

控释掺混肥对夏玉米氮肥利用效率和气态氮损失的影响

曹兵, 高玮, 李洪杰, 王学霞, 王玉霞, 谷佳林, 倪小会, 李子双

引用本文:

曹兵, 高玮, 李洪杰, 王学霞, 王玉霞, 谷佳林, 倪小会, 李子双. 控释掺混肥对夏玉米氮肥利用效率和气态氮损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 1190–1198.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0924>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

控释肥对东北春玉米产量和土壤氨挥发的影响

宋梓璇, 李虎, 李建政, 尹彩霞, 王迎春, 山楠, 王立刚

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2342–2349 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1762>

清液肥对滴灌棉田 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响

王方斌, 刘凯, 殷星, 廖欢, 孙嘉璘, 闵伟, 侯振安

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2354–2362 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0067>

氮肥品种对露地蔬菜 NH_3 挥发及经济效益的影响

李晓明, 居静, 夏永秋, 钱晓晴, 颜晓元, 周伟

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1337–1343 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1482>

不同深施肥方式对稻田氨挥发及水稻产量的影响

周平遥, 张震, 王华, 肖智华, 徐华勤, 汪久翔

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2683–2691 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0441>

有机无机肥配施对苹果园温室气体排放的影响

马艳婷, 赵志远, 冯天宇, SOMPOUVISETThongsouk, 孔旭, 翟丙年, 赵政阳

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2039–2048 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1477>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

曹兵, 高玮, 李洪杰, 等. 控释掺混肥对夏玉米氮肥利用效率和气态氮损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 1190–1198.

CAO B, GAO W, LI H J, et al. Effects of blends of controlled-release and conventional nitrogen fertilizers on nitrogen utilization efficiency and gaseous nitrogen loss in summer maize cropland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(5): 1190–1198.



开放科学 OSID

控释掺混肥对夏玉米氮肥利用效率和气态氮损失的影响

曹兵^{1,4}, 高玮^{1,3,4}, 李洪杰², 王学霞^{1,4}, 王玉霞², 谷佳林^{1,4}, 倪小会^{1,4*}, 李子双^{2*}

(1.北京市农林科学院植物营养与资源环境研究所, 北京 100097; 2.德州市农业科学研究院, 山东 德州 253015; 3.河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071001; 4.北京市缓控释肥料工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要:为阐明控释掺混肥对夏玉米产量、氮肥利用效率和气态氮损失的影响,本研究以郑单958为供试材料,设不施氮对照(CK)、常规施氮(FFP)、优化施氮(OPT)、含30%控释尿素的控释掺混肥(CRBF30)和含50%控释尿素的控释掺混肥(CRBF50)共5个处理,对比分析了不同处理的夏玉米产量、氮肥利用效率和气态氮损失(氨挥发和N₂O排放)的差异。结果发现,控释掺混肥(CRBF30和CRBF50处理)较FFP处理夏玉米增产1.4%~2.9%($P>0.05$),在减氮和一次性施肥的条件下实现了夏玉米稳产。与FFP处理相比,CRBF30和CRBF50处理的氮肥吸收利用率分别提高了8.4个和11.1个百分点,其中CRBF50处理差异显著($P<0.05$);氮肥偏生产力分别提高了8.87 kg·kg⁻¹和9.86 kg·kg⁻¹($P<0.05$)。与FFP处理相比,控释掺混肥(CRBF30和CRBF50处理)的氨挥发强度和累积氨挥发损失分别降低71.9%~73.5%($P<0.05$)和71.59%~72.66%($P<0.05$),N₂O排放强度和累积排放量分别显著降低了34.5%~41.4%($P<0.05$)和33.7%~37.5%($P<0.05$)。综上,施用控释掺混肥可兼顾夏玉米稳产、氮肥高效利用并降低氮素气态损失。

关键词:夏玉米;控释掺混肥;氮肥利用效率;氨挥发;N₂O排放

中图分类号:S513 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)05-1190-09 doi:10.11654/jaes.2023-0924

Effects of blends of controlled-release and conventional nitrogen fertilizers on nitrogen utilization efficiency and gaseous nitrogen loss in summer maize cropland

CAO Bing^{1,4}, GAO Wei^{1,3,4}, LI Hongjie², WANG Xuexia^{1,4}, WANG Yuxia², GU Jialin^{1,4}, NI Xiaohui^{1,4*}, LI Zishuang^{2*}

(1. Institute of Plant Nutrition, Resource and Environment, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. Dezhou Academy of Agricultural Sciences, Dezhou 253015, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 4. Beijing Engineering Technology Research Center for Slow / Controlled-Release Fertilizer, Beijing 100097, China)

Abstract: Summer maize is an important staple food crop in China. The Huanghuaihai Plain is the main production area for summer maize, and stabilizing the planting area and yield of summer maize is of great significance for ensuring national food security. Adopting high-efficiency nutrition management practices is critical for maintaining summer maize yields and for sustainable agricultural development. Controlled-release fertilizer is a novel nutrient-efficient and environment-friendly fertilizer that can provide available nutrients in the soil at controlled rates or concentration levels required for crop growth while maintaining the nutrients for a longer period. Controlled-release fertilizer can promote crop yield, simplify fertilizer application, save labor, improve nitrogen use efficiency (NUE), and reduce reactive nitrogen losses by better synchronization of nitrogen release and crop uptake. To determine the effects of the blends of controlled-release

收稿日期:2023-11-03 录用日期:2024-02-21

作者简介:曹兵(1970—),男,湖北宜都人,博士,副研究员,从事新型肥料研究。E-mail:609284507@qq.com

*通信作者:倪小会 E-mail:nixiaohui7510@126.com;李子双 E-mail:zishuangli@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD170060504,2023YFD1701005);北京市农林科学院创新能力建设专项(KJCX20230304);北京市农林科学院创新平台建设项目(PT2023-47);新型肥料研发与评价科技能力提升项目(ZHS202301)

