

耕作方式与氮肥减施对黄褐土麦田土壤酶活性及温室气体排放的影响

张志勇, 于旭昊, 熊淑萍, 马新明, 王小纯, 刘洋, 闫广轩, 李永革

引用本文:

张志勇, 于旭昊, 熊淑萍, 等. 耕作方式与氮肥减施对黄褐土麦田土壤酶活性及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2): 418–428.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0586>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

减氮配施氮转化调控剂对麦田CO₂和CH₄排放的影响

王艳群, 彭正萍, 马阳, 吴敏, 王洋, 宋学利, 王会贤

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1657–1664 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1350>

水氮耦合对设施土壤温室气体排放的影响

杜世宇, 薛飞, 吴汉卿, 邹洪涛, 张玉玲, 张玉龙, 虞娜

农业环境科学学报. 2019, 38(2): 476–484 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0408>

施用生物炭对农田土壤N₂O的减排效应

赵光听, 刘杏认, 张晴雯, 田秀平

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2872–2880 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0699>

土壤温室气体排放对C/N的响应

李彬彬, 武兰芳

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 2067–2078 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1607>

UV-B辐射对元阳梯田稻田土壤活性有机碳含量与温室气体排放的影响

王灿, 李虹茹, 湛方栋, 李想, 李元, 祖艳群, 何永美, 郭先华

农业环境科学学报. 2018, 37(2): 383–391 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1060>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张志勇, 于旭昊, 熊淑萍, 等. 耕作方式与氮肥减施对黄褐土麦田土壤酶活性及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2): 418–428.

ZHANG Zhi-yong, YU Xu-hao, XIONG Shu-ping, et al. Effects of tillage methods and nitrogen fertilizer reduction on soil enzyme activities and greenhouse gas emissions of wheat yellow cinnamon soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(2): 418–428.

耕作方式与氮肥减施对黄褐土麦田土壤酶活性及温室气体排放的影响

张志勇¹, 于旭昊¹, 熊淑萍¹, 马新明^{1*}, 王小纯², 刘 洋¹, 闫广轩³, 李永革⁴

(1. 河南农业大学农学院, 郑州 450002; 2. 河南农业大学生命科学学院, 郑州 450002; 3. 河南师范大学环境学院, 黄淮水环境污染与防治教育部重点实验室, 河南省环境污染控制重点实验室, 河南 新乡 453007; 4. 安阳市农业环境监测站, 河南 安阳 455000)

摘 要:为探明夏玉米秸秆粉碎还田后, 不同耕作方式和氮肥减施对土壤酶活性及温室气体排放的影响, 采用静态箱气相色谱法, 以传统翻耕和常规施氮量为对照(PT+CN), 测定并分析了免耕减氮(NT+LN)、免耕常规施氮(NT+CN)、旋耕减氮(RT+LN)、旋耕常规施氮(RT+CN)、翻耕减氮(PT+LN)对麦田土壤-作物系统温室气体排放的影响及其与土壤酶活性的关系。结果表明: 土壤中脲酶和蔗糖酶活性均表现为0~20 cm 高于 20~40 cm 土层, 拔节期脲酶和蔗糖酶活性达到最高值。减少施氮量降低了土壤脲酶和蔗糖酶活性, 其中以 NT+LN 处理土壤脲酶和蔗糖酶活性最低; 不同处理小麦田均表现为 CH₄ 的汇和 CO₂ 与 N₂O 的源。与对照相比, NT+LN、RT+LN、PT+LN、NT+CN、RT+CN 处理的 CH₄ 平均吸收通量分别减少了 25.57%、25.06%、18.03%、11.96%、11.61%, CO₂ 和 N₂O 平均排放通量分别降低了 17.57%、12.28%、11.36%、10.24%、4.96% 和 34.05%、26.48%、20.60%、15.61%、3.02%; 土壤脲酶与 CH₄ 排放通量呈负相关, 与 CO₂、N₂O 排放通量呈正相关。蔗糖酶与 0~20 cm 土层的 CH₄ 排放呈显著负相关, 与 N₂O 排放呈显著正相关, 但 20~40 cm 土层的蔗糖酶活性与温室气体排放通量相关性不显著。综上所述, 在秸秆还田、减少化肥用量、提倡固碳减排的背景下, 旋耕减氮处理是在保持较高土壤酶活性的同时减少农田温室气体排放的最优组合。

关键词: 耕作方式; 氮肥减施; 土壤酶活性; 温室气体

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)02-0418-11 doi:10.11654/jaes.2019-0586

Effects of tillage methods and nitrogen fertilizer reduction on soil enzyme activities and greenhouse gas emissions of wheat yellow cinnamon soil

ZHANG Zhi-yong¹, YU Xu-hao¹, XIONG Shu-ping¹, MA Xin-ming^{1*}, WANG Xiao-chun², LIU Yang¹, YAN Guang-xuan³, LI Yong-ge⁴

(1. College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. College of Life Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 3. School of Environment, Henan Normal University, Key Laboratory for Yellow River and Huai River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, Henan Key Laboratory for Environmental Pollution Control, Xinxing 453007, China; 4. Anyang Agricultural Environment Monitoring Station, Anyang 455000, China.)

Abstract: To investigate the effects of different tillage methods and nitrogen fertilizer application on soil enzyme activities and greenhouse gas emissions after cultivating corn stalks were smashed and returned to the field. By using static box gas chromatography method, and conventional tillage and nitrogen application (PT + CN) as control, we measured and analyzed the effects of no-tillage and nitrogen reduction (NT+LN), no-tillage conventional nitrogen application (NT+CN), rotary tillage and nitrogen reduction (RT+LN), rotary-tillage and con-

收稿日期: 2019-05-27 录用日期: 2019-10-10

作者简介: 张志勇(1988—), 男, 河南新密人, 讲师, 从事农业生态环境和小麦氮素高效利用研究。E-mail: zyong1988@126.com

*通信作者: 马新明 E-mail: xinmingma@126.com

基金项目: 农业部-世界银行-全球环境基金-气候智慧型主要粮食作物生产项目(P144531, CSA-C-2); 河南省现代农业产业技术体系项目(S2010-01-G04)

Project supported: Ministry of Agriculture and Rural Areas of China-World Bank-Global Environment Facility-Climate Smart Major Food Crop Production Project(P144531)(CSA-C-2); Modern Agricultural Industry Technology System of Henan Province(S2010-01-G04)

ventional nitrogen application(RT+CN), and conventional tillage and nitrogen reduction(PT+LN) on greenhouse gas emissions from wheat soil system and the relationship with soil enzyme activity. The results of two consecutive years of experiments showed that soil urease and sucrase activities in layer 0~20 cm were higher than that of 20~40 cm. The urease and sucrase activities were highest at the jointing stage. Reduced nitrogen application decreased the soil urease and sucrase activity, with soil urease and sucrase activities at their lowest with NT+LN treatment. All wheat field treatments showed as the CH₄ sink and CO₂ and N₂O sources. Compared with the control treatment, the average absorption fluxes of CH₄ in NT+LN, RT+LN, PT+LN, NT+CN, and RT+CN decreased by 25.57%, 25.06%, 18.03%, 11.96%, and 11.61%, respectively. The average emission fluxes of CO₂ and N₂O decreased by 17.57%, 12.28%, 11.36%, 10.24%, and 4.96%; and 34.05%, 26.48%, 20.60%, 15.61%, and 3.02%, respectively. Soil urease was negatively correlated with CH₄ emission flux and positively correlated with CO₂ and N₂O emission fluxes. Sucrase activity was negatively correlated with CH₄ emissions from 0 to 20 cm, and positively correlated with N₂O greenhouse gas emissions. The correlation between the sucrase activity of the layer 20~40 cm and greenhouse gas emission flux was not significant. In summary, for the purpose of straw returning and reducing the amount of chemical fertilizers, rotary tillage and nitrogen reduction treatment is the optimal combination to maintain high soil enzyme activity while reducing greenhouse gas emissions.

