

不同氮肥增效剂对减少豫北麦田 气态氮损失及其增产效果研究

贺云霞 马建辉 张黛静 刘东华 晁晓燕 陈慧平 李春喜

(河南师范大学生命科学学院, 453007, 河南新乡)

摘 要 为研究氮肥增效剂对豫北麦田气态氮损失及其增产效果的影响, 于河南获嘉县进行大田试验, 设置 9 个施氮处理[不施肥+不施增效剂 (CK)、减氮 20%+不施增效剂 (U1)、正常施氮+不施增效剂 (U2)、减氮 20%+纯氮量的 1%脲酶抑制剂 (NBPT) (T1)、减氮 20%+纯氮量的 1%硝化抑制剂 (DMPP) (T2)、减氮 20%+1/2NBPT+1/2DMPP (T3)、正常施氮+纯氮量的 1%NBPT (T4)、正常施氮+纯氮量的 1%DMPP (T5)、正常施氮+1/2NBPT+1/2DMPP (T6)], 研究对氮素转化和小麦生长的影响。结果表明, 同一施氮水平下产量均表现为 T3 和 T6 处理高于其他处理; 整个小麦生育期, 与 U2 处理相比, T3 和 T6 土壤 NH_4^+ 含量分别提高了 12.23%~36.10%和 0.72%~49.47%, 叶面积指数分别提高了 7.79%~21.32%和 10.08%~49.54%, 干物质积累量分别提高了 20.32%~35.25%和 13.56%~40.43%; 分别降低了土壤 NO_3^- 含量 6.51%~34.56%和 5.47%~40.20%、 N_2O 排放通量 31.73%~72.53%和 24.63%~67.84%, 减少了 N_2O 累积排放通量 32.89%和 26.67%, 均提高了氮肥利用效率。综上, 减氮 20% (192 kg/hm²) 配合脲酶抑制剂和硝化抑制剂组合在不降低产量的前提下可显著降低温室气体排放, 利于冬小麦绿色高效生产。

关键词 小麦; 氮肥增效剂; 铵态氮; 硝态氮; 叶面积指数; 干物质积累量; 产量

氮素是提高作物产量、改善作物品质的关键元素, 也是植物体内不可或缺的元素之一^[1]。自 20 世纪 70 年代我国大量施用氮肥以来, 小麦和玉米等作物明显增产。与此同时, 我国农业对氮肥的需求也越来越大。据统计, 1978 年我国化肥使用量达 884 万 t, 到 2016 年化肥使用量达到每年 5984 万 t, 化肥使用量增加了近 6 倍^[2]。近年来, 我国氮肥施入量持续增加, 但是粮食产量增长缓慢。化肥对粮食增长的贡献率从 20 世纪 80 年代的 30%~40%下降到目前的 10%左右^[3], 随着施肥量的增加甚至出现粮食产量降低的现象。同时, 高化肥投入造成了一系列环境污染问题, 例如土壤酸化、水体富营养化和温室气体排放等^[4]。尿素淋溶、反硝化和挥发等是降低氮肥利用率的重要原因。因此, 抑制尿素水解、减少氮素损失、提高氮肥利用率已成为农业和环境领域亟待解决的问题^[5]。

为解决氮肥施用量高、利用率低的问题, 除采用优化施肥方案、秸秆还田、深施等方法解决外, 目前国内外的研究已转向缓控释肥和氮肥增效剂的使用。施加氮肥增效剂, 可以减少 NH_4^+ 向

NO_3^- 的转化、淋失以及反硝化^[6]。因此, 氮肥增效剂在农业生产中有广阔的应用前景。李长青等^[7]研究表明, 氮肥配施脲酶抑制剂 (NBPT) 和硝化抑制剂 (DCD) 与不施氮肥相比, 小麦产量提高了 35%。Liu 等^[8]研究表明, 氮肥配施 DCD 与硝化抑制剂 (DMPP) 土壤 N_2O 排放量分别降低 35%和 38%。阚建鸾等^[9]研究表明, 与仅施氮肥相比, 尿素配施 NBPT、DMPP 小麦氮肥利用效率分别提高了 37.89%和 41.57%。李莉等^[10]研究表明, 在白浆土中添加 NBPT 和 DMPP 对土壤铵态氮转化为硝态氮的抑制过程效果显著。脲酶抑制剂和硝化抑制剂配合施用, 相较于单一施用增效剂在抑制尿素水解、抑制硝化反应和反硝化反应中效果更为显著^[11-13]。然而, 有关氮肥增效剂的研究主要集中在同一施氮水平中氮肥增效剂对土壤氮素转化的影响, 对不同氮肥水平与氮肥增效剂类型综合作用的研究鲜有报道。因此, 本研究以豫北冬小麦农田为研究对象, 通过大田试验, 探讨不同氮肥水平下增效剂类型对土壤氮素转化、小麦生长、 N_2O 排放通量的影响, 明确在产量不降低的前提下, 能够减

作者简介: 贺云霞, 主要从事小麦栽培及生理研究, E-mail: 2827639478@qq.com

李春喜为通信作者, 主要从事小麦栽培及生理研究, E-mail: wheat_lab@163.com

基金项目: “十四五”国家重点研发计划: 黄淮海小麦—玉米 (大豆) 产能提升技术研发及集成示范 (2023YFD2301500)

