

玛纳斯河流域不同灌区棉田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量

张梦洁^{1,2}, 李艳红^{1,2}, 李发东^{1,2,3,4}, 何新林^{5,6}

(1.新疆师范大学地理科学与旅游学院,乌鲁木齐 830054;

2.新疆维吾尔自治区重点实验室,新疆干旱区湖泊环境与资源实验室,乌鲁木齐 830054;

3.中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101;4.中国科学院大学资源与环境学院,北京 100190;

5.石河子大学水利建筑工程学院,新疆 石河子 832000;6.现代节水灌溉兵团重点实验室,新疆 石河子 832000)

摘要: 为探究石河子灌区、新湖总场灌区、莫索湾灌区之间土壤温室气体排放的差异性,通过长期的野外观测及样品采集,采用静态箱—气相色谱法,于 2019 年棉花出苗期、花铃期、吐絮期对玛纳斯河流域石河子灌区、新湖总场灌区、莫索湾灌区棉田土壤温室气体进行日观测,应用统计学方法,并结合土壤温度、含水量、pH、有机碳、铵态氮、硝态氮等因素分析。结果表明:(1)土壤 CO₂ 和 N₂O 具有明显的季节变化和日变化,土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量的峰值出现在花铃期,分别为 527.160,1.713 mg/(m²·h)。同时,CO₂ 排放通量日变化峰值出现在 13:00,N₂O 排放通量日变化峰值出现在 17:00,表现为单峰曲线。2 种土壤温室气体在生育期内的排放通量在不同灌区之间有所差异,呈现出新湖总场灌区>莫索湾灌区>石河子灌区。(2)土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量受温度影响更为显著,土壤 CO₂ 和 N₂O 均与温度呈显著正相关。石河子灌区、新湖总场灌区、莫索湾灌区 Q₁₀ 分别为 1.31~1.82,1.40~2.68,1.32~1.92。(3)石河子灌区、新湖总场灌区、莫索湾灌区在棉花生育期碳库储量分别为 3.34,2.93,2.8 Tg。

关键词: 玛纳斯河流域; 棉田; 土壤温室气体

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)01-0304-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.039

CO₂ and N₂O Emission Fluxes from Cotton Fields in Different Irrigation District of Manas River Basin

ZHANG Mengjie^{1,2}, LI Yanhong^{1,2}, LI Fadong^{1,2,3,4}, HE Xinlin^{5,6}

(1.College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054;

2.Key Laboratory of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang Laboratory of Lake Environment and

Resources in Arid Area, Urumqi 830054; 3.Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; 4.College of Resources and Environment, University of Chinese

Academy of Sciences, Beijing 100190; 5.College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shihezi University,

Shihezi, Xinjiang 832000; 6.Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation Group, Shihezi, Xinjiang 832000)

Abstract: In order to explore the differences in soil greenhouse gas emissions between Shihezi Irrigation Area, Xinhuzongchang Irrigation Area and Mosowan Irrigation Area, through long-term field observation and sample collection, adopts the static closed chamber-GC technique, daily observation was conducted to observe the soil greenhouse gases in Shihezi Irrigation District, Xinhuzongchang Irrigation Area and Mosowan Irrigation Area of Manas River Basin in 2019 at the seedling stage, flowering boll stage and spitting stage, and statistical methods were applied, and combined with soil temperature, water content, pH, organic carbon, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and other factors in the Manas River Basin. The results showed that: (1) Soil CO₂ and N₂O had obvious seasonal and daily changes, and the peak of soil CO₂ and N₂O emission fluxes appeared at the flowering boll stage, which were 527.160 and 1.713 mg/(m²·h). At the same time, the peak of the daily change of CO₂ emission flux appeared at 13:00, and the daily change peak of N₂O emission flux appeared at 17:00, which was manifested as a unipolar curve. The emission fluxes of the two soil greenhouse gases during the growth period were different between different irrigation areas,

收稿日期:2022-05-20

资助项目:国家自然科学基金项目(U1803244)

第一作者:张梦洁(1996—),女,在读硕士研究生,主要从事干旱区资源开发与规划研究。E-mail:912994890@qq.com

通信作者:李艳红(1977—),女,教授,主要从事干旱区气候与环境研究。E-mail:lyh0704@126.com

showing the irrigation area of Xinhuzongchang > Mosuowan > Shihezi. (2) Soil CO₂ and N₂O emission fluxes were more significantly affected by temperature, and soil CO₂ and N₂O were significantly positively correlated with temperature. The Q₁₀ of Shihezi Irrigation District, Xinhuzongchang Irrigation District and Mosowan Irrigation District were 1.31~1.82, 1.40~2.68 and 1.32~1.92, respectively. (3) The carbon reservoir reserves of cotton in Shihezi Irrigation District, Xinhuzongchang Irrigation Area and Mosowan Irrigation District were 3.34, 2.93 and 2.8 Tg, respectively.

Keywords: Manas River Basin; cotton fields; soil greenhouse gases

在过去的 50 年间,土壤 CO₂ 和 N₂O 排放量均有所增加^[1]。其中农业生态系统 CO₂ 和 N₂O 排放量分别占全球人为排放总量的 13%,81%^[2-4]。近 30 年来,中国农田温室气体在自然生态系统中排放量较高^[5]。同时,我国干旱区绿洲农田棉花种植达到 590 万 hm²,约占农田种植的 4%,对温室气体的影响较为显著^[6]。目前,大量研究通过不同管理措施控制耕作^[7]、施肥^[8-9]、灌溉^[10]等条件调控农田土壤理化性质,进而影响土壤温室气体的排放。在国外,有研究^[11-12]表明,土壤的 CO₂ 排放与土壤的水热条件关系密切。Pou 等^[13]研究发现,农田土壤温室气体及其土壤因子在季节上有所差异,表明土壤温湿度都是控制土壤温室气体的重要因素;Ladoni 等^[14]研究表明,不同生态系统的位置和水文特征具有差异性,因此土壤 CO₂ 和 N₂O 通量在不同地理位置表现出不同的特征;Bwana 等^[15]对坦桑尼亚棉田进行研究,提出干旱区绿洲由于生态环境的恶劣性,量化干旱区作物种植产生的温室气体排放量对于种植系统的可持续性至关重要。

