

# 立式深旋耕作对马铃薯农田土壤温室气体排放的影响

缪平贵<sup>1</sup> 于显枫<sup>2</sup> 张绪成<sup>1,2</sup> 方彦杰<sup>2</sup> 侯慧芝<sup>2</sup> 王红丽<sup>2</sup> 马一凡<sup>2</sup> 窦学诚<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>甘肃农业大学农学院/甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 730070, 甘肃兰州; <sup>2</sup>甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 730070, 甘肃兰州)

**摘要** 为明确立式深旋耕作 (VRT) 技术对马铃薯全生育期农田温室气体 ( $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$ ) 排放的影响, 采用静态暗箱—气相色谱法, 设置立式深旋松覆膜种植马铃薯 (VRT-P)、旋耕覆膜种植马铃薯 (TT-P)、立式深旋松露地无作物 (VRT-FL) 和旋耕露地无作物 (TT-FL) 4 个处理, 测定土壤含水量、温度和温室气体排放通量等, 研究 VRT 对温室气体排放的影响及其机制。结果表明, VRT 能显著提高 0~30cm 土层的土壤含水量, 在现蕾期、始花期、盛花期和淀粉累积期, VRT-P 处理较 TT-P 处理分别增加了 9.8%、8.4%、14.6% 和 18.9%, VRT-FL 处理较 TT-FL 处理分别增加了 12.3%、9.1%、10.7% 和 26.8%; 0~25cm 土层土壤温度在现蕾期显著增加。农田土壤温室气体  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  排放通量呈现夏秋高而冬春低的季节性分布规律, 在马铃薯生育期内 VRT-P 处理的  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  排放通量较 TT-P 处理分别提高 39.9% 和 26.1%, 在休闲季节分别提高 11.2% 和 35.9%; VRT-FL 处理的  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  排放通量较 TT-P 处理分别增加 62.8% 和 4.4%, 在休闲季节分别增加了 41.5% 和 4.8%。种植作物对温室气体排放有显著影响, VRT-P 处理的  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  排放通量较 VRT-FL 处理分别提高了 78.2% 和 41.9%, TT-P 处理的  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  排放通量较 TT-FL 处理分别提高了 107.3% 和 24.1%, 均达到显著差异。VRT 提高了土壤温度和湿度, 可显著提高土壤温室气体 ( $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$ ) 排放通量。

**关键词** 立式深旋耕作; 马铃薯; 温室气体; 排放通量

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



近年来, 由农业生产造成的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放量分别约占全球人为温室气体排放量的 12%、50% 和 60%, 我国农业碳排放量占温室气体排放总量的 16%~17%<sup>[1-2]</sup>。耕作是农业生产活动中的重要环节, 能有效调节土壤的理化性状, 主要包括土壤容重、孔隙度、土壤团聚体以及持水率等方面<sup>[3]</sup>, 可以改变土壤微生物生存的微环境及土壤有机质在土壤剖面中的分布等<sup>[4]</sup>; 同时耕作措施可以改变土壤水分和温度等环境因子。温度通过多种途径对温室气体排放产生影响, 土壤温度升高可以加速土壤有机质分解和土壤微生物活性, 继而影响作物根系呼吸和有机质分解<sup>[5]</sup>, 增加土壤中温室气体排放。土壤含水量和含氧量呈负相关, 土壤含氧量同样影响微生物的活性与植物生长, 这对温室气体排放有显著影响<sup>[6]</sup>。 $\text{CO}_2$  排放通量的变化与土壤含水量

的关系复杂, 当土壤含水量过高时, 较差的土壤通气性限制了  $\text{CO}_2$  的排放; 当土壤含水量过低时, 土壤微生物活性和植物根系的呼吸作用被抑制, 进而减小  $\text{CO}_2$  的排放通量<sup>[7-8]</sup>。Giuseppe 等<sup>[9]</sup> 研究发现, 免耕能够增加土壤容重、土壤含水量和有机碳含量, 从而促进农田  $\text{N}_2\text{O}$  排放。Lamprey 等<sup>[10]</sup> 发现, 与常规翻耕和旋耕相比, 深松增加了土壤孔隙度、土壤饱和导水率, 使土壤  $\text{CO}_2$  排放通量显著降低。种植作物会影响农田土壤中氮的吸收与固定, 改变土壤有机质含量<sup>[11]</sup>。另外, 作物根系的生长会改变土壤微环境, 影响土壤微生物的活性, 同时能够影响土壤水分分布, 调节土壤温度, 从而影响农田温室气体的排放<sup>[12-13]</sup>。田琴<sup>[14]</sup> 研究表明, 与种植作物的农田相比较, 裸地农田土壤中微生物活性较低, 土壤呼吸速率与作物根系生物量呈正相关。

作者简介: 缪平贵, 主要从事作物栽培与生态生理研究, E-mail: yamo613691187g@163.com

张绪成为通信作者, 主要从事作物栽培、植物营养生理、节水农业和植被生态方面的研究, E-mail: gszhangxuch@163.com;

窦学诚为共同通信作者, 主要从事区域经济学研究, E-mail: tigerzyx@163.com

基金项目: 甘肃省农业科学院农业科技创新专项计划 (2017GAAS27); 国家重点研发计划 (2018YFD020080105)

