

王永生, 张爱平, 刘汝亮, 等. 优化施氮对宁夏引黄灌区稻田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6):1218–1224.

WANG Yong-sheng, ZHANG Ai-ping, LIU Ru-liang, et al. Effects of optimized N fertilization on carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes in paddy fields in Yellow River water irrigation region of Ningxia[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6):1218–1224.

优化施氮对宁夏引黄灌区稻田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量的影响

王永生^{1,2}, 张爱平^{3*}, 刘汝亮⁴, 杨世琦³, 李存军^{1,2}

(1.北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 2.国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097; 3.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部农业环境重点实验室, 农业清洁流域创新团队, 北京 100081; 4.宁夏农林科学院, 银川 750000)

摘要:针对宁夏引黄灌区稻田施氮严重过量现象,在宁夏引黄灌区的青铜峡稻田,采用静态箱-气相色谱法,通过田间试验研究常规施氮(N300)、优化施氮(N240)和不施氮(N0)对水稻不同生育期 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量以及稻田增温潜势(GWP)的影响。结果表明: CO_2 排放主要在水稻灌浆和成熟期, CH_4 排放主要发生在水稻孕穗期,而 N_2O 排放关键期在水稻的分蘖和拔节期。与 N0 处理相比,施氮能显著增加稻田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放通量以及稻田 GWP;常规施氮处理中 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的累积排放量分别为 18 446.87、146.57 kg C·hm⁻² 和 2.93 kg N·hm⁻²;为期一年的优化施氮没有显著增加水稻生育期内稻田 CO_2 排放,但使灌区稻田 CH_4 和 N_2O 排放分别显著降低了 24.42%和 36.28%。总的来看,为期一年的优化施氮使宁夏引黄灌区稻田 GWP 显著降低了 26.70%。未来应结合土壤有机碳氮形态和含量变化以及土壤微生物技术,分析长期优化施氮对土壤温室气体通量的影响机制。

关键词:宁夏引黄灌区;优化施氮;土壤;温室气体;增温潜势

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)06-1218-07 doi:10.11654/jaes.2016.06.027

Effects of optimized N fertilization on carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes in paddy fields in Yellow River water irrigation region of Ningxia

WANG Yong-sheng^{1,2}, ZHANG Ai-ping^{3*}, LIU Ru-liang⁴, YANG Shi-qi³, LI Cun-jun^{1,2}

(1.Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China; 2.National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China; 3.Institute of Agro-Environment and Sustainable Development, CAAS/Key Laboratory of Agro-Environment and Climate Change, China Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 4.Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750000, China)

Abstract: Excessive nitrogen (N) fertilizer application is a widespread practice in Yellow River water irrigation region of Ningxia. Previous studies have demonstrated that optimized N fertilization can not only improve rice yield but also reduce nitrogen leaching. However, there was little information available about the responses of soil greenhouse gas fluxes to optimized N fertilization in this region. A field experiment was conducted to evaluate the effects of different N fertilization on carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) fluxes and global warming potential (GWP) in paddy field in Yellow River water irrigation region of Ningxia, using static chamber technique and gas chromatography. Treatments included conventional N fertilization (N300), optimized N fertilization (N240) and no N fertilization (N0). Our results showed obvious differences in greenhouse gas fluxes during the rice growth period. Higher CO_2 emissions appeared at filling and maturity stages, but CH_4 emissions mainly occurred at booting stage. However, the peak of N_2O emissions was observed at tillering and elongation

收稿日期:2015-11-30

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(201ZX07201-009);中央公益性科研院所基本科研业务费专项资金(BSRF201306)

作者简介:王永生(1985—),男,山东潍坊人,博士,助理研究员,主要从事土壤碳氮循环关键过程及微生物机理研究。E-mail: wyswqj@163.com

*通信作者:张爱平 E-mail: apzhang0601@126.com

stages. Applying nitrogen significantly increased soil CO₂, CH₄, and N₂O emissions and the global warming potential. During the experimental period, average CO₂, CH₄, and N₂O fluxes were 18 446.87 kg C·hm⁻², 146.57 kg C·hm⁻², and 2.93 kg N·hm⁻², respectively. One-season optimized N fertilization did not affect CO₂ emissions, but significantly reduced CH₄ and N₂O emissions by 24.42% and 36.28%, respectively, as compared with conventional N fertilization. Overall, our results indicate that the global warming potential of paddy field was significantly reduced by 26.70% by optimized N fertilization in Yellow River water irrigation region of Ningxia. Further research is needed to analyze the mechanisms of soil greenhouse gas fluxes under long-term optimized N fertilization by integrating the variations of soil organic carbon and N availability and soil microbiology methods.