Project supported: National Key Research and Develop Program (2022YFD170060504, 2023YFD1701005); Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences Innovation Capacity Building Special(KJCX20230304); Platform Construction of Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences (PT2023-47); Improvement of Technological Capabilities in Research and Evaluation of New Fertilizers (ZHS202301)

and conventional nitrogen fertilizers on summer maize yield, nitrogen utilization efficiency, and gaseous nitrogen loss, ammonia (NH_3) volatilization was measured using the aeration method and nitrous oxide (N_2O) emission was sampled using a static box and measured by gas chromatography. A field experiment was conducted using the summer maize cultivar Zhengdan 958, and five nitrogen fertilizer management treatments were established: no nitrogen fertilizer (CK), conventional nitrogen application (FFP), optimized nitrogen application (OPT), blends of controlled-release and conventional nitrogen fertilizers with 30% coated urea (CRBF30), and blends of controlled-release and conventional nitrogen fertilizers with 50% coated urea (CRBF50). For the CRBF30 and CRBF50 treatments, total nitrogen was applied simultaneously as basal fertilization. Summer maize yield, NUE, NH_3 volatilization, and N_2O emissions under different treatments were compared. The results showed that blends of controlled-release and conventional nitrogen fertilizers (CRBF30 and CRBF50 treatments) increased the yield of summer maize by 1.4% to 2.9% compared with FFP treatments ($P>0.05$), and a stable yield of summer maize was achieved under the conditions of nitrogen reduction and one-time fertilization. Compared with FFP, the nitrogen recovery efficiency (NRE) of the CRBF30 and CRBF50 treatments increased by 8.4 and 11.1 percentage points, respectively, with a significant difference in the CRBF50 treatment ($P<0.05$). Nitrogen partial factor productivity (NFP) of CRBF30 and CRBF50 treatments increased by 8.87 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 9.86 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P<0.05$), respectively. Compared with FFP treatment, NH_3 volatilization intensity and cumulative NH_3 volatilization loss of the blends of controlled-release and conventional nitrogen fertilizers (CRBF30 and CRBF50 treatments) were reduced by 71.9%–73.5% ($P<0.05$) and 71.59%–72.66% ($P<0.05$), respectively. The N_2O emission intensity and cumulative emission were significantly reduced by 34.5%–41.4% ($P<0.05$) and 33.7%–37.5% ($P<0.05$), respectively. In summary, blends of controlled-release and conventional nitrogen fertilizers can help ensure stable summer maize yields, improve NUE, and reduce gaseous nitrogen losses.

Keywords: summer maize; blends of controlled-release and conventional N fertilizers; nitrogen utilization efficiency; ammonia volatilization; N_2O emission

氮是作物生长发育的关键营养元素,合理施氮在农作物增产诸因素中起主要作用^[1-2]。施入农田的氮肥部分会进入水体和大气^[3],造成环境污染^[4],因此,采用科学的养分管理措施,在实现作物高产的同时降低氮素损失对环境的危害,是保障粮食安全和农业绿色发展的重要举措。

玉米是我国三大主粮作物之一,其中夏玉米占全国玉米播种面积的43.4%^[5],黄淮海平原则是我国夏玉米主产区,稳定夏玉米播种面积和产量对于保障国家粮食安全具有重要意义。近年来随着农村人口持续向城镇转移,农业生产中劳动力短缺及老龄化问题日益突出,已严重威胁到了农业生产的可持续性和粮食安全,农业生产的轻简化已成为当下和未来农业发展趋势。目前夏玉米生产中广泛采用了缓控释肥一次性种肥同播技术,实现了夏玉米生产的高产、高效、生态、节肥和省工^[6-7],对于化肥减施增效和保障国家粮食安全发挥了重要作用。根据缓控释肥养分缓慢持续释放的特点,采用缓控释氮肥与速效化肥掺混成缓控释专用肥,夏玉米播种时一次性施入缓控释专用肥,不仅解决了常规速效性化肥需要追肥的难题,还能有效降低肥料投入成本,且能较好地满足夏玉米稳产高产的氮素需求并降低氮素损失^[8-11]。Zheng等^[12]通过8 a的定位研究表明,在冬小麦-夏玉米轮作制度下,控释掺混肥一次性施肥的夏玉米增产6.8%~9.8%,平均氮肥利用率提高13.2%~14.3%。Guo等^[13]

对高产玉米的施肥研究表明,控释掺混肥一次性施肥能满足高产玉米生育期的氮素需求,其中控释尿素和普通尿素以2:1的比例掺混不仅能实现玉米高产,还能将氮素损失降至最低。刘仲阳等^[14]对缓控释肥一次性施肥连续施用对粮食作物产量、土壤肥力、氮肥利用率及对农田生态环境影响的分析表明,缓控释肥料一次性施肥连续5 a及以上使玉米产量提高了0~14.4%,氮肥利用率提高了14.3%~80.3%;一次性施肥连续施用3 a及以上的玉米农田 N_2O 排放、 NH_3 挥发分别降低5.1%~56.0%和6.1%~52.4%。Zhang等^[15]通过Meta分析表明施用控释尿素可使玉米产量提高5.3%,氮肥利用率提高24.1%, N_2O 排放和氨挥发损失分别降低23.8%和39.4%。

目前控释肥在夏玉米上的研究主要以释放期、掺混比例对产量和氮肥利用率的影响为主^[9,16-18],对控释肥施用的氮素损失和环境效应研究相对缺乏,尤其是与大气环境密切相关的气态氮损失。为此,本研究拟通过田间小区试验研究包膜尿素和普通尿素不同掺混比例对夏玉米产量、氮肥利用效率和气态氮损失(氨挥发和 N_2O 排放)的影响,以期对夏玉米的轻简高效生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验地位于山东省德州市现代农业科技园区

(37.44°N, 116.30°E), 属温带大陆性季风气候, 年平均温度为 12.9 °C, 年均日照时数为 2 592 h, 年平均降雨量为 547.5 mm。夏玉米生育期降雨量为 468.5 mm, 研究期气温和降雨分布见图 1。试验地土壤为潮土, 0~20 cm 耕层土壤养分状况: 土壤 pH 值 8.40, 有机质含量 13.31 g·kg⁻¹, 全氮含量 0.80 g·kg⁻¹, 有效磷含量 28.66 mg·kg⁻¹, 速效钾含量 170.35 mg·kg⁻¹, 碱解氮含量 53.1 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