Keywords: tillage method; nitrogen fertilizer reduction; soil enzyme activity; greenhouse gas

CO₂、CH₄和N₂O是3种主要的温室气体(Greenhouse gas, GHG),大气中这3种气体浓度的日益增加是全球气候变暖的重要原因之一^[1]。农业源温室气体排放量占全球人为活动产生温室气体排放总量的10%~12%^[2],而我国的农业源温室气体排放量更是超过了全国温室气体排放总量的15%^[3]。农田土壤作为农业源温室气体排放的主要来源,对全球温室效应的影响不容忽视^[4]。自2010年,联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)提出气候智慧型农业(Climate-smart agriculture, CSA)的概念以来,以可持续地增加农业生产力和收入、适应气候变化和尽可能减少或消除GHG排放为3个主要目标的气候智慧型农业正成为全球应对气候变化的农业发展新模式^[5]。因此,减少农田土壤CO₂、CH₄和N₂O的排放对减少农业源温室气体排放、缓解温室效应及发展气候智慧型农业有着重要意义。

研究表明,秸秆还田、施肥、耕作等农业管理措施均影响农田温室气体排放,并通过改变土壤温湿度、土壤有机质、土壤结构、土壤酶活性等理化性质来改变农田土壤温室气体的排放^[6-7]。秸秆还田和免耕等保护性耕作措施,减少了对土壤的扰动,增加了土壤表面覆盖,提高了土壤有机质和碳含量,从而影响温室气体的排放^[8]。一般认为,秸秆还田可提高土壤CO₂排放速率,增加CO₂排放量^[9-10],但也有研究显示秸秆还田能够减少CO₂排放^[11]。多数研究表明,秸秆还田可明显降低N₂O排放,但也有部分研究得出了相反的结论^[12-14]。此外,通过耕作方式改变土壤结构、团粒大小和通气状况等对农田温室气体排放也有重

要影响,一般认为免耕减少CO₂和N₂O排放,但Badagliacca等^[15]认为免耕相比于翻耕能促进N₂O排放。农田土壤温室气体的一个重要来源是化肥的施用,大量研究表明温室气体(特别是N₂O)的排放随着施肥量的增加而增加,且土壤酶系统的生物化学过程(如植物残体的降解、土壤有机质的矿质化、土壤N的氧化还原反应等)均与温室气体的产生过程密切相关,氮肥减施能够有效降低温室气体排放^[16-19],因此实现农田可持续发展和固碳减排,需综合考虑农田土壤生态系统的物质转化和能量代谢^[20]。

综上所述,前人研究多集中于秸秆还田、免耕、施肥等单因素的影响,但是目前在贡献了全国粮食总产量三分之一的黄淮海小麦玉米轮作区^[21],秸秆粉碎还田技术普遍应用和氮肥减量施用的背景下,研究不同耕作方式及氮肥减施对土壤酶活性及温室气体排放的影响鲜有报道。因此,本文通过分析两年不同处理下土壤脲酶、蔗糖酶的活性,温室气体排放通量及其与土壤酶活性的相关关系,以期发现适合固碳减排的合理耕作方式与氮肥减施措施,为黄淮海地区气候智慧型农业的发展提供理论基础和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2015年至2017年在河南叶县龙泉乡牛杜庄村(33°31'N, 113°22'E)进行。该地位于河南省西南部,温带大陆季风气候。土壤为黄褐土,土质为壤质黏土,0~10、10~20 cm和20~40 cm土层容重分别为1.08、1.22 g·cm⁻³和1.32 g·cm⁻³,0~20 cm和20~40 cm耕层土壤中有机质含量分别为8.34 g·kg⁻¹和5.88

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮含量分别为 $0.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 0~20 cm 土层中速效磷和速效钾含量分别为 $26.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $168.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验用地为农户连续 10 年的冬小麦-夏玉米轮作种植体系, 其间秸秆全量粉碎还田。

1.2 试验设计

试验为耕作方式和施氮量双因素裂区试验, 设耕作方式为主区: 包括翻耕 (PT), 深度 25 cm; 旋耕 (RT), 深度 15 cm; 免耕 (NT), 仅免耕播种机播种时耢腿处土壤有少量扰动, 深度 5 cm。副区设减氮 (LN, $120 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$)、常规施氮 (CN, $225 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$) 两个施氮水平。小区面积 $15 \text{ m} \times 50 \text{ m}$, 设置 3 次重复。氮肥为尿素, 磷肥为过磷酸钙, 钾肥为氯化钾, 磷肥 (P_2O_5) 和钾肥 (K_2O) 用量均为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 作为基肥在耕作前一次性施入, 拔节期追施尿素并灌水, 氮肥的基追肥比为 5:5。供试小麦品种为周麦 27, 两年播期均为 10 月 13 日, 播量皆为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 25 cm/10 cm 宽窄行播种。其他管理措施同高产田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤酶活性

分别于 2016 年和 2017 年小麦生长季的返青期 (Re)、拔节期 (Jo)、开花期 (Fl)、灌浆期 (Fi)、成熟期 (Ma), 采用三点取样法用土钻取 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土样, 风干后过 100 目筛备用。土壤脲酶用改良靛酚蓝比色法^[22]测定, 活性用 $\text{mg NH}_3\text{-N} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 表示; 土壤蔗糖酶用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定, 活性用 $\text{mg glucose} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 表示。

1.3.2 温室气体排放通量的测定

温室气体的采集与测定采用静态箱-气相色谱法^[23]。采样箱为暗箱, 由箱体和底座两部分组成, 箱体规格为 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$, 底座为 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 。每个小区固定 3 个底座, 每个底座内均包含窄行两边两行小麦, 底座上端有宽 2 cm、深 2 cm 的水封槽, 采样时槽中注水防止箱体和底座的接触处漏气。箱体框架为不锈钢角铁, 四周和顶部材料由外及内分别为铝塑板、白色泡沫和锡箔。采样箱内有小风扇和温度传感器, 同步测量采样时的箱内温度和地下 5 cm 土壤温度, 箱子顶部安装有自动记录温度和采气的自动模块。采样时间均在上午 8:00—11:00 之间, 每次罩箱时间为 24 min。从采样箱密封放置到底座上, 开始采集第一个气体样品, 之后每 6 min 采样一次, 共采集 5 个气体样品。采集的气体样品置于 0.5 L 的铝塑复合气袋中。采样频率为每 10 d 采样 1

次; 小麦施基肥后, 加强监测频率, 连续监测 7 d; 小麦追肥后, 加强观测频率, 连续监测 7 d; 气体样品均在采样结束 3 d 内测定完毕。利用气相色谱仪 (Agilent 6820、Agilent 6890, Agilent, USA) 对 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 含量进行检测: 氢火焰离子化检测器 (FID) 测定 CO_2 、 CH_4 含量, CH_4 直接通过 FID 检测, CO_2 先通过镍触媒还原成 CH_4 后再通过 FID 检测; 电子捕获检测器 (ECD) 测定 N_2O 含量。

农田中 3 种主要温室气体 (CO_2 、 CH_4 、 N_2O) 排放通量计算公式如下^[24]:

$$F = \frac{273}{273 + t} \times \frac{dC}{dt} \times \frac{P}{P_0} \times \rho \times H$$

式中: F 为温室气体 (CO_2 、 CH_4 、 N_2O) 排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; t 为气样采集过程中的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; $\frac{dC}{dt}$ 为气体浓度随时间的初始变化率, $\text{mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; P_0 为标准大气压, 101.3 kPa; P 为箱内气压, 该试验地海拔低, 气压影响可以忽略不计; ρ 为温室气体在标况下的密度, CO_2 为 $1.964 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 CH_4 为 $0.714 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 N_2O 为 $1.964 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; H 为采集箱高度, m。