棉花是新疆典型的种植作物,2019—2021 年棉花种植面积和总产量分别达到 2.5×10^6 hm² 和 5.1×10^7 t,分别占全国总种植面积和总产量的 82.7% 和 89.4%。玛纳斯河流域是新疆典型的绿洲生态系统之一,分布着大量棉田,位于天山山脉—古尔班通古特沙漠之间,近年来其耕地面积变化剧烈^[16]。随着玛纳斯河流域开发的增加,人类开垦、耕种、施肥,土地显著变化,使得生态水文问题日益加剧,导致温室气体排放增加,玛纳斯河流域的生态环境问题日益成为众多学者关注的焦点。目前,王进^[17]在玛纳斯河流域石河子灌区研究发现,棉田土壤主要表现为碳汇的形式;张金玺^[18]和刘芳婷等^[19]对石河子灌区农田土壤进行研究发现,随着土壤温度和土壤含水量的增加土壤 CO₂ 呈排放趋势,在土壤盐分的增加的条件下,CO₂ 和 N₂O 呈排放趋势;张文^[20]模拟玛河流域咸水灌溉模式发现,N₂O 与土壤含水量、铵态氮、硝态氮呈正相关关系。对玛纳斯河流域 CO₂ 和 N₂O 排放通量的研究,主要集中在石河子灌区,对多个灌区土壤温室气体综合对比的研究较少。因此,本文以

玛河流域不同灌区干旱区绿洲农田土壤为研究对象,了解其土壤温室气体季节排放特征,并分析不同灌区之间棉田土壤因子与土壤温室气体排放通量之间的关系,对我国农田温室气体观测数据进行重要补充,同时为评价我国干旱区绿洲农田在全球气候变化中的作用提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于玛纳斯河石河子灌区、新湖总场灌区和莫索湾灌区,位于天山山脉和古尔特通古特沙漠之间,流域内地势呈南高北低,平均海拔 450 m,属典型的温带大陆性气候。石河子灌区、新湖总场灌区、莫索湾海拔分别为 400~600,300~400,200~300 m^[21],平均年降水量为 125.0~207.7 mm,由山地向荒漠依次递减,蒸发量与之相反。玛河流域降水主要集中在 5—7 月,平均气温 25.1~26.1℃,气温最高值出现在莫索湾灌区。其中石河子、莫索湾灌区在 1952—1962 年大规模集中开发,1962 年之后开发低山带河流两岸的荒漠草原,由此石河子、新湖总场、莫索湾灌区轮廓基本形成。石河子灌区临近山前平原,南部有水库作为缓冲,土壤肥力得以在此储存,而新湖总场灌区位于人工平原绿洲的边缘区域,土壤积盐程度高,莫索湾灌区位于绿洲—荒漠过渡带,此处人工开垦度、人工肥力投入较大,三大灌区均为碱性土壤,盐度表现为新湖总场灌区>莫索湾灌区>石河子灌区,依次为中盐渍土 5~10 g/kg、弱盐渍土 3~5 g/kg 和非盐渍土 0~3 g/kg。

1.2 样地材料与设计

样地定位在玛纳斯河流域 3 个灌区内,根据采样时调查、走访以及 2018 年新疆统计年鉴资料,绘制出玛河流域灌区轮廓图(图 1),根据灌区轮廓利用地统计学软件,计算灌区面积。在采样开始前沿河流考察并在每个灌区选取种植作物为棉花的 3 个棉田,于 2019 年 4—11 月作物生长季进行野外样品的采集,选择出苗期(5 月)、花铃期(8 月)和吐絮期(10 月)进行分析,在每个样地取 3 个平行采样点,选择天气状况良好的日期,进行土壤温室气体和土样样品的采集。棉田采取滴灌补水的方式,在出苗期 5 月 20 日开

始第 1 次滴灌补水、补肥,在花铃期内从 8 月 2 日开始,有 2 次滴灌补水,其中第 2 次滴灌是补水、补肥,吐絮期有少量滴灌不进行肥料的补充,在棉花出苗期对棉花根系补充氮肥,在花铃期主要对棉花叶片补充氮肥,吐絮期基本停止对棉田滴灌和肥料的补充,施氮量在 60~75 hm²/kg,测得土壤全磷在 0.79~1.42 g/kg,并对样地土壤环境进行综合测定(表 1)。

1.3 样品采集

1.3.1 气体采集 本文采用静态箱—气相色谱法采集^[22]、分析玛纳斯河流域土壤 CO₂ 和 N₂O 气体通量。静态箱箱体由内径 22 cm、高 19.5 cm 的圆柱体 PVC 管制成。气体样品采集时,将静态箱安置在其基座凹槽中,为保证其密封,抽气取样时,将水封槽内注满水,然后将气密室密封罩罩上。每天采气时间为 9:00,13:00,17:00,21:00 共 4 次。每次采集 4 管气体,每管气体间隔 5 min 采集 1 次,共计 4 次。采集 30 mL 气体并注入真空玻璃容器中,利用气相色谱法在中国科学院禹城综合试验站进行测定,在棉花生育期共计采集气体样品 1 296 个。

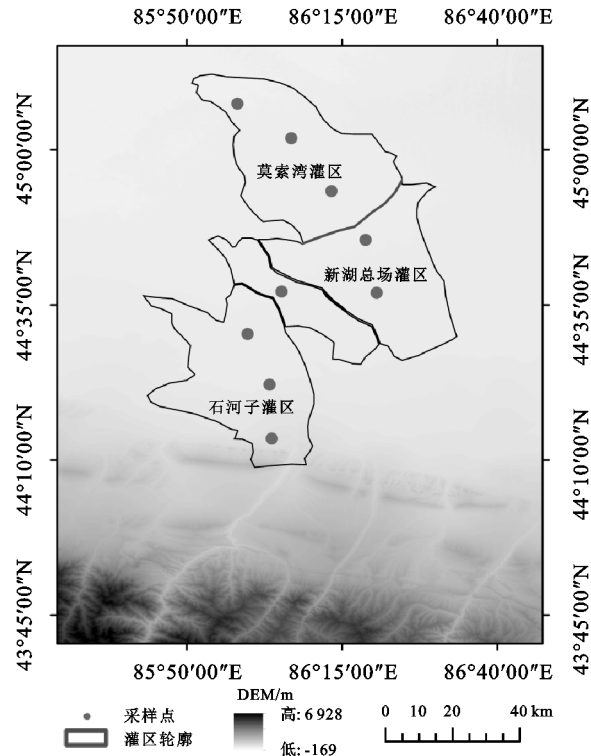


图 1 玛纳斯河流域灌区

表 1 采样前研究区概况

指标	pH	土壤盐分/ (g·kg ⁻¹)	铵态氮/ (mg·kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	面积/ 10 ⁴ hm ²	土壤 类型	土壤 质地
石河子灌区	8.06±0.08	0.59	3.24±0.80	0.92±0.44	15.40±0.38	12.67	黏土	灰漠土
新湖总场灌区	8.48±0.10	6.32	2.68±0.53	0.89±0.91	9.63±0.31	16.34	黏土	盐化或碱化灰漠土
莫索湾灌区	8.70±0.04	3.23	5.19±3.98	0.87±0.57	12.29±1.11	13.25	粉砂质壤土	风沙土