田间试验共设 5 个施肥处理, 分别为不施氮对照 (CK), 不施氮肥, 只施磷钾肥; 常规施氮 (FFP), 其中氮肥 1/3 作为底肥, 2/3 用于大喇叭口追肥; 优化施氮 (OPT), 其中氮肥 1/3 作为底肥, 2/3 用于大喇叭口追肥; 含 30% 控释尿素的控释掺混肥 (CRBF30), 控释氮占总施氮量的 30%, 采用一次性施肥; 含 50% 控释尿素的控释掺混肥 (CRBF50), 控释氮占总施氮量的 50%, 采用一次性施肥。氮肥分为大颗粒尿素 (含 N 46%) 和生物基聚氨酯包膜尿素 (含 N 44.7%, 初期释放率 0.52%, 氮素累积释放 80% 所需时间为 62 d, 由北京市农林科学院植物营养与资源环境研究所自制), 各处理磷肥 (105 kg·hm⁻²) 和钾肥 (135 kg·hm⁻²) 用量相同, 磷肥为重过磷酸钙 (含 P₂O₅ 46%), 钾肥为硫酸钾 (含 K₂O 52%), 磷钾肥全部基施, 施氮方案详见表 1。每个

表 1 施氮方案 (kg·hm⁻²)

Table 1 Nitrogen application scheme (kg·hm⁻²)

处理 Treatment	基肥 Base fertilizer	追肥 Topdressing
CK	0	0
FFP	80	160
OPT	70	140
CRBF30	210	0
CRBF50	210	0

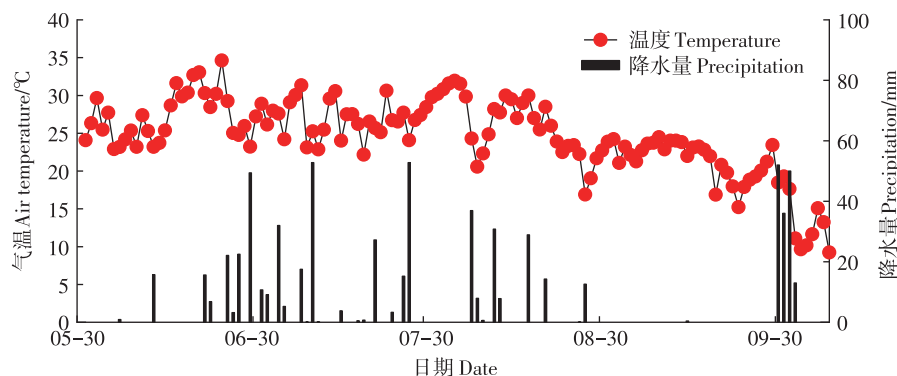


图 1 夏玉米生长季降雨量与温度

Figure 1 Precipitation and temperature during summer maize growing period

处理 3 次重复, 15 个试验小区, 小区面积为 42 m², 每个小区种植 7 行夏玉米, 采用随机区组设计。夏玉米 2022 年 6 月 10 日机播 (7 行), 10 月 13 日收获, 夏玉米品种为郑丹 958。夏玉米在出苗后侧深施入基肥, 追肥尿素则采用撒施。夏玉米株行距为 23 cm×60 cm, 前茬小麦秸秆全部还田, 田间管理参照当地农民习惯。

1.3 取样与测定方法

1.3.1 夏玉米产量

在夏玉米收获时, 每小区选取中间两行有代表性的 20 株玉米进行人工收割, 将玉米穗摘下后风干脱粒, 并测定玉米籽粒的实际含水量, 折合水分含量 14% 计算玉米籽粒质量作为产量数据。

1.3.2 吸氮量和氮肥利用效率

玉米成熟期每小区选取长势均匀的 3 株玉米, 将所取的植株分为秸秆 (含棒芯) 和籽粒以测定植株含氮量, 样品置于烘箱 105 °C 杀青 30 min, 75 °C 下烘干至质量恒定, 籽粒全部粉碎后取样分析, 秸秆先用大机械全部粗粉碎, 再用小型粉样机细粉碎后取样分析, 采用凯氏定氮法测定样品的全氮含量。

氮肥吸收利用率 (NRE, %) 计算公式:

$$NRE = (N_a - N_b) / N \quad (1)$$

式中: N_a 和 N_b 分别为施氮区和不施氮区地上部氮素积累量, kg·hm⁻², N 为当季施氮肥量, kg·hm⁻²。

氮肥农学利用率 (NAE) 计算公式:

$$NAE = (Y_a - Y_b) / N \quad (2)$$

式中: Y_a 和 Y_b 分别为施氮区和对照区产量, kg·hm⁻²。

氮肥偏生产力 (NPF, kg·kg⁻¹) 计算公式:

$$NPF = Y / N \quad (3)$$

式中: Y 为总产量, kg·hm⁻²。

1.3.3 氨挥发和 N₂O 排放测定

土壤 NH₃ 挥发采用通气法测定^[19]。通气法装置

由硬质PVC管(内径16 cm,高20 cm)制作而成,上下通透。测定前将装置插入土壤约5 cm,测定时将两块厚度均为2 cm、直径为17 cm的海绵均匀浸以磷酸甘油溶液,置于塑料管中,下层海绵距离管底部5 cm,上层海绵与管顶部相平,下层海绵用于吸收土壤挥发的NH₃,上层海绵用于防止空气中的NH₃和灰尘进入。施肥后立即进行土壤NH₃挥发的测定,每次取样时间均为上午8:00—9:00,取样时仅将装置的下层海绵取出放入密封袋中,并换上另一块浸过磷酸甘油的海绵,上层的海绵视干湿情况3~5 d更换一次,保证湿润。在每次施肥后1~2 d取样一次,随后视监测到的氨挥发量每隔3~5 d一次,往后可拉长至7~10 d,直至各处理的氨挥发量维持在很低水平,停止监测。将取回的海绵带回实验室,立即浸泡在300 mL 1 mol·L⁻¹的KCl溶液中,振荡1 h,随后用流动分析仪(AA3, Bran+Luebbe,德国)测定浸提液的铵态氮含量。计算公式如下:

$$F_{\text{NH}_3} = [M / (A \times D)] \times 10^{-2} \quad (4)$$

式中: F_{NH_3} 为氨挥发速率,kg·hm⁻²·d⁻¹;M为单个捕获装置平均每次测得的NH₄⁺-N量,mg;A为捕获装置的横截面积,m²;D为每次连续捕获的时间,d。

$$AAV = \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_{i+1} + F_i}{2} \right) \times (t_{i+1} - t_i) \quad (5)$$

式中:AAV为测定NH₃累积排放量(以N计),kg·hm⁻²;F_i为第i次测定时NH₃的排放通量;t_{i+1}-t_i为第i次取样到第i+1次取样的间隔天数,d。

