

丰雨年旱作农业区不同耕作措施 麦豆地 N₂O、CH₄ 的排放

孙成胜^{1,2}, 张仁陟^{1,2,3}, 张 军^{1,2,3}, 蔡立群^{1,2,3}, 周 欢^{1,2}, 董 博¹

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃省节水农业工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 采用静态箱-气相色谱法采集丰雨年旱作农业区不同耕作措施春小麦-豌豆地排放气体并计算通量, 研究耕作措施、土壤温度和土壤含水量对春小麦-豌豆地 N₂O 和 CH₄ 排放的影响, 其中, 耕作措施包括免耕秸秆覆盖(NTS)、免耕不覆盖(NT)和传统耕作+秸秆还田(TS)以及传统耕作不覆盖(T)四种。研究表明: 不同措施麦豆地均为 N₂O 的排放源, 春小麦地通量波动范围 0.018~0.146 mg·m⁻²·h⁻¹, 豌豆地通量波动范围 0.024~0.210 mg·m⁻²·h⁻¹, 全生育期春小麦地 N₂O 平均排放通量大小顺序: T>TS>NT>NTS, 而豌豆地大小顺序: T>NTS>NT>TS; 不同耕作措施麦豆地均表现为 CH₄ 的吸收汇, 春小麦地吸收通量的波动范围 0.051~0.212 mg·m⁻²·h⁻¹, 豌豆地的波动范围 0.057~0.193 mg·m⁻²·h⁻¹, 全生育期春小麦地 CH₄ 平均吸收通量大小顺序: NTS>NT>TS>T, 豌豆地大小顺序: NTS>TS>NT>T; 不同耕作措施对 N₂O 和 CH₄ 全生育期通量有明显的影响, TS、NT 和 NTS 三种耕作措施较 T 措施而言, 有效地减少了 N₂O 的排放且增加 CH₄ 的吸收; 丰雨年, 土壤温度和土壤含水量对旱作农业区 N₂O 和 CH₄ 排放综合影响权重有所降低。

关键词: N₂O; CH₄; 春小麦; 豌豆; 耕作措施; 丰雨年; 旱作农业

中图分类号: S345; S181.6 **文献标志码:** A

N₂O and CH₄ emissions of spring wheat – pea rotation fields under different tillage patterns in dryland farming in a wet year

SUN Cheng-sheng^{1,2}, ZHANG Ren-zhi^{1,2,3}, ZHANG Jun^{1,2,3}, CAI Li-qun^{1,2,3}, ZHOU Huan^{1,2}, DONG Bo²

(1. College of Resources and Environmental Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. Gansu Engineering Research Center for Agriculture Water-saving, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: This study aims to illustrate the effect of tillage patterns, soil temperature and soil moisture content on N₂O and CH₄ emissions of spring wheat-pea rotation fields in a wet year. Gases (N₂O and CH₄) emission were determined under four tillage patterns including no-tillage with straw mulching (NTS), no-tillage without straw mulching (NT), conventional tillage with straw mulching(TS) and conventional tillage without straw mulching (T) by static chamber-gas chromatographic techniques. The results showed that both wheat and pea fields were emission sources of N₂O regardless of the patterns. Emission flux of spring wheat field ranged from 0.018 mg·m⁻²·h⁻¹ to 0.146 mg·m⁻²·h⁻¹, while that from pea field was from 0.024 mg·m⁻²·h⁻¹ to 0.210 mg·m⁻²·h⁻¹. N₂O average emission flux of spring wheat field was in the order of T>NT>NTS>TS, while that from pea field T>NTS>NT>TS. Both wheat and pea fields were sinks of CH₄ irrespective of tillage patterns. The absorbed flux of spring wheat and pea field were from 0.051 mg·m⁻²·h⁻¹ to 0.212 mg·m⁻²·h⁻¹ and 0.057 mg·m⁻²·h⁻¹ to 0.193 mg·m⁻²·h⁻¹, respectively. Average CH₄ absorption fluxes of spring wheat and pea field was in the order of NTS>NT>TS>T and NTS>TS>NT>T, respectively. Significant effects on fluxes of N₂O and CH₄ existed across the tillage patterns. Compared with T, TS, NT and NTS

收稿日期: 2014-05-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(31160269); 国家科技支撑计划(2012BAD14B03)

作者简介: 孙成胜(1988—), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 研究方向为农业生态恢复。E-mail: 137911041@qq.com。

通信作者: 张仁陟(1961—), 男, 甘肃平凉人, 教授, 博士生导师, 研究方向节水农业及恢复生态学。E-mail: zhangrz@gsau.edu.cn。

reduced emissions of N_2O effectively and increased the absorption of CH_4 . The comprehensive influence of soil temperature and soil moisture content on N_2O and CH_4 emission in dryland farming in a wet year was lower than that in a normal year.

Keywords: N_2O ; CH_4 ; spring wheat; pea; cultivation practices; wet year; dryland agriculture

近年,在气候变暖的整体趋势下,气候变化愈加频繁,极端天气在全球范围不断出现,气候变化对自然、经济和人民生活的影响已成为社会和各界关注的热点问题^[1]。而气候变暖的主要原因之一就是温室气体吸收和反射太阳辐射产生“温室效应”,这些温室气体中的 CH_4 和 N_2O 因来源复杂、增长速率较快以及增温潜势强等原因成为温室气体研究的重点^[2-7]。大气中每年有 15%~30% 的 CH_4 、80%~90% 的 N_2O 来源于土壤,农田土壤是温室气体重要排放源^[8]。据国土资源部统计,全国现有旱作耕地面积 $6733 \times 10^4 \text{ hm}^2$,约占耕地总面积的 55%,广泛分布于西北、华北、东北等干旱、半干旱或半湿润偏旱地区,研究旱作农业温室气体排放对制定合理的农业减排措施和适应措施具有重要意义。

旱作农业区却因人类活动(如农牧业、挖掘和采集等)使农田遭受到很大破坏,出现水土流失,造成旱地农业生态系统明显的波动性特征,特别是降雨量的波动,对生产者和还原者影响较大^[9],尤其是丰雨年降雨波动性更大,使旱作农业区的土壤理化性状、土壤微生物等皆与干旱年有着较大的差别^[10-12],致使农业生态系统的 N_2O 和 CH_4 排放有别于干旱年。所以研究丰雨年旱作农业区温室气体排放特征及影响因素对于进一步了解旱作农业区农田温室气体排放机制具有实际意义。

