

不同耕作措施下土壤 N₂O 排放及其农学效率*

许艳艳^{1,2} 武兰芳^{1**} 李彬彬¹ 丘清燕^{1,2} 秦越^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室 北京 100101; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 为评价不同耕作措施下华北平原农田土壤 N₂O 排放及其农学效率, 通过设置常规耕作秸秆还田 (CT+)、常规耕作无秸秆还田 (CT-)、免耕秸秆还田 (NT+)、免耕无秸秆还田 (NT-) 4 个处理田间定位试验, 采用静态箱-气相色谱法测定分析了连续 3 个小麦生长期的表层土壤 N₂O 排放及其主要相关因子, 同时测定了小麦产量与氮吸收量等相关指标。结果表明: 在 4 个处理下, 小麦生长期表层土壤 N₂O 排放动态基本一致, 而土壤 N₂O 累积排放量却存在显著差异, 而且耕作方式与秸秆还田存在显著的互作效应。在常规耕作和免耕措施下, 单位面积土壤 N₂O 累积排放量均表现为秸秆还田土壤显著高于无秸秆还田土壤, CT+ 和 NT+ 分别比 CT- 和 NT- 高 26.2% 和 74.6%; 在无秸秆还田条件下, 土壤 N₂O 排放量表现为常规耕作比免耕高 42.4%。相关分析表明, 土壤 N₂O 排放通量与地下 5 cm 土壤温度、土壤孔隙充水率 (WFPS) 之间呈显著正相关关系, 与土壤溶解性有机氮 (DON) 含量之间呈显著负相关关系。利用农学效率指标度量 N₂O 排放量时可知, 虽然小麦籽粒产量和氮肥偏生产力在各处理间没有达到显著性差异, 但每生产 1 kg 小麦籽粒表层土壤 N₂O 排放量为 0.18~0.73 g N₂O-N, 每投入 1 kg 氮素表层土壤 N₂O 排放量为 5.1~18.0 g N₂O-N, 处理间存在显著差异; 与单位面积土壤 N₂O 排放量表现一致, 单位籽粒产量 N₂O 排放量和单位氮素投入 N₂O 排放量均表现为无论是常规耕作还是免耕措施, 秸秆还田土壤均显著高于秸秆不还田土壤, 在秸秆不还田条件下, 常规耕作土壤均显著高于免耕土壤。总之, 免耕是有效减少土壤 N₂O 排放的一种耕作措施。

关键词 土壤 N₂O 排放 耕作措施 秸秆还田 农学效率

中图分类号: X712 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2015)11-1349-10

Soil N₂O emission and its agronomic efficiency under different tillage*

XU Yanyan^{1,2}, WU Lanfang^{1**}, LI Binbin¹, QIU Qingyan^{1,2}, QIN Yue^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Cultivated land soil is regarded as an important source of N₂O emission that is affected by farming practices. To determine effects of tillage and crop residues management on soil N₂O emission and its agronomic efficiency on the North China Plain, a field experiment was carried out, which contained 4 treatments with 3 replications. The 4 treatments were conventional tillage with crop residues incorporation to soil (CT+) and without crop residues incorporation to soil (CT-), no-tillage with crop residues mulching (NT+) and without crop residues mulching (NT-). During the field experimentation soil N₂O emissions at soil/atmosphere interface were sampled and analyzed by using static chamber-Gas Chromatography (GC) method in continuous 3 wheat growth seasons; meanwhile, the primary related factors with N₂O emission were also investigated

* 国家自然科学基金项目(31271675)和国家科技支撑计划课题(2013BAD05B03)资助

** 通讯作者: 武兰芳, 主要研究方向为农业可持续发展评价、农田生产力与资源环境关系。E-mail: wulf@igsrr.ac.cn
许艳艳, 主要研究方向为农田生态系统优化管理。E-mail: xuyan20081011@163.com

收稿日期: 2015-04-01 接受日期: 2015-07-03

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31271675) and the National Key Technology Support Program (No. 2013BAD05B03)

** Corresponding author, E-mail: wulf@igsrr.ac.cn
Received Apr. 1, 2015; accepted Jul. 3, 2015

and analyzed. The results showed that the dynamic changes of soil N_2O emission during wheat growth were similar but the cumulative N_2O emissions were significantly different under 4 treatments and, the interactive effect between tillage and crop residues management was significant. The cumulative N_2O emission per unit area under CT+ and NT+ were higher than those under CT- and NT- by 26.2% and 74.6%, respectively, and CT- treatment emitted 42.4% more N_2O than NT- treatment. The soil N_2O emission was greatly influenced by soil temperature and soil moisture. The correlation analysis indicated that there was a significant positive correlation between soil N_2O emission and both soil temperature at 5 cm depth soil and water filled pore space (WFPS), while there was a significantly negative relation between soil N_2O emission and dissolved organic nitrogen (DON). When assessing soil N_2O emission in relation to crop productivity expressed as above-ground N uptake (i.e. yield-scaled and nitrogen input-scaled N_2O emission), the soil N_2O emissions per kilogram grain yield were 0.18–0.73 g N_2O -N and per kilogram nitrogen input were 5.1–18.0 g N_2O -N. Although grain yield and nitrogen productivity were not significantly different among treatments, the N_2O emissions in relation to crop productivity were still significantly different among treatments, similar to the N_2O emission per unit area that were also greater under CT+ and NT+ than under CT- and NT-. In conclusion, no-till practice is help to reduce N_2O emissions from arable land soil in the North China Plain.

Keywords Soil; N_2O emissions; Tillage; Crop residues management; Agronomic efficiency

N_2O 作为重要的温室气体之一, 其增温潜势是 CO_2 的 298 倍^[1]。农田土壤是大气 N_2O 的重要排放源, 其产生和排放受土壤耕作、施肥、灌溉等多种农作措施的影响, 其中耕作方式和秸秆还田主要通过影响土壤温湿度、土壤性质和土壤养分状况等过程对 N_2O 排放产生重要的影响^[2]。Munkholm-Lars 等^[3]在丹麦砂质壤土的研究发现, 常规耕作措施下土壤排放的 N_2O 高于免耕。Ball 等^[4]在英国黏壤土进行的免耕和常规耕作长期定位试验中指出, 免耕措施下较高的土壤密度和水分含量增加了气体扩散阻力和土壤厌氧环境, 表层土壤中的反硝化作用速率提高, 进而促进了土壤 N_2O 的排放。太湖地区冬小麦田的观测表明, 翻耕对 N_2O 排放的影响在作物不同生长阶段表现不同, 但总体而言, 翻耕和免耕措施下 N_2O 平均排放通量并无明显差异^[5]。张玉铭等^[6]则认为, 耕作措施对农田土壤 N_2O 的排放产生了显著影响, 翻耕比免耕更有利于 N_2O 的排放, 主要是因为土壤扰动促进了郁闭于土壤内的 N_2O 向大气中的释放。汪婧等^[7]在我国半干旱地区的研究中指出, 秸秆还田改善了土壤团粒结构, 减缓了土壤有机质的降解, 从而降低了土壤 N_2O 的排放量。另有研究显示, 秸秆覆盖能够补充土壤中碳源, 使本来受碳限制的土壤硝化、反硝化细菌活性增强, 从而增加了 N_2O 的排放^[8]。马二登等^[9]研究发现, 稻草覆盖于地表显著增加了麦田土壤 N_2O 的排放量, 而将稻草与土壤混合均匀或原位焚烧则显著减少了土壤 N_2O 的排放。胡春胜等^[10]研究指出, 秸秆还田可以改变氮素的迁移和转化规律, 有效减少氮素以气体形式释放到大气中的量。总之, 不同农作措施对土壤 N_2O 排放的影响在不同的气候及土壤条件下具