N₂O排放通量采用静态暗箱-气相色谱法进行采集与测定^[20]。静态箱由箱体和底座两部分组成。箱体为直径31.5 cm,高60 cm的PVC圆柱形,静态箱外部用黑色泡沫包裹,表面覆有隔热层。静态箱底座附有凹槽,在种植作物后将底座埋入土壤约10 cm深,取样时将底座凹槽注满水,将箱体置于水槽底座中形成密闭空间,随后分别在放置箱子后的第0、5、15、30分钟用20 mL注射器收集箱内气体并打入10 mL真空顶空气瓶。底座均置于小区中央,每小区均放置一个静态箱。温室气体于作物施肥后开始取样,取样时间均为晴朗上午9:00—11:00,施肥或降雨后加密采集次数(间隔1~2 d),平时7 d一次(共采样18次)。在气样采集的同时记录10 cm深土壤温度和土壤含水量。土壤温度和土壤含水量采用土壤温湿度记录仪(BS3132,北京雨根科技公司)测定,每个处理任选一个小区放置1个土壤温湿度记录仪。利用气相色谱仪(HP6890N, Agilent公司)测定顶空气瓶中的N₂O

浓度,测定N₂O浓度的检测器为电子捕获检测器(ECD),测定温度为330 ℃,色谱柱也为Porpak Q填充柱,柱温70 ℃。

N₂O排放通量计算公式:

$$F_{\text{N}_2\text{O}} = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T} \quad (6)$$

式中: $F_{\text{N}_2\text{O}}$ 为N₂O排放通量,μg·(m²·h)⁻¹;ρ表示标准状态下气体的密度,g·cm⁻³;V为采样箱体积,m³;A为采样底座内土壤表面积,m²;Δc/Δt表示气体的排放速率;T为采样时箱内的平均温度,℃,N₂O排放通量(均值)为夏玉米生长期所有测试数据的算术平均值。

N₂O累积排放量计算公式:

$$ANE = \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_{i+1} + F_i}{2} \right) \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (7)$$

式中:ANE为测定N₂O累积排放量,kg·hm⁻²;F_i为第i次测定时N₂O的排放通量。

NH₃/N₂O挥发或排放强度(EI_{NH₃/N₂O}, kg·t⁻¹)和排放因子(EF_{NH₃/N₂O}, %, 占施氮量的比率)采用下述公式计算:

$$EI_{\text{NH}_3/\text{N}_2\text{O}} = AE_{\text{NH}_3/\text{N}_2\text{O}} / Y \quad (8)$$

$$EF_{\text{NH}_3/\text{N}_2\text{O}} = \frac{AE_N - AE_0}{R_N} \times 100 \quad (9)$$

式中:AE_{NH₃/N₂O}是各处理NH₃/N₂O的累积排放量,kg·hm⁻²;Y是产量,t·hm⁻²;AE_N和AE₀是施氮处理和无氮对照处理NH₃/N₂O的累积排放量,kg·hm⁻²;R_N是施氮量,kg·hm⁻²。

1.4 数据处理

采用Excel 2013、Origin 8.5软件进行数据处理和图形绘制,所有数据均运用SPSS 22.0软件进行单因素方差分析,差异显著性水平为0.05水平。

2 结果与分析

2.1 夏玉米产量和氮肥利用效率

施氮显著提高了夏玉米产量,增产幅度为16.5%~17.1%(P<0.05),施氮处理间则无显著差异(表2),可见控释掺混肥处理(CRBF30和CRBF50)在减氮条件下可起到稳产的效果。

与不施氮对照相比,施氮显著增加了夏玉米吸氮量,施氮处理间差异不显著(表2)。与常规施氮(FFP处理)相比,优化施氮(OPT处理)和控释掺混肥(CRBF30和CRBF50处理)均在一定程度上提高了氮肥利用效率(表2)。与FFP处理相比,CRBF30和CRBF50处理的氮肥吸收利用率分别提高了8.4个和11.1个百分点,其中CRBF50处理差异显著(P<0.05),

氮肥偏生产力分别提高了 8.87 kg·kg⁻¹ 和 9.86 kg·kg⁻¹ ($P < 0.05$)。

2.2 氨挥发

施基肥后,各处理均在第1天出现氨挥发速率高峰,施氮处理的氨挥发速率显著高于不施氮对照(图2a),FFP处理的氨挥发速率最高,较CK处理增加150.5%。在施氮处理中,CRBF30和CRBF50处理较FFP处理均降低了氨挥发速率峰值,所有处理的氨挥发速率在6d后均趋于平稳;夏玉米大喇叭口追肥后,FFP与OPT处理同样在第1天出现氨挥发峰值(图2b),并在追肥后第4天开始趋于平稳,CK、CRBF30和CRBF50处理未出现氨挥发高峰,与前期差异较小且相对平稳。各处理的氨挥发通量峰值仍然以FFP处理为最高,是CK处理的15.5倍且远高于CRBF30和CRBF50处理。FFP和OPT处理在追肥期的氨挥发通量峰值远高于基肥期,而控释掺混肥处理(CRBF30和CRBF50)在夏玉米整个生育期的氨挥发速率均维

持在较低水平,无明显波动。

与FFP相比,CRBF30和CRBF50处理显著降低了夏玉米生育期内的氨挥发强度(表3),降幅分别为71.9%和73.5% ($P < 0.05$)。各施肥处理的氨挥发累积损失量呈现 FFP>OPT>CRBF30>CRBF50>CK 的趋势,其中FFP处理和OPT处理的累积氨挥发损失量较CK处理显著增加了11.35~13.59 kg·hm⁻² ($P < 0.05$),增幅达317%~379%,而控释掺混肥处理(CRBF30和CRBF50)与CK处理相比均无显著差异 ($P > 0.05$)。与FFP相比,OPT、CRBF30和CRBF50处理的累积氨挥发损失量分别显著降低了13.04%、71.59%和72.66% ($P < 0.05$)。各施氮处理的氨挥发损失因子在0.5%~5.7%之间,其中控释掺混肥处理仅为0.5%~0.6%,而且控释氮的比例越高,氨挥发损失越低。可见施用控释掺混肥可明显降低夏玉米生育期内的氨挥发损失,既提高了氮肥利用率又减少了氨挥发对环境造成的危害。

表2 产量和氮肥利用率
Table 2 Yield and nitrogen use efficiency

处理 Treatment	产量 Yield/ (t·hm ⁻²)	吸氮量 Nitrogen uptake/ (kg·hm ⁻²)	氮肥吸收利用率 N recovery efficiency/%	氮肥农学利用率 N agronomic efficiency/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 N partial factor productivity/ (kg·kg ⁻¹)
CK	11.53±0.32b	133.6±14.4b	—	—	—
FFP	13.40±0.32a	212.6±11.1a	32.9±4.6b	7.81±1.33a	55.85±1.33b
OPT	13.50±0.80a	213.0±9.87a	37.8±4.7ab	9.40±3.80a	64.31±3.80a
CRBF30	13.59±0.51a	220.4±6.81a	41.3±3.2ab	9.82±2.42a	64.72±2.42a
CRBF50	13.80±0.35a	236.1±9.93a	48.9±4.7a	10.81±1.69a	65.71±1.69a

注:不同小写字母表示处理之间在5%水平上差异显著。下同。

Note: Different lowercase indicates the significant difference among treatments at the 5% level. The same below.