1.4 数据分析

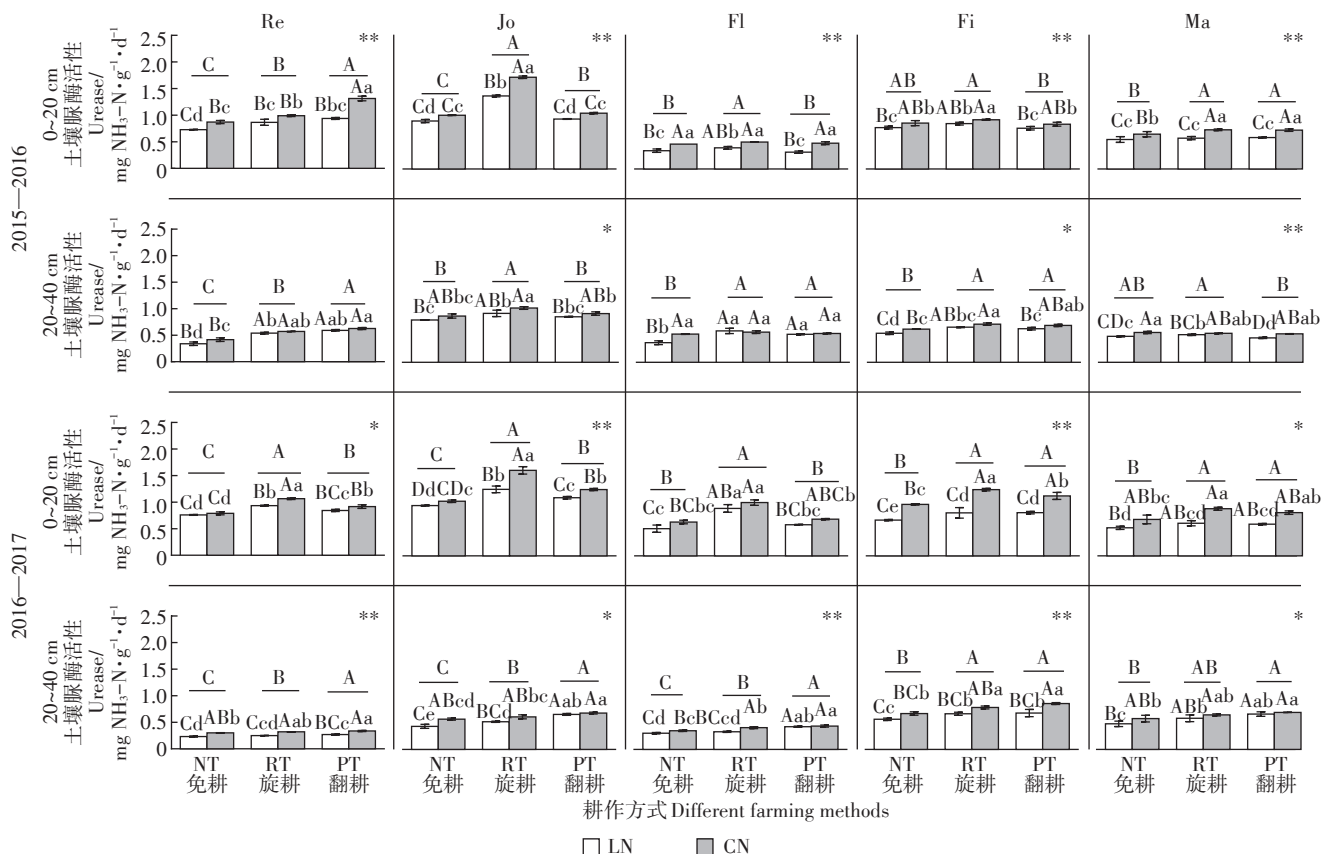
数据经过 Excel 2013 整理后, 用 SPSS 24.0 软件 One-way ANOVA 进行方差分析, Pearson 相关性分析, 数据图表的绘制用 Office 2013 和 GraphPad Prism 6.0 完成。

2 结果与分析

2.1 耕作方式和减氮处理对土壤酶活性的影响

2.1.1 对土壤脲酶活性的影响

冬小麦返青期至成熟期间, 脲酶活性呈现出先升高再降低, 再升高再降低的趋势 (图 1)。脲酶活性随季节而变化, 在拔节期和灌浆期出现峰值。其中, 拔节期土壤脲酶活性最高, 开花期最低。2015—2016 季, 0~20 cm 和 20~40 cm 土层脲酶活性最大值均出现在拔节期的 RT+CN 处理, 分别为 $1.774 \text{ mg NH}_3\text{-N} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $1.046 \text{ mg NH}_3\text{-N} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。2016—2017 季, 0~20 cm 和 20~40 cm 土层脲酶活性最大值分别出现在拔节期的 RT+CN 处理和灌浆期的 PT+CN 处理, 分别为 $1.645 \text{ mg NH}_3\text{-N} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.883 \text{ mg NH}_3\text{-N} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在拔节期及之前, 3 种耕作方式两两之间的脲酶活性存在极显著差异, 拔节期之后差异显著降低。在小麦成熟期, LN 与 CN 处理的脲酶活性达显著差异。综合连续两年数据, 与 PT+CN 相比, NT+LN、RT+LN、PT+LN、NT+CN 的脲酶活性分别平均降低了 27.38%、



1. 柱上方字母代表差异显著性,大写字母为 $P < 0.01$,小写字母为 $P < 0.05$,有相同字母则表示在对应水平上差异不显著。2. 短线上字母表示 NT、RT 和 PT 间在 $P < 0.01$ 水平上的差异显著性。3. * 和 ** 表示 LN 与 CN 间的差异显著性, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。下同

1. The letters above the column represent the difference significance, uppercase characters: $P < 0.01$, lowercase letters, $P < 0.05$. The same letter indicates that the difference is not significant at the corresponding level. 2. The different letters on the short line indicate the significant difference among NT, RT and PT at the $P < 0.01$ level. 3. * and ** indicate the significant difference between LN and CN, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$. The same below

图1 小麦季各生育期不同土层不同处理的土壤脲酶活性

Figure 1 Soil urease activity in different soil layers at different growth stages

8.12%、14.73%、13.41%, RT+CN 平均增加了 7.96%。

2.1.2 对土壤蔗糖酶活性的影响

冬小麦返青期至成熟期间,蔗糖酶活性总体呈现出先升高再降低,之后缓慢升高的趋势(图2),在小麦拔节期最高,开花期最低。在不同土层中,CN 和 LN 处理间,蔗糖酶活性普遍达到差异显著水平或极显著水平,且 0~20 cm 土层大于 20~40 cm。2015—2016 季和 2016—2017 季,0~20 cm 土层中 3 种耕作方式的蔗糖酶活性各时期均表现为 NT>RT>PT,而在 20~40 cm 土层中,不同耕作方式间的蔗糖酶活性呈现出 NT<RT<PT。综合两年数据,与 PT+CN 相比,NT+LN、RT+LN、PT+LN 的整体蔗糖酶活性分别平均降低了 10.96%、9.9%、10.01%,NT+CN、RT+CN 蔗糖酶活性分别增加 2.04%、1.65%。

2.2 耕作方式和减氮处理对温室气体排放通量的影响

2.2.1 对 CH₄ 气体排放通量的影响

由图 3 可知,不同处理下,小麦田 CH₄ 排放通量均

为负值,表明麦田对 CH₄ 气体主要为吸收。小麦返青期到成熟期,CH₄ 气体的排放通量随小麦生育期的进行,呈现出先降低后升高再降低的趋势。在拔节期,CH₄ 排放通量有最小值,且 CN 和 LN 处理间差异均达到显著水平。不同耕作方式之间的排放通量呈现出 NT>RT>PT。两个氮肥用量之间表现为 LN>CN,在拔节期差异最为显著。

2.2.2 对 CO₂ 气体排放通量的影响

由图 4 可知,麦田对 CO₂ 气体主要表现为排放,排放通量趋势为先升高,后降低。在小麦返青期至成熟期间,CO₂ 排放通量在拔节期出现排放高峰,且不同氮处理间差异均达到显著或极显著水平。耕作方式之间呈现出 NT<RT<PT。LN 与 CN 处理下的 CO₂ 排放通量,整体呈现出 LN<CN。在拔节期,NT、RT 和 PT 下的 LN 与 CN 处理 CO₂ 排放通量差异显著,第一年分别降低 5.87%、8.82% 和 15.70%,第二年分别降低 4.14%、5.97% 和 10.15%。