收稿日期: 2019-10-21; 修回日期: 2019-11-02; 网络出版日期: 2020-04-21

立式深旋耕作技术是借鉴了粉垄技术，同时具备深松和旋耕优势的一项新型耕作技术<sup>[15-17]</sup>，其耕作深度可达 40cm 以上，能够有效打破犁地层，提高土壤孔隙度，改善土壤通透性，降低土壤容重，增加地温和土壤含水量<sup>[18]</sup>，能有效改善作物生长的水热环境<sup>[18-19]</sup>，促进马铃薯根系及块茎的生长<sup>[16]</sup>，而这些因素均能显著影响温室气体排放，目前对此尚无相关研究报道。为此，本研究以传统旋耕为对照，测定立式深旋耕作技术种植马铃薯和露地农田土壤温湿度和温室气体排放通量，分析比较耕作方式对农田温室气体排放通量差别，以明确立式深旋耕作对农田温室气体排放的影响，为探索资源高效和环境友好的绿色耕作方式提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

试验于 2017–2018 年在甘肃省农业科学院定

西试验站（甘肃省定西市安定区团结镇唐家堡村，104° 36' E，35° 35' N）进行。该地区海拔 1 900m，年平均气温 6.2℃，年辐射总量 5 898.2MJ/m<sup>2</sup>，年日照时数 2 500h，≥10℃年积温 2 075℃，无霜期 140d，属中温带半干旱气候。作物一年一熟，为典型旱地雨养农业区。年平均降水量为 410mm，降水季节分布不均匀，6–9 月份降水量占全年总降水量的 67.8%，降水相对变率为 24.2%，400mm 降水保证率为 48.1%。试验区土壤类型为黄绵土，0–30cm 土层平均容重 1.25g/cm<sup>3</sup>，田间持水量为 21.2%，凋萎系数为 7.20%。

1.2 试验区域气候条件

甘肃省农业科学院定西试验站气象统计资料显示，2017 年为欠水年，马铃薯生育期内降雨量为 353.5mm，但在马铃薯盛花期出现持续干旱，降雨量呈现季节性分配不均的现象，如图 1 所示。2017 年平均温度与多年平均温度基本一致。

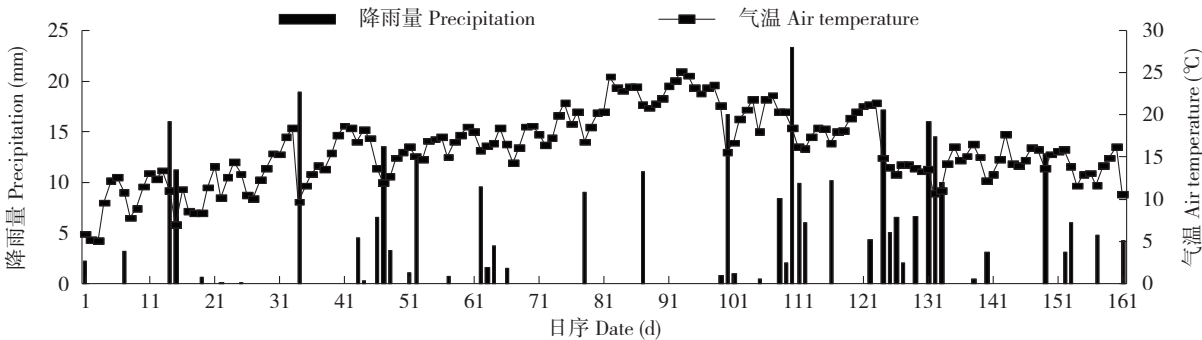


图 1 2017 年试验区降雨量分布及平均气温变化  
Fig.1 Precipitation and average air temperature in test area in 2017

1.3 试验设计

试验为随机区组试验，共设 4 个处理，分别为立式深旋松覆膜种植马铃薯（VRT-P，用由定西三

石农业科技有限公司和甘肃省农业科学院旱地农业研究所共同研制的立式深旋松耕作施肥覆膜一体机早春耕作，耕深 40cm 左右。按季节用马铃薯点播

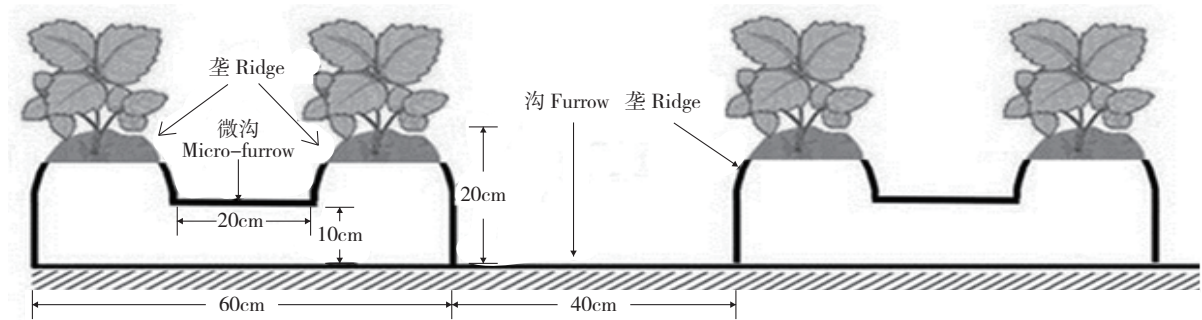


图 2 马铃薯全膜覆盖垄上微沟示意图  
Fig.2 Potato micro-furrows on ridges and planting with plastic mulching

