

不同氮肥管理方式对华北粮田 N_2O 排放和作物产量的影响分析

舒晓晓¹, 王艳群¹, 李迎春², 彭正萍^{1*}, 魏珊珊¹, 石新丽¹, 赵延伟¹

(1.河北农业大学资源与环境学院/河北省农田生态环境重点实验室, 河北 保定 071001; 2.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要:通过华北小麦和玉米田已发表文献分析,明确不同施氮量、氮肥基追比及氮素调控措施对土壤 N_2O 排放和作物产量的影响。结果表明:高氮水平下减少氮肥用量并调整基追比有助于减少土壤 N_2O 排放;添加硝化抑制剂双氰胺(DCD)对小麦和玉米产量的提高和土壤 N_2O 的减排效果均较好。兼顾华北粮田 N_2O 减排和作物产量,小麦季推荐合理施氮量 $167\sim 174\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,基追比 1:1,添加 DCD,土壤 N_2O 总排放量为 $0.31\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,籽粒产量 $6\ 200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上;玉米季推荐合理施氮量 $177\sim 181\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,基追比 2:3~1:2,添加 DCD,土壤 N_2O 总排放量 $1.70\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,籽粒产量 $9\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上。

关键词:小麦;玉米;氮肥;不同管理方式; N_2O 排放;产量

中图分类号:S147.22 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-6819(2016)04-0340-09 **doi:**10.13254/j.jare.2016.0037

引用格式:

舒晓晓, 王艳群, 李迎春, 等. 不同氮肥管理方式对华北粮田 N_2O 排放和作物产量的影响分析[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(4): 340-348.

SHU Xiao-xiao, WANG Yan-qun, LI Ying-chun, et al. Effects of Different Nitrogen Management Methods on Soil N_2O Emission and Crop Yield of Grain Field in North China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(4): 340-348.

Effects of Different Nitrogen Management Methods on Soil N_2O Emission and Crop Yield of Grain Field in North China

SHU Xiao-xiao¹, WANG Yan-qun¹, LI Ying-chun², PENG Zheng-ping^{1*}, WEI Shan-shan¹, SHI Xin-li¹, ZHAO Yan-wei¹

(1.College of Resources and Environmental Sciences/Key Laboratory for Farmland Eco-Environment of Hebei, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China; 2.Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Through the published literature analysis of wheat and maize field in North China, this study investigated the effects of different management methods of nitrogen(N) application rates, basal/topdressing ratios and N control measures on the soil N_2O emission and crop yield. The results showed that reducing N application rates and adjusting basal/top dressing ratios under high N level could decrease soil N_2O emissions. Besides, N application with nitrification inhibitor dicyandiamide(DCD) was an effective practice for wheat/maize yield enhancement and soil N_2O emission reduction. In order to reduce the soil N_2O emission as well as ensure crop yield production in North China, the optimal N application rate of $167\sim 174\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ at basal/top dressing ratio 1:1 with DCD was recommended for wheat production. As a result, soil N_2O total emission was $0.31\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and wheat grain yield reached more than $6\ 200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. For maize production, the optimal N application rate of $177\sim 181\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ at basal/top dressing ratios 2:3~1:2 with DCD was regarded as the best practice. Soil N_2O total emission was $1.70\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and maize grain yield exceeded $9\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.

Keywords: wheat; maize; nitrogen fertilizer; different management methods; N_2O emission; crop yield

收稿日期:2016-02-03

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAD11B);国家重点基础研究发展计划项目(2012CB955904);国家自然科学基金项目(41105115);河北农业大学青年学术带头人项目;河北省自然科学基金项目(C2016204078)

作者简介:舒晓晓(1990—),女,陕西人,在读硕士生,主要从事植物营养与生态环境研究。E-mail:shuxiaoxiao789@163.com

*通信作者:彭正萍 E-mail:pengzhengping@sohu.com

大气中温室气体不断增加是气候变暖及相关环境问题的重要根源。N₂O 是一种重要的温室气体,在大气中的浓度比工业化前升高 20%^[1],农业生产中 N₂O 排放占总排放量的 84%^[2]。由氮肥驱动的 N₂O 排放占土壤总 N₂O 排放量的 25%~82%^[3]。

我国农田作物当季氮肥利用率只有 30%左右,不被利用的氮素会对周边土壤、水体和气体产生较大负面影响^[4]。华北平原粮食总产量占全国 1/7,是我国主要粮食产区^[5]。为获高产,农民向农田投入大量氮肥,小麦季高产农区农民平均施纯氮为 250.5 kg·hm⁻²,最大可达 301.5 kg·hm⁻²^[6-7];一般玉米季施氮量为 220~270 kg·hm⁻²,高产农区平均纯氮用量 500~600 kg·hm⁻²,远超过作物的氮素需求。该地区 N₂O 累积排放量为 2.4~7.1 kg·hm⁻²,最高可达 12.6 kg·hm⁻²^[8-9]。针对农田 N₂O 减排的研究主要集中在氮肥用量和种类、耕作措施以及长效肥料、氮素控制剂等方面。众多学者指出,华北地区小麦/玉米轮作中氮肥施用量降至 150~200 kg·hm⁻²,既能保证作物产量又可减少环境污染^[10-12]。胡小康等^[13]研究表明,随氮肥用量增加,土壤 N₂O 排放呈直线或曲线增加。氮素调控剂(DCD)^[14]、氮肥包膜^[15]、纳米增效尿素^[16]等均在促进氮肥利用的同时降低了环境污染风险。

目前,针对华北粮田 N₂O 排放虽进行了大量研究,但大部分是特定区域单一试验结果,缺乏系统性。因此,本文通过查阅大量已发表文献,对华北小麦和玉米田不同氮肥用量、氮肥基追比例以及氮素调控剂等对土壤排放 N₂O 和作物产量的影响进行综合分析,试图明确粮田系统较合理的减排 N₂O 和增产作物模式,为华北地区农业安全生产提供科学依据。

