

控释肥施用对小麦生长期 N₂O 排放的影响*

纪洋^{1,2} 刘刚^{1,2} 马静¹ 李小平¹ 徐华^{1†} 蔡祖聪¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 通过田间试验,采用静态箱法研究不同施氮水平下控释肥和尿素(N 0、100、200、270 kg hm⁻²)对麦季 N₂O 排放的影响。结果表明,与对照相比,整个小麦生长期 N₂O 排放量均随尿素和控释肥施用量的增加呈指数增加(32%~164%, $p < 0.05$),但控释肥处理增加程度则较尿素处理缓和;施用控释肥可以有效抑制小麦生长期 N₂O 排放($p < 0.05$),控释肥对 N₂O 的减排量随着施氮量的增加而增加。小麦产量随尿素施用量的增加呈抛物线增加(24%~43%, $p < 0.05$),随控释肥施用量的增加亦呈抛物线增加(30%~45%, $p < 0.05$);与施用相同水平尿素相比,施用控释肥的小麦产量略有增加,但无显著差异($p > 0.05$)。单位产量 N₂O 排放量随尿素施用量的增加而呈指数增加(31%~114%, $p < 0.05$),随控释肥施用量的增加而呈抛物线增加(2%~50%, $p < 0.05$);施用控释肥可以有效抑制小麦生长期单位产量 N₂O 排放($p < 0.05$),控释肥对单位产量 N₂O 的减排量随着施氮量的增加而增加。各处理 N₂O 排放量与土壤水分存在显著正相关($p < 0.05$),与土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 浓度和土温不呈明显线性关系($p > 0.05$)。

关键词 控释肥;施氮量;N₂O 排放;产量;单位产量 N₂O 排放;麦季

中图分类号 S131^{+.1}; X511 **文献标识码** A

N₂O 是《京都议定书》中规定需要减少排放的 6 种温室效应气体之一^[1],其浓度的增加不仅加剧了全球温室效应,而且导致臭氧层的破坏与地面紫外线辐射增强。根据 IPCC 第 4 次评估报告,2005 年大气中 N₂O 浓度值已由工业革命前的约 270 nL L⁻¹ 增至 319 nL L⁻¹^[2]。土壤是大气中 N₂O 排放最大的源,几乎占其总排放量的 65%^[3-4],其中农业土壤是最主要的来源^[5-6]。氮肥的大量施用是大气中 N₂O 排放量增加的最主要原因^[7-9],在全球范围内,估计农业土壤因施用化学氮肥而直接导致的 N₂O 排放量达 36%^[10],对文献报道的田间实际测定数据进行统计分析表明,绝大部分农田 N₂O-N 排放系数变化于 0.1%~2.0% 之间^[11]。因此,如何减少氮肥施用导致的 N₂O 气体排放,对减轻全球温室效应尤为重要。

20 世纪 90 年代以来,我国兴起了以提高氮肥利用率为主要目标的控释肥料研究热潮。理论上控释肥料 1 次施用后,能在作物生育期内达到养分

供应与作物需求基本一致,防止土壤中出现有效态氮过量的现象^[12],提高了氮肥利用率,节省了施肥劳动力,保护了环境^[13]。已有研究表明,施用控释肥可明显地减少旱地因氮肥施用直接造成的 N₂O 气体排放,同时也能减少因氮素淋溶或随地表径流而间接造成的 N₂O 气体排放^[14-19],但对麦田 N₂O 气体排放影响鲜有研究,且在已有研究中,控释肥的施用量均与常规氮肥的施用量相同,对于控释肥不同施用梯度的研究鲜见报道。本文通过大田原位试验研究控释肥与尿素不同施用量对稻麦轮作系统中麦田 N₂O 排放的影响,以进一步研究控释肥施用对麦田 N₂O 排放的减排效果,旨在为农田合理施用氮肥、提高氮肥利用率及降低环境污染等方面提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计和水肥管理

大田试验于 2009 年在江苏省句容市行香镇

* 科技部国际科技合作项目(S2012GR0080)、国家自然科学基金项目(40971154)、公益性行业(农业)科研专项(201103039)资助

† 通讯作者, E-mail: hxu@issas.ac.cn

作者简介:纪洋(1986—),女,山东德州人,博士研究生,主要从事农田温室气体减排措施的研究。E-mail: jiyang@issas.ac.cn

收稿日期:2010-12-13;收到修改稿日期:2011-06-14

(31°58'N, 119°18'E) 进行。试验土壤为发育于下蜀黄土的爽水性水稻土, 土壤有机碳含量为 17.4 g kg⁻¹, 全氮含量为 1.1 g kg⁻¹。

小麦品种为扬麦 16 号, 试验按当地农业管理方式进行。小麦于 2009 年 11 月 26 日播种, 2010 年 6 月 18 日收割, 整个生长期为 206 d。肥料的施用方式为: 尿素按当地常规分两次施用, 60% 作为基肥, 40% 作为追肥; 控释肥作为基肥一次性施用, 本试验所施用的控释肥为山东金正大公司生产的可降解树脂包膜尿素肥料, 含氮量为 42%; 所有处理磷钾肥分别为 450 kg hm⁻² 的过磷酸钙和 225 kg hm⁻² 的氯化钾, 作为基肥一次性施入。基肥、返青肥分别于 2009 年 11 月 26 日、2010 年 3 月 10 日施用。

