冬季储水灌溉技术及其应用前景[J].中国农村水利水电,2007,19(3):48-49,54.
- [2] 丁林,金彦兆,李元红,等.石羊河流域农田休闲期耗水规律研究[J].中国生态农业学报,2012,20(4):447-453.
- [3] 柴存英,王仰仁,王晓东.冬小麦储水灌溉节水增产效果分析[J].山西水利科技,1999,29(1):93-95.
- [4] 谢忠奎,王亚军,祁旭升,等.河西绿洲区储水灌溉节水技术研究[J].中国沙漠,2000,20(4):451-454.
- [5] 姚宝林,景明,施炯林.覆盖免耕在休闲期的节水和生育期的调温效应[J].甘肃农业大学学报,2005,40(2):208-211.
- [6] 张金霞,施炯林,刘成元.绿洲灌区留茬覆盖免耕储水灌溉在休闲期的节水效应[J].甘肃农业大学学报,2007,42(1):114-118.
- [7] 王峰,杨明庆,景明,等.留茬覆盖储水灌溉对豌豆出苗及水分利用效率的影响[J].沈阳农业大学学报,2007,38(1):110-113.
- [8] 张敬平.反季节储水灌溉土壤水分有效性分析[J].山西水利,2007,23(1):66-67.
- [9] 李玉山,喻宝屏.土壤深层储水冬小麦产量效应的研究[J].土壤学报,1980,18(4):383-388.
- [10] Bing Hui, He Ping, Zhang Ying. Cyclic freeze-thaw as a mechanism for water and salt migration in soil [J]. Environ Earth Sci, 2015,74(1):675-681.
- [11] Wang Yang, Li Xiaoyan, Wu Xiuchen, et al. Temporal changes of soil respiration in a subalpine meadow in the Heihe River Basin, Northwest China [J]. Catena, 2019,178(7):267-275.
- [12] Ouyang Wei, Lai Xuehui, Li Xia, et al. Soil respiration and carbon loss relationship with temperature and land use conversion in freeze-thaw agricultural area [J]. Science of the Total Environment, 2015, 533 (11): 215-222.
- [13] Yan Guoyong, Xing Yajuan, Xu Lijian, et al. Nitrogen deposition may enhance soil carbon storage via change of soil respiration dynamic during a spring freeze-thaw cycle period [J]. Scientific Reports, 2016,6(6):29134.
- [14] Liu Peng, Zha Tianshan, Jia Xin, et al. Diurnal Freeze-thaw cycles modify winter soil respiration in a desert shrub-land ecosystem [J]. Forests 2016,7(8):161.