中国生态农业学报 2018 年 2 月 第 26 卷 第 2 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Feb. 2018, 26(2): 203−213

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.171158

肖乾颖, 黄有胜, 胡廷旭, 朱波. 施肥方式对紫色土农田生态系统 N_2O 和 NO 排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 203−213
XIAO Q Y, HUANG Y S, HU T X, ZHU B. Effects of fertilization regimes on N_2O and NO emissions from agro-ecosystems of purplish soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(2): 203−213

施肥方式对紫色土农田生态系统 N_2O 和 NO 排放的影响*

肖乾颖[1,2], 黄有胜[3], 胡廷旭[1,2], 朱 波[1**]

(1. 中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室/中国科学院成都山地灾害与环境研究所 成都 610041; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 四川省农业机械化干部学校 成都 610017)

摘 要: 依托紫色土施肥方式与养分循环长期试验平台(2002 年一), 采用静态箱-气相色谱法开展紫色土冬小麦-夏玉米轮作周期(2013 年 10 月至 2014 年 10 月)农田生态系统 N_2O 和 NO 排放的野外原位观测试验。长期施肥方式包括单施氮肥(N)、传统猪厩肥(OM)、常规氮磷钾肥(NPK)、猪厩肥配施氮磷钾肥(OMNPK)和秸秆还田配施氮磷钾肥(RSDNPK)等 5 种, 氮肥用量相同[小麦季 130 kg(N)·hm^{-2},玉米季 150 kg(N)·hm^{-2}], 不施肥对照(CK)用于计算排放系数, 对比不同施肥方式对紫色土典型农田生态系统土壤 N_2O 和 NO 排放的影响, 以期探寻紫色土农田生态系统 N_2O 和 NO 协同减排的施肥方式。结果表明, 所有施肥方式下紫色土 N_2O 和 NO 排放速率波动幅度大, 且均在施肥初期出现峰值; 强降雨激发 N_2O 排放, 但对 NO 排放无明显影响。在整个小麦-玉米轮作周期, N、OM、NPK、OMNPK 和 RSDNPK 处理的 N_2O 年累积排放量分别为 1.40 kg(N)·hm^{-2}、4.60 kg(N)·hm^{-2}、0.95 kg(N)·hm^{-2}、2.16 kg(N)·hm^{-2} 和 1.41 kg(N)·hm^{-2}, 排放系数分别为 0.41%、1.56%、0.25%、0.69%、0.42%; NO 累积排放量分别为 0.57 kg(N)·hm^{-2}、0.40 kg(N)·hm^{-2}、0.39 kg(N)·hm^{-2}、0.46 kg(N)·hm^{-2} 和 0.17 kg(N)·hm^{-2}, 排放系数分别为 0.21%、0.15%、0.15%、0.17%、0.07%。施肥方式对紫色土 N_2O 和 NO 累积排放量具有显著影响($P<0.05$), 与 NPK 处理比较, OM 和 OMNPK 处理的 N_2O 排放分别增加 384%和 127%, 同时 NO 排放分别增加 3%和 18%; RSDNPK 处理的 NO 排放减少 56%。表明长期施用猪厩肥显著增加 N_2O 和 NO 排放, 而秸秆还田有效减少 NO 排放。研究表明, 土壤温度和水分条件均显著影响小麦季 N_2O 和 NO 排放($P<0.01$), 对玉米季 N_2O 和 NO 排放没有显著影响($P>0.05$), 土壤无机氮含量则是在小麦-玉米轮作期 N_2O 和 NO 排放的主要限制因子($P<0.01$)。全量秸秆还田与化肥配合施用是紫色土农田生态系统 N_2O 和 NO 协同减排的优化施肥方式。

关键词: 施肥方式; 紫色土; N_2O; NO; 排放量; 排放系数
中图分类号: S145.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)02-0203-11

Effects of fertilization regimes on N_2O and NO emissions from agro-ecosystem of purplish soil*

XIAO Qianying[1,2], HUANG Yousheng[3], HU Tingxu[1,2], ZHU Bo[1**]

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Chinese Academy of Sciences / Institute of Mountain

* 国家自然科学基金项目(41330744, 41271321)和国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB417101)资助
** 通信作者: 朱波, 主要研究方向为土壤养分循环及面源污染控制。E-mail: bzhu@imde.ac.cn
肖乾颖, 主要研究方向为土壤氮素循环。E-mail: qianying_xiao@126.com
收稿日期: 2017-12-12 接受日期: 2017-12-18
* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41330744 and 41271321) and the National Basic Research Program of China (973 Program) (2012CB417101).
** Corresponding author, E-mail: bzhu@imde.ac.cn
Received Dec. 12, 2017; accepted Dec. 18, 2017

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Sichuan Provincial College for Engineer of Agri-mechanization, Chengdu 610017, China)

Abstract: Nitrous oxide (N_2O) and nitric oxide (NO) emissions from agro-ecosystem of purplish soil were measured (starting from October 2003) in a long-term purplish soil fertilization platform (established in 2002) using closed static-chamber and gas chromatography systems. Single synthetic nitrogen fertilizer (N), pig manure (OM), regular synthetic nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer (NPK), pig manure combined with synthetic NPK fertilizer (OMNPK) and returned crop residues combined with synthetic NPK fertilizer (RSDNPK) under the same total nitrogen rate were set, and N_2O and NO emissions from croplands of purplish soil were monitored under these fertilization regimes. No fertilizer treatment (CK) was used as control in the calculations of the emission coefficients. The results showed large fluctuations in emission rates of N_2O and NO, with N_2O and NO peak emissions at the early stage of fertilization. N_2O emission was enhanced by heavy rainfall, but rainfall had no significant effect on NO emission. For the whole wheat-maize rotation period, cumulative annual emissions of N_2O in N, OM, NPK, OMNPK and RSDNPK treatments were 1.40, 4.60, 0.95, 2.16 and 1.41 kg(N)·hm^{-2}; and with emission coefficients of 0.41%, 1.56%, 0.25%, 0.69% and 0.42%, respectively. The cumulative emissions of NO in N, OM, NPK, OMNPK and RSDNPK treatments were 0.57, 0.40, 0.39, 0.46 and 0.17 kg(N)·hm^{-2}; and with emission coefficients of 0.21%, 0.15%, 0.15%, 0.17% and 0.07%, respectively. Fertilizer application regimes significantly ($P < 0.05$) influenced cumulative N_2O and NO emissions. Compared with conventional NPK fertilizer, pig manure amendment stimulated N_2O and NO emissions, with increases of 384% and 3% for OM and 127% and 18% for OMNPK, respectively. Returned crop residues combined with regular synthetic NPK fertilizer decreased NO emission by 56%. The application of pig manure (OM) increased N_2O and NO emissions, whereas returned crop residues plus regular synthetic NPK fertilizer (RSDNPK) decreased NO emission. The research also showed that both soil temperature and moisture conditions significantly influenced N_2O and NO emissions during wheat season ($P < 0.01$), but not during maize season ($P > 0.05$). However, soil inorganic nitrogen content was the main limiting factor for N_2O and NO emissions during the whole wheat-maize rotation year ($P < 0.01$). Returned crop residues plus regular NPK fertilizer was recommended as the optimal fertilization regime for simultaneous mitigation of N_2O and NO emissions.