目前,农田 N_2O 和 CH_4 排放研究十分广泛,研究结果表明:土壤、施肥、管理措施、气象条件等均可对 N_2O 和 CH_4 排放产生影响^[13-16],而且 CH_4 排放研究多集中于稻田^[17-18],研究旱作农业区 N_2O 和 CH_4 排放的相对较少。因此,本文以旱作农业区春小麦-豌豆轮作地为研究对象,采用静态箱-气相色谱法研究丰雨年较充足降雨条件下耕作措施、土壤含水量和土壤温度对农田 N_2O 和 CH_4 排放的影响,进一步了解旱地农业区耕地土壤温室气体源/汇的变化和影响机制,为合理安排耕作措施和促进 N_2O 和 CH_4 减排提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于甘肃省定西市安定区李家堡镇,属中温带半干旱区,是典型旱作农业区。海拔 2 000

m,年均太阳辐射 $591.9 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$,日照时数 2 476.6 h,无霜期 140 d,年均气温 6.4°C , $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 $2 933.5^\circ\text{C}$, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 $2 239.1^\circ\text{C}$ 。多年平均降水量 390.99 mm ,年蒸发量 $1 531 \text{ mm}$,80% 保证率的降水量为 365 mm ,变异系数 24.3%,土壤为典型的黄绵土,pH 值 8.36,土壤容重为 $1.17 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,凋萎含水率 7.3%,饱和含水率 21.9%,土壤有机质 $12.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $0.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $1.77 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计及材料方法

试验采用春小麦-豌豆双轮作方式即小麦→豌豆→小麦和豌豆→小麦→豌豆两个序列。各序列分别有 4 种耕作措施(表 1),分别作 4 次重复,16 个采样箱分布于 8 个小区,小区面积 $4 \text{ m} \times 20 \text{ m}$,随机区组排列,并编订小区序列。选用春小麦品种为“定西 35 号”,2013 年 3 月 20 日播种,播种量 $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,行距 20 cm,各措施均施 N $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (尿素,46% N), P_2O_5 $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (过磷酸钙,14% P_2O_5);豌豆品种为绿农 1 号,4 月 3 日播种,播种量 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,行距 24 cm,豌豆各措施均施 N $20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (尿素,46% N), P_2O_5 $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (过磷酸钙,14% P_2O_5)。

所有肥料在播种时作为基肥一次性施入。覆盖所用秸秆为前茬作物秸秆,收获后切碎均匀就地还田。

1.3 气体样品的采集与分析

采样期自 2013 年 3 月 22 日至 7 月 31 日,10 d 为一周期,使用静态暗箱密闭法,于每天 8:30—11:30 按小区编号顺序依次采集 16 个采样箱排放的气体。采样箱包括底座和顶箱,均为圆柱形。箱体由 1 mm 厚 304 K 薄不锈钢板制成,箱高 35 cm,直径为 38 cm,箱体顶部有 1 个小孔,用于插入温度计来读取箱内温度。箱内有设小风扇 1 个用于搅匀气体,箱外包有保温膜,防止太阳辐射使箱内温度改变。底座深 16 cm,内径 36.5 cm,底座上端有密封水槽。播种后分别于每个措施的农田中“S”型栽入 3 个底座。准备采样前,将箱体嵌入底座中,在水槽中加水密封,静置 20 min,防止周边环境对气体排放造成干扰。静置完毕,将温度计插入箱体底部,将箱内空气与外部彻底隔绝,分别于 0,10,20 min 时取 3 次气体样品,置于 150 ml 密闭气袋中备用,由于采样

时间少于 0.5 h,对采样点自然状况无明显扰动^[19]。气体浓度采用安捷伦 7890A 型气相色谱仪(7890AGCSystem, USA)分析。色谱柱:ParkQ 15 m × 0.53 mm × 25 μm。CH₄ 检测器 FID(检测温度 200℃,柱温 55℃),载气为高纯 N₂;N₂O 检测器 ECD(检测温度 300℃,柱温 45℃),载气为高纯 N₂,气体排放通量 F 计算公式^[20]:

$$F = \frac{C_2 \times V \times M_0 \times 273/T_2 - C_1 \times V \times M_0 \times 273/T_1}{A \times (t_2 - t_1) \times 22.4}$$

式中, F 为气体排放通量($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); A 为取样箱底面积(m^2); V 为采样箱体积(m^3); M_0 为气体分

子量; C_1, C_2 分别为测定箱关闭时和测定箱开启前箱内温室气体的体积浓度($\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$); T_1, T_2 分别为测定箱关闭时和测定箱开启前箱内温度(K); t_1, t_2 为测定开始和结束的时间(h)。CH₄ 和 N₂O 的浓度采用外标工作曲线法计算,由 0, 10, 20 min 时气体样品计算通量后加权平均得最终排放通量。

每次采集气体时观测一次各层次土壤温度及土壤含水量。通过地温计获取 0, 5, 10, 15, 20, 25 cm 六个层次的土壤温度,采用烘干法($105 \pm 2^\circ\text{C}$)测定 0 ~ 5 cm, 5 ~ 10 cm 和 10 ~ 30 cm 三个土层的土壤含水量。

表 1 耕作措施描述

Table 1 Description of experimental tillage measures

代码 Code	耕作措施 Treatments	操作方法 Methods
T	传统耕作不覆盖 Tillage without straw or plastic film mulching	前茬作物收获后三耕两耩,翻耕深度依次为 20 cm、10 cm 和 5 cm The field was ploughed 3 times and harrowed twice after harvesting. The plough depths were 20 cm, 10 cm and 5 cm, respectively.
TS	传统耕作 + 秸秆还田 Tillage with straw mulching	耕作同 T,但在第一次耕作的同时将前茬作物秸秆翻埋入土 Tillage practice was the same as that of treatment T, with straw incorporated at the first plough. All the straw from the previous crop was returned to the original plot immediately after harvesting and then was incorporated into soils.
NT	免耕不覆盖 No-tillage without straw or plastic film mulching	全年免耕,不覆盖任何材料,播种时用免耕播种机一次性完成播种和施肥 No-tillage without straw mulching throughout the experimental period. Sowing and fertilization were completed by no-tillage planter by one time.
NTS	免耕秸秆覆盖 No-tillage with straw mulching	耕作同 NT,小区地面均匀覆盖前茬作物秸秆 Tillage practice was the same as that of treatment NT. The ground was covered with straw of previous crop from August to next March. All the straw was returned to the original plot immediately after harvesting.

