

氮肥管理措施对黑土玉米田温室气体排放的影响

郝小雨^{1,2}, 周宝库^{1*}, 马星竹¹, 高中超¹ (1. 黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086; 2. 黑龙江省农业科学院博士后科研工作站, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要: 采用静态箱-气相色谱法研究了不同氮肥管理措施(农民常规施肥、减氮 20%、添加硝化抑制剂、施用控释肥)对黑土玉米田温室气体排放的影响。结果表明:黑土玉米田施肥(基肥和追肥)后 1~3d 出现 N_2O 排放峰,施肥后 16d 内 N_2O 排放量占生育期总排放量的 28.8%~41.9%。减施氮肥 20%显著降低土壤 N_2O 排放,生育期内的 N_2O 累积排放量减少了 17.6%~46.1%,综合温室效应降低 30.7%~67.8%,温室气体排放强度降低 29.1%~67.0%。等氮量投入时,添加吡啶抑制剂土壤 N_2O 排放量、综合温室效应和温室气体排放强度最低。玉米拔节~乳熟期出现了较强的土壤 CO_2 排放,黑土玉米田是大气中 CH_4 的一个较弱的“汇”,施氮和添加硝化抑制剂对黑土玉米田 CO_2 排放和 CH_4 吸收没有显著影响。添加硝化抑制剂和施用控释肥不影响玉米产量。在本试验条件下,减氮 20%并添加吡啶抑制剂在保证玉米产量的同时,减排增收效果优于其他施肥措施,适宜在黑土区玉米种植中推广使用。

关键词: 氮肥管理措施; 硝化抑制剂; 控释肥; 温室气体; 氮肥减量; 黑土

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2015)11-3227-12

Effects of nitrogen fertilizer management on greenhouse gas emissions from maize field in black soil. HAO Xiao-yu^{1,2}, ZHOU Bao-ku¹, MA Xing-zhu^{1*}, GAO Zhong-chao¹ (1. Institute of Soil and Fertilizer and Environment Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 2. Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences Postdoctoral Programme, Harbin 150086, China). *China Environmental Science*, 2015,35(11): 3227~3238

Abstract: Greenhouse gas (GHG) emission from agricultural production is an important source of atmospheric GHG. It is crucial to explore corresponding measures and their effect on mitigating GHG emissions. To gain high crop yield without increasing GHG emissions, it is necessary to propose new nitrogen (N) fertilizer management strategies. This study was conducted to determine the effects of different nitrogen fertilizer management (conventional fertilization, decreasing within 20% of the conventional N application rate, nitrification inhibitor and controlled release fertilizer) on greenhouse gases emissions from spring maize field in black soil using the static chamber-gas chromatograph method. The results showed that: the peak of N_2O emission flux occurred within 1~3days after basal fertilization and top-dressing from maize field in black soil. 28.8%~41.9% of total N_2O emissions during maize growth period were emitted within the first 16days after basal fertilization and top-dressing. Decreasing within 20% of the conventional N application rate significantly decreased the total N_2O emissions. Compared with the conventional fertilization with higher rates of N fertilizer (185kg N/ha), the total N_2O emissions and annual global warming potential (GWP) were decreased by 17.6%~46.1% and 30.7%~67.8% respectively under improved N management practices, whereas greenhouse gas intensity (GHGI) were decreased by 29.1%~67.0%. Nitrification inhibitor addition showed the lowest total N_2O emissions, GWP and GHGI compared with other treatments. Higher CO_2 emission fluxes occurred from elongating to milky-ripening stage. The maize field was a weak sink of atmospheric CH_4 in black soil. The emission fluxes of CO_2 and CH_4 were not affected by N application rate (148~185kg N/hm²) and nitrification inhibitor, respectively. Nitrification inhibitor and controlled release fertilizer had no significant influence on the yield of maize. Under the conditions of our experiment, decreasing N rate by 20% at the basic level of 185kg N/hm² combined with nitrification inhibitor can maintain the stable yield of maize,

收稿日期: 2015-04-03

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAD07B01,2013BAD11B03);农业部公益性行业专项(201203030,201303126);黑龙江省农业科学院引进博士人员科研启动金项目(201507-23)

* 责任作者, 研究员, zhoubaku@aliyun.com

therefore could be served as an appropriate practice for mitigating GHG emissions with reduction of cost in black soil area.

Key words: nitrogen fertilizer management; nitrification inhibitor; controlled release fertilizer; greenhouse gas (GHG); reducing nitrogen application; black soil

CO₂、CH₄ 和 N₂O 是 3 种最重要的温室气体。IPCC^[1]在第五次评估报告中指出,2011 年大气中 CO₂ (391×10⁶)、CH₄ (1803×10⁹)和 N₂O (324ppb)的浓度大大超过了冰芯记录的过去 80 万年以来最高浓度。温室气体引起的全球气候变化成为各国政府、社会和科学界共同关注的热点问题。农业生产是温室气体排放的重要来源,全球范围内农业排放的非 CO₂ 温室气体约占人为排放总量的 14%,其中农业排放了 84%的 N₂O,47%的 CH₄,而农业释放的 CO₂ 估计达 40Mt(以 CO₂-eq 的质量计)^[2]。如何采取有效措施来减少农田土壤中温室气体排放成为国内外研究的热点。

与农业生产相关的管理措施,尤其是氮肥的施用,是影响 N₂O 排放的重要因素。当前,东北平原区农民为追求高产不惜大量施用化肥,一些农户的施氮(N)量已高达 300kg/hm²^[3-4]。过量的氮肥投入导致土壤氮素大量累积,造成氮肥利用率下降,并对环境造成影响,同时造成向大气中排放 N₂O 的可能性增加。研究证明,N₂O 排放量随着施氮肥量的增加呈线性增加或呈曲线增加^[5-6]。因此,探索切实可行的减排措施,缓解农业生产活动排放温室气体带来的环境压力已经成为当务之急。从氮素在土壤中的生物化学转化过程入手,通过抑制剂的施用调控氮素转化,是提高氮肥利用率、缓解氮肥污染、减少温室气体排放,实现氮肥高效管理与利用的有效措施^[7]。硝化抑制剂可以抑制土壤中 NH₄⁺-N 向 NO₃⁻-N 的转化,以延长或者调整无机氮在土壤中的形式,从而抑制土壤微生物硝化和继而发生的耦合的反硝化过程产生的 N₂O 以及雨季的硝态氮淋溶。近年来,在牧草^[8]、水稻^[9]、小麦-玉米轮作^[10]、蔬菜^[6]等作物上的研究表明,施用硝化抑制剂可以显著降低土壤 N₂O 排放。控释肥可以减缓、控制肥料的溶解和释放速度,即可根据作物生长需要提供养

分。研究表明,控释肥可避免出现施肥后土壤中剩余无机氮过高的现象,从而减少旱地因氮肥施用造成的 N₂O 排放,还能减少因氮素淋溶或地表径流而间接造成的 N₂O 排放^[11-12]。综上可知,硝化抑制剂和控释肥对于土壤 N₂O 减排效果显著,然而对黑土区玉米田温室气体最终是减排还是增排,产量和综合温室效应如何,哪种措施更具减排优势,都还存在不确定性。