器垄上穴播, 每穴 1~2 株)、立式深旋松露地无作物 (VRT-FL)、旋耕覆膜种植马铃薯 (TT-P, 旋耕机早春耕作, 耕深 15cm 左右) 和旋耕露地无作物 (TT-FL)。采用全膜覆盖垄上微沟的种植方法, 宽窄行种植, 带宽为 100cm, 其中宽行为 60cm, 窄行为 40cm。在垄上的微沟内每隔 50cm 打孔, 以使降水能够入渗。马铃薯种植在垄上微沟两侧的垄顶, 播种深度 8~10cm。供试品种为陇薯 10 号, 播种密度为 50 000 株/hm<sup>2</sup>。试验各处理在全生育期不灌溉, 除拔草和花期追肥外不进行其他管理。

#### 1.4 测定指标及方法

**1.4.1 温室气体排放通量** 于 2017 年 5 月开始进行气体采样, 在马铃薯生育期内每 15d 采集 1 次样, 于每天 8:30–11:30 进行。采用静态暗箱–气相色谱法测定温室气体排放通量。大田中使用静态暗箱收集气体。静态暗箱为正方体, 包括底座和顶箱, 由不锈钢钢板制成, 高 60cm, 长 60cm, 宽 60cm, 采样箱体内装 100mm 小风扇来搅匀箱体内气体。用 12V 蓄电池作为外接电源, 为风扇转动提供电能。静态暗箱箱体一侧装有取样通气阀门和温度探头, 方便取样和读取温度。底座高 15cm, 底座上方置有 3cm 密封水槽, 下方由不锈钢钢板制成, 便于底座嵌入农田土壤中, 同时不影响底座内外作物生长。底座于马铃薯播种后插入各小区中央, 整个试验过程均不挪动。取样时, 先在顶箱嵌入之前放置好的正方形底座水槽处注入定量的水, 保证掩盖箱体与底座接触缝隙。接通小风扇电源后静置 5min, 然后使用 50mL 医用注射器采集在 0、10、20、30 和 40min 的气体样品, 将采集的气体分别注入做好标记的 3L 铝塑复合密闭气袋中, 采集

后将样品带回实验室, 于 24~48h 内完成样品分析。

**1.4.2 土壤温度** 用曲管地温计测定各小区土壤温度, 测定土壤深度分别为 5、10、15、20 和 25cm, 自马铃薯播种后, 每隔 15d 测定 1 次土壤温度, 测至马铃薯收获期。每次测定 8:00、14:00 和 18:00 3 个时刻的土壤温度。

**1.4.3 土壤含水量** 每 15d 测定 1 次土壤含水量, 播种前、收获后, 测定土壤深度为 30cm。测定时, 用土钻人工取土, 每 10cm 一分层。土壤含水量计算公式: 土壤含水量 = [(湿土重 + 铝盒重) - (干土重 + 铝盒重)] / [(干土重 + 铝盒重) - 铝盒重] × 100%。

#### 1.5 数据分析

根据每组 5 个样品的气体体积比与对应采样时间的直线回归斜率求得各气体排放通量。CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量计算公式:

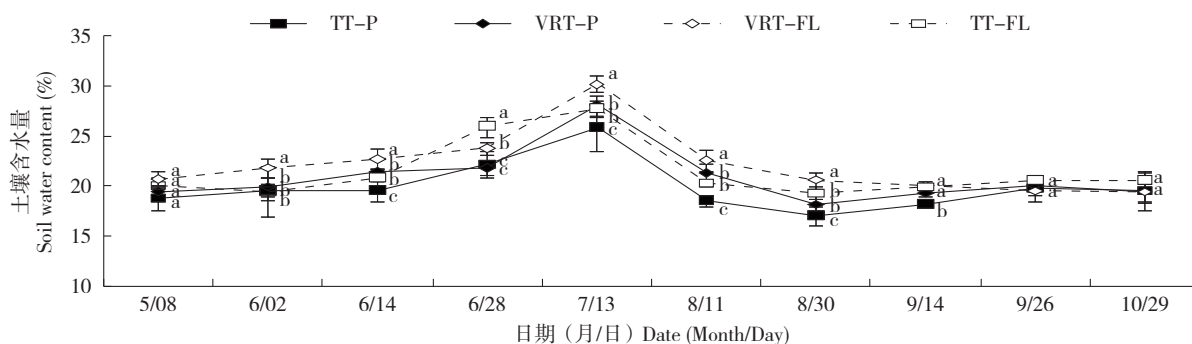
$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T}$$

式中,  $F$  为 N<sub>2</sub>O [μg/(m<sup>2</sup>·h)]、CO<sub>2</sub> [mg/(m<sup>2</sup>·h)] 排放通量;  $\rho$  为标准状况下 N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 的相对密度, 分别为 1.25、0.5g/L;  $V$  为静态箱体积 (m<sup>3</sup>);  $A$  为采样底座内土壤表面积 (m<sup>2</sup>);  $\Delta C/\Delta t$  为 N<sub>2</sub>O (μg/h)、CO<sub>2</sub> (mg/h) 排放速率;  $T$  为采样箱内温度 (°C)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同耕作方式对土壤含水量的影响