Keywords: Yellow River water irrigation region of Ningxia; optimized N fertilization; soil; greenhouse gas; global warming potential

人类活动导致大气中 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的浓度分别以年均 0.5%、0.8% 和 0.3% 的速率增加^[1],使全球地表平均温度上升了 0.3~0.6 °C^[2]。稻田是重要的温室气体排放源,其 CH₄ 的年排放量为 31~112 Tg,占全球 CH₄ 总排放的 5%~19%^[1],我国农业生态系统的 CH₄ 排放量为 9.2 Tg·a⁻¹^[3]。稻田的过量施肥和烤田期的干湿交替使 N₂O 排放量不断增加,我国稻田水稻生长期 N₂O 排放量为 29 Gg·a⁻¹,占我国农田 N₂O 年排放总量的 7%~11%^[4]。我国的水稻种植面积约占全球的 20%,研究稻田温室气体排放及其减排措施,对于发展低碳农业和控制温室效应具有重要意义。

水稻是宁夏引黄灌区的重要粮食作物,灌区的灌溉条件便利,光热资源丰富^[5],水稻种植面积约为 18×10⁴ hm²,占全国水稻种植总面积的 0.6%,稻谷产量占全国总产的 0.71%,是水稻的高产区域之一,平均单产比全国平均水平高 1213 kg·hm⁻²,是西北乃至全国的重要商品粮基地^[6]。但水稻种植过程中化肥平均施用量较高,还以每年 6% 的速率增长。近 5 年的农用化肥施用量为 8.746×10⁸ kg·a⁻¹,其中氮肥占 54.81%^[7]。稻田氮肥施用过度,降低了氮素利用效率,提高了地表水、土壤和浅层地下水体中硝酸盐浓度^[8],增加了土壤温室气体排放^[9-10]。目前,引黄灌区稻田氮肥施用量为 300 kg N·hm⁻²,远高于全国的平均水平^[11-12]。近些年来,宁夏引黄灌区开展了大量的氮肥减量控制试验,在氮肥施用量减至 240 kg N·hm⁻² 的情况下,不仅能增加水稻对土壤氮素的利用率^[13-14],减少氮素淋失^[15-18]和 N₂O 排放^[19],还能提高作物产量^[14-15]。因此,240 kg N·hm⁻² 的施氮量被推荐为宁夏引黄灌区的稻田优化施氮水平。由于施氮对稻田温室气体排放的影响并不一致,从稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 三种温室气体排放以及增温潜势角度出发,评价宁夏引黄灌区优化施肥对稻田温室效应影响的综合研究极为重要。本研究目的在于,对比分析常规施肥和优化施肥条件下,宁夏引黄灌区稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的排放

通量以及对稻田增温潜势(Global warming potential, GWP)的影响。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于宁夏引黄灌区青铜峡市叶升镇正鑫源现代农业公司(106°11'35" E, 38°07'26" N)。年均降水量 192.9 mm,年蒸发量 1 762.9 mm,无霜期 163 d,年均积温 3 866.3 °C。土壤类型为灌淤土,0~20 cm 土壤有机质含量 16.1 g·kg⁻¹,全氮 0.9 g·kg⁻¹,速效氮 62 mg·kg⁻¹,全磷 0.9 g·kg⁻¹,速效磷 11.87 mg·kg⁻¹,土壤 pH 值 8.49,容重 1.41 g·kg⁻¹^[20]。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,设置常规施氮(300 kg N·hm⁻², N300)、优化施氮(240 kg N·hm⁻², N240)和对照不施氮(0 kg N·hm⁻², N0)3 个处理,每个处理重复 3 次,共 9 个小区,小区面积为 65 m²。优化施氮处理与常规施氮的区别仅为氮肥减量,施氮时间和方法以及其他田间管理措施相同。试验小区之间田埂宽 30 cm,田埂两侧开沟深 120 cm,用长寿塑料膜相互隔离,防止小区之间水分侧渗和串流。试验灌水引自黄河,各小区设置单独的灌水口和排水口。

水稻种植品种为宁粳 43 号,5 月 29 日插秧,10 月 1 日收获。所用氮肥为尿素(N, 46%),磷肥为重过磷酸钙(P₂O₅, 46%),钾肥为氯化钾(K₂O, 60%)。常规施氮和优化施氮的管理措施与当地常规措施同步。氮肥 3 次施入土壤,其中 50% 作为基肥,30% 的分蘖肥和 20% 的拔节肥分别在 6 月 9 日和 6 月 24 日追施。水稻生长季内共灌水 18 次,每个小区的灌溉量为 14 500 m³·hm⁻²,不同生育阶段的灌水量次数详见表 1。