黑土春玉米种植区是我国重要的商品粮基地,属中北温带半干旱大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,自然条件对氮素转化的影响不同于其他地区,因此,探讨通过合理施肥来降低黑土温室气体的排放是非常必要的。本研究从合理施肥的角度,以黑土玉米田为研究对象,采用静态箱-气相色谱法分析不同施肥措施下土壤温室气体排放特征及差异,并计算综合温室效应和排放强度,全面评价硝化抑制剂和控释肥的减排效果,以寻求经济效益著、可操作性强和环境友好的施肥模式,为指导黑土区玉米合理施肥和减排增效提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

田间试验点位于哈尔滨市道外区民主镇黑龙江省农业科学院科技园区,试验区域属中温带,年均气温 3.5℃,年降雨量 533mm,无霜期约 135d。试验地为旱地黑土,成土母质为洪积黄土状粘土。种植制度为一年一作,无灌溉。试验开始前 0~20cm 土壤基础性状为:有机质为 32.2g/kg,全氮 1.9g/kg,全磷 2.1g/kg,全钾 27.6g/kg,碱解氮 199.1mg/kg,有效磷 141.1mg/kg,速效钾 215.0mg/kg, pH 值(水土比 2.5:1)为 7.1。供试作物为春玉米,品种为龙丹 42。

1.2 试验设计

试验共设 6 个处理:1)不施氮(CK);2)农民习

惯施肥;3)减氮施肥 20%,即在习惯施肥基础上减氮 20%(N80%);4)减氮施肥 20%+双氰胺(N80% DCD);5)减氮施肥 20% + 2-氯-6-三氯甲基吡啶(N80% CP);6)减氮施肥 20%,硫包膜尿素(N80% CRF).各处理施肥管理和施肥量见表 1.每个处理 3 次重复,随机排列.各处理磷(P₂O₅)、钾(K₂O)施用量均为 60kg/hm²,全部底施.所用肥料为尿素(N 46%),硫包膜尿素(N 34%,山东金正大生态工程有限公司),含 2-氯-6-三氯甲基吡啶“碧晶”尿素(N 46%,浙江奥复托化工有限公司),重过磷酸钙(P₂O₅,46%),硫酸钾(K₂O 50%).试验小区面积为 32.5m²(宽 3.25m × 长 10m).2013 年 5 月 13 日施底肥、播种,6 月 25 日追肥,9 月 27 日收获;2014 年 4 月 23 日施底肥、播种,6 月 25 日追肥,9 月 30 日收获.

表 1 各处理氮肥施用量(kg N/hm²)

Table 1 Nitrogen fertilizer rate for different treatments (kg N/hm²)

处理	施氮量	基肥	追肥	肥料添加剂
CK	0	0	0	0
N100%	185	92.5	92.5	0
N80%	148	74	74	0
N80% DCD	148	74	74	1.48
N80% CP	148	74	74	0.148
N80% CRF	148	148	0	0

注: N100%-农民习惯施肥; N80%-优化施肥; DCD-双氰胺; CP-2-氯-6-三氯甲基吡啶; CRF-控释肥

1.3 样品采集

温室气体的测定采用密闭箱-气相色谱法^[13].密闭箱由取样箱和底座构成,材料为聚氯乙烯管(PVC 管).气体取样箱为圆柱体,外径 20cm,高 26cm,顶部密封,底部开口可以罩在底座上.底座为四周有水槽的圆柱体(高 10cm),取样前将底座下部嵌入土体 5cm 左右,每个试验处理小区内分别固定一个底座,取样时箱体置于密封槽中,在密封槽中加入水,防止箱内气体外溢.分别在 0、10、20 和 30min 抽取经过混匀的气样 35mL 至 12mL 预先抽为真空的血清瓶(英国 Labco 公司生产)中.采样时间的选取原则是选择接近每天平均气温的时段,即上午 9: 00~11: 00.

生育期每 10~15d 取样一次,施肥后每 3d 取气样一次,直至施氮处理与不施氮处理的温室气体排放通量无差异时为止.施肥后底座固定在同一位置,为避免影响到水肥的均匀分布,在下次施肥前将其移出,施肥后再选择另一位置安装,以防因破坏土壤结构引起的测定误差.采样同时记录取样箱内外温度,并测定土壤 5cm 深度处的土壤温度和含水量,土壤温度采用温度计测定,土壤水分采用 AZS-100 测定,平均气温采用野外台站气象数据.本文中 2 年数据均是指春玉米生育期(5~9 月)的温室气体排放,不包括非生育期.

1.4 样品测定与计算

气体样品分析采用 HP7890B 气相色谱仪,分析柱为 Porpak.Q 填充柱,柱箱温度为 50℃,载气为 N₂, N₂O 测定用电子捕获检测器(ECD),工作温度 350℃.CO₂ 和 CH₄ 测定采用氢火焰(FID)检测器,工作温度 250℃.气相色谱仪在每次测试时使用国家标准计量中心的标准气体进行标定,温室气体测定的相对误差在 2%以内.

温室气体排放通量的计算公式为:

$$F = \rho \times H \times (\Delta c / \Delta t) \times 273 / (273 + T) \tag{1}$$

式中: F 为温室气体排放通量, $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; ρ 为某温室气体标准状态下的密度, kg/m^3 ; H 为取样箱高度, m ; $\Delta c / \Delta t$ 为单位时间静态箱内的温室气体浓度变化率, $\mu\text{L}/(\text{L} \cdot \text{h})$; T 为测定时箱体内的平均温度, $^{\circ}\text{C}$.

$$\text{N}_2\text{O 排放系数}(\%) = [(\text{施氮处理 N}_2\text{O-N 排放量} - \text{不施氮处理 N}_2\text{O-N 排放量}) / \text{施氮量}] \times 100 \tag{2}$$

全球增温潜势(GWP) 是一种以 CO₂ 作为参考气体来估计不同温室气体对全球变暖的潜在效应的指标,可计算其温室气体排放二氧化碳当量.在 100a 的时间尺度下,N₂O 和 CH₄ 的 GWP 分别为 CO₂ 的 298 和 25 倍^[14].

$$\text{GWP}(\text{kg}/\text{hm}^2) = R_N \times 298 + R_C \times 25 \tag{3}$$

式中: R_N 为 N₂O 总排放量, kg/hm^2 ; R_C 为 CH₄ 总排放量, kg/hm^2 .

$$\text{GHGI} = \text{GWP} / Y \tag{4}$$

依据 Timothy 等^[15]的研究,式中 GHGI 为温室气体排放强度, kg/t ; Y 为作物产量, t/hm^2 .

$$\text{CC} = T \times V \tag{5}$$

式中:CC 为碳信用,元/(hm²·a); T 为某处理较农民习惯施肥减少的 CO₂ 排放当量,元/(hm²·a); V 为碳排放权交易成交价(据北京市碳排放权电子交易平台,2014 北京市碳排放权交易成交均价 54.71 元/t).