马铃薯生育期内降水量季节性分布不均匀。在现蕾期 (6 月 14 日)、始花期 (6 月 28 日)、盛花期 (7 月 13 日) 和淀粉累积前期 (8 月 30–9 月 14 日), VRT-P 处理较 TT-P 处理土壤含水量分别增加了 9.8%、9.1%、14.6% 和 26.8%, VRT-FL 处



不同字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同

Different letters indicate significant difference among treatments at 0.05 level, the same below

图 3 不同处理土壤水分 (0~30cm) 动态变化

Fig.3 Dynamic changes of soil water (0~30cm) under different treatments



理较 TT-FL 处理土壤含水量分别增加了 12.3%、8.4%、10.7% 和 18.9%，差异均达到显著水平。盛花期 TT-P 处理较 TT-FL 处理的土壤含水量降低了 8.7%，VRT-P 处理较 VRT-FL 处理降低了 5.5%。在受到长期干旱胁迫时，VRT 处理能有效提高土壤含水量，因此，VRT 处理土壤含水量比同时期 TT 高，VRT-P 处理较 VRT-FL 处理土壤含水量降低了 5.4%，TT-P 处理较 TT-FL 处理降低了 7.1%，差异达到显著水平。

## 2.2 不同耕作方式对土壤温度的影响

马铃薯生育期内 0~25cm 土壤温度呈现夏秋

高、冬春低的季节性变化规律。马铃薯生育期内，VRT-P 处理 0~25cm 土层温度较 TT-P 处理增加 2.1%，VRT-FL 处理较 TT-FL 处理增加 2.7%，在现蕾期分别增加了 6.5% 和 8.3%，差异达到显著水平。与 VRT-FL 处理相比，VRT-P 处理土壤温度增加了 1.6%，淀粉累积期增加了 14.7%，TT-P 处理较 TT-FL 处理土壤温度增加了 0.9%，淀粉积累期增加了 19.2%。不种植作物情况下，VRT 处理与 TT 处理在 0~25cm 土层温度变化随季节而变化，在气温增加的 4~6 月份，VRT 处理较 TT 处理升高了 3.8%；在温度较高的 7~8 月份，升高了 6.3%；在气

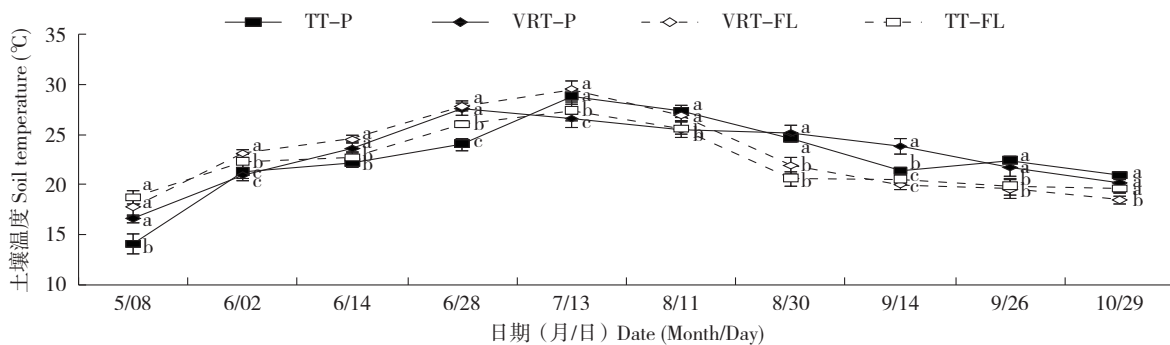


图 4 不同处理土壤温度 (0~25cm) 动态变化

Fig.4 Dynamic changes of soil temperature (0~25cm) under different treatments

温下降的 9~10 月份，降低了 3.0%。

## 2.3 不同耕作方式对土壤 $N_2O$ 排放通量的影响

不同处理间土壤  $N_2O$  排放通量整体呈现季节性变化规律，在 6~7 月份和 9 月份呈现出增高趋势 (图 5)。马铃薯生育期内，VRT-P 处理农田  $N_2O$  排放通量较 TT-P 处理增加了 39.9%，VRT-FL 处理较 TT-FL 处理增加了 62.8%，均达到显著差异。在现蕾期、始花期、盛花期和收获期 (9 月 26 日)，VRT-P 处理的农田  $N_2O$  排放通量较 TT-P 处理分别增加了 121.1%、44.9%、125.6% 和 71.2%，VRT-

FL 处理较 TT-FL 处理分别增加了 41.1%、40.9%、199.5% 和 35.3%，均达到显著差异。种植作物对农田温室气体  $N_2O$  的排放通量有显著影响。在马铃薯生育期内，VRT-P 处理农田温室气体  $N_2O$  的排放通量较 VRT-FL 处理增加了 107.3%，TT-P 处理较 TT-FL 处理增加了 78.2%，均达到显著差异。在现蕾期、始花期、盛花期、淀粉累积前期和收获期，VRT-P 处理农田温室气体  $N_2O$  的排放通量较 VRT-FL 处理分别增加了 85.9%、34.8%、173.2% 和 100.6%，TT-P 处理较 TT-FL 处理分别增加了