1.3 样品采集及测定方法

土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的获取与测定采用静态箱-气相色谱法。静态箱由不锈钢材料制成,分为底座(60 cm×50 cm×30 cm)和盖箱(60 cm×50 cm×150 cm)

表1 水稻各生育期内灌水次数和气体观测频率

Table 1 Frequency of water irrigation and greenhouse gas sampling during rice growth period

生育阶段 Growth stage	泡田期 Soaking	分蘖期 Tillering	拔节期 Elongation	孕穗期 Booting	灌浆期 Filling	成熟期 Maturing	休闲期 Fallow
时间段(月·日)Time period	4.29—5.28	5.29—6.20	6.21—6.30	7.1—7.31	8.1—8.25	8.26—9.27	9.28—11.20
取样次数 Sampling	5	5	3	2	2	2	2
灌水次数 Irrigation	2	8	3	3	1	1	0

两部分。插秧前将底座埋入地下,采样时注水密封,盖箱外覆盖白色防水罩以减少取样时太阳辐射对箱内温度的影响。根据株行距大小,插秧后底座内共有水稻10株。温室气体观测时间为2014年4月至11月,观测期内采用前紧后松的采样频率,共采样21次。在插秧、施用分蘖和拔节肥后进行加强采样,在水稻收获前后每月采样1次,其他时间每月采样3次。根据水稻的生长情况和取样时间,将整个观测时间划分为6个时期,每个阶段内的取样次数详见表1。气体采集时间为上午8:00—10:00,在30 min时段内,用100 mL注射器在0、10、20、30 min时分别抽取1次气样,每个样方共采集4个气样,用铝箔气袋(Delin, China)保存,利用气相色谱(Agilent7890, USA)测定温室气体浓度。

1.4 数据分析

土壤温室气体通量根据箱内气体浓度随时间的变化率计算^[21],计算公式如下:

$$F = \rho \times H \times \frac{dc}{dt} \times \frac{273}{273 + T}$$

式中: F 为温室气体通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 或 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 为标准状态下温室气体浓度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; H 为静态箱高度, m ; $\frac{dc}{dt}$ 为温室气体的排放速率, $\text{mL} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$; T 为采样箱内气体温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

本研究选取100年尺度来计算灌区稻田 CH_4 和 N_2O 排放的增温潜势(GWP):

$$\text{GWP} = 25 \times [\text{CH}_4] + 298 \times [\text{N}_2\text{O}]$$

式中:25和298分别为 CH_4 和 N_2O 在100年尺度上相对于 CO_2 的GWP倍数。

采用观测期内温室气体排放总量和采样次数计算温室气体平均排放速率,年累积排放量由测定期间内每天的通量累加得到,无实测数据的碳排放采用前后实测数据,根据线性插值得到。采用重复测量方差分析,比较不同施氮处理、生育阶段的温室气体排放通量差异。数据处理及绘图分别采用SPSS 16.0和Sigmaplot 10.0。

2 结果与分析

2.1 稻田 CO_2 通量

观测期内,灌区稻田 CO_2 排放通量存在明显的动态变化($P < 0.001$),排放峰出现在水稻成熟期,最小值出现在泡田期(图1和表2)。N0处理中稻田 CO_2 累计排放量为 $12\,305.18 \text{ kg C} \cdot \text{hm}^{-2}$,施氮显著增加了灌区稻田 CO_2 的排放($P = 0.023$)(表3)。N300和N240对稻田 CO_2 排放通量贡献的增加比例分别为49.91%和43.73%,主要表现在水稻孕穗、灌浆和成熟期(表2)。与N300相比,N240没有显著降低灌区稻田 CO_2 累计排放量。

2.2 稻田 CH_4 通量

灌区稻田 CH_4 通量呈现单峰型变化(图1, $P < 0.001$),排放峰出现在水稻孕穗期,而在水稻收获后的休闲期,土壤为 CH_4 吸收汇。N0处理中稻田 CH_4 累计排放量为 $72.73 \text{ kg C} \cdot \text{hm}^{-2}$,施氮显著增加了灌区稻田 CH_4 的排放($P = 0.045$)。N300和N240处理稻田 CH_4 的排放均值分别为 146.57 、 $110.77 \text{ kg C} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别增加了101.53%和52.31%,增加期主要为水稻孕穗期(表2和表3)。与N300相比,N240显著降低了24.42%的稻田 CH_4 排放。