收稿日期: 2024-03-07; 修回日期: 2024-04-09; 网络出版日期: 2025-01-13

少温室气体排放的最佳施肥措施，为豫北农田绿色发展和减排提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于河南省新乡市获嘉县东彰仪村(113°65'E, 35°27'N)进行，土壤类型为壤质潮土，播种前耕层土壤基本理化性质为 pH 8.06，含有机质 19.89 g/kg、全氮 1.09 g/kg、硝态氮 20.76 mg/kg、铵态氮 10.02 mg/kg、速效磷 19.41 mg/kg、速效钾 132.71 mg/kg。栽培模式为小麦—玉米轮作。

1.2 试验方法

试验时间为 2022 年 10 月—2023 年 6 月，共 9

个处理，见表 1，每个处理 3 次重复，共计 27 个小区，小区面积为 26.6 m² (7 m×3.8 m)，各区组随机排列。供试小麦品种为伟隆 169，播量 225 kg/hm²。2022 年 10 月 20 日播种，2023 年 6 月 8 日收获。

供试肥料为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)、硫酸钾(含 K₂O 52%)。供试抑制剂为脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)和硝化抑制剂 3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)，均为市售，NBPT 和 DMPP 施入量均为纯氮量的 1%。抑制剂与肥料混合施用且一次性基施，具体灌水时间为 2023 年 1 月 12 日和 3 月 4 日，灌水方式为漫灌。小麦生育期分别对杂草和病虫害采用化学药物进行防治，用量同当地常规管理。

表 1 不同处理施肥方案
Table 1 Different treatments of fertilization schemes

处理 Treatment	肥料 Fertilizer	kg/hm ²				
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	NBPT	DMPP
CK	不施肥、不施增效剂	0	0	0	0	0
U1	减氮 20%、不施增效剂	192	150	90	0	0
U2	正常施氮、不施增效剂	240	150	90	0	0
T1	减氮 20%、纯氮量的 1% NBPT	192	150	90	2.4	0
T2	减氮 20%、纯氮量的 1% DMPP	192	150	90	0	2.4
T3	减氮 20%、1/2 NBPT+1/2 DMPP	192	150	90	1.2	1.2
T4	正常施氮、纯氮量的 1% NBPT	240	150	90	2.4	0
T5	正常施氮、纯氮量的 1% DMPP	240	150	90	0	2.4
T6	正常施氮、1/2 NBPT+1/2 DMPP	240	150	90	1.2	1.2

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤 NH₄⁺和 NO₃⁻ 分别在小麦越冬期(2023 年 2 月 11 日)、拔节期(2023 年 3 月 28 日)、抽穗期(2023 年 4 月 19 日)、灌浆期(2023 年 5 月 18 日)和成熟期(2023 年 6 月 4 日)的晴天采样，每个小区用 5 点取样法分别取 0~20 cm 耕层土壤，土样混合后剔除杂质。过筛后在 4℃条件下保存，测定土壤铵态氮(靛酚蓝比色法)和硝态氮(紫外分光光度校正因素法)。

1.3.2 产量 各小区选取 3 个 1m²典型样点进行测产。首先统计每个样点的有效穗数，然后在每个样点选取 15 株小麦统计每株穗粒数，小麦晒干脱粒后称重并记录千粒重，重复 3 次，烘干部分籽粒并计算籽粒含水量，折算成含水率为 13%的质量即为小麦产量。

1.3.3 叶面积指数 于小麦拔节期、抽穗期、灌浆期通过长宽系数法^[14]测定植株叶面积(叶面积=叶长×叶宽×0.83，叶长为从叶片基部到叶尖的距离，

叶宽为叶片最宽处的距离)。

叶面积指数(LAI)=叶片总面积(m²)/土地面积(m²)。

1.3.4 干物质积累量 在小麦 5 个生育期的晴天取样，每个小区随机选取生长一致的小麦 30 株，烘干后计算地上部干物质积累量。

1.3.5 氮肥利用效率 小麦成熟期计算氮素偏生产力、氮肥农学效率、氮素收获指数。

氮素偏生产力(NPFP, kg/kg)=作物产量/施氮量，氮肥农学效率(NAE, kg/kg)=(施氮区产量-不施氮区产量)/施氮量，氮素收获指数(NHI, %)=籽粒氮素积累量/植株总氮素积累量。

1.3.6 N₂O 的采集与测定 利用静态箱—气相色谱法采集和测定 N₂O 气体。在不同处理小区安置直径 50 cm、高 1 m 的圆筒。采样时将采样箱置于底座中的卡槽处，用水密封，采样时间为上午 8:00—12:00，采样频率为小麦 5 个生育期，施肥后连续取 3 d，采集后的气体用安捷伦 Agilent A (7890)

型气相色谱仪分析气体。

温室气体排放通量计算公式： $F=\rho\times(V/A)\times(dc/dt)\times[273/(273+T)]$ 。式中， F 为 N_2O 排放通量 [$\mu g/(m^2\cdot h)$]， ρ 为标准状态下采气箱内气体密度 (g/cm^3)， V 为采气箱内有效空间体积 (m^3)， A 为采气箱覆盖的土壤面积 (m^2)， dc 为气体浓度差 (nl/L)， dt 为时间间隔 (h)， T 为采样时采气箱温度 ($^{\circ}C$)。

温室气体累计排放量计算公式： $M=\sum[(F_{i+1}+F_i)/2]\times(D_{i+1}-D_i)\times24$ 。式中， M 为 N_2O 排放总量 ($\mu g/m^2$)， F_{i+1} 和 F_i 分别为第 $i+1$ 和 i 次采样时 N_2O 排放通量 [$\mu g/(m^2\cdot h)$]， D_{i+1} 和 D_i 分别是第 $i+1$ 和 i 次采样时间 (d)。

