

干湿交替对新疆绿洲农田土壤 CO₂ 排放的影响

牛百成^{1,2}, 赵成义¹, 冯广龙¹, 唐钢梁^{1,2}

(1. 中国科学院 新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 分析不同土壤水分变化及干湿交替对土壤 CO₂ 排放的影响, 为绿洲农田土壤碳循环提供科学依据。[方法] 选取新疆绿洲棉田土壤, 通过室内控制模拟试验, 以及用气相色谱仪分析 CO₂ 浓度。[结果] (1) 与 60%WFPS(土壤充水孔隙度)相比, 40%WFPS 对土壤 CO₂ 排放起到了显著的抑制作用 ($p < 0.05$), 而 80%WFPS 对土壤 CO₂ 排放无显著性影响 ($p < 0.05$)。培养结束时, 与 60%WFPS 的土壤 CO₂ 累积排放量相比, 40%WFPS 的土壤 CO₂ 累积排放量降低 26% ($p < 0.05$), 而 80%WFPS 的土壤 CO₂ 累积排放量仅增加 0.04% ($p > 0.05$)。 (2) 多次干湿交替循环后, 干湿交替处理下的土壤 CO₂ 累积排放量显著低于恒湿处理。在不同干旱强度处理中, 重度干旱(SD)处理对土壤 CO₂ 排放速率响应程度大于适度干旱(MD)处理, 但多次干湿交替循环后, SD 处理下的土壤 CO₂ 累积排放量却显著小于 MD 处理。随干湿交替循环次数的增加, 干湿交替对土壤 CO₂ 排放速率的影响显著降低, 特别是对土壤 CO₂ 排放速率最高值的影响最大。[结论] 在新疆绿洲棉田土壤中, 干湿交替能降低土壤 CO₂ 排放量, 降低量随干旱强度的增大而增大。

关键词: 绿洲农田; 土壤水分; 干湿交替; 土壤 CO₂ 排放

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)03-0074-07

中图分类号: S152.7

文献参数: 牛百成, 赵成义, 冯广龙, 等. 干湿交替对新疆绿洲农田土壤 CO₂ 排放的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 74-80. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.014

Effects of Alternate Drying and Wetting on Soil CO₂ Emissions in Oasis Farmland of Xinjiang Region

NIU Baicheng^{1,2}, ZHAO Chengyi¹, FENG Guanglong¹, TANG Gangliang^{1,2}

(1. State Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment, Xinjiang

Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang

830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] To evaluate the effects of soil water change and alternate drying and wetting on soil CO₂ emissions in order to provide basis for soil carbon cycle in oasis farmland. [Methods] Soil samples were taken from oasis farmland in Xinjiang region, which was used for incubation experiment in laboratory. CO₂ concentration was analyzed by meteorological chromatograph. [Results] (1) Compared with 60% WFPS (water filling soil porosity), 40% WFPS had a significant inhibiting effect on soil CO₂ emissions ($p < 0.05$), while 80% WFPS was no significant influence on soil CO₂ emissions ($p < 0.05$). At the end of the experiment, compared with 60% WFPS, accumulation of soil CO₂ emissions of 40% WFPS was reduced by 26% ($p < 0.05$), while accumulation of soil CO₂ emissions of 80% WFPS was increased by 0.04% ($p > 0.05$). (2) After multiple wet dry cycling, soil CO₂ accumulative emissions under alternate drying and wetting condition was significant lower than that of constant moisture treatment ($p < 0.05$). Under different drought intensity, the effect of severe drought on soil CO₂ emission rate was higher than that of the moderate drought. But after multiple wet dry cycling, the effect of severe drought on the accumulation of soil CO₂

收稿日期: 2015-03-26

修回日期: 2015-06-16

资助项目: 中德科学基金研究交流中心项目“塔里木盆地绿洲棉田土壤固碳研究”(GZ867)

第一作者: 牛百成(1987—), 男(汉族), 甘肃省会宁市人, 在读硕士, 主要从事农田土壤碳循环研究。E-mail: niubch@foxmail.com.

通讯作者: 赵成义(1966—), 男(汉族), 新疆维吾尔自治区玛纳斯县人, 博士, 主要从事干旱区流域水文生态学理论及应用, 水文与生态过程模拟, 农田水利, 区域土壤水盐运动及水碳耦合过程与模拟, 区域生态环境质量演变与评价等方面的研究。E-mail: zcy@ms.xjb.ac.cn.

emissions was lower than that of moderate drought ($p < 0.05$). With the increased of drying and wetting alternation, the effects on soil CO₂ emission rate was reduced significantly, especially for maximum soil CO₂ emission rate. [Conclusion] Drying and wetting alternation can reduce soil CO₂ emissions, and the amount of reduction increases with the increasing of drought intensity in Xinjiang oasis soil.

