

网络出版时间:2019-11-04 15:57 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2020.05.013
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20191101.0929.026.html

长期施用化肥对旱作雨养农田 N₂O 排放特征的影响

肖杰^{1a}, 刘平静^{1a}, 孙本华^{1a,2}, 高明霞^{1b}, 张树兰^{1a}, 杨学云^{1a}, 冯浩^{1b,1c,2}

(1 西北农林科技大学 a 资源环境学院/农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, b 水利与建筑工程学院,
c 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】【目的】分析不同施肥处理对土壤理化性质、N₂O 的排放特征及小麦产量的影响, 以为旱作雨养农田化肥合理施用以及降低温室气体排放提供科学依据。【方法】2016—2018 年, 以始于 1990 年的陕西杨凌“国家黄土肥力与肥料效益监测基地”冬小麦/夏休闲体系长期肥料定位试验为基础, 对其中 6 个处理((1)不施肥(CK)、(2)单施氮肥(N)、(3)氮肥与钾肥配施(NK)、(4)磷肥与钾肥配施(PK)、(5)氮肥与磷肥配施(NP)、(6)氮肥、磷肥与钾肥配施(NPK))进行研究, 测定不同处理土壤样品理化性质、N₂O 排放特征以及小麦产量, 并就 N₂O 排放总量与土壤理化性质的关系进行了冗余(RDA)分析。【结果】不同处理对土壤理化性质影响有差异, 其中 NP 和 NPK 处理土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、无机氮(铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)、微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)含量均明显高于其他处理, 而土壤 pH 显著下降。2016—2017 和 2017—2018 年不同处理的土壤 N₂O 排放总量分别为 0.48~1.31 和 0.41~1.18 kg/hm², 其中施氮处理(NK、NP 和 NPK)的土壤 N₂O 排放总量均显著高于 CK; 土壤 N₂O 排放总量平均值表现为 NPK>NP>NK>N>PK>CK。所有施氮处理中, NPK 处理的 N₂O 排放系数平均值最高, 达 0.59%, 显著高于其他处理。2016—2017 和 2017—2018 年, 所有施肥处理小麦产量均显著高于 CK, 其中 NP 和 NPK 处理的小麦产量均较高。6 个处理中, N 处理的土壤 N₂O 排放强度平均值最高, 显著高于其他处理; CK、NK 和 NPK 处理次之, 且三者之间差异不显著; NP 和 PK 处理均较低, 且两者之间差异不显著。RDA 分析结果表明, 土壤 N₂O 排放总量与土壤理化性质的相关性由大到小表现为 TN>NO₃⁻-N>SOC>NH₄⁺-N>MBN>MBC。【结论】对于黄土区雨养农田而言, 长期氮、磷肥配施(NP)或者氮、磷、钾肥配施(NPK)可显著提高土壤肥力和小麦产量以及 N₂O 排放总量, 是研究区较好的施肥方式。

【关键词】 长期施肥; 冬小麦/夏休闲体系; N₂O 排放系数

【中图分类号】 S147.2

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2020)05-0108-07

Effects of long-term chemical fertilization on N₂O emission from rain-fed dry farmland

XIAO Jie^{1a}, LIU Pingjing^{1a}, SUN Benhua^{1a,2}, GAO Mingxia^{1b},
ZHANG Shulan^{1a}, YANG Xueyun^{1a}, FENG Hao^{1b,1c,2}

(1 a College of Natural Resources and Environment/Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-Environment, Ministry of Agriculture, b College of Water Resources and Architectural Engineering, c Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Water-saving Agriculture in Arid Area of China, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract:【Objective】The effects of long-term different fertilizations on soil physical and chemical characteristics, wheat yield and N₂O emission were investigated to provide basis for reducing emission from

【收稿日期】 2019-04-08

【基金项目】 国家高技术研究发展计划项目(2013AA102904); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016KTZDNY03-06); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JM4007); 高等学校学科创新引智计划资助项目(B12007)

【作者简介】 肖杰(1994—), 男, 河南荥阳人, 硕士, 主要从事土壤化学和土壤生态研究。E-mail: 13526559019@163.com

【通信作者】 孙本华(1972—), 男, 江苏金湖人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事土壤化学和土壤生态研究。E-mail: sunbenhua@126.com