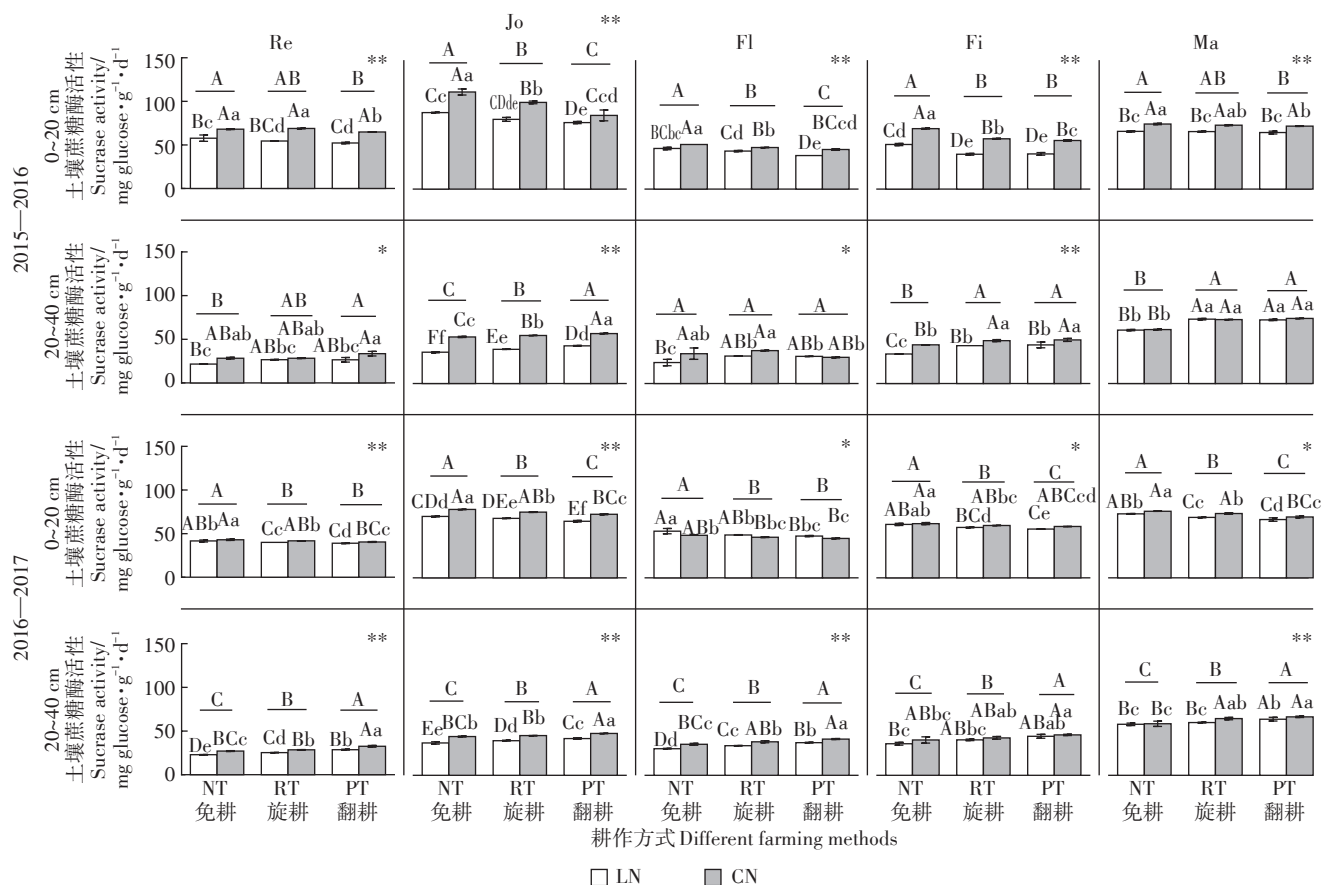
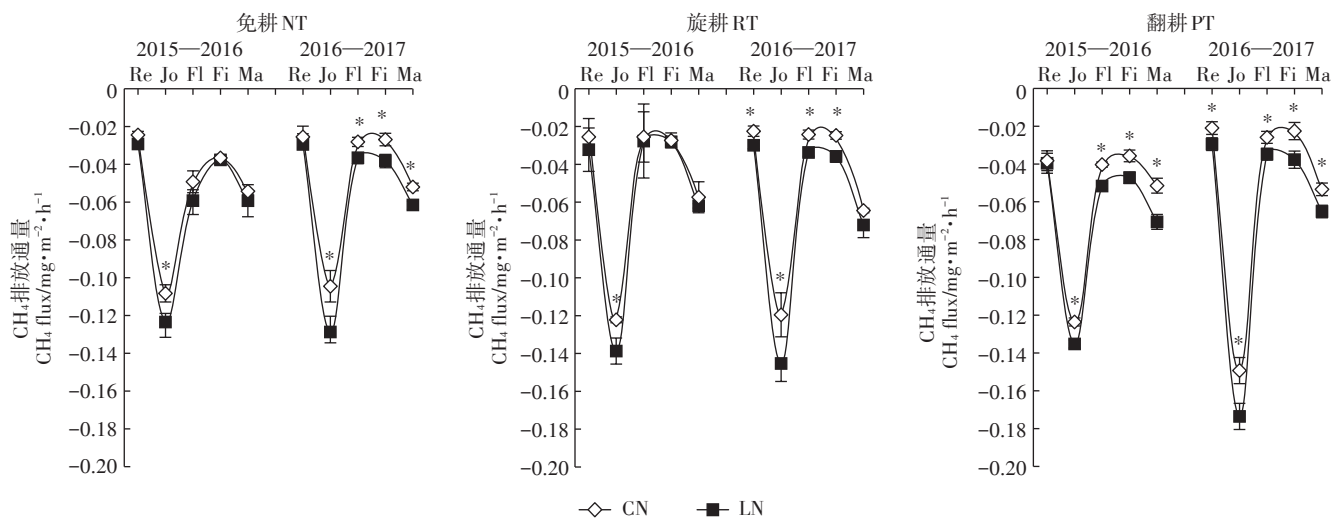


图2 小麦季各生育期不同土层不同处理的土壤蔗糖酶活性

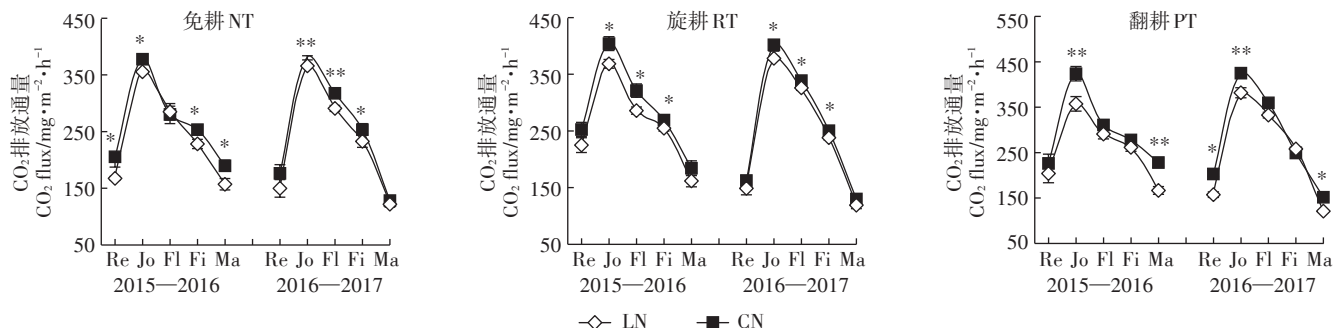
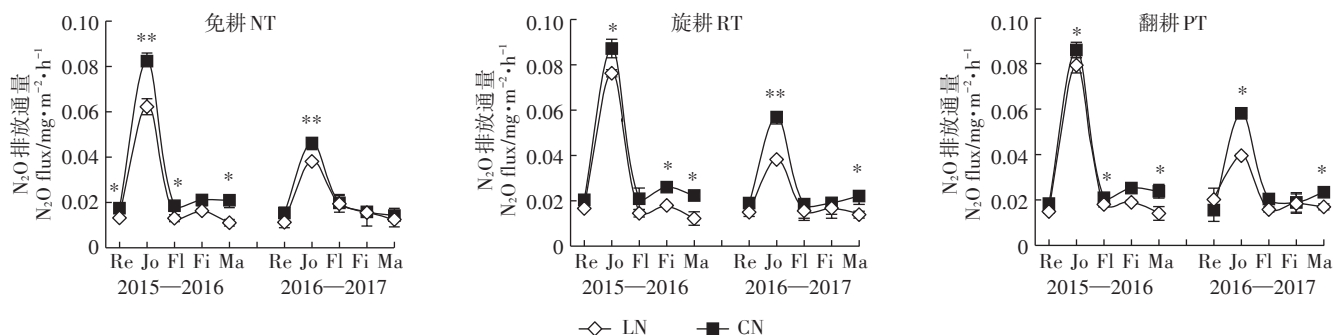
Figure 2 Soil sucrase activity in different soil layers at different growth stages