1.4 数据处理

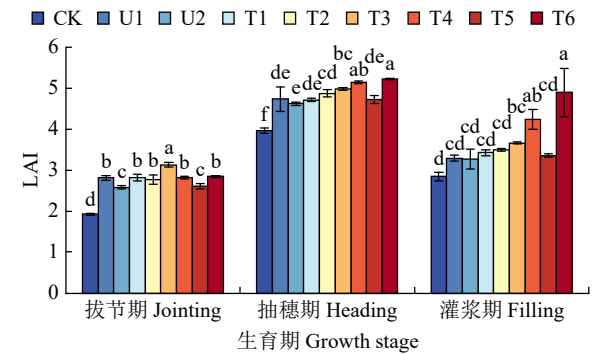
采用 Excel 2019 和 SPSS 26.0 处理试验数据。采用单因素 (one-way ANOVA) 和 Duncan 新复极差法进行数据分析。使用 OriginPro 2022 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥增效剂对小麦 LAI 的影响

不同氮肥增效剂对小麦 LAI 影响显著 ($P<0.05$)。从图 1 可知，小麦拔节期、抽穗期和灌浆期 T3、T4、T6 处理的 LAI 最高。拔节期除 CK 处理外，其他处理均高于 U2 处理。T3 处理 LAI 最高，显著高于其他处理，与 U2 处理相比，增加了 21.32%。U1、T1、T2、T4 和 T6 处理间差异不显著且高于 U2 处理，U2 与 T5 处理之间差异不显著。除 CK 外，抽穗期各处理均高于 U2 处理，T6 处理 LAI 最高，与 U2 处理相比增加了 12.99%。灌浆期 T3、T4、T6 处理相较于 U2 处理分别增加了

11.93%、29.66%、49.54%。U1、T1、T2 和 T5 处理均高于 U2 处理，但是差异不显著。



不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著，下同。
The different lowercase letters indicate significant difference at $P<0.05$ level, the same below.

图 1 不同氮肥增效剂对小麦 LAI 的影响
Fig.1 Effects of different nitrogen fertilizer synergists on LAI of wheat

2.2 不同氮肥增效剂对小麦干物质积累量的影响

在小麦各生育期内，添加 NBPT 和 DMPP 显著影响小麦干物质积累量，并且正常施氮条件下施加氮肥增效剂高于减氮条件下施加氮肥增效剂高于不施增效剂处理。由图 2 可知，小麦越冬期，施加增效剂处理 T1~T6 均高于 U2 处理，增幅为 8.26%~31.63%。小麦拔节期，施加增效剂处理同样高于 U2 处理，提高了 11.65%~43.10%。小麦抽穗期，T1、T3、T4、T5 和 T6 处理高于 U2 处理，分别增加了 8.22%、20.32%、14.30%、9.34% 和 13.56%。U1、T2 处理与 U2 处理无显著差异。小麦灌浆期 T2、T3、T4、T5 和 T6 处理干物质积累量分别较 U2 处理提高了 13.73%、25.65%、9.26%、29.03% 和 31.46%。U1 和 T1 处理与 U2 处理小麦干物质积累量差异不显著。小麦成熟期，T3、T6 处

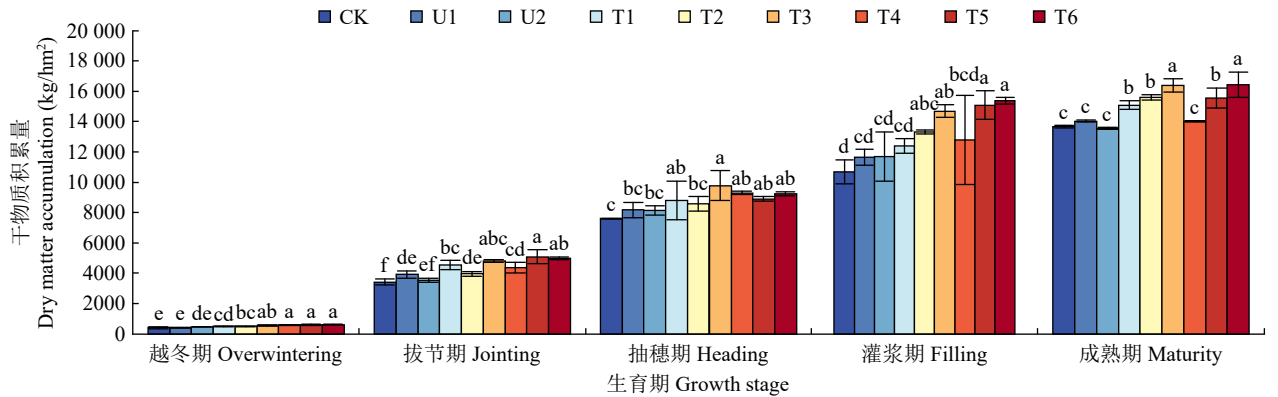


图 2 不同氮肥增效剂对小麦干物质积累量的影响
Fig.2 Effects of different nitrogen fertilizer synergists on the dry matter accumulation of wheat