Keywords: Fertilization regime; Purplish soil; N_2O; NO; Emission flux; Emission coefficient

N_2O 和 NO 是大气中的重要痕量气体，对大气环境有重要影响[1]。N_2O 是主要温室气体之一，影响着地球气候的辐射强迫[2]；且作为大气平流层中最重要的含氮化合物，N_2O 会催化分解平流层臭氧[3]，破坏臭氧层；N_2O 还能直接产生温室效应，其百年尺度上的增温潜势能达 CO_2 的 298 倍和 CH_4 的 12 倍[4]。NO 在大气中发生光化学反应导致臭氧的形成[5]，从而影响人类健康与植被生长[6]。NO 在对流层发生光化学反应影响 O_3 的产生，从而间接产生温室效应[7]。农田 N_2O 的排放主要受土壤氮素水平的驱使[8]。研究指出[9]，由于农田施肥量逐渐增加，到 2030 年全球土壤 N_2O 的排放量将增加 35%~60%。与 N_2O 的研究类似，NO 的排放量也随氮肥施用量增加而增多[10]。我国氮肥用量大约占全球用量的 30%以上[6]，合理施肥可有效减少因氮肥施用所致的土壤 N_2O 的排放[11]。

农田土壤是 N_2O 和 NO 排放的主要源[4,12]，中国农田土壤每年向大气排放的 N_2O 和 NO 的排放量分别达 3.3 Tg 和 1.4 Tg[10]。N_2O 和 NO 由土壤中的硝化和反硝化过程产生[13]，其中 N_2O 主要来源于铵态氮促使发生的反硝化过程[14]，NO 主要来源于自养和异养硝化细菌参与的硝化过程[15]。农田管理措施能够影响土壤硝化与反硝化过程，从而调控土壤 N_2O 和 NO 排放[16]。氮肥施用是导致农田土壤 N_2O 和 NO 排放的主要原因[17]。可见，减少或控制 N_2O 和 NO 排放及缓解全球变暖，需查明氮肥施用方式和施用量等对土壤 N_2O 和 NO 排放的影响。氮肥用量对 N_2O 的影响已有大量的研究报道，而施肥方式的影响颇有争议，施用有机肥和秸秆还田的影响是当前研究热点。在红壤地区，施用有机肥虽然能增加作物产量，但会显著增加农田土壤 N_2O 的排放[18]，化肥配合有机肥施用，N_2O 的排放通量大于常规化肥处理[19-20]。另有研究[21-23]表明，等氮量施肥下，化肥处理的 N_2O 排放通量显著高于有机肥处理。Das 等[24]发现在热带水稻田中，家禽粪肥配施无机氮肥处理会增大 N_2O 排放通量。而等氮量施肥条件下，施用未经处理的猪粪能够减缓 N_2O 和 NO 的排放[25]。此外，还有研究[26]表明，在华中北部小麦季玉米秆还田对农田 N_2O 和 NO 的排放没有显著影响，玉米季小麦秸秆还田却会明显增加农田 N_2O 和 NO 的排放。但在长三角非水稻期，秸秆还田显著减少 N_2O 的累积排放的同时对 NO 排放没有显著影响[27]。而且由于地区差异，气候条件、种植体系、土壤类型、土地利用方式等不同，N_2O 和 NO 排放量在不同地区存在

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

明显差别。可见, 施用有机肥和秸秆还田等方式对农田 N_2O 和 NO 排放的影响暂无定论, 而多种施肥方式下农田生态系统 N_2O 和 NO 排放的对比研究报道还不多见, 尚有待进一步探寻既可保证产量又能减少 N_2O 和 NO 排放的施肥方式。

总体而言, 目前国内关于农田生态系统 N_2O 和 NO 排放的研究报道主要集中在华北和华东地区, 而在西南紫色土地区的工作较少。本研究针对以上不足, 以四川盆地典型紫色土农田生态系统为对象, 依托紫色土施肥方式与养分循环长期试验平台, 对比不同施肥方式下冬小麦-夏玉米农田生态系统的 N_2O 和 NO 排放动态, 并分析 N_2O 和 NO 排放规律及其影响因素, 有助于筛选合理的减排施肥模式并探寻紫色土农田养分资源管理优化措施。

1　材料与方法

1.1　研究地概况

研究点位于中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站的施肥方式与养分循环长期试验平台(105°27′E, 31°16′N)。该研究点地处四川盆地中部丘陵区, 具有典型的亚热带湿润季风气候特征, 年平均温度为 17.3 ℃, 多年平均降雨量 836 mm, 无霜期 294 d。试验土壤类型为发育于侏罗系蓬莱镇组紫色页岩的石灰性紫色土, 表土(0~20 cm)土壤理化性质为: pH 8.2, 有机质 8.75 $g\cdot kg^{-1}$, 土壤容重 1.34 $g\cdot cm^{-3}$, 黏粒含量 22.3%, 粉粒含量 34.6%, 砂粒含量 43.1%, 全氮 0.81 $g\cdot kg^{-1}$, 全磷 0.84 $g\cdot kg^{-1}$, 全钾 18.01 $g\cdot kg^{-1}$, 碱解氮 42.29 $mg\cdot kg^{-1}$, 速效磷 9.02 $mg\cdot kg^{-1}$, 速效钾 86.35 $mg\cdot kg^{-1}$。

1.2　试验设计

田间试验地为紫色土施肥方式与养分循环长期试验场(2002 年—), 轮作作物为川中丘陵区具代表性的冬小麦(*Triticum aestivum*)和夏玉米(*Zea mays*), 试验共选取 6 种施肥处理: 单施氮肥(N)、猪厩肥(OM)、常规氮磷钾肥(NPK)、猪厩肥配施氮磷钾肥(OMNPK)、秸秆还田配施氮磷钾肥(RSDNPK)及对照不施肥(CK)。试验为完全随机区组设计, 每个处理设置 3 个重复。除 CK 处理外, 其余处理氮素施用总量保持一致以明确养分综合管理目标, NPK、OMNPK 和 RSDNPK 处理磷钾化肥施用量保持相同, 小麦季和玉米季施用氮素总量分别为 130 $kg(N)\cdot hm^{-2}$ 和 150 $kg(N)\cdot hm^{-2}$, 磷肥和钾肥施用量分别为 90 $kg(N)\cdot hm^{-2}$ 和 36 $kg(N)\cdot hm^{-2}$。有机-无机配施处理中, 无机化肥的供氮量为总施氮量的 60%, 猪厩肥和秸秆占 40%。试验中所使用化学氮肥为碳酸氢铵(纯 N17%), 磷肥为过磷酸钙(含 $P_2O_5$12%), 钾肥为氯化钾(含 K_2O 60%), 小麦季和玉米季新鲜猪粪全氮含量分别为 2 $g(N)\cdot kg^{-1}$(鲜重)和 3 $g(N)\cdot kg^{-1}$(鲜重), 还田施用的玉米秸秆(冬小麦季)和小麦秸秆(夏玉米季)含氮量分别为 8 $g(N)\cdot kg^{-1}$(干重)和 5 $g(N)\cdot kg^{-1}$(干重)。作物种植前人工耕作, 深度为 20 cm。施肥以底肥一次性施入, 冬小麦肥料采取撒施, 夏玉米采取穴施, 后期不再追肥。