图3 氮肥减施和耕作方式对CH₄排放通量的影响Figure 3 Effect of nitrogen fertilizer reduction and tillage methods on CH₄ emission flux

2.2.3 对N₂O气体排放通量的影响

由图5可以看出,N₂O排放通量趋势也表现为先升高后下降,最后趋于平稳的趋势,且在拔节期时排放速率最快。与传统的PT处理相比,第一年NT和

RT能明显降低麦田N₂O排放通量13.53%和1.60%,第二年分别降低15.69%和4.82%。LN与CN处理在拔节期差异最显著,第一年,NT、RT、PT3种耕作方式下,LN处理下N₂O排放速率依次降低27.83%、

图4 氮肥减施和耕作方式对CO₂排放通量的影响Figure 4 Effect of nitrogen fertilizer reduction and tillage methods on CO₂ emission flux图5 氮肥减施和耕作方式对N₂O排放通量的影响Figure 5 Effect of nitrogen fertilizer reduction and tillage methods on N₂O emission flux

22.25%、16.70%，第二年分别降低了13.25%、26.73%和18.79%。

2.3 土壤酶活性与气体排放通量的相关性分析

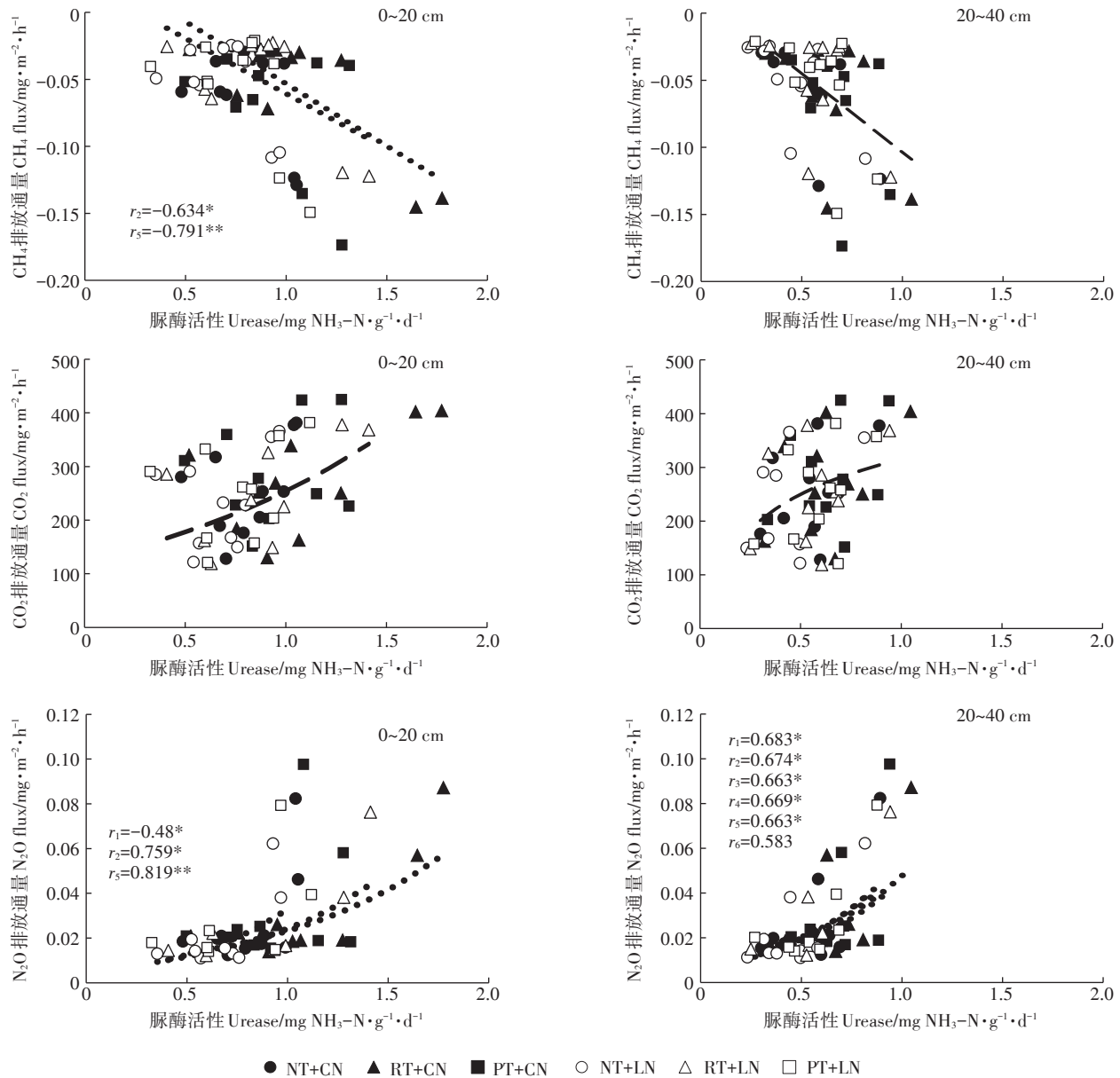
两年小麦季内土壤脲酶活性和蔗糖酶活性与气体排放通量间的相关关系如图6和图7所示。其中，0~20 cm 土层脲酶活性变化范围为0.33~1.77 mg NH₃-N·g⁻¹·d⁻¹，蔗糖酶活性变化范围为39.00~111.21 mg glucose·g⁻¹·d⁻¹。土壤脲酶活性与RT+LN和RT+CN处理中，CH₄排放通量之间存在显著负相关关系，与其他处理的相关性均未达到显著水平；虽然土壤-作物系统CO₂排放通量随脲酶活性增加表现出上升趋势，但均未达到显著水平；LN条件下，NT和RT处理中脲酶活性与N₂O排放通量存在显著相关关系，RT+CN处理下脲酶活性与N₂O排放通量呈极显著正相关，其他处理相关关系不显著。各处理间土壤蔗糖酶活性与CH₄排放通量存在显著负相关关系，相关系数为-0.694~-0.841；蔗糖酶活性与N₂O排放通量之间呈显著正相关关系，相关系数为0.671~0.818；虽然CO₂排放通量随蔗糖酶活性增加整体呈上升趋势，但两者之间相关性不显著。

20~40 cm 土层脲酶活性变化范围为0.23~1.05 mg NH₃-N·g⁻¹·d⁻¹，蔗糖酶活性变化范围为21.60~

73.05 mg glucose·g⁻¹·d⁻¹。其中，除PT+CN处理土层脲酶活性与N₂O排放通量之间相关系数为0.583，未达到显著水平外，其他处理两者之间的相关关系均达到显著水平；虽然整体上CH₄排放通量随脲酶活性降低而减小，CO₂排放通量随脲酶活性增强而变大，但均未达到显著水平。土层蔗糖酶活性与CH₄、CO₂及N₂O排放通量之间相关关系均不显著。