farmland soil by reasonable fertilization. 【Method】 From 2016 to 2018, based on the long-term fertilizer experiment of winter wheat/summer fallow system started in 1990 as “National Monitoring Base of Soil Fertility and Fertilizer Efficiency on Loess Soil” in Yangling, Shaanxi, different treatments including farmland without fertilization (CK), N fertilizer (N), N and K fertilizer (NK), P and K fertilizer (PK), N and P fertilizer (NP), as well as N, P and K fertilizer (NPK) were selected. The physicochemical properties of soil samples, N₂O emission characteristics and wheat yield of different treatments were measured, and the relationship between total N₂O emission and soil physicochemical properties was analyzed by redundancy analysis (RDA). 【Result】 The effects of different treatments on soil physical and chemical properties were different. Soil organic carbon, total nitrogen, inorganic nitrogen (ammonium nitrogen and nitrate nitrogen), microbial biomass carbon (MBC) and microbial biomass nitrogen (MBN) contents in NP and NPK treatments were significantly higher than that in other treatments. Soil pH in treatments decreased significantly. Total N₂O emissions from different treatments during 2016–2017 and 2017–2018 were 0.48–1.31 and 0.41–1.18 kg/hm², respectively. The total N₂O emissions of nitrogen fertilization treatments (NK, NP and NPK) were significantly higher than that of CK. The average soil N₂O emissions were in the order of NPK>NPK>NK>N>PK>CK. Among all nitrogen fertilization treatments, the NPK treatment had the highest average N₂O emission factor of 0.59%, and it was significantly higher than that of other treatments. In 2016–2017 and 2017–2018, the wheat yields of all fertilization treatments were significantly higher than that of CK with the highest in NP and NPK treatments. N treatment had the highest yield-scaled N₂O emission and it was significantly higher than other treatments. CK, NK and NPK were lower without significant difference. NP and PK treatments were the lowest without significant difference. RDA analysis showed that the correlation coefficient between soil N₂O emission and soil physical and chemical properties was in the order of TN>NO₃⁻-N>SOC>NH₄⁺-N>MBN>MBC. 【Conclusion】 For rain-fed farmland in Lou soil area, long-term combined application of nitrogen and phosphorus (NP) or combined application of nitrogen, phosphorus and potassium (NPK) can significantly increase soil fertility, wheat yield and cumulative emission of N₂O. The two treatments are suggested fertilizer application methods in the study area.

Key words: long-term fertilization; winter wheat-summer fallow cropping system; N₂O emission factor

温室气体排放所引起的全球变暖和气候异常是当今国际社会关注的焦点问题之一。氧化亚氮(N₂O)是重要的温室气体之一,在100年的时间尺度上N₂O的全球增温潜势为二氧化碳(CO₂)的298倍^[1]。农田是N₂O重要的排放来源,我国农业生产活动中所排放的N₂O占N₂O排放总量的92%^[2]。区域环境条件、土壤类型、耕作制度及肥料投入等因素均会影响到农田N₂O排放,其中肥料尤其是化肥施用是一个重要来源。我国是世界上农田氮肥施用量最大的国家之一,年施氮肥总量达到24~33 Tg,据估算我国每年农田排放的N₂O总量为0.37~0.39 Tg,约占全球农田的10%^[3]。研究表明,施用化肥是造成N₂O排放量大幅增加的主要原因,N₂O的排放随着氮肥用量的增加而增大,且受施肥次数和施肥种类的影响很大^[4]。相同管理水平下,施氮量越高,N₂O排放量也越高,两者之间存在极显著

的正相关关系^[5]。华北平原地区的研究结果表明,施用铵态氮肥,通过其硝化作用能显著增加N₂O的排放量,而施用硝态氮几乎不产生N₂O排放^[6-7]。有研究指出,当氮肥用量相同时,氮磷肥配施处理的黑土N₂O排放量大于单施氮肥处理^[8]。也有研究显示,稻田中,氮磷肥配施处理与单施氮肥处理的N₂O排放量差异不显著,可能与不同类型土壤有机质含量和施氮量等存在差异有关^[9]。

关中平原是西北地区的重要粮食产区,冬小麦-夏休闲的模式是该地区常见轮作方式,关于此农田利用模式下长期施肥对土壤N₂O排放影响的研究还较少。本研究利用20世纪90年代初建立的旱作雨养农田长期施肥定位试验,研究不同化肥及其配合施用对农田N₂O排放量的影响,为旱作雨养农田化肥合理施用以及降低温室气体排放提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在“国家黄土肥力与肥料效益监测基地”进行,地点位于陕西杨凌示范区五泉镇(34°17′51″N, 108°00′48″E),海拔 516 m,年平均气温 13 °C,≥10 °C 积温 4 196.2 °C,年均降水量 550~600 mm,主要集中在 7—9 月,年均蒸发量 993 mm,无霜期 184~216 d。供试土壤为土垫旱耕人为土(塋土),黄土母质。