1.3　气体采集与分析方法

N_2O 和 NO 气体样品采集包含 1 个完整的冬小麦-夏玉米轮作期, 小麦季观测期为 2013 年 10 月 28 日至 2014 年 5 月 15 日, 玉米季观测期为 2014 年 6 月 4 日至 2014 年 10 月 4 日。采用静态暗箱-气相色谱法对试验地进行 N_2O 排放采样, 采样从施肥后第 1 天开始, 第 1 周的采样频率为一天 1 次, 第 2 周的采样频率为隔一天采 1 次, 两周之后采样频率为每周两次, 降雨后连续加密采样 3 d。采用静态暗箱-气相色谱法观测 N_2O 和 NO 的排放通量。小麦季使用箱体尺寸为 500 mm×500 mm×200 mm×2.5 mm 的采样箱; 玉米季使用底座由外框(500 mm×400 mm×130 mm×2.5 mm)和内框(80 mm×80 mm×50 mm×2.5 mm)组成, 顶箱由两个 400 mm×250 mm×200 mm×2.5 mm 的箱体组成的采样箱, 底座埋深均为 20 cm。每个采样点于 9:00—11:00 采集气体, 共采集 5 个样品, 每个样品采集时间间隔为 7 min。采集的气样避光保存在 60 mL 医用注射器内, 24 h 内完成分析。每次采集气体的同时, 同步进行相关环境因子观测。测定土壤体积含水率、采样箱内气体温度和土壤温度(5 cm), 采集 0~10 cm 土壤样品分析土壤含水率、无机氮(NH_4^+-N、NO_3^--N)含量。使用气袋分别在 N_2O 采集前、后采集氮氧化物(NO)。

气体 N_2O 浓度分析使用 Agilent7890A 气相色谱仪(GC, 美国安捷伦公司), 气体 NO 用氮氧化物分析仪(Thermo-Model 42i)进行测定; 土壤含水率采用重量法测定, 土壤铵态氮和硝态氮含量采用 0.5 $mol\cdot L^{-1}$ K_2SO_4 浸提后, 利用 AA3 流动分析仪(德国 SEAL 公司)进行测定(水土比为 5∶1)。

1.4　数据计算与处理

根据标准气体和待测气体的峰面积计算待测气体中 N_2O(或 NO)的浓度, 通过气体 N_2O(或 NO)浓度随时间的变化计算单位面积的气体排放通量,计算公式为[28]:

$$F=\frac{M}{V_0}\cdot\frac{P}{P_0}\cdot\frac{T_0}{T}\cdot H\cdot\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}t}K \tag{1}$$

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中: F 为气体排放通量($\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$), M 为气体的摩尔质量($g \cdot mol^{-1}$), V_0 为标准状态下(温度 273 K, 气压 1 013 hPa)气体的摩尔体积(22.41×10^{-3} m^3), T_0 和 P_0 分别为标准状态下的气温(237 K)和气压(1 031 hPa), P 为采样点的气压(hPa), T 为采样时箱内的平均气温(K), dc/dt 为采样箱内 N_2O(或 NO)浓度变化速率, H 为采样箱的高度(cm), K 为量纲转换系数。

N_2O(或 NO)的累积排放量是根据作物生长期内 N_2O(或 NO)的排放速率, 将观测值和未观测日内插法计算值逐日累加后得到 N_2O(或 NO)的累积排放量。计算公式为[28]:

$$E = K\sum_{i+2}^{n+1}[X_{i-1} + t \cdot (X_{i-1} + X_i)/2] \quad (2)$$

式中: E 为 N_2O(或 NO)排放量[$kg(N) \cdot hm^{-2}$], K 为量纲换算系数, X_i 为第 i 天 N_2O(或 NO)的日排放通量值[$mg(N) \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$], 将小时排放通量($\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)乘以 24 h 转换成日排放通量, t 为相近两次日排放通量值之间间隔的天数(d), n 为轮作期内有效日排放通量观测值的天数。

N_2O(或 NO)排放系数利用公式(3)计算得到[28]:

$$F = \frac{T_N - T_{CK}}{T} \times 100 \quad (3)$$

式中: F 为 N_2O 或 NO 的排放系数(%), T_N 为施肥后 N_2O(或 NO)排放量[$kg(N) \cdot hm^{-2}$], T_{CK} 为对照不施氮肥的 N_2O(或 NO)排放量[$kg(N) \cdot hm^{-2}$], T 为氮肥施用量[$kg(N) \cdot hm^{-2}$]。

利用 Microsoft Excel 2007 进行数据汇总与计算, SPSS 22.0 进行相关性分析, Origin 9.0 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 试验期间降水量、土壤温度和土壤孔隙充水率变化

2013—2014 年小麦-玉米轮作周期降雨量为 798.4 mm, 其中小麦季总降雨量为 163.1 mm, 玉米季总降雨量为 595.5 mm, 降雨主要集中在 8—10 月。在整个小麦-玉米生长期内, 土壤(5 cm)平均温度为 11.4 ℃, 变化范围为 2~32 ℃, 总体表现为先下降后上升, 冬季温度下降至最低, 春季温度开始回升直至夏季达到最高。土壤孔隙充水率主要受降雨的影响, 呈现不规则变化, 波动范围大, 在 6.1%~36.2%间变化。各施肥处理间的土壤温度及土壤孔隙充水率均无显著差异(P>0.05)(图 1)。

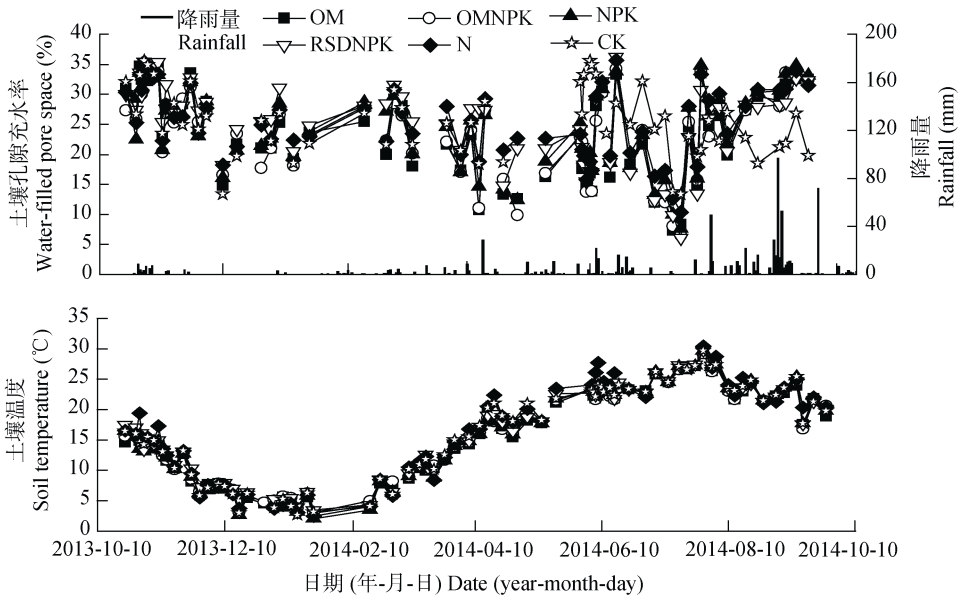

图 1 2013—2014 年冬小麦-夏玉米轮作周期内降雨量和不同施肥方式下土壤孔隙充水率及土壤 5 cm 温度

Fig. 1 Rainfall and water-filled pore space (WFPS), soil temperature in the topsoil (5 cm) under different fertilization regimes during winter wheat-summer maize rotation from 2013 to 2014

OM: 猪厩肥处理; NPK: 氮磷钾肥处理; OMNPK: 猪厩肥配施氮磷钾肥处理; RSDNPK: 秸秆还田配施氮磷钾肥处理; N: 氮肥处理; CK: 不施肥处理。OM: pig manure treatment; NPK: regular synthetic nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer treatment; OMNPK: pig manure combined with synthetic NPK fertilizer treatment; RSDNPK: returned crop residues combined with synthetic NPK fertilizer treatment; N: synthetic N fertilizer treatment; CK: no fertilization treatment.