3 讨论

土壤酶主要来源于土壤微生物和植物根系的分泌物及动植物残体分解释放的酶。土壤脲酶可催化尿素水解生成氨和二氧化碳，而氨先通过亚硝化细菌的亚硝化作用生成NO₂⁻，进而NO₂⁻被硝化细菌经硝化作用生成NO₃⁻供作物吸收利用，其活性在一定程度上反映了土壤的供氮能力，与土壤氮素循环息息相关^[25]。土壤蔗糖酶催化土壤中蔗糖水解成的葡萄糖和果糖，是土壤微生物和植物根系发育的营养物质，蔗糖酶活性在一定程度上反映了土壤的营养状况^[25]。本研究，脲酶和蔗糖酶活性随小麦生育期推进而变化，均在小麦拔节期活性最高，这种现象应该与小麦拔节期前追施尿素有关。由于脲酶作用下的底物和产物均增多，一方面使得NO₃⁻参与下的根系形态建成



r 下标的1,2,3,4,5,6分别代表NT+LN、RT+LN、PT+LN、NT+CN、RT+CN、PT+CN处理; * $P<0.05$; ** $P<0.01$,下同

1,2,3,4,5, and 6 of the subscript of r represent NT+LN, RT+LN, PT+LN, NT+CN, RT+CN, and PT+CN, respectively. * $P<0.05$; ** $P<0.01$. The same below

图6 土壤脲酶与温室气体排放的关系

Figure 6 Relationship between soil urease and greenhouse gas emissions

加快,另一方面根系分泌物增多,根际微生物活动旺盛,促进了对相关土壤酶的分泌释放,根系和微生物的连锁效应协同促进了脲酶和蔗糖酶促反应能力的提升,这与甄丽莎等^[26]的研究结果一致。同时本研究发现脲酶和蔗糖酶对土层的反应敏感程度不同,0~20 cm 土层脲酶活性变化在不同时期差异较大,20~40 cm 土层活性变化差异较小,而蔗糖酶在两个土层的变化幅度均较小。这一方面可能是由尿素表施引起的0~20 cm 土层中尿素含量变动导致,而蔗糖酶的酶促底物含量相对稳定,另一方面由于上下耕层

根系生物量和形态的差异,根际微生物群落的差异和活动对酶活性也有一定影响。此外,相关研究也证明了脲酶、蔗糖酶的活性随土层加深而降低^[27],随施氮量的增加而增强^[28],减少施氮量显著降低脲酶活性^[29]。拔节期前,3种耕作方式之间NT脲酶活性最小,PT脲酶活性最大,且存在极显著差异,这是由于脲酶的酶促反应为需氧反应,翻耕的土壤孔隙度较大,通透性好导致土壤氧含量较高,而免耕的土壤反之,故翻耕土壤为脲酶提供了更好的酶促动力学条件,增强了土壤脲酶的活性。

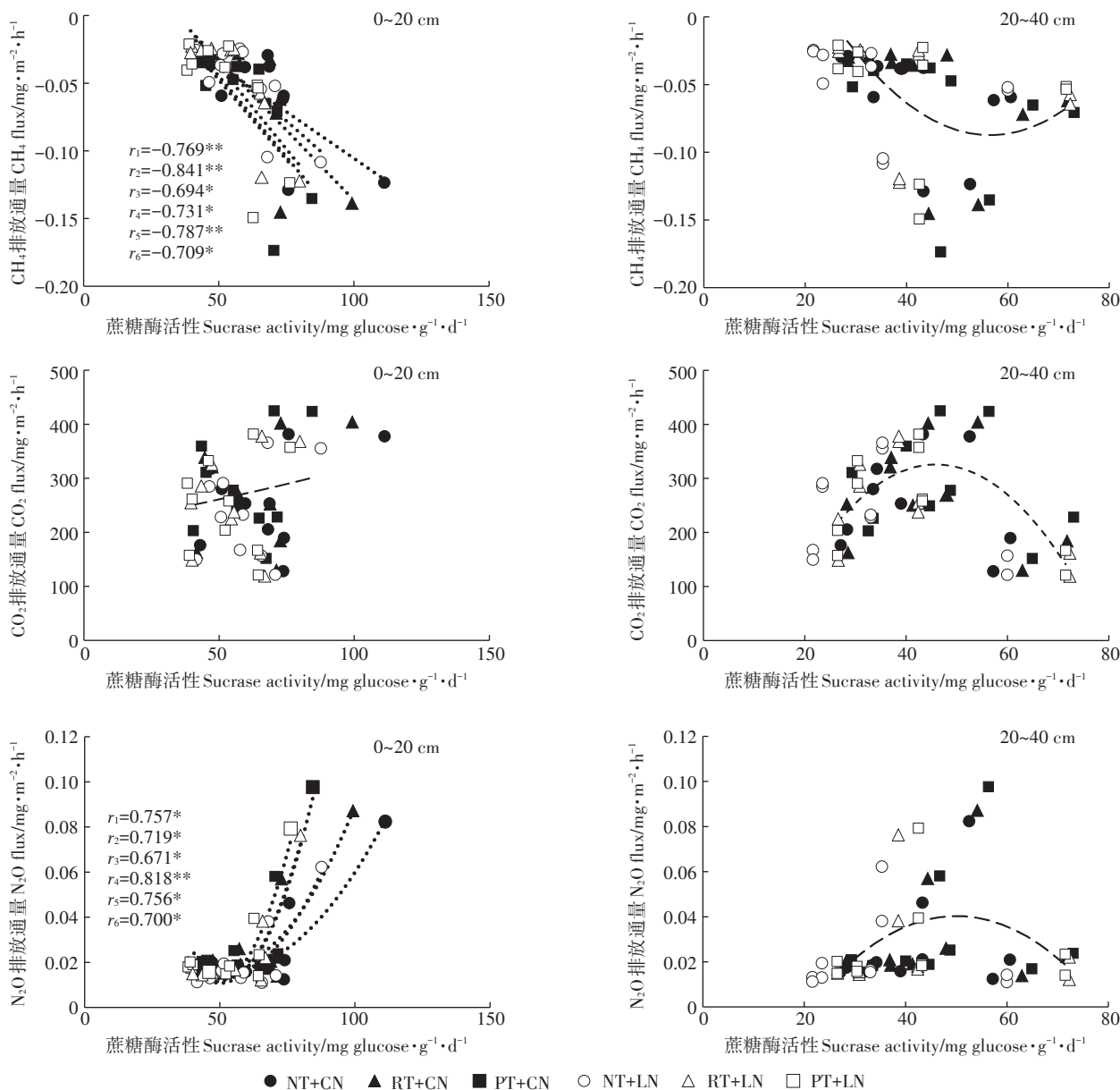


图7 土壤蔗糖酶活性与温室气体排放的关系

Figure 7 Relationship between soil Sucrase and greenhouse gas emissions

土壤通气状况是 CH_4 发挥源/汇作用的主要原因^[19]。本研究中,不同处理间由于耕作方式的不同,形成了不同的土壤通透性,对 CH_4 的排放通量呈现出 $\text{NT} > \text{RT} > \text{PT}$,麦田土壤对 CH_4 气体表现为吸收,与田慎重等^[30]的研究结果一致。因为在旱地土壤中较多的 CH_4 氧化菌消耗和吸收了地表大气中的 CH_4 ,使旱地土壤成为一个弱的 CH_4 汇^[31]。另外,本研究发现减少施氮量能够显著增加土壤对 CH_4 吸收的主要原因可能是 NH_4^+-N 抑制了 CH_4 氧化菌的活性,从而抑制了 CH_4 的氧化^[32]。拔节期追施尿素增加了土壤中 NH_4^+-N 的含量,灌水降低了土壤通透性,降低了土壤对 CH_4