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS13.0 软件进行数据分析.

2 结果与分析

2.1 不同施肥措施下黑土温室气体排放特征

2.1.1 土壤 N₂O 排放特征 由图 1 可知,不同年际间土壤 N₂O 排放的季节特征基本一致,即施肥后土壤 N₂O 排放通量迅速上升,且较高的排放通量持续约 16d.各处理均在基肥和追肥后第 1~3d 出现 N₂O 排放峰,但在降雨后(图 2)又会出现比较弱的排放峰.从整个观测期的平均 N₂O 排放通量来看(表 2),2013 年和 2014 年各处理春玉米生育期的平均 N₂O 排放通量分别在 13.5~37.0 和 15.5~47.4μg N/(m²·h) 之间,且习惯施肥处理 N100%的平均 N₂O 排放通量显著高于其他处理 (P<0.05).

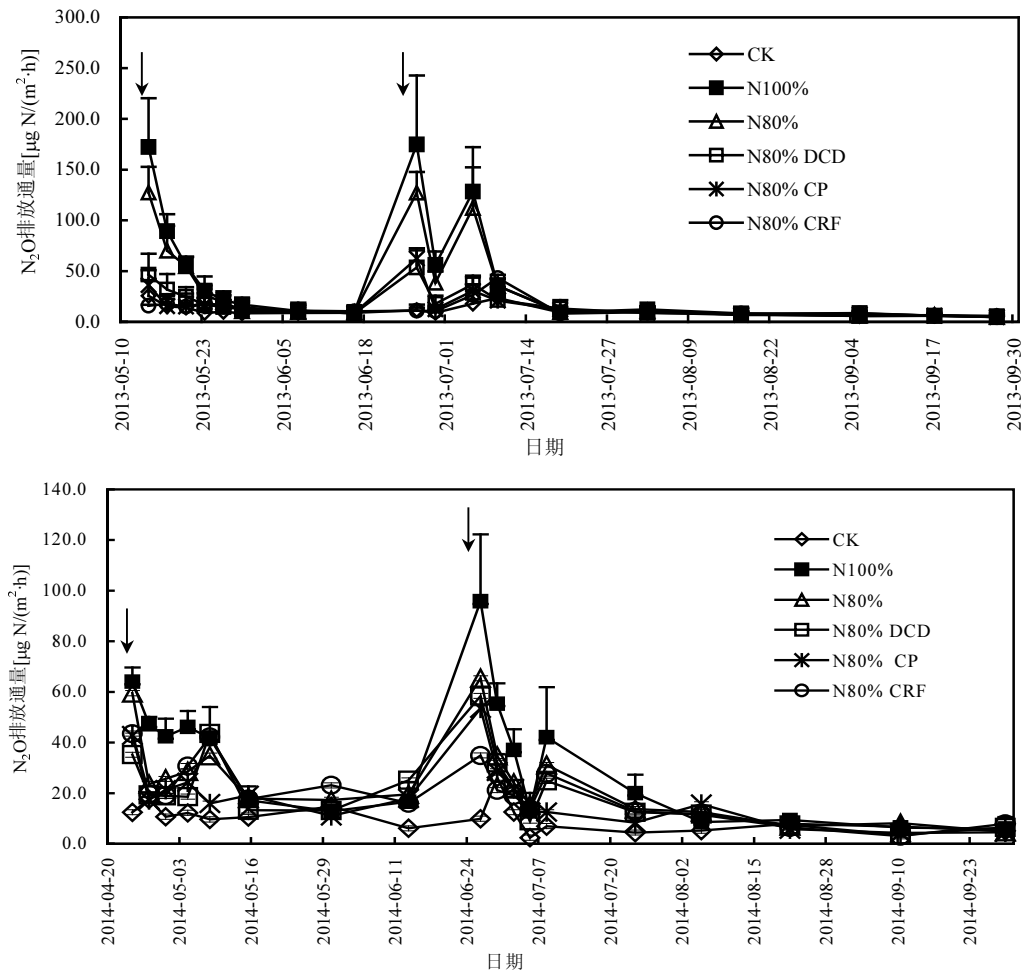


图 1 不同施肥措施下黑土 N₂O 排放通量动态变化

Fig.1 Variation of N₂O emission fluxes from spring maize field in a black soil under different fertilizer treatments

图中箭头代表施肥日期,下同

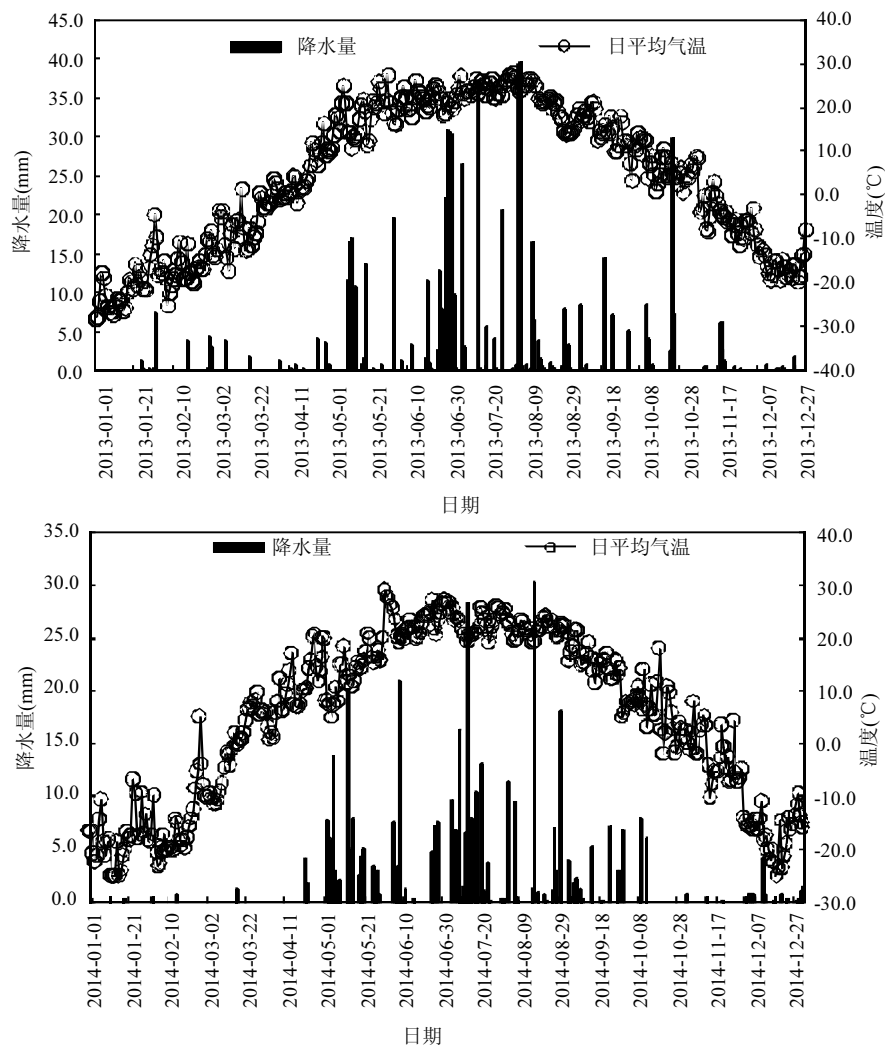


图2 2013 和 2014 年日平均温度与日降水量

Fig.2 Average air temperature and precipitation in 2013 and 2014

表2 不同施肥措施下春玉米生育期 N₂O 平均排放通量
[μg N/(m²·h)]