1 材料与方法

本文以冬小麦、夏玉米为研究对象,集中在氮肥施用量、氮肥基追比以及氮素调控剂使用方面,查阅和综合分析近期公开发表的国内外期刊和硕博学位论文。不同文献中的相同指标均换算为统一单位,其中计算 N₂O 减排与作物增产均以各自试验的不施氮肥处理为对照进行核算。采用 MATLAB 软件进行各指标相关性逐步回归分析。各指标计算公式为:

$$\text{N}_2\text{O 排放量增加率}(\%) = (\text{施氮处理 N}_2\text{O 排放量} - \text{不施氮处理 N}_2\text{O 排放量}) / \text{不施氮处理 N}_2\text{O 排放量} \times 100$$

$$\text{作物增产率}(\%) = (\text{施氮处理作物产量} - \text{不施氮处理作物产量}) / \text{不施氮处理作物产量} \times 100$$

$$\text{单位氮肥 N}_2\text{O 排放量}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) = \text{施氮处理 N}_2\text{O 排放量} / \text{纯氮施用量}$$

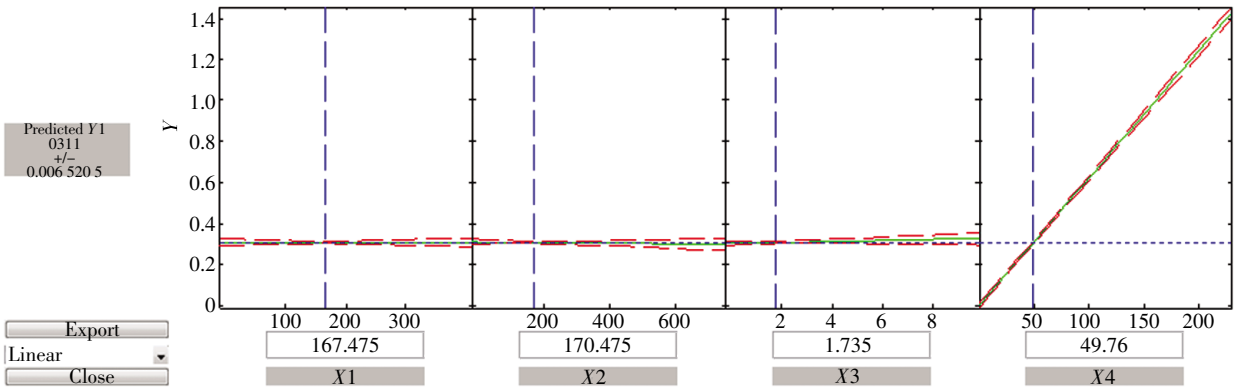
$$\text{单位产量 N}_2\text{O 排放量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = \text{N}_2\text{O 排放量} / \text{作物产量}$$

2 结果与分析

2.1 麦田土壤 N₂O 排放及小麦产量

2.1.1 不同氮肥施用量和基追比对土壤 N₂O 排放及小麦产量的影响

收集华北区麦田 10 个实验 42 组数据,利用 MATLAB 软件统计建模,分别以 N₂O 排放总量和产量为因变量,纯氮用量、N₂O 增排率、单位氮肥 N₂O 排放量、单位产量 N₂O 排放量和增产率为自变量进行逐步回归分析。N₂O 排放总量为因变量时(图 1),根据残差图逐步去除异常值后保留 20 组有效数据,拟合出



图中 X1 为纯氮用量(kg·hm⁻²);X2 为 N₂O 增排率(%);X3 为单位氮肥 N₂O 排放量(g·kg⁻¹);X4 为单位产量 N₂O 排放量(mg·kg⁻¹);Y 为 N₂O 总排放量(kg·hm⁻²)(n=42)^[17-20]

图 1 麦田 N₂O 总排放量逐步回归分析

Figure 1 Stepwise regression analysis of soil N₂O total emissions in wheat field

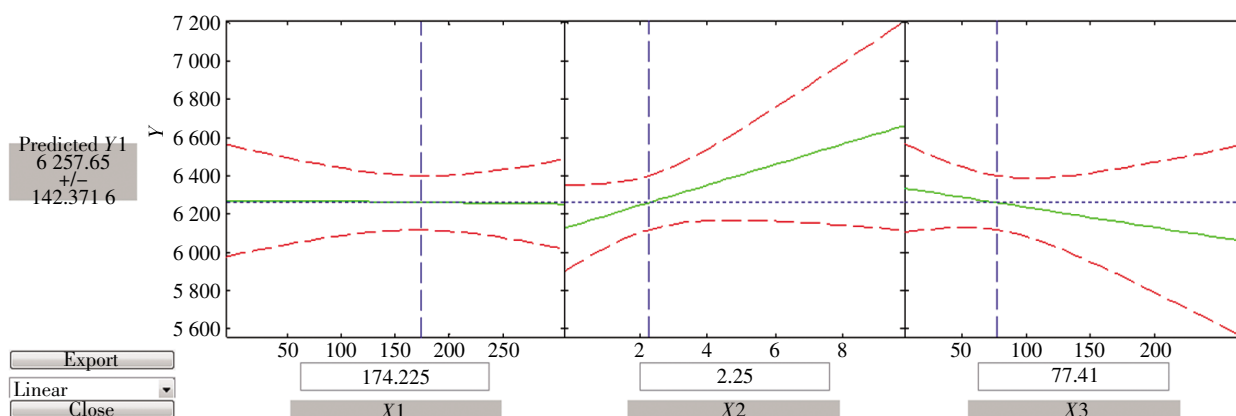
最佳回归方程为 $Y=0.001\ 53-2.77e^{-6}X_1-1.83e^{-5}X_2+0.002\ 16X_3+0.006\ 22X_4(r=0.999^{**})$, 最优拟合下施氮量 $167\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的土壤 N_2O 平均排放量为 $0.31\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 且纯氮用量、 N_2O 增排率、单位氮肥 N_2O 排放量和单位产量 N_2O 排放均会显著影响麦田 N_2O 的总排放量。当产量为因变量时(图 2), 根据残差图逐步去除异常值后保留 31 组有效数据, 拟合出最佳回归方程为 $Y=6\ 230.89-0.064\ 3X_1+53.127X_2-1.054\ X_3(r=0.757^{**})$ 。最优拟合下施氮量 $174\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的小麦平均产量 $6\ 258\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。综合施氮肥土壤减排 N_2O 和小麦增产, 以施氮量 $167\sim 174\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 即可保证增产较大, 又排放 N_2O 较少。