Keywords: oasis farmland; soil moisture; drying and wetting alternation; soil CO₂ emissions.

农田土壤是陆地生态系统中最大的碳库,其碳储量约为 1 500 Pg^[1]。土壤呼吸是指土壤释放 CO₂ 的过程,严格意义上讲,指的是未扰动的土壤产生 CO₂ 的所有代谢过程,包括土壤微生物呼吸、根系呼吸和土壤动物呼吸 3 个生物过程以及一个含碳矿物质的化学氧化作用的非生物学过程^[2]。CO₂ 是主要的温室气体之一,每年土壤排放到大气中的 CO₂ 量约 79.3~81.8 Pg^[3]。已有研究表明,土壤温度和湿度是影响土壤排放 CO₂ 的主要环境因素^[2,4-5]。目前针对干旱区绿洲农田土壤 CO₂ 排放的研究,主要集中在土壤温度^[6]、湿度^[7]和覆膜^[8]等对土壤 CO₂ 排放的影响。

水分胁迫在干旱地区非常普遍,干燥的土壤遇到降水或者灌溉等事件后,会导致土壤微生物发生变化^[9],从而影响土壤 CO₂ 排放。新疆绿洲农田的生产主要依靠灌溉,灌溉方式以漫灌和滴灌为主,受灌溉次数和高强度蒸发的影响,在农田中就形成了干湿交替现象,而这种干湿交替过程会对土壤 CO₂ 排放产生影响^[10]。Miller 等^[11]的研究结果表明干湿交替处理能增加土壤 CO₂ 排放量;但也有学者^[12-13]研究得出不同结果,干湿交替处理的土壤 CO₂ 累积排放量均低于恒湿处理;而 Kruse 等^[14]认为干湿交替处理对土壤 CO₂ 累积排放量没有显著的影响。目前针对干湿交替处理对土壤 CO₂ 排放的影响的研究结论争议较大,其次,干湿交替对新疆绿洲农田土壤 CO₂ 排放的影响研究鲜有报道。

本文拟以新疆棉田为研究对象,通过室内模拟试验,分析不同水分梯度和干湿交替强度对新疆绿洲农田土壤 CO₂ 排放的影响,以期对新疆绿洲农田土壤碳循环及碳平衡的研究提供重要的基础数据,以及在土壤水分交替变化情况下,对于研究和掌握土壤碳循环的变化规律提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自新疆阿克苏绿洲棉田试验地(80°45'E,40°37'N,海拔 1 028 m,站区多年平均气温 11.2 °C,年均降水量 45.7 mm,无霜期 207 d),土壤类型为灌耕土。试验选用棉田表层 0—20 cm 土壤,

自然风干后除去杂物,研磨并过 2 mm 的筛子。试验地的土壤质地为粉砂土壤(44%沙粒、50%粉粒和 6%黏粒),0—20 cm 的土壤 pH 值为 7.16;土壤容重 1.32 g/cm³;有机质为 6.96 g/kg;全氮含量为 0.48 g/kg。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验设置了 3 个不同水分梯度(水分含量分别为 40%WFPS,60%WFPS 和 80%WFPS,其中 WFPS 表示土壤充水孔隙度,即充水孔隙体积占总孔隙体积的百分数)和 2 个不同强度的干湿交替,即重度干旱(用 SD 表示,水分含量设 40%WFPS)和适度干旱(用 MD 表示,水分含量设 60%WFPS),共计 5 个处理,每个处理重复 3 次。在 25 °C 恒温培养箱中培养,培养期共 64 d。在整个培养过程中,3 个不同水分梯度的水分含量始终保持在 40%,60%和 80%WFPS。2 个不同强度的干湿交替处理总共 4 次循环,每次循环周期为 16 d。

在 SD 处理中,每次干湿交替过程都包括 3 个时期。湿润期:快速湿润后培养 4 d(WFPS 值保持在 80%);干燥期:WFPS 值从 80%降到 60%,培养 4 d;接着 WFPS 值又从 60%降到 40%,培养 4 d;干旱期:WFPS 值保持在 40%,培养 4 d;在 MD 处理中,每次干湿交替过程中也经历 3 个时期。湿润期:快速湿润后培养 4 d(WFPS 值保持在 80%);干燥期:WFPS 值从 80%降到 60%,培养 4 d;干旱期:WFPS 值保持在 60%,培养 8 d。恒湿处理水分含量为 80%WFPS(与不同水分梯度处理共用)。干燥期:通过加入定量的硅胶干燥剂进行缓慢干旱(通过早期试验计算出,在 2 次取样之间(4 d)加入定量的干燥剂,能使 WFPS 值从 80%降到 60%或者 60%降到 40%来完成缓慢干旱)。硅胶干燥剂装进一次性纸杯中,并在纸杯四周扎出许多小孔(小孔直径小于干燥剂颗粒直径,防止干燥剂漏出,如图 1 所示)。