1.2 试验设计

长期试验始于 1990 年秋,本研究于 2016—2018 年进行,利用其中 6 个处理:(1)不施肥(CK);(2)单施氮肥(N);(3)氮肥与钾肥配施(NK);(4)磷肥与钾肥配施(PK);(5)氮肥与磷肥配施(NP);(6)氮肥、磷肥与钾肥配施(NPK)。小区面积均为 399 m²(21 m×19 m)。处理实行冬小麦-夏休闲单作种植制度,作物生长期未进行人工灌溉,主要依靠自然降雨。氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾,所有肥料于冬小麦播种前作为基肥一次性施入,不同处理中 N、P₂O₅ 和 K₂O 用量分别为 135.0, 108.0 和 67.5 kg/hm²。

1.3 方法

1.3.1 N₂O 采集与测定 N₂O 排放通量测定采用静态箱-气相色谱法^[10]。采集箱分为箱体和底座两部分,制作材料均为 PVC。箱体规格为 50 cm×50 cm×50 cm,箱内安装风扇以混匀气体,箱外包装泡沫层用以保温。底座外径为 50.5 cm×50.5 cm,上附宽度为 3 cm 的凹槽,底座的 4 个角下连接长度为 10 cm 的楔子,底座总高度为 15 cm。小麦播种前将底座插入土壤中 15 cm,至其凹槽上沿与地表水平,整个采样过程中不再移动,每次采集气体之前在凹槽中注水,使其与箱体形成一个密闭环境。从 2016 年 6 月 14 日休闲季开始至 2018 年 6 月 3 日小麦收获结束,每隔 7 d 进行 1 次气体采集,每次于上午 08:00—11:00 采集气体。分别在密闭箱置于底座内密封后的 0, 10, 20, 30 min 时用注射器抽取箱内气体 50 mL,共 4 次。每次采集气体样品的同时用温度计测定气温和密闭箱内空气温度,测定时间为密闭箱置于底座后 30 min。样品采集完毕后带回,用气相色谱仪(7890B,美国 Agilent 公司)进行 N₂O 浓度分析。气相色谱仪的测定条件为:柱温是 80 °C,检测器温度为 320 °C,载气为氦甲烷(流速为 30 mL/min)。

1.3.2 土壤样品采集与测定 2018 年 6 月小麦收获后采集表层(0~20 cm)土壤样品。采样时每个小区采集 6 点组成一个混合样品,重复采集 3 次,样品装入塑料袋并置于冰盒中运回实验室。新鲜样品剔除动植物残体,用于测定土壤 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N、微生物量碳(MBC)和微生物量氮(MBN)含量,土壤样品经风干和处理后测定土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)含量和 pH。

土壤 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量用 1 mol/L KCL 浸提,用流动注射分析仪测定;MBC、MBN 含量分别用氯仿熏蒸-0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提法测定;土壤 TN 含量用硫酸消煮-凯氏定氮法测定;土壤 SOC 含量用重铬酸钾容量法测定;土壤 pH 采用电位法(水土体积质量比 5:1)测定。

1.3.3 产量测定 小麦成熟时每小区分别收获 3 个 10 m² 样方的植株样品,收获的小麦样品经风干和脱粒测定生物量以及籽粒产量。

1.4 数据处理与分析

N₂O 排放通量的计算公式如下:

$$Flux = M \times \rho / (K + T) \times H / R \times dc / dt \quad (1)$$

式中:Flux 为 N₂O 排放通量(μg/(m²·h)),M 为碳的摩尔质量(12 g/mol),ρ 为 N₂O 密度(g/L),H 为采集箱子的高度(cm),R 为普适气体常数(8.314 J/(mol·K)),K 为标准温度(K),T 为采样时箱内平均气温(°C),dc/dt 为 N₂O 排放速率(μL/(L·min))。

N₂O 排放总量的计算公式如下:

$$S = X \times 24 \times d \times 10^2 \quad (2)$$

式中:S 为气体排放总量(kg/hm²),X 为第 n 次采样时气体排放通量(μg/(m²·h)),d 为第 n 次采样到第 n+1 次采样间隔的天数。

采用公式(3)计算 N₂O 排放系数(EF_d):

$$EF_d = (F_N - F_{CK}) / N \times 100\% \quad (3)$$

式中:F_N 和 F_{CK} 分别为施肥和不施肥处理 N₂O 年排放总量(kg/hm²),N 为氮肥施用量(kg/hm²)。

采用公式(4)计算 N₂O 排放强度(EY, mg/kg):

$$EY = E / Y \times 10^6 \quad (4)$$

式中:E 为 N₂O 年排放总量(kg/hm²),Y 为小麦产量(kg/hm²)。

使用 SPSS 21.0 对各处理土壤 N₂O 排放总量进行单因素方差分析和多重比较(ANOVA, LSD),采用 CANOCO 4.5 软件对 N₂O 排放总量与土壤因子关系进行冗余(RDA)分析。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对土壤理化性质的影响