根据图 1 和图 2 逐步回归分析确定的小麦较优施氮量范围 $167\sim 174\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 在施氮量 $150\sim 225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 范围内。根据文献报道(表 1), 施氮量 $150\sim 225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时的 N_2O 增排率为 $20.5\%\sim 176.9\%$, 其中 2:3

和 4:3:3 的基追比增排率较大, 而 1:0 和 1:1 的基追比增排率较小; 1:1 氮肥基追比的单位氮肥和单位产量 N_2O 排放量均小于其他处理, 1:1 和 2:3 的小麦增产率均比 1:0 大。因此, 麦田基追比例 1:1 减排 N_2O 又有利于增产。

2.1.2 氮素调控剂对麦田土壤 N_2O 排放及小麦产量的影响

由表 2 可知, 施氮量 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 包膜比未包膜处理的土壤 N_2O 增排率减少 50 个百分点, 作物增产率高 6 个百分点; 施氮量 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 与等量无机氮肥比, 添加 DCD 增排 N_2O 5.1 个百分点, 包膜处理无变化, 添加 DCD 比包膜处理单位产量 N_2O 排放量减少 $0.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 小麦增产率高 8.1 个百分点。施氮量 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 进行氮素调控比 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 氮肥的 N_2O 减排增产效果明显, 添加纳米碳比 DCD 增排 28.0 个百分点, 单位氮肥 N_2O 排放量增加 $0.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,



图中 X_1 为纯氮用量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); X_2 为单位氮肥 N_2O 排放量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); X_3 为单位产量 N_2O 排放量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);
 Y 为作物产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)($n=42$)^[17-26]

图 2 小麦产量逐步回归分析

Figure 2 Stepwise regression analysis of wheat yield

表 1 不同氮素基追比对麦田土壤 N_2O 排放和小麦产量的影响

Table 1 Effects of different nitrogen ratios of basal to top dressing on soil N_2O emissions and wheat yield

纯氮用量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	基追比	N_2O 排放总量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	N_2O 增排率/ %	单位氮肥 N_2O 排放量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	单位产量 N_2O 排放量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	作物产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	增产率/ %	数据来源
150	1:1	0.16	23.1	1.1	23.9	6 692	79.0	文献[17]
225	1:1	0.25	92.3	1.1	39.4	6 350	69.8	
150	2:3	0.96	123.3	6.4	163.4	5 876	76.6	文献[18]
225	2:3	1.06	146.5	4.7	169.4	6 258	88.1	
150	1:0	0.47	20.5	3.1	86.6	5 430	41.4	文献[19]
220	1:0	0.67	71.8	3.0	118.8	5 640	46.9	
150	4:3:3	0.27	107.7	1.8	—	—	—	文献[26]
200	4:3:3	0.36	176.9	1.8	—	—	—	

注:表中“—”表示没有测定作物产量及无法计算相关数据。

表 2 氮素调控剂对麦田土壤 N₂O 排放及小麦产量的影响
Table 2 Effects of different nitrification inhibitors on soil N₂O emissions and wheat yield

纯氮用量/ kg·hm ⁻²	N ₂ O 排放总量/ kg·hm ⁻²	N ₂ O 增排率/ %	单位氮肥 N ₂ O 排放量/g·kg ⁻¹	单位产量 N ₂ O 排放量/mg·kg ⁻¹	作物产量/ kg·hm ⁻²	增产率/ %	数据来源
225	1.06	146.5	4.7	169.4	6 258	88.1	文献[18]
225+5%DCD	0.66	53.5	2.9	84.6	7 800	134.4	
300	1.14	165.1	3.8	186.3	6 120	83.9	
300+5%DCD	0.75	74.4	2.5	105.0	7 141	114.6	
150	0.47	20.5	3.1	86.6	5 430	41.4	文献[19]
150+5%DCD	0.49	25.6	3.3	78.3	6 260	63.0	
150 包膜	0.47	20.5	3.1	79.0	5 950	54.9	
225	1.06	86.0	4.7	132.0	8 033	55.3	
180+DCD	0.75	31.6	4.2	78.9	9 507	83.8	文献[16]
180+纳米碳	0.91	59.6	5.1	96.1	9 473	83.1	
100	—	164.0	—	—	—	24.0	
100 包膜	—	114.0	—	—	—	30.0	
270	—	270.0	—	—	—	40.0	文献[15]
270 包膜	—	214.0	—	—	—	41.0	
200	0.73	238.4	3.7	200.0	3 650	25.9	
200+DCD	0.40	86.6	2.0	111.1	3 600	24.1	
200 包膜	0.49	126.8	2.5	146.3	3 350	15.5	文献[27]

注:表中“—”表示没有测定作物产量及无法计算相关数据。

单位产量N₂O 排放量增加 17.2 mg·kg⁻¹, 小麦增产率低 0.7 个百分点,说明添加 DCD 减排增产效果好。施氮量 200 kg·hm⁻² 时,包膜比添加 DCD 土壤 N₂O 增排率增加 40.2 个百分点,单位氮肥 N₂O 排放量增加 0.5 g·kg⁻¹,单位产量 N₂O 排放量增加 35.2 mg·kg⁻¹,小麦增产率低 8.6 个百分点,说明添加 DCD 较包膜有利于稳产减排。施氮量 225 kg·hm⁻² 时,添加 DCD 比等量氮肥减排 N₂O 93 个百分点且增产率高 46.3 个百分点。施氮量 300 kg·hm⁻² 添加 DCD 比等量无机氮肥 N₂O 排放下降 90.7 个百分点,小麦增产率高 30.7 个百分点,较 270 kg·hm⁻² 的包膜处理减排 N₂O 139.6 个百分点且小麦增产率高 73.6 个百分点,说明 DCD 能抑制高氮水平下麦田 N₂O 的排放。因此,不同施氮水平下添加 DCD 均比包膜肥料减排增产效果明显。