注:表中数据为平均值±标准差。

1.3.2 土样样品采集 在气体采集的同时,采集土壤样品,取土层深度 0—5,5—10,10—20 cm,首先在每个样点使用环刀法采集土壤容重;随后采集土壤鲜土,将其装入密封袋中,带回实验室,保留 50 g 鲜土用于铵态氮、硝态氮,实验开始前冷冻保存,其余土壤风干、研磨、过筛保存,筛选 100 目的土壤用于有机质的测定。

1.4 样品分析

1.4.1 气体测定 使用气相色谱仪(GC 7890A)进行分析,测出气体浓度,利用气体通量公式进行计算。

1.4.2 土壤测定 土壤 pH 测定使用 HANNA 公司 pH 电极(pH 211 Microprocessor pH Meter)进行;土壤质量含水量使用烘干法;有机质测定用 100 目的土,称取 0.5 g 使用重铬酸钾氧化法测定;土壤 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 称取鲜土 10 g,使用 1 mol/L 的 KCl 浸提液提取,用紫外分光光度计^[23]测定,试验均在中国科学院禹城综合试验站完成。

1.4.3 计算方法

(1)气体通量公式^[24]:

$$F = \frac{60}{100\rho h} \times \frac{p}{1013} \times \frac{273}{273+T} \times \frac{dC_t}{dt} \quad (1)$$

式中: F 为被测气体排放通量[CO₂ 单位为 mg/(m²·h); N₂O 单位为 μg/(m²·h)]; ρ 为标准状态下的被测气体密度(g/L); h 为箱高(cm), p 为采样点的气压(kPa), T 为采样时箱内平均温度(°C), t 为采样时间(min); dC_t/dt 为采集箱内被测气体体积分数的变化率[μL/(L·min)]。

(2)呼吸过程对温度的敏感性通常用 Q_{10} 来描述, Q_{10} 是温度增加 10 °C 所造成的呼吸速率改变的商,定义为^[25]:

$$Q_{10} = \frac{R_{T_0+10}}{R_{T_0}} \quad (2)$$

式中: R_{T_0} 和 R_{T_0+10} 分别为参比温度 T_0 、(T_0+10 °C)时的呼吸速率[mg/(m²·h)]。

估算的土壤呼吸 Q_{10} 依不同地理位置的差异性,从略大于 1(低敏感性)到大于 10(高敏感性)。

(3)土壤有机碳密度^[26]:

$$C_d = H \times B \times SOC \times 0.01 \quad (3)$$

式中: C_d 为土壤有机碳密度(kg/m²); H 为土层深度(cm); B 为容重(g/cm³); SOC 为有机碳含量(g/kg)。

(4)土壤有机碳储量^[26]:

$$P_{oc} = \sum_{i=1}^n S_i \times \sum_{j=1}^n SOC_{ij} \times H_{ij} \times B_{ij} \times 0.1 \quad (4)$$

式中: P_{oc} 为土壤有机碳储量(t); S_i 为区域*i*土种面积(hm²); SOC_{ij} 为*i*土种*j*土层有机碳含量(g/kg), H_{ij} 为*i*土种*j*土层厚度(cm); B_{ij} 为*i*土种*j*土层的容重(g/cm³)。

1.5 数据分析

利用 Pearson 相关分析,T 检验,LSD(多重比较)探讨计算土壤呼吸通量与水热因子、土壤理化性之间可能具有的相关关系,并进行回归分析,分析均在 SPSS 20.0 软件完成,采用 Origin 2019 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤温室气体通量季节特征分析