有不同结果。鉴于此, 典型区域内耕作措施对农田土壤 N_2O 排放的影响, 有必要继续进行研究。

有学者^[11-12]指出, 由于全球对农产品增长的不断需求, 高投入、高产出的农业生产通常伴随着大量氮素损失(包括 N_2O 排放), 所以, 在评价农田土壤 N_2O 排放时, 相对于单位面积 N_2O 排放量, 以作物生产力相关的农学指标度量土壤 N_2O 排放更有实际意义。由于温室气体的排放和作物氮肥利用率均与化肥施用、耕作方式、秸秆还田等农田管理措施密切相关, 土壤 N_2O 排放量的降低可能伴随而来的是产量的减少, 更高的化肥氮施入可能引起作物产量的提高和 N_2O 排放量的增加, 如果其带来的产量提高幅度大于 N_2O 排放的增加比例, 则可以降低单位产量 N_2O 的排放量。采用作物生产力尺度来度量 N_2O 的排放量可以兼顾不同农田管理方式带来的经济与环境效应, 有利于管理者在寻求作物产量最大化的前提下确保由此造成的环境影响最低。Almaraz 等^[13]在对加拿大西部黏壤土进行研究时发现, 免耕与翻耕相比, 作物产量增加 17%, 而土壤 N_2O 累积排放量却增加 35%, 但是, 如果用单位籽粒产量所排放的 N_2O 表示, 两种耕作措施之间差异并不显著。Venterea 等^[14]研究表明, 翻耕和免耕措施下 N_2O 累积排放量之间没有显著差异, 而单位地上部氮吸收量 N_2O 排放量则表现为免耕土壤显著高于翻耕, 主要是由于免耕条件下较低的产量造成的。江波等^[15]的研究发现, 与对照相比, 秸秆还田、常规耕作措施增加了冬小麦土壤 N_2O 的排放率, 但明显降低了单位产量 N_2O 的排放量, 降低幅度在秸秆还田措施下表现最为明显。因此, 有必要对不同耕作方式下农田土壤 N_2O 排放的农学效率进行评估。

华北平原作为我国的粮食主产区, 以小麦-玉米一年两熟种植为主体种植制度, 常规耕作和免耕是最主要的两种耕作措施, 秸秆直接还田又是未来的主要趋势, 依赖于化肥投入保持作物高产稳产又是重要的物质基础。因此, 本研究的主要目的是基于农田定位试验, 测定分析不同耕作措施下小麦对化肥氮的吸收利用、土壤 N₂O 的排放及其影响因素, 尝试用籽粒产量和化肥投入量度量评价农田土壤 N₂O 的排放, 以探讨小麦生产力与土壤 N₂O 排放之间的关系。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验在中国科学院禹城农业综合试验站(东经 116°36', 北纬 36°57')进行。气候属暖温带半湿润季风气候, 多年年均气温为 13.1 °C, 多年平均降水量为 583 mm, 且主要集中在 7—9 月。地貌特征为冲积平原, 土壤类型为盐化潮土。试验开始时 0~20 cm 土壤本底值为: 有机质 12.2 g·kg⁻¹, 全氮 0.8 g·kg⁻¹, 全磷 2.06 g·kg⁻¹, 全钾 22.9 g·kg⁻¹, pH 8.4。种植制度为冬小麦-夏玉米一年两熟种植。

1.2 试验设计

田间定位试验开始于 2008 年 10 月, 共设置常规耕作秸秆还田(CT+)、常规耕作无秸秆还田(CT-)、免耕秸秆还田(NT+)、免耕无秸秆还田(NT-)4 种处理, 试验采用随机区组设计, 每个处理 3 次重复。每种处理的小区面积 2.5 m×2.5 m, 小区与小区之间用宽 12 cm、深 60 cm 的水泥隔板分隔, 并设置 1.2 m×1.2 m 的保护行。秸秆还田为各小区上一个生长季收获作物籽粒后将剩余的作物根、茎、叶全部归还, 秸秆还田之前先将其切成约 10 cm 左右的小段。CT+ 处理在小麦和玉米播种前先把秸秆均匀地覆盖在小区土壤表面, 小麦播种前进行常规耕作处理, 使秸秆耕层土壤充分混合; 玉米播种对土壤不进行耕作。NT+ 处理在小麦和玉米播种前先把秸秆均匀覆盖在土壤表层, 然后直接进行播种, 播种时尽量避免过多扰动覆盖的秸秆。CT- 和 NT- 处理于小麦季按照常规耕作和免耕方式进行耕作与播种, 玉米季均采用免耕方式。冬小麦于每年 10 月中旬播种, 次年 6 月上旬收获, 播种时采用人工开沟撒种, 行距 20 cm; 同时两行小麦中间开沟施入底肥(N: 195 kg·hm⁻²; P₂O₅: 45 kg·hm⁻²; K₂O: 60 kg·hm⁻²), 沟深 3~5 cm。夏玉米于 6 月中旬人工点播(6.67×10⁴ 株·hm⁻²), 10 月上旬收获, 不施底肥。于小麦拔节期和玉米大口期追施氮肥, 氮肥施用量分别为 115 kg·hm⁻² 和 240 kg·hm⁻²。

小麦和玉米生育期内其他的农作管理措施如浇水、除草全部与当地大田常规方法相同。

1.3 测定项目与测定方法

研究在 2010—2011 年度、2012—2013 年度和 2013—2014 年度 3 个小麦生长季进行采样分析, 气温和降水数据来自中国科学院禹城农业综合试验站气象站。

1.3.1 土壤气体的采集与分析

土壤气体采用静态箱-气相色谱法^[16]进行测定分析。采气装置分为上下两部分, 底座常年埋于土壤中, 每个试验小区 1 个底座。采集气体时将采样箱放置于底座上, 底座外围的凹槽用水密封。采样箱内装有温度传感器, 同步测量采样时的箱内温度和地下 5 cm 土壤温度。采集气体时间为 20 min, 分别于 0 min、5 min、10 min、15 min 时用 20 mL 医用注射针管抽取采样箱内气体, 抽取完毕后用三通阀密闭针管保存气体。气体采集自小麦出苗(11 月上旬)时开始, 小麦成熟收获(6 月上旬)时结束, 小麦越冬期(12 月中旬至来年 3 月上旬)只采集 1 次, 其他生育期内采样频率为每周 1 次, 大量降水后于田间没有积水时进行测定。每次采样从 9:00 开始, 11:00 结束, 该时间段对气体通量日平均值的估算有较好的代表性^[17]。采集的气体样品于 12 h 内用安捷伦 4890 气相色谱仪完成对气体样品 N₂O 浓度的分析, N₂O 检测器为电子捕获检测器(ECD)。气体通量(表示单位时间、单位面积观测箱内该气体质量的变化)的计算公式为:

$$F = M/V_0 \times P/P_0 \times T_0/T \times H \times d_c/d_t \quad (1)$$

式中: F 为土壤气体通量[N₂O 通量单位为 $\mu\text{g}(\text{N}_2\text{O}-\text{N})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$]; M 为气体的摩尔质量($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$); V_0 、 T_0 和 P_0 分别为标准状态(温度 273 K, 气压 101.3 kPa)下气体摩尔体积($22.4 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}$)、空气的绝对温度(K)和气压(kPa); P 、 T 和 H 分别为采样点气压(kPa)、采样时的绝对温度(K)和采样箱的高度(m); d_c/d_t 为箱内气体浓度随时间的变化率, 正值表示排放, 负值表示吸收。