试验共设 7 个处理, 4 个施氮水平: ①CK: 不施氮肥; ②U100: 尿素施用量为 N 100 kg hm⁻²; ③U200: 尿素施用量为 N 200 kg hm⁻²; ④U270: 尿素施用量为 N 270 kg hm⁻²; ⑤C100: 控释肥施用量 N 100 kg hm⁻²; ⑥C200: 控释肥施用量 N 200 kg hm⁻²; ⑦C270: 控释肥施用量 N 270 kg hm⁻²。小区面积为 12 m² (3 m × 4 m), 每个处理 3 次重复, 随机区组设计。

1.2 采样与测定

采用静态箱法测定稻田 N₂O 排放。将静态密闭箱 (50 cm × 50 cm × 100 cm) 放置在小麦播种前埋设在试验小区土壤中的塑料底座 (50 cm × 50 cm × 15 cm) 上, 底座上部有 4 cm 宽、5 cm 深的水槽以便于密闭箱的放置和密封, 底座埋入地下 15 cm 左右以防止试验小区内、底座外的水稻根系进入采样箱; 采样时, 密闭箱密封后, 通过插进密封采样垫的双通针将箱内气体导入 18 ml 预先抽真空的玻璃瓶中, 每 15 min 采样 1 次, 共采 4 次, 采样时间为上午 8:00 ~ 12:00。小麦生长季一般每周采样 1 次, 施肥后、降雨期间约 2 ~ 3 d 1 次, 1 ~ 2 月低温期 10 d 采样 1 次。

采样的同时, 用数字温度计 (Model 2455, Yokogawa, Japan) 记录箱温及土温; 采集 0 ~ 15 cm 的表层土, 于 105℃ 下烘干至恒重, 测定土壤水分。降雨期, 取表层 0 ~ 15 cm 的土样, 用 2 mol L⁻¹ KCl 提取新鲜土样的 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N, 土水比 1:5, 然后用 Skalar 流动分析仪测定。小麦收获时, 按试验小区分别收割、脱粒、晾晒、适当筛除秕粒后称重, 计算小麦产量。

样品 N₂O 浓度用岛津气相色谱 (Shimadzu GC-12A, Kyoto, Japan) 测定, 检测器为 ⁶³Ni 电子捕获

(ECD) 检测器。色谱柱为 80/100 目 PorapakQ 填充柱, 柱温 65℃, 检测器温度为 300℃。以 95% 氩气 + 5% 甲烷作为载气, 流速 40 ml min⁻¹。N₂O 标准气体均由日本国立农业环境技术研究所提供。

1.3 数据处理与分析

N₂O 排放通量按下式计算: $F = \rho \times V/A \times dc/dt \times 273/(273 + T)$

式中, F 为 N₂O 排放通量 (N μg m⁻² h⁻¹); ρ 为标准状态下 N₂O 密度 (1.25 kg m⁻³); V 为采气箱内有效空间体积 (m³); A 为采气箱覆盖的土壤面积 (m²); dc 为气体浓度差 (nL L⁻¹); dt 为时间间隔 (h); T 为采样时箱温 (℃)。

N₂O 排放通量用每次观测 3 个重复的平均值及标准偏差表示。N₂O 季节平均排放量是将 3 个重复的每次观测值按时间间隔加权平均后再平均。

N₂O 季节排放总量按下式计算: $T = \sum [(F_{i+1} + F_i)/2] \times (D_{i+1} - D_i) \times 24/1000$

式中, T 为 N₂O 季节排放总量 (N mg m⁻²); F_i 和 F_{i+1} 分别为第 i 和 $i+1$ 次采样时 N₂O 平均排放通量 (N μg m⁻² h⁻¹); D_i 和 D_{i+1} 分别为第 i 和 $i+1$ 次采样时间 (d)。

处理间比较以 3 个重复的平均值进行方差分析及多重比较。相关性分析用全部观测值进行线性回归相关分析。数据处理与分析均采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS10.0 (SPSS Inc., Chicago) 完成。

2 结果与分析

2.1 麦季 N₂O 排放通量的季节变化

各处理 N₂O 排放均存在明显的季节变化, 并呈现出相同的季节变化模式。由图 1 可见, 各处理 N₂O 排放峰主要出现在施肥后不久的降雨过后。由于施肥降水, 土壤中具有丰富的氮源和适宜的水分含量, 利于土壤的硝化和反硝化作用的同时进行。基追肥的施入并没有导致 N₂O 排放的迅速增加, 而是在随后的降雨过后 2 ~ 3 d 才出现 N₂O 的排放峰, 这与以往研究结果一致^[20-23]。由于尿素快速水解为铵态氮并发生硝化作用, 且降水带来适宜的水分条件, 基肥施用后 16 d 各处理出现第 1 个 N₂O 排放高峰 (13 d 有降雨), CK、U100、U200、U270、C100、C200、C270 处理 N₂O 排放峰值分别为 N 33、115、127、186、45、65 和 73 μg m⁻² h⁻¹; 尿素处理第