2.1.1 土壤温室气体排放日变化特征 棉花生育期

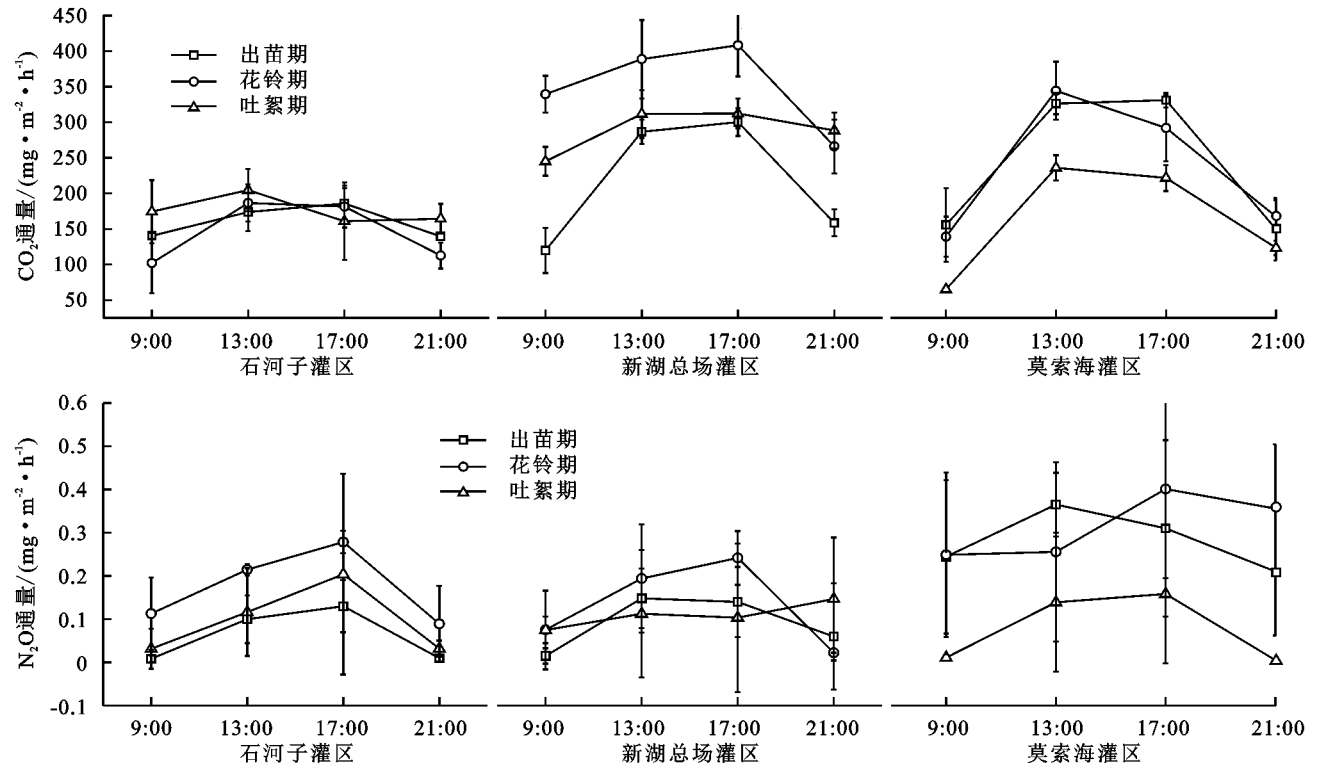


图 2 土壤温室气体排放通量日变化

2.1.2 土壤温室气体排放季节变化特征 在棉花生育期内(图 3),石河子灌区和新湖总场灌区 CO₂、N₂O 排放通量表现为花铃期>吐絮期>出苗期,莫索湾灌区表现为花铃期>出苗期>吐絮期。石河子灌区和新湖总场灌区季节性差异不显著($p>0.05$),新湖总场灌区花铃期分别与出苗期和吐絮期存在显著性差异($p<0.05$)。石河子灌区花铃期的 CO₂ 排放通量相比出苗期和吐絮期高分别高 17% 和 10%, N₂O 排放通量分别高 63%, 47%;莫索湾灌区花铃期的 CO₂ 排放通量相比吐絮期和出苗期高分别高 16% 和 33%, N₂O 排放通量分别高 8%, 68%。在棉花花铃期石河子灌区和新湖总场灌区存在显著

日排放通量平均变化趋势有所差异(图 2),CO₂、N₂O 排放通量均从 9:00 开始缓慢上升,17:00 之后表现为下降的趋势,日间变化在 21:00 出现最小值,其中石河子灌区和新湖总场灌区 CO₂ 排放通量在 13:00 达到最大值,分别为(150.55±89.4), (390.18±69.2) mg/(m²·h),莫索湾灌区 CO₂ 排放通量在 17:00 达到最大值,为(220.53±102.7) mg/(m²·h)。石河子灌区、新湖总场灌区、莫索湾灌区 N₂O 排放通量均在 17:00 达到最大值,分别为(0.41±0.018), (0.33±0.025), (0.55±0.019) mg/(m²·h)。三大灌区 CO₂ 排放通量日变化在统计学上的差异性不显著($p>0.05$),新湖总场和莫索湾灌区 N₂O 排放通量在 17:00—21:00 具有显著性差异($p<0.05$)。

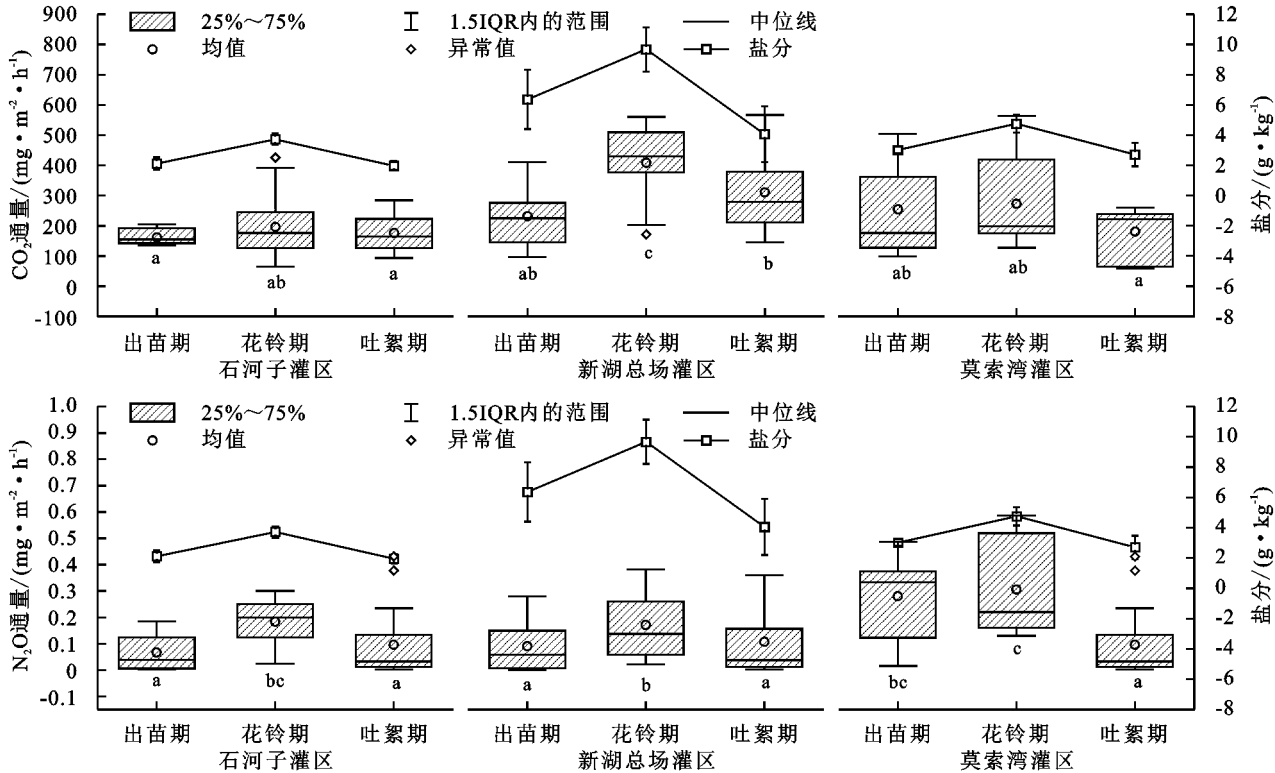
性差异,在吐絮期新湖总场灌区分别与石河子灌区和莫索湾灌区存在显著性差异($p<0.05$)。

玛纳斯河流域石河子灌区 CO₂、N₂O 变化量分别为(64.74~425.60), (0.002 3~0.43) mg/(m²·h),新湖总场灌区 CO₂、N₂O 变化量分别为(97.33~566.52), (0.001~0.38) mg/(m²·h),莫索湾灌区 CO₂、N₂O 变化量分别在(59.65~564.28), (0.002 3~0.58) mg/(m²·h)。

2.1.3 温室气体排放通量的空间变化 根据克里金插值法(图 4),棉花生育期内 CO₂ 排放通量表现为新湖总场灌区最高,石河子灌区 CO₂ 排放通量最低,通过 LSD 法比较 CO₂ 排放通量在新湖总场灌区、石河子灌区、莫索湾灌区 3 个地区之间均有显著性差异($p<0.05$),石河子灌区和莫索湾灌区在统计学上差异性不显著($p>0.05$)新湖总场灌区的 CO₂ 排放通

量分别比石河子灌区和莫索湾灌区高 43%和 26%,莫索湾灌区比石河子灌区高 23%;N₂O 排放通量表现为莫索湾灌区最高,石河子灌区 N₂O 排放通量最低,通过 LSD 法比较 N₂O 排放通量在莫索湾灌区与石河子灌区、新湖