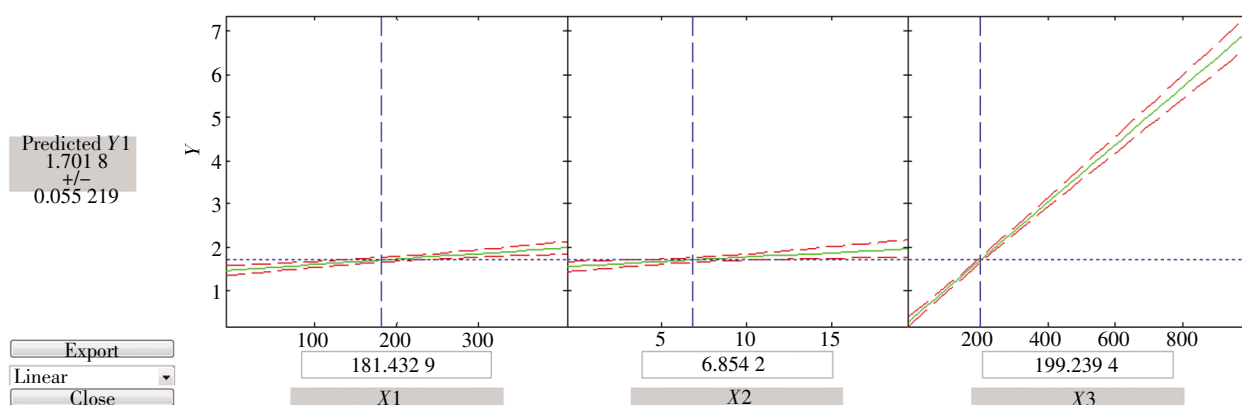
2.2 玉米田土壤 N₂O 排放及玉米产量

2.2.1 不同施氮量和基追比对土壤 N₂O 排放及玉米产量的影响

玉米田利用 MATLAB 软件建模,分别以 N₂O 排放总量和产量为因变量,纯氮用量、N₂O 增排率、单位氮肥 N₂O 排放量、单位产量 N₂O 排放量和增产率为自变量进行逐步回归分析。N₂O 排放总量为因变量时(图 3),根据残差图逐步去除异常值后保留 29 组有效数据,拟合出最佳回归方程为 $Y=-0.001\ 56+0.001\ 26X_1+$

$0.021\ 1X_2+0.006\ 67X_3(r=0.998^{**})$,最优拟合下施氮量 181 kg·hm⁻² 时的土壤 N₂O 平均排放量 1.70 kg·hm⁻²,且纯氮用量、单位氮肥 N₂O 排放和单位产量 N₂O 排放均会显著影响土壤 N₂O 的总排放量;当产量为因变量时(图 4),根据残差图逐步去除异常值后保留 36 组有效数据,拟合出最佳回归方程为 $Y=8\ 576.58+7.545X_1+54.031X_2-6.088X_3(r=0.813^{**})$,最优拟合下施氮量 177 kg·hm⁻² 时玉米平均产量为 9 046 kg·hm⁻²。综合施氮肥减排 N₂O 和玉米增产,以施氮量 177~181 kg·hm⁻² 即可保证增产较大,又排放 N₂O 较少。

根据图 3 和图 4 逐步回归分析确定的较优玉米施氮量范围 177~181 kg·hm⁻²,在施氮量 150~260 kg·hm⁻² 范围内。根据文献报道(表 3),施氮量 150~180 kg·hm⁻² 时,基追比 2:3 比 1:0 和 1:1 的单位氮肥 N₂O 排放量增加 8.4~13.1 g·kg⁻¹,单位产量 N₂O 排放量增加 220.5~270.6 mg·kg⁻¹,无减排增产趋势。施氮量 225 kg·hm⁻² 且基追比 2:3 明显比一次性基施氮肥减少 N₂O 总排放量和单位氮肥 N₂O 排放量,作物可增产 38.6%;同等试验中基追比 2:3 比 1:0 减排 N₂O 22.3 个百分点,增产 3.2 个百分点。与施氮 240 kg·hm⁻² 基追比 1:1 比,施氮量 210 kg·hm⁻² 和 263 kg·hm⁻² 基追比 1:2 的土壤 N₂O 增排率分别下降 530.2、513.1

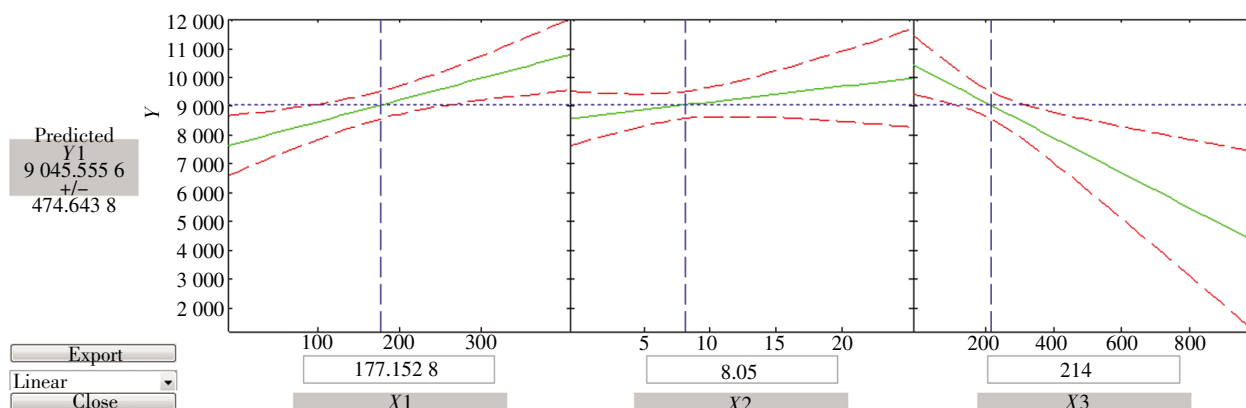


图中 X_1 为纯氮用量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); X_2 为单位氮肥 N_2O 排放量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); X_3 为单位产量 N_2O 排放量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);