1.2.2 试验培养 称取 100 g 风干土,均匀置于 730 ml 玻璃瓶中,试验装置见图 1。该装置参考俞永祥等^[15]的研究做了一定的改进。试验前期加水至干燥风干土,使土壤水分含量达到 80%WFPS,在温度为 25 °C 的培养箱中培养 16 d,用于恢复土壤微生物活性为干湿交替试验开始做准备。试验开始时 3 个

不同梯度的土壤水分含量,分别为 40% WFPS, 60% WFPS 和 80% WFPS,而 SD 和 MD 处理的土壤水分含量分别为 40% WFPS 和 60% WFPS(在湿润期时,通过加入蒸馏水使 SD 和 MD 处理的土壤水分含量恢复到 80% WFPS)。

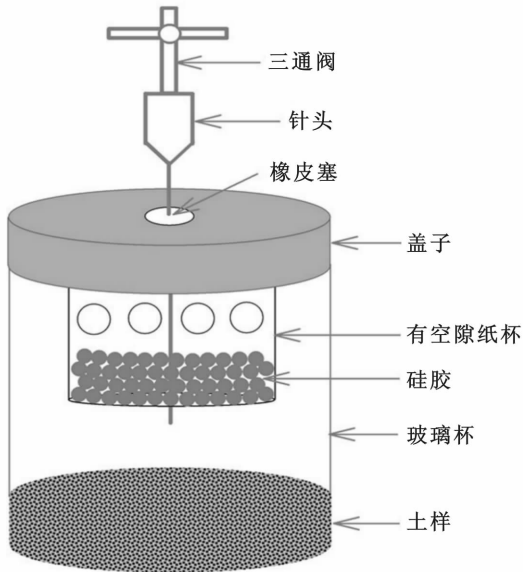


图 1 土壤干湿交替模拟装置

试验开始后,每隔 4 d 采集 1 次气体样品,共计采集 16 次。采集气体时间为 10:00—12:00。采样流程:采用 50 ml 注射器通过培养瓶盖上三通阀抽取 50 ml 气体。操作完成后打开培养瓶盖,在培养瓶顶部煽动,使培养瓶内空气流动,目的是瓶内 CO_2 浓度与室内空气接近^[9],大约 15 min 后,通过称重法,使用注射器喷洒蒸馏水进行再湿润,使 3 个不同梯度

的土壤水分含量分别恢复到 40% WFPS, 60% WFPS 和 80% WFPS,以及使 SD 和 MD 处理的土壤水分含量恢复到 80% WFPS,在需要缓慢干燥的培养瓶里加入定量的干燥剂后拧紧瓶盖继续置于 25 °C 恒温培养箱中培养。

1.3 CO_2 测定

抽取的气体样品使用气相色谱仪(Agilent 7890 A, Agilent, Palo Alto, USA)进行测定。 CO_2 气体样品分析流程:气体样品中的 CO_2 ,主要经过进样、分离和检验 3 个过程,最终将 CO_2 成分推入镍触媒转化器,在 375 °C 高温下被 H_2 还原定量转化成 CH_4 后被 FID 检验。

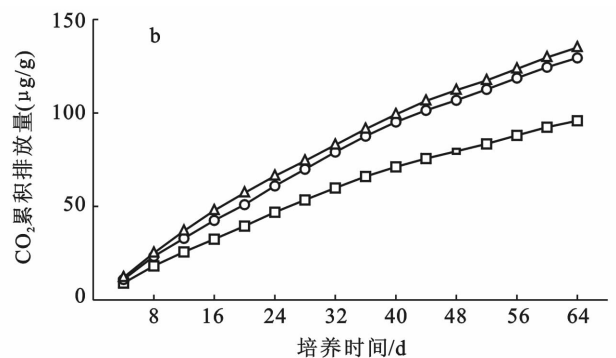
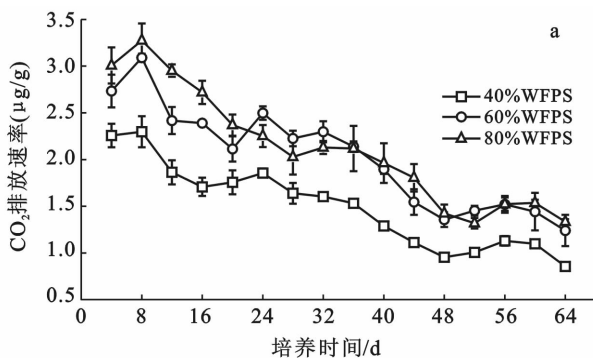
1.4 数据处理