理干物质积累量最高，相较于 U2 处理，分别增加了 20.94%和 21.36%。

2.3 不同氮肥增效剂对土壤 NH_4^+ 含量的影响

从图 3 可知，在小麦各生育时期内，添加 NBPT 和 DMPP 处理的氮肥显著影响土壤 NH_4^+ 含量， NH_4^+ 含量总体呈现先上升后下降的趋势。从小麦的 5 个生育时期来看，正常施氮条件下施加氮肥增效剂处理均高于减氮条件下施加氮肥增效

剂。由图 3 可知，越冬期 T4、T5、T6 处理 NH_4^+ 含量均要高于 CK、U1、U2 处理，增幅分别为 1.64%、6.46%、0.72%。拔节期 T5、T6 和 U2 处理 NH_4^+ 含量最高且无显著差异。抽穗期与 U2 处理相比，T3、T6 处理增加了 12.23%、12.22%。灌浆期，与 U2 处理相比，T3、T6 处理显著增加了 36.10%、49.47%。成熟期，T3、T5、T6 处理均高于 U2 处理，增幅为 5.03%~24.93%。

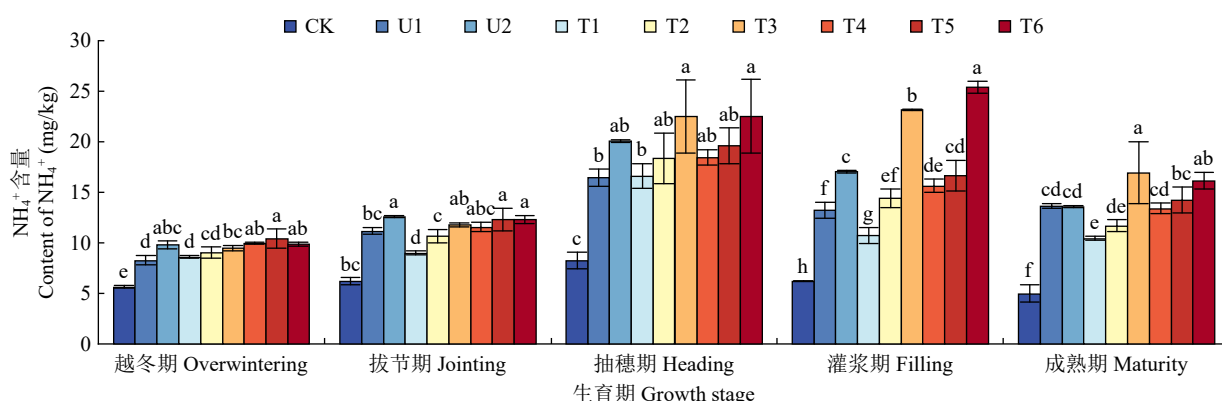


图 3 不同氮肥增效剂对土壤 NH_4^+ 含量的影响

Fig.3 Effects of different nitrogen fertilizer synergists on NH_4^+ contents in soil

2.4 不同氮肥增效剂对土壤 NO_3^- 含量的影响

由图 4 可知，在小麦的各生育期内，添加 NBPT 和 DMPP 处理显著影响土壤 NO_3^- 含量，其变化趋势与 NH_4^+ 含量相同，总体呈先上升后下降的趋势。小麦越冬期，添加氮肥增效剂处理潮土 NO_3^- 含量低于 U2 处理，降幅为 7.62%~32.10%。小麦拔节期各处理潮土 NO_3^- 含量均低于 U2 处理，添加增效剂

处理较 U2 处理降低了 5.47%~34.44%。小麦抽穗期，U1 和 T1 处理高于 U2 处理，T4、T5 处理与 U2 处理差异不显著，其余各处理均显著低于 U2 处理。小麦灌浆期，U2 处理 NO_3^- 含量最高，与 U1 处理差异不显著，添加增效剂处理 NO_3^- 含量与 U2 处理相比较降低了 1.63%~25.22%。小麦成熟期，各处理均显著低于 U2 处理，添加增效剂处理

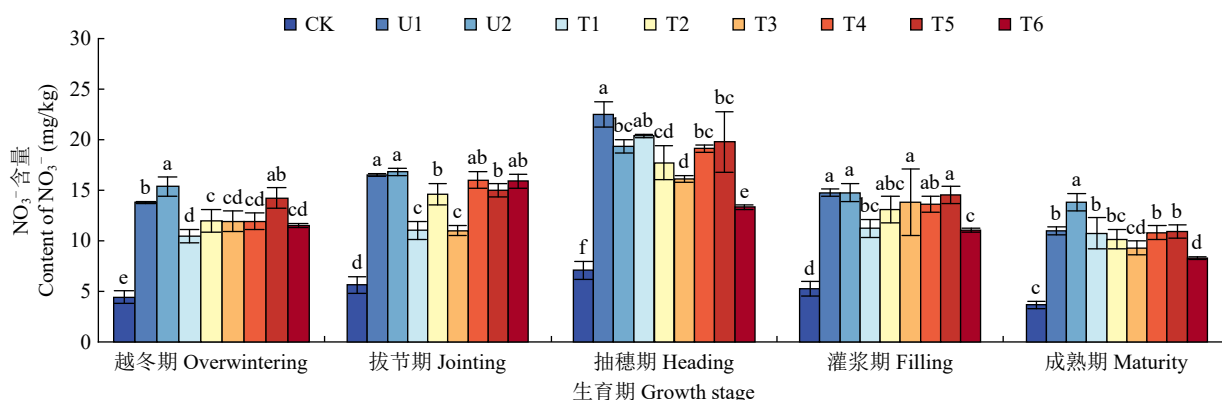


图 4 不同氮肥增效剂对土壤 NO_3^- 含量的影响

Fig.4 Effects of different nitrogen fertilizer synergists on NO_3^- contents in soil