2.2 不同施肥方式下紫色土土壤可溶性有机碳(DOC)和无机氮的变化

整个轮作周期内各处理的土壤 DOC 和无机氮(NH_4^+-N、NO_3^--N)含量动态变化如图 2 所示。除 CK 处理外, 其余 5 种施肥处理的土壤无机氮含量在施肥初期均迅速增加。无论在小麦季还是玉米季, 土

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

壤 DOC 的含量均呈现先降低再增高的趋势, 最低值出现在施肥后 1 周左右。玉米季土壤 DOC 含量呈现多峰变化, 在 8 月底急剧上升, 这可能是受根系分泌物和土壤水分影响所致。与 NPK 处理相比, OM、OMNPK、RSDNPK 处理有较高的土壤 DOC 含量, N 处理的土壤 DOC 含量最低。各处理的土壤 DOC 年际变化趋势相同, 小麦季的 DOC 含量低于玉米季。

在小麦季和玉米季, 土壤 NH_4^+-N 含量均在施肥后短时间内出现峰值, 之后很快下降。OM、OMNPK、RSDNPK 处理在小麦-玉米轮作周期内呈多峰现象, 说明有机肥处理及秸秆还田处理在一定程度上延缓 NH_4^+-N 的释放。无论在小麦季还是玉米季, 各施肥处理之间土壤 NH_4^+-N 含量无显著差异。各施肥处理土壤 NO_3^--N 含量均出现动态波动, 达到峰值并持续一段时间后, 因植物吸收、微生物作用和氮素淋失等原因, 总体呈下降趋势, 至收获期其含量达最小值。与 NPK 处理相比, N、OM、OMNPK 处理有较高的土壤 NO_3^--N 含量, RSDNPK 处理的土壤 NO_3^--N 含量最低。相较于小麦季, 玉米季期间各处理的土壤 NO_3^--N 含量较低。

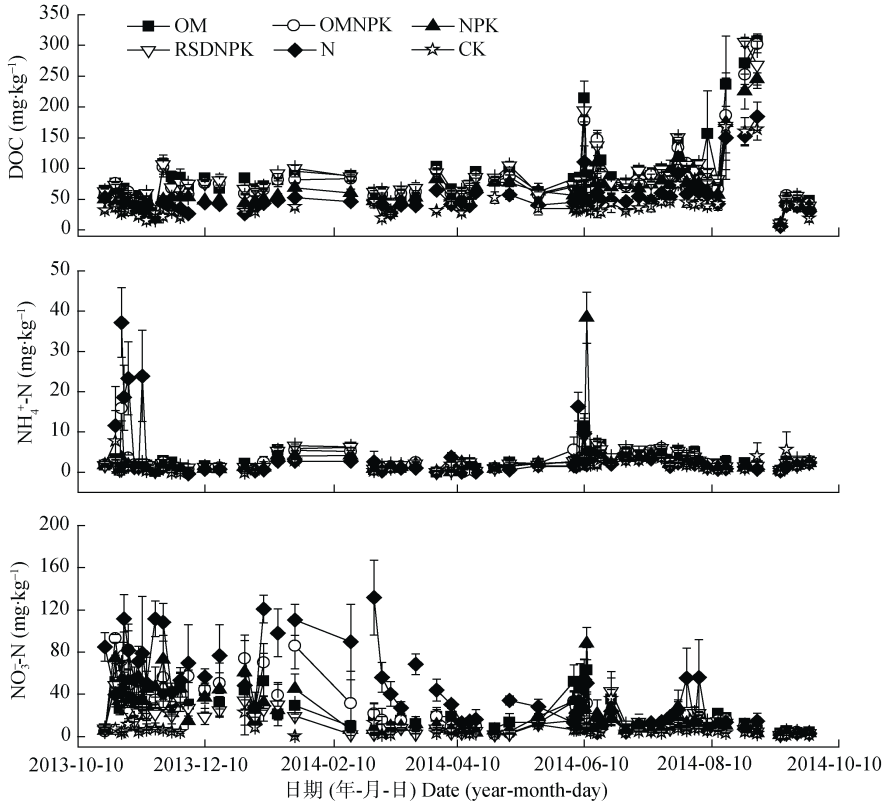

图 2　2013—2014 年冬小麦-夏玉米轮作周期内不同施肥方式下土壤可溶性有机碳(DOC)和无机氮(NH_4^+-N、NO_3^--N)含量变化

Fig. 2　Dynamic changes of soil dissolved organic carbon (DOC) and inorganic N (NH_4^+-N, NO_3^--N) contents under different fertilization regimes during winter wheat-summer maize rotation from 2013 to 2014

OM: 猪厩肥处理; NPK: 氮磷钾肥处理; OMNPK: 猪厩肥配施氮磷钾肥处理; RSDNPK: 秸秆还田配施氮磷钾肥处理; N: 氮肥处理; CK: 不施肥处理。OM: pig manure treatment; NPK: regular synthetic nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer treatment; OMNPK: pig manure combined with synthetic NPK fertilizer treatment; RSDNPK: returned crop residues combined with synthetic NPK fertilizer treatment; N: synthetic N fertilizer treatment; CK: no fertilization treatment.

2.3　不同施肥方式下紫色土农田生态系统 N_2O 和 NO 排放动态

2.3.1　紫色土农田 N_2O 排放动态

2013—2014 年冬小麦-夏玉米轮作周期内各施肥处理的 N_2O 排放动态见图 3。结果表明, 在小麦季和玉米季, CK 处理的 N_2O 排放的季节变化不明显; 而各施肥处理的 N_2O 排放变化趋势基本一致, 施肥后 N_2O 排放通量均迅速增加并出现 N_2O 排放峰, 峰值持续约两周后, N_2O 排放速率迅速下降, 可见施肥是 N_2O 排放峰出现的主要原因。N 处理在小麦季的排放峰出现在施肥后第 13 天, 峰值为 154 $\mu g(N)\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$; 在玉米季的排放峰出现在施肥后第 11 天, 峰值为 145 $\mu g(N)\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$。NPK 处理在小麦季和玉米季 N_2O 排放峰均出现在施肥后第 11 天, 峰值分别为 94 $\mu g(N)\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$、211 $\mu g(N)\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$。相较于 NPK 处理, 有机肥(OM、OMNPK)处理排放峰更高且出现得更早。在小麦季, OM、OMNPK 处理排放峰出现在施肥后第 6 天和第 8 天, 峰值分别

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

为 470 μg(N)·m^{-2}·h^{-1}、312 μg(N)·m^{-2}·h^{-1}；在玉米季，OM、OMNPK 处理排放峰均出现在施肥后第 2 天，峰值分别为 700 μg(N)·m^{-2}·h^{-1}、335 μg(N)·m^{-2}·h^{-1}。RSDNPK 处理相比于 NPK 处理的 N_2O 排放峰值略高，小麦季峰值出现在施肥后第 5 天，峰值为 183 μg(N)·m^{-2}·h^{-1}；玉米季峰值出现在施肥后第 8 天，峰值为 246 μg(N)·m^{-2}·h^{-1}。玉米季与小麦季的 N_2O 排放特征存在差异，玉米季较小麦季各施肥处理具有较高的排放峰值，但排放峰值的维持时间较短，这可能是由于土壤温度和土壤硝化-反硝化反应底物含量综合影响的结果。在整个小麦-玉米轮作期间，降雨对 N_2O 排放也有明显的激发作用，图 3 中共标注了 3 次重要降雨事件，分别是 4 月 18 日大雨(28.4 mm)、6 月 13 日中雨(21.9 mm)、9 月 11 日暴雨(96.7 mm)，各处理的 N_2O 排放均有增加，这可能是因为降雨事件导致土壤厌氧环境的形成，促进土壤中微生物反硝化反应的进行，从而增强 N_2O 的排放。