采用 SPSS 16.0 软件进行方差分析(ANOVA),差异显著性水平($p < 0.05$)通过最小显著差数法(LSD)进行检验,并采用 Origin 9.0 软件绘图。土壤 CO_2 排放速率以平均值加减标准差(mean \pm SD)表示。

2 结果与分析

2.1 不同水分梯度对土壤 CO_2 排放的影响

整个培养期土壤 CO_2 排放速率随 WFPS 值增大而增大(图 2a),但 20 d 之后,60% WFPS 和 80% WFPS 处理下的土壤 CO_2 排放速率的数值接近。60% WFPS 和 80% WFPS 处理下的土壤 CO_2 排放速率显著大于 40% WFPS 的土壤 CO_2 排放速率。在整个培养过程中,不同水分梯度处理下的土壤 CO_2 排放速率都趋于下降,培养初期不同水分梯度处理下土壤 CO_2 排放速率分别是培养末期的 2.25, 2.20, 2.64 倍。



注:不同处理间土壤 CO_2 累积排放量间多重比较是在 5% 水平下进行。下同。

图 2 不同水分梯度对土壤 CO_2 排放速率(图 2a)和土壤 CO_2 累积排放量(图 2b)的影响

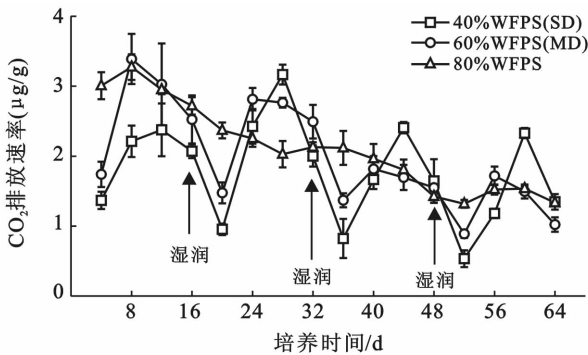
整个培养过程中,土壤 CO_2 累积排放量随 WFPS 值增大而增大(图 2b)。培养结束时,80% WFPS 处理下的土壤 CO_2 累积排放量(以 C 计)约为 135 $\mu\text{g/g}$,分别是 60% WFPS 和 40% WFPS 处理下的 1.04,

1.4 倍。培养过程中,3 个不同水分梯度处理下的土壤 CO_2 累积排放量的增长速率均趋于平缓,而 40% WFPS 处理下的土壤 CO_2 累积排放量的增长速率在 40 d 后变得更加平缓。80% WFPS 和 60% WFPS 处

理下的土壤 CO₂ 累积排放量之间无显著性差异 ($p > 0.05$), 但均显著大于 40% WFPS 处理下的土壤 CO₂ 累积排放量 ($p < 0.05$)。

2.2 干湿交替对土壤 CO₂ 排放速率的影响

干湿交替处理下的土壤 CO₂ 排放速率表现为: 第 1 个循环的湿润期 (0~4 d), SD 和 MD 处理下的土壤 CO₂ 排放速率分别减小到 1.39 和 1.74 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$, 显著低于恒湿处理。与第 1 个循环相比, 第 2, 3 和 4 个循环中, SD 和 MD 处理下的土壤 CO₂ 排放速率的最低值, 分别降低了 2.17, 2.44, 3.11, 1.71, 1.82, 1.74 倍 (图 3)。其中, 4 个干湿交替循环中 SD 处理下的土壤 CO₂ 排放速率的最低值与 MD 处理下的土壤 CO₂ 排放速率最低值相比, 分别降低了 20%, 35%, 40%, 40%。



注: SD 为重度干旱; MD 为适度干旱; WFPS 为土壤充水孔隙度。下同。

图 3 干湿交替对土壤 CO₂ 排放速率的影响

在 SD 处理中, 第 1 次循环的干燥期 (8~12 d), 土壤 CO₂ 排放速率达到这个循环的最高值, 约为 2.38 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$ 。其余 3 次循环中土壤 CO₂ 排放速率的最高值出现的时间与第 1 次循环类似。SD 处理中除第 1 次循环外 (第 1 次土壤 CO₂ 排放速率的最高值远小于其余 3 次), 第 2 次循环的干燥期 (24~28 d), 土壤 CO₂ 排放速率的最高值分别是第 3, 4 次循环干燥期 (第 3 次: 40~44 d, 第 4 次: 56~60 d) 土壤 CO₂ 排放速率的最高值的 1.31, 1.37 倍。在 MD 处理中, 第 1 次循环的干燥期 (4~8 d) 土壤 CO₂ 排放速率也达到这个循环的最高值, 约为 3.39 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$ 。其余 3 次循环中土壤 CO₂ 排放速率的最高值出现的时间也与第 1 次循环类似。MD 处理下的第 1 次循环的干燥期 (4~8 d) 土壤 CO₂ 排放速率的最高值分别是第 2, 3 和 4 次循环干燥期 (第 2 次: 20~24 d, 第 3 次: 36~40 d, 第 4 次: 52~56 d) 土壤 CO₂ 排放速率的最高值的 1.18, 1.27, 1.96 倍。在每次循环中, 与 MD 处理相比, SD 处理下土壤 CO₂ 排放速率的最高值落后 4 d