NO_3^- 含量降低了 21.26%~40.20%。

2.5 不同氮肥增效剂对小麦 N_2O 排放通量的影响

图 5 为不同增效剂处理对小麦 N_2O 排放通量的

影响。在小麦整个观测期内 N_2O 排放存在 1 次高峰，出现在小麦施基肥后，其余时间均维持在一个较低的排放值。除 CK 处理外，其余各处理 N_2O 排

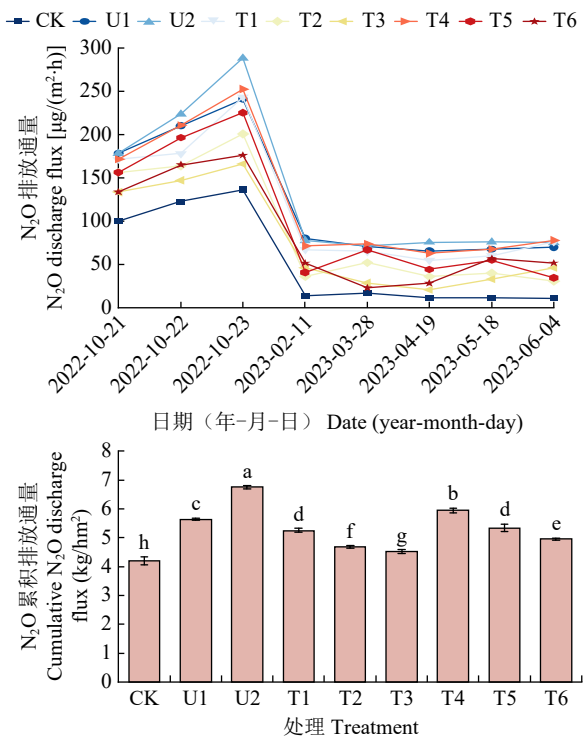


图 5 不同氮肥增效剂对小麦 N₂O 的影响
Fig.5 Effects of different nitrogen fertilizer synergists on N₂O in wheat

放通量均低于 U2 处理，同一施肥处理，同时施加 NBPT 和 DMPP 处理更有利于降低温室气体排放。同一增效剂处理，减氮条件下更有利于降低 N₂O 排放通量。小麦施基肥后第 3 天出现排放高峰，范围在 136.02~288.06 μg/(m²·h)，同一增效剂下，T4 比 T1 处理高 3.78%，T5 比 T2 处理高 12.00%，T6 比 T3 处理高 5.98%。进入 2 月后，随着温度降低，N₂O 排放通量下降且维持在一个较低的水平；随着温度逐渐升高，灌浆期与成熟期 N₂O 排放通量出现小幅度的升高，综合表现为 U2>T4>U1>T1>T5>T6>T2>T3>CK，且差异显著（*P*<0.05）。由图 5 可知，施加增效剂处理的 N₂O 累积排放通量显著低于 U2 处理，且降低幅度为 13.45%~49.01%。

2.6 不同氮肥增效剂对小麦产量和氮素利用效率的影响

2.6.1 对小麦产量及其构成因素的影响 由表 2 可以看出，各处理小麦产量范围为 7025.68~12 303.94 kg/hm²。与 U2 处理相比，除 T2 处理外，其他施入增效剂

表 2 不同氮肥增效剂对小麦产量及其构成因素的影响

Table 2 Effects of different nitrogen fertilizer synergists on wheat yield and its components

处理 Treatment	穗数 Spike number (/m ²)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg/hm ²)
CK	515.00±9.00f	45.67±7.62ab	34.38±0.11de	7025.68±551.37d
U1	639.00±14.73e	47.33±5.03ab	35.54±0.41bcd	9357.55±211.92c
U2	667.67±6.53cd	47.67±1.53ab	36.63±0.46b	10 140.44±190.63bc
T1	671.00±8.13cd	52.00±4.36a	35.19±0.61cd	10 684.44±377.56bc
T2	655.67±12.34de	49.00±1.73ab	33.55±0.34e	9380.92±523.68c
T3	734.33±12.66ab	51.67±1.53a	35.24±1.24cd	11 645.77±422.98ab
T4	683.33±11.50c	45.67±1.15ab	38.04±0.66a	10 324.85±263.74bc
T5	718.00±18.33b	43.00±2.65b	37.99±0.97a	10 208.97±236.57bc
T6	743.33±6.03a	52.33±3.06a	36.19±0.78bc	12 303.94±378.05a

不同小写字母表示 *P*<0.05 水平差异显著，下同。
The different lowercase letters indicate significant difference at *P*<0.05 level, the same below.