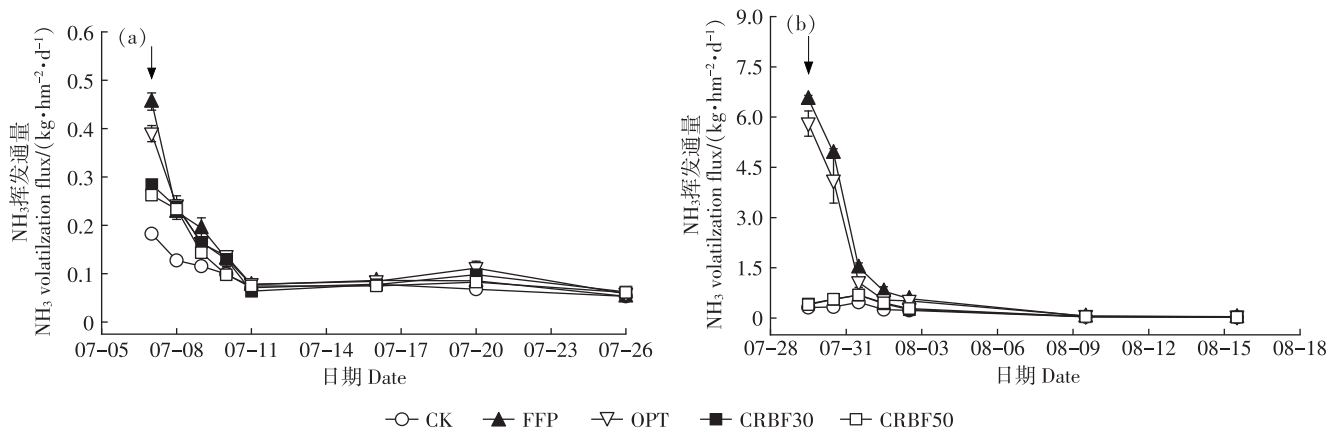


图2 氨挥发通量
Figure 2 Ammonia volatilization flux

表3 夏玉米全生育期氨挥发损失

Table 3 Ammonia volatilization loss of summer maize growth period

处理 Treatment	氨挥发强度 NH ₃ volatilization intensity/(kg·t ⁻¹)	氨挥发累积损失 Cumulation volatilization emission/ (kg·hm ⁻²)	氨挥发损失因子 Ammonia volatilization loss factor/%
CK	0.31±0.01c	3.58±0.08c	—
FFP	1.28±0.01a	17.16±0.39a	5.7±0.16a
OPT	1.10±0.05b	14.93±1.17b	5.4±0.56a
CRBF30	0.36±0.01c	4.88±0.07c	0.6±0.03b
CRBF50	0.34±0.01c	4.69±0.20c	0.5±0.10b

2.3 N₂O 排放

如图3a所示,施基肥后第3天,FFP处理较不施氮对照的N₂O排放通量增加70 μg·m⁻²·h⁻¹,增幅82.3%,随后CK处理的N₂O排放通量总体缓慢下降,各施氮处理则迅速上升并在第5天出现N₂O排放通量峰值,其中FFP处理最高。在追肥期,FFP与OPT处理均在施追肥后的第3天出现排放通量峰值,且同样以FFP处理最高,而控释掺混肥处理除在灌浆期有一个较小的排放峰外,整个追肥期无明显波动。FFP

处理较不施氮对照的N₂O排放通量(均值)增加了179.6%(*P*<0.05)。在施氮处理中,CRBF30和CRBF50处理的N₂O排放通量(均值)较FFP处理分别显著降低了23.1%和28.5%(*P*<0.05),较OPT处理分别显著降低了12.3%和18.4%(*P*<0.05),CRBF50处理的N₂O排放通量(均值)又显著低于CRBF30处理(*P*<0.05,图3b)。

N₂O排放通量与环境因子(土壤温度和土壤含水量)呈显著正相关关系(图4),土壤温度和含水量越高,N₂O排放通量越高,夏玉米生长前期和中期温度相对更高,黄淮海平原具有雨热同季特点,夏玉米生长期内的土壤含水量则主要受降雨影响(图1),因此N₂O排放通量在夏玉米生长前期和中期相对更高(图3a)。

施氮显著增加了夏玉米的N₂O排放强度和累积排放量(*P*<0.05),其中FFP处理N₂O累积排放量最高(表4),较不施氮对照增加2.31 kg·hm⁻²,增幅151%。与FFP相比,CRBF30和CRBF50处理的N₂O排放强度分别显著降低了34.5%和41.4%(*P*<0.05),与OPT相比,CRBF30和CRBF50处理的N₂O排放强度分别显著降低了24.0%和32.0%(*P*<0.05);与FFP相比,CRBF30和CRBF50处理的N₂O累积排放量分别显著降低了