出现。4 个干湿交替循环中, SD 处理中除第 1 次循环外, 其余 3 次循环中土壤 CO₂ 排放速率的最高值与 MD 处理下的土壤 CO₂ 排放速率的最高值相比分别提高了 12.4%, 32.4% 和 29.7%。

随干湿交替循环次数的增加, SD 和 MD 处理下的土壤 CO₂ 排放速率在不同培养时期存在一定的差异性: 在 SD 处理中, 湿润期、干燥期和干早期之间的土壤 CO₂ 排放速率均存在显著性差异。在 MD 处理中, 湿润期与干燥期和干早期之间的土壤 CO₂ 排放速率均存在显著性差异, 而干燥期和干早期之间的土壤 CO₂ 排放速率的显著性差异变化趋势不一致。

随着干湿交替循环次数的增加, 对 SD 和 MD 处理下的土壤 CO₂ 排放速率的最高值和最低值的影响均呈显著降低的趋势 (表 1)。虽然 SD 和 MD 处理下的土壤 CO₂ 排放速率的最低值变化趋势存在差异 (第 3 次循环), 但总的来说干湿交替循环次数对其影响趋势大体一致。干湿交替循环次数对土壤 CO₂ 排放速率的最高值的影响均呈现降低的趋势, 特别是第 3 和第 4 次循环的土壤 CO₂ 排放量最高值之间已不存在显著性差异, 表明对土壤 CO₂ 排放速率的影响程度随干湿交替循环次数的增加而降低。

表 1 干湿交替循环次数对重度干旱 (SD) 和适度干旱 (MD) 的 CO₂ max 和 CO₂ min 的影响

循环次数	重度干旱		适度干旱	
	CO ₂ min	CO ₂ max	CO ₂ min	CO ₂ max
1	1.37 ± 0.12 ^a	2.38 ± 0.38 ^a	1.74 ± 0.06 ^a	3.39 ± 0.16 ^a
2	0.95 ± 0.08 ^b	3.16 ± 0.14 ^b	1.47 ± 0.05 ^b	2.82 ± 0.15 ^b
3	0.82 ± 0.14 ^{bc}	2.41 ± 0.29 ^a	1.37 ± 0.1 ^b	1.82 ± 0.1 ^c
4	0.53 ± 0.07 ^c	2.33 ± 0.05 ^a	0.88 ± 0.05 ^c	1.72 ± 0.1 ^c

注: CO₂ min 和 CO₂ max 代表 SD 或 MD 处理土壤 CO₂ 排放速率的最低值和最高值。同一个处理 (SD 或 MD) 中的 CO₂ min 或 CO₂ max 之间多重比较是在 5% 水平下进行。

2.3 干湿交替对土壤 CO₂ 累积排放量的影响

试验过程中, 干湿交替处理相对于恒湿处理显著降低了土壤 CO₂ 累积排放量 (图 4)。SD 和 MD 处理下的土壤 CO₂ 累积排放量, 在每次再湿润后增加趋于变缓, 而在干燥期迅速增加。其中 MD 处理下的土壤 CO₂ 累积排放量变化幅度低于 SD 处理。此外, 土壤 CO₂ 累积排放量增长速率随着干湿交替循环次数的增加而降低。培养结束后, 不同处理下的土壤 CO₂ 累积排放量差异性显著 ($p < 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同水分梯度对土壤 CO₂ 排放的影响

土壤水分含量是影响土壤 CO₂ 排放的重要影响

因子之一^[16]。已有学者^[17]研究表明,土壤微生物活性最强的 WFPS 值为 60%,这时土壤 CO₂ 排放量最大。当 WFPS 值低于 60%时,就会抑制土壤微生物的活性,而当高于 60%时,又会降低土壤的氧气含量,从而影响需氧性微生物的活性。在本文中,40% WFPS 处理显著抑制了土壤 CO₂ 排放速率,表现为整个培养过程中 40% WFPS 处理土壤 CO₂ 排放速率显著低于 60% WFPS 和 80% WFPS 处理,与 Linn 等^[17]的结果相接近。60% WFPS 和 80% WFPS 处理之间土壤 CO₂ 平均排放速率无显著性差异 ($p > 0.05$),可能 80% WFPS 处理从不同程度上抑制需氧微生物的活性^[17]。

