

水肥一体化追氮配施氮肥增效剂对冬小麦 生长和氮素利用率的影响

吴英杰¹, 董元杰¹, 孙桂阳¹, 尹雯靖¹, 代兴龙², 贺明荣²

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 土肥高效利用国家工程研究中心, 山东 泰安 271018;

2. 山东农业大学农学院, 山东 泰安 271018)

摘要: [目的] 为探讨添加氮肥增效剂对小麦生长、产量及氮素利用率的影响。[方法] 试验共设对照(CK)、U(T1)、U+NBPT(T2)、U+DMPP(T3)和U+NBPT+DMPP(T4) 5个处理,在拔节期水肥一体化追肥,比较各处理对冬小麦生长、产量、氮肥利用率及生理特性的影响。[结果] 与T1处理相比,T2~T4均能提高小麦株高、干物质质量和产量,其中,T4干物质质量和产量分别显著提高32.35%和17.19%;T2~T4均能显著提升小麦水氮利用效率,提高土壤供氮能力,其中,T4氮素吸收效率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥贡献率和水分利用效率分别提高18.96%、17.19%、89.36%、61.57%和17.59%;在孕穗期土壤 NH_4^+ -N质量分数、 NO_3^- -N质量分数和 NH_4^+ -N表观硝化率较T1分别显著降低6.04%、18.74%和5.03%,在孕穗期土壤脲酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶和羟胺还原酶活性较T1分别显著降低30.37%、20.04%、14.54%和7.04%;尿素配施抑制剂能够提高小麦叶片叶绿素质量分数和抗氧化酶活性,降低丙二醛质量分数和超氧因子产生速率,延缓叶片衰老,促进小麦后期对氮肥的吸收,提高氮素利用率。[结论] 尿素配施NBPT和DMPP双抑制剂能够促进小麦生长,优化土壤氮代谢酶活性和叶片生理特性,提高光合能力,延缓叶片衰老,最终提高小麦产量和水氮利用率,是最优的水肥一体化添加抑制剂方式。研究结果可为小麦高效施用氮肥提供依据。

关键词: 水肥一体化; 脲酶抑制剂; 硝化抑制剂; 土壤氮; 小麦产量; 土壤酶

中图分类号: S154.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0285-10

Effects of Integrated Water and Fertilizer Nitrogen Application Combined with Nitrogen Fertilizer Synergist on Winter Wheat Growth and Nitrogen Use Efficiency

WU Yingjie¹, DONG Yuanjie¹, SUN Guiyang¹, YIN Wenjing¹, DAI Xinglong², HE Mingrong²

(1. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer, Tai'an, Shandong 271018, China; 2. College of Agronomy, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of nitrogen fertilizer synergists on wheat growth, yield, and nitrogen use efficiency. [Methods] Five treatments were set up: control (CK), U (T1), U+NBPT (T2), U+DMPP (T3) and U+NBPT+DMPP (T4). The fertilizer was applied at the jointing stage through integrated water and fertilizer management. The effects of each treatment on the growth, yield, nitrogen use efficiency, and physiological characteristics of winter wheat were compared. [Results] Compared with T1, treatments T2 to T4 all improved the plant height, dry matter accumulation, and yield. In particular, T4 significantly increased dry matter and yield by 32.35% and 17.19%, respectively. Treatments T2 to T4 significantly improved wheat water

收稿日期: 2025-03-21

修回日期: 2025-04-15

录用日期: 2025-05-06

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-06-03

资助项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2024MC055); 国家农业重大科技项目(NK202218080315)

第一作者: 吴英杰(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事作物高效施肥技术研究。E-mail: 1074500614@qq.com

通信作者: 董元杰(1977—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事施肥与环境研究。E-mail: yuanjiedong@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

and nitrogen use efficiency, as well as the soil nitrogen supply capacity. Under T4, nitrogen uptake efficiency, partial factor productivity, agronomic efficiency, nitrogen contribution rate, and water use efficiency increased by 18.96%, 17.19%, 89.36%, 61.57% and 17.59%, respectively. At the booting stage, the contents of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and the apparent nitrification rate of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ were significantly reduced by 6.04%, 18.74% and 5.03%, respectively, compared with T1. Additionally, the activities of soil urease, nitrate reductase, nitrite reductase, and hydroxylamine reductase were significantly reduced by 30.37%, 20.04%, 14.54% and 7.04%, respectively, compared with T1. The application of inhibitors with urea increased the chlorophyll content and antioxidant enzyme activity, reduced malondialdehyde content and superoxide radical production rate, delayed leaf senescence, enhanced nitrogen uptake in the later growth stage, and improved nitrogen use efficiency. **[Conclusion]** The combined application of NBPT and DMPP with urea promotes wheat growth, optimizes soil nitrogen-metabolizing enzyme activities and leaf physiological characteristics, enhances photosynthetic capacity, delays leaf senescence, and ultimately improves wheat yield and both water and nitrogen use efficiency. It is the optimal strategy for applying inhibitors in integrated water and fertilizer management. The results of this study can provide a basis for the efficient application of nitrogen fertilizer in wheat.

Keywords: integration of water and fertilizer; urease inhibitors; nitrification inhibitors; soil nitrogen; wheat yield; soil enzymes

Received: 2025-03-21

Revised: 2025-04-15

Accepted: 2025-05-06

Online(www.cnki.net): 2025-06-03

小麦作为我国主要的粮食作物,其高产稳产与国家粮食安全息息相关^[1]。氮是光合作用、蛋白质和核酸合成等生命过程所必需的营养元素,可提高作物产量、改善作物品质^[2],是小麦生长发育不可或缺的元素之一。目前小麦生产中,氮肥施用过量^[3]、施用方法不合理,养分释放快,容易通过氨挥发、淋溶和硝化-反硝化作用等途径流失到环境中,导致土壤养分供应与作物需求不匹配和污染环境^[4]。水分是制约小麦生长的重要条件,农民常规灌溉方法为大水漫灌,不仅导致水资源浪费,还引起土壤养分淋洗加剧,造成肥水效率降低、肥料资源浪费和污染环境^[5]。因此,在小麦生产中需要进行合理施肥,提高氮肥利用率。

提高氮肥利用率,除优化施肥措施、有机肥替代化肥^[6]和绿肥还田等方法外,还可通过水肥一体化来提高氮肥利用率^[7]。水肥一体化技术可精确地控制水分和氮肥的供应,提高土壤养分和作物需求的匹配度^[8],现有研究^[7]表明,微喷灌水肥一体化可在减肥条件下增加作物产量,节约水分,提高水分利用率,适宜的水氮运筹可显著增加小麦产量,降低土壤氮素损失,提高土壤供氮能力和水氮利用效率^[9]。氮肥增效剂可提高氮肥利用率,本试验中,采用的氮肥增效剂为脲酶抑制剂 NBPT(正丁基硫代磷酸三胺)和硝化抑制剂 DMPP(3,4-二甲基吡唑磷酸盐),NBPT 是迄今为止最为常用的脲酶抑制剂^[10],尿素配施脲酶抑制剂 NBPT 可