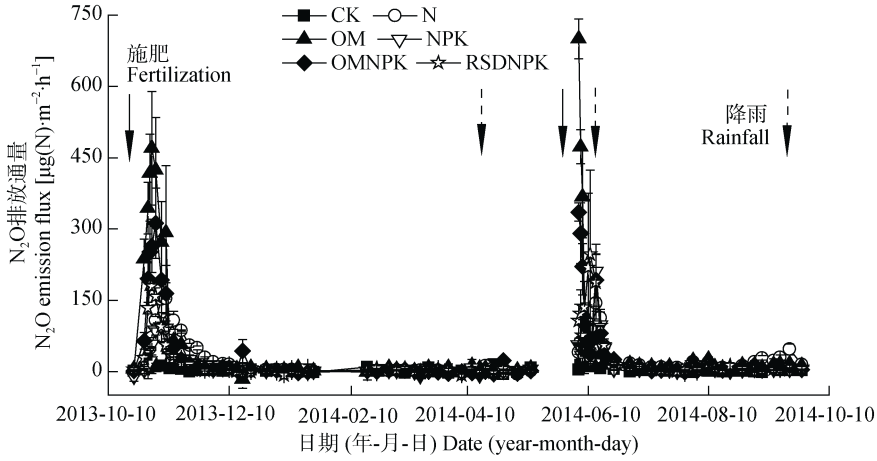

图 3 2013—2014 年冬小麦-夏玉米轮作周期内不同施肥方式下土壤 N_2O 排放通量变化

Fig. 3 Variations of soil N_2O emission fluxes under different fertilization regimes during winter wheat-summer maize rotation from 2013 to 2014

OM: 猪厩肥处理; NPK: 氮磷钾肥处理; OMNPK: 猪厩肥配施氮磷钾肥处理; RSDNPK: 秸秆还田配施氮磷钾肥处理; N: 氮肥处理; CK: 不施肥处理。OM: pig manure treatment; NPK: regular synthetic nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer treatment; OMNPK: pig manure combined with synthetic NPK fertilizer treatment; RSDNPK: returned crop residues combined with synthetic NPK fertilizer treatment; N: synthetic N fertilizer treatment; CK: no fertilization treatment.

2.3.2 紫色土农田 NO 排放动态

不同施肥处理的 NO 排放动态见图 4。CK 处理未出现明显的排放高峰，除 CK 处理外，各施肥处理 NO 排放峰值均出现在施肥的初期。相较于小麦季，玉米季 NO 排放峰值的维持时间更短。N 处理在小麦季的排放峰出现在施肥后第 8 天，峰值为 152 μg(N)·m^{-2}·h^{-1}；在玉米季的排放峰出现在施肥后第 11 天，峰值为 54 μg(N)·m^{-2}·h^{-1}。NPK 处理在小麦季和玉米季 NO 排放峰分别出现在第 6 天和第 7 天，峰值分别为 83 μg(N)·m^{-2}·h^{-1}、33 μg(N)·m^{-2}·h^{-1}。OM、OMNPK 处理的 NO 排放峰初期明显高于其他处理，且在玉米季的排放峰值大于小麦季，而其他施肥处理在小麦季具有较高的 NO 排放峰值。OM 处理在小麦季 NO 排放峰值较低，排放峰出现在施肥后第 2 天，峰值为 37 μg(N)·m^{-2}·h^{-1}；在玉米季 NO 排放峰较高，排放峰出现在施肥后第 4 天，峰值为 208 μg(N)·m^{-2}·h^{-1}。OMNPK 处理小麦季排放峰出现在施肥后第 5 天，峰值为 87 μg(N)·m^{-2}·h^{-1}；玉米季排放峰出现在施肥后第 4 天，峰值为 142 μg(N)·m^{-2}·h^{-1}。RSDNPK 处理小麦季排放峰出现在施肥后第 5 天，峰值为 99 μg(N)·m^{-2}·h^{-1}；玉米季排放峰出现在施肥后第 11 天，峰值为 25 μg(N)·m^{-2}·h^{-1}。各施肥方式下 NO 的排放高峰持续时间约两周，随后排放量迅速降低，并在作物生长中后期保持较低排放量至作物收获期，可见施肥对 NO 排放有明显的促进作用。图 4 中标注的降雨事件同图 3，结果表明，除玉米季施肥初期的降雨增加了少量 NO 排放外，降雨对 NO 没有明显的激发作用。

2.4 紫色土农田生态系统 N_2O 和 NO 的累积排放

2013—2014 年冬小麦-夏玉米轮作周期农田生态系统的 N_2O 和 NO 的累积排放量列于表 1。在冬小麦-夏玉米整个轮作周期，对照(CK)的 N_2O 年累积排放量为 0.24 kg(N)·hm^{-2}，其他施肥处理的土壤 N_2O 累积排放量范围为 0.95~4.60 kg(N)·hm^{-2}，其大小顺序为 OM>OMNPK>RSDNPK>N>NPK。其中，小麦季施肥处理 N_2O 累积排放量范围为 0.42~1.41

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

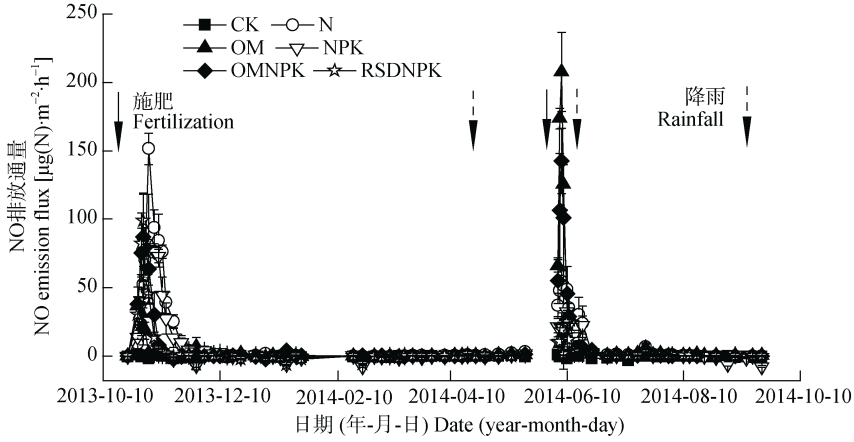

图 4　2013—2014 年冬小麦-夏玉米轮作周期内不同施肥方式下土壤 NO 排放通量变化

Fig. 4　Variations of soil NO emission fluxes under different fertilization regimes during winter wheat-summer maize rotation from 2013 to 2014

OM: 猪厩肥处理; NPK: 氮磷钾肥处理; OMNPK: 猪厩肥配施氮磷钾肥处理; RSDNPK: 秸秆还田配施氮磷钾肥处理; N: 氮肥处理; CK: 不施肥处理。OM: pig manure treatment; NPK: regular synthetic nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer treatment; OMNPK: pig manure combined with synthetic NPK fertilizer treatment; RSDNPK: returned crop residues combined with synthetic NPK fertilizer treatment; N: synthetic N fertilizer treatment; CK: no fertilization treatment.