1.4 数据整理与分析

使用 Excel 2003 整理数据,并利用 SPSS18.0 对数据进行差异显著性检验及相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同耕作措施麦豆轮作地全生育期 N₂O 通量变化

春小麦地即试验区春小麦-豌豆轮作方式中的小麦→豌豆→小麦地,豌豆地即为豌豆→小麦→豌豆地。试验期包含播种前、春小麦或豌豆全生育期和收获后。其中,春小麦地试验期自 2013 年 3 月 22 日至 2013 年 7 月 31 日,豌豆地试验期自 2013 年 4 月 2 日至 2013 年 7 月 22 日。

春小麦地和豌豆地全生育期均表现为 N₂O 的排放源,如图 1 所示。春小麦地通量波动范围 0.018 ~ 0.146 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,豌豆地通量波动范围 0.024 ~ 0.210 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,从整个生育期看,通量有逐渐增大趋势,就通量变化而言,各措施春小麦地通量比豌豆地波动小,变化范围小。

春小麦地 N₂O 通量随着生育期的推进表现出波浪式增长的变化趋势。从播种至分蘖期(5 月 11 日前后)通量呈平稳上升的态势,只出现一次与趋势相反的波动(5 月 1 日),之后通量有所下降,但在抽穗期(6 月 11 日前后)通量出现剧烈增大现象,紧接着开花期至成熟期(6 月 21 日前后至 7 月 21 日前后)进入新一轮的增长阶段,收获后通量再一次下降。同时,由图 1 得:播种前各措施春小麦地 N₂O 通量都处于试验期的最低位,此时通量小的主要原因是耕地未种植作物且温度较低,土壤中微生物数量及活性较低^[21-22]。小麦播种后气温逐渐回升,从出苗期→三叶期→分蘖期春小麦排放通量呈现出缓慢增大趋势,5 月 1 日的异常波动可能是因为 4 月 29 日的降雨影响造成的。研究表明降雨将土壤孔隙中气体排出,土壤孔隙分布状况是影响反硝化速率的主要因素,而充气孔隙度对反硝化反应的速率有很大的影响^[23]。至营养生长旺盛的小麦分蘖阶段,各措施通量达到第一个高峰,之后开始下降直至拔节期前(6 月 1 日);在拔节期和抽穗期,各措施通

量急剧增加,此时期通量成为整个生育期的排放高峰,达到第二个高峰;抽穗后小麦进入生殖生长阶段通量迅速回落至灌浆期,灌浆之后至成熟期通量又有一定的增长,通量达到第三个高峰;收获后通量再一次回落。整个生育期,春小麦地在抽穗期和成熟期是 N₂O 通量排放的两个高峰,可能是这两个阶段水热条件较为适中。

豌豆地 N₂O 通量的变化表现出与春小麦较相似的趋势,由图 1 得:播种前 NT 和 NTS 措施豌豆地 N₂O 通量处于试验期的最低位,从播种至分枝期(5

月 12 日前后)通量呈平稳上升的态势,与 5 月 2 日出现一次与趋势相反的波动,之后通量有所下降;在开花结荚期通量出现剧烈增大现象,此阶段豌豆边开花边结荚,生长发育旺盛,6 月 12 日各措施 N₂O 排放通量达到峰值;6 月 22 日 N₂O 排放通量急剧降低,因恰逢一次较大的降雨过程,此时 T 和 TS 出现了 N₂O 排放通量的最低值,紧接着豌豆进入灌浆成熟期,N₂O 排放通量同时也进入新一轮的增长阶段。整个生育期,豌豆地在开花结荚期是 N₂O 通量排放的高峰。

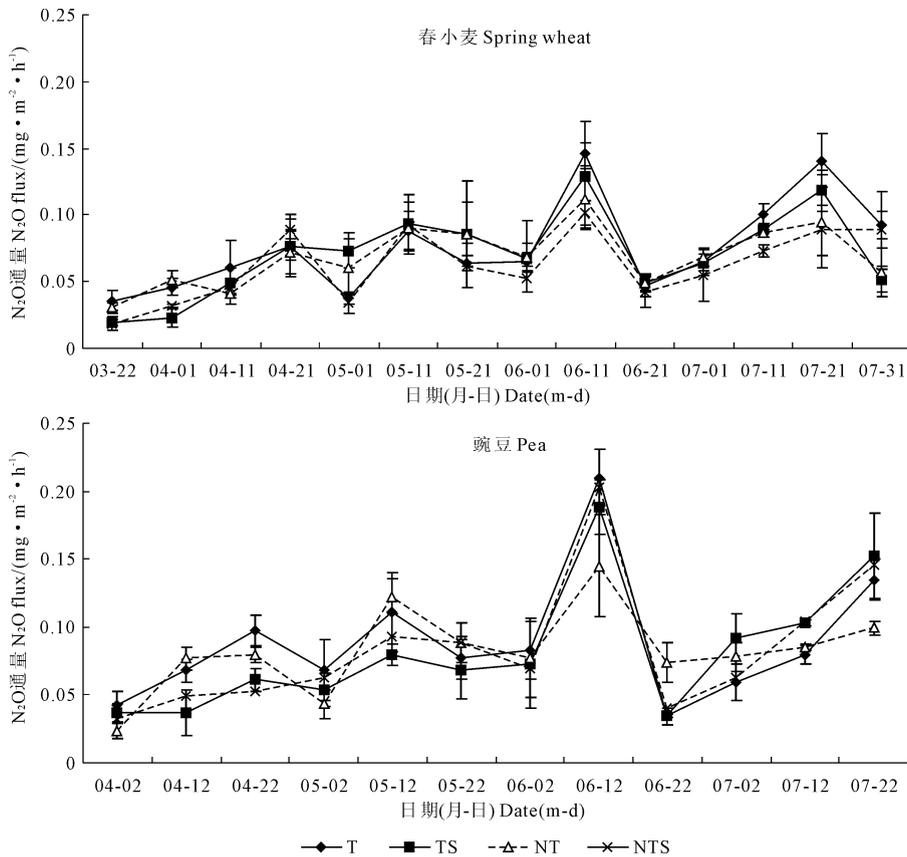


图 1 不同耕作措施麦豆轮作地全生育期 N₂O 通量变化曲线

Fig.1 Dynamic variations of soil N₂O fluxes in spring wheat-pea rotation fields under different tillage patterns