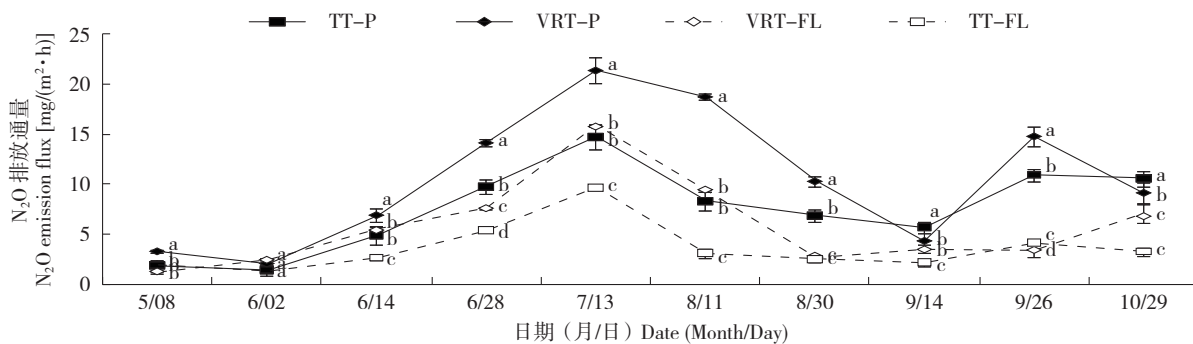


图 5 不同处理土壤  $N_2O$  排放通量季节性动态变化

Fig.5 Seasonal dynamic changes of  $N_2O$  emission flux from soils under different treatments

23.6%、52.0%、274.3% 和 166.4%，均达到差异显著。

2.4 不同耕作方式对土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量的影响

不同处理间土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量整体呈现季节性变化规律，在 6–7 月份和 9 月份呈现出增高趋势（图 6）。马铃薯生育期内，VRT-P 处理的农田 CO<sub>2</sub> 排放通量较 TT-P 处理增加了 26.1%，达到显著差异；VRT-FL 处理较 TT-FL 处理增加了 4.4%。在苗期、现蕾期、始花期和收获期，VRT-P 处理的农田 CO<sub>2</sub> 排放通量较 TT-P 处理分别增加了 17.9%、32.2%、8.3% 和 30.5%，均达到显著差异，VRT-

FL 处理较 TT-FL 处理分别增加了 5.7%、41.1%、23.0% 和 9.2%，均达到显著差异水平。与空白对照相比，种植作物处理对农田温室气体 CO<sub>2</sub> 的排放通量有显著影响。在马铃薯生育期内，VRT-P 处理农田温室气体 CO<sub>2</sub> 的排放通量较 VRT-FL 处理增加了 41.9%，TT-P 处理较 TT-FL 处理增加了 24.1%，均达到显著差异。在现蕾期、始花期、盛花期和收获期，TT-P 处理农田温室气体 CO<sub>2</sub> 的排放通量较 TT-FL 处理分别增加了 99.5%、60.7%、42.0% 和 67.8%，VRT-P 处理较 VRT-FL 处理分别增加了

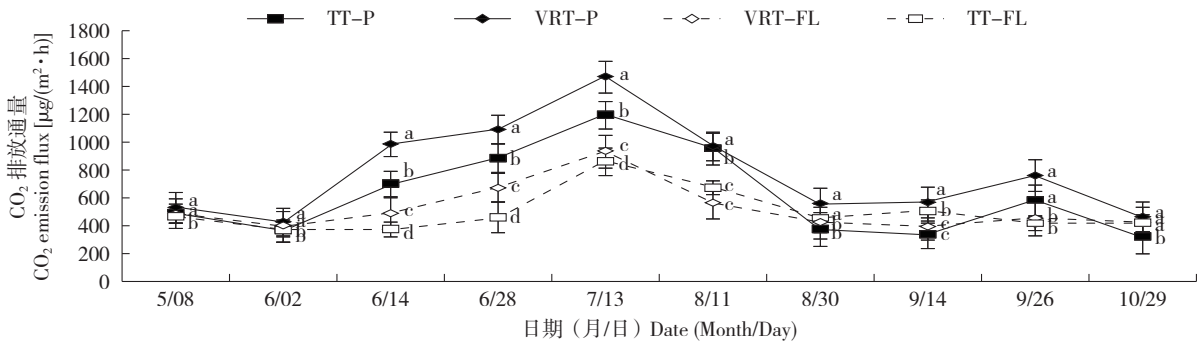


图 6 不同处理土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量季节性动态变化  
Fig.6 Seasonal dynamic changes of CO<sub>2</sub> emission flux from soils under different treatments

86.5%、92.7%、73.7% 和 40.4%，均达到显著差异。

2.5 土壤温度和含水量对 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响

以土壤温度和含水量为自变量、温室气体排放通量为因变量进行了回归分析。0~25cm 土壤

温度与 N<sub>2</sub>O 排放通量之间呈现显著正相关关系 ( $r=0.649\sim0.764$ )，马铃薯生育期内，随着土壤温度的升高，农田 N<sub>2</sub>O 的排放通量也随之增高；0~25cm 土壤温度与 CO<sub>2</sub> 排放通量之间呈现显著相关关系，VRT-FL 处理达到极显著相关（表 1）。