2个 N_2O 排放高峰出现在追肥施用后20 d(18 d有雨雪),CK、U100、U200、U270处理 N_2O 排放峰值分别为 $N\ 26、98、187$ 和 $238\ \mu g\ m^{-2}\ h^{-1}$;尽管控释肥作为基肥一次性施入,但控释肥处理第2个 N_2O 排放高峰出现时间与尿素处理相同,C100、C200、C270处理 N_2O 排放峰值分别为 $N\ 42、58$ 和 $100\ \mu g\ m^{-2}\ h^{-1}$,这可能与小麦返青期生长发育迅速且此时温度升高有关。施氮肥(尿素和控释肥)处理 N_2O 两个排放峰值均高于CK处理,且峰值随施氮量的增加而增加;与相同施氮量尿素处理相比,控释肥处理 N_2O 排放峰值减少49%~69%。

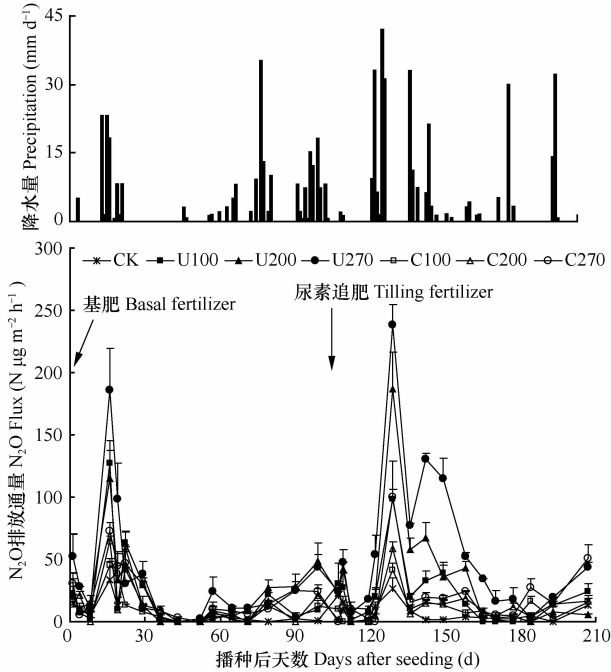


图1 小麦生长期降雨分布和 N_2O 排放通量的季节变化

Fig. 1 Seasonal variation of N_2O flux and distribution of rainfall during the wheat-growing period

本试验中,施氮处理小麦返青-成熟期 N_2O 排放高于播种-返青期(图2),但也有研究表明,小麦播种-返青期 N_2O 排放高于返青-成熟期^[24-25],由于返青-成熟期的降雨量大于播种-返青期,在施肥(尿素处理)与降水的综合作用下, N_2O 排放量返青-成熟期大于播种-返青期。小麦返青-成熟期,尿素处理 N_2O 排放值占全生长期 N_2O 排放总值的比例为52%~65%,而控释肥处理 N_2O 排放值所占比例则较小,为51%~55%;整个小麦生长期,控释肥处理土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度均低于尿素处理,且变化较小(图4)。由此可见,控释肥可以有效控制肥料氮在整个小麦生长期缓慢释放,延长供氮时间,由此可

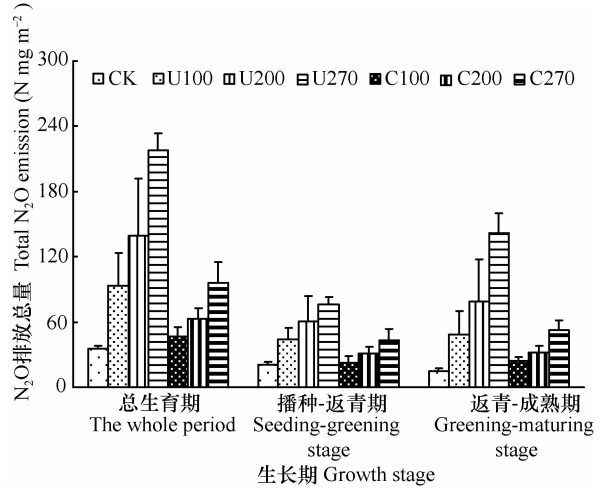


图2 小麦生长期 N_2O 季节排放总量及不同生长阶段 N_2O 排放量

Fig. 2 Total N_2O emissions during the wheat-growing period and different growth stages

以抑制因降雨引起的 N_2O 排放峰值。

2.2 控释肥施用对麦季 N_2O 排放总量的影响

从整个小麦生长季来看,各处理 N_2O 排放总量从大到小依次为U270、U200、U100、C270、C200、C100和CK,施氮处理 N_2O 排放系数分别为0.66%、0.52%、0.58%、0.22%、0.14%和0.11%。如图3(a)所示,施用氮肥促进 N_2O 排放,且 N_2O 排放量随氮肥施用量的增加而增加,这与黄树辉等^[26]研究结果一致。不同施氮量条件下,对于尿素处理, N_2O 排放量随尿素施用量的增加而呈指数增加($y = 39.68e^{0.0065x}$, $R^2 = 0.97$, $p < 0.05$),其中U100处理 N_2O 排放量较CK处理增加164% ($p < 0.05$),U200处理较U100处理增加50%,U270处理较U200处理增加56% ($p < 0.05$);对于控释肥处理, N_2O 排放量也随控释肥施用量的增加而呈指数增加($y = 33.72e^{0.0036x}$, $R^2 = 0.97$, $p < 0.05$),但增加程度则较尿素处理缓和,其中C100处理较CK处理增加32%,C200处理较C100处理增加35%,C270处理较C200处理增加51% ($p < 0.05$)。