2.3 稻田 N_2O 通量

稻田 N_2O 排放通量在水稻生育期内呈现显著的阶段性变化(图1, $P < 0.001$),最大排放出现在分蘖和拔节期。N0处理中稻田 N_2O 排放均值为 $1.16 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,显著低于N300处理的 $2.93 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和N240处理的 $1.87 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表3)。施氮显著增加灌区稻田 N_2O 排放($P = 0.003$),尤其是在分蘖和拔节期(表2)。与N300相比,N240对稻田 N_2O 排放通量的减少作用显著,降幅达到了36.28%。

2.4 稻田GWP

在不施氮的条件下,灌区稻田的GWP为 $2\,164.18 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$,N300和N240均显著增加了灌区稻田的GWP,分别为 $4\,536.60$ 、 $3\,325.20 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。与N300相比,N240使宁夏引黄灌区稻田GWP显著降低了

26.70%(表 3)。

3 讨论

3.1 优化施氮对稻田温室气体通量的影响

土壤中 CO₂ 来源于土壤自养呼吸(根系呼吸)和异养呼吸(微生物呼吸)^[22]。本研究中稻田 CO₂ 的排放峰出现在水稻生长的中后期,尤其是成熟期(图 1),原因在于:(1)水稻生长初期,植株矮小,根系分泌物

较少,不仅直接限制了自养呼吸,还因底物缺少间接限制了异养呼吸^[23],而到了中后期,根系生物量和腐败分泌物增加,土壤呼吸作用加强^[24-25];(2)水稻生长初期土壤温度较低,而且土壤处于淹水状态,限制土壤呼吸作用,在 8—9 月,由于灌溉与晒田交替,土壤通气性增强,温度升高,促进了土壤有氧呼吸的进行^[25-26]。施氮显著增加稻田土壤 CO₂ 排放的研究较多,本研究也有同样的结果,而且施氮主要增加灌区水稻孕穗、

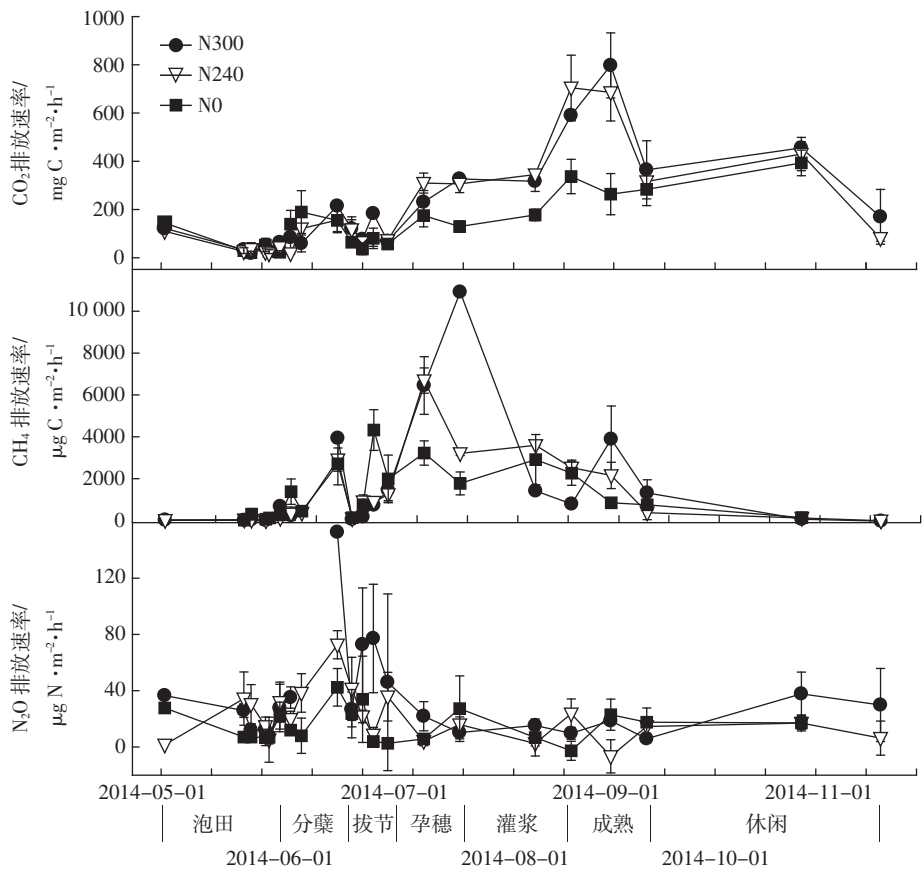


图 1 观测期内稻田温室气体排放速率变化情况

Figure 1 Variations of greenhouse gas emission rates in paddy field during experimental period