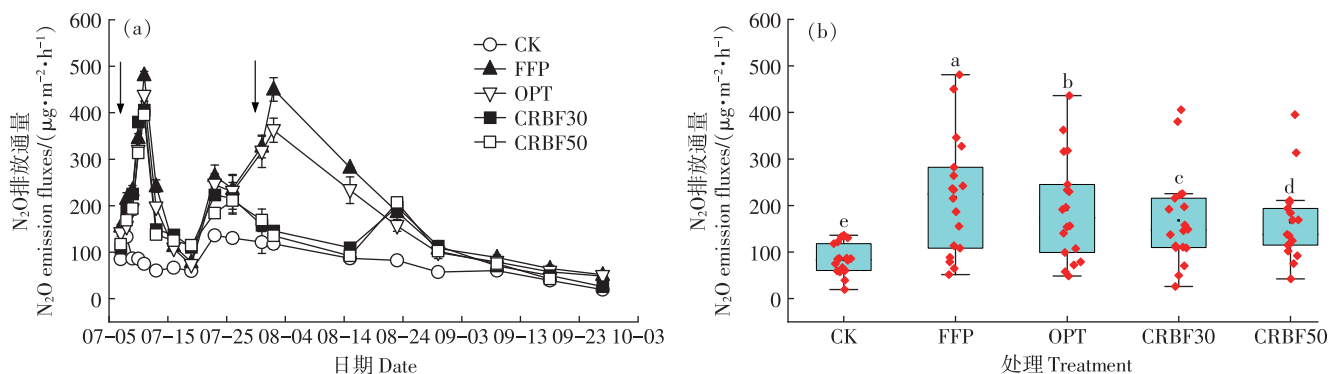
图3 N₂O 排放通量

Figure 3 nitrous oxide emission flux

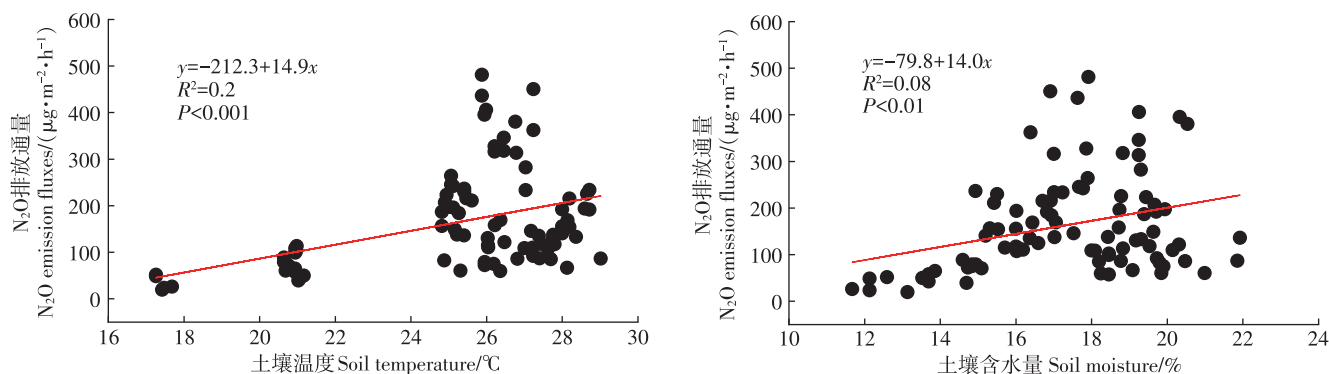
图4 N₂O 排放通量与环境因子(土壤温度和含水量)的关系

Figure 4 Relationship between nitrous oxide emission flux and environmental factors (soil temperature and moisture content)

表4 夏玉米生育期 N₂O 排放Table 4 N₂O emission of summer maize growth period

处理 Treatment	N ₂ O 排放强度 N ₂ O emission intensity/(kg·t ⁻¹)	N ₂ O 累积排放量 Cumulation N ₂ O emission/(kg·hm ⁻²)	N ₂ O 排放因子 N ₂ O emission factor/%
CK	0.13±0.01d	1.53d	—
FFP	0.29±0.01a	3.84a	1.1
OPT	0.25±0.02b	3.33b	1.0
CRBF30	0.19±0.01c	2.55c	0.57
CRBF50	0.17±0.01c	2.40c	0.48

33.7% 和 37.5% ($P<0.05$), 与 OPT 相比, CRBF30 和 CRBF50 处理的 N₂O 累积排放量分别显著降低了 23.5% 和 27.9% ($P<0.05$)。CRBF30 和 CRBF50 处理的 N₂O 排放因子仅为 FFP 处理的一半左右。由此可见, 与速效性氮肥相比, 施用控释掺混肥可以有效降低夏玉米的土壤 N₂O 排放, 减排作用明显。

3 讨论

3.1 控释掺混肥对夏玉米产量和氮肥利用效率的影响

控释肥的养分供应更易满足作物生长期的氮素需求, 采用一次性施肥的控释肥较常规分次施氮的作物产量和氮肥利用率更高, 同时还能显著降低活性氮损失^[21], 但由于控释材料和肥料二次加工均会增加控释肥的成本, 因此在粮食作物生产中, 大多采用控释肥和速效性化肥配制成控释掺混肥, 充分利用了速效性氮肥和控释肥不同的氮素供应特征, 满足作物生长前期和中后期的氮素差异化需求, 同时价格降低使得控释肥能大规模应用于玉米、水稻等粮食作物^[6-7, 22], 控释掺混肥已成为平衡肥料投入和作物增产的最优选择^[10]。本研究中, 相比常规分次施氮, 在减氮 12.5% 且采用一次性施肥的情况下, 施用控释掺混肥实现了夏玉米稳产, 但不同控释尿素掺混比例的夏玉米产量差异不显著(表 2), 与杨俊刚等^[11]在夏玉米上研究发现控释掺混肥具有稳产的结果类似, 曹兵等^[18]研究表明, 控释尿素不同掺混比例对夏玉米产量影响不明显, 即使减氮 20% 也不会导致夏玉米减产。本试验结果表明, 施用控释掺混肥的氮肥利用效率(氮肥利用率和氮肥偏生产力)均高于常规施氮(表 2), 与定位试验和 Meta 分析的研究结果一致^[12, 23]。控释肥能提高作物产量和氮肥利用效率的主要原因是其氮素释放特征与作物吸氮规律高度吻合^[21, 24], Zhang 等^[25]研究表明, 控释肥的氮素释放与直播稻氮素吸收呈显著的直线关系, 相比常规施肥, 即使减氮 1/3 还能显著增