Y 为 N_2O 总排放量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)($n=40$)^[18,21-24,28-32]

图 3 玉米田 N_2O 总排放量逐步回归分析

Figure 3 Stepwise regression analysis of soil N_2O total emissions in maize yield



图中 X_1 为纯氮用量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); X_2 为单位氮肥 N_2O 排放量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); X_3 为单位产量 N_2O 排放量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);

Y 为作物产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)($n=40$)^[18,21-24,28-32]

图 4 玉米田产量逐步回归分析

Figure 4 Stepwise regression analysis of maize yield

表 3 不同氮素基追比对玉米田土壤 N_2O 排放和玉米产量的影响

Table 3 Effects of different nitrogen ratios of basal to top dressing on soil N_2O emissions and maize yield

纯氮用量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	基追比	N_2O 排放总量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	N_2O 增排率/ %	单位氮肥 N_2O 排放量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	单位产量 N_2O 排放量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	作物产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	增产率/%	数据来源
225	1:0	3.12	124.5	13.9	316.4	9 860	3.7	文献[33]
225	2:3	2.81	102.2	12.5	276.3	10 170	6.9	
150	2:3	2.54	398.0	16.9	337.4	7 529	31.9	文献[18]
225	2:3	2.99	486.3	13.3	378.0	7 911	38.6	
180	1:1	0.69	331.3	3.8	66.8	10 330	5.7	文献[30]
240	1:1	1.10	587.5	4.6	112.3	9 797	0.2	
200	1:0	1.88	161.1	9.4	153.7	12 230	206.5	文献[34]
160	1:0	1.36	88.9	8.5	116.9	11 630	191.5	
210	1:2	1.29	57.3	6.1	124.8	10 333	11.6	文献[28]
263	1:2	1.43	74.4	5.4	134.7	10 620	14.7	

个百分点,单位氮肥和单位产量 N₂O 排放量相近,增产率提高 11.4、14.5 个百分点,说明基追比 1:2 有利于中氮区玉米稳产减排。因此,玉米田氮肥基追比例为 2:3~1:2 可稳产减排。

2.2.2 氮素调控剂对土壤 N₂O 排放及玉米产量的影响

笔者收集了玉米田研究最多的氮素调控措施(包膜控释肥料、纳米增效尿素/碳铵和 DCD)(表 4)。在纯氮量 160 kg·hm⁻² 时,添加 DCD N₂O 增排率降低 62.5 个百分点且增产率上升 7.3 个百分点。施氮量 180 kg·hm⁻² 时的单位氮肥和单位产量 N₂O 排放量均表现为硫包膜>180+5%DCD>纳米增效尿素>纳米增效碳铵>180+10%DCD,几种调控剂间增产(相差最大 25.1 个百分点)不及 N₂O 增排(相差最小 73 个百分点)幅度大,说明该施氮量下添加 10%DCD 综合效果较好。施氮量 210 kg·hm⁻² 时,包膜处理的 N₂O 增排率比添加 DCD 处理高 25.9 个百分点,单位氮肥 N₂O 排放量增加 0.7 g·kg⁻¹,单位产量 N₂O 排放量增加 15.8 mg·kg⁻¹,增产率下降 3.2 个百分点;施氮 225 kg·hm⁻² 添加 DCD 比等量无机氮肥降低 N₂O 增排率 111.8 个百分点,包膜却增排 N₂O 39.5 个百分点,单位氮肥和单位产量 N₂O 排放量均有 DCD 减排而包膜处理增排的趋势,玉米增产率 DCD 和包膜处理的分别提高 47.7、10.5 个百分点,说明氮量 210 kg·hm⁻² 和 225 kg·hm⁻² 时,添加 DCD 无论减排还是增产均比包膜肥

料效果明显。因此,玉米田添加 DCD 比其他氮素调控措施增产减排潜力大。

3 讨论

华北地区小麦和玉米生产中普遍存在氮肥用量高、利用率低、作物养分需求与土壤、肥料养分供应不同步等问题。本文旨在寻找该区合适的施氮水平,提高氮肥利用率,缓解 N₂O 排放。吉艳芝等^[17]报道,河北小麦高产且 N₂O 排放量较少的施氮量为 150 kg·hm⁻²。宋利娜等^[37]指出,施氮量 210 kg·hm⁻² 为华北区小麦优化管理模式,土壤 N₂O 总排放量 1.19 kg·hm⁻²,籽粒产量 6 140 kg·hm⁻²。王艳群等^[18]研究表明,225 kg·hm⁻² 的氮素水平下,小麦产量 6 258 kg·hm⁻²,土壤排放 N₂O 1.06 kg·hm⁻²。本文通过汇总文献资料并进行逐步回归分析,确定小麦最优施氮量为 167~174 kg·hm⁻²,N₂O 排放 0.31 kg·hm⁻²,产量在 6 200 kg·hm⁻² 以上,在稳产下比上述研究更能减排 N₂O,精确了麦田最佳施氮量范围。刘亚男^[24]研究表明,玉米季施氮量 392 kg·hm⁻² 时,产量最高为 9 461 kg·hm⁻²,土壤排放 N₂O 3.31 kg·hm⁻²。蔡祖聪等^[38]研究表明,华北潮土上施氮量 150 kg·hm⁻² 的玉米产量和环境效应最好,籽粒产量 7 633 kg·hm⁻² 且多年产量变异较小。本文拟合玉米最优施氮量为 177~181 kg·hm⁻²,尽管施肥量稍高于蔡祖聪等研究结果,但研究样点涉及区域广,土壤

表 4 氮素调控剂对土壤 N₂O 排放及玉米产量的影响

Table 4 Effects of different nitrification inhibitors on soil N₂O emissions and maize yield