N₂O 累积排放量计算公式:

$$M = \sum \left[\frac{F_{i+1} + F_i}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \right] \times 24 \div 100 \quad (2)$$

式中: M 、 F 分别为 N₂O 累积排放量和 N₂O 排放通量, 单位分别为 $\text{kg}(\text{N}_2\text{O}-\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\mu\text{g}(\text{N}_2\text{O}-\text{N})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; i 为采样次数; t 为采样时间, 单位为 d。

1.3.2 土壤样品

气体采集的同时采集 0~20 cm 土壤样品, 每个小区采集 3 个点的土样混合均匀, 采用烘干法测定

土壤水分含量。土壤溶解性有机氮(DON)含量=土壤浸提液中全氮含量(TDN)-硝态氮含量($\text{NO}_3\text{-N}$)-铵态氮含量($\text{NH}_4\text{-N}$);其中,土壤浸提液的提取采用 1:5 水土比法^[18],全氮含量采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度计法测定,硝态氮和铵态氮含量采用紫外分光光度计法测定。分别于小麦播种前和收获后采用环刀法测定每个试验小区内 0~20 cm 土壤容重,取平均值作为小区土壤容重值。

1.3.3 植物样品

植物样品采用收割法采集,小麦成熟收获时于各小区内选择 0.2 m×0.2 m 的样方植株齐地取出,测定籽粒产量、秸秆干物质质量,籽粒和秸秆分别粉碎后用凯氏定氮法测定其氮素含量。冬小麦地上部氮吸收量=籽粒产量×籽粒氮素含量+秸秆干物质质量×秸秆氮素含量。氮肥偏生产力(PFP_N)=小麦籽粒产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)/所施氮肥总量[$\text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$]。

1.3.4 土壤孔隙充水率(WFPS)的计算

$$\text{WFPS} = \frac{\text{土壤含水量}(w/w) \times \text{土壤容重}}{(1 - \text{土壤容重}/2.65) \times 100\%} \quad (3)$$

式中:WFPS 为土壤含水量(质量),单位为%;土壤容重的单位为 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$;2.65 为土粒密度,单位为 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

1.3.5 土壤 N_2O 排放量的农学效率计算

$$\text{单位籽粒产量 } \text{N}_2\text{O 排放量}[\text{g}(\text{N}_2\text{O}-\text{N})\cdot\text{kg}^{-1}] = \frac{\text{N}_2\text{O 累积排放量}[\text{kg}(\text{N}_2\text{O}-\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}]}{\text{小麦籽粒产量}(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})} \quad (4)$$

$$\text{单位地上部氮吸收量 } \text{N}_2\text{O 排放量}[\text{g}(\text{N}_2\text{O}-\text{N})\cdot\text{kg}^{-1}(\text{N})] = \frac{\text{N}_2\text{O 累积排放量}[\text{kg}(\text{N}_2\text{O}-\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}]}{\text{小麦地上部氮吸收量}[\text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}]} \times 1000 \quad (5)$$

$$\text{单位氮肥投入量排放 } \text{N}_2\text{O 系数}(\text{FIEF}_\text{N})(\%) = \frac{\text{N}_2\text{O 累积排放量}[\text{kg}(\text{N}_2\text{O}-\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}]}{\text{氮肥施用量}[\text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}]} \times 100\% \quad (6)$$

1.4 数据处理与分析

采用 SPSS 16.0 进行数据的统计分析,方差分

析采用单变量方差分析(Univariate),相关性分析采用二元变量相关分析方法(Bivariate);画图软件采用 Sigmaplot 10.0。

2 结果与分析

2.1 小麦生长季内降水与气温状况

研究期间的降水状况如图 1 所示,2010—2011 年度、2012—2013 年度和 2013—2014 年度冬小麦生长季累积降雨量分别为 64.5 mm、132.2 mm 和 101.2 mm,播种至返青期累积降雨量分别为 8.3 mm、81.2 mm 和 29.4 mm,小麦返青至成熟期累积降雨量分别为 56.2 mm、51.0 mm 和 71.8 mm;分别降雨 17 d、21 d 和 12 d,日降雨量分别介于 0.2~23.5 mm、0.9~16.2 mm 和 1.6~33.9 mm。3 个年度冬小麦生长季日均气温变化趋势一致(图 2),分别在 -8.13~26.2 °C、-12.2~27.2 °C 和 -6.0~29.4 °C 范围内变化,平均日均气温分别为 7.77 °C、7.45 °C 和 8.09 °C。

2.2 不同耕作措施下土壤 N_2O 排放通量的动态变化

3 个小麦生长季不同耕作措施下 N_2O 排放通量的变化趋势基本一致(图 3),小麦出苗至越冬期前,土壤 N_2O 的排放通量呈下降趋势。返青期, N_2O 排放通量先增加后降低。拔节期追施氮肥和灌水后,土壤 N_2O 排放通量增加,到抽穗期达到峰值,排放量为 97.23~224.77 $\mu\text{g}(\text{N}_2\text{O}-\text{N})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。抽穗-灌浆期土壤 N_2O 排放通量一直保持在较高水平。此后土壤 N_2O 排放通量逐渐下降,至小麦成熟,排放量降至 15.37~34.15 $\mu\text{g}(\text{N}_2\text{O}-\text{N})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。 N_2O 平均排放通量 CT+、NT+、CT- 之间没有显著差异($P>0.05$),均显著高于 NT- 处理($P<0.05$),分别高 85.72%、79.76%和 49.82%。免耕措施下,秸秆还田较不还田显著增加了土壤 N_2O 的排放;无秸秆还田条件下,免耕较常规耕作明显减少了 N_2O 的排放。

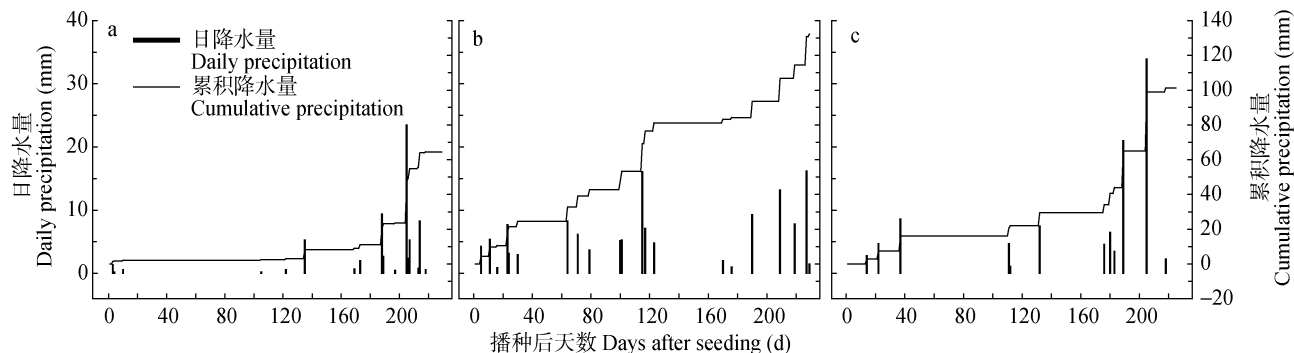


图 1 2010—2011 年度(a)、2012—2013 年度(b)和 2013—2014 年度(c)试验区小麦生长季降水量

Fig. 1 Precipitation during wheat growing seasons in 2010—2011 (a), 2012—2013 (b) and 2013—2014 (c) in the experimental site