表 1　冬小麦-夏玉米轮作系统不同施肥方式下 N_2O 和 NO 的累积排放量和排放系数

Table 1　N_2O and NO cumulative emissions and emission coefficients under different fertilization regimes in winter wheat-summer maize rotation system

	处理 Treatment	累积排放量 Accumulated emission ($kg·hm^{-2}$)			排放系数 Emission coefficient (%)		
		冬小麦季 Winter wheat season	夏玉米季 Summer maize season	轮作周期 Total	冬小麦季 Winter wheat season	夏玉米季 Summer maize season	轮作周期 Total
N_2O	CK	0.13±0.23d	0.11±0.22d	0.24±0.22e	—	—	—
	N	0.71±0.13bc	0.69±0.02bc	1.40±0.15c	0.45	0.39	0.41
	OM	1.41±0.09a	3.19±0.55a	4.60±0.64a	0.98	2.05	1.56
	NPK	0.42±0.16cd	0.53±0.02c	0.95±0.16d	0.22	0.28	0.25
	OMNPK	0.87±0.11b	1.29±0.01b	2.16±0.12b	0.57	0.79	0.69
	RSDNPK	0.52±0.07bcd	0.89±0.04bc	1.41±0.11c	0.30	0.52	0.42
NO	CK	−0.01±0.00e	−0.01±0.00e	−0.02±0.00e	—	—	—
	N	0.34±0.05a	0.23±0.01abc	0.57±0.06a	0.27	0.16	0.21
	OM	0.07±0.09de	0.33±0.01a	0.4±0.08c	0.06	0.23	0.15
	NPK	0.25±0.05ab	0.14±0.03cd	0.39±0.08c	0.20	0.10	0.15
	OMNPK	0.18±0.04bc	0.28±0.04ab	0.46±0.08b	0.15	0.19	0.17
	RSDNPK	0.11±0.02cd	0.06±0.01d	0.17±0.03d	0.09	0.05	0.07

CK: 不施肥处理; N: 氮肥处理; OM: 猪厩肥处理; NPK: 氮磷钾肥处理; OMNPK: 猪厩肥配施氮磷钾肥处理; RSDNPK: 秸秆还田配施氮磷钾肥处理。"—"表示不施肥作为对照计算排放系数, 同列不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著(Duncan 多重比较)。表中数据为平均值±标准误差。CK: no fertilization treatment; N: synthetic N fertilizer treatment; OM: pig manure treatment; NPK: regular synthetic nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer treatment; OMNPK: pig manure combined with synthetic NPK fertilizer treatment; RSDNPK: returned crop residues combined with synthetic NPK fertilizer treatment. "—" represents no fertilizer(CK) as control for calculation of emission coefficient. Different small letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$, Duncan) among fertilization regimes. The values in the table are mean ± S.E.

$kg(N)·hm^{-2}$, CK 的 N_2O 累积排放量为 0.13 $kg(N)·hm^{-2}$; 玉米季施肥处理 N_2O 累积排放量范围为 0.53~3.19 $kg(N)·hm^{-2}$, CK 的 N_2O 累积排放量为 0.11 $kg(N)·hm^{-2}$。与 NPK 处理相比, OM、OMNPK、RSDNPK 及 N 处理下土壤 N_2O 的累积排放量分别增加 384%、127%、48%、47%。

施肥对于 NO 排放也有明显促进作用。不施肥对照(CK)的 NO 年累积排放量为−0.02 $kg(N)·hm^{-2}$, 其他施肥处理下土壤 NO 累积排放量范围为 0.17~0.57 $kg(N)·hm^{-2}$, 其大小顺序为 N>OMNPK>OM>NPK>RSDNPK。其中, 小麦季施肥处理 NO 累积排放量范围为 0.07~0.34 $kg(N)·hm^{-2}$, CK 的 NO 累积排放量为−0.01 $kg(N)·hm^{-2}$; 玉米季施肥处理 NO 累积排放量范围为 0.06~0.33 $kg(N)·hm^{-2}$, CK 的 NO 累积排放量为−0.01 $kg(N)·hm^{-2}$。与 NPK 处理相比, N、OMNPK 及 OM 处理下土壤 NO 的累积排放量分别增

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

加 46%、18%、3%, 而 RSDNPK 处理减少 56%。

3 讨论

3.1 紫色土 N_2O 和 NO 排放的环境驱动因子

整个冬小麦-夏玉米轮作期内土壤 N_2O 和 NO 排放通量与环境条件相关分析如表 2 所示。在碱性旱地土壤中, N_2O 和 NO 一般产生于硝化-反硝化反应[23], 影响硝化-反硝化过程的主要因素有温度、水分、无机氮化合物含量等[29]。除 N 和 NPK 处理外, 土壤温度和土壤孔隙充水率与 N_2O 和 NO 排放通量均在小麦季表现出显著相关性($P<0.05$), 而在玉米季的相关关系并不显著, 这与前人的研究结果基本相似[30]。这可能因玉米季温度较高且波动较小, 而高温会降低微生物的活性从而影响土壤硝化-反硝化过程[31], 导致 N_2O 和 NO 排放受限。而在小麦季 WFPS 与各施肥处理的 N_2O 和 NO 排放通量之间具有显著相关性($P<0.05$), WFPS 影响着土壤中空气的流通, WFPS 越大, 土壤易形成厌氧环境, 进而促进土壤中微生物的反硝化作用导致 N_2O 排放的增加, 是土壤 N_2O 排放的重要影响因子。土壤 DOC 含量与农田 N_2O 和 NO 排放通量无显著相关关系, 而土壤无机氮(NH_4^+-N、NO_3^--N)含量与 N_2O 和 NO 排放通量之间呈显著正相关。土壤 NH_4^+-N 含量显著影响小麦季 OMNPK 处理的 N_2O 和 NO 排放通量和玉米季 N 处理的 NO 排放通量($P<0.01$)。除 N 处理外, 其余处理下土壤 NO_3^--N 含量显著影响着 N_2O 和 NO 的排放($P<0.01$)。说明无机氮含量控制着紫色土 N_2O 和 NO 的排放, 因为无机氮是微生物硝化反应的重要底物, 直接影响了 N_2O 和 NO 的产生[7]。因此, 土壤温度(5 cm)、WFPS 和土壤无机氮含量均对 N_2O 和 NO 排放有重要影响。可见, 紫色土农田生态系统的 N_2O 和 NO 排放受多种因素的限制, 而土壤无机氮为土壤硝化-反硝化过程提供底物, 是紫色土 N_2O 和 NO 排放的主控因子。各环境因子对 N_2O 和 NO 排放的影响相

表 2 冬小麦-夏玉米轮作系统不同施肥方式下土壤 N_2O 和 NO 排放通量与环境因子的相关分析

Table 2 Correlation coefficients between environment factors and N_2O and NO emission fluxes under different fertilization regimes in winter wheat-summer maize rotation system

	处理 Treatment	作物生长季 Crop growing season	土温 (5 cm) Soil temperature (5 cm)	WFPS	DOC	NH_4^+-N	NO_3^--N
N_2O	CK	冬小麦 Winter wheat	0.114	0.245	−0.303	−0.143	−0.005
		夏玉米 Summer maize	0.143	0.345	0.102	0.013	0.025
	N	冬小麦 Winter wheat	0.266	0.473**	0.540	0.117	0.311*
		夏玉米 Summer maize	0.183	0.140	−0.118	0.182	−0.185
	OM	冬小麦 Winter wheat	0.392**	0.599**	0.005	0.117	0.426**
		夏玉米 Summer maize	−0.115	−0.168	−0.098	−0.080	0.545**
	NPK	冬小麦 Winter wheat	0.236	0.499**	0.018	0.083	0.498**
		夏玉米 Summer maize	−0.115	0.079	−0.058	0.073	0.112
	OMNPK	冬小麦 Winter wheat	0.318*	0.593**	0.104	0.445**	0.527**
		夏玉米 Summer maize	−0.193	0.004	0.109	−0.191	0.522**
	RSDNPK	冬小麦 Winter wheat	0.322*	0.462**	−0.027	0.010	0.518**
		夏玉米 Summer maize	−0.150	−0.097	0.027	0.347	0.161
NO	CK	冬小麦 Winter wheat	0.184	0.162	0.019	0.152	−0.106
		夏玉米 Summer maize	0.234	0.153	0.013	0.136	0.177
	N	冬小麦 Winter wheat	0.319*	0.483**	0.071	0.263	0.267
		夏玉米 Summer maize	0.252	−0.295	−0.043	0.531**	0.366
	OM	冬小麦 Winter wheat	0.312*	0.309**	0.080	0.136	0.412**
		夏玉米 Summer maize	−0.145	−0.378*	−0.084	−0.081	0.527**
	NPK	冬小麦 Winter wheat	0.354*	0.529**	0.066	0.162	0.493**
		夏玉米 Summer maize	−0.068	−0.350	−0.104	0.395*	0.593**
	OMNPK	冬小麦 Winter wheat	0.327*	0.501**	0.119	0.527**	0.522**
		夏玉米 Summer maize	−0.150	−0.124	−0.097	0.045	0.670**
	RSDNPK	冬小麦 Winter wheat	0.327*	0.360*	−0.014	−0.025	0.528**
		夏玉米 Summer maize	−0.098	−0.153	0.113	0.337	0.196