总场灌区均有显著性差异($p<0.01$),石河子灌区和新湖总场灌区在统计学上差异性不显著($p>0.05$),莫索湾灌区的 N₂O 排放通量分别比石河子灌区和新湖总场灌区高 52%和 48%。



注:在 0.05 级别差异性显著,不同小写字母表示具有显著性差异。

图 3 土壤温室气体排放通量与盐分变化

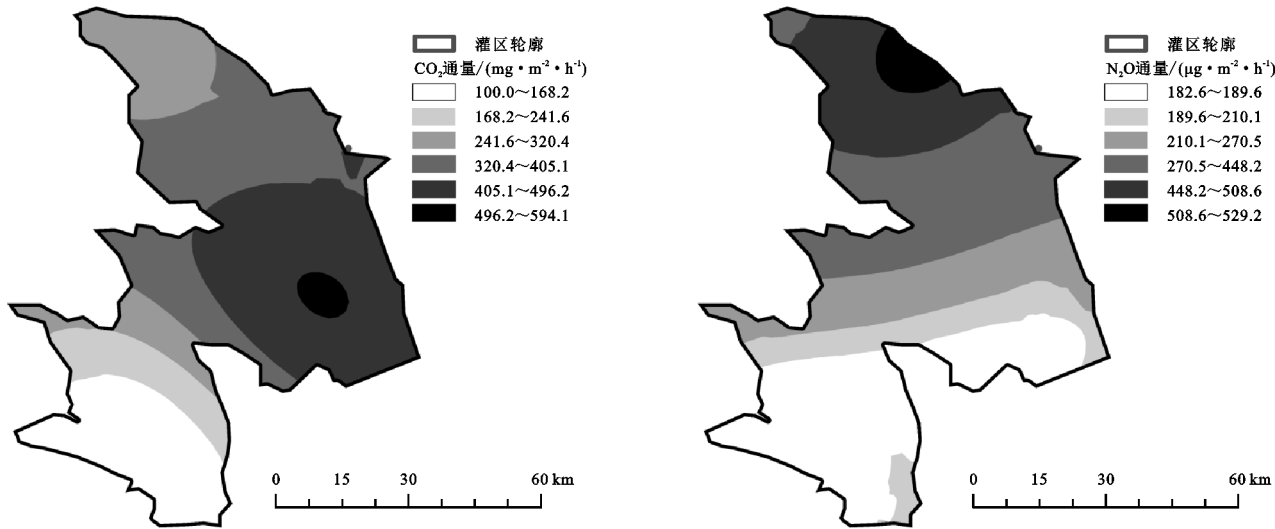


图 4 土壤 CO₂、N₂O 通量空间分布

2.2 土壤温室气体通量的相关性分析

2.2.1 CO₂ 排放通量与土壤表层温度的关系 通过对 0—5 cm 处土壤表层温度与不同灌区 CO₂ 排放通量进行相关分析,石河子灌区、新湖总场灌区、莫索湾灌区的 CO₂ 排放通量与 0—5 cm 土层温度表现为显著的正相关,相关系数分别为 0.774,0.985,0.718 ($p<0.01$);对不同灌区的 CO₂ 排放通量与 0—5 cm 土层土壤温度进行回归分析。石河子灌区 CO₂ 排放

通量与土壤表层 0—5 cm 土层土壤温度公式为:
 $F_{CO_2}=6.29T+31.8 \quad R^2=0.582 \quad (p<0.01)$ (5)
根据回归方程可以算出,石河子灌区的 $Q_{10}=1.31\sim1.82$ 。
式中: F 为土壤排放通量[mg/(m²·h)]; T 为 0—5 cm 土层土壤温度(℃)。显著度检验通过,相关显著,说明近 0—5 cm 土层土壤温度是影响农田土壤温室气体的重要因素。

新湖总场灌区 CO₂ 排放通量与 0—5 cm 土层土壤温度回归方程为:

$$F_{\text{CO}_2}=14.45T-29.8 \quad R^2=0.916 \quad (p<0.01)$$

(6)

可以得出 Q₁₀=1.40~2.68。

莫索湾灌区 CO₂ 排放通量与 0—5 cm 土层土壤温度回归方程为:

$$F_{\text{CO}_2}=7.66T+29 \quad R^2=0.515 \quad (p<0.01)$$

(7)

可以得出 Q₁₀=1.32~1.92。

2.2.2 N₂O 排放通量与土壤温度的关系 石河子灌区、新湖总场灌区和莫索湾灌区的 N₂O 排放通量与 0—5 cm 土层土壤温度表现为显著的正相关,相关系数分别为 0.959 ($p<0.01$), 0.952 ($p<0.01$), 0.95 ($p<0.05$); 对不同灌区的 N₂O 排放通量与 0—5 cm 土层土壤温度进行回归分析, 石河子灌区 N₂O 排放通量与 0—5 cm 土层土壤温度公式为:

$$F_{\text{N}_2\text{O}}=0.014T-0.21 \quad R^2=0.917 \quad (p<0.01)$$

(8)

新湖总场灌区 N₂O 排放通量与 0—5 cm 土层土壤温度回归方程为:

$$F_{\text{N}_2\text{O}}=0.015T-0.2 \quad R^2=0.902 \quad (p<0.01)$$

(9)

莫索湾灌区 N₂O 排放通量与 0—5 cm 土层土壤温度回归方程为:

$$F_{\text{N}_2\text{O}}=0.025T-0.294 \quad R^2=0.9 \quad (p<0.01)$$

(10)

2.3 土壤温室气体排放通量与土壤因子相关性分析

由表 2 可知,土壤温度整体表现为吐絮期为低值,花铃期土壤温度最高;土壤含水量表现为出苗期和吐絮期高,花铃期最低,土壤 pH 出苗期最高,其实是花铃期,吐絮期 pH 最低;铵态氮和硝态氮在花铃期含量高,吐絮期低,同时石河子灌区的铵态氮和硝态氮含量最高。

将石河子灌区、新湖总场灌区和莫索湾灌区土壤 2 种温室气体通量分别与其土壤理化性质进行相关分析。石河子灌区土壤温室气体排放通量均与土壤 0—5 cm 土层土壤含水量显著不相关;新湖总场灌区土壤 CO₂、N₂O 排放通量均与土壤含水量呈显著正相关;莫索湾灌区土壤 CO₂ 排放通量与土壤 0—5 cm 土层土壤含水量呈正相关,N₂O 排放通量与土壤 0—5 cm 土层土壤含水量显著不相关(表 3)。棉花生育期内石河子灌区、新湖总场灌区土壤盐分含量随季节性变化具有一定差异(图 3),不同灌区土壤盐分最高值均在花铃期出现,出苗期和吐絮期土壤盐分差异性不显著,变化范围在 0.37~13.74 g/kg;新湖总场灌区土壤盐分显著高于石河子灌区和新湖总场灌区 ($p<0.05$),土壤盐分与土壤 CO₂、N₂O 排放通量呈正相关关系。