表 1 不同耕作措施下土壤温度（0~25cm）与农田温室气体排放通量的回归方程  
Table 1 Regression equations of soil temperature (0–25cm) and greenhouse gas emission fluxes under different tillage measures

气体排放通量 Gas emission flux	处理 Treatment	回归方程 Regression equation	决定系数 Coefficient of determination ( $R^2$ )	相关系数 Correlation coefficient ( $r$ )
N <sub>2</sub> O 排放通量 N <sub>2</sub> O emission flux	TT-P	$y=0.7157x-8.7865$	0.4711	0.686 <sup>*</sup>
	VRT-P	$y=1.3013x-19.7370$	0.4317	0.657 <sup>*</sup>
	VRT-FL	$y=0.8064x-12.6620$	0.5836	0.764 <sup>**</sup>
	TT-FL	$y=0.5486x-8.6616$	0.4727	0.687 <sup>*</sup>
CO <sub>2</sub> 排放通量 CO <sub>2</sub> emission flux	TT-P	$y=50.5450x-531.4200$	0.4427	0.649 <sup>*</sup>
	VRT-P	$y=70.9560x-866.2500$	0.4871	0.715 <sup>*</sup>
	VRT-FL	$y=31.9210x-210.8100$	0.6073	0.821 <sup>**</sup>
	TT-FL	$y=34.1400x-264.6100$	0.4554	0.674 <sup>*</sup>

注：“\*”表示 0.05 水平上相关显著，“\*\*”表示 0.01 水平上相关极显著，下同  
Note: “\*” indicates the difference is significant at 0.05 level, “\*\*” indicates the difference is extremely significant at 0.01 level, the same below

0~30cm 土壤含水量与农田 N<sub>2</sub>O 排放通量之间的关系呈显著正相关，随着土壤含水量升高，农田 N<sub>2</sub>O 排放通量也随着增加；0~30cm 土壤含水量与农

田 CO<sub>2</sub> 排放通量之间呈显著正相关，随着农田土壤含水量的增加，农田 CO<sub>2</sub> 排放通量增大，其中 VRT-P 和 VRT-FL 处理呈现极显著相关（表 2）。

表 2 不同耕作措施下土壤水分（0~30cm）与农田温室气体排放通量的回归方程  
Table 2 Regression equations of soil moisture (0~30cm) and greenhouse gas emission fluxes under different tillage measures

气体排放通量 Gas emission flux	处理 Treatment	回归方程 Regression equation	决定系数 Coefficient of determination ( $R^2$ )	相关系数 Correlation coefficient ( $r$ )
N <sub>2</sub> O 排放通量 N <sub>2</sub> O emission flux	TT-P	$y=1.0920x-14.2490$	0.4129	0.642 <sup>*</sup>
	VRT-P	$y=1.6279x-23.5470$	0.4493	0.671 <sup>*</sup>
	VRT-FL	$y=1.1503x-19.5530$	0.7138	0.844 <sup>**</sup>
	TT-FL	$y=0.7816x-13.1510$	0.8563	0.925 <sup>**</sup>
CO <sub>2</sub> 排放通量 CO <sub>2</sub> emission flux	TT-P	$y=92.5140x-1223.8000$	0.5584	0.723 <sup>*</sup>
	VRT-P	$y=111.5600x-1550.6000$	0.8008	0.913 <sup>**</sup>
	VRT-FL	$y=49.7470x-576.7400$	0.8866	0.993 <sup>**</sup>
	TT-FL	$y=33.9710x-229.3800$	0.4025	0.634 <sup>*</sup>

3 讨论

耕作措施会改变农田土壤的理化性状，而作物根系的生长会影响农田土壤微生物的活性，从而影响农田温室气体的排放。本研究中，在不种植作物情况下，立式深旋耕作的 N<sub>2</sub>O 排放通量较传统旋耕增加了 62.8% ( $P<0.05$ )，CO<sub>2</sub> 排放通量增加了 4.4%；在种植马铃薯后，立式深旋耕作处理的 N<sub>2</sub>O 排放通量较传统旋耕处理增加了 39.9%，CO<sub>2</sub> 排放通量增加了 26.1%，均达到显著差异，这主要是立式深旋耕作使土壤含水量增加了 3.1%~5.0%，在现蕾期、始花期、盛花期和淀粉累积期立式深旋耕作处理的土壤含水量较传统耕作处理分别增加了 9.8%~12.3%、8.4%~9.1%、10.7%~14.6% 和 18.9%~26.8%，均达到显著差异；0~25cm 土层土壤温度在现蕾期显著增加。不同耕作措施可改变农田土壤理化性质，立式深旋能使土壤容重下降了 11.2%~24.8%，土壤孔隙度提高了 29.7%~46.6%<sup>[18,20]</sup>，而土壤物理性状的变化，会导致土壤有机质在剖面中的分布和分解发生改变<sup>[4]</sup>，引起温室气体排放增加<sup>[21-22]</sup>。种植作物会影响农田土壤碳氮的转化<sup>[11]</sup>以及土壤微生物的活性，且调节土壤温湿度，引起农田温室气体排放发生变化<sup>[12-13]</sup>。立式深旋耕作可以提高农田土壤含水量，从而促进 CO<sub>2</sub> 排放；土壤含水量主要通过改变土壤中 O<sub>2</sub> 的含量，控制硝化和反硝化微生物的活性，从而影响土壤中氮的矿化速率。