处理下穗数提升了 0.50%~11.33%。T1、T3、T6 处理穗粒数较高，与 U2 处理相比，分别增加了 9.08%、8.39%、9.78%。CK、U1、T2 和 T4 处理穗粒数与 U2 处理无显著差异，T5 处理则低于 U2 处理。与 U2 处理相比，T4、T5 处理千粒重较大，分别提高了 3.85%和 3.71%。T3、T6 处理下小麦产量较高，与 U2 处理相比产量分别提高了 14.84%和 21.34%。

2.6.2 对氮肥利用效率的影响 如表 3 所示，对小麦氮肥利用效率分析发现，与 U2 处理相比，各处理小麦的 NPFP 均高于正常施氮处理，增幅为

表 3 不同氮肥增效剂对小麦氮素利用效率的影响
Table 3 Effects of different nitrogen fertilizer synergists on nitrogen use efficiency of wheat

处理 Treatment	氮素偏生产力 NPFP (kg/kg)	氮肥农学效率 NAE (kg/kg)	氮素收获指数 NHI (%)
CK	—	—	61.64±1.63c
U1	48.74±0.59cd	12.15±1.15b	64.30±0.19bc
U2	42.25±0.79d	10.60±0.03b	64.64±0.68bc
T1	55.65±0.09ab	19.06±0.40a	69.07±0.20a
T2	48.86±0.72cd	12.27±0.14b	63.38±0.95c
T3	60.66±0.80a	24.06±1.02a	64.40±0.59bc
T4	43.02±1.10d	11.37±0.37b	65.10±0.99bc
T5	42.54±0.49d	10.89±0.94b	61.34±0.59c
T6	51.27±0.58bc	19.62±0.51a	67.98±0.70ab

0.69%~43.57%。施加 NBPT 和 DMPP 的 T1、T3、T6 处理 NAE 显著高于其他处理, 相较于 U2 处理分别提高了 79.81%、126.98%和 85.09%, 其他处理与 U2 处理在 NAE 上无显著差异。T1、T6 处理下的 NHI 最高, 与 U2 处理相比, 分别提高了 6.85%和 5.17%, U1、T3、T4 处理与 U2 处理的 NHI 差异不显著, CK、T2、T5 处理下的 NHI 则低于 U2 处理。

3 讨论

3.1 不同氮肥增效剂对小麦生长的影响

本试验中, 在相同的施氮水平下, 添加 NBPT+DMPP 复配处理干物质积累量、LAI 最高, 其次是添加 NBPT 和 DMPP 处理, 原因可能是尿素施入土壤后, 增效剂在尿素分子表面形成聚能网进而调控土壤氮素转化, 延长尿素在土壤中的作用时间, 但是增效剂对作物产量影响的试验结果并不完全相同。张文学等^[15]研究表明, 施加 NBPT 处理与 NBPT+DMPP 复配处理相较于单施尿素处理均能显著增加水稻产量, 分别提高 6.60%和 8.20%; 而 Byrnes 等^[16]的试验结果表明, 氮肥中加入 NBPT 在减少氨挥发损失上效果显著, 但是水稻增产与对照处理相比未达显著水平。本研究中, 脲酶与硝化抑制剂配施的 T3 和 T6 处理小麦产量与正常施氮且不施增效剂处理相比分别提高了 14.84%和 21.34%。但是单施增效剂处理与正常施氮且不施增效剂处理下的小麦产量间无显著差异, 这可能是因为农田同时施入脲酶和硝化抑制剂使小麦生长季的总有效态氮一直保持较高水平, 提高小麦对尿素氮的吸收, 从而增加小麦产量。

3.2 不同氮肥增效剂对土壤氮转化及 N₂O 的影响

当地农民常规氮肥施用下, 土壤中高 NH₄⁺含量存在时间较短, 这与人^[17]研究结果一致。增效剂主要通过潮土中铵态氮含量的增加延缓土壤中的硝化作用, 潮土中硝态氮含量维持在较低水平, 主要以增效剂组合 NBPT+DMPP 抑制效果最为明显, 这是因为 2 种抑制剂配合施用能够减缓潮土中铵态氮向硝态氮的转化, 使土壤中尿素释放与小麦氮需求同步, 减少氮淋溶损失, 降低环境污染。硝化和反硝化作用是农田排放 N₂O 的主要途径。全球变暖会增加 N₂O 排放速率^[18], 小麦大部分生长时间土壤温度远低于硝化作用 (25~35 °C) 和反硝化

作用 (30~67 °C) 的最佳土壤温度, 限制了 N₂O 的排放^[19-20]。氮肥同样显著影响土壤 NH₃ 以及 N₂O 排放, 减施氮肥对于减少 N₂O 排放至关重要^[21]。本试验研究结果表明, 在减施氮肥的情况下配施增效剂显著降低了 N₂O 排放通量和累积排放通量, 这一研究结果与 Wang 等^[22]的结果相似, 原因是脲酶抑制剂和硝化抑制剂通过抑制尿素水解的同时降低了硝化和反硝化作用产生的 N₂O。

氮素损失的主要途径是氨挥发, 主要受施氮量和肥料类型的影响^[23]。这是因为尿素进入土壤后会迅速水解生成 NH₄⁺, 而 NH₄⁺的增加会促进氨挥发。一般来说, 随着施氮量的增加, 土壤氨挥发损失量显著增加^[24]。而脲酶抑制剂抑制尿素水解为氨, 因此其可以直接抑制氨挥发。Cantarella 等^[25]研究表明, 脲酶抑制剂 NBPT 的施用可以降低 53% 的氨挥发量。He 等^[26]研究发现, 在不同土壤类型下, 硝化抑制剂 DMPP 均能增加氨挥发损失。多数研究认为, 硝化抑制剂促进氨挥发, 而脲酶抑制剂抑制氨挥发, 这可能与抑制剂的抑制机理有关^[27]。但本研究尚未考虑氨挥发导致的 N₂O 间接排放通量, 未来研究可综合考量氨挥发与 N₂O 排放量的研究, 同时考虑不同氮肥增效剂类型以及氮肥用量对豫北农田氨挥发的影响。