处理	2013 年	2014 年
CK	15.5 ±4.1d	13.5±5.0d
N100%	47.4 ±14.4a	37.0±10.5a
N80%	39.1 ±9.4b	30.6±10.3b
N80% DCD	23.1±6.3c	27.1±9.4c
N80% CP	21.6 ±6.2c	23.4±5.8c
N80% CRF	18.9±5.4cd	26.2±6.5c

注:同一列中不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05),下同

观察 2013 年和 2014 年各处理在春玉米生育

期的 N₂O 排放通量,发现施肥后土壤 N₂O 排放通量迅速上升,期间会出现几个 N₂O 排放峰,且年际间有所差异,究其原因可能与降水变化有关,如在 2013 年 6 月 26 日~2013 年 7 月 4 日、2014 年 5 月 2 日~2014 年 5 月 8 日,出现了连续降水,导致土壤水分含量增加,适宜的土壤含水量促进了硝化和反硝化过程的进行,导致 N₂O 排放量上升^[16]. 2013 年和 2014 年全年的日平均温度表现为抛物线的形式,即冬季寒冷漫长,夏季温热短促,4~9 月的生长季温度较高,适宜的温度易促进土壤 N₂O 的生成和排放,因此,通过改变施肥方法来降低土壤 N₂O 排放是需要关注的问题,如在温度较低的

秋季施肥等,这方面还需进一步探索.

2.1.2 土壤 CO₂ 排放特征 从图 3 可以看出,黑土玉米田 CO₂ 排放表现出季节性变化规律.玉米苗期(播种后 30d 内)土壤 CO₂ 排放处于较低水平,不同施肥措施 CO₂ 的排放通量变化范围在 35.2~148.7mg C/(m²·h)之间;玉米拔节~乳熟期(播种后 31~105d)出现了较强的土壤 CO₂ 排放,不同施肥措施 CO₂ 的排放通量在 123.5~240.2mg C/(m²·h)之间;玉米成熟期(播种后 106d~收获)土

壤 CO₂ 排放呈现下降趋势,土壤 CO₂ 的排放通量在 13.0~59.9mg C/(m²·h)之间.不同处理间,习惯施肥处理 N100% CO₂ 平均排放通量(2013 年和 2014 年平均为 128.0mg C/(m²·h))高于其他处理,但不存在显著差异;减施氮肥的 4 个处理,土壤 CO₂ 平均排放通量无明显差异,说明添加硝化抑制剂以及施用缓释尿素均不会影响土壤 CO₂ 排放.可见,施用氮肥和添加硝化抑制剂均不会影响黑土玉米田 CO₂ 排放.

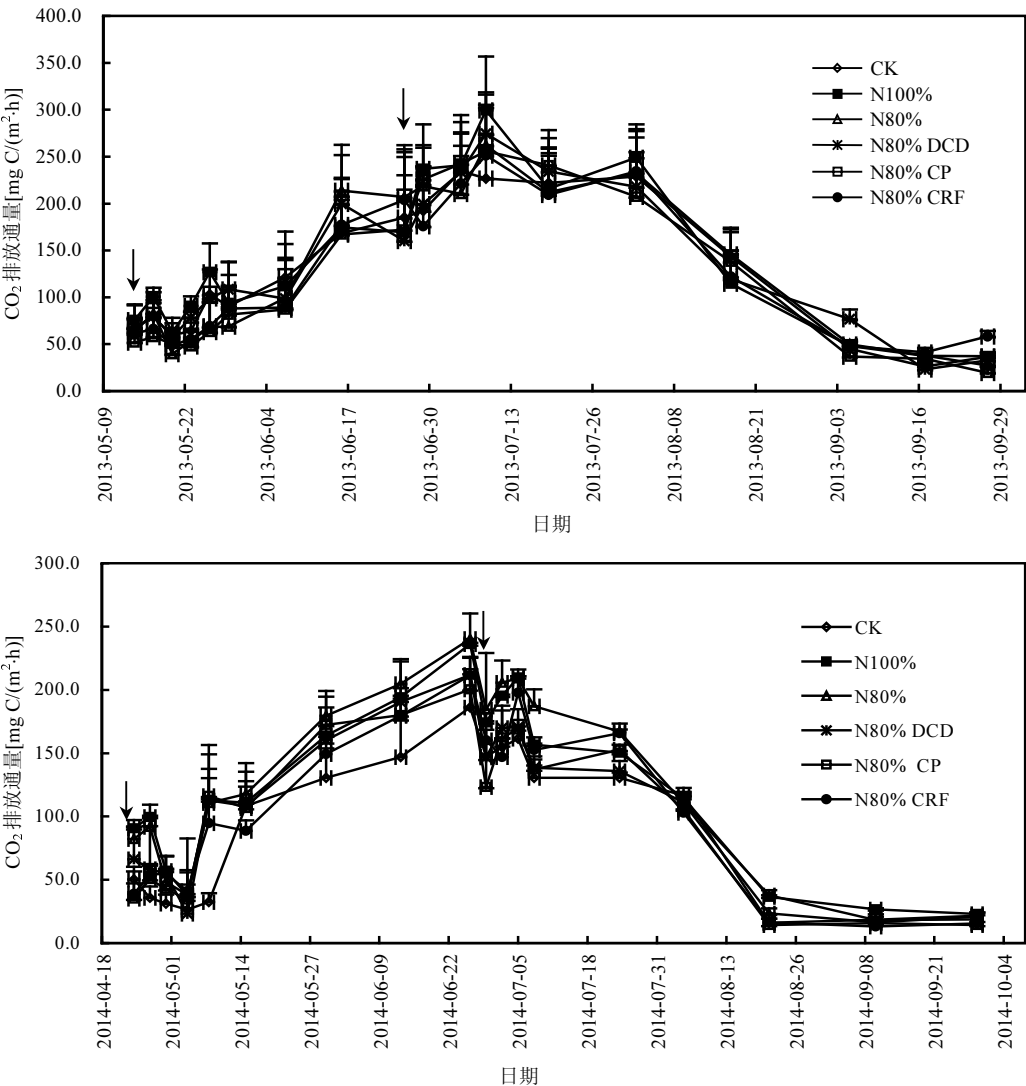


图 3 不同施肥措施下黑土 CO₂ 排放通量动态变化

Fig.3 Variation of CO₂ emission fluxes from spring maize field in a black soil under different fertilizer treatments

2.1.3 土壤 CH₄ 排放/吸收特征 不同施肥措 施下玉米生育期间土壤 CH₄ 的排放通量动态见

图 3,虽然在两次施肥后 CH_4 吸收通量表现出了 一定的变化,但从整个玉米生长季看,施肥后甲 烷排放通量略微增加,但总体来讲施肥对 CH_4 表明黑土玉米田是大气中 CH_4 的一个较弱的 排放通量没有表现出显著影响. 6 个处理在玉米 “汇”.