表 2 不同灌区之间土壤理化性质季节特征

灌区	生育期	土壤 温度/℃	土壤质量 含水量/%	土壤 pH	土壤铵态氮/ (mg·kg ⁻¹)	土壤硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)
石河子灌区	出苗期	27.12	4.22	8.22	3.45	0.88
	花铃期	29.58	6.04	8.06	4.04	0.83
	吐絮期	16.87	14.39	7.94	2.83	1.23
	出苗期	23.09	11.05	8.37	2.68	0.91
新湖总场灌区	花铃期	29.41	9.98	8.21	4.26	0.56
	吐絮期	13.12	10.20	8.16	3.63	2.35
	出苗期	24.66	8.01	8.60	3.77	0.78
莫索湾灌区	花铃期	26.52	8.86	8.03	4.02	0.98
	吐絮期	12.90	12.02	8.08	1.92	0.94

表 3 不同灌区土壤理化性质与土壤排放通量相关系数

指标	灌区	土壤质量含水量	土壤盐分	土壤 pH	土壤铵态氮	土壤硝态氮	土壤有机碳
CO ₂ 通量	石河子灌区	0.185	0.843**	0.272	0.529*	-0.626**	-0.832**
	新湖总场灌区	0.528*	0.776*	0.544*	0.670**	-0.433	-0.233
	莫索湾灌区	0.385*	0.767*	-0.074	0.215	-0.317	0.093
N ₂ O 通量	石河子灌区	0.053	0.677*	-0.272	0.592**	-0.423	-0.703**
	新湖总场灌区	0.397*	0.649	0.139	0.512*	-0.396	-0.568**
	莫索湾灌区	0.165	0.798*	-0.318	-0.282	-0.436	-0.604**

注:**表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著;*表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

2.4 土壤固碳机制

不同灌区的土壤有机碳含量(表 4)可看出,土壤有机碳含量由出苗期到吐絮期逐渐降低,呈现出被分解、消耗的趋势。通过 LSD 法比较有机碳含量在石

河子灌区、新湖总场灌区和莫索湾灌区之间均存在显著性差异,石河子灌区相比新湖总场灌区、莫索湾灌区分别高出 30%和 21%,这与 CO₂ 排放通量和 N₂O 排放通量相反。其次石河子碳库储量占 37%,新湖总场灌

区为 32%，莫索湾灌区占到 31%，分别为 3.34, 2.93, 2.80 Tg。其中石河子灌区盐分含量较低,土壤肥力条件较好。从空间土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量来看,土壤有机碳储量是可能影响土壤温室气体的因素之一。各

灌区土壤有机质变异系数在 0.19~0.44,这表明各灌区土壤性质趋于稳定,而碳库储量从出苗期到吐絮期呈递减趋势,这可能是由于氮肥集中在棉花生长前期施用以及棉花生长对有机质进行消耗的因素影响。

表 4 不同灌区表层(0—20 cm)土壤有机碳密度和储量

灌区	生育期	有机碳范围/ (g·kg ⁻¹)	有机碳均值/ (g·kg ⁻¹)	变异 系数 CV	容重/ (g·cm ⁻³)	碳密度/ (kg·m ⁻²)	面积 比例	碳库储量/ 10 ⁶ t	碳库 比例
石河子灌区	出苗期	7.94~12.95	10.33	0.39	1.53	3.17	0.30	4.02	0.37
	花铃期	7.61~9.14	8.31	0.44	1.39	2.30		2.92	
	吐絮期	5.7~10.45	7.74	0.35	1.58	2.45		3.10	
新湖总场灌区	出苗期	5.56~7.58	6.18	0.19	1.46	1.81	0.39	2.95	0.32
	花铃期	3.97~9.48	5.41	0.23	1.33	1.43		2.34	
	吐絮期	2.60~8.32	6.87	0.43	1.56	2.14		3.50	
莫索湾灌区	出苗期	6.25~11.25	8.17	0.29	1.50	2.45	0.31	3.25	0.31
	花铃期	4.47~7.36	5.39	0.44	1.57	1.70		2.25	
	吐絮期	5.11~8.43	7.16	0.40	1.54	2.20		2.91	

3 讨论

3.1 土壤温室气体日变化和季节变化的特征及差异

通过对不同灌区土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量的日变化和季节变化的研究,CO₂ 和 N₂O 排放通量的表现为单峰变化曲线,日变化最高值集中于 13:00—17:00,季节变化的峰值均在棉花的花铃期,这与邬强等^[27]研究滴灌下棉田土壤温室气体排放通量具有一致性。通过相关性分析发现,土壤温度与土壤温室气体排放通量关系密切,棉花花铃期 0—5 cm 土层土壤温度最高,棉花出苗期次之,变化范围分别为 22.9~38.7,17.7~34.8℃,棉花吐絮期温度低至 12.6~22.7℃,这与土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量的日变化和季节变化具有一致性;Pearson 相关分析表明,土壤表层温度和土壤 CO₂ 和 N₂O 通量存在很强的正相关,这与李锐^[28]对土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量与土壤 10 cm 温度呈极显著正相关的研究结果一致。

通过分析不同灌区的土壤温室气体排放通量年变化与 0—5 cm 土层土壤含水量间的关系可发现,土壤湿度和土壤 CO₂ 和 N₂O 通量存在正相关关系;棉花出苗期和棉花花铃期石河子灌区 0—5 cm 土层土壤含水量均很低,变化范围分别为 1.56%~5.42%和 0.86%~27.6%,棉花吐絮期含水量达到 9.8%~21.0%。0—5 cm 土层土壤含水量仅在新湖总场灌区存在正相关关系,这与 Nguyen 等^[29]的研究相似,土壤温室气体通量与温度的相关关系更大。

土壤 pH、铵态氮和有机碳在棉花花铃期有下降的趋势,在吐絮期有轻微的回升,这与吐絮期前对棉田进行最后一次少量补肥相对应,而土壤硝态氮在花铃期有所升高,这主要是因为土壤铵态氮具有向下累积趋势,硝态氮经过滴灌被淋洗至土壤深层,因此提高土壤中硝态氮的含量^[30]。

3.2 土壤温室气体空间变化规律

石河子灌区和莫索湾灌区的土壤水分与土壤 CO₂、N₂O 通量之间几乎没有统计学上的显著相关性,这与人^[31-32]对温室气体的研究具有一致性,土壤温室气体排放通量与土壤温度具有相关关系,与土壤含水量的相关性不显著。通过单因素方差分析,土壤含水量在不同灌区之间差异性不显著,土壤含水量主要作用于季节土壤温室气体排放通量的变化,在空间上的影响较为微弱。