同时,由图 1 可发现,各生育阶段春小麦地和豌豆地不同耕作措施 N₂O 的排放存在差异,而无论春小麦地还是豌豆地,全生育期的前半段和后半段排放通量变化规律较为一致,前半段变化均相对平稳,后半段变化剧烈,因此通过研究前后两个时间段各措施春小麦地和豌豆地的 N₂O 排放,来说明不同耕作措施对排放通量的影响。

春小麦地全生育期前半段 T、TS、NT 和 NTS 的耕层(0~30 cm)平均含水量分别为 9.85%、10.64%、8.55% 和 9.66%,耕层平均温度分别为 14.57℃、15.23℃、15.90℃ 和 13.94℃,N₂O 平均通量

的排放顺序 NT>TS>T>NTS,其中 NT 措施释放的 N₂O 最大,可能因免耕处理使土壤具有良好通气性,进而使该措施具有良好温、湿条件,硝化作用增强。而全生育期后半段 T、TS、NT 和 NTS 的耕层平均含水量分别为 11.61%、11.82%、12.00% 和 12.00%,耕层平均温度分别为 19.40℃、20.28℃、20.92℃ 和 19.41℃,通量大小 T>TS>NT>NTS,其中,TS>NTS,可能是生育后期土壤含水量较高时,农田易出现微域厌氧环境,且秸秆还田比秸秆覆盖更能增加土壤中碳源特别是可溶性有机碳含量,从而促进反硝化细菌的生长繁殖并增强反硝化作用使通量排放

有所增加。豌豆地全生育期前半段 T、TS、NT 和 NTS 的耕层平均含水量分别为 8.76%、9.30%、9.76% 和 9.54%，耕层平均温度分别为 15.34℃、16.06℃、15.51℃ 和 17.07℃，平均排放通量 T > NT > NTS > TS，TS 较 NTS 措施更小，与秸秆覆盖相比，生育前期秸秆还田更能减弱 N₂O 的排放。后半段 T、TS、NT 和 NTS 平均土壤含水量 12.10%、11.96%、11.70% 和 12.32%，耕层平均温度分别为 19.01℃、19.05℃、18.90℃ 和 18.98℃，平均排放通量 TS > NTS > T > NT，各措施温、湿条件相似，TS 和 NTS 措施因物质基础较丰富，N₂O 的排放较大。

为判断各措施 N₂O 的排放通量差异是否明显，

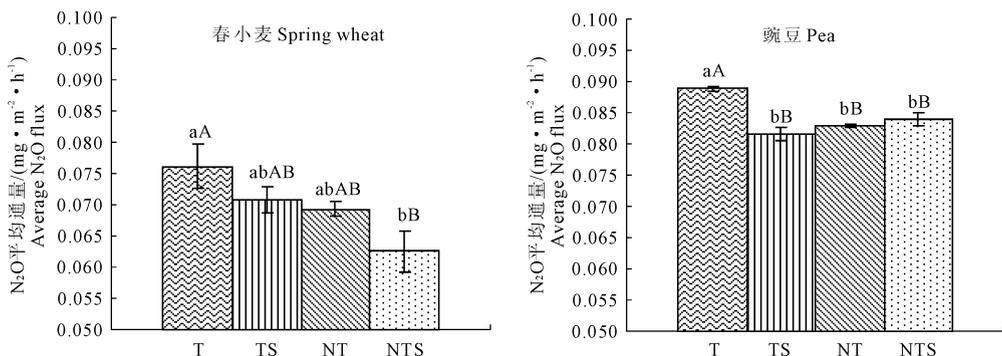


图 2 不同耕作措施麦豆轮作地 N₂O 平均通量方差分析图

Fig. 2 Variance analysis of average N₂O flux in spring wheat-pea rotation fields under different tillage patterns

2.2 不同耕作措施麦豆轮作地全生育期 CH₄ 通量变化

春小麦地和豌豆地全生育期均为 CH₄ 的吸收汇，通量全部表现为负值，如图 3 所示。春小麦地吸收通量波动范围 0.051 ~ 0.212 mg·m⁻²·h⁻¹，豌豆地波动范围 0.057 ~ 0.193 mg·m⁻²·h⁻¹，但多在 0.10 ~ 0.15 mg·m⁻²·h⁻¹ 间波动，且春小麦地通量比豌豆地的波动更大。

由图 3 可得：各措施春小麦地 CH₄ 通量变化波动较频繁。播种前 NTS 措施的 CH₄ 吸收通量是该措施试验阶段的最低值，从播种到出苗期（4 月 11 日前后）各措施吸收通量大增，T、NT 和 NTS 措施出现试验阶段的通量峰值。之后吸收通量在波折中下降，于孕蕾开花期形成整个试验期 CH₄ 吸收通量的波谷，T、TS 和 NT 措施的 CH₄ 吸收通量出现试验阶段的最低值，但随着拔节期的开始，吸收通量又有所增加，在 6 月 21 日前后达到第二个高峰，之后略有下降，不过在灌浆成熟期又有新一轮的增长，TS 措施在该阶段出现吸收通量峰值，收获后再次下降。全生育期春小麦地 CH₄ 吸收通量峰值出现在苗期和灌浆期，主要可能是因为小麦苗期营养生长极为