水分和温度是影响农田 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 排放通量的 2 个主要因素<sup>[23]</sup>，而耕作措施对土壤温湿度有显著的调节作用，进而影响作物的生长发育，最终调节农田温室气体的排放<sup>[24]</sup>。本试验中，N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub>

排放通量与 0~30cm 土层土壤含水量呈显著正相关。土壤含水量影响作物根系生长、根系呼吸和土壤微生物活力从而影响农田温室气体的排放<sup>[25]</sup>。农田土壤含水量增大会促进作物根系生长，增强土壤微生物的活性，加速土壤碳氮矿化速率，进而促使农田排放更多的 N<sub>2</sub>O<sup>[26-27]</sup>。研究表明，CO<sub>2</sub> 排放通量受土壤含水量时间（年、季节、日）分布的影响，如在干旱季节 CO<sub>2</sub> 排放通量的主导因子为土壤含水量，降雨可以有效减少土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量<sup>[28]</sup>。农田土壤中土壤含水量的增加会增强土壤微生物的活性，提高农田土壤中有机的矿化速率，促使农田土壤排放大量的 CO<sub>2</sub><sup>[29]</sup>。本试验中，0~25cm 土层土壤温度与农田温室气体 N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 排放通量呈显著正相关。土壤温度通过多种途径对温室气体排放产生影响，土壤温度升高可以加速土壤有机质分解和土壤微生物活性，继而影响作物根系呼吸和有机质的分解，从而增加土壤温室气体的排放<sup>[30]</sup>，N<sub>2</sub>O 排放/吸收状态主要由控制硝化与反硝化的微生物调控，而温度的升高会影响微生物的活性，进而间接影响 N<sub>2</sub>O 排放通量的增加<sup>[31]</sup>，这一结论与姚凡云等<sup>[32]</sup>和徐聪<sup>[33]</sup>的研究结果一致。

4 结论

立式深旋耕作能够增加土壤温度和土壤含水量，在马铃薯生育期内 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 排放通量较传统旋耕增加了 39.9%~62.8% 和 4.4%~26.1%。农田温室气体排放通量与 0~25cm 土层土壤温度呈显著正相关，随农田土壤温度的升高，农田温室气体的排放通量增加；与 0~30cm 土层土壤含水量呈显著正相关。因此，立式深旋耕作提高了土壤温度和湿度，在种植作物后促进了 CO<sub>2</sub> 排放，但抑制了 N<sub>2</sub>O

的排放。

### 参考文献

- [1]任凤玲. 施用有机肥我国典型农田土壤温室气体排放特征. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [2]田云, 张俊彪, 李波. 中国农业碳排放研究: 测算、时空比较及脱钩效应. 资源科学, 2012, 34(11): 2097–2105.
- [3]Samoura M L. 耕作方式与秸秆还田对双季稻产量和温室气体排放的影响. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [4]姚鹏伟. 旱作农田土壤温室气体剖面分布及净排放对作物、氮肥和覆膜的响应. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [5]田慎重. 耕作方式及其转变对麦玉两熟农田土壤CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O排放和固碳能力的影响. 泰安: 山东农业大学, 2010.
- [6]Fierer N. A proposed mechanism for the pulse in carbon dioxide production commonly observed following the rapid rewetting of a dry soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(3): 798–805.
- [7]李赞, 贾宏涛, 方光新, 等. 围栏封育对新疆亚高山草甸土壤夏季CO<sub>2</sub>日排放的影响. 干旱区地理, 2008, 31(6): 892–896.
- [8]刘硕, 游松财, 李玉娥, 等. 基于模拟试验的CO<sub>2</sub>浓度和气温升高对水稻产量的影响. 湖南农业科学, 2013(1): 94–96.
- [9]Giuseppe B, Emilio B, Gaetano A. Long-term effects of contrasting tillage on soil organic carbon, nitrous oxide and ammonia emissions in a Mediterranean Vertisol under different crop sequences. *Science of the Total Environment*, 2018, 619: 18–27.
- [10]Lamprey S, Li L L, Xie J H. Soil respiration and net ecosystem production under different tillage practices in semi-arid Northwest China. *Plant Soil and Environment*, 2017, 63: 14–21.
- [11]杨兰芳, 蔡祖聪. 不同生长期盆栽大豆的土壤呼吸昼夜变化及其影响因子. 生态学报, 2004, 24(12): 2955–2960.
- [12]陈书涛. 管理措施对农田生态系统土壤呼吸、N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>排放的影响. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [13]杨晓琳. 华北平原不同轮作模式节水减排效果评价. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [14]田琴. 黄土丘陵区典型植被类型土壤微生物及异养呼吸特征. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [15]韦本辉. 旱地作物粉垄栽培技术研究简报. 中国农业科学, 2010, 43(20): 4330.
- [16]侯慧芝, 张绪成, 王娟, 等. 半干旱区旱地马铃薯立式深旋耕作栽培技术. 中国蔬菜, 2019(3): 95–97.
- [17]韦本辉, 甘秀芹, 申章佑, 等. 粉垄栽培甘蔗试验增产效果. 中国农业科学, 2011, 44(21): 4544–4550.
- [18]李华, 逢焕成, 任天志, 等. 深旋松耕作法对东北棕壤物理性状及春玉米生长的影响. 中国农业科学, 2013, 46(3): 647–656.
- [19]张绪成, 马一凡, 于显枫, 等. 西北半干旱区深旋松耕作对马铃薯水分利用和产量的影响. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3293–3301.
- [20]张绪成, 马一凡, 于显枫, 等. 立式深旋松耕对西北半干旱区土壤水分性状及马铃薯产量的影响. 草业学报, 2018, 27(12): 156–165.
- [21]成臣, 曾勇军, 杨秀霞, 等. 不同耕作方式对稻田净增温潜势和温室气体强度的影响. 环境科学学报, 2015, 35(6): 1887–1895.
- [22]吕锦慧, 武均, 张军, 等. 不同耕作措施下旱作农田土壤CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>排放特征及其影响因素. 干旱区资源与环境, 2018, 32(12): 26–33.
- [23]李叶杉, 张仁陟, 张军, 等. 不同施氮水平下陇中黄土高原旱作小麦农田土壤温室气体的排放特征. 甘肃农业大学学报, 2018, 53(6): 34–41.
- [24]赵力莹, 董文旭, 胡春胜. 耕作方式转变对冬小麦季农田温室气体排放和产量的影响. 中国生态农业学报, 2018, 26(11): 1613–1623.
- [25]江峰. 秸秆还田与灌溉模式对超级梗稻产量形成、及温室气体排放的影响. 扬州: 扬州大学, 2014.
- [26]李平, 郎漫. 硝化和反硝化过程对林地和草地土壤N<sub>2</sub>O排放的贡献. 中国农业科学, 2013, 46(22): 4726–4732.
- [27]吕晓东, 王婷. 旱地农田氧化亚氮排放研究进展. 甘肃农业科技, 2018(10): 67–73.
- [28]常宗强, 冯起, 司建华, 等. 土壤水热条件对祁连山荒漠草原土壤CO<sub>2</sub>通量的影响. 干旱区地理, 2007, 30(6): 812–819.
- [29]刘全全. 降水变化对黄土高原旱作冬小麦农田土壤温室气体排放的影响. 西安: 西北大学, 2015.
- [30]尹高飞. 有机肥替代对不同作物轮作模式下农田温室气体排放的影响. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [31]林存刚. 硝化与反硝化作用对农田土壤N<sub>2</sub>O排放的贡献. 重庆: 西南大学, 2006.
- [32]姚凡云, 王立春, 多馨曲, 等. 不同氮肥对东北春玉米农田温室气体周年排放的影响. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1303–1311.
- [33]徐聪. 华北平原长期氮肥施用和秸秆还田下温室气体排放及氮素损失特征. 北京: 中国农业大学, 2018.