土壤呼吸温度敏感性系数(Q₁₀)是反映土壤呼吸对温度变化敏感性的重要指标,有研究^[33]表明,Q₁₀的变化范围在 1.3~3.3,均值为 2.4。本研究得出,石河子灌区的土壤温度敏感性 Q₁₀为 1.31~1.82,新湖总场灌区 Q₁₀为 1.40~2.68,莫索湾灌区 Q₁₀为 1.32~1.92。与新疆库尔勒绿洲试验农田相比,Q₁₀略高,库尔勒绿洲试验农田多年监测 Q₁₀范围在 1.18~2.69^[34]。吕晓东^[35]研究发现,受能量和物质供应限制,干旱区土壤呼吸温度敏感性低于全球 Q₁₀平均值。与以上研究^[33-35]相比,本文水热因子特征与土壤呼吸温度敏感性系数与其他农田土壤特征存在一定差异,尤其在温度相似的情况下,玛纳斯河流域农田土壤含水量低于中东部农田。

土壤盐分对土壤 CO₂ 和 N₂O 通量呈正相关关系,土壤盐分含量的升高对有土壤 CO₂ 和 N₂O 通量起促进作用,这表现为在新湖总场灌区土壤 CO₂ 排放通量达到最大值,而土壤 N₂O 通量表现为莫索湾灌区最大,较高的土壤盐分含量对 N₂O 排放通量有抑制作用,这与孙星^[36]对土壤 N₂O 的排放和土壤盐分之间的关系研究具有一致性。

土壤硝态氮表现为莫索湾灌区>石河子灌区>新湖总场灌区,土壤铵态氮表现为新湖总场灌区>石河

子灌区>莫索湾灌区。土壤中 N₂O 排放的主要来源为硝化作用和反硝化作用,与土壤水、氮源的时效性和碳源相关^[37]。凋落物为 N₂O 产生菌落提供丰富的产物,硝态氮和铵态氮是硝化作用和反硝化作用的必需反应物。本文研究可知,铵态氮与土壤 N₂O 排放通量在石河子灌区和新湖总场灌区具有相关性,而硝态氮与土壤 N₂O 排放通量在统计学上无显著相关性,这与 Nguyen 等^[29]对景观地形与土壤温室气体的研究一致。土壤铵态氮和硝态氮存在较高的变异性,有研究^[38]表明,硝化作用和反硝化作用受干湿交替的农田的影响,交替产生 N₂O,并抑制 N₂O 还原为 N₂的过程,从而促进 N₂O 的排放。同时,土壤,温度,土壤含水量、pH 也是影响铵态氮和硝态氮含量的主导因素^[39]。

3.3 土壤有机碳储量变化规律

在有氧条件下,植物消耗固定的有机碳,通过呼吸作用以 CO₂ 的形式排放到大气中,形成农田碳循环。根据表 4 对有机碳密度的分析得到出苗期有机碳密度最高,花铃期土壤有机碳密度通过植物消耗达到最低值,到吐絮期有机碳密度有所回升。在空间上,土壤碳库储量表现为石河子灌区最高,新湖总场灌区和莫索湾灌区无明显差异,pH 表现为莫索湾灌区>新湖总场灌区>石河子灌区,均呈碱性。已有研究^[40]表明,土壤释放 CO₂ 的主要机制有植物根系呼吸和土壤有机质分解,在温度升高或土壤碱性程度较高的状态下,土壤有机质更容易溶解分散^[41]。同时,不同的耕作条件影响有机碳的含量和储量,从而影响 CO₂ 的释放^[42],石岳峰等^[43]发现,提高有机碳储量,有利于降低 CO₂ 的释放量。在采样区,石河子灌区土壤有机碳含量最高,其次是莫索湾灌区,然后是新湖总场灌区,在石河子灌区 CO₂ 排放量与土壤有机质呈显著负相关,因此土壤 CO₂ 排放通量经过有机碳的分解在碱性土壤的综合作用下表现为新湖总场灌区>莫索湾灌区>石河子灌区。玛纳斯河流域土壤有机碳密度略低于四川盆地和东北平原有机碳密度 3.1 g/kg^[36,44],略高于松嫩平原有机碳密度 1.7 g/kg^[45],但玛纳斯河流域碳库储量远低于土壤呈中性或弱酸性的四川盆地和东部土壤肥力条件较好的松嫩平原。

4 结论

(1)干旱区绿洲农田生态系统土壤温室气体的排放对大气具有一定影响,土壤 CO₂、N₂O 排放通量均有明显的季节变化,CO₂、N₂O 排放通量在石河子灌区、新湖总场灌区均表现为花铃期>吐絮期>出苗期,莫索湾灌区表现为花铃期>出苗期>吐絮期,日排放通量最大值出现在 13:00—17:00。

(2)土壤温度是影响 CO₂ 和 N₂O 排放通量的重

要因子,石河子灌区 Q₁₀ 为 1.31~1.82,新湖总场灌区 Q₁₀ 为 1.40~2.68,莫索湾灌区 Q₁₀ 为 1.32~1.92,表现为新湖总场灌区>莫索湾灌区>石河子灌区。

(3)土壤温度、含水量是影响土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量的主要因素,pH、盐分、有机碳、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 间接参与土壤环境从而影响土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量。

(4)棉花生育期碳库储量表现为石河子灌区>新湖总场灌区>莫索湾灌区,分别为 3.34,2.93,2.80 Tg。

参考文献:

[1] Decock C, Lee J, Necpalova, M, et al. Mitigating N₂O emissions from soil: From patching leaks to transformative action[J].Soil,2015,1(2):687-694.

[2] Edenhofer O, PichsMadruga R, Sokona Y, et al. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of climate change [M].England: Cambridge Univ Press, 2014:147.

[3] Gandura O A, Rajesh C, Saroop S S, et al. Effects of biochar and manure applications on soil carbon dioxide, methane, and nitrous oxide fluxes from two different soils[J].Journal of Environmental Quality,2019,48(6): 1664-1674.

[4] Shukla P R, Skea J, Buendia E C, et al. Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [EB/OL].[2019-08-08](2022-03-03). www.ipcc.ch.

[5] Tian H Q, Yang J, Xu R T, et al. Global soil nitrous oxide emissions since the preindustrial era estimated by an ensemble of terrestrial biosphere models: Magnitude, attribution, and uncertainty[J].Global Change Biology,2019,25(2):640-659.

[6] Shah A N, Iqbal J, Tanveer, M, et al. Nitrogen fertilization and conservation tillage: A review on growth, yield, and greenhouse gas emissions in cotton[J].Environmental Science and Pollution Research,2017,24(3): 2261-2272.