对各措施全生育期平均通量做单因素方差分析，如图 2。从春小麦地看，各措施 N₂O 平均排放通量大小顺序为：T > TS > NT > NTS，TS、NT 和 NTS 三种耕作方式的平均排放通量均小于 T 措施，其中 NTS 通量最小，TS、NT 和 NTS 排放 N₂O 通量分别较 T 措施减小 6.94%、8.94% 和 17.82%。在 5% 和 1% 水平下，只有 T 和 NTS 差异显著，其它措施间差异不显著。从豌豆地看，各措施 N₂O 平均排放通量大小顺序为：T > NTS > NT > TS，T 措施较 NTS、NT 和 TS 分别大 5.70%、6.75% 和 8.22%，在 5% 和 1% 水平下 T 分别与 NTS、NT、TS 差异显著，NTS、NT、TS 之间差异不显著。

旺盛，灌浆期可能是土壤通气状况较好，利于 CH₄ 的氧化和对空气中 CH₄ 的吸收。豌豆地 CH₄ 吸收通量在出苗期略有增大，之后波平稳下降形成，到分枝期（5 月 12 日前后）形成第一个吸收高峰，T 和 TS 措施在此阶段达到试验期的峰值。进入孕蕾、开花期后 CH₄ 吸收通量降低，形成豌豆地全生育期吸收通量的波谷。但随着结荚期的开始，吸收通量又有所增加，在 6 月 22 日前后达到第二个高峰，NTS 和 NT 措施在此阶段达到试验期的峰值。之后略有下降，在灌浆成熟期再次增长直至收获，全生育期豌豆地 CH₄ 吸收通量峰值出现在分枝和结荚期。

同时，由图 3 可得全生育阶段春小麦地和豌豆地不同耕作措施 CH₄ 的吸收变化规律较为一致，因此通过研究全生育期各措施春小麦地和豌豆地的 CH₄ 的吸收，来说明不同耕作措施对吸收通量的影响。

春小麦地全生育期 T、TS、NT 和 NTS 的耕层平均含水量分别为 10.73%、11.23%、10.28% 和 10.83%，耕层平均温度分别为 16.98℃、17.76℃、18.41℃ 和 16.67℃，CH₄ 平均吸收通量顺序为：NTS > NT > TS > T；豌豆地全生育期 T、TS、NT 和 NTS 的

耕层平均含水量分别为 10.43%、10.63%、10.73% 和 10.93%，耕层平均温度分别为 17.13℃、17.67℃、17.16℃ 和 18.02℃，CH₄ 平均吸收通量顺序为：NTS > TS > NT > T，春小麦地和豌豆地不同措施 CH₄ 吸

收通量不同的主要原因是土壤 CH₄ 吸收率与土壤湿度通常呈负相关关系，湿度高，大气 CH₄ 和 O₂ 向土壤中扩散受阻^[24]。

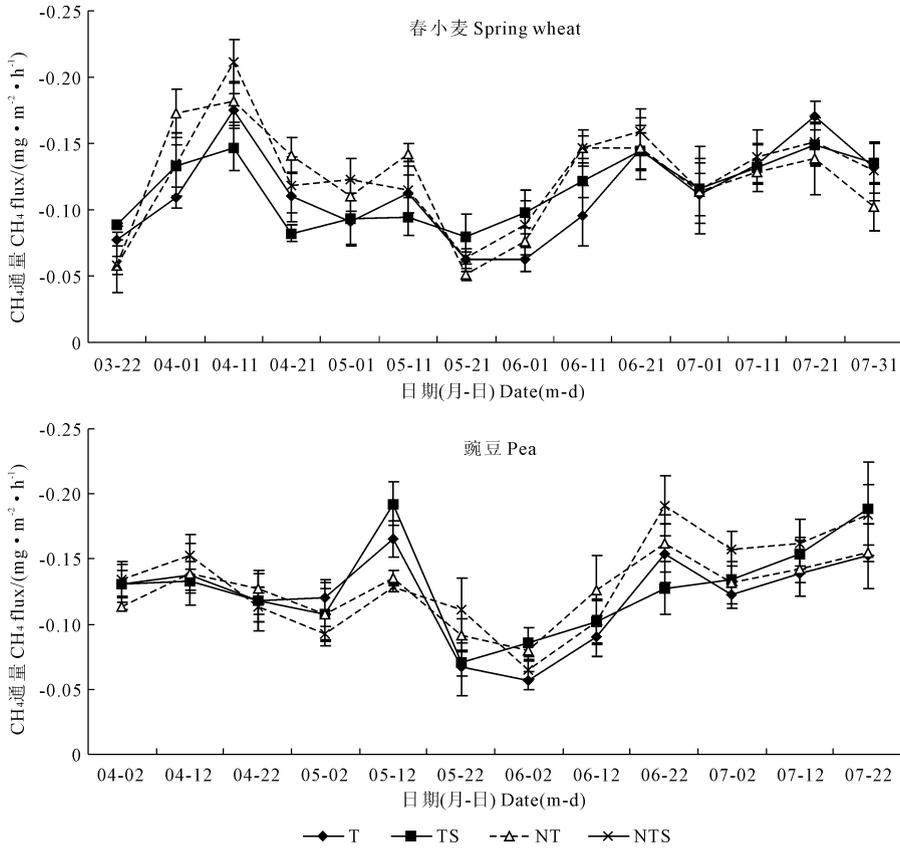


图 3 不同耕作措施麦豆轮作地全生育期 CH₄ 通量变化曲线

Fig.3 Dynamic variations of soil CH₄ fluxes in spring wheat-pea rotation fields under different tillage patterns

为判断各措施 CH₄ 吸收通量差异是否明显，对各措施全生育期平均通量做单因素方差分析，如图 4。从春小麦地看，NTS 措施 CH₄ 吸收通量最大，T 措施最小，NTS、NT 和 TS 分别比 T 措施高 10.41%、7.59% 和 1.54%。在 5% 水平下 T 与 NT 和 NTS 差

异显著，TS 和 NTS 差异显著，在 1% 水平下 T 只与 NTS 差异显著。从豌豆地看，NTS、TS 和 NT 分别比 T 大 9.25%、5.95% 和 3.57%，在 5% 水平下 T 与 NT 和 NTS 差异显著，在 1% 水平下，T 与 NTS 差异显著。