3.3 不同氮肥增效剂对小麦产量和氮肥利用率的影响

合理的氮肥施用可以显著提高小麦产量。然而农业生产者常常过量施肥, 既降低了氮肥利用率, 同时施入的氮肥通过淋溶、挥发等途径进入水体和空气中, 造成环境污染^[28]。因此, 根据作物的需肥规律, 选择合适的氮肥类型、适宜的氮肥用量和适当的施肥时间, 对提高氮肥利用效率有重要意义^[29]。随着农业机械化发展, 一次性氮肥基施的施肥方式是农业发展的一种重要趋势^[30]。然而, 普通施肥会造成养分释放过快, 不能满足作物全生育期养分需求, 因此优化氮肥管理、用有机肥和肥料增效剂代替部分氮肥是提高作物产量、氮肥利用效率的一种简单有效的方法^[4]。前人^[31]研究发现, 与常规施氮 (250 kg/hm²) 相比, 减氮 20% (200 kg/hm²) 在提高玉米产量和氮肥吸收利用效率上效果最为显著。但李欢等^[32]研究发现, 减氮 20%时, 玉米产量大幅降低。这可能与土壤基础肥力、肥料类型和肥料剂量有关。本研究

中, T3 和 T6 处理的氮素偏生产力、氮肥农学效率和氮素收获指数都较高, 与 Liang 等^[33]的结果相似, 这可能是因为增效剂延长了尿素在土壤中的存在。脲酶和硝化抑制剂具有不同的效果, 但都可以减少氮损失, 土壤中较高的 NH_4^+ 可以增加作物的氮利用率, 促进作物对氮的吸收, 增加作物产量^[34]。

4 结论

在豫北农田小麦种植体系中, 氮肥配施脲酶与硝化抑制剂对产量、氮肥利用效率、 NH_4^+ 含量、LAI 和干物质积累量均有显著的提升效果, 并能有效降低土壤 NO_3^- 含量和 N_2O 排放通量。综上所述, 在豫北农田小麦种植体系中, 减氮 20% (192 kg/hm^2) 并配合脲酶与硝化抑制剂处理在保证小麦产量的同时, 能够减少农田温室气体排放, 有助于实现冬小麦绿色高效生产。

参考文献

- [1] Zhang L, Wei Z B, Wang L L, et al. Fate of urea and ammonium sulfate in the plant and soil system as affected by poly- γ -glutamic acid. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 22(2): 2457-2468.
- [2] 王则宇. 劳动力结构变化对粮食生产化肥利用效率的影响研究. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [3] 旷爱萍, 谢凯承. 我国化肥施用量影响因素研究. *北方农业学报*, 2022, 50(6): 40-49.
- [4] Sha Z P, Ma X, Wang J X, et al. Effect of N stabilizers on fertilizer-N fate in the soil-crop system: a meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 290: 106763.
- [5] Bodirsky B L, Popp A, Lotze-Campen H, et al. Reactive nitrogen requirements to feed the world in 2050 and potential to mitigate nitrogen pollution. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 3858.
- [6] 曾科, 王书伟, 朱文彬, 等. 不同硝化抑制剂对稻季 N_2O 排放、 NH_3 挥发和水稻产量的影响. *土壤*, 2023, 55(3): 503-511.
- [7] 李长青, 纪萌, 马萌萌, 等. 天然增效剂与化学抑制剂复配对小麦/玉米轮作体系产量、氮素利用及氮平衡的影响. *应用生态学报*, 2023, 34(9): 2391-2397.
- [8] Liu C Y, Wang K, Zheng X H. Effects of nitrification inhibitors (DCD and DMPP) on nitrous oxide emission, crop yield and nitrogen uptake in a wheat-maize cropping system. *Biogeosciences*, 2013, 10(4): 2427-2437.
- [9] 阚建鸾, 王晓云, 苏建平, 等. 不同氮肥抑制剂对小麦产量、土壤肥力、氮肥利用率的影响. *中国农学通报*, 2023, 39(5): 69-74.
- [10] 李莉, 李东坡, 武志杰, 等. 脲酶/硝化抑制剂对尿素氮在白浆土中转化的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3): 646-650.
- [11] 赵婉伊, 徐卫红, 王崇力, 等. 脲酶-硝化抑制剂缓释肥对不同土壤氮素释放特性及黄瓜 NPK 吸收利用的影响. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 250-257.
- [12] 张文学, 王少先, 夏文建, 等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田土壤硝化、反硝化功能菌的影响. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(6): 897-909.
- [13] 王静, 王允青, 张凤芝, 等. 脲酶/硝化抑制剂对沿淮平原水稻产量、氮肥利用率及稻田氮素的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 211-216.
- [14] 胡林. 植物叶面积系数法改进研究. *中国农学通报*, 2015, 31(5): 228-233.
- [15] 张文学, 杨春成, 王少先, 等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田土壤氮素转化的影响. *中国水稻科学*, 2017, 31(4): 417-424.
- [16] Byrnes B H, Freney J R. Recent developments on the use of urease inhibitors in the tropics. *Fertilizer Research*, 1995, 42: 251-259.
- [17] Wallace A J, Armstrong R D, Grace P R, et al. Nitrogen use efficiency of ^{15}N urea applied to wheat based on fertiliser timing and use of inhibitors. *Nutrient Cycling in Agroecosyst*, 2020, 116(1): 41-56.
- [18] Tian H, Xu R, Canadell J G, et al. A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, 2020, 586(7828): 248-256.
- [19] Liu Q L, Ma J J, Sun X H, et al. Research advancement on soil nitrification-denitrification and its influencing factors. *Agricultural Engineering*, 2011, 1(4): 79-83.
- [20] Zhang Y Y, Wang W J, Yao H Y. Urea-based nitrogen fertilization in agriculture: a key source of N_2O emissions and recent development in mitigating strategies. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2023, 69(5): 663-678.
- [21] Tian X S, Yin Y L, Zhuang M H, et al. Bottom-up estimates of reactive nitrogen loss from Chinese wheat production in 2014. *Scientific Data*, 2022, 9(1): 233.
- [22] Wang J X, Sha Z P, Zhang J R, et al. Improving nitrogen fertilizer use efficiency and minimizing losses and global warming potential by optimizing applications and using nitrogen synergists in a maize-wheat rotation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 353: 108538.
- [23] Wang H Y, Zhang D F, Zhang Y T, et al. Ammonia emissions from paddy fields are underestimated in China. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 482-488.
- [24] 伊英杰, 韩坤, 赵斌, 等. 长期不同施肥措施冬小麦-夏玉米轮作体系周年氮挥发损失的差异. *中国农业科学*, 2022, 55(23): 4600-4613.
- [25] Cantarella H, Otto R, Soares J R, et al. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: a review. *Journal of Advanced Research*, 2018, 13: 19-27.
- [26] He T H, Liu D Y, Yuan J J, et al. A two years study on the combined effects of biochar and inhibitors on ammonia volatilization in an intensively managed rice field. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 264: 44-53.
- [27] 刘世腾, 刘春丽, 李开春, 等. 氮肥增效剂对石灰性潮土氮挥发及冬小麦产量的影响. *中国土壤与肥料*, 2023(3): 1-6.
- [28] 倪秀菊. 几种抑制剂对尿素水解和土壤硝化作用的影响. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [29] 郭海, 杨鹏金, 李录久, 等. 氮肥基追比例运筹方式对水稻生长和肥料利用效率的影响. *现代农业科技*, 2015(20): 20, 27.
- [30] 任寒, 朱国梁, 董浩, 等. 减施配方控释肥调控土壤理化性状与稳定夏玉米产量. *土壤通报*, 2022, 53(6): 1440-1446.
- [31] 郑利芳, 吴三鼎, 党廷辉. 不同施肥模式对春玉米产量、水分利用效率及硝态氮残留的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 221-227.
- [32] 李欢, 李扬, 杨清夏, 等. 缓释尿素一次性施用在玉米减氮增效中的作用. *南方农业学报*, 2021, 52(4): 967-975.