[7] Zhang L, Zheng J C, Chen L G, et al. Integrative effects of soil tillage and straw management on crop yields and greenhouse gas emissions in a rice-wheat cropping system [J]. European Journal of Agronomy,2015,63(63):47-54.

[8] Bremner J M. Sources of nitrous oxide in soils[J].Nutrient Cycling in Agroecosystems,1997,49(1):7-16.

[9] Pisante M, Galieni A, Basch G, et al. Soil management practices and benefits in conservation agriculture systems[J].Advances in Conservation Agriculture,2020,62(2):75-103.

[10] Laura S M, Meijide A, Garcia-Torres L, et al. Combination of drip irrigation and organic fertilizer for mitigating emissions of nitrogen oxides in semiarid climate [J]. Agriculture Ecosystems and Environment,2010, 137(1):99-107.

- [11] Reth S, Gockede M, Falge E. CO₂ efflux from agricultural soils in Eastern Germany: Comparison of a closed chamber system with eddy covariance measurements[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2005, 80(2/4): 105-120.
- [12] Huang S H, Hari K P, Lu J. Effects of water regimes on nitrous oxide emission from soils[J]. Ecological Engineering, 2007, 31(1): 9-15.
- [13] Pow P K C, Black T A, Jassal R S, et al. Greenhouse gas exchange over a conventionally managed highbush blueberry field in the Lower Fraser Valley in British Columbia, Canada[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 295: 1286-1295.
- [14] Ladoni M, Basir A, Robertson P G, et al. Scaling-up: Cover crops differentially influence soil carbon in agricultural fields with diverse topography[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 225: 93-103.
- [15] Bwana T N, Amuri N A, Semu E, et al. Soil N₂O emission from organic and conventional cotton farming in Northern Tanzania[J]. Science of the Total Environment, 2021, 785: e147301.
- [16] 夏鑫鑫, 朱磊, 杨爱民, 等. 基于山地—绿洲—荒漠系统的生态系统服务正负价值测算: 以新疆玛纳斯河流域为例[J]. 生态学报, 2020, 40(12): 3921-3934.
- [17] 王进. 玛纳斯河流域农田生态系统碳动态及其驱动因素研究[D]. 新疆 石河子: 石河子大学, 2017.
- [18] 张金玺. 滴灌条件下棉田土壤水—盐—气作用规律研究[D]. 新疆 石河子: 石河子大学, 2020.
- [19] 刘芳婷, 范文波, 张金玺, 等. 温度、水分、盐分对土壤 CO₂ 和 O₂ 浓度影响的试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(10): 154-159.
- [20] 张文. 咸水滴灌对棉田土壤 N₂O 排放的影响[D]. 新疆 石河子: 石河子大学, 2016.
- [21] 陈图峥, 李艳红, 李发东, 等. 人为干扰活动对玛纳斯河流域棉田土壤容重的影响[J]. 水土保持, 2021, 9(1): 26-39.
- [22] Ruser R, Flessa H, Russow R, et al. Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: Effect of compaction, soil moisture and rewetting[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(2): 263-274.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 49-56.
- [24] Allen M R, Stott P A, Mitchell J, et al. Quantifying the uncertainty in forecasts of anthropogenic climate change[J]. Nature, 2000, 407(6804): 617-620.
- [25] 栾军伟, 刘世荣. 土壤呼吸的温度敏感性: 全球变暖正负反馈的不确定因素[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4902-4913.
- [26] 周金霖, 黄阳, 陈佳婧, 等. 重庆市农田土壤有机碳时空变化与固碳潜力分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3647-3654.
- [27] 郭强, 王振华, 郑旭荣, 等. PBAT 生物降解膜覆盖对绿洲滴灌棉花土壤水热及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 135-143.
- [28] 李锐. 浅埋滴灌下施氮水平对春玉米氮效率及土壤温室气体排放的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古民族大学, 2021.
- [29] Nguyen L T T, Kravchenko A N. Effects of cover crops on soil CO₂ and N₂O emissions across topographically diverse agricultural landscapes in corn-soybean-wheat organic transition[J]. European Journal of Agronomy, 2021, 122: 126-189.
- [30] 陈霖明, 李艳红, 李发东, 等. 玛纳斯河流域出苗期棉田土壤膜下滴灌前后水分—盐分—养分运移分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2021, 56(5): 110-119.
- [31] Fortin M C, Rochette P, Pattey E. Soil carbon dioxide fluxes from conventional and no-tillage small-grain cropping systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(5): 1541-1547.
- [32] 陈慧, 侯会静, 蔡焕杰, 等. 加气灌溉温室番茄地土壤 N₂O 排放特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 111-117.
- [33] 颌鹏. 河西绿洲农田生态系统土壤碳汇时空演变研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2009.
- [34] 明广辉. 绿洲膜下滴灌农田水热盐碳通量研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- [35] 吕晓东. 干旱绿洲灌区典型农田温室气体排放及其减排效应[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [36] 孙星. 盐分、pH、施 N 量对盐碱土壤 N₂O 排放影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2014.
- [37] Butterbachbahl K, Baggs E M, Dannenmann M, et al. Nitrous oxide emissions from soils: How well do we understand the processes and their controls? [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences, 2013, 368(1621): e20130122.
- [38] 陈召月, 段巍巍. 旱地农田 N₂O、CO₂ 排放主要影响因素及减排措施研究进展[J]. 现代农业科技, 2020(24): 140-142.
- [39] 石轩, 李艳红, 李发东. 玛纳斯河流域不同灌区棉田土壤铵态氮和硝态氮变化特征及影响因素[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, 60(6): 80-90.
- [40] Rafique R, Kumar S, Luo Y, et al. Estimation of greenhouse gases (N₂O, CH₄ and CO₂) from no-till cropland under increased temperature and altered precipitation regime: A DAYCENT model approach[J]. Global and Planetary Change, 2014, 118: 106-114.
- [41] 王树涛, 门明新, 刘微, 等. 农田土壤固碳作用对温室气体减排的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(6): 1775-1780.
- [42] 张恒恒, 严昌荣, 张燕卿, 等. 北方旱区免耕对农田生态系统固碳与碳平衡的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 240-247.
- [43] 石岳峰, 吴文良, 孟凡乔, 等. 农田固碳措施对温室气体减排影响的研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(1): 43-48.
- [44] 张海晶, 王少杰, 田春杰, 等. 玉米秸秆及其生物炭对东北黑土溶解有机质特性的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 243-250.
- [45] 姜蓝齐, 臧淑英, 张丽娟, 等. 松嫩平原农田土壤有机碳变化及固碳潜力估算[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7068-7081.