产, 氮肥利用率大幅提高。

3.2 控释掺混肥对氮素气态损失的影响

氨挥发是农田氮肥损失的主要途径之一, 氨挥发不仅会降低农田氮肥利用率, 也会造成大气雾霾、氮沉降和温室效应等环境问题^[26-28], 控释肥料的包膜层可以使得氮素缓慢释放, 降低土壤铵态氮浓度和脲酶活性, 进而减少氨挥发损失^[21, 29], Meta 分析揭示控释肥可平均减少氨挥发损失 48.4%^[28]。本研究中, FFP 处理的氨挥发损失因子为 5.7%, 低于北方夏玉米氨挥发损失的均值(7.72%)^[30], 控释掺混肥(CRBF30 和 CRBF50 处理)较常规氮肥显著降低了氨挥发速率(图 2), 氨挥发强度降低 71.9%~73.5%, 氨挥发损失降低 71.59%~72.66%, 稍高于杨俊刚等^[11]关于控释掺混肥在夏玉米上 54%~63% 的氨挥发减排比例。本研究氨挥发损失与类似研究出现差异的原因可能与施氮量、施肥方式、测试方法、控释掺混肥(释放期和掺混比例)和土壤及环境因素等有关。在夏玉米生育期内, 控释掺混肥(CRBF30 和 CRBF50 处理)的氨挥发速率没有大的波动, 但 FFP 和 OPT 处理在追肥后的氨挥发速率远高于基肥阶段(图 2), 导致这种差异的主要原因是施肥方式不同, 基肥采用开沟条施, 而追肥则采用雨前撒施, 但如果追肥后降雨较小, 尤其是在施肥后的一周内没有出现强降雨, 将会为氨挥发创造适宜的条件^[31], 从而造成北方夏玉米基肥期氨挥发明显低于追肥期^[30]。

土壤 N₂O 主要通过微生物活动的硝化反硝化过程产生, N₂O 是一种重要的温室气体。虽然单位质量 N₂O 对温室效应的贡献率仅为 5%, 但它的增温潜势却分别是 CH₄ 和 CO₂ 的 13 倍和 296 倍, 农田系统中因氮肥施用造成的 N₂O 排放量大约可占到 50%^[32], 控释尿素较速效性氮肥平均降低玉米地 23.8% 的 N₂O 排放量^[15]。其主要原因是控释肥的氮素供应更能满足生长期的氮素需求, 而且控释肥持续而缓慢地释放氮素降低了土壤中可用于硝化和反硝化的底物氮含量^[33-34], N₂O 排放量甚至可降低 60%~80%^[35]。本研究中, 控释掺混肥(CRBF30 和 CRBF50 处理)较常规氮肥显著降低了 N₂O 排放速率(图 3), N₂O 排放强度降低 34.5%~37.9%, N₂O 累积排放量降低了 33.7%~37.5%(表 3), 降幅与 Shen 等^[21]的研究结果接近。除了氮肥施用的影响外, 土壤温度和水分等因素也会影响土壤中 N₂O 的排放^[36], 本研究中, 土壤温度和含水量与 N₂O 排放呈显著正相关关系, 土壤温度和含水量升高加剧了 N₂O 排放, 与 Liang 等^[37]的研究结果类似。

本供试土壤的 N_2O 自然排放量(CK处理)为 $1.53\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,常规施氮(FFP处理)的 N_2O 排放因子为 1.1% ,与全球农业生产中氮肥平均 1% 的 N_2O 排放因子基本一致^[38],而控释掺混肥(CRBF30和CRBF50处理)则仅为 $0.48\%\sim 0.57\%$ (表4),减排效果明显。

4 结论

(1)控释掺混肥在减氮和一次性施肥条件下实现了夏玉米稳产。氮肥吸收利用率和氮肥偏生产力分别提高了 $8.4\sim 11.1$ 个百分点和 $8.87\sim 9.86\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

(2)与不施氮对照相比,常规施氮的氨挥发和 N_2O 排放显著增加 379% 和 151% ,不同配比的控释掺混肥较常规施氮有效降低了夏玉米生长期气态氮损失($P<0.05$),氨挥发和 N_2O 排放分别降低了 $71.59\%\sim 72.66\%$ 和 $33.7\%\sim 37.5\%$,在保证产量的同时实现了氨挥发和温室气体减排。

(3)综合考虑作物产量、氮肥利用效率和氮素气态损失,一次性减量施用控释掺混肥可推荐为夏玉米稳产和降低氮素损失的有效氮肥管理措施。

参考文献:

- [1] NING T Y, SHAO G Q, LI Z J, et al. Effects of urea types and irrigation on crop uptake, soil residual, and loss of nitrogen in maize field on the North China Plain[J]. *Plant Soil and Environment*, 2012, 58: 1-8.
- [2] 李欢, 鲁溢超, 王良, 等. 不同氮磷配比对夏玉米花后光合特性和产量的影响[J]. 玉米科学, 2023, 31(3): 152-159. LI H, LU Y C, WANG L, et al. Effects of different nitrogen and phosphorus ratios on photosynthetic characteristics and yield of summer maize after anthesis [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2023, 31(3): 152-159.
- [3] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924. ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.
- [4] 巨晓棠, 张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 1-13. JU X T, ZHANG C. The principles and indicators of rational N fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(1): 1-13.
- [5] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018. National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.
- [6] 刘兆辉, 吴小宾, 谭德水, 等. 一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3827-3839. LIU Z H, WU X B, TAN D S, et al. Application and environmental effects of one-off fertilization technique in major cereal crops in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3827-3839.
- [7] 李丽霞, 赵现锋, 衣文平, 等. 包膜控释肥在夏玉米生产中的应用进展[J]. 中国土壤与肥料, 2022, 5: 217-224. LI L X, ZHAO X F, YI W P, et al. Application status of controlled-release fertilizers in summer maize production[J]. *Soil and fertilizer in China*, 2022, 5: 217-224.
- [8] LI Y, ZHANG J J, ZHANG Z D, et al. Effect of different fertilization managements on nitrate accumulation in a mollisol of Northeast China [J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2016, 3: 16-23.
- [9] 金容, 李兰, 郭萍, 等. 控释氮肥比例对土壤氮含量和玉米氮素吸收利用的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 214-221. JIN R, LI L, GUO P, et al. Effects of mixed ratios of controlled-release nitrogen fertilizer[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(6): 214-221.
- [10] ZOU H T, BA C, HOU Z H, et al. How optimizing application of coated controlled-release urea affects crop yield in China[J]. *Agronomy Journal*, 2022, 114: 991-999.
- [11] 杨俊刚, 安文博, 连炳瑞, 等. 缓控释肥一次性施用后土壤氮素供应与损失特征研究[J]. 玉米科学, 2023, 31(1): 135-142. YANG J G, AN W B, LIAN B R, et al. Characteristics of soil nitrogen supply and losses after a one-off application of slow and controlled release fertilizer[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2023, 31(1): 135-142.
- [12] ZHENG W K, SUI C L, LIU Z G, et al. Long-term effects of controlled-release urea on crop yields and soil fertility under wheat-corn double cropping systems[J]. *Agronomy Journal*, 2016, 108: 1703-1716.
- [13] GUO J M, WANG Y H, BLAYLOCK A D, et al. Mixture of controlled release and normal urea to optimize nitrogen management for high-yielding ($>15\text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) maize[J]. *Field Crops Research*, 2017, 204: 23-30.
- [14] 刘仲阳, 吴小宾, 郑福丽, 等. 我国主要粮食作物一次性施肥的长期效应研究进展[J]. 土壤, 2022, 54(4): 667-675. LIU Z Y, WU X B, ZHENG F L, et al. Progress of long-term effects of one-off fertilization on major food crops in China[J]. *Soils*, 2022, 54(4): 667-675.
- [15] ZHANG W S, LIANG Z Y, HE X M, et al. The effects of controlled release urea on maize productivity and reactive nitrogen losses: a Meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 246: 559-565.
- [16] 衣文平, 屈浩宇, 许俊香, 等. 不同释放天数包膜控释尿素在春玉米上的应用研究[J]. 核农学报, 2012, 6(4): 699-704. YI W P, QU H Y, XU J X, et al. Application of different release duration controlled-release coated urea on spring maize[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2012, 6(4): 699-704.
- [17] 李伟, 李絮花, 李海燕, 等. 控释尿素与普通尿素混施对夏玉米产量和氮肥效率的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(4): 699-706. LI W, LI X H, LI H Y, et al. Effects of different mixing rates of controlled-release urea and common urea on grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(4): 699-706.
- [18] 曹兵, 倪小会, 陈延华, 等. 包膜尿素和普通尿素混施对夏玉米产量、氮肥利用率和土壤硝态氮残留的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 695-701. CAO B, NI X H, CHEN Y H, et al. Impact of coated urea combined with conventional urea on the yield, nitrogen use efficiency, and soil residual nitrate of summer maize[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(5):