## Effects of Vertical Deep Rotary Tillage on Soil Greenhouse Gas Emissions from Potato Farmland

Miao Pinggui<sup>1</sup>, Yu Xianfeng<sup>2</sup>, Zhang Xucheng<sup>1,2</sup>, Fang Yanjie<sup>2</sup>,  
Hou Huizhi<sup>2</sup>, Wang Hongli<sup>2</sup>, Ma Yifan<sup>2</sup>, Dou Xuecheng<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>School of Agriculture, Gansu Agricultural University/Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou 730070, Gansu, China; <sup>2</sup>Institute of Dryland Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu, China)

**Abstract** In order to study the effects of vertical deep rotary tillage (VRT) technology on greenhouse gas (CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O) emissions in the whole growth period of potato farmland was analyzed. Static box-gas chromatography was used in the experiment to design four treatments: vertical deep rotary mulch planting potato (VRT-P), rotary tillage mulch planting potato (TT-P), vertical deep rotary mulch without crop (VRT-FL) and rotary tillage without crop (TT-FL). Soil



water content, temperature and greenhouse gas emission flux were measured to study the effect of vertical deep rotary tillage on greenhouse gas emissions and its mechanism. The results showed that VRT treatment could significantly increase the soil water content of the 0-30cm soil layer. At buding stage, early flowering stage, full flowering stage and starch accumulation stage, VRT-P increased by 9.8%, 8.4%, 14.6% and 18.9% respectively compared with TT-P, while VRT-FL increased by 12.3%, 9.1%, 10.7% and 26.8% respectively compared with TT-FL. Soil temperature in 0-25cm soil layer increased significantly at budding stage. The emission fluxes of greenhouse gases ( $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$ ) from farmland soil showed a seasonal distribution pattern of high in summer and autumn and low in winter and spring. During the potato growth period, the  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  emission fluxes of VRT-P increased by 39.9% and 26.1% respectively compared with TT-P, and increased by 11.2% and 35.9% respectively in leisure season. Compared with TT-P, the  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  emission fluxes of VRT-RL increased by 62.8% and 4.4% respectively, and increased by 41.5% and 4.8% in leisure season respectively. Planting crop had a significant effect on greenhouse gas emissions. The  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  emission fluxes of VRT-P increased by 78.2% and 41.9% respectively compared with VRT-FL, and TT-P significantly increased by 107.3% and 24.1% respectively compared with TT-FL. Therefore, vertical deep rotation tillage significantly increases the emission flux of soil greenhouse gases ( $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$ ) due to the increase of soil temperature, humidity and the change of soil physical structure.

**Key words** Vertical deep rotary tillage; Potato; Greenhouse gases; Discharge flux