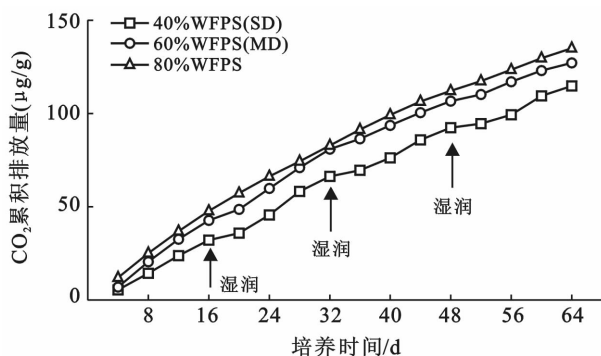


图 4 干湿交替对土壤 CO₂ 积累排放量的影响

60% WFPS 和 80% WFPS 处理下的土壤 CO₂ 累积排放量显著高于 40% WFPS 处理下的土壤 CO₂ 累积排放量 ($p < 0.05$, 图 2b)。可能原因是 40% WFPS 的土壤溶液中可溶性有机碳扩散受到抑制,这时土壤微生物处于底物缺乏状态^[18]。在 Linn 等^[17]的研究中也认为,当土壤水分含量低于某一水平时,土壤 CO₂ 排放量就会下降的主要原因为土壤水膜上的水溶性有机碳的利用率降低。其次,本文中 60% WFPS 和 80% WFPS 处理之间的土壤 CO₂ 累积排放量没有显著差异性 ($p > 0.05$),说明在 60% WFPS 和 80% WFPS 之间出现了最适的土壤 CO₂ 排放速率的 WFPS 值,因此 80% WFPS 可能对土壤 CO₂ 排放产生抑制作用。虽然本文没有对土壤 CO₂ 排放最适的 WFPS 值进行研究,通过试验数据分析可基本认为土壤 CO₂ 排放最适的 WFPS 值与 Ding 等^[19]的研究结果比较接近。

3.2 干湿交替对土壤 CO₂ 排放速率的影响

在干燥期,SD 和 MD 处理下的 WFPS 值分别会从 80% 降到 40% 和 80% 降到 60%。由于土壤水分含量的降低,可能影响土壤微生物的活性和土壤中碳的累积矿化量^[12,20],也可能对土壤微生物的流动性起到限制作用^[21]以及抑制土壤微生物对营养物质的

利用^[22],以上这些都可能对土壤微生物的活性产生抑制作用。很多研究表明,再湿润干燥的土壤会激发土壤 CO₂ 排放速率^[12-13],而在本文中,再湿润不同于旱程度的土壤(SD 和 MD 处理),土壤 CO₂ 排放速率却是下降的,显著低于恒湿处理,与 Zhang^[23]的研究结果相似。同时出现土壤 CO₂ 排放速率的最低值(SD < MD),直到开始缓慢干燥时才有所上升(图 3a)。原因可能是再湿润后 WFPS 值达到 80% 时抑制了土壤微生物的活性^[17,19]以及干旱期间大量土壤微生物死亡造成的。另一种原因也可能是由于土壤初始状态比较干燥,当快速湿润后,可能在最初的一段时间里会发生了表层土壤湿润而下层土壤还处于干旱状态,造成土壤的干湿不均匀,所以也可能会出现这种情况^[24]。但本文认为主要是由土壤过湿和干旱时大量的土壤微生物死亡造成土壤 CO₂ 排放速率下降的主要原因。每次干湿交替过程中 SD 处理下的土壤 CO₂ 排放速率的最低值小于 MD 处理的,可能由于 SD 处理比 MD 处理的土壤更加干燥,造成更多土壤微生物死亡^[23],因此当再湿润时 SD 处理下的土壤 CO₂ 排放速率的最低值小于 MD 处理的。

每次循环的干燥期,SD 和 MD 处理中均出现土壤 CO₂ 排放速率的最高值(SD > MD, 图 3a)。说明土壤微生物的活性和数量在各自的这个时期基本恢复了^[20],因此快速增加了对土壤有机碳和干旱时期死亡的微生物残体以及由于干湿交替循环引起的土壤团聚体裂解而暴露出有机质的矿化量^[25-27],迅速增加了土壤 CO₂ 排放速率,因此出现干湿交替过程中的土壤 CO₂ 排放速率的最高值。而 SD 处理下的土壤 CO₂ 排放速率的最高值大约落后 MD 处理 4 d,可能由于 SD 处理下的土壤比 MD 处理下的更加干燥,所以 SD 处理可能造成了更多的土壤微生物死亡^[13,23-24],当再湿润时,在 SD 处理中微生物的数量要达到原来微生物的活性和数量水平,可能就要比 MD 处理花费更长的时间(本文 4 d 左右)。从干湿交替强度对土壤 CO₂ 排放速率的影响来看,SD 处理下的土壤 CO₂ 排放速率的最高值要大于 MD 处理,这个结果与 Liu 等^[28]的结论非常相似,再湿润前土壤含水量越低,再湿润时对土壤 CO₂ 排放速率的影响越大。