表 1 显示,各施肥处理土壤有机碳含量显著高于 CK 处理,其中 NP 和 NPK 处理土壤有机碳含量均最高达 10.31 g/kg,且显著高于 N、NK 和 PK 处理;NK 与 PK 处理差异不显著,但显著高于 N 处理。施氮处理(NK、NP 和 NPK)的土壤全氮含量显著高于其他处理。与 CK 相比,仅 NP 和 NPK 处理土壤 pH 显著下降。施氮处理的土壤无机氮(铵态

氮和硝态氮)含量显著高于 CK,NP 和 NPK 处理的土壤无机氮含量均较高,且两者之间无显著差异。不同处理的土壤微生物量碳(MBC)含量为 225.9~339.8 mg/kg,其中 N 和 NK 处理显著低于 CK,施磷(PK、NP 和 NPK)处理则显著高于 CK,NPK 与 NP 处理之间差异不显著。不同处理的土壤微生物量氮(MBN)含量为 16.58~36.10 mg/kg,其中 NPK 处理 MBN 含量最高,N 处理 MBN 含量最低,各处理之间差异显著。

表 1 不同施肥处理土壤的理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties with different fertilization treatments

处理 Treatment	有机碳/ (g·kg ⁻¹) SOC	全氮/ (g·kg ⁻¹) TN	pH	铵态氮/ (mg·kg ⁻¹) NH ₄ ⁺ -N	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹) NO ₃ ⁻ -N	微生物量碳/ (mg·kg ⁻¹) MBC	微生物量氮/ (mg·kg ⁻¹) MBN
CK	7.84 d	0.89 bc	8.32 ab	0.39 c	7.94 c	279.7 c	18.49 d
N	8.38 c	0.98 b	8.31 ab	0.46 b	18.95 b	264.6 d	16.58 e
NK	8.76 b	1.03 a	8.29 b	0.46 b	18.36 b	225.9 e	18.88 d
PK	8.66 b	0.93 bc	8.34 a	0.38 c	7.83 c	322.5 b	25.11 c
NP	10.31 a	1.09 a	8.23 c	0.51 ab	20.66 a	337.0 ab	30.35 b
NPK	10.31 a	1.08 a	8.20 c	0.54 a	20.64 a	339.8 a	36.10 a

注:同列数据后不同小写字母表示处理之间在 P<0.05 水平差异显著。下表同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference (P<0.05). The same below.

2.2 长期施肥对 N₂O 排放总量与排放系数的影响

不同施肥处理的 2 个轮作周期 N₂O 排放总量如表 2 所示。表 2 显示,第 1 个轮作年(2016—2017 年),不同处理的 N₂O 排放总量为 0.48~1.31 kg/hm²;第 2 个轮作年(2017—2018 年),不同处理 N₂O 排放总量为 0.41~1.18 kg/hm²。2 个轮作年的 N₂O 排放总量均为 CK 处理最低,NPK 处理最高。所有施氮处理(N、NK、NP 和 NPK)的 N₂O 排放总量均显著高于 CK,而不施氮(PK)处理的 N₂O 排放总量与 CK 间无显著差异。2016—2017 年所有施氮处理的 N₂O 排放总量表现为 NPK>NP>NK>

N,而 2017—2018 年则表现为 NPK>NP≈NK≈N。N₂O 排放总量的平均值变化趋势与 2016—2017 年相似,即 NPK>NP>NK>N>PK>CK。

表 2 还显示,2016—2017 年和 2017—2018 年各处理的 N₂O 排放系数分别为 0.24%~0.61%和 0.28%~0.57%,其中 NPK 处理的排放系数最高,显著高于其他施肥处理。2016—2017 年 N 与 NK 处理的 N₂O 排放系数差异不显著,但显著低于 NP;2017—2018 年 NP、NK 和 N 处理的排放系数差异不显著。N₂O 排放系数平均值表现为 NPK>NP>NK>N。

表 2 2016—2018 年不同施肥处理 N₂O 的排放总量和排放系数

Table 2 N₂O emission and emission factor with different fertilization treatments in 2016—2018

处理 Treatment	2016—2017		2017—2018		平均值 Mean	
	排放总量/ (kg·hm ⁻²) Emission factor	排放系数/% Emission factor	排放总量/ (kg·hm ⁻²) Emission factor	排放系数/% Emission factor	排放总量/ (kg·hm ⁻²) Emission factor	排放系数/% Emission factor
CK	0.48 e	—	0.41 c	—	0.45 e	—
N	0.81 d	0.24 c	0.78 b	0.28 b	0.80 d	0.26 d
NK	0.89 c	0.30 c	0.80 b	0.31 b	0.84 c	0.29 c
PK	0.51 e	—	0.42 c	—	0.47 e	—
NP	0.97 b	0.36 b	0.81 b	0.30 b	0.89 b	0.33 b
NPK	1.31 a	0.61 a	1.18 a	0.57 a	1.24 a	0.59 a