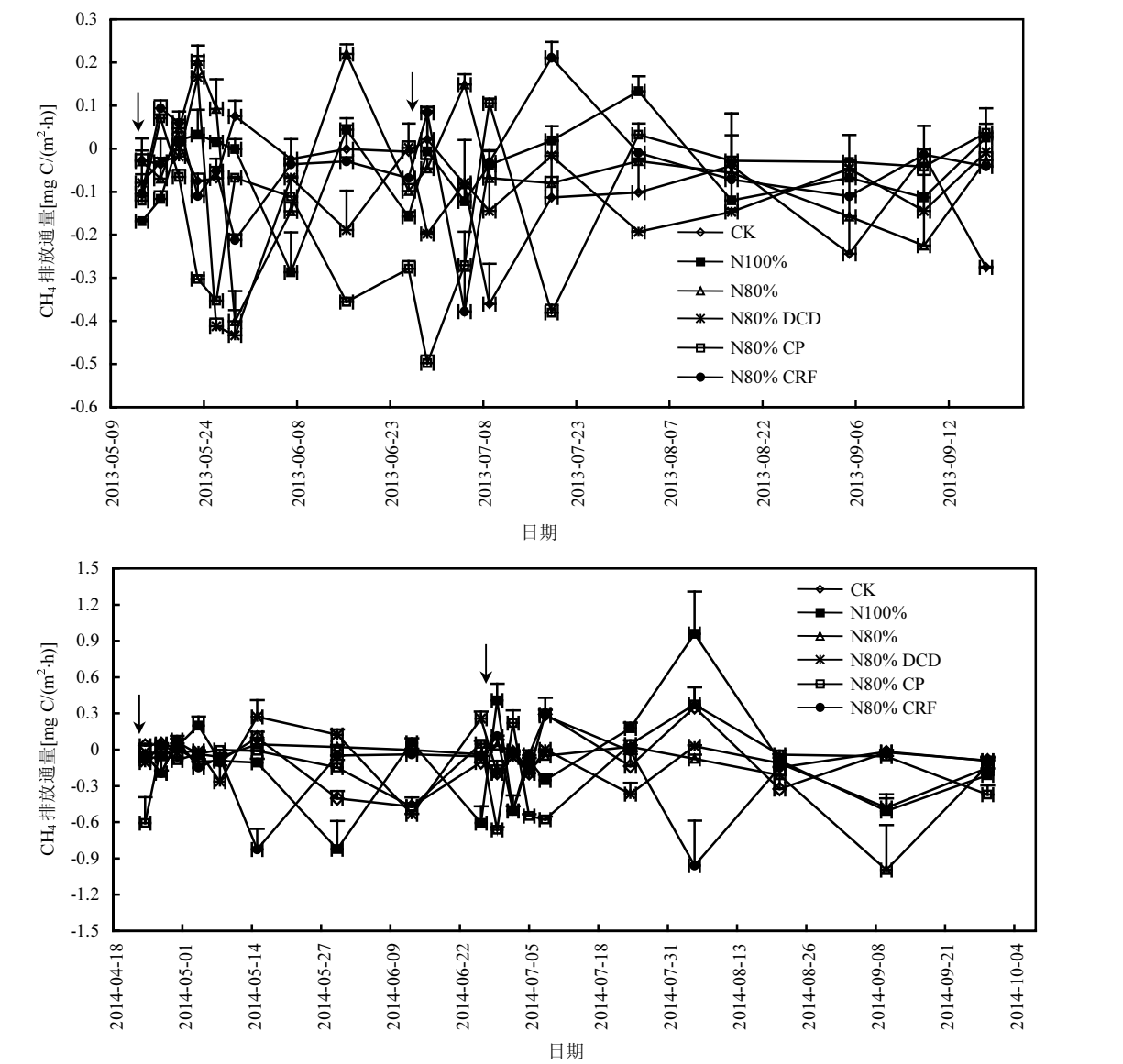


图 4 不同施肥措施下黑土甲烷排放/吸收通量动态变化

Fig.4 Variation of CH_4 emission fluxes from spring maize field in a black soil under different fertilizer treatments

2.2 不同施肥措施下黑土 N_2O 的排放特征

施氮显著促进了土壤 N_2O 排放(表 3).5 个 施氮处理的土壤 N_2O 排放量在 0.51~0.94kg N/hm^2 之间,较不施氮处理的分别增加 56.3%~ 189.8%.较高的氮肥用量,增加了土壤微生物所 需的的有效氮源,从而促进 N_2O 的排放.减施肥 料的 4 个处理可显著降低土壤 N_2O 排放量,较农 民常规施肥处理降低了 17.6%~46.1%.4 个减量

施肥处理间,N80% CP 和 N80% CRF 处理的土壤 N₂O 排放量最低.减施肥料的 4 个处理可显著降低因土壤 N₂O 排放造成的氮损失,排放系数在 0.11%~ 0.33%之间,明显低于农民常规施肥处理.从 N₂O 排放在玉米生育期内的分配来看,5 个施氮处理在施肥后 16d 内 N₂O 排放量较大,占生育期总排放量 1/3 左右,排放比例在 28.8%~41.9%之间.

表 3 不同施肥措施下黑土 N₂O 排放量(2013~2014 平均值)

Table 3 N₂O emission in black soil under different fertilizer treatments (Average emission from 2013 to 2014)

处理	生育期 N ₂ O 总排放量 Eg(kg N/hm ²)	N ₂ O 排放系数 Ef(%)	N ₂ O 减排比例 Ep(%)	施肥后 16d 内 N ₂ O 排放 比例 E16(%)
CK	0.32d	—	—	—
N100%	0.94a	0.33a	—	41.9
N80%	0.77b	0.28b	17.6	38.6
N80% DCD	0.57c	0.14c	39.8	30.8
N80% CP	0.51c	0.11c	46.1	29.7
N80% CRF	0.51c	0.11c	45.4	28.8

注: Eg—生育期N₂O总排放量; Ef—N₂O排放系数; Ep—N₂O减排比例; E16—施肥后16d内N₂O排放比例

2.3 不同施肥措施下玉米产量和减排成本分析
有研究表明,黑土玉米产区肥料增产效应以氮肥最高,不施氮对玉米产量影响最大^[17].本研究也表明,施用氮肥显著增加了玉米产量($P<0.05$,表 4).施用氮肥的 5 个处理玉米产量(平均产量)较 CK 的增加了 28.0%~35.1%,平均为 31.7%.相比

于习惯施肥处理 N100%,减量施氮 20%的 4 个处理的产量略有下降,但不存在显著差异,表明适当减少氮肥用量不影响玉米生物学性状和籽粒产量.本研究显示,施氮量相同时,添加硝化抑制剂以及控释氮肥 CRF 替代普通氮肥均未显著增加玉米产量.