表 2 水稻不同生育期内稻田温室气体排放速率

Table 2 Variations of greenhouse gas emission rates in paddy field at different growth stages of rice

处理 Treatment		泡田 Soaking	分蘖 Tillering	拔节 Elongation	孕穗 Booting	灌浆 Filling	成熟 Maturing	休闲 Fallow
N300	CO ₂ /kg C·hm ⁻²	37.20±3.54	108.41±5.24	109.49±14.21	278.77±26.45a	453.71±22.87a	581.02±7.12a	312.58±69.04
N240		30.45±10.76	93.60±8.53	74.37±16.81	307.92±37.51a	524.99±62.79a	500.80±55.07a	255.58±29.06
N0		38.73±14.33	114.13±13.32	66.67±26.95	152.09±31.02b	257.21±45.53b	273.75±73.27b	393.20±53.18
N300	CH ₄ /kg C·hm ⁻²	32.93±12.66	1 226.38±56.90a	790.21±200.45c	8 684.01±684.58a	1 100.84±39.96b	2 573.50±919.62	17.15±19.29
N240		36.87±3.15	760.73±143.41b	1 012.27±185.06b	4 948.35±331.14ab	3 056.40±179.54a	1 264.78±440.82	55.96±22.69
N0		109.50±54.47	988.67±262.91b	2 350.47±336.67a	2 498.69±281.91b	2 854.99±881.38ab	798.67±121.20	140.70±41.32
N300	N ₂ O/kg N·hm ⁻²	15.42±1.60	53.52±6.63a	65.33±21.55a	16.07±3.61a	12.52±1.44	12.24±1.68ab	33.81±20.17
N240		20.38±9.85	40.82±6.09ab	22.06±2.61b	10.05±4.26ab	13.11±6.05	3.98±4.57b	11.37±4.66
N0		8.33±2.22	21.68±3.01b	13.48±10.26b	4.87±2.02b	2.02±3.97	20.28±7.33a	17.12±5.68

表 3 稻田温室气体累积排放通量及增温潜势

Table 3 Average emission fluxes and global warming potential of greenhouse gases from paddy fields

处理 Treatment	CO ₂ /kg C·hm ⁻²	CH ₄ /kg C·hm ⁻²	N ₂ O/kg N·hm ⁻²	GWP/kg CO ₂ ·hm ⁻²
N300	18 446.87±696.85a	146.57±13.33a	2.93±0.21a	4 536.60±341.42a
N240	17 686.83±894.81a	110.77±9.19b	1.87±0.21b	3 325.20±261.62b
N0	12 305.18±1 021.01b	72.73±8.39c	1.16±0.14c	2 164.18±243.21c

灌浆和成熟期土壤 CO₂ 排放(表 2)。与常规施氮相比,优化施氮并没有显著减少土壤 CO₂ 排放(表 3),与赵峥等^[24]的研究结果一致。施氮引起的植株生物量增大是引起生态系统 CO₂ 排放增加的重要原因^[27]。研究发现,CO₂ 排放与水稻产量存在显著的相关性^[28],但在该地区,与常规施氮相比,优化施氮并没有显著影响水稻的生长和产量^[29],水稻根系分泌物并未显著增加。因此,优化施氮并没有显著增加微生物活动的底物,CO₂ 排放的增加也不明显。施氮引起的土壤有机碳形态和含量的变化,也可能是引起 CO₂ 排放改变的重要原因^[23],但在宁夏引黄灌区缺少关于此方面的研究。此外,本研究在气体取样过程中,静态箱内水稻植株的光合作用也会对稻田 CO₂ 通量产生影响,下一步需要增加 CO₂ 净排放的相关研究。