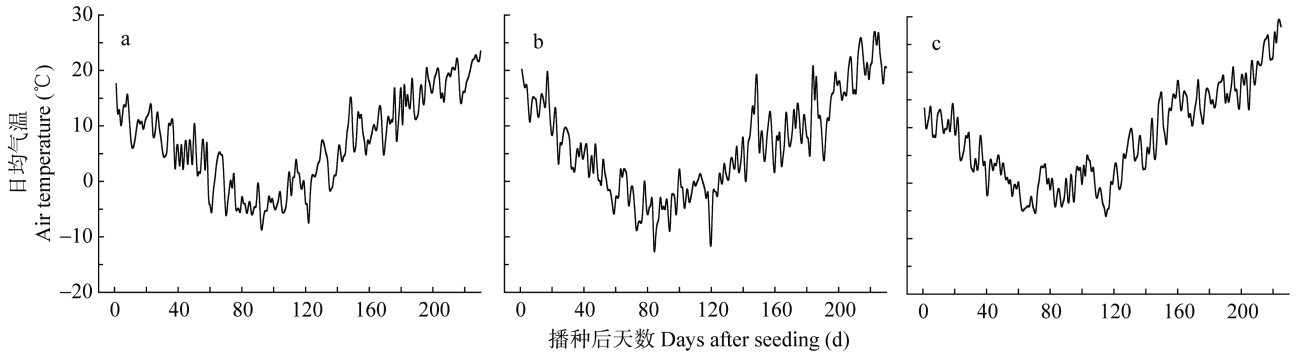


图 2 2010—2011 年度(a)、2012—2013 年度(b)和 2013—2014 年度(c)试验区小麦生长季日均温度

Fig. 2 Daily mean temperature during wheat growing seasons in 2010–2011 (a), 2012–2013 (b) and 2013–2014 (c) in the experimental site

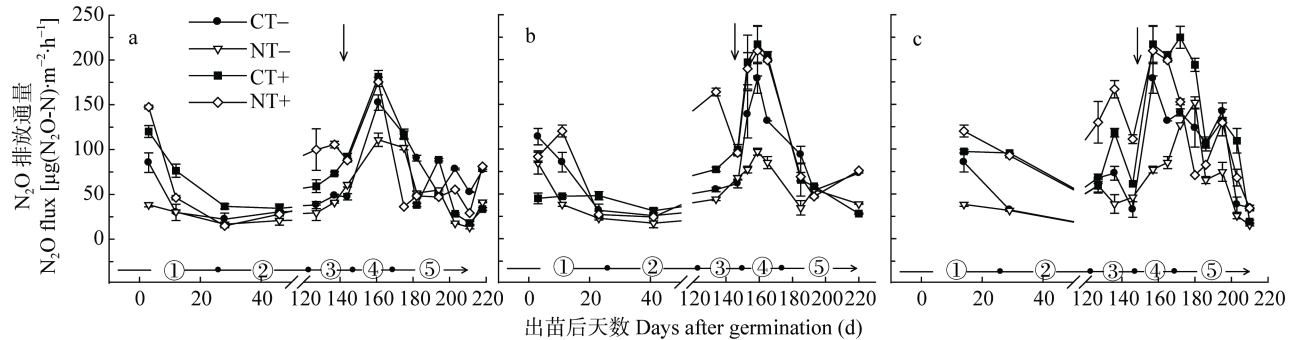


图 3 2010—2011 年度(a)、2012—2013 年度(b)和 2013—2014 年度(c)不同耕作措施下土壤 N₂O 排放通量的动态变化
Fig. 3 Dynamic changes of N₂O fluxes during wheat growing seasons in 2010–2011 (a), 2012–2013 (b) and 2013–2014 (c) under different treatments

CT-、NT-、CT+和 NT+分别为常规耕作无秸秆还田、免耕无秸秆还田、常规耕作秸秆还田和免耕秸秆还田处理; 、 、 、 和 分别代表小麦苗期、越冬期、返青-拔节期、抽穗-开花期和灌浆-成熟期; 垂直箭头代表拔节期施肥灌水日。下同。CT-, NT-, represent conventional tillage and no-tillage without crop residues retention, CT+ and NT+ are conventional tillage and no-tillage with crop residues retention, respectively. , , , and represent wheat growth periods of seedling, over-wintering, re-greening to jointing, earing to grouting, and grain-filling to mature. Downward-pointing arrows indicate dates of fertilization and irrigation. The same below.

2.3 N₂O 排放的相关影响因素

2.3.1 土壤水热状况

如图 4 所示, 同一年份不同处理间土壤 WFPS 变化趋势一致, 呈现出明显的季节变化。在为期 3 年的观测中, 土壤 WFPS 均表现为 NT+>NT->CT+>CT-, 处理间差异均达显著水平, 表明免耕和秸秆还田措施均显著增加了土壤 WFPS。相关分析显示,

各处理下 WFPS 与土壤 N₂O 排放通量之间呈极显著正相关关系($R=0.31\sim 0.33, P<0.01$)。小麦季不同处理间地下 5 cm 土壤温度变化趋势一致(图 5), 出苗-越冬期下降, 返青-成熟期升高, 各处理间平均地温无显著差异($P>0.05$)。相关分析表明, 各处理地下 5 cm 土壤温度与土壤 N₂O 排放通量间呈显著正相关关系($R=0.31\sim 0.33, P<0.05$)。

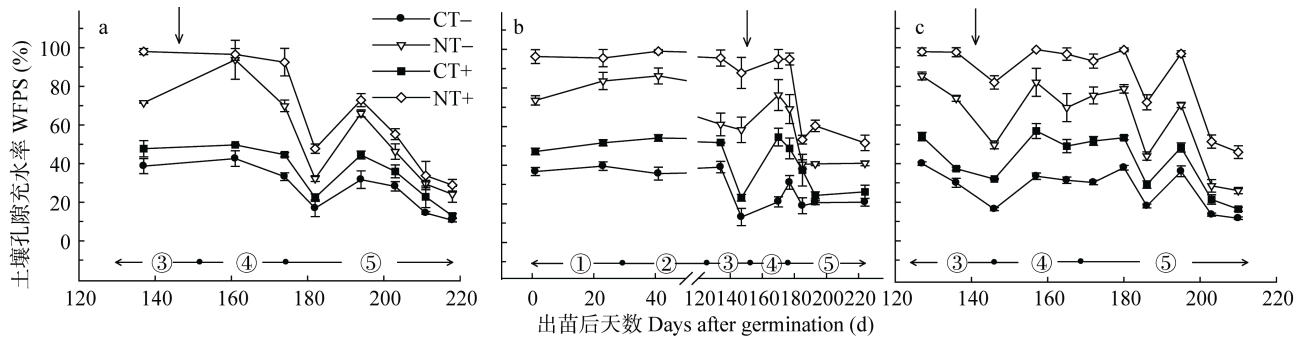


图 4 2010—2011 年度(a)、2012—2013 年度(b)和 2013—2014 年度(c)不同耕作措施下小麦生长季土壤孔隙充水率的动态变化
Fig. 4 Dynamic changes of water filled pore space (WFPS) of soil during wheat growing seasons in 2010–2011 (a), 2012–2013 (b) and 2013–2014 (c) under different treatments