与相同施氮量尿素处理对比,施用控释肥减少 N_2O 排放,其中C100处理 N_2O 排放量较U100处理减少50%,C200处理较U200处理减少55%,C270处理较U270处理减少56%,方差分析均达显著性差异($p < 0.05$)。由此可见施用控释肥可以有效抑制小麦生长季 N_2O 排放,同施氮量条件下,控释肥对 N_2O 的减排量随着施氮量的增加而增加。

2.3 控释肥对小麦产量的影响

如图 3(b) 所示, 施氮处理小麦增产 24% ~ 45% ($p < 0.05$), 其中尿素处理小麦增产 24% ~ 43%, 控释肥处理小麦增产 30% ~ 45%。不同施氮量下, 对于尿素处理, 小麦产量随尿素施用量的增加呈抛物线增加 ($y = 3.195 + 0.01x - 0.00003x^2$, $R^2 = 0.99$, $p < 0.05$), 其中 U100 处理小麦产量较 CK 处理增加 24% ($p < 0.05$), U200 处理较 U100 处理增产 15% ($p < 0.05$), U270 处理较 U200 处理增产 1%; 对于控释肥处理, 小麦产量随控释肥施用量的增加亦呈抛物线增加 ($y = 3.214 + 0.01x - 0.00003x^2$, $R^2 = 0.99$, $p < 0.05$), 其中 C100 处理小麦产量较 CK 处理增加 30% ($p < 0.05$), C200 处理较 C100 处理增产 10%, C270 处理较 C200 处理增产 1%。与相同施氮量尿素处理对比, 施用控释肥略增加小麦产量, 但均无显著性差异 ($p > 0.05$), 其中 C100 处理较 U100 处理增产 5%, C200 处理较 U200 处理增产 1%, C270 处理较 U270 处理增产 1%。值得注意的是, C200 处理小麦产量与 U270 处理相当, 而其控释肥施用量仅是尿素施用量的 74%, 表明在达到相同产量的前提下, 可以减少控释肥的施用量, 这与 Patil 等^[27] 研究结果一致。

2.4 控释肥对单位产量 N₂O 排放量的影响

如图 3(c) 所示, 单位产量 N₂O 排放量随着施氮量的增加而增加。不同施氮量条件下, 对于尿素处理, 单位产量 N₂O 排放量随尿素施用量的增加而呈指数增加 ($y = 119.2 e^{0.005x}$, $R^2 = 0.96$, $p < 0.05$), 其中 U100 处理单位产量 N₂O 排放量较 CK 处理的增加 114%, U200 处理较 U100 处理增加 31%, U270 处理较 U200 处理增加 55%; 对于控释肥处理, 单位产量 N₂O 排放量随控释肥施用量的增加而呈抛物线增加 ($y = 111.9 + 0.0024x^2 - 0.3057x$, $R^2 = 0.98$, $p < 0.05$), 其中 C100 处理单位产量 N₂O 排放量较 CK 处理的增加 2%, C200 处理较 C100 处理增加 23%, C270 处理较 C200 处理增加 50%。

与同施氮量尿素处理对比, 施用控释肥减少单位产量 N₂O 排放, 其中 C100 处理单位产量 N₂O 排放量较 U100 处理减少 52%, C200 处理较 U200 处理减少 55%, C270 处理较 U270 处理减少 57%。由此可见施用控释肥可以有效抑制小麦生长季单位产量 N₂O 排放, 相同施氮量条件下, 控释肥对单位产量 N₂O 的减排量随着施氮量的增加而增加。

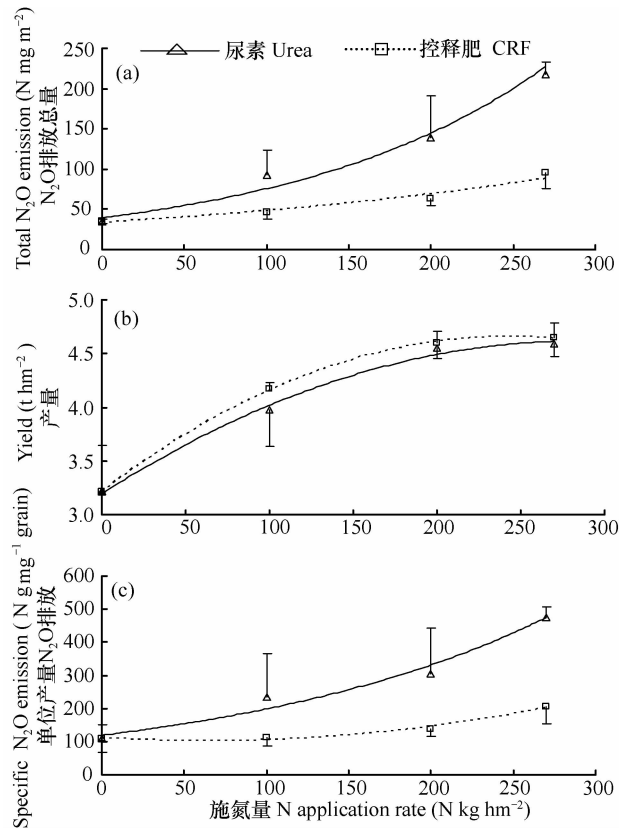


图 3 施氮量对小麦生长期 N₂O 排放量、产量和单位产量 N₂O 排放量的影响

Fig. 3 Effect of N application rate on N₂O emission, yield and specific N₂O emissions during the wheat-growing period