在本文中,SD 处理下的第 1 次循环与其余 3 次循环相比,土壤 CO₂ 排放速率的最高值都小于其余 3 次土壤 CO₂ 排放速率的最高值(图 3),在 Zhang 等^[23]的研究中也出现类似结果,而本文 MD 处理却没有出现这样的现象。可能在 SD 处理中,第 1 次循环时的土壤与其他处理(MD)相比较干燥,其次,也可

能土壤微生物没有适应这样的环境以及在干早期引起土壤微生物大量死亡,而在后面3次循环中的土壤微生物大部分可能适应了这样环境^[23-24],因此在SD处理中,在第1次循环就出现这种现象。

3.3 干湿交替循环次数对土壤 CO₂ 排放速率的影响

随着干湿交替循环次数的增加,对SD和MD处理下的土壤 CO₂ 排放速率的最低值和最高值的影响显著降低的趋势(表1)。但SD和MD处理下的第3,4次循环土壤 CO₂ 排放速率的最高值之间无显著性差异。原因可能是,经历几次这样的循环过程,使微生物改变了自己的生理状态,让它们慢慢适应了这种干湿交替循环过程^[21,24]。也可能是土壤微生物通过改变它们的渗透势来抵御这种干湿交替循环过程。其次,本试验整个培养过程中没有外来碳源的进入,也可能使土壤微生物处于底物缺乏状态^[29]。而SD和MD处理下的第3,4次循环中,土壤 CO₂ 排放速率的最低值之间显著性差异变化趋势不一致。原因可能是,在干早期微生物会失去了降解复杂化合物的能力,而微生物在土壤水分含量适合条件下,在一定程度上可以维持这种能力^[12,27],因此在MD处理中,第3,4次循环之间的土壤 CO₂ 排放速率的最低值差异性显著。虽然本文没有对微生物的量和活性进行研究,但从表1可以看出,在SD和MD处理中,第3,4次循环对土壤 CO₂ 排放速率的最高值之间已无显著性差异。说明土壤微生物可能已经适应了这样的环境,以上这些研究结果可能是干湿交替循环次数对土壤 CO₂ 排放速率的最低值和最高值影响降低的原因,有待于进一步研究。

3.4 干湿交替对土壤 CO₂ 累积排放量的影响

多次干湿交替循环后,土壤 CO₂ 累积排放量显著低于恒湿处理(图4),这个结论与部分学者的研究结果一致^[12-13]。本文发现,在干湿交替过程中,湿润期不但没有出现土壤 CO₂ 排放速率的激增,反而降低了土壤 CO₂ 排放速率。只有在干燥期出现一个较长时间段的土壤 CO₂ 排放速率持续增加,但弥补不了湿润期和干早期造成的土壤 CO₂ 排放速率的低值。从干旱强度来看,土壤 CO₂ 累积排放量随干旱强度的增加而减少。干旱时期土壤可以大大减少土壤 CO₂ 的排放,这与王苑等^[13]研究结果是相似的。

4 结论

(1) 与60%WFPS处理相比,40%WFPS处理对土壤 CO₂ 排放起到了抑制作用,而80%WFPS处理对土壤 CO₂ 排放速率的影响不大。整个培养过程

中,土壤 CO₂ 累积排放量随WFPS值的增大而增大,但60%WFPS和80%WFPS处理之间土壤 CO₂ 累积排放量无显著性差异。

(2) 与恒湿处理相比较,干湿交替过程中,土壤 CO₂ 排放速率的动态变化表现为先下降后上升再下降的规律。多次干湿交替循环后,土壤 CO₂ 累积排放量显著低于恒湿处理。在不同干旱强度处理中,SD处理对土壤 CO₂ 排放速率造成的变化幅度显著大于MD处理,但多次干湿交替循环后,SD处理下的土壤 CO₂ 累积排放量却显著小于MD处理的。随干湿交替循环次数的增加,对土壤 CO₂ 排放速率的影响幅度显著降低。干湿交替能降低土壤 CO₂ 排放量,降低量随干旱强度的增大而增大。

(3) 本文以新疆绿洲农田为研究对象,分析了灌溉对 CO₂ 的影响,但仅仅只是进行了室内模拟试验,没有在大田中进行实际观测,在以后的研究工作中,将结合大田试验,验证该结论,进一步剖析该过程机理,并讨论其尺度特征。