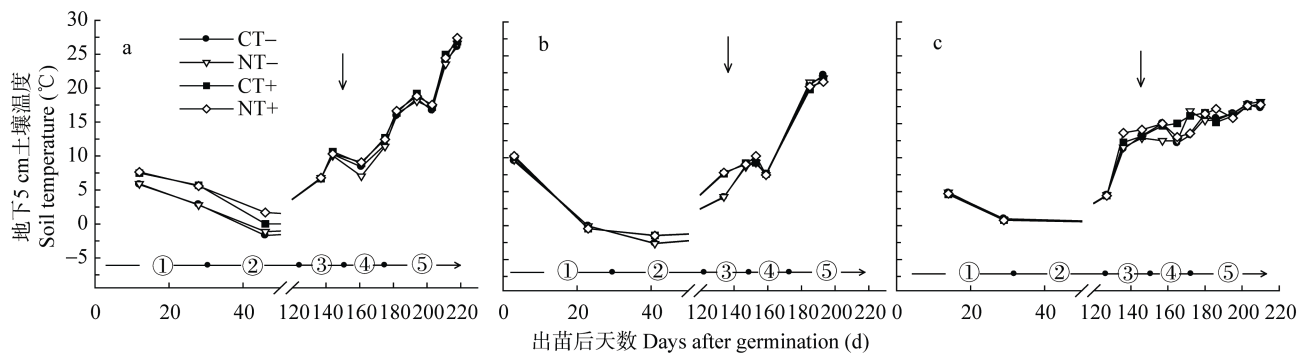


图 5 2010—2011 年度(a)、2012—2013 年度(b)和 2013—2014 年度(c)不同耕作措施下小麦生长季地下 5 cm 土壤温度
Fig. 5 Dynamic changes of 5 cm soil temperature during wheat growing seasons in 2010–2011 (a), 2012–2013 (b) and 2013–2014 (c) under different treatments

2.3.2 土壤溶解性有机氮(DON)与 NO₃-N 含量

3 个年度中各处理下土壤溶解性有机氮(DON)含量的季节变化动态如图 6 所示。小麦返青—拔节期土壤 DON 含量先升高后下降; 拔节期施肥灌水后土壤 DON 含量先下降后升高, 于抽穗期达到高峰; 而后含量逐渐下降。2010—2011 年度和 2012—2013 年度灌浆—成熟期土壤 DON 含量升高, 而 2013—2014 年度含量变化平缓。平均 3 个小麦生长季来看, 不同耕作措施下土壤 DON 平均含量表现为 NT+显

著高于 CT+($P=0.03$), CT+显著高于 NT-和 CT- ($P<0.05$); 无论是常规耕作还是免耕, 秸秆还田均显著高于不还田; 在秸秆还田条件下, 免耕明显高于常规耕作, 无秸秆还田条件下, 免耕和常规耕作间没有显著差异。相关分析显示, 土壤 DON 含量与表层土壤 N₂O 排放通量间呈显著的负相关关系($R=-0.47\sim-0.42$, $P<0.05$)。

2010—2011 年度和 2013—2014 年度小麦季土壤 NO₃-N 含量变化如图 7 所示。小麦返青期后

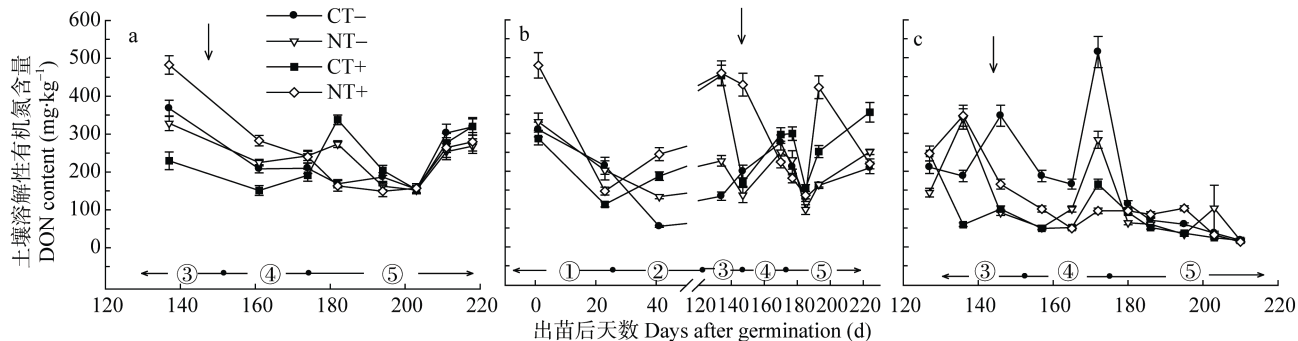


图 6 2010—2011 年度(a)、2012—2013 年度(b)和 2013—2014 年度(c)不同耕作措施下小麦生长季土壤溶解性有机氮含量的动态变化

Fig. 6 Dynamic changes of soil dissolved organic nitrogen (DON) contents during wheat growing seasons in 2010–2011 (a), 2012–2013 (b) and 2013–2014 (c) under different treatments

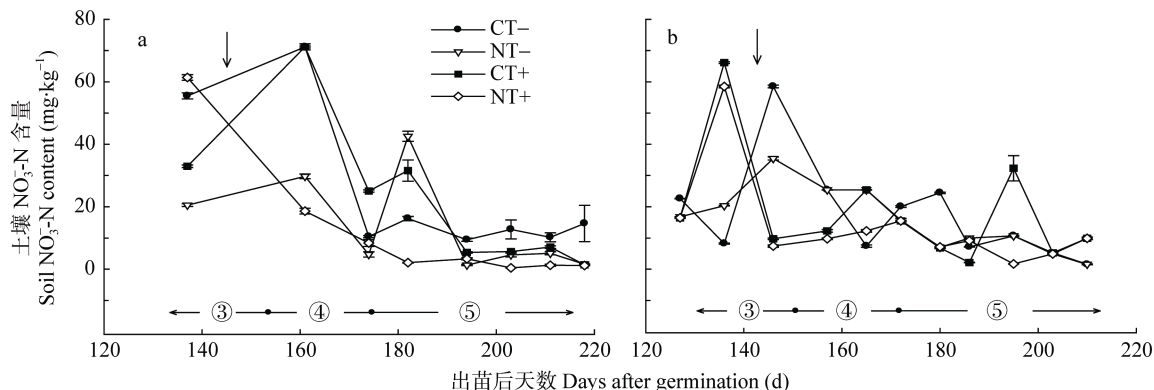


图 7 2010—2011 年度(a)和 2013—2014 年度(b)不同耕作措施下小麦生长季土壤硝态氮含量的动态变化

Fig. 7 Dynamic changes of soil NO₃-N contents during wheat growing seasons in 2010–2011 (a) and 2013–2014 (b) under different treatments

NO₃-N 含量 NT+处理呈下降趋势, 其他 3 种处理 NO₃-N 含量增加; 拔节期追施尿素和灌水后土壤 NO₃-N 含量较高, 开花-成熟期土壤 NO₃-N 含量在较低水平上小幅度波动。不同耕作措施下土壤 NO₃-N 平均含量表现为常规耕作处理(CT-, CT+) 显著高于免耕处理(NT-, NT+, $P < 0.05$), 无论秸秆还田还是不还田, 常规耕作土壤硝态氮含量均明显高于免耕土壤; 秸秆还田与无秸秆还田间差异不显著。相关分析显示, 土壤中 NO₃-N 含量与 N₂O 排放通量间相关关系不显著($P > 0.05$)。

2.4 小麦生育期土壤 N₂O 累积排放量与农学效率

2.4.1 N₂O 累积排放量

3 个年度冬小麦生长季 N₂O 累积排放量如表 1

表 1 不同年度不同耕作措施下小麦生长季土壤 N₂O 累积排放量

Table 1 Soil cumulative N₂O emissions during wheat growing seasons in different years under different treatments

处理 Treatment	年度 Year			平均值 Average
	2010—2011	2012—2013	2013—2014	
CT+	3.55±0.09a	2.67±0.09b	5.39±0.07a	3.90a
NT+	2.85±0.02b	3.29±0.10a	5.25±0.37ab	3.79a
CT-	2.92±0.07b	2.56±0.07c	3.78±0.09b	3.09b
NT-	2.03±0.05c	1.67±0.08d	2.60±0.10c	2.17c

同年度同列不同字母表示不同处理间 5%水平上差异显著。下同。Values in the same column with different letters are significantly different ($P < 0.05$). The same below.