的吸收。开花期之后随着小麦生长对土壤中 NH_4^+-N 的吸收和气温的升高, CH_4 的排放通量逐渐增大。

土壤 CO_2 排放主要是由微生物活动和根系呼吸作用产生,受土壤养分状况、环境温度、农田管理措施等多方面因素的影响^[19]。耕作措施通过改变土壤团粒大小、湿度、紧实度、通透性及养分的物质和能量转化等方式调节土壤有机质的分解环境^[33],进而影响温室气体的吸收和排放^[34-35]。本研究中,不同耕作方式间的土壤 CO_2 排放顺序为 $\text{PT} > \text{RT} > \text{NT}$ 。一方面,相较于不同程度增加土壤通透性的RT和PT,NT减少土壤干扰的同时,增加了团聚体的稳定性,有利于难分

解碳的形成,从而减少土壤 CO_2 的排放;另一方面,NT处理的秸秆覆盖在表层维持土壤温度和湿度的稳定,也减少了 CO_2 排放^[35-36]。LN与CN处理下的 CO_2 排放通量整体呈现出 $\text{CN} > \text{LN}$,与李新华等^[37]的研究结果一致,即减少施氮量能有效减少 CO_2 的排放。

施肥、耕作及气候等因素直接影响着土壤的硝化与反硝化过程^[38],而农田 N_2O 的排放主要来自土壤的反硝化过程,该过程主要受外源C、N供应水平的制约^[39]。本研究中, N_2O 的排在拔节期追肥后出现峰值(图5),这可能是由于追肥为 N_2O 的释放提供了足够的氮素^[40]。NT、RT、PT 3种耕作模式下LN与CN处理相比, N_2O 排放通量显著降低,主要原因是氮肥的减施减少了反硝化作用的底物供应,使反硝化过程中反硝化细菌所需的有效氮源不足,从而减少了 N_2O 的排放^[41]。PT和RT不同程度地改善了土壤通透性,加速了土壤中 N_2O 的排放,NT对土壤扰动小被认为是减少 N_2O 排放的有效措施,但也有研究认为免耕降低了土壤中氧气的浓度,可能会增加反硝化引起的 N_2O 的排放^[42]。另外,与传统的PT相比,第一年NT和RT能明显降低13.53%和1.60%麦田 N_2O 排放通量,第二年分别降低15.69%和4.82%,说明整体排放第二年较第一年降低更多,表明连续保护性耕作和秸秆还田对于 NO_2 排放的降低具有较大潜力,这可能是由于秸秆的分解促进了反硝化过程,从而减少 N_2O 的排放^[43],但是需要多年的试验进一步验证。

温室气体的排放与土壤生态系统,特别是土壤酶系统的生物化学过程中的C/N物质和能量循环关系密切。已有研究表明,添加脲酶抑制剂能有效减少温室气体的排放,脲酶活性与温室气体的排放密切相关^[44]。本研究中,脲酶活性与 N_2O 排放通量之间呈现出明显的正相关关系,不同土层和耕作措施的相关性均在0.6以上,表明脲酶作为作用于线型酰胺C—N键(非肽)的水解酶,通过酶促反应将尿素水解成氨,增加了 N_2O 的反应底物;脲酶与 CH_4 排放通量也为正相关,但是相关性不显著。蔗糖酶在0~20 cm和20~40 cm的土层中与 CO_2 和 N_2O 的相关性不同,在0~20 cm土层环境中,蔗糖酶活性与 CO_2 和 N_2O 的排放通量为正相关,但是在20~40 cm土层中,相关性呈现先升高,后下降的趋势,即温室气体排放通量活性随酶活性的升高而下降。土壤蔗糖酶主要作用于呋喃果糖甘末端残基的水解,是受土壤空气影响的诸多酶的一种,与土壤的呼吸强度有关。故当20~40 cm土层氧气的消耗达到蔗糖酶的临界阈

值时,酶活性受到抑制,这可能是导致温室气体排放通量下降的原因。这与张俊丽等^[45]的研究结果不尽一致,可能与不同土壤质地、作物品种以及试验季节气候等有关,有待进一步论证。也需要进一步从植物残茬的腐烂降解、土壤微生物、土壤酶系统和大气环境中C、N等元素循环及其互动机理出发,整合土壤微生物学、分子生物学和土壤学等多学科交叉进行深入探讨。

4 结论

(1)本研究中不同处理下,小麦田表现为 CH_4 的汇和 CO_2 与 N_2O 的源。

(2)减少施氮量显著降低了土壤脲酶和蔗糖酶的活性;旋耕与翻耕相比,浅层土壤的蔗糖酶和脲酶活性提升显著。土壤酶活性随着耕作方式对耕层微环境的改变影响温室气体排放通量。

(3)脲酶与 CH_4 排放通量呈负相关,与 CO_2 、 N_2O 排放通量呈正相关;蔗糖酶与 CH_4 排放呈负相关,与 N_2O 排放呈正相关,但20~40 cm耕层相关性不显著。

(4)在麦玉轮作秸秆还田、化肥减控的耕作措施下,旋耕加氮肥减施是保障小麦稳产、维持土壤酶活性和降低农田温室气体排放的有效措施。

参考文献:

- [1] Lashof D A, Ahuja D R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming[J]. *Nature*, 1990, 344(6266): 529-531.
- [2] Ciais P, Sabine C, Bala G, et al. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change change[R]. London: Cambridge University Press, 2013.
- [3] Hansen J E, Lacis A A. Sun and dust versus greenhouse gases: an assessment of their relative roles in global climate change[J]. *Nature*, 1990, 346(6286): 713-719.
- [4] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.[R]. London: Cambridge University Press, 2007.
- [5] 管大海, 张俊, 王卿梅, 等. 气候智慧型农业及其对我国农业发展的启示[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(10): 7-13.
GUAN Da-hai, ZHANG Jun, WANG Qing-mei, et al. Climate-smart agriculture and its enlightenment to agricultural development of China [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(10): 7-13.
- [6] 杨江山, 张恩和, 黄高宝, 等. 保护性耕作对麦药轮作土壤酶活性和微生物数量的影响[J]. 生态学报, 2009, 30(3): 824-829.
YANG Jiang-shan, ZHANG En-he, HUANG Gao-bao, et al. Effects of conservation tillage on soil microbes quantities and enzyme activities