[33] Liang H Y, Shen P F, Kong X Z, et al. Optimal nitrogen practice in winter wheat-summer maize rotation affecting the fates of ^{15}N -labeled fertilizer. *Agronomy*, 2020, 10(4): 521.

[34] Zheng J, Fan J L, Zhang F C, et al. Interactive effects of

mulching practice and nitrogen rate on grain yield, water productivity, fertilizer use efficiency and greenhouse gas emissions of rainfed summer maize in northwest China. *Agricultural Water Management*, 2021, 248: 106778.

Study on the Effect of Different Nitrogen Fertilizer Synergists on Reducing Gaseous Nitrogen Loss and Increasing Yield in Wheat Field of Northern Henan

He Yunxia, Ma Jianhui, Zhang Daijing, Liu Donghua,
Chao Xiaoyan, Chen Huiping, Li Chunxi

(College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453007, Henan, China)

Abstract In order to investigate the effects of nitrogen fertilizer synergists on gaseous nitrogen loss and yield increase in wheat fields of northern Henan, nine nitrogen application measures were set up, including no fertilizer+no synergist (CK), 20% nitrogen reduction+no synergist (U1), normal application of nitrogen+no synergist (U2), 20% nitrogen reduction+1% of pure nitrogen amount of urease inhibitor (NBPT) (T1), 20% nitrogen reduction+1% of pure nitrogen amount of nitrification inhibitor (DMPP) (T2), 20% nitrogen reduction+1/2NBPT+1/2DMPP (T3), normal application of nitrogen+1% of pure nitrogen amount of NBPT (T4), normal application of nitrogen+1% of pure nitrogen amount of DMPP (T5), and normal application of nitrogen+1/2NBPT+1/2DMPP (T6). The results showed that the yields at the same N application level were all higher in the T3 and T6 treatments than those in the other treatments; during the wheat growth period, compared with the U2 treatment, T3 and T6 increased the soil NH_4^+ content by 12.23%-36.10% and 0.72%-49.47%, the leaf area index by 7.79%-21.32% and 10.08%-49.54%, and the dry matter accumulation by 20.32%-35.25% and 13.56%-40.43%; reduced soil NO_3^- contents 6.51%-34.56% and 5.47%-40.20%, N_2O discharge flux 31.73%-72.53% and 24.63%-67.84%, and reduced cumulative N_2O discharge flux 32.89% and 26.67%, all improved the efficiency of N fertilizer utilization. Therefore, the combination of 20% nitrogen reduction with urease inhibitor and nitrification inhibitor can significantly reduce greenhouse gas emissions without reducing yield, which is conducive to the green and efficient production of winter wheat.

Key words Wheat; Nitrogen fertilizer synergists; Ammonium nitrogen; Nitrate nitrogen; Leaf area index; Dry matter accumulation; Yield