表 2 不同年度不同耕作措施下小麦籽粒产量、地上部氮吸收量和氮肥偏生产力

Table 2 Grain yield, total shoot N uptake and partial factor productivity from applied N (PFP_N) of winter wheat in different years under different treatments

年度 Year	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield (t·hm ⁻²)	地上部氮吸收量 Shoot N uptake [kg(N)·hm ⁻²]	氮肥偏生产力 PFP _N (kg·kg ⁻¹)
2010—2011	CT+	10.78±1.30a	251.25±25.18a	34.53±4.17a
	CT-	10.05±0.83a	268.14±23.09a	32.19±2.67a
	NT-	9.89±1.21a	258.67±30.21a	31.66±3.87a
	NT+	9.66±0.32a	227.43±8.46a	30.93±1.03a
2012—2013	CT+	7.53±0.13a	226.56±3.33a	24.10±0.40a
	CT-	6.95±0.08b	235.09±4.61a	22.24±0.26b
	NT-	6.93±0.35b	229.83±6.51a	22.20±1.11b
	NT+	6.45±0.29b	179.00±11.17b	20.66±0.93b
2013—2014	CT+	8.05±0.27a	194.90±6.02ab	22.92±0.87a
	CT-	7.47±0.27bc	201.61±6.26a	23.91±0.87bc
	NT-	7.04±0.13c	184.87±4.67bc	25.79±0.42c
	NT+	7.64±0.21ab	175.57±9.99c	24.46±0.69ab
平均值 Average	CT+	8.79a	224.24a	28.14a
	CT-	8.15a	234.95a	26.12a
	NT-	8.12a	224.32a	25.99a
	NT+	7.92a	194.00a	25.35a

所示。NT+, CT+显著高于 CT-和 NT-, NT-显著低于其他 3 种处理($P < 0.05$)。3 个年度 NT-较 CT-减排幅度依次为 30.48%、34.77%和 31.22%。3 个小麦生长季内, 无论是常规耕作还是免耕, 秸秆还田较不还田均显著增加 N₂O 排放量; 在无秸秆还田条件下, 常规耕作较免耕均显著增加 N₂O 排放量; 在秸秆还田条件下, 与免耕相比, 常规耕作对 N₂O 排放量的影响在 3 个小麦生长季内表现不同, 2010—2011 年度显著增加了 N₂O 排放, 2012—2013 年度表现为降低效应, 而在 2013—2014 年度两者之间没有明显差异。3 年综合来看秸秆还田条件下常规耕作和免耕间差异未达显著水平。

2.4.2 小麦产量和地上部氮吸收量

3 个年度内 CT+较 CT-均增加了小麦籽粒产量(表 2), 后两个年度增产效应显著($P < 0.05$); NT+, NT-与 CT-之间无显著差异($P > 0.05$), 3 个年度 NT-仅比 CT-减产 1.59%、0.29%和 5.72%。无论秸秆还田与否, 常规耕作较免耕均提高了小麦籽粒产量; 常规耕作措施下, 秸秆还田对冬小麦具有增产效果。2012—2013 年度和 2013—2014 年度生长季内小麦地上部氮吸收量在 CT-, NT-和 CT+之间无显著差异($P > 0.05$), 但均显著高于 NT+处理。综合 3 年来看, 秸秆还田与不还田条件下, 常规耕作措施小麦地上部氮吸收量均高于免耕措施; 与秸秆不还田相比, 无论在常规耕作还是免耕条件下, 秸秆还田均降低了小麦地上部氮吸收量, 差异均不显著(表 2)。

小麦季不同处理下氮肥偏生产力(PFP_N)在 3 个年度中的变化范围依次为 26.66~37.92 kg·kg⁻¹、19.76~24.54 kg·kg⁻¹ 和 22.03~26.64 kg·kg⁻¹。和免耕措施相比,常规耕作在秸秆还田条件下提高了小麦 PFP_N, 秸秆不还田条件下增加效果不明显;在常规耕作措施下,秸秆还田较不还田增加小麦 PFP_N 幅度为 7.73%;在免耕措施下,秸秆还田较不还田降低小麦 PFP_N 的幅度为 2.52%。

2.4.3 土壤 N₂O 排放的农学效率

3 个年度不同处理间单位籽粒产量 N₂O 排放量如表 3 所示。3 个年度 NT-处理均显著低于其他 3 种处理,表现出对土壤 N₂O 明显的减排效应;

CT+处理下单位籽粒产量 N₂O 排放量高于 CT-, 但仅 2013—2014 年度达显著水平; NT+处理下单位籽粒产量 N₂O 排放量高于 CT-, 并于 2012—2013 年度和 2013—2014 年度差异显著。综合 3 年均值来看,在无秸秆还田条件下,免耕较常规耕作显著降低了单位籽粒产量 N₂O 排放量;秸秆还田条件下,免耕和常规耕作措施间没有明显差异 ($P>0.05$)。在常规耕作措施下,秸秆还田增加了单位籽粒产量 N₂O 排放量,并于 2013—2014 年度达到显著水平;在免耕措施下,3 个小麦生长季内秸秆还田对单位籽粒产量 N₂O 排放量均具有显著的增加效应。

表 3 不同年度不同耕作措施下小麦单位籽粒产量 N₂O 排放量、单位地上部氮吸收量 N₂O 排放量、氮肥排放 N₂O 系数
Table 3 N₂O emissions per unit grain yield and shoot N uptake and nitrogen fertilizer-induced emissions factor (FIEF_N) of winter wheat in different years under different treatments

年度 Year	处理 Treatment	单位籽粒产量 N ₂ O 排放量 N ₂ O emission per unit grain yield [g(N ₂ O-N)·kg ⁻¹]	单位地上部氮吸收量 N ₂ O 排放量 N ₂ O emission per unit shoot N uptake [g(N ₂ O-N)·kg ⁻¹ (N)]	氮肥排放 N ₂ O 系数 FIEF _N (%)
2010—2011	CT+	0.33±0.04a	14.28±1.45a	1.14±0.03a
	CT-	0.29±0.02a	10.59±0.67b	0.93±0.02b
	NT+	0.29±0.01a	12.52±0.38ab	0.91±0.01b
	NT-	0.21±0.03b	7.95±1.04c	0.65±0.02c
2012—2013	NT+	0.51±0.01a	18.42±0.60a	1.05±0.03a
	CT+	0.37±0.01b	12.20±0.05b	0.88±0.03b
	CT-	0.37±0.01b	10.89±0.45c	0.82±0.02c
	NT-	0.24±0.01c	7.28±0.20d	0.54±0.03d
2013—2014	NT+	0.69±0.03a	29.86±0.66a	1.68±0.12ab
	CT+	0.67±0.03a	27.69±1.14b	1.73±0.02a
	CT-	0.51±0.03b	18.80±0.96c	1.21±0.03b
	NT-	0.37±0.02c	14.07±0.53d	0.83±0.03c
平均值 Average	NT+	0.50a	20.27a	1.21a
	CT+	0.46ab	18.06ab	1.25a
	CT-	0.39ab	13.54ab	0.99b
	NT-	0.28b	10.11b	0.69c