表 4 不同施肥措施下黑土玉米产量和效益分析

Table 4 Yield and benefit of spring maize in black soil under different fertilizer treatments

处理	产量(kg/hm ²)			肥料成本 [元/(hm ² ·a)]	碳信用收益 [元/(hm ² ·a)]
	2013 年	2014 年	平均		
CK	7797.6±937.9b	8807.6 ±782.8b	8302.6b	—	—
N100%	10982.1±1082.5a	11454.8 ±288.7a	11218.5a	1501.39	—
N80%	10565.5±371.7a	11400.0 ±288.7a	10982.7a	1340.52	2.22
N80% DCD	10327.4±1199.0a	10934.1±642.1a	10630.8a	1414.52	52.36
N80% CP	10089.3±1115.2a	11783.7±1073.0a	10936.5a	1372.70	92.37
N80% CRF	10892.9±932.2a	10906.7 ±481.7a	10899.8a	1741.75	85.41

注:肥料价格尿素2000元/t,硫酸钾3200元/t,重过磷酸钙2400元/t,硫包膜尿素2400元/t,双氰胺10000元/t,喷涂吡啶抑制剂的尿素2100元/t

在各施氮处理玉米产量无显著差异的情况下,本研究评价经济效益时仅考虑肥料成本以及潜在的碳信用收益.不同施肥措施当年的肥料成本如表 4 所示,减施氮肥可直接降低成本,N80%、N80% DCD 和 N80% CP 3 个处理较习惯施肥处理 N100%的成本分别降低 160.87、86.87 和 128.70 元/(hm²·a).N80% CRF 处理由于控释氮肥(硫包膜尿素)价格较高,其肥料成本也最高,达到 1741.75 元/(hm²·a).在等氮量的情况下,添加硝化抑制剂也增加了肥料成本,N80% DCD 和 N80% CP 两个处理肥料成本较 N80%处理分别增加 74.00 和 32.17 元/(hm²·a).评价一种施肥措施的减排效果,不仅要计算肥料成本,还要考虑温室气体排放的环境效应.碳交易市场的建立,使得温室气体排放与经济效益直接关联起来.表 4 计算出了不同施肥措施下碳信用收益情况,相比于

农民习惯施肥,减施氮肥 20%时碳信用收益表现为正效应,减量施氮的 4 个处理碳信用收益在 2.22~92.37 元/(hm²·a)。

综合评价肥料成本和碳信用收益,减量施氮可节约成本并增加收入,其中 N80%、N80% DCD 和 N80%CP 3 个处理较习惯施肥处理 N100%分别增收 163.09、139.23 和 221.07 元/(hm²·a),平均增收 174.46 元/(hm²·a);等氮量时,添加 DCD 由于成本增加会减少收益 21.64 元/(hm²·a),而添加吡啶抑制剂 CP 会增收 60.20 元/(hm²·a),即因添加 CP 所导致的肥料成本增加值,小于其所减少的温室气体排放量所带来的碳信用收益值。

2.4 综合温室效应评价

表 5 不同施肥措施下春玉米生育期 N₂O 和 CH₄ 的综合温室效应 (2013~2014 平均值)

Table 5 Carbon dioxide equivalents under different fertilizer treatments during spring maize period		
处理	GWP(kg/hm ²)	GHGI(kg/t)
N100%	360.3a	32.1a
N80%	249.8b	22.7b
N80% DCD	138.4c	13.0c
N80% CP	115.9c	10.6c
N80% CRF	134.2c	12.3c

黑土玉米田 N₂O 和 CH₄ 转化为 CO₂ 当量的全球增温潜势(GWP)结果见表 5(目前的温室气体清单中,农田管理的土壤 CO₂ 排放并未被认为是人为温室气体排放源,因此此处只计算 N₂O 和 CH₄ 的总额和温室效应)。可见,玉米田 GWP 主要来源于 N₂O 的排放,是全球增温潜势占主导地位的温室气体,而 CH₄ 对玉米田 GWP 的抵消仅占很小比例。减量施氮可降低全球增温潜势,减施氮肥的 4 个处理 GWP 较习惯施肥处理 N100%的降低了 30.7%~67.8%。等量施氮时,添加硝化抑制剂以及施用控释氮肥均会降低 GWP,其中添加 DCD 和 CP 分别降低 44.6%和 53.6%,控释氮肥 CRF 则降低了 46.3%。温室气体排放强度(GHGI)是把全球增温潜势与作物产量相结合的综合温室效应评价指标,即单位经济产出温室气体排放量。通过比较 5 种施肥模式的 GHGI,减施氮肥的 4

个处理 GHGI 较习惯施肥处理 N100%的降低了 29.1%~67.0%,其中以 N80% CP 处理的最低,较 N100%和 N80%处理分别降低 67.0%和 53.4%,说明在保证作物产量的前提下,利用改进的施肥措施可以实现降低农田温室气体排放的目标。

3 讨论

3.1 不同施肥措施下黑土玉米田温室气体减排效果探究

氮肥施用是影响土壤 N₂O 排放的最重要因素之一,外源氮素不仅为作物提供了生长所需的养分,同时也为土壤微生物提供了充足的底物,促进了硝化、反硝化过程中 N₂O 的产生。而减施氮肥可以减少土壤中不能被植物及时吸收而残留的哪些无机氮,减少了硝化和继而引起的反硝化作用的底物(铵态氮和硝态氮),进而降低土壤 N₂O 排放^[13,18]。本研究中,减施氮肥的 4 个处理可 N₂O 排放量均显著降低,较农民常规施肥处理降低了 17.6%~46.1%。众多研究证明,N₂O 排放主要发生在施氮后半个月到 3 周内。本研究亦显示,不论基肥还是追肥,施氮后土壤 N₂O 排放通量均出现上升趋势,在施肥后 1~3d 内出现排放峰,且施肥后 16d 内 N₂O 排放量较大,占生育期总排放量的 1/3 左右。

黑土长期定位试验的结果表明,施肥和温度是影响黑土土壤呼吸变化的重要因素,施用有机肥(腐熟猪粪)土壤呼吸量显著高于其他处理,而施用化肥对土壤呼吸无显著影响;气温较高的拔节期至乳熟期土壤呼吸速率较高^[19]。本研究也得出类似结果,即玉米拔节期~乳熟期土壤 CO₂ 排放通量较高,主要原因是这一阶段玉米生长旺盛,根系生物量增加,来自根系的自养呼吸也增强,并且此时土壤温度较高,旺盛分泌的根系分泌物也为促进了土壤微生物的异养呼吸作用,从而产生较高的 CO₂ 排放通量;玉米生长接近成熟期时,玉米开始进入生殖生长,光合产物主要用于地上部生长,转移到根系中的同化物相对减少,根系开始逐渐衰老,根系分泌物也相应减少,并且土壤温度逐渐降低,微生物活动变弱,自养及异养呼吸均会因底物减少而降低,因此 CO₂ 排放通量呈现下降

趋势.综上可知,无外源有机物投入时,黑土玉米田 CO_2 排放主要受气温影响,氮肥减量 20% 对其影响较小.