2.5 影响麦季 N₂O 排放的因素

图 4 表示各处理小麦生长期土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度的季节变化。由图 4 可知, 整个小麦生长季, 施用尿素处理土壤 NH₄⁺-N 浓度变化趋势一致, 在两次施肥后出现土壤 NH₄⁺-N 浓度峰值, 随着施肥时间的延长, 土壤 NH₄⁺-N 浓度逐渐降低, 土壤 NO₃⁻-N 含量变化不明显; 而施用控释肥处理土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度变化均不明显, 在较长时间内维持在一个较低水平, 仅在收获期有少量无机氮释放, 整个小麦生长期, 土壤 NH₄⁺-N 浓度和 NO₃⁻-N 浓度均低于施用尿素处理。各处理 N₂O 排放量与土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度均无显著线性相关性 ($p > 0.05$)。

小麦拔节-成熟期土壤充水孔隙度在 45% ~ 75% 间变动, 降水使土壤水分含量增加 (图 5)。相关分析表明, 麦季 N₂O 排放通量与土壤水分存在显著正相关 ($0.82 < R^2 < 0.90$, $p < 0.05$)。土壤水分是影响旱作农田土壤 N₂O 产生和排放的重要因素,

适宜土壤含水量范围内, N_2O 排放随土壤含水量增加而增加^[28]。

土壤 5 cm 处温度季节变化趋势基本相同(图 5)。小麦全生育期内, 土温在 0~30℃ 范围内变动, 季节平均温度为 10℃。相关分析表明, N_2O 排放通量与土温不存在明显线性相关关系($p > 0.05$)。郑循华等^[29]研究发现, 当土壤湿度适宜

时, 旱地 N_2O 排放对表层土温的依赖可以用指数函数来描述。邹建文等^[30]研究结果表明, 土温和 N_2O 排放通量的关系可以用一个多项式方程来拟合。谢军飞和李玉娥^[31]研究结果表明, 土温对 N_2O 排放通量的作用关系是一种复杂的多项式关系。土温是影响麦田 N_2O 排放的因素之一, 但与 N_2O 排放通量不呈明显线性关系。

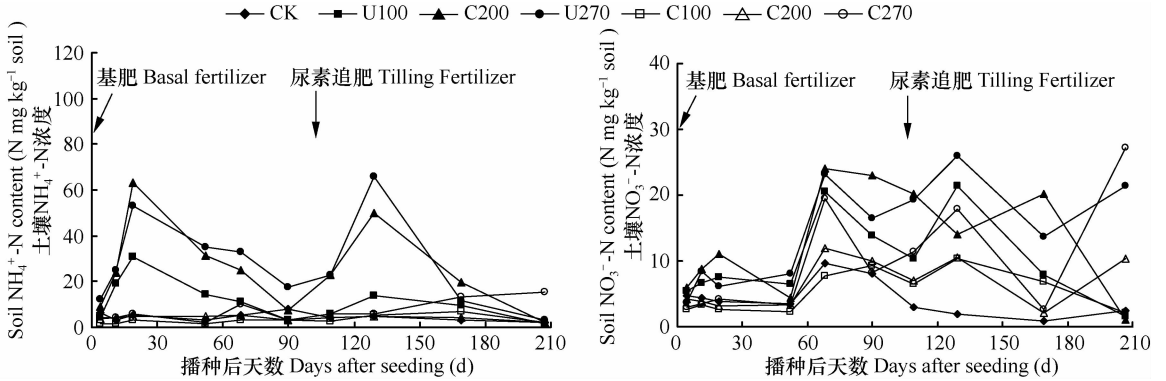


图 4 小麦生长期土壤 NH_4^+-N 和 $NO_3^- -N$ 浓度的季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of soil NH_4^+-N and $NO_3^- -N$ contents during the wheat-growing period

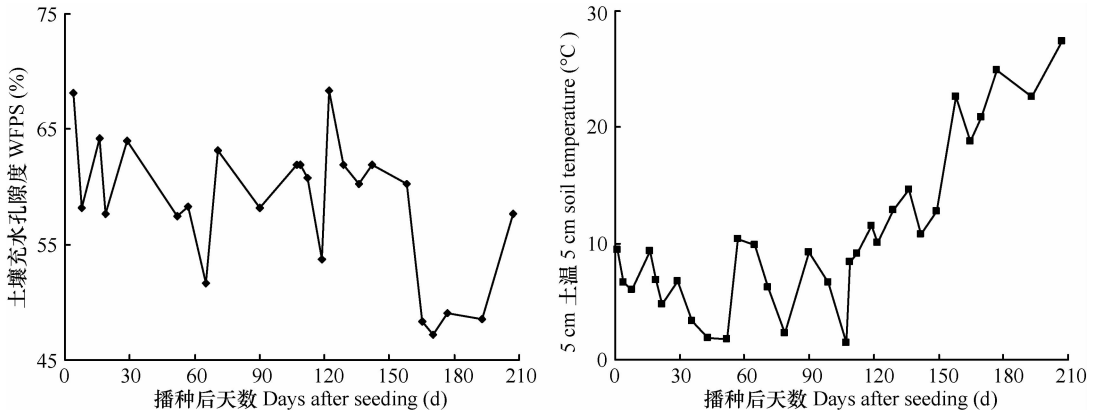


图 5 小麦生长期土壤水分和土壤温度的季节变化

Fig. 5 Seasonal variations of soil water content and soil temperature during the wheat-growing period