纯氮用量/ kg·hm ⁻²	N ₂ O 排放总量/ kg·hm ⁻²	N ₂ O 增排率/ %	单位氮肥 N ₂ O 排放量/g·kg ⁻¹	单位产量 N ₂ O 排放量/mg·kg ⁻¹	作物产量/ kg·hm ⁻²	增产率/%	数据来源
180	1.53	488.5	8.5	129.5	11 815	19.9	文献[35]
180+10%DCD	0.62	138.5	3.4	49.4	12 551	27.4	
180+5%DCD	0.81	211.5	4.5	70.6	11 469	16.4	
180 硫包膜	1.41	442.3	7.8	109.0	12 939	31.3	
180	1.17	550.0	6.5	108.8	10 758	27.9	文献[36]
180 纳米增效碳铵	0.70	288.9	3.9	59.9	11 684	38.9	
180 纳米增效尿素	0.78	333.3	4.3	65.5	11 908	41.5	
225	3.12	124.5	13.9	316.4	9 860	3.7	文献[33]
225 包膜	3.67	164.0	16.3	337.9	10 860	14.2	
160	1.36	88.9	8.5	116.9	11 630	191.5	文献[34]
160+10%DCD	0.91	26.4	5.7	76.3	11 920	198.8	
210	0.96	77.8	4.6	96.2	9 977	14.9	文献[29]
210 包膜	0.98	81.5	4.7	95.3	10 282	18.4	
210+1%DCD	0.84	55.6	4.0	79.5	10 560	21.6	
225	2.99	486.3	13.3	378.0	7 911	38.6	文献[18]
225+5%DCD	2.42	374.5	10.8	227.5	10 637	86.3	

类型多,籽粒产量也在 $9\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上,增产明显。与茹淑华等^[39]在该区 6 年定位试验获得的最佳施肥量与产量结果比较接近,但本研究施氮量区间结合 N_2O 减排,概括性更强,范围更集中,便于生产中应用。

该区小麦种植建议选用基追比例为 1:1,而玉米季则建议基追比为 2:3~1:2,这与该地区的灌溉和降水相关。水分是影响 N_2O 产生和排放的一个重要因素,同时影响养分转化和移动。玉米季雨热同期,利于 N_2O 排放,高水分条件下土壤 N_2O 排放量大于正常水分^[40]。玉米生长前期吸收土壤氮素少^[41],在水分较好时作物对氮肥依赖性小,增加了氮的移动性;而后期玉米生长旺盛,根系吸收土壤氮素能力增强,不增加后期 N_2O 排放^[42]。玉米季将基追比例调至 2:3~1:2 既能保证产量又能减排 N_2O 。小麦季,低温和持续干燥的冬季会降低土壤微生物和硝化反硝化细菌的活动,比玉米季受水分影响小,基追比例为 1:1 时没有增排 N_2O 。王蔚华等^[43]指出,基追比 8:2 时,由于前期施肥比例占一生的 80%,导致后期缺肥,影响小麦产量;但基追比调整为 2:8 时,光合功能不强导致粒重低,只有基追比 1:1 增加粒重提高产量。因此,基追比 1:1 是减少氮肥总量投入、实现氮肥养分资源高效管理的有效途径。

合理氮素调控措施在减少氮肥用量的同时可增产减排 N_2O 。研究发现在华北小麦玉米种植区添加 DCD 可使小麦季 N_2O 排放量下降 49%^[44],小麦/玉米轮作季降低 23.1%~31.1%,小麦增产 16.7%~24.6%,玉米增产 29.8%~34.5%^[16,18],极少发现减产^[45]。本文综合分析华北区小麦/玉米粮田增施 DCD 有利于减排增产,这可能是由于 DCD 和尿素混合施入土壤后,能通过抑制氨氧化菌或者相关酶的活性,有效延缓 NH_4^+-N 氧化为 NO_3^--N 的进程,使土壤中的 NH_4^+-N 保持较高水平,延长氮肥肥效,从而减少 N_2O 的排放,提高作物产量^[46]。

4 结论

通过逐步回归分析汇总文献资料,兼顾小麦/玉米田 N_2O 减排和 2 种作物产量,在氮肥管理中,小麦季推荐合理施氮量 $167\sim 174\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N_2O 总排放量降至 $0.31\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,产量 $6\,200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上;玉米季,推荐合理施氮量 $177\sim 181\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N_2O 总排放量降至 $1.70\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,产量 $9\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上。同时,在该区氮肥合理用量基础上添加 DCD 调控均能显著降低小

麦和玉米田 N_2O 排放,且调整基追比也是降低 N_2O 排放的有效途径,但两季作物比例不同,小麦季基追比例 1:1 效果较好,玉米季将基追比例调至 2:3~1:2 可增产减排。

参考文献:

- [1] IPCC. Working group I contribution to the IPCC fifth assessment report: Climate Change 2013: The physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 王孟雪,张忠学. 适宜节水灌溉模式抑制寒地稻田 N_2O 排放增加水稻产量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 72-79.
WANG Meng-xue, ZHANG Zhong-xue. Optimal water-saving irrigation mode reducing N_2O emission from rice paddy field in cold region and increasing rice yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(15): 72-79. (in Chinese)
- [3] Eichner M J. Nitrous oxide emissions from fertilized soils: Summary of available data[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1990, 19: 272-280.
- [4] 李鑫,巨晓棠,张丽娟,等. 不同施肥方式对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 99-104.
LI Xin, JU Xiao-tang, ZHANG Li-juan, et al. Effect of different fertilization modes on soil ammonia volatilization and nitrous oxide emission [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1): 99-104. (in Chinese)
- [5] 孙艳丽,陆佩玲,李俊,等. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作田土壤 N_2O 通量特征及影响因素[J]. 中国农业气象, 2008, 29(1): 1-5.
SUN Yan-li, LU Pei-ling, LI Jun, et al. Characteristics of soil N_2O flux in a winter wheat-summer maize rotation system in north China plain and analysis of influencing factors[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, 29(1): 1-5. (in Chinese)
- [6] 杨军芳,周晓芬,贾良良. 河北省太行山前平原小麦养分资源管理现状分析与评价[J]. 河北农业科学, 2012, 16(7): 51-56.
YANG Jun-fang, ZHOU Xiao-fen, JIA Liang-liang. Analysis and evaluation of the wheat nutrient resource management in the piedmont plain of Taihang mountains of Hebei province[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2012, 16(7): 51-56. (in Chinese)
- [7] 崔振岭. 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系优化氮肥管理——从田块到区域尺度[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
CUI Zhen-ling. Optimization of the nitrogen fertilizer management for winter wheat-summer maize rotation system in the north China plain: from field to regional scale[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [8] 裴淑玮,张圆刘,刘俊峰,等. 华北平原玉米-小麦轮作农田 N_2O 交换通量的研究[J]. 环境科学, 2012, 33(10): 3641-3646.
PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, et al. N_2O exchange fluxes from wheat-maize crop rotation system in the north China plain [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(10): 3641-3646. (in Chinese)
- [9] Ding W X, Cai Y, Cai Z C, et al. Nitrous oxide emissions from an intensively cultivated maize-wheat rotation soil in the North China plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 373(2-3): 501-511.
- [10] Chen X P, Cui Z L, Vitousek P M, et al. Integrated soil-crop system

- management for food security[J]. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(16): 6399–6404.
- [11] Cui Z L, Chen X P, Miao Y X, et al. On-farm evaluation of the improved soil N-based nitrogen management for summer maize in North China plain[J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(3): 517–525.
- [12] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environment risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(9): 3041–3046.
- [13] 胡小康, 黄彬香, 苏芳, 等. 氮肥管理对夏玉米土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国科学(化学), 2011, 41(1): 117–128.
HU Xiao-kang, HUANG Bin-xiang, SU Fang, et al. Effects of nitrogen management on methane and nitrous oxide emissions from summer maize soil in North China plain[J]. *Scientia Sinica Chimica*, 2011, 41(1): 117–128. (in Chinese)
- [14] 闫湘, 金继运, 何萍. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 450–459.
YAN Xiang, JIN Ji-yun, HE Ping. Recent advances in technology of increasing fertilizer use efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(2): 450–459. (in Chinese)
- [15] 纪洋, 刘刚, 马静, 等. 控释肥施用对小麦生长期 N_2O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 527–534.
JI Yang, LIU Gang, MA Jing, et al. Effect of controlled-release fertilizer on nitrous oxide emission during the wheat growing period[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(3): 527–534. (in Chinese)
- [16] LIU Y N, LI Y C, PENG Z P, et al. Effects of different nitrogen fertilizer management practices on wheat yields and N_2O emissions from wheat fields in North China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(6): 1184–1191.
- [17] 吉艳芝, 巨晓棠, 刘新宇, 等. 不同施氮量对冬小麦田氮去向和气态损失的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 113–119.
JI Yan-zhi, JU Xiao-tang, LIU Xin-yu, et al. Impact of different nitrogen application on nitrogen movement and gaseous loss of winter wheat fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3): 113–119. (in Chinese)
- [18] 王艳群, 李迎春, 彭正萍, 等. 氮素配施双氰胺对冬小麦-夏玉米轮作系统 N_2O 排放的影响及效益分析[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1999–2006.
WANG Yan-qun, LI Ying-chun, PENG Zheng-ping, et al. Effects of dicyandiamide combined with nitrogen fertilizer on N_2O emission and economic benefit in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(7): 1999–2006. (in Chinese)
- [19] 胡腾. 黄土高原南部冬小麦-夏休闲种植体系温室气体排放与减排措施研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
HU Teng. Study on GHG emission and mitigation in winter–summer fallow region of south loess plateau[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2014. (in Chinese)
- [20] Liu C, Wang K, Zheng X. Responses of N_2O and CH_4 fluxes to fertilizer nitrogen addition rates in an irrigated wheat–maize cropping system in Northern China[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(2): 839–850.
- [21] 王秀斌. 优化施氮下冬小麦/夏玉米轮作农田氮素循环与平衡研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
WANG Xiu-bin. Nitrogen cycling and balance in winter wheat–summer corn rotation system under optimized nitrogen management[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009. (in Chinese)
- [22] 王朝东. 硝化抑制剂 DCD 与不同施氮量对粮田系统氮素分布及 N_2O 排放的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2013.
WANG Chao-dong. Effects of dicyandiamide and different fertilizer levels on nitrogen distribution and N_2O emissions in grain system[D]. Baoding: Agriculture of University of Hebei, 2013. (in Chinese)
- [23] 山楠. 京郊小麦-玉米轮作体系氮素利用与损失研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2014.
SHAN Nan. Nitrogen utilization and loss in winter wheat–summer maize rotation system of Beijing suburb[D]. Baoding: Agriculture of University of Hebei, 2014. (in Chinese)
- [24] 刘亚男. 冬小麦/夏玉米轮作系统不同氮肥管理方式的生物效应及 N_2O 排放特征研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2015.
LIU Ya-nan. Effects of biological and N_2O emissions under different nitrogen fertilizer management practices in wheat–maize rotation[D]. Baoding: Agriculture of University of Hebei, 2015. (in Chinese)
- [25] 张贺, 郭李萍, 谢立勇, 等. 不同管理措施对华北平原冬小麦田土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(3): 654–659.
ZHANG He, GUO Li-ping, XIE Li-yong, et al. The effect of management practices on the emission of CO_2 and N_2O from the winter wheat field in North China plain[J]. *Journal of Soil Science*, 2013, 44(3): 654–659. (in Chinese)
- [26] 王海云, 邢光熹. 不同施氮水平对稻麦轮作农田氧化亚氮排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2631–2636.
WANG Hai-yun, XING Guang-xi. Effect of nitrogen fertilizer rates on nitrous oxide emission from paddy field under rice–wheat rotation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2631–2636. (in Chinese)
- [27] HU Xiao-kang, SU Fang, JU Xiao-tang, et al. Greenhouse gas emissions from a wheat–maize double cropping system with different nitrogen fertilization regimes[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 176: 198–207.
- [28] 刘慧颖, 华利民, 张鑫. 不同施氮方式对玉米产量及 N_2O 排放的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2013, 30(5): 76–80.
LIU Hui-ying, HUA Li-min, ZHANG Xin. Effect of different N application methods on yield, N_2O emission of maize [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2013, 30(5): 76–80. (in Chinese)
- [29] 杨黎. 辽西地区春玉米农田 N_2O 排放特征与固碳减排机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
YANG Li. Mechanism of mitigation and characteristics of N_2O emissions from typical spring maize fields in western Liaoning Province[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013. (in Chinese)
- [30] 马银丽, 吉艳芝, 李鑫, 等. 施氮水平对小麦-玉米轮作体系氮挥发与氧化亚氮排放的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 225–230.
MA Yin-li, JI Yan-zhi, LI Xin, et al. Effects of N fertilization rates on