土壤-大气界面 CH₄ 通量是土壤内部 CH₄ 产生和氧化共同作用的结果,受底物和扩散速率的影响^[30]。在稻田淹水期,随着水稻分蘖的增加,植株生长进入旺盛阶段,根系分泌物的增加以及土壤有机质的不断分解,厌氧环境中产生的 CH₄ 气体,随着水稻发达的通气组织排向大气^[31],使 CH₄ 通量在孕穗期达到最大(表 2),N300、N240 和 N0 处理中该段时期的 CH₄ 排放分别占总排放量的 60.20%、44.44%和 26.38%。与常规施氮相比,优化施氮显著减少了 CH₄ 排放(表 3),主要原因也在于减少了孕穗期 CH₄ 的排放。水稻生长后期的干湿交替使土壤通气性增加,从而使 CH₄ 氧化能力加强^[32],因此排放通量不断下降。由于常规施氮和优化施氮处理下,水稻生长没有显著性差异^[29],优化施氮显著减少 CH₄ 排放的原因可能与 CH₄ 氧化作用的降低有关。研究发现,随着施用量的增加,氮肥对土壤 CH₄ 氧化作用的抑制作用增强^[33],因此优化施氮处理中 CH₄ 氧化作用强于常规施氮,使稻田 CH₄ 排放量显著减少。

化学反硝化与土壤中的硝化作用、反硝化作用、硝态氮异化还原成铵作用都能产生 N₂O。施肥和田间水管理是影响稻田 N₂O 排放的关键因素^[34]。本研究中,基肥、分蘖肥和拔节肥的 3 次施入,为反硝化细菌

提供了大量的氮源,使 N₂O 排在分蘖期和拔节期出现显著的排放峰(图 1,表 2),与张惠等^[19]的研究结果一致。监测期内,常规施氮稻田 N₂O 排放总量为 2.93 kg N·hm⁻²,显著高于优化施氮的 1.87 kg N·hm⁻²,两个处理中氮素损失比例分别为 0.98%和 0.78%,因此, N₂O 排放并不是宁夏引黄灌区稻田氮素损失的主要途径^[19,35]。施氮引起的土壤硝态氮含量的增加是灌区稻田 N₂O 排放增加的主要原因^[18-19]。在对宁夏的灵武灌区和青铜峡灌区的稻田氮肥减量研究发现,与常规施氮相比,优化施氮可显著提高氮素利用效率^[14],同时增加对土壤原有氮素的吸收利用能力^[13],减少灌区稻田土壤硝态氮和铵态氮含量^[16,19],使硝化作用和反硝化作用的底物减少,降低 N₂O 排放。因此我们认为,在宁夏引黄灌区,优化施氮对土壤有效氮含量的降低作用可能是稻田 N₂O 排放降低的主要原因。

3.2 优化施肥对稻田 GWP 的影响

在百年尺度上,CH₄ 和 N₂O 的 GWP 分别是 CO₂ 的 25 倍和 298 倍^[1]。本研究中,施氮显著增加了灌区稻田的 GWP,常规施肥和优化施肥的增加比例分别为 109.62% 和 53.65%(表 2),而且优化施氮处理的 GWP 显著低于常规施氮。按宁夏灌区水稻种植面积为 1.8×10⁵ hm² 计算,得出优化施肥比常规施肥在每个水稻生长季内可减少碳排放 2.18×10⁸ kg,相当于 Li 等^[36]通过 DNDC 模拟的我国 3×10⁷ hm² 稻田的 CH₄-C 年排放量(6.4~12.0×10⁶ kg)所产生的温室效应。但该结果只是优化施肥 1 年的表现,还需要长期实验的修正。

4 结论与展望

研究表明,施氮能显著增加宁夏引黄灌区稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放,从而显著增加稻田 GWP;CO₂ 排放主要在水稻灌浆和成熟期,CH₄ 排放主要发生在水稻孕穗期,而 N₂O 排放关键期在分蘖和拔节期。与常规施氮相比,1 年的优化施氮结果倾向于降低土壤 CO₂ 排放,同时显著降低了稻田 24.42%的 CH₄ 累积排放和 36.28%的 N₂O 累积排放量,总的来看优化施氮