- 695-701.
- [19] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定-通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205-209. WANG Z H, LIU X J, JU X T, et al. Field *in situ* determination of ammonia volatilization from soil: venting method[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2002, 8(2): 205-209.
- [20] 王学霞, 曹兵, 梁红胜, 等. 控释氮肥与水溶肥配施减少设施土壤 N₂O 排放的机理[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(12): 2084-2094. WANG X X, CAO B, LIANG H S, et al. Combined application of controlled-release nitrogen fertilizer and water-soluble fertilizer to reduce N₂O emission in greenhouse soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2019, 25(12): 2084-2094.
- [21] SHEN Y Z, WANG B C, ZHU S X, et al. Single application of a new polymer-coated urea improves yield while mitigates environmental issues associated with winter wheat grown in rice paddy soil[J]. *Field Crops Research*, 2022, 285: 108592.
- [22] TRENKLE M E. Slow- and controlled release and stabilized fertilizers [M]. Paris: Int. Fertilizer Industry Assoc, 2010.
- [23] XIA L, LAM S K, CHEN D, et al. Can knowledge-based N management produce more staple grain with lower greenhouse gas emission and reactive nitrogen pollution? a Meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(5): 1917-1925.
- [24] 曹兵, 徐秋明, 任军, 等. 延迟释放型包衣尿素对水稻生长和氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(3): 352-356. CAO B, XU Q M, REN J, et al. Effects of delayed release coated urea on rice growth and nitrogen absorption[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(3): 352-356.
- [25] ZHANG S, SHEN T, YANG Y, et al. Controlled-release urea reduced nitrogen leaching and improved nitrogen use efficiency and yield of direct-seeded rice[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 220: 191-197.
- [26] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6. ZHU Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1): 1-6.
- [27] 卢丽丽, 吴根义. 农田氨排放影响因素研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(1): 149-162. LU L L, WU G Y. Advances in affecting factors of ammonia emission in farmland[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(1): 149-162.
- [28] SHA Z P, LIU H J, WANG J X, et al. Improved soil-crop system management aids in NH₃ emission mitigation in China[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 289: 117844.
- [29] 曹兵, 丁紫娟, 侯俊, 等. 控释掺混肥结合增密对水稻氮肥利用效率和氨挥发的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 56-63. CAO B, DING Z J, HOU J, et al. Effects of the blends of controlled-release and conventional nitrogen fertilizers combined with dense planting on nitrogen use efficiency and ammonia volatilization in a paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(13): 56-63.
- [30] 张薇, 倪邦, 许秀春, 等. 氮肥使用对北方夏玉米季氨挥发的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 5176-5184. ZHANG W, NI B, XU X C, et al. Impacts of nitrogen application on ammonia volatilization during maize season in Northern China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(11): 5176-5184.
- [31] 张翀, 李雪倩, 苏芳, 等. 施氮方式及测定方法对紫色土夏玉米氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1194-1201. ZHANG C, LI X Q, SU F, et al. Effects of different fertilization and measurement methods on ammonia volatilization of summer maize in purple soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1194-1201.
- [32] SHCHERBAK I, MILLAR N, ROBERTSON G P. Global Meta-analysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N₂O) emissions to fertilizer nitrogen[J]. *PNAS*, 2014, 111(25): 9199-9204.
- [33] YANG M, ZHU X Q, BAI Y, et al. Coated controlled release urea creates a win-win scenario for producing more staple grains and resolving N loss dilemma worldwide[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 288: 125660.
- [34] 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.
- [35] BORTOLETTO-SANTOS R, CAVIGELLI M A, MONTES S E, et al. Oil-based polyurethane-coated urea reduces nitrous oxide emissions in a corn field in a Maryland loamy sand soil[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 249: 119329.
- [36] LIU S, LIN F, WU S, et al. A Meta-analysis of fertilizer-induced soil NO and combined NO + N₂O emissions[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(6): 2520-2532.
- [37] LIANG Z H, JIN X, ZHAI P F, et al. Combination of organic fertilizer and slow-release fertilizer increases pineapple yields, agronomic efficiency and reduces greenhouse gas emissions under reduced fertilization conditions in tropical areas[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 343: 131054.
- [38] REAY D S, DAVIDSON E A, SMITH K A, et al. Global agriculture and nitrous oxide emissions[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2: 410-416.

(责任编辑:叶飞)