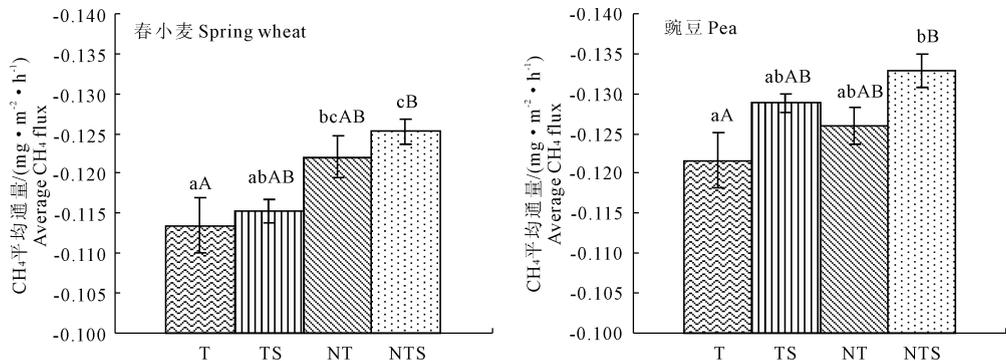


图 4 不同耕作措施麦豆轮作地 CH₄ 平均通量方差分析图

Fig.4 Variance analysis of average CH₄ flux in spring wheat-pea rotation fields under different tillage patterns

2.3 土壤含水量和温度对不同耕作措施麦豆轮作地 N₂O 和 CH₄ 通量变化的影响

旱地农田 N₂O 的产生,主要是在土壤微生物参与下通过硝化和反硝化作用完成的,CH₄ 主要来自土壤腐殖质的分解、土壤有机残体的分解、有机肥的分解和其它人工合成有机物分解,同时影响 N₂O 和 CH₄ 的环境因素方向包括施肥条件^[25]、土壤水分和温度^[26-27]、土壤 pH 值、微生物、质地^[11,28-29]等,但研究表明土壤水分和土壤温度对黄土高原旱作农业区的影响最为显著^[30-31]。因试验期 4 个月内已累积降雨 321.5 mm,接近多年平均降雨量,所以 2013 年属于丰雨年型,土壤含水量与温度变化均较大,因此,以 SPSS 软件进行相关性分析,通过 Pearson 相关系数判定丰雨年含水量、温度对 N₂O 和 CH₄ 排放通量间相关性。

土壤含水量与通量之间的相关性如表 2。结果表明:春小麦地 N₂O 通量与 5~10 cm 的土壤含水量相关性最高,但仅表现出弱的负相关关系,与 0~5 cm 和 10~30 cm 层土壤含水量无相关关系。豌豆地 N₂O 通量与 10~30 cm 土壤含水量相关性最高,表现出显著的正相关关系,与 5~10 cm 层土壤含水量有弱正相关关系。整体上豌豆地的 N₂O 通量与土壤含水量的相关性较春小麦地高。相关性中 5~

10 cm 层土壤含水量始终表现出特殊性,可能主要原因是春小麦和豌豆根系主要集中在 5~10 cm 层^[32-33],此层土壤含水量在整个生育期的变化最为剧烈,加上降雨的影响,土壤含水量往往是这 3 个层次中最高的,具体变化特征如图 5。而春小麦地和豌豆地的 CH₄ 吸收通量与土壤含水量之间均表现出显著的正相关关系,其中 0~5 cm 土壤含水量与春小麦地 CH₄ 通量相关性最高,5~10 cm 和 10~30 cm 土壤含水量与豌豆地 CH₄ 通量相关性最高。

表 2 春小麦地和豌豆地 N₂O 和 CH₄ 通量与土壤含水量的相关性

Table 2 Correlation coefficients of N₂O flux, CH₄ flux and soil water content in spring wheat and pea fields

作物 Crop	气体通量 Gas flux	土壤含水量 Soil water content		
		0~5 cm	5~10 cm	10~30 cm
春小麦 Spring wheat	N ₂ O 通量 N ₂ O flux	0.024	-0.268 **	-0.062
	CH ₄ 通量 CH ₄ flux	0.559 **	0.473 **	0.528 **
豌豆 Pea	N ₂ O 通量 N ₂ O flux	0.220 *	0.175	0.407 **
	CH ₄ 通量 CH ₄ flux	0.469 **	0.507 **	0.507 **

注: * 0.05 水平下显著相关(双尾检验); ** 0.01 水平下显著相关(双尾检验)。下同。

Note: * Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed). ** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed). The same below.

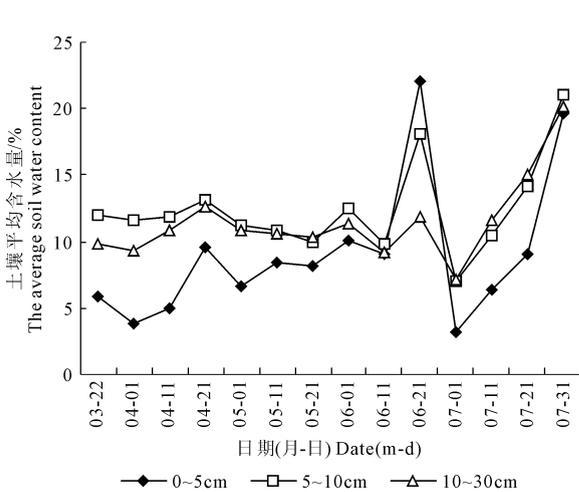


图 5 全生育期不同土层土壤含水量变化图

Fig. 5 Variation of soil water content in different layers during the whole growth period

土壤温度与通量间相关性见表 3,结果表明:春小麦地和豌豆地 N₂O 通量与 0 cm 和 5 cm 处土壤温度都没有明显相关性,但与其它各层有弱正相关关系,且豌豆地与通量的相关性略大于春小麦地。春小麦地各层相关系数顺序:25 cm > 15 cm > 10 cm > 20 cm,豌豆地各层相关系数顺序:25 cm > 15 cm > 20

cm > 10 cm。而春小麦地 CH₄ 通量则与各层都无明显的相关性,豌豆地只有 5 cm 和 10 cm 处土壤温度与通量表现出弱的正相关性。通过表 2 和表 3 可得:丰雨年里春小麦地和豌豆地 N₂O 通量与土壤温度和含水量相关关系较弱,CH₄ 通量则只与土壤含水量有弱的相关关系。