[参 考 文 献]

- [1] Jia Bingrui, Zhou G, Wang Yanqin, et al. Effects of temperature and soil water-content on soil respiration of grazed and ungrazed *Leymus chinensis* steppes, Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 67(1):60-76.
- [2] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus B, 1992, 44(2):81-99.
- [3] Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980—1994[J]. Global Change Biology, 2002, 8(8):800-812.
- [4] 曹兴,陈荣毅,季枫,等. 干旱区绿洲棉田土壤 CO₂ 通量变化特征及温湿度影响分析[J]. 中国农学通报, 2012, 28(8):199-207.
- [5] 谢静霞,翟翠霞,李彦. 盐生荒漠与绿洲农田土壤 CO₂ 通量的对比研究[J]. 自然科学进展, 2008, 18(3):262-268.
- [6] 赵志敏,赵成义. 塔里木河流域干旱区棉田土壤呼吸的温度敏感性研究[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1):169-176.
- [7] Yu Yongxiang, Zhao Chengyi, Zhao Zhiming, et al. Soil respiration and the contribution of root respiration of cotton(*Gossypium hirsutum* L.) in arid region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3):17-21.
- [8] 俞永祥,赵成义,贾宏涛,等. 覆膜对绿洲棉田土壤 CO₂ 通量和 CO₂ 浓度的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1):155-160.
- [9] Xiang Shurong, Doyle A, Holden P A, et al. Drying and rewetting effects on C and N mineralization and mi-

- crobal activity in surface and subsurface California grassland soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9):2281-2289.
- [10] Unger S, Máguas C, Pereira J S, et al. Interpreting post-drought rewetting effects on soil and ecosystem carbon dynamics in a Mediterranean oak savannah[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 154(2): 9-18.
- [11] Miller A E, Schimel J P, Meixner T, et al. Episodic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(12):2195-2204.
- [12] Mikha M M, Rice C W, Milliken G A. Carbon and nitrogen mineralization as affected by drying and wetting cycles[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(2): 339-347.
- [13] 王苑, 宋新山, 王君, 等. 干湿交替对土壤碳库和有机碳矿化的影响[J]. *土壤学报*, 2014(2):342-350.
- [14] Kruse J S, Kissel D E, Cabrera M L. Effects of drying and rewetting on carbon and nitrogen mineralization in soils and incorporated residues[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 69(3):247-256.
- [15] Yu Yongxiang, Zhao Chengyi, Jia Hongtao. Ability of split urea applications to reduce nitrous oxide emissions: A laboratory incubation experiment[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 100(4):75-80.
- [16] 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.
- [17] Linn D M, Doran J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(6):1267-1272.
- [18] 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.
- [19] Ding Weixin, Meng Lei, Yin Yunfeng, et al. CO₂ emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(2):669-679.
- [20] Franzluebbers K, Weaver R W, Juo A S R, et al. Carbon and nitrogen mineralization from cowpea plants part decomposing in moist and in repeatedly dried and wetted soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(10):1379-1387.
- [21] Griffin D M. Water potential as a selective factor in the microbial ecology of soils[M]// *Water Potential Relations in Soil Microbiology*. Soil Science Society of America, 1981:141-151.
- [22] Sommers L E, Gilmour C M, Wildung R E, et al. The effect of water potential on decomposition processes in soils[M]// *Water Potential Relations in Soil Microbiology*. Soil Science Society of America, 1981:97-117.
- [23] Zhang B, Yao S H, Hu F. Microbial biomass dynamics and soil wettability as affected by the intensity and frequency of wetting and drying during straw decomposition[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(6):1482-1492.
- [24] Muhr J, Goldberg S D, Boroken W, et al. Repeated drying-rewetting cycles and their effects on the emission of CO₂, N₂O, NO, and CH₄ in a forest soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(5): 719-728.
- [25] Deneff K, Six J, Bossuyt H, et al. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(12):1599-1611.
- [26] Van Gestel M, Ladd J N, Amato M. Carbon and nitrogen mineralization from two soils of contrasting texture and microaggregate stability: Influence of sequential fumigation, drying and storage[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 23(4):313-322.
- [27] Van Gestel M, Merckx R, Vlassak K. Microbial biomass responses to soil drying and rewetting: The fate of fast-and slow-growing microorganisms in soils from different climates[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, 25(1):109-123.
- [28] Liu Xiaozhong, Wan S Q, Su Bo, et al. Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem[J]. *Plant & Soil*, 2002, 240(2):213-223.
- [29] 戴万宏, 王益权, 黄耀, 等. 干燥和重新湿润过程引起土壤 CO₂ 激发释放的模拟研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(2):318-322.