3 讨论

施肥土壤的各形态氮素含量变化一方面与氮素本身的循环过程有关, 更重要的是受肥料氮素释放的影响^[32]。本试验中, 整个小麦生长期, 控释肥处理土壤 NH_4^+-N 和 $NO_3^- -N$ 浓度均低于尿素处理, 且变化较小, 与施用尿素对比, 控释肥可以控制养分在整个小麦生长期缓慢释放, 由此可以抑制因降雨引起的 N_2O 排放峰值。氮肥的施用为 N_2O 产生排放提供了可能, 但这种可能能否成为现实很大程

度上取决于土壤水分状况和水分变化频率^[33], 因此各处理 N_2O 排放通量与土壤 NH_4^+-N 浓度和 $NO_3^- -N$ 浓度的关系因水热条件影响而变得复杂。控释肥对旱地 N_2O 的减排效果受种植作物、耕作方式、土壤性质及气候条件等多因素的综合影响。Akiyama 等^[19]关于控释肥对农田土壤 N_2O 排放影响的统计结果表明, 控释肥显著降低 35% 农田土壤 N_2O 排放, 但其效果随土壤利用方式及类型的不同而不同, 在排灌条件差的草原地区, 控释肥对土壤 N_2O 排放的减排效果很好, 而在排灌条件好的旱地减排效果则不明显。Chu 等^[15]研究结果显示, 深施尿素

表 1 控释肥对旱地生态系统 N₂O 排放的影响

Table 1 Effect of CRF on nitrous oxide emission from the upland ecosystem

试验地点 Experimental site	种植作物 Plant	氮肥施用量 Application rate of nitrogen fertilizers (N kg hm ⁻²)	CRF 施用方式 Application method of CRF	N ₂ O 减排比例 (与常规氮肥相比) N ₂ O reduction (compared with normal N-fertilizer) (%)		增产比例 (与常规氮肥相比) Yield increase (compared with normal N-fertilizer) (%)		N ₂ O 排放系数 FIE (%)		参考文献 References
				控释肥 CRF	尿素 Urea	控释肥 CRF	尿素 Urea			
大田试验 中国 Field experiment, China	玉米 Corn	180	深施至 15 cm Deep application to 15 cm layer	↓ 55		↑ 9		0.76	1.98	[14]
大田试验 日本 Field experiment, Japan	玉米 Corn	150	深施 Deep application	↓ -		↑ 19		-	-	[15]
大田试验 美国 Field experiment, USA	大麦 Barley	90	8 cm 条带深施 Band application	↓ 16		↓ 12		0.24	0.37	[17]
	玉米 Corn	150	条带深施 Band application	↓ 68		↑ 12		0.59	2.02	
大田试验 美国 Field experiment, USA	玉米 Corn	246	机械表层层条 免耕 施 Band No-till application on soil surface Till	↓ 49		↓ 1		0.14	0.33	[18]
大田试验 中国 Field experiment, China	冬小麦 Wheat	100	表层混施	↓ 50		↑ 5		0.11	0.58	本试验
		200	Application and mix with the surface soil	↓ 55		↑ 1		0.14	0.52	This experiment
		270		↓ 56		↑ 1		0.22	0.66	

处理 N_2O 排放量是浅施尿素的 5~8 倍,原因可能是深施处土壤水分含量大于表层土壤,利于反硝化反应的进行;Hultgreen 等^[34]研究表明,条带状施用尿素较表面撒施尿素降低土壤 N_2O 排放。统计国内外已有研究,控释肥施用方式大多是条带状深施(表 1),而本试验是在排灌条件较好的旱地上进行,控释肥与尿素施用方法均是表面撒施后与土壤均匀混合,操作简易方便,而 N_2O 减排量在统计范围之内且较高,因此本试验所采用的控释肥施用方法简易可行,是值得推广的控释肥施用方式。

本试验中,C200 处理小麦产量与 U270 处理无显著差异($p > 0.05$),而其 N_2O 排放量却较 U270 处理减少 71%。Ma 等^[35]试验结果表明,尿素施氮量从 $N 90 \text{ kg hm}^{-2}$ 提高至 150 kg hm^{-2} ,玉米产量仅有少量增加,而 N_2O 排放量却增加了 2 倍;Shoji 等^[17]大田试验结果显示,减少控释肥施用量至尿素施用量的 1/2,产量没有显著降低,表明控释肥提高了氮肥利用率;Patil 等^[27]研究结果也表明,在达到相同产量的前提下,控释肥的施用量可减至尿素施用量的 1/2。因此减少控释肥施用量在保障产量的同时,不仅提高了氮肥利用率,减少了由施用氮肥造成的气态损失,而且减少劳动力,提高了经济效益。但也有研究结果表明(表 1),施用控释肥虽然抑制 N_2O 排放,但却降低产量,可能是由于控释肥养分的缓释性,作物生长前期,控释肥养分释放较少,难以满足作物前期对养分的需求。因此为了减少环境污染同时保证粮食产量,基肥采用尿素与控释肥配合施用不失为一种有效的方法^[36],但关于尿素与控释肥配施对农田 N_2O 排放的影响还有待进一步研究。