CK: 不施肥处理; N: 氮肥处理; OM: 猪厩肥处理; NPK: 氮磷钾肥处理; OMNPK: 猪厩肥配施氮磷钾肥处理; RSDNPK: 秸秆还田配施氮磷钾肥处理。*和**分别代表在 0.05 和 0.01 水平极显著相关, 表中数值为皮尔森相关系数。CK: no fertilization treatment; N: synthetic N fertilizer treatment; OM: pig manure treatment; NPK: regular synthetic nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer treatment; OMNPK: pig manure combined with synthetic NPK fertilizer treatment; RSDNPK: returned crop residues combined with synthetic NPK fertilizer treatment. "*" and "**" indicate significant correlation at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively. The values in the table are Pearson correlation coefficients.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

互制约, 难以单独体现, 这也导致环境因子对 N_2O 和 NO 排放的驱动机制较为复杂。

3.2 施肥方式对紫色土 N_2O 和 NO 排放的影响

不同施肥方式下, 紫色土小麦-玉米轮作土壤 N_2O 排放通量之间存在显著差异($P<0.05$), 其大小顺序为 OM>OMNPK>RSDNPK>N>NPK>CK。等氮量施肥时, NPK 处理的 N_2O 排放通量较 N 处理更低, 因为磷肥和钾肥的施入, 使得肥料间的协同作用增强, 从而提高作物对肥料的利用率。有学者认为是磷肥提升了土壤有效磷含量, 氮磷配施提高磷酸酶活性[32]促进作物利用肥料, 并且磷肥施用能固持肥料氮并增加微生物量氮的含量[33], 降低土壤硝化-反硝化的底物含量, 实现 N_2O 减排。与 NPK 处理比较, 施用有机肥(OM、OMNPK)不仅提前了 N_2O 的排放峰时间, 还增大了排放速率的峰值, 可见紫色土有机肥的施用较常规化肥更能激发土壤 N_2O 排放, 导致 N_2O 的累积排放通量更大, 这与土壤碳氮比(C/N)有关[34]。研究中所施用的有机肥的 C/N 较低(15∶1), 与其他施肥处理的 C/N 比有显著差异。秸秆还田(RSDNPK)处理下, 土壤 N_2O 排放通量略高于 NPK 处理, 冬小麦季和夏玉米季分别增加 24%和 68%, 这与胡磊等[35]的研究结果基本一致。这可能因 RSDNPK 处理的秸秆覆盖保温、保熵作用, 该处理的表层土壤有较高年均温和土壤湿度($P<0.05$), 反硝化过程对 N_2O 排放的贡献量随温度的增加而增加, 并且土壤水分的增加会导致土壤通气性变差, O_2 含量降低从而促进反硝化作用。有研究[30]表明施用秸秆能为微生物提供碳源, 增强微生物的呼吸作用, 加快氧气的消耗, 土壤更易形成厌氧环境, 从而增加土壤中微生物的反硝化作用, 使 N_2O 排放通量增加。而秸秆矿化需要消耗大量无机氮, 减少了土壤中无机氮的含量[22], 能够在一定程度上抑制土壤的反硝化作用。导致研究结果不同可能是, 土壤环境条件有一定的差异, 或是秸秆用量、研究方法有所不同。

在小麦-玉米轮作周期内, 施肥方式也显著影响 NO 排放通量($P<0.05$), 其大小顺序为 N>OMNPK>OM>NPK>RSDNPK>CK。除 OM 与 NPK 处理的 NO 排放通量无显著差异, 其他各处理的 NO 排放通量表现出显著差异($P<0.05$)。较常规 NPK 处理, OM 和 OMNPK 处理 NO 排放分别增加 3%和 18%, 这可能与猪厩肥 C/N 比较低影响微生物活性相关。有机肥处理(OM、OMNPK)NO 排放通量最小值出现在小麦季, 最大值出现在玉米季, 这可能与土壤水分条件有关。而单施氮肥的 NO 排放通量较施 NPK 肥增加 46%, 这可能是由于 N 处理为土壤硝化-反硝化过程提供了足量氮源, 促进 NO 的排放。与常规 NPK 施肥处理相比, 秸秆还田(RSDNPK)处理下, 紫色土 NO 的排放量显著减小, 冬小麦季和夏玉米季分别减少 56%和 57%。这可能因秸秆覆盖保水条件下, 土壤通气性较差, 并且秸秆的施入能够增强土壤微生物的呼吸作用[30], 加速氧气的消耗, 减弱硝化作用从而减少了 NO 的排放通量。

在整个轮作期内, 施肥后各处理的 N_2O/NO 值均急剧下降, 这主要因大量铵态氮肥输入到石灰性紫色土中, 促进了土壤硝化作用, 加速铵态氮向硝态氮转化。在施肥后两周内, 各施肥处理均表现出较低 N_2O/NO 值, 这可能是因在施肥初期硝化作用起主导作用。无论在小麦季还是玉米季, 不同施肥处理之间 N_2O/NO 排放通量的比值特征不同, 如 N 和 NPK 处理在施肥后 N_2O/NO 排放通量的比值较低, OM、OMNPK、RSDNPK 等处理在施肥后 N_2O/NO 排放通量的比值较高, 这可能受土壤无机氮底物及通气环境的影响, 进而影响土壤硝化-反硝化作用的强度。可见, 农田生态系统 N_2O 和 NO 排放受多种因素的共同作用, 施肥对紫色土农田生态系统的 N_2O 与 NO 排放比例具有显著影响, 但其影响机制有待深入研究。

4 结论

通过对比不同施肥方式下, 紫色土冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统 N_2O 和 NO 排放的动态变化, 分析施肥方式及其他土壤环境因素对紫色土 N_2O 和 NO 排放的影响, 得出以下主要结论:

1)施肥对紫色土 N_2O 和 NO 排放具有相似的影响。施肥显著增加紫色土冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统 N_2O 和 NO 的排放通量, 但对 N_2O 和 NO 的季节排放规律无显著影响。

2)等氮量施肥时, 与常规氮磷钾施肥处理相比, 长期有机肥施用造成土壤低 C/N, 显著增加 N_2O 的排放量; 秸秆还田因形成一定的厌氧环境降低 NO 的排放量, 减少氮肥以 NO 形式的损失比例。施肥方式显著影响农田 N_2O 与 NO 排放通量的比例, N 和 NPK 处理的 N_2O/NO 较低, OM、OMNPK、RSDNPK 处理的 N_2O/NO 较高, 表明土壤有机质累积可能有利于 N_2O 的排放。秸秆还田与 NPK 化肥配合施用可推荐为紫色土农田 N_2O 与 NO 协同减排的优化施肥方式。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3)土壤温度和 WFPS 影响 N_2O 和 NO 排放的季节动态变化，而土壤无机氮为土壤硝化-反硝化过程提供底物，是驱动 N_2O 和 NO 排放的主控因子。合理调控土壤无机氮水平，可减少 N_2O 和 NO 的排放。