2.3 长期施肥对作物产量与 N₂O 排放强度的影响

表 3 显示,2016—2017 年的小麦产量为 1 685.8~5 683.5 kg/hm²,其中 NP 和 NPK 处理

显著高于其他处理。由于受到春季冻害的影响,2017—2018 年各处理小麦产量大幅下降,为 1 090.8~2 443.6 kg/hm²,其中 NP 和 NPK 处理

的产量仍明显高于其他处理。2 个轮作年小麦产量的平均值为 1 392.3~4 024.6 kg/hm²,其中 NP 和 NPK 处理显著高于其他处理。

表 3 还显示,2016—2017 年各处理 N₂O 排放强度为 174.1~487.9 mg/kg,其中 N 处理最高,且显著高于其他处理;CK 与 NK 处理次之,两者之间差异不显著,但显著高于 PK、NP 和 NPK 处理;NP 处理 N₂O 排放强度最低,仅为 174.1 mg/kg。2017—2018 年,各处理的小麦产量受到冻害影响而

大幅下降,而土壤 N₂O 排放总量变化不大,故各处理的 N₂O 排放强度与 2016—2017 年存在差异,其中 PK 处理的排放强度最低;N 处理的 N₂O 排放强度最高,且显著高于其他处理。从 2016—2018 年 N₂O 排放强度的平均值来看,N 处理最高,显著高于其他处理;CK、NK 和 NPK 处理次之,且三者差异不显著;NP 和 PK 处理显著低于其他处理,但二者之间差异不显著。

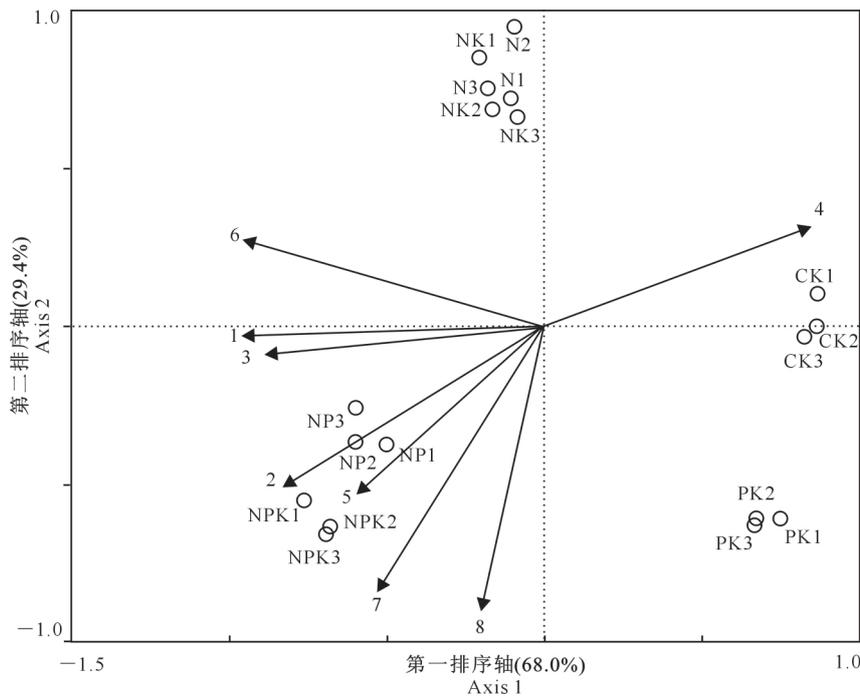
表 3 2016—2018 年不同施肥处理小麦产量和 N₂O 排放强度

Table 3 Wheat yield and yield-scaled N₂O emission with different fertilization treatments in 2016—2018

处理 Treatment	2016—2017		2017—2018		平均值 Mean	
	产量/ (kg·hm ⁻²) Yield	N ₂ O 排放强度/ (mg·kg ⁻¹) Yield-scaled N ₂ O emission	产量/ (kg·hm ⁻²) Yield	N ₂ O 排放强度/ (mg·kg ⁻¹) Yield-scaled N ₂ O emission	产量/ (kg·hm ⁻²) Yield	N ₂ O 排放强度/ (mg·kg ⁻¹) Yield-scaled N ₂ O emission
CK	1 685.8 c	294.5 b	1 283.9 c	320.15 c	1 392.3 d	303.6 b
N	1 693.7 c	487.9 a	1 090.8 c	727.55 a	1 484.8 d	581.5 a
NK	3 240.2 b	273.8 b	2 110.9 ab	379.38 c	2 675.6 b	315.2 b
PK	2 265.5 c	230.0 c	1 921.6 b	220.36 d	2 093.6 c	224.1 c
NP	5 683.5 a	174.1 d	2 365.8 ab	349.29 c	4 024.6 a	223.2 c
NPK	5 253.0 a	249.9 c	2 443.6 a	492.17 b	3 848.3 a	324.1 b