表 3 春小麦地和豌豆地 N₂O 和 CH₄ 通量与土壤温度的相关性

Table 3 Correlation coefficients of N₂O flux, CH₄ flux and soil temperature in spring wheat and pea fields

作物 Crop	气体通量 Gas flux	土壤温度 Soil temperature					
		0 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm
春小麦 Spring wheat	N ₂ O 通量 N ₂ O flux	0.128	0.198	0.240*	0.243*	0.226*	0.259*
	CH ₄ 通量 CH ₄ flux	0.107	0.074	0.090	0.089	0.104	0.126
豌豆 Pea	N ₂ O 通量 N ₂ O flux	0.164	0.201	0.288**	0.361**	0.354**	0.376**
	CH ₄ 通量 CH ₄ flux	0.155	0.208*	0.203*	0.170	0.172	0.181

而干旱的 2011 年, N₂O 的通量与地表、5 cm 和 10 cm 处土壤温度呈极显著和显著正相关关系, 与土壤含水量之间呈弱负相关关系, 同时 CH₄ 通量与地温无明显关系, 与 0~5、5~10 cm 土壤含水量有显著正相关关系, 干旱年 N₂O 和 CH₄ 通量与土壤温度和含水量拟合的回归方程的相关系数达极显著相关水平^[31], 与干旱年比, 丰雨年土壤温度对 N₂O 通量的影响下降, 土壤含水量对 CH₄ 通量的影响有所加强。对比表 2 可发现, 丰雨年土壤温度和含水量对旱作农业区 N₂O 和 CH₄ 排放的综合影响权重有所降低, 且与土壤温度相比, 土壤含水量表现出更大

的影响权重。

全生育期不同土层土壤温度数据如图 6, 6 个层次的土壤平均温度在 14.5℃~25.5℃, 相对稳定, 而硝化和反硝化作用的最适温度范围分别为 25℃~35℃和 30℃~67℃^[34], 这可能是造成土壤温度比土壤含水量影响权重低的主要原因。水分作为旱作地区农业生产的主要限制因素, 丰雨年降雨充足, 土壤含水量较高并表现出干湿交替的特征, 影响到微生物活性、土壤通气性及孔隙度、肥料的吸收利用以及其它环境因素, 进而对不同耕作措施的春小麦和豌豆地 N₂O 和 CH₄ 的排放产生影响。

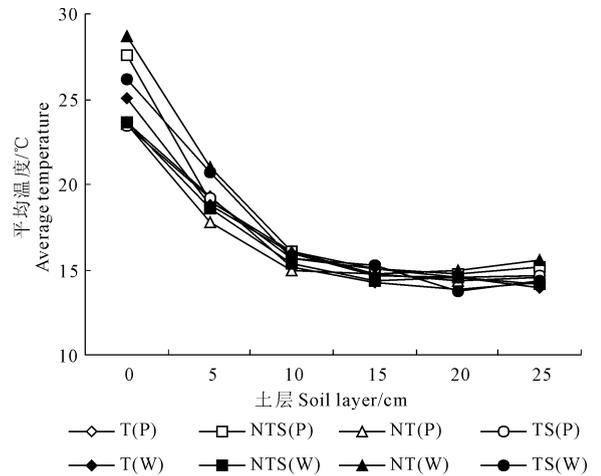
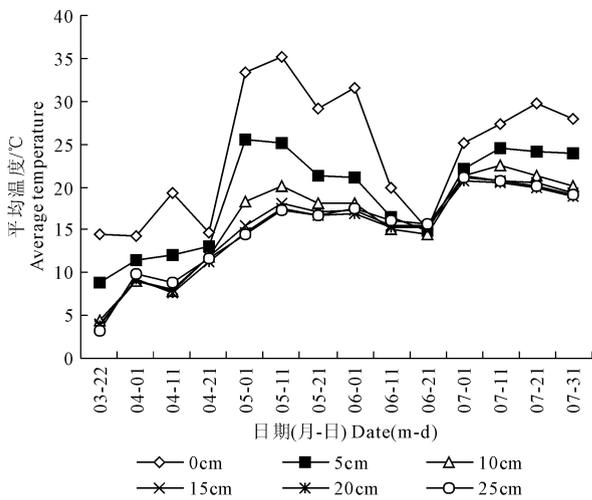


图 6 全生育期不同土层土壤温度变化图

Fig.6 Variation of soil temperature in different layers during the whole growth period

3 结 论

1) 不同耕作措施春小麦地和豌豆地全生育期均表现为 N₂O 的排放源, 春小麦地通量波动范围 0.018~0.146 mg·m⁻²·h⁻¹, 豌豆地通量波动范围 0.024~0.210 mg·m⁻²·h⁻¹, 通量表现出波浪式增长的趋势, 但春小麦地通量比豌豆地波动小, 变化范围小。春小麦地的抽穗期和成熟期是 N₂O 通量排放的两个高峰, 各措施全生育期 N₂O 平均排放通量大小顺序: T > TS > NT > NTS。豌豆地开花结荚期是

N₂O 通量的排放高峰, 各措施全生育期 N₂O 平均排放通量大小顺序: T > NTS > NT > TS。

2) 不同耕作措施春小麦地和豌豆地全生育期均表现为 CH₄ 的吸收汇, 春小麦地吸收通量波动范围 0.051~0.212 mg·m⁻²·h⁻¹, 豌豆地波动范围 0.057~0.193 mg·m⁻²·h⁻¹, 春小麦地通量较豌豆地的波动更大。全生育期春小麦地 CH₄ 吸收通量峰值出现在苗期和灌浆期, 各措施 CH₄ 平均吸收通量大小顺序: NTS > NT > TS > T。豌豆地 CH₄ 吸收通量峰值出现在分枝和结荚期, 各措施 CH₄ 吸收通量大

小顺序: NTS > TS > NT > T。

3) 不同耕作措施春小麦地和豌豆地对 N_2O 和 CH_4 全生育期通量有明显的影 响, 其中, T 与 NTS 之间的差异最为显著, TS、NT 和 NTS 三种耕作措施相 较 T 措施, 有效地减少了 N_2O 的排放且增加 CH_4 的 吸收, 起到了减少氮流失和固碳的作用。