微生物活动引起了土壤中 CH_4 的排放和吸收.在厌氧条件下,甲烷菌分解土壤中的有机物,产生 CH_4 排放;在好气土壤中, CH_4 被甲烷氧化菌氧化成 CO_2 ,而当土壤中 CH_4 浓度低于大气中 CH_4 浓度时,在浓度梯度作用下引起 CH_4 的负排放,强化了土壤作为 CH_4 的吸收汇特征^[20].此外,产甲烷菌在有氧气或者氧化性物质存在时,催化还原小分子有机物形成甲烷的过程会受到影响^[21].本研究表明,黑土玉米田是大气中 CH_4 的一个较弱的汇,这与其他旱地农田土壤 CH_4 通量研究结果一致^[20,22].究其原因,首先旱地农田土壤相对干燥,通气状况良好,氧气易于扩散到土壤中,促进土壤中介导甲烷氧化微生物(如甲烷氧化菌)和甲烷氧化酶(如甲烷单加氧酶)的活性,增强了土壤吸收氧化大 CH_4 的能力^[21].

3.2 硝化抑制剂与控释氮肥的减排效果分析

本研究中,添加硝化抑制剂双氰胺和 2-氯-6-氯三氯甲基吡啶均能够显著减少 N_2O 排放,降低综合温室效应和温室气体排放强度,这与前人关于硝化抑制剂减少 N_2O 排放的研究结果一致^[8,10,23].铵态氮肥施入土壤后发生硝化作用,即在氨氧化微生物的作用下将 NH_3 氧化为 NO_2^- ,继而生成 NO_3^- .在施入 DCD 后,DCD 可高效抑制氨氧化细菌的活性,其抑制机理可能为:(1)竞争性抑制.DCD 中的氨基($-\text{NH}_2$)和亚氨基($=\text{NH}$)具有与 NH_3 相似的结构,它们会结合氨单加氧酶(AMO)上氧化 NH_3 的活性位点,使其失去吸收和利用 NH_3 的能力^[24].(2)干扰氨氧化细菌呼吸.DCD 中的功能团 $\text{C}\equiv\text{N}$ 可能与菌体呼吸酶中的巯基或重金属基团发生反应从而抑制其活性,抑制氨氧化细菌呼吸作用过程中的电子转移和干扰细胞色素氧化酶的功能而影响硝化作用^[25].2-氯-6-氯甲基吡啶(CP)主要通过抑制氨氧化细菌的活性来抑制硝化作用的第一阶段氨氧化过程,即 NH_4^+ 向 NO_2^- 的转化过程,从而实现整个硝化过程被抑制^[26].CP 是 AMO 的一种催化底物,其氧化中间产物 6-氯嘧啶羧酸可以不加选择的

结合于膜蛋白进而抑制硝化作用^[27],但由于 CP 对 AMO 的亲能力并不强,底物竞争并不是其抑制硝化作用的直接原因^[28].Vannelli^[29-30]认为 CP 可能通过两种方式抑制硝化作用,一是利用其氧化产物 6-氯嘧啶羧酸螯合 AMO 活性位点上的 Cu 组分来抑制催化氧化过程,二是 CP 的三氯甲基可结合于 AMO 的活性位点,进而还原 O_2 并阻碍 NH_3 的硝化作用.可见,不同硝化抑制剂的抑制过程和机理不尽一致,对于黑土区不同硝化抑制剂的作用机理还有待进一步研究.

包膜控释氮肥能根据作物生长需肥曲线缓慢释放氮素,达到养分供应与作物需求同步,可从源头上控制土壤硝态氮和铵态氮的含量,进而减少氮素的气态损失^[23,31].本研究结果表明,控释肥用量 $148\text{kg}/\text{hm}^2$ 可以达到农民习惯用量 $185\text{kg}/\text{hm}^2$ 时的产量水平,即在黑土区减氮 20% 且施用控释氮肥可以满足玉米生育期内的氮素需求,并能够显著减少 N_2O 排放,降低综合温室效应和温室气体排放强度.因此,施用控释肥能够实现良好的产量和环境效益.

考虑某种肥料的实际应用价值时,在对比作物产量效应的同时还应重点关注其成本.本研究中,各施氮处理玉米产量无显著差异,评价经济效益时仅考虑肥料成本以及潜在的碳信用收益.在等氮量的情况下,添加硝化抑制剂和施用控释氮肥均会导致肥料成本上升,但同时会增加碳信用的收益.添加 DCD 和施用控释氮肥会增加成本;而添加吡啶抑制剂 CP 虽然成本也略有增加,但由于减排量大,减排收益大于其增加的成本,如果所减排的碳信用能够成交,综合计算会增收 $60.20\text{元}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$.目前我国还没有强制减排任务,但已经有一些自愿减排项目,农民或农户如果能综合考虑产量及环境效益,将所减排的碳信用集中放到碳市场交易是一个可喜的尝试.综上可知,N80% CP 施肥措施在维持玉米产量的同时,既有显著的减排效果,又可节约成本,适宜在黑土区玉米种植中推广使用.

4 结论

4.1 黑土春玉米田施肥(基肥和追肥)后 1~3d 出

现 N_2O 排放峰, 施肥后 16d 内 N_2O 排放量占生育期总排放量的 28.8%~41.9%。

4.2 黑土春玉米地在 $185\text{kg}/\text{hm}^2$ 施氮量水平上减施氮肥 20%, 较农民习惯施肥处理显著降低生育期土壤 N_2O 排放 17.6%~46.1%, 生育期综合温室效应降低 30.7%~67.8%, 温室气体排放强度降低 29.1%~67.0%。

4.3 等氮量投入时, 添加吡啶抑制剂处理的土壤 N_2O 排放量、综合温室效应和温室气体排放强度最低。

4.4 玉米拔节~乳熟期出现了较强的土壤 CO_2 排放, 黑土玉米田是大气中 CH_4 的一个较小的“汇”, 施氮和添加硝化抑制剂对黑土玉米田 CO_2 排放和 CH_4 吸收没有显著影响。