参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2001: The physical scientific basis. Contribution of Working Group to the Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press
- [2] IPCC. Climate change 2007: Understanding and attributing climate change. [2010-10-12]. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter9.pdf>
- [3] Li X, Inubushi K, Sakamota K. Nitrous oxide concentrations in an Andisol profile and emissions to the atmosphere as influenced by the application of nitrogen fertilizers and manure. *Biol Fert Soil*, 2002, 35: 108—113
- [4] Mosier A R, Kroese C. Potential impact on the global atmospheric N_2O budget of the increased nitrogen input required to meet future global food demands. *Chemosphere Global Change Science*, 2000, 2: 465—473
- [5] Beauchamp E G. Nitrous oxide emissions from agricultural soils. *Can J Soil Sci*, 1997, 77: 113—123
- [6] Duxbury J M. The significance of agricultural sources of greenhouses gases. *Fert Res*, 1994, 38: 151—163
- [7] 侯爱新, 陈冠雄, 吴杰. 不同种类氮肥对土壤释放 N_2O 的影响. *应用生态学报*, 1998, 9(2): 176—180. Hou A X, Chen G X, Wu J. Effect of different nitrogen fertilizers on soil N_2O emission (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(2): 176—180
- [8] Isermann K. Agriculture's share in the emission of trace gases affecting the climate and some cause-oriented proposals for reducing this share. *Environ Poll*, 1994, 83: 95—111
- [9] Xing G X, Yan X Y. Direct nitrous oxide emissions from agricultural fields in China estimated by the revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouses gases. *Environ Sci Policy*, 1999, 2: 355—361
- [10] Mosier A R, Kroeze C, Nevsion C, et al. Closing the global N_2O budget: Nitrogen oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutr Cyc Agroecosyst*, 1998, 52: 225—248
- [11] Bouwman A F. Soils and the greenhouse effect. New York: John Wiley and Sons, 1990
- [12] 武志杰, 陈利军. 缓释/控释肥料: 原理与应用. 北京: 科学出版社, 2003: 9—10. Wu Z J, Chen L J. Slow/Controlled-release fertilizers: Theory and application (In Chinese). Beijing: Science Press, 2003: 9—10
- [13] 张琴, 张春华. 缓/控释肥为何发展缓慢. *中国农村科技*, 2005, 3: 28—29. Zhang Q, Zhang C H. Why slow/controlled-release fertilizers develop slowly (In Chinese). *China Rural Science & Technology*, 2005, 3: 28—29
- [14] 黄国宏, 陈冠雄, 张志明, 等. 玉米田 N_2O 排放及减排措施研究. *环境科学学报*, 1998, 18(4): 345—349. Huang G H, Chen G X, Zhang Z M, et al. N_2O emission in maize field and its mitigation (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, 18(4): 345—349
- [15] Chu H Y, Hosen Y, Yagi K. Nitrogen oxide emissions and soil microbial activities in a Japanese andisol as affected by N-fertilizer management. *Soil Sci Plant Nutr*, 2004, 50(2): 287—292
- [16] Delgado J, Mosier A. Mitigation alternatives to decrease nitrous oxides emissions and urea-nitrogen loss and their effect on methane flux. *J Environ Qual*, 1996, 25: 1 105—1 111
- [17] Shoji S, Delgado J, Moiser A, et al. Use of controlled release fertilizers and nitrification inhibitors to increase nitrogen use efficiency and to conserve air and water quality. *Commu Soil Sci Plant Anal*, 2001, 32(7/8): 1 051—1 070
- [18] Ardell D H, Stephen J D, Francesco A. Tillage and inorganic nitrogen source effects on nitrous oxide emissions from irrigated cropping systems. *Soil Sci Soc Am J*, 2010, 74(2): 436—445
- [19] Akiyama H, Yan X Y, Yagi K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N_2O and NO emissions from agricultural soils: Meta-analysis. *Global Change Biology*, 2010, 16: 1 837—1 846