显著降低了灌区稻田 GWP。

本研究中静态箱内植株的存在,使温室气体通量变化对优化施氮的响应结果还存在一定的局限性。在下一步的研究中,首先应加强宁夏引黄灌区施氮对土壤碳氮温室气体的长期研究,同时开展剪除水稻后,优化施氮对土壤温室气体通量的影响研究。其次应分别建立土壤有机碳氮形态和含量与土壤碳氮温室气体通量的关系,明确引起温室气体通量变化的原因;利用 Biolog 微平板法和磷脂脂肪酸法分析施肥对土壤微生物群落结构和呼吸代谢的影响,利用末端限制性片段技术分析施氮对甲烷产生和氧化菌、氨氧化菌与反硝化细菌功能基因的影响,从微生物角度探讨施氮对稻田土壤温室气体排放通量的影响。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007—the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. Climate Change 1990: The IPCC scientific assessment, report prepared for intergovernmental panel on climate change by working group I[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [3] 李长生, 肖向明, Frolking S, 等. 中国农田的温室气体排放[J]. 第四纪研究, 2003, 23(5): 494–503.
LI Chang-sheng, XIAO Xiang-ming, Frolking S, et al. Greenhouse gas emission from croplands of China[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(5): 494–503.
- [4] Zou J W, Huang Y, Zheng X H, et al. Quantifying direct N₂O emissions in paddy fields during rice growing season in mainland China: Dependence on water regime[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(37): 8030–8042.
- [5] 刘汝亮, 李友宏, 张爱平, 等. 氮肥后移对引黄灌区水稻产量和氮素淋溶损失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 16–20.
LIU Ru-liang, LI You-hong, ZHANG Ai-ping, et al. Effect of postponing N application on rice yield and N losses in Yellow River irrigation area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2): 16–20.
- [6] 国家统计局. 中国统计年鉴(2009)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
National Bureau of Statistics of China. China statistical year book 2009 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2009.
- [7] 宁夏回族自治区统计局. 宁夏统计年鉴(2008)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
Ningxia Statistics Bureau. Ningxia statistical yearbook 2008[M]. Beijing: China Statistics Press, 2008.
- [8] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(19): 3041–3046.
- [9] Shcherbak I, Millar N, Robertson G P. Global metaanalysis of the non-linear response of soil nitrous oxide(N₂O) emissions to fertilizer nitrogen [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(25): 9199–9204.
- [10] Robertson G P, Paul E A, Harwood R R. Greenhouse gases in intensive agriculture: Contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere[J]. *Science*, 2000, 289(5486): 1922–1925.
- [11] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992: 228–245.
ZHU Zhao-liang, WEN Qi-xiao. Soil nitrogen in China [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992: 228–245.
- [12] 李红莉, 张卫峰, 张福锁, 等. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1136–1143.
LI Hong-li, ZHANG Wei-feng, ZHANG Fu-suo, et al. Chemical fertilizer use and efficiency change of main grain crops in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(5): 1136–1143.
- [13] 张晴雯, 张惠, 易军, 等. 青铜峡灌区水稻田化肥氮去向研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(8): 1707–1714.
ZHANG Qing-wen, ZHANG Hui, YI Jun, et al. The fate of fertilizer-derived nitrogen in a rice field in the Qingtongxia irrigation area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(8): 1707–1714.
- [14] 李巧珍, 陈晓群, 李玉中, 等. 宁夏灌区不同氮磷组合对水稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 中国农业气象, 2010, 31(3): 379–383.
LI Qiao-zhen, CHEN Xiao-qun, LI Yu-zhong, et al. Effect of different N/P fertilizer application on rice yield and N use efficiency in irrigation area of Ningxia[J]. *Chinese Journal of Agromtrorology*, 2010, 31(3): 379–383.
- [15] 陈晓群, 孙玉芳, 赵营, 等. 不同 N、P 肥配比对水稻产量、养分吸收及稻田水环境的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(7): 173–180.
CHEN Xiao-qun, SUN Yu-fang, ZHAO Ying, et al. Effect of different N and P rates on the rice yield, nutrients uptake and water environment of paddy field[J]. *Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(7): 173–180.
- [16] 易军, 张晴雯, 杨正礼. 宁夏引黄灌区稻田氮素浓度变化与迁移特征[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 771–777.
YI Jun, ZHANG Qing-wen, YANG Zheng-li. Concentration change and migration characteristics of nitrogen in the paddy field of Ningxia Yellow River irrigation area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 771–777.
- [17] 周丽娜, 刘汝亮, 张爱平, 等. 引黄灌区灌淤土氮素淋失特征土柱模拟研究[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(6): 513–520.
ZHOU Li-na, LIU Ru-liang, ZHANG Ai-ping, et al. Anthropogenic-alluvial soil nitrogen fertilizer leaching loss characteristics study using soil column simulation in Yellow River irrigation area, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(6): 513–520.
- [18] Zhang A P, Liu R L, Gao J, et al. Regulating N application for rice yield and sustainable eco-agro development in the upper reaches of Yellow River basin, China[J]. *Scientific World Journal*, 2014, doi:org/10. 1155/2014/239279.
- [19] 张惠, 杨正礼, 罗良国, 等. 黄河上游灌区稻田 N₂O 排放特征[J]. 生态学报, 2011, 31(21): 6606–6615.
ZHANG Hui, YANG Zheng-li, LUO Liang-guo, et al. The feature of