4.5 减施氮肥 20%基础上添加硝化抑制剂和施用控释肥对玉米产量没有显著影响; 但减量施氮可节约成本并增加碳信用收入, 添加吡啶抑制剂 CP 的增收效果最好。

4.6 综合评价各种施肥措施, 减氮 20%并添加吡啶抑制剂在保证玉米产量的同时, 减排增收效果优于其他施肥措施, 适宜在黑土区玉米种植中推广使用。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 郭树芳, 齐玉春, 董云社, 等. 滴灌对农田土壤 CO_2 和 N_2O 产生与排放的影响研究进展 [J]. 中国环境科学, 2014, 34(11): 2757-2763.
- [3] 赵兰坡, 张志丹, 王鸿斌, 等. 松辽平原玉米带黑土肥力演化特点及培育技术 [J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30(4): 511-516.
- [4] 纪玉刚, 孙静文, 周卫, 等. 东北黑土玉米单作体系氮挥发特征研究 [J]. 植物营养与肥科学报, 2009, 15(5): 1044-1050.
- [5] 黄树辉, 蒋文伟, 吕军, 等. 氮肥和磷肥对稻田 N_2O 排放的影响 [J]. 中国环境科学, 2005, 25(5): 540-543.
- [6] 熊舞, 夏永秋, 周伟, 等. 菜地氮肥用量与 N_2O 排放的关系及硝化抑制剂效果 [J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 743-751.
- [7] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 等. 硝化抑制剂的施用效果、影响因素及其评价 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1611-1618.
- [8] Di H J, Cameron K C, Sherlock R R, et al. Nitrous oxide emissions from grazed grassland as affected by a nitrification inhibitor, dicyandiamide, and relationships with ammonia-oxidizing bacteria and archaea [J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, 10(5): 943-954.
- [9] Sun H J, Zhang H L, Powlson D, et al. Rice production, nitrous oxide emission and ammonia volatilization as impacted by the nitrification inhibitor 2-chloro-6-(trichloromethyl)-pyridine [J]. Field Crops Research, 2015, 173: 1-7.
- [10] Migliorati M D A, Scheer C, Grace P R, et al. Influence of different nitrogen rates and DMPP nitrification inhibitor on annual N_2O emissions from a subtropical wheat-maize cropping system [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2014, 186: 33-43.
- [11] Ji Y, Liu G, Ma J, et al. Effect of controlled-release fertilizer on nitrous oxide emission from a winter wheat field [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2012, 94: 111-122.
- [12] 张怡, 吕世华, 马静, 等. 控释肥料对覆膜栽培稻田 N_2O 排放的影响 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 769-775.
- [13] 郝小雨, 高伟, 王玉军, 等. 有机无机肥料配合施用对设施菜田土壤 N_2O 排放的影响 [J]. 植物营养与肥科学报, 2012, 18(5): 1073-1085.
- [14] IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC [R]. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007.
- [15] Timothy H, Jonathan P, Kevin B. Target-intensity: an analysis of greenhouse gas intensity targets [M]. World Resources Institute, Washington D. C., USA, 2006: 37.
- [16] 于亚军, 朱波, 荆光军. 成都平原土壤-蔬菜系统 N_2O 排放特征 [J]. 中国环境科学, 2008, 28(4): 313-318.
- [17] 何萍, 徐新朋, 仇少君, 等. 我国北方玉米施肥产量效应和经济效益分析 [J]. 植物营养与肥科学报, 2014, 20(6): 1387-1394.
- [18] Venterea R T, Halvorson A D, Kitchen N, et al. Challenges and opportunities for mitigating nitrous oxide emissions from fertilized cropping systems [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2012, 10: 562-570.
- [19] 乔云发, 苗淑杰, 王树起, 等. 不同施肥处理对黑土土壤呼吸的影响 [J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 1028-1035.
- [20] 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.
- [21] 李志国, 张润花, 赖冬梅, 等. 西北干旱区两种不同栽培管理措施下棉田 CH_4 和 N_2O 排放通量研究 [J]. 土壤学报, 2012, 49(5): 924-934.
- [22] 邬刚, 潘根兴, 郑聚锋, 等. 施肥模式对雨养旱地温室气体排放的影响 [J]. 土壤, 2013, 45(3): 459-463.
- [23] 王斌, 李玉娥, 万运帆, 等. 控释肥和添加剂对双季稻温室气体排放影响和减排评价 [J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 314-323.

[24] Zhang L M, Hu H W, Shen J P, et al. Ammonia-oxidizing archaea have more important role than ammonia-oxidizing bacteria in ammonia oxidation of strongly acidic soils [J]. The ISME Journal, 2012,6:1032-1045.

[25] Amberger A. Research on dicyandiamide as a nitrification inhibitor and future outlook [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1989,20:1933-1955.

[26] 黄益宗,冯宗炜,张福珠.硝化抑制剂硝基吡啉在农业和环境保护中的应用 [J]. 土壤与环境, 2001,10(4):323-326.

[27] 武志杰,史云峰,陈利军.硝化抑制作用机理研究进展 [J]. 土壤通报, 2008,39(4):962-970.

[28] 张苗苗,沈菊培,贺纪正,等.硝化抑制剂的微生物抑制机理及其应用 [J]. 农业环境科学学报, 2014,33(11):2077-2083.

[29] Vannelli T, Hooper A. Oxidation of nitrapyrin to 6-chloropicolinic acid by the ammonia-oxidizing bacterium nitrosomonas europaea [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1992,58(7):2321-2325.

[30] Vannelli T, Hooper A B. Reductive dehalogenation of the trichloromethyl group of nitrapyrin by the ammonia-oxidizing bacterium Nitrosomonas europaea [J]. Applied and environmental microbiology, 1993,59(11):3597-3601.

[31] Grant C A, Wu R, Selles F, et al. Crop yield and nitrogen concentration with controlled release urea and split applications of nitrogen as compared to non-coated urea applied at seeding [J]. Field Crops Research, 2012,127:170-180.

作者简介: 郝小雨(1981-),男,河北张家口人,助理研究员,博士,主要从事农田养分循环研究.发表论文 10 篇.

十三五规划建议:重点生态功能区实行产业准入负面清单

《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十三个五年规划的建议》2015 年 11 月 3 日发布.《建议》提出,发挥主体功能区作为国土空间开发保护基础制度的作用,落实主体功能区规划,完善政策,发布全国主体功能区规划图和农产品主产区、重点生态功能区目录,推动各地区依据主体功能定位发展.以主体功能区规划为基础统筹各类空间性规划,推进“多规合一”.

推动京津冀、长三角、珠三角等优化开发区域产业结构向高端高效发展,防治“城市病”,逐年减少建设用地增量.推动重点开发区域提高产业和人口集聚度.重点生态功能区实行产业准入负面清单.加大对农产品主产区和重点生态功能区的转移支付力度,强化激励性补偿,建立横向和流域生态补偿机制.整合设立一批国家公园.

维护生物多样性,实施濒危野生动植物抢救性保护工程,建设救护繁育中心和基因库.强化野生动植物进出口管理,严防外来有害物种入侵.严厉打击象牙等野生动植物制品非法交易.

以县级行政区为单元,建立由空间规划、用途管制、领导干部自然资源资产离任审计、差异化绩效考核等构成的空间治理体系.

摘自《中国环境网》
2015-11-04