CT-、NT-、CT+和 NT+处理下小麦植株每吸收 1 kg 的氮土壤排放的 N₂O 量如表 3 所示。3 个小麦生长季内 NT-处理下单位地上部氮吸收量 N₂O 排放量均显著低于其他 3 个处理 ($P<0.05$), 其中较 CT-分别减少 24.93%、33.15%和 25.16%; CT+和 NT+较 CT-均显著增加了单位地上部氮吸收量 N₂O 排放量 ($P<0.05$), 3 个年度内增加幅度依次为 34.84%和 18.22%、12.03%和 69.15%、47.29%和 58.83%。3 个小麦生长季内,无秸秆还田条件下,免耕较常规耕作显著减少了单位地上部氮吸收量 N₂O 排放量; 2012—2013 年度和 2013—2014 年度小麦生长季内,在秸秆还田条件下,常规耕作较免耕显著减少了单位地上部氮吸收量 N₂O 排放量。3 个小麦

生长季内,无论是常规耕作还是免耕措施下,秸秆还田均明显增加了单位地上部氮吸收量 N₂O 排放量 ($P<0.05$)。

不同处理下小麦季氮肥排放 N₂O 系数(FIEF_N)如表 3 所示。NT-处理显著低于其他 3 种处理 ($P<0.05$), 无论秸秆还田与否,免耕措施下 FIEF_N 均低于常规耕作,并于秸秆不还田条件下降低效应显著(3 年平均降低 30.3%); 无论是常规耕作还是免耕,秸秆还田的 FIEF_N 均显著高于不还田,免耕措施下 3 年平均提高 75.4%。

3 讨论与结论

与常规耕作相比,免耕对土壤 N₂O 排放的影响

不同研究者得到的结论有所不同。Oorts 等^[19]在法国北部石灰性褐土上进行的连续 32 年的定位试验研究指出, 秸秆还田条件下免耕土壤会比常规耕作排放更多的 N₂O, 主要是免耕措施下较强的硝化作用引起的。江波等^[15]对圩区冬小麦-水稻轮作系统中小麦季进行了研究, 秸秆还田翻耕土壤 N₂O 的排放量是秸秆还田免耕土壤的 1.71 倍, 原因可能是免耕措施下所施化肥暴露在土壤表面, 短时间内大量挥发, 土壤微生物进行硝化反硝化作用的底物减少。黄光辉等^[20]在华北平原潮褐土的研究表明, 玉米秸秆还田后免耕土壤较高的 C/N 可能有效降低了 N₂O 的排放, 使得小麦季土壤 N₂O 累积排放量明显低于常规耕作措施。蔡延江等^[21]在华北平原潮土的研究显示, 秸秆不还田条件下玉米季土壤 N₂O 累积排放量免耕高于常规耕作, 但差异不显著。本研究结果表明常规耕作土壤 N₂O 排放量高于免耕土壤, 在秸秆还田条件下差异不显著, 秸秆不还田条件下差异达到显著水平。这主要是由于相比免耕措施, 常规耕作增加了对土壤的扰动, 改变了土壤微环境, 农田土壤的透水透气性较好, 促使厌氧环境向好氧环境转变, 增加了硝化作用产生的 N₂O 量, 同时有利于土壤气体的迁移和扩散; 另外, 耕作还可以改变土壤中营养物质的空间分布, 将土壤有机碳、硝态氮和铵态氮从深层土壤向表层土壤迁移, 土壤的干湿交替加剧, 进而促进了土壤中 N₂O 的排放^[22]。Cui 等^[8]对华北平原冬小麦-夏玉米农田土壤进行了研究, 结果表明秸秆还田能够增加土壤 N₂O 的排放量; Liu 等^[23]在华北平原的研究也发现秸秆还田较不还田明显增加了 N₂O 的排放, 分析原因主要是还田秸秆调节了土壤 C/N, 改善了土壤理化性状, 同时秸秆还田土壤较无秸秆还田土壤温度稍高, 促进了 N₂O 的产生。本研究结果与之一致, 无论在常规耕作还是免耕措施下, 秸秆还田土壤 N₂O 排放量均显著高于无秸秆还田土壤。可能是因为秸秆还田后, 土壤中有有机碳含量增加, 土壤硝化、反硝化作用所需的碳源得到补充, 反应速率加快^[8]; 同时, 秸秆还田较不还田增加了土壤孔隙充水率, 增强了土壤中氮素的可利用性, 进而增加了 N₂O 的排放量。

Wei 等^[24]于陕西省丘陵区进行的肥料长期定位试验的测定显示, 0~120 kg(N)·hm⁻² 的施肥水平下, 小麦季单位籽粒产量 N₂O 排放量为 1.0~2.5 g(N)·kg⁻¹, 单位地上部氮吸收量 N₂O 排放量为 35.6~96.0 g·kg⁻¹; 还有研究报道显示在 146 kg(N)·hm⁻² 的施肥水平下, 玉米季单位籽粒产量 N₂O 排放量范围为 0.05~

0.12 g(N)·kg⁻¹, 单位地上部氮吸收量 N₂O 排放量范围为 2.0~7.0 g·kg⁻¹^[14]; 在华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系中的研究指出, 氮肥施用量为 0~600 kg(N)·hm⁻² 范围内全年单位籽粒产量 N₂O 的排放量为 0.16~0.46 g(N)·kg⁻¹, 单位地上部氮吸收量 N₂O 排放量为 5.0~16.0 g·kg⁻¹^[25]; 另有研究测定显示, 在施肥量为 360~430 kg(N)·hm⁻² 范围内冬小麦/夏玉米一年两熟农田年度单位籽粒产量 N₂O 排放量为 0.56~0.66 g(N)·kg⁻¹^[20]。本研究中小麦季氮肥施用量为 310 kg(N)·hm⁻², 2010—2011 年度、2012—2013 年度和 2013—2014 年度对应单位籽粒产量 N₂O 排放量为 0.21~0.33 g(N)·kg⁻¹、0.24~0.51 g(N)·kg⁻¹ 和 0.37~0.39 g(N)·kg⁻¹, 高于 Venterea 等^[14]的研究结果, 低于 Wei 等^[24]的测定结果, 与 Qin 等^[25]的研究相近。3 个小麦季单位地上部氮吸收量 N₂O 排放量范围依次为 7.95~14.28 g·kg⁻¹、7.28~18.42 g·kg⁻¹ 和 14.07~29.86 g·kg⁻¹, 高于 Venterea 等^[14]的研究报道, 低于 Wei 等^[24]的测定结果, 与 Qin 等^[25]的研究相近。研究间的差异可能与不同施肥条件下不同作物产量水平及对氮素的利用效率不同有关^[11]。因此需要对 N₂O 排放的农学效率进行深入研究。对 3 个小麦生长季内氮肥偏生产力(PFP_N)与单位籽粒产量 N₂O 排放量间的相关关系进行分析, 两者呈显著线性负相关关系($R=-0.42$, $P=0.012$), 这和 Van-Groenigen 等^[11-12, 25]的研究结论一致, 即氮素利用率越高, 农学效率尺度 N₂O 排放量越低, NT-处理下 PFP_N 较高, 农田产出单位籽粒产量的同时土壤所排放的 N₂O 量最低, 在农业生产实践中有一定的指导意义。