2.4 长期施肥下影响土壤 N₂O 排放的土壤因素
为更好地揭示土壤因子与 N₂O 排放总量的相

互关系,将 N₂O 排放总量与土壤理化性质进行 RDA 分析,结果见图 1。



○代表各处理,每个处理后的数字 1,2,3 分别代表处理的 3 次重复。1. N₂O 排放总量;2. 土壤有机碳;
3. 全氮;4. pH;5. NH₄⁺-N 含量;6. NO₃⁻-N 含量;7. 微生物量氮;8. 微生物量碳
○ represents treatments,1,2 and 3 after the treatments represent three replicates. 1. N₂O emission;2. Soil organic carbon;
3. Total nitrogen;4. pH;5. NH₄⁺-N content;6. NO₃⁻-N content;7. Microbial biomass nitrogen;8. Microbial biomass carbon

图 1 不同施肥处理 N₂O 排放总量与土壤理化性质 RDA 分析

Fig. 1 RDA analysis on relationship of N₂O emission and soil physical and chemical properties with different fertilization treatments

图 1 表明,第一排序轴能解释总变异的 68.0%,而第二排序轴能解释总变异的 29.4%。各施肥处理 N₂O 排放总量在 RDA 图上分布差异显著,与 CK 相比位置均发生了明显的变化,表明施肥均会改变 N₂O 的排放。CK 位于 pH 正方向上,而 NP 和 NPK 处理位于 pH 负方向上,表明 NP 和 NPK 处理降低了土壤 pH。NP 和 NPK 处理位于 SOC、NH₄⁺-N、MBN 和 MBC 的正方向,而 CK 位于以上指标反方向上,表明 NP 和 NPK 处理提高了土壤肥力,从而与 CK 产生了差异。

图 1 显示,土壤 N₂O 排放总量与 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、MBC、MBN 和 SOC 的夹角均为锐角,说明它们之间呈正相关关系,且与土壤 N₂O 排放总量相关性大小表现为 TN>NO₃⁻-N>SOC>NH₄⁺-N>MBN>MBC;土壤 N₂O 排放总量与土壤 pH 的夹角为钝角,二者之间呈负相关关系。

3 讨 论

农田生态系统 N₂O 排放主要源于土壤氮素的硝化和反硝化作用^[11],施肥通过直接影响土壤的硝化和反硝化过程,引起农田土壤 N₂O 排放变化^[12-13]。大量研究表明,施用氮肥是土壤 N₂O 排放的最直接影响因素^[14-16]。本研究结果表明,施用氮肥总体可以显著提高土壤无机氮、MBN 和 TN 含量,从而能显著增加土壤 N₂O 排放总量。关于氮肥和磷肥配施对于农田 N₂O 排放影响已有大量相关报道。刘运通等^[17]在春玉米上进行为期 1 年的短期施肥试验发现,与单施氮肥相比,氮肥与磷肥配施可以显著减少 N₂O 排放。蔡延江等^[18]在黑土上进行长期定位施肥试验发现,氮磷和氮磷钾处理土壤 N₂O 排放量都小于单施氮肥处理,可能是因为氮肥与磷肥和钾肥配施提高了作物对肥料尤其是氮肥的吸收利用,降低了土壤 NO₃⁻-N 与 NH₄⁺-N 含量,从而减少了土壤 N₂O 的排放。也有学者认为,氮肥与磷肥配合施用能够显著提高土壤微生物量氮含量,因为增加了微生物对氮素的固持而降低了 N₂O 排放^[19]。黄晶等^[20]在旱地红壤的长期施肥研究中发现,NPK 处理的土壤 N₂O 排放量大于 NP、NK 和 N 处理,可能是长期平衡施用无机肥有利于提高土壤 MBN 和 MBC 含量,长期不均衡施用无机肥会加剧土壤矿质养分的不平衡,影响土壤微生物群落组成,降低微生物的多样性和活性,从而减少土壤 N₂O 排放^[21]。佟帆^[22]通过室内培养试验分析了不同施肥处理黑土 N₂O 的排放量变化情况,不同施肥处理