- in wheat-herb rotation system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(3): 824-829.
- [7] 张 赛, 王龙昌, 黄召存, 等. 保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(6): 2419-2425.
- ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, et al. Soil respiration and carbon balance in wheat field under conservation tillage[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2014, 35(6): 2419-2425.
- [8] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [9] 张庆忠, 吴文良, 王明新, 等. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 2883-2887.
- ZHANG Qing-zhong, WU Wen-liang, WANG Ming-xin, et al. The effects of crop residue amendment and N rate on soil respiration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2883-2887.
- [10] 强学彩, 袁红莉, 高旺盛. 秸秆还田量对土壤CO₂释放和土壤微生物量的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 469-472.
- QIANG Xue-cai, YUAN Hong-li, GAO Wang-sheng. Effect of crop-residue incorporation on soil CO₂ emission and soil microbial biomass [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(3): 469-472.
- [11] Naser H M, Nagata O, Tamura S, et al. Methane emissions from five paddy fields with different amounts of rice straw application in central Hokkaido, Japan[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2010, 53(1): 95-101.
- [12] 王改玲, 郝明德, 陈德立. 硝化抑制剂和通气调节对土壤N₂O排放的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(1): 32-36.
- WANG Gai-ling, HAO Ming-de, CHEN De-li. Effect of nitrification inhibitors and aeration regulation on soil N₂O emission[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2006, 12(1): 32-36.
- [13] Ma J, Li X L, Xu H, et al. Effects of nitrogen fertiliser and wheat straw application on CH₄ and N₂O emissions from a paddy rice field[J]. *Aust J Soil Res*, 2007, 45(5): 359-367.
- [14] Shan J, Yan X Y. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 71: 170-175.
- [15] Badagliacca G, Benítez E, Amato G, et al. Long-term effects of contrasting tillage on soil organic carbon, nitrous oxide and ammonia emissions in a Mediterranean Vertisol under different crop sequences [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 619/620: 18-27.
- [16] 王玉英, 胡春胜, 程一松, 等. 太行山前平原夏玉米-冬小麦轮作生态系统碳截存及其气体调节价值[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(7): 1508-1515.
- WANG Yu-ying, HU Chun-sheng, CHENG Yi-song, et al. Carbon sequestrations and gas regulations in summer-maize and winter-wheat rotation ecosystem affected by nitrogen fertilization in the piedmont plain of Taihang Mountains, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1508-1515.
- [17] 王玉英, 胡春胜. 施氮水平对太行山前平原冬小麦-夏玉米轮作体系土壤温室气体通量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(5): 1122-1128.
- WANG Yu-ying, HU Chun-sheng. Soil greenhouse gas emission in winter wheat/summer maize rotation ecosystem as affected by nitrogen fertilization in the Piedmont Plain of Mount Taihang, China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(5): 1122-1128.
- [18] Qin S P, Wang Y Y, Hu C S, et al. Yield-scaled N₂O emissions in a winter wheat-summer corn double-cropping system[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 55: 240-244.
- [19] 宋利娜, 张玉铭, 胡春胜, 等. 华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3): 297-307.
- SONG Li-na, ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, et al. Comprehensive analysis of emissions and global warming effects of greenhouse gases in winter-wheat fields in the high-yield agro-region of North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(3): 297-307.
- [20] Snyder C S, Bruulsema T W, Jensen T L, et al. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 133(3): 247-266.
- [21] Yang X L, Gao W S, Shi Q H, et al. Impact of climate change on the water requirement of summer maize in the Huang-Huai-Hai farming region[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 124(2): 20-27.
- [22] 黄 娟, 李 稹, 张 健. 改良靛酚蓝比色法测土壤脲酶活性[J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, 34(1): 102-107.
- HUANG Juan, LI Zhen, ZHANG Jian. Improvement of indophenol blue colorimetric method on activity of urease in soil[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2012, 34(1): 102-107.
- [23] 邹建文, 黄 耀, 宗良纲, 等. 稻田CO₂、CH₄和N₂O排放及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(6): 758-764.
- ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. A field study on CO₂, CH₄ and N₂O emissions from rice paddy and impact factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(6): 758-764.
- [24] 谢义琴, 张建峰, 姜慧敏, 等. 不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(3): 578-584.
- XIE Yi-qin, ZHANG Jian-feng, JIANG Hui-min, et al. Effects of different fertilization practices on greenhouse gas emissions from paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3): 578-584.
- [25] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- GUAN Song-yin. Soil enzymes and their research methods[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986.
- [26] 甄丽莎, 谷 洁, 高 华, 等. 秸秆还田与施肥对土壤酶活性和作物产量的影响[J]. *西北植物学报*, 2012, 32(9): 1811-1818.
- ZHEN Li-sha, GU Jie, GAO Hua, et al. Effect of straws, manure and chemical fertilizer on soil properties and crop yields[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, 32(9): 1811-1818.
- [27] 路文涛, 贾志宽, 张 鹏, 等. 秸秆还田对宁夏旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(3): 522-528.
- LU Wen-tao, JIA Zhi-kuan, ZHANG Peng, et al. Effects of straw returning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of southern Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 522-528.

- [28] 吕艳杰, 于海燕, 姚凡云, 等. 秸秆还田与施氮对黑土区春玉米田产量、温室气体排放及土壤酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(11): 1456-1463.
- LÜ Yan-jie, YU Hai-yan, YAO Fan-yun, et al. Effects of soil straw return and nitrogen on spring maize yield, greenhouse gas emission and soil enzyme activity in black soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(11): 1456-1463.
- [29] 袁玲, 杨邦俊, 郑兰君, 等. 长期施肥对土壤酶活性和氮磷养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(4): 300-306.
- YUAN Ling, YANG Bang-jun, ZHENG Lan-jun, et al. Effects of long-term fertilization on enzymatic activities and transformation of nitrogen and phosphorus in soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1997, 3(4): 300-306.
- [30] 田慎重, 宁堂原, 李增嘉, 等. 不同耕作措施对华北地区麦田CH₄吸收通量的影响[J]. 生态学报, 2010, 20(2): 541-548.
- TIAN Shen-zhong, NING Tang-yuan, LI Zeng-jia, et al. Effect of CH₄ uptake flux under different tillage systems in wheat field in the North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 20(2): 541-548.
- [31] 谢立勇, 叶丹丹, 张贺, 等. 旱地土壤温室气体排放影响因子及减排增汇措施分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(4): 481-487.
- XIE Li-yong, YE Dan-dan, ZHANG He, et al. Review of influence factors on greenhouse gases emission from upland soils and relevant adjustment practices[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(4): 481-487.
- [32] Goulding K W T, Willison T W, Webster C P, et al. Methane fluxes in aerobic soils[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1996, 42(1/2): 175-187.
- [33] Almaraz J J, Zhou X M, Mabood F, et al. Greenhouse gas fluxes associated with soybean production under two tillage systems in southwestern Quebec[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 104(1): 134-139.
- [34] 马小婷, 隋玉柱, 朱振林, 等. 秸秆还田对农田土壤碳库和温室气体排放的影响研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(6): 14-20.
- MA Xiao-ting, SUI Yu-zhu, ZHU Zhen-lin, et al. Research progress on the effects of straw returning on farmland soil carbon pool and greenhouse gas emissions[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(6): 14-20.
- [35] 徐钰, 刘兆辉, 朱国梁, 等. 不同农业管理措施对华北地区麦田温室气体排放的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(2): 7-13.
- XU Yu, LIU Zhao-hui, ZHU Guo-liang, et al. Effects of greenhouse gas emission under different agricultural management practices in wheat field in the North China Plain[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(2): 7-13.
- [36] 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.
- CAI Li-qun, WANG Juan, LUO Zhu-zhu, et al. Greenhouse gas emissions in double sequence pea-wheat rotation fields under different tillage conditions[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(8): 921-930.
- [37] 李新华, 朱振林, 董红云, 等. 氮肥减施对黄淮海地区麦田温室气体排放的影响[J]. 土壤与作物, 2016, 5(4): 215-222.
- LI Xin-hua, ZHU Zhen-lin, DONG Hong-yun, et al. Effects of reduced N fertilizer application on greenhouse gas emissions from wheat fields in Huang-huai-hai area[J]. *Soil and Crop*, 2016, 5(4): 215-222.
- [38] 焦燕, 黄耀. 影响农田氧化亚氮排放过程的土壤因素[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(4): 457-466.
- JIAO Yan, HUANG Yao. Influence of soil properties on N₂O emissions from farmland[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(4): 457-466.
- [39] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田CH₄和N₂O排放的综合影响[J]. 环境科学, 2003, 24(4): 7-12.
- ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. Integrated effect of incorporation with different organic manures on CH₄ and N₂O emissions from rice paddy[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(4): 7-12.
- [40] 李晓密, 伦小秀, 陈琪, 等. 不同施肥处理下冬小麦-夏玉米轮作农田温室气体的排放[J]. 环境化学, 2014, 33(4): 591-596.
- LI Xiao-mi, LUN Xiao-xiu, CHEN Qi, et al. Greenhouse gas emission from a winter wheat-summer maize crop rotation farmland under different fertilization treatments[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(4): 591-596.
- [41] Xing G X, Zhao X, Xiong Z Q, et al. Nitrous oxide emission from paddy fields in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 45-50.
- [42] Ball B C, Scott A, Parker J P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland[J]. *Soil & Tillage Research*, 1999, 53(1): 29-39.
- [43] Azam F, Muller C, Weiske A, et al. Nitrification and denitrification as sources of atmospheric nitrous oxide-role of oxidizable carbon and applied nitrogen[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2002, 35(1): 54-61.
- [44] Ding W X, Yu H Y, Cai Z C. Impact of urease and nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions from fluvo-aquic soil in the North China Plain[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2011, 47(1): 91-99.
- [45] 张俊丽, 高明博, 温晓霞, 等. 不同施氮措施对旱作玉米地土壤酶活性及CO₂排放量的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(19): 6147-6154.
- ZHANG Jun-li, GAO Ming-bo, WEN Xiao-xia, et al. Effects of different fertilizers on soil enzyme activities and CO₂ emission in dryland of maize[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(19): 6147-6154.