- the NH_3 volatilization and N_2O emissions from the wheat-maize rotation system in North China plain[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(2): 225-230. (in Chinese)
- [31] 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 Yan-qing, TANG Ji-wei, CHE Sheng-guo, 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. (in Chinese)
- [32] 刘运通. 不同施肥措施下玉米地温室气体排放特点分析与模拟研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- LIU Yun-tong. Study on the characteristics of greenhouse gases flux and its simulation in maize field under different fertilization management[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008. (in Chinese)
- [33] 李娜. 耕作方式和包膜尿素对夏玉米田土壤 N_2O 排放的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- LI Na. Effects of tillage practice and poly-coated urea on N_2O from summer maize field[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [34] 吴得峰, 姜继韶, 高兵, 等. 添加 DCD 对雨养区春玉米产量、氧化亚氮排放及硝态氮残留的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 86(4): 10-20.
- WU De-feng, JIANG Ji-shao, GAO Bing, et al. Effects of DCD addition on grain yield, N_2O emission and residual nitrate-N of spring maize in rain-fed agriculture[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 86(4): 10-20. (in Chinese)
- [35] 李超. 不同施肥处理对春玉米田 N_2O 排放的影响及经济效益分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- LI Chao. Effects and economic benefits analysis of different fertilizer treatments on N_2O emissions from spring corn field[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013. (in Chinese)
- [36] 周鹏, 李玉娥, 万运帆, 等. 华北春玉米田施用纳米增效氮肥的增产减排作用初探[J]. 中国农业气象, 2013, 34(5): 532-537.
- ZHOU Peng, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Preliminary research on the effects of applying nano-synergism nitrogen fertilizer on nitrous oxide emission and yield of spring corn in North China plain[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(5): 532-537. (in Chinese)
- [37] 宋利娜, 张玉铭, 胡春胜, 等. 华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3): 297-307.
- SONG Li-na, ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, et al. Comprehensive analysis of emissions and global warming effects of greenhouse gases in winter-wheat fields in the high-yield agro-region of North China plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(3): 297-307. (in Chinese)
- [38] 蔡祖聪, 钦绳武. 华北潮土长期试验中的作物产量、氮肥利用率及其环境效应[J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 886-890.
- CAI Zu-cong, QIN Sheng-wu. Crop yield, N use efficiency and environmental impact of a long-term fertilization experiment in fluvo-aquic soil in North China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(6): 886-890. (in Chinese)
- [39] 茹淑华, 张国印, 孙世友, 等. 施氮量对冬小麦-夏玉米轮作体系土壤硝态氮分布和累积的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26: 85-89.
- RU Shu-hua, ZHANG Guo-yin, SUN Shi-you, et al. Effect of nitrogen application rate on nitrate nitrogen distribution and accumulation in soils in wheat-maize rotation system[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26: 85-89. (in Chinese)
- [40] 侯爱新, 陈冠雄, 吴杰. 不同种类氮肥对土壤释放的 N_2O 的影响[J]. 应用生态学报, 1998, 9(2): 176-180.
- HOU Ai-xin, CHEN Guan-xiong, WU Jie. Effect of different nitrogen fertilizers on N_2O emission from soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(2): 176-180. (in Chinese)
- [41] 戴明宏, 陶洪斌, 王利纳, 等. 华北平原春玉米季土壤硝态氮动态及氮素矿化的特征[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 76-81.
- DAI Ming-hong, TAO Hong-bin, WANG Li-na, et al. Characteristics of soil NO_3^- -N changing and nitrogen mineralization during spring maize seasons in the North China plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(3): 76-81. (in Chinese)
- [42] 杨兰芳, 蔡祖聪. 施氮和玉米生长对土壤氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(1): 100-104.
- YANG Lan-fang, CAI Zong-cong. Effects of N application and maize growth on N_2O emission from soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(1): 100-104. (in Chinese)
- [43] 王蔚华, 郭文善, 封超年, 等. 氮肥运筹对小麦花后剑叶衰老及籽粒发育的影响[J]. 扬州大学学报, 2002, 23(4): 61-65.
- WANG Wei-hua, GUO Wen-shan, FENG Chao-nian, et al. Effects of nitrogen application methods on flag leaf senescence after anthesis and grain development in wheat[J]. *Journal of Yangzhou University*, 2002, 23(4): 61-65. (in Chinese)
- [44] Majumdar D, Pathak H, Kumar S, et al. Nitrous oxide emission from a sandy loam Inceptisol under irrigated wheat in India as influenced by different nitrification inhibitors[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 91: 283-293.
- [45] Mahmood T, Ali R, Latif Z, et al. Dicyandiamide increases the fertilizer N loss from an alkaline calcareous soil treated with ^{15}N -labelled urea under warm climate and under different crops[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47: 619-631.
- [46] Di H J, Cameron K C, Shen J P, et al. A lysimeter study of nitrate leaching from grazed grassland as affected by a nitrification inhibitor, dicyandiamide, and relationships with ammonia oxidizing bacteria and archaea[J]. *Soil Use and Management*, 2009, 25: 454-461.