不同耕作措施下, 华北平原小麦生长期表层土壤 N₂O 排放通量在 13.21~224.77 μg(N₂O-N)·m⁻²·h⁻¹ 范围内变化, 且相关分析显示其与地下 5 cm 土壤温度、土壤孔隙充水率(WFPS)之间呈显著正相关关系, 与土壤溶解性有机氮(DON)含量间呈显著的负相关关系。小麦生长期, 单位面积土壤 N₂O 累积排放量为 2.17~3.90 kg(N₂O-N)·hm⁻², 每生产 1 kg 小麦籽粒表层土壤 N₂O 排放量为 0.18~0.73 g(N₂O-N)·kg⁻¹, 每投入 1 kg 氮素表层土壤 N₂O 排放量为 5.1~18.0 g(N₂O-N)·kg⁻¹, 用单位面积、单位籽粒产量、单位氮肥投入量度量土壤 N₂O 排放量, 均为常规耕作秸秆还田土壤 N₂O 排放量最高, 免耕无秸秆还田土壤 N₂O 排放量最低, 处理间呈显著差异。免耕作为我国将来的一种替代耕作措施, 在华北平原农业生产实践中可降低农田土壤 N₂O 排放。

参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2014: The physical science basis of climate change, contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[RB/OL]. 2014. <http://www.ipcc.ch/>
- [2] Lal R, Lenka N. Soil aggregation and greenhouse gas flux after 15 years of wheat straw and fertilizer management in a no-till system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 126: 78–89
- [3] Munkholm-Lars J, Petersen-Björn M, Petersen-Søren O, et al. Nitrous oxide emissions and controls as influenced by tillage and crop residue management strategy[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10): 1701–1711
- [4] Ball B, Horgan G, Crichton I, et al. Dynamics of upward and downward N₂O and CO₂ fluxes in ploughed or no-tilled soils in relation to water-filled pore space, compaction and crop presence[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 101(1/2): 20–30
- [5] 姚志生, 郑循华, 周再兴, 等. 太湖地区冬小麦田与蔬菜地 N₂O 排放对比观测研究[J]. *气候与环境研究*, 2007, 11(6): 691–701
Yao Z S, Zheng X H, Zhou Z X, et al. Nitrous oxide emission from winter wheat and vegetable fields in the Taihu region: A comparison case study[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2007, 11(6): 691–701
- [6] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体 (CO₂、CH₄、N₂O) 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
Zhang Y M, Hu C S, Zhang J B, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO₂, CH₄ and N₂O in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 966–975
- [7] 汪婧, 蔡立群, 张仁陟, 等. 耕作措施对温带半干旱地区土壤温室气体 (CO₂、CH₄、N₂O) 通量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(6): 1295–1300
Wang J, Cai L Q, Zhang R Z, et al. Effect of tillage pattern on soil greenhouse gases (CO₂, CH₄ and N₂O) fluxes in semi-arid temperate regions[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(6): 1295–1300
- [8] Cui F, Yan G X, Zhou Z X, et al. Annual emissions of nitrous oxide and nitric oxide from a wheat-maize cropping system on a silt loam calcareous soil in the North China Plain[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 48: 10–19
- [9] 马二登, 马静, 徐华, 等. 稻秆还田方式对麦田 N₂O 排放的影响[J]. *土壤*, 2007, 39(6): 870–873
Ma E D, Ma J, Xu H, et al. Effects of rice straw returning methods on N₂O emissions from wheat-growing season[J]. *Soils*, 2007, 39(6): 870–873
- [10] 胡春胜, 董文旭, 张玉铭, 等. 华北山前平原农田生态系统氮通量与调控[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(5): 997–1003
Hu C S, Dong W X, Zhang Y M, et al. Nitrogen flux and its manipulation in the cropland ecosystem of the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(5): 997–1003
- [11] Van-Groenigen J W, Velthof G L, Oenema O, et al. Towards an agronomic assessment of N₂O emissions: A case study for arable crops[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61(6): 903–913
- [12] Linquist B, Van-Groenigen K, Adviento-Borbe M, et al. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 194–209
- [13] Almaraz J, Mabood F, Zhou X M, et al. Carbon dioxide and nitrous oxide fluxes in corn grown under two tillage systems in southwestern Quebec[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(1): 113–119
- [14] Venterea R, Maharjan B, Dolan M. Fertilizer source and tillage effects on yield-scaled nitrous oxide emissions in a corn cropping system[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40(5): 1521–1531
- [15] 江波, 杨书运, 马友华, 等. 耕作方式对圩区冬小麦温室气体排放通量的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2014, 41(2): 241–247
Jiang B, Yang S Y, Ma Y H, et al. Effects on emission of greenhouse gas by different tillage treatments to winter wheat in polder areas[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2014, 41(2): 241–247
- [16] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(5): 842–844
- [17] 汤洁, 韩源, 刘森, 等. 吉林西部不同土地利用方式下的生长季土壤 CO₂ 排放通量日变化及影响因素[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(1): 33–37
Tang J, Han Y, Liu S, et al. Diurnal variation of soil CO₂ fluxes and factors in different land use types during growing season in western Jilin Province[J]. *Ecology and Environment*, 2012, 21(1): 33–37
- [18] Yan D Z, Wang D J, Sun R J, et al. N mineralization as affected by long-term N fertilization and its relationship with crop N uptake[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(1): 125–130
- [19] Oorts K, Merckx R, Grehan E, et al. Determinants of annual fluxes of CO₂ and N₂O in long-term no-tillage and conventional tillage systems in northern France[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 95(1): 133–148
- [20] 黄光辉, 张明园, 陈卓, 等. 耕作措施对华北地区冬小麦田 N₂O 排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 167–173
Huang G H, Zhang M Y, Chen F, et al. Influences of tillage methods on N₂O emission from winter wheat field in North China Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2): 167–173
- [21] 蔡廷江, 丁维新, 朱安宁, 等. 免耕对华北平原潮土 N₂O 和 CO₂ 排放的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(5): 1–6
Cai Y J, Ding W X, Zhu A N, et al. Effects of non-tillage on N₂O and CO₂ emissions from sandy loam soil in the North China Plain[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(5): 1–6
- [22] 徐文彬, 刘维屏, 刘广深. 应用 DNDC 模型分析施肥和翻耕方式变化对旱田土壤 N₂O 释放的潜在影响[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(6): 918–922
Xu W B, Liu W P, Liu G S. Potential effect of fertilising and tilling on N₂O emission from upland soils analyzed by DNDC model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(6): 918–922
- [23] Liu C Y, Wang K, Meng S X, et al. Effects of irrigation, fertilization and crop straw management on nitrous oxide and nitric oxide emissions from a wheat-maize rotation field in northern China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 140: 226–233
- [24] Wei X R, Hao M D, Xue X H, et al. Nitrous oxide emission from highland winter wheat field after long-term fertilization[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7: 3301–3310
- [25] 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