N₂O 排放量表现为 NPK>NP>N>CK,可能是平衡施肥增加了作物生物量,使得进入土壤中的根系残叶等增加,从而提高了土壤微生物量氮含量,最终增加了土壤 N₂O 的排放。本研究结果表明,冬小麦-夏休闲 2 个轮作年的农田 N₂O 排放总量均表现为长期平衡施肥(NPK)高于长期偏施化肥(N、NK、PK 和 NP)处理以及 CK。原因可能是长期平衡施肥可显著增加作物生物量,进入土壤的作物根系残叶量也相应增大,从而提高了土壤有机碳含量,NPK 处理土壤有机碳含量显著高于其他处理(NP 处理除外)也证明了这点。土壤有机碳含量提高能为微生物提供更充足的反应底物和能源,而有机碳作为绝大多数异养微生物的细胞能源和电子受体,能促进异养硝化和反硝化作用从而促进 N₂O 排放^[23-24]。本研究中,NP 处理的土壤 N₂O 排放总量显著低于 NPK 处理,可能是 NP 处理提高了冬小麦对土壤钾素吸收,从而消耗了大量的土壤钾^[25],而土壤钾缺乏会影响到土壤微生物对氮素的代谢和转化^[26]。本研究中,从平均值看,N 处理的土壤 N₂O 排放强度最高,NP 处理最低,其他处理居中。总体而言,随着土壤肥力的提升,冬小麦-夏休闲体系的土壤 N₂O 排放总量提高。从协调作物产量、土壤肥力提升和 N₂O 排放来看,氮肥与磷肥配施(NP)或者氮、磷、钾肥配施(NPK)是本区域较好的施肥方式。

4 结 论

与 CK 相比,长期单施氮肥(N)处理的小麦产量较低,但显著提高了 N₂O 排放总量和排放强度;长期氮、钾肥配施(NK)或者磷、钾肥配施(PK)处理的土壤 N₂O 排放强度和产量均较低;长期氮、磷肥配施(NP)或者氮、磷、钾肥配施(NPK)处理的土壤肥力、小麦产量和 N₂O 排放总量均显著增加,但 N₂O 排放强度明显降低,综合考虑,NP 和 NPK 处理是本区域较好的施肥方式。

[参考文献]

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013: 1535.
- [2] 国家发展和改革委员会. 中华人民共和国气候变化初始国家信息通报 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
National Development and Reform Commission. The People's Republic of China initial national communications on climate change [M]. Beijing: China Planning Press, 2004.
- [3] Gu J X, Zheng X H, Zhang W. Background nitrous oxide emis-

- sions from croplands in China in the year 2000 [J]. *Plant and Soil*, 2009, 320(1/2): 307-320.
- [4] 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 肥料施用及环境因子对农田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(5): 913-918.
Dong Y H, Ouyang Z, Li Y S, et al. Influence of fertilization and environmental factors on CO₂ and N₂O fluxes from agricultural soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(5): 913-918.
- [5] 张仲新, 李玉娥, 华 璐, 等. 不同施肥量对设施菜地 N₂O 排放通量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 269-275.
Zhang Z X, Li Y E, Hua L, et al. Effects of different fertilizer levels on N₂O flux from protected vegetable land [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(5): 269-275.
- [6] Ju X T, Lu X, Gao Z L, et al. Processes and factors controlling N₂O production in an intensively managed low carbon calcareous soil under sub-humid monsoon conditions [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159: 1007-1016.
- [7] De Klein C A M, Sherlock R R, Cameron K C, et al. Nitrous oxide emissions from agricultural soils in New Zealand: a review of current knowledge and directions for future research [J]. *Journal of the Royal Society of New Zealand*, 2001, 31(3): 543-574.
- [8] 高洪军, 张卫建, 彭 畅, 等. 长期施肥下黑土玉米田土壤温室气体排放特征 [J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(5): 422-430.
Gao H J, Zhang W J, Peng C, et al. Emission characteristics of greenhouse gas from maize field of black soil region under long-term fertilization [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(5): 422-430.
- [9] 黄树辉, 蒋文伟, 吕 军, 等. 氮肥和磷肥对稻田 N₂O 排放的影响 [J]. *中国环境科学*, 2005, 25(5): 540-543.
Huang S H, Jiang W W, Lü J, et al. Influence of nitrogen and phosphorus fertilizers on N₂O emissions in rice fields [J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(5): 540-543.
- [10] 顾 帅, 周凌晞, 刘立新, 等. 静态箱-气相色谱法 CO₂ 和 CH₄ 通量观测的质控方法研究 [J]. *气象*, 2010, 36(8): 87-91.
Gu S, Zhou L X, Liu L X, et al. Research of quality control measures in greenhouse gase flux observation using static closed chamber-GC technique [J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(8): 87-91.
- [11] 刘 韵, 柳文丽, 朱 波. 施肥方式对冬小麦-夏玉米轮作土壤 N₂O 排放的影响 [J]. *土壤学报*, 2016, 53(3): 735-745.
Liu Y, Liu W L, Zhu B. Effect of fertilization regime on soil N₂O emission from upland field under wheat-maize rotation system [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3): 735-745.
- [12] 孟 磊, 蔡祖聪, 丁维新. 长期施肥对华北典型潮土 N 分配和 N₂O 排放的影响 [J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 6197-6203.
Meng L, Cai Z C, Ding W X. Effects of long-term fertilization on N distribution and N₂O emission in fluvoaquic soil in North China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6197-6203.
- [13] 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.
- [14] Stehfest E, Bouwman L. N₂O 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.
- [15] Yao Z S, Zheng X H, Wang R, et al. Greenhouse gas fluxes and NO release from a Chinese subtropical rice-winter wheat rotation system under nitrogen fertilizer management [J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2013, 118(2): 623-638.
- [16] Akiyama H, Tsuruta H, Watanabe T. N₂O and NO emissions from soils after the application of different chemical fertilizers [J]. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, 2(3/4): 313-320.
- [17] 刘运通, 李玉娥, 万运帆, 等. 不同氮磷肥施用对春玉米农田 N₂O 排放的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(7): 1468-1475.
Liu Y T, Li Y E, Wang Y F, et al. Nitrous oxide emissions from spring-maize field under the application of different nitrogen and phosphorus fertilizers [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7): 1468-1475.
- [18] 蔡廷江, 王连峰, 温丽燕, 等. 培养实验研究长期不同施肥制度下中层黑土氧化亚氮的排放特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(2): 219-223.
Cai Y J, Wang L F, Wen L Y, et al. Nitrous oxide emission from long-term fertilized black soil by laboratory incubation [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 219-223.
- [19] 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.
- [20] 黄 晶, 张杨珠, 刘宏斌, 等. 长期不同施肥条件下红壤小麦和玉米季 CO₂、N₂O 排放特征 [J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(4): 7-13.
Huang J, Zhang Y Z, Liu H B, et al. CO₂ and N₂O emissions from red soil during wheat and corn growing seasons under different patterns of long-term fertilization [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 7(4): 7-13.
- [21] 郭 芸, 孙本华, 王 颖, 等. 长期施用不同肥料土 PLFA 指纹特征 [J]. *中国农业科学*, 2017, 50(1): 94-103.
Guo Y, Sun B H, Wang Y, et al. PLFA fingerprint characteristics of an anthropogenic loess soil under long-term different fertilizations [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(1): 94-103.