4) 丰雨年里土壤温度和土壤含水量对旱作农 业区 N_2O 和 CH_4 排放的综合影响权重有所降低, 水分作为旱作地区农业生产的主要限制因素, 丰雨年 土壤含水量较高, 影响微生物活性、土壤通气性及孔 隙度、肥料的吸收利用, 进而影响到不同耕作措施的 春小麦和豌豆地 N_2O 和 CH_4 的排放。

参 考 文 献:

- [1] 潘根兴, 高 民, 胡国华, 等. 气候变化对中国农业生产的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1698-1706.
- [2] 李长生, 肖向明, Frolking S, 等. 中国农田的温室气体排放 [J]. 第四纪研究, 2003, 23(5): 493-502.
- [3] 张 华, 张若玉, 何金海, 等. CH_4 和 N_2O 的辐射强迫与全球增 温潜能 [J]. 大气科学, 2013, 37(3): 745-754.
- [4] 白小琳, 张海林, 陈 阜, 等. 耕作措施对双季稻田 CH_4 与 N_2O 排放的影响 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 282-289.
- [5] 张志栋, 刘景辉, YU Qing, 等. 旱作燕麦不同耕作方式对土壤温 室气体排放的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 67-72.
- [6] 梁东丽, 方日尧, 李生秀, 等. 硝、铵态氮肥对旱地土壤氧化亚氮 排放的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 112-116.
- [7] 王 娟, 蔡立群, 张仁陟. 不同耕作措施下豆麦双序列轮作农田 温室气体的排放特征及其增温潜势 [J]. 土壤通报, 2013, 44(1): 57-63.
- [8] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体 (CO_2 、 CH_4 、 N_2O) 的源/汇强度及其温室效应研究进展 [J]. 中国生态农 业学报, 2011, 19(4): 966-975.
- [9] 胡恒觉, 张仁陟, 黄高宝, 等. 黄土高原旱地农业 - 理论、技术、 潜力 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [10] 唐正光. 降雨入渗影响因素与滑坡的研究 [D]. 昆明: 昆明理 工大学, 2013.
- [11] 蒋静艳, 汤 伟, 朱秋兰, 等. 不同水分条件下不同土壤微生物 类群产 N_2O 量的初步研究 [J]. 农业环境科学学报, 2006, 25 (6): 1535-1540.
- [12] 岳 进, 黄国宏, 梁 巍, 等. 不同水分管理下稻田土壤 CH_4 与 N_2O 排放与微生物菌群的关系 [J]. 应用生态学报, 2003, 14 (12): 2273-2277.
- [13] 张 萍. 土壤管理对农田温室气体排放的效应研究 [D]. 扬

- 州: 扬州大学, 2012.
- [14] 聂文婷. 几种土地利用方式对土壤 N_2O 与 CO_2 排放的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [15] 焦 燕, 黄 耀, 宗良纲, 等. 氮肥水平对不同土壤 N_2O 排放的 影响 [J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2094-2098.
- [16] 焦 燕, 黄 耀, 宗良纲, 等. 氮肥水平对不同土壤 CH_4 排放的 影响 [J]. 环境科学, 2005, 26(3): 21-24.
- [17] 易 琼, 逢玉万, 杨少海, 等. 施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放 的影响 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(8): 1432-1437.
- [18] 马永跃, 全 川, 王维奇. 福州平原两种水稻品种稻田的 CH_4 和 N_2O 排放通量动态 [J]. 湿地科学, 2013, 11(2): 246-253.
- [19] 万运帆, 李玉娥, 林而达, 等. 静态箱法测定旱地农田温室气体 时密闭时间的研究 [J]. 中国农业气象, 2005, 27(2): 122-124.
- [20] 万运帆, 林而达. 翻耕对冬闲农田 CH_4 和 CO_2 排放通量的影响 初探 [J]. 中国农业气象, 2004, 25(3): 8-10.
- [21] 夏北成, Zhou J Z, Tiedje J M. 土壤微生物群落及其活性与植被 的关系 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 1998, 37(3): 95-99.
- [22] 郑有飞, 石春红, 吴芳芳, 等. 土壤微生物活性影响因子的研究 进展 [J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1209-1214.
- [23] 黄光辉, 张明园, 陈 阜, 等. 耕作措施对华北地区冬小麦田 N_2O 排放的影响 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 167-173.
- [24] 李 俊, 同小娟, 于 强. 不饱和土壤 CH_4 的吸收与氧化 [J]. 生态学报, 2005, 25(1): 141-147.
- [25] 邬 刚, 潘根兴, 郑聚锋, 等. 施肥模式对雨养旱地温室气体排 放的影响 [J]. 土壤, 2013, 45(3): 459-463.
- [26] 王改玲, 陈德立, 李 勇. 土壤温度、水分和 $NH_4^+ - N$ 浓度对 土壤硝化反应速度及 N_2O 排放的影响 [J]. 中国生态农业学 报, 2010, (1): 1-6.
- [27] 李海防, 夏汉平, 熊燕梅, 等. 土壤温室气体产生与排放影响因 素研究进展 [J]. 生态环境, 2007, 16(6): 1781-1788.
- [28] Lian F, Wang, H C, et al. Nitrous oxide emissions from black soils with different pH [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25 (6): 1071-1076.
- [29] 徐 华. 土壤水分状况和质地对稻田 N_2O 排放的影响 [J]. 土 壤学报, 2000, 37(4): 499-505.
- [30] 谢军飞, 李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究 进展 [J]. 中国农业气象, 2002, 23(4): 47-52.
- [31] 蔡立群, 王 娟, 罗珠珠, 等. 不同耕作条件下豆麦双序列轮作 农田土壤温室气体的排放及影响因素研究 [J]. 中国生态农 业学报, 2013, 21(8): 921-930.
- [32] 樊 巍, 卢 琦, 高喜荣. 果农复合系统根系分布格局与生长 动态研究 [J]. 生态学报, 1999, 19(6): 860-863.
- [33] 轩春香, 牛俊义, 张红萍, 等. 水分胁迫对豌豆根系生长及产量 的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2008, 43(5): 45-49.
- [34] Granli T, Bockman O C. Nitrous oxide from agriculture [J]. Norwegian Journal of Agricultural Sciences, 1994, 12(Supplement): 1-128.