- N_2O emission from a paddy field in irrigation area of the Yellow River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(21):6606–6615.
- [20] 张爱平, 刘汝亮, 高 霁, 等. 生物炭对灌淤土氮素流失及水稻产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12):2395–2403.
- ZHANG Ai-ping, LIU Ru-liang, GAO Ji, et al. Effects of biochar on nitrogen losses and rice yield in anthropogenic-alluvial soil irrigated with Yellow River water[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12):2395–2403.
- [21] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH_4 , CO_2 and N_2O emissions from a short-plant ecosystem[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(5):842–844.
- [22] Kuzyakov Y. Sources of CO_2 efflux from soil and review of partitioning methods[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(3):425–448.
- [23] Fang H J, Cheng S L, Yu G R, et al. Experimental nitrogen deposition alters the quantity and quality of soil dissolved organic carbon in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 81:1–11.
- [24] 赵 峥, 岳玉波, 张 翼, 等. 不同施肥条件对稻田温室气体排放特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11):2273–2278.
- ZHAO Zheng, YUE Yu-bo, ZHANG Yi, et al. Impact of different fertilization practices on greenhouse gas emission from paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11):2273–2278.
- [25] 侯玉兰, 王 军, 陈振楼, 等. 崇明岛稻麦轮作系统稻田温室气体排放研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(9):1862–1867.
- HOU Yu-lan, WANG Jun, CHEN Zhen-lou, et al. Emission of greenhouse gases from paddy fields of rice-wheat rotation system in Chongmingisland, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(9):1862–1867.
- [26] Tesarova M, Gloser J. Total CO_2 output from alluvial soils with two types of grassland communities[J]. *Pedobiologia*, 1976, 16:364–372.
- [27] Wang Y S, Cheng S L, Fang H J, et al. Contrasting effects of ammonium and nitrate inputs on soil CO_2 emission in a subtropical coniferous plantation of Southern China[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51(7):815–825.
- [28] 薛正平. 水稻田温室气体排放对施氮量响应的试验研究[C]. 全国农业气象与生态环境学术年会论文集, 2006:471–473.
- XUE Zheng-ping. Response of soil methane emission to nitrogen application in paddy field[C]. National Agro-meteorology and Eco-environment of Academic Annual Conference, 2006:471–473.
- [29] 刘汝亮, 张爱平, 李友宏, 等. 长期配施有机肥对宁夏引黄灌区水稻产量和稻田氮素淋失及平衡特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5):947–954.
- LIU Ru-liang, ZHANG Ai-ping, LI You-hong, et al. Rice yield, nitrogen use efficiency (NUE) and nitrogen leaching losses as affected by long-term combined applications of manure and chemical fertilizers in Yellow River irrigated region of Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5):947–954.
- [30] Oh N H, Kim H S, Richter D D. What regulates soil CO_2 concentrations? A modeling approach to CO_2 diffusion in deep soil profiles[J]. *Environmental Engineering Science*, 2005, 22(1):38–45.
- [31] 上官行健, 王明星, 陈德章, 等. 稻田土壤中的 CH_4 产生[J]. 地球科学进展, 1993, 8(5):1–12.
- SHANGGUAN Xing-jian, WANG Ming-xing, CHEN De-zhang, et al. Methane production in rice paddy fields[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1993, 8(5):1–12.
- [32] Li C S, Qiu J J, Frolking S, et al. Reduced methane emissions from large-scale changes in water management of China's rice paddies during 1980–2000[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(20):331–334.
- [33] Wang Y S, Cheng S L, Fang H J, et al. Simulated nitrogen deposition reduces CH_4 uptake and increases N_2O emission from a subtropical plantation forest soil in Southern China[J]. *Plos One*, 2014, 9(4):e93571.
- [34] Xiong Z Q, Xing G X, Zhu Z L. Nitrous oxide and methane emissions as affected by water, soil and nitrogen[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(2):146–155.
- [35] 朱金霞, 张源沛, 郑国保, 等. 氮肥对宁夏地区水稻田 N_2O 排放的影响[J]. 西北农业学报, 2014, 23(1):98–102.
- ZHU Jin-xia, ZHANG Yuan-pei, ZHENG Guo-bao, et al. Effect of nitrogen fertilizer on the emission of N_2O from paddy field in Ningxia, China[J]. *Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica*, 2014, 23(1):98–102.
- [36] Li C S, Mosier A, Wassmann R, et al. Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems: Sensitivity and upscaling[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(1):1–19.