参考文献 References

[1] ZHU X, BURGER M, DOANE T A, et al. Ammonia oxidation pathways and nitrifier denitrification are significant sources of N_2O and NO under low oxygen availability[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(16): 6328–6333

[2] KRAUSE H M, THONAR C, ESCHENBACH W, et al. Long term farming systems affect soils potential for N_2O production and reduction processes under denitrifying conditions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 114: 31–41

[3] KANTER D, MAUZERALL D L, RAVISHANKARA A R, et al. A post-Kyoto partner: Considering the stratospheric ozone regime as a tool to manage nitrous oxide[J]. Proceedings of the National Academy of Sciencesof the United States of America, 2013, 110(12): 4451–4457

[4] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 465–570

[5] SLEMR F, SEILER W. Field study of environmental variables controlling the NO emissions from soil and the NO compensation point[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1991, 96(D7): 13017–13031

[6] CRUTZEN P J. Atmospheric chemical processes of the oxides of nitrogen, including nitrous oxide[M]//DELWICHE C C. Denitrification, Nitrification and Atmospheric N_2O. Chichester: John Wiley & Sons, 1981

[7] 蔡延江，丁维新，项剑. 农田土壤 N_2O 和 NO 排放的影响因素及其作用机制[J]. 土壤, 2012, 44(6): 881–887
CAI Y J, DING W X, XIANG J. Factors controlling N_2O and NO emissions from agricultural soils and their influencing mechanisms: A review[J]. Soils, 2012, 44(6): 881–887

[8] MOSIER A, KROEZE C. Potential impact on the global atmospheric N_2O budget of the increased nitrogen input required to meet future global food demands[J]. Chemosphere-Global Change Science, 2000, 2(3/4): 465–473

[9] BRUINSMA J. World Agriculture: Towards 2015/2030: An FAO Perspective[M]. London: Earthscan, 2003

[10] STEHFEST E, BOUWMAN L. N_2O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: Summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2006, 74(3): 207–228

[11] 曾泽彬，朱波，朱雪梅，等. 施肥对夏玉米季紫色土 N_2O 排放及反硝化作用的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 130–137
ZENG Z B, ZHU B, ZHU X M, et al. Effects of fertilization on N_2O emission and denitrification in purple soil during summer maize season in the Sichuan Basin[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(1): 130–137

[12] RAVISHANKARA A R, DANIEL J S, PORTMANN R W. Nitrous oxide (N_2O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. Science, 2009, 326(5949): 123–125

[13] ROBERTSON G P, GROFFMAN P M. Nitrogen Transformations[M]//PAUL E A. Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry. San Diego: Academic Press, 2015: 421–446

[14] JU X T, LU X, GAO Z L, et al. Processes and factors controlling N_2O production in an intensively managed low carbon calcareous soil under sub-humid monsoon conditions[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(4): 1007–1016

[15] 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

[16] 薛建福，濮超，张冉，等. 农作措施对中国稻田氧化亚氮排放影响的研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 1–9
XUE J F, PU C, ZHANG R, et al. Review on management-induced nitrous oxide emissions from paddy ecosystems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 1–9

[17] BOUWMAN A F, BOUMANS L J M, BATJES N H. Emissions of N_2O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2002, 16(4): 6-1–6-13

[18] ZHAI L M, LIU H B, ZHANG J Z, et al. Long-term application of organic manure and mineral fertilizer on N_2O and CO_2 emissions in a red soil from cultivated maize-wheat rotation in China[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(11): 1748–1757

[19] 董玉红，欧阳竹，李运生，等. 不同施肥方式对农田土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2007, (4): 34–39
DONG Y H, OUYANG Z, LI Y S, et al. Influence of different fertilization on CO_2 and N_2O fluxes from agricultural soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2007, (4): 34–39

[20] 李燕青，唐继伟，车升国，等. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米 N_2O 和 CO_2 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(21): 4381–4389
LI Y Q, TANG J W, CHE S G, et al. Effect of organic and inorganic fertilizer on the emission of CO_2 and N_2O from the summer maize field in the North China Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(21): 4381–4389

[21] LI H, QIU J J, WANG L G, et al. Modelling impacts of alternative farming management practices on greenhouse gas emissions from a winter wheat–maize rotation system in China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 135(1/2): 24–33

[22] MENG L, DING W X, CAI Z C. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N_2O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(11): 2037–2045

[23] ZHENG X H, WANG M X, WANG Y S, et al. Mitigation options for methane, nitrous oxide and nitric oxide emissions from agricultural ecosystems[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2000, 17(1): 83–92

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[24] DAS S, ADHYA T K. Effect of combine application of organic manure and inorganic fertilizer on methane and nitrous oxide emissions from a tropical flooded soil planted to rice[J]. Geoderma, 2014, 213: 185–192

[25] VALLEJO A, SKIBA U M, GARCÍA-TORRES L, et al. Nitrogen oxides emission from soils bearing a potato crop as influenced by fertilization with treated pig slurries and composts[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(9): 2782–2793

[26] 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 & Environment, 2011, 140(1/2): 226–233

[27] YAO Z S, ZHENG X H, XIE B H, et al. Tillage and crop residue management significantly affects N-trace gas emissions during the non-rice season of a subtropical rice-wheat rotation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(10): 2131–2140

[28] 柳文丽, 李锡鹏, 沈茜, 等. 施肥方式对冬小麦季紫色土 N_2O 排放特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(9): 1029–1037
LIU W L, LI X P, SHEN X, et al. Effects of fertilizer application regimes on soil N_2O emissions in the croplands of purple soil in the Sichuan Basin during wheat season[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(9): 1029–1037

[29] GÖDDE M, CONRAD R. Influence of soil properties on the turnover of nitric oxide and nitrous oxide by nitrification and denitrification at constant temperature and moisture[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, 32(2): 120–128

[30] 李涛, 王小国, 胡廷旭. 生物炭对紫色土农田土壤 NO 排放的影响[J]. 土壤, 2016, 48(5): 879–886
LI T, WANG X G, HU T X. Impact of biochar on NO emission from copland of purple soil[J]. Soils, 2016, 48(5): 879–886

[31] HOYLE F C, MURPHY D V, FILLERY I R P. Temperature and stubble management influence microbial CO_2-C evolution and gross N transformation rates[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(1): 71–80

[32] 李春越, 白红英, 党廷辉, 等. 农田土壤磷酸酶活性与土壤 N_2O 排放通量的相关性[J]. 中国环境科学, 2007, 27(2): 231–234
LI C Y, BAI H Y, DANG T H, et al. Relationship of field soil phosphatase activity and soil N_2O emission flux[J]. China Environmental Science, 2007, 27(2): 231–234

[33] 王继红, 刘景双, 于君宝, 等. 氮磷肥对黑土玉米农田生态系统土壤微生物量碳、氮的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 35–38
WANG J H, LIU J S, YU J B, et al. Effect of fertilizing N and P on soil microbial biomass carbon and nitrogen of black soil corn agroecosystem[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(1): 35–38

[34] FLEISHER D H, CAVAZZONI J, GIACOMELLI G A, et al. Adaptation of substor for controlled-environment potato production with elevated carbon dioxide[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(2): 531–538

[35] 胡磊, 刘韵, 朱波. 不同施肥方式下紫色土 N_2O 与 NO_x 的排放特征[J]. 环境科学, 2017, 38(8): 3442–3450
HU L, LIU Y, ZHU B. Characteristics of N_2O and NO_x emissions from purple soil under different fertilization regimes[J]. Environmental Science, 2017, 38(8): 3442–3450

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net