- [20] 黄耀, 蒋静艳, 宗良纲, 等. 种植密度和降水对冬小麦田 N₂O 排放的影响. 环境科学, 2001, 22(6): 20—23. Huang Y, Jiang J Y, Zong L G, et al. Influence of planting density and precipitation on N₂O emission from a winter wheat field (In Chinese). Environmental Science, 2001, 22(6): 20—23
- [21] 梁冬丽, 同延安, Emtery O, 等. 灌溉和降水对旱地土壤 N₂O 气态损失的影响. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 298—302. Liang D L, Tong Y A, Emtery O, et al. Effect of irrigation and precipitation on N₂O emission from upland soil (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(3): 298—302
- [22] 苏维翰, 宋文质, 张桦, 等. 华北典型冬麦区农田氧化亚氮通量. 环境化学, 1992, 11(2): 26—32. Su W H, Song W Z, Zhang H, et al. Flux of nitrous oxide on typical winter wheat field in northern China (In Chinese). Environmental Chemistry, 1992, 11(2): 26—32
- [23] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N₂O 产生与排放的影响. 应用生态学报, 1996, 7(3): 273—279. Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, et al. Impact of soil humidity on N₂O production and emission from a rice-wheat rotation ecosystem (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(3): 273—279
- [24] 马二登, 马静, 徐华. 稻秆还田方式对麦田 N₂O 排放的影响. 土壤, 2007, 39(6): 870—873. Ma E D, Ma J, Xu H. Effects of rice straw returning methods on N₂O emissions from wheat-growing season (In Chinese). Soils, 2007, 39(6): 870—873
- [25] 马静, 徐华, 蔡祖聪, 等. 稻季施肥管理措施对后续麦季 N₂O 排放的影响. 土壤, 2006, 38(6): 687—691. Ma J, Xu H, Cai Z C, et al. Effect of fertilizer application in rice-growing season on N₂O emissions from following wheat-growing season (In Chinese). Soils, 2006, 38(6): 687—691
- [26] 黄树辉, 蒋文伟, 吕军, 等. 氮肥和磷肥对稻田 N₂O 排放的影响. 中国环境科学, 2005, 25(5): 540—543. Huang S H, Jiang W W, Lv J, et al. Influence of nitrogen and phosphorus fertilizers on N₂O emissions in rice fields (In Chinese). China Environmental Science, 2005, 25(5): 540—543
- [27] Patil M D, Das B S, Barak E. Performance of polymer-coated urea in transplanted rice: Effect of mixing ratio and water input on nitrogen use efficiency. Paddy Water Environ, 2010, 8(2): 189—198
- [28] 蔡祖聪, Mosier A R. 土壤水分状况对 CH₄ 氧化、N₂O 和 CO₂ 排放的影响. 土壤, 1999, 31(6): 289—294, 298. Cai Z C, Mosier A R. Effect of soil WFPS on CH₄ oxidation, N₂O and CO₂ emissions (In Chinese). Soils, 1999, 31(6): 289—294, 298
- [29] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N₂O 产生与排放的影响. 环境科学, 1997, 18(5): 1—5. Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, et al. Effect of temperature on farmland N₂O production and emission (In Chinese). Environmental Science, 1997, 18(5): 1—5
- [30] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素. 环境科学学报, 2003, 23(6): 758—764. Zou J W, Huang Y, Zong L G, et al. A field study on CO₂, CH₄ and N₂O emissions from rice paddy and impact factors (In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(6): 758—764
- [31] 谢军飞, 李玉娥. 土壤温度对北京旱地农田 N₂O 的影响. 中国农业气象, 2005, 26(1): 7—10. Xie J F, Li Y E. Effect of soil temperature on N₂O emissions in upland farm of Beijing (In Chinese). Chinese Journal of Agrometeorology, 2005, 26(1): 7—10
- [32] 赵维, 蔡祖聪. 氮肥品种对亚热带土壤 N₂O 排放的影响. 土壤学报, 2009, 46(2): 248—253. Zhao W, Cai Z C. Effects of N fertilizers on N₂O emissions from subtropical soils in China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(2): 248—253
- [33] 黄国宏, 陈冠雄, 韩冰. 土壤含水量与 N₂O 产生途径研究. 应用生态学报, 1999, 10(1): 53—56. Huang G H, Chen G X, Han B. Relationships between soil water content and N₂O production (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(1): 53—56
- [34] Hultgreen G, Leduc P. The effect of nitrogen fertilizers placement, formulation, timing and rate on greenhouse gas emission and agronomic performance. Final Report, Project NO. 5300G, ADF#19990028, Saskatchewan Department of Agriculture and Food, Regina, SK. <http://www.agr.gov.sk.ca/apps/adf-admin/reports/19990028>. PDF
- [35] Ma B L, Wu T Y, Tremblay N. Nitrous oxide fluxes from corn fields: On-farm assessment of the amount and timing of nitrogen fertilizer. Global Change Biology, 2010, 16: 156—170
- [36] Jarosiewicz A, Tomaszewska M. Controlled-release NPK fertilizer encapsulated by polymeric membranes. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(2): 413—417

EFFECT OF CONTROLLED-RELEASE FERTILIZER (CRF) ON NITROUS OXIDE EMISSION DURING THE WHEAT GROWING PERIOD

Ji Yang^{1,2} Liu Gang^{1,2} Ma Jing¹ Li Xiaoping¹ Xu Hua^{1†} Cai Zucong¹

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A field experiment was conducted to study effect of application rate (N_0 , 100, 200 and 270 kg hm^{-2}) of controlled-release fertilizer (CRF) and urea on N_2O emission from the wheat cropping system. Seven treatments, i. e. CK, U100, U200, U270, C100, C200 and C270, were designed and implemented separately during the wheat growing period. Results indicate that application of either urea and CRF, increased total N_2O emission during the wheat growing period exponentially from 32% to 164% with increasing N-fertilizer application rate ($p < 0.05$). The increasing tendency was duller in Treatments CRF than in Treatments Urea. Compared with Treatments urea, Treatments CRF inhibited significantly N_2O emission during the wheat growing period ($p < 0.05$), and the effect was enhanced with increasing application rate. Compared with that in Treatment CK, grain yield increased in a parabolic pattern from 24% to 43% in Treatments Urea and from 30% to 45% in Treatments CRF with increasing application rate ($p < 0.05$). Obviously the effect of Treatment CRF was slightly higher than that of Treatment Urea ($p > 0.05$). Specific N_2O emission increased exponentially from 31% to 114% in Treatment Urea with increasing application rate ($p < 0.05$), and from 2% to 50% in Treatment CRF, showing while in parabolic pattern ($p < 0.05$). CRF inhibited significantly specific N_2O emission ($p < 0.05$), and the effect increased with increasing application rate. Significant positive correlations were observed between N_2O flux and soil water content ($p < 0.05$) in all the treatments, while no significant linear correlation was found between N_2O flux and soil NH_4^+ -N and NO_3^- -N concentrations, or soil temperature ($p > 0.05$).

Key words CRF; Application rate of N-fertilizer; N_2O emission; Grain yield; Specific N_2O emission; Wheat season