(下转第 122 页)

- Hou J W, Xing C F, Lu Z H, et al. Effects of different straw biochar on bacterial communities in yellow soil of Guizhou Province [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(23): 4485-4495.
- [20] Pauli E A, Clark F E. *Soil microbiology and biochemistry* [M]. San Diego, California: Academic Press, 1989.
- [21] Blackmer A M, Bremner J M. Inhibitory effect of nitrate on reduction of N_2O to N_2 by soil microorganisms [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1978, 10: 187-191.
- [22] Kiese R, Papen H, Zumbusch E, et al. Nitrification activity in tropical rain forest soils of the Coastal Low-lands and Atherton Tablelands, Queensland, Australia [J]. *Plant Nutr Soil Sci*, 2002, 165: 682-685.
- [23] 刘 佳, 陈晓芬, 刘 明, 等. 长期施肥对旱地红壤细菌群落的影响[J/OL]. *土壤学报*, 1-12 [2019-03-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20190226.1030.004.html>.
- Liu J, Chen X F, Liu M, et al. Effects of long-term fertilization on bacterial community in upland red soil [J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*, 1-12 [2019-03-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20190226.1030.004.html>.

(上接第 114 页)

- [22] 佟 帆. 长期施肥下黑土氮素组分含量及 N_2O 排放特征 [D]. 南昌: 江西农业大学, 2011.
- Tong F. The feature of nitrogen component content and emission of N_2O on the black soil under long-term fertilization [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2011.
- [23] Akiyama H, Tsuruta H. Effect of chemical fertilizer form on N_2O , NO and NO_2 fluxes from Andisol field [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2/3): 219-230.
- [24] Cuello J P, Hwang H Y, Gutierrez J, et al. Impact of plastic film mulching on increasing greenhouse gas emissions in temperate upland soil during maize cultivation [J]. *Appl Soil Ecology*, 2015, 91: 48-57.
- [25] 王 蕊, 王百群, 王 昊, 等. 长期施用氮磷肥对土壤钾素的影响 [J]. *水土保持研究*, 2017(4): 58-63.
- Wang R, Wang B Q, Wang H, et al. Effects of long-term application of nitrogen and phosphorus fertilizers on potassium of Lou soil [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017(4): 58-63.
- [26] 张 敏, 孙宝利, 宋阿琳, 等. 微生物多样性对土壤氮磷钾转化、酶活性及油菜生长的影响 [J]. *生态学报*, 2016, 36(18): 5856-5864.
- Zhang M, Sun B L, Song A L, et al. Effects of soil microbial diversity on soil NPK transformation, enzyme activities, and canola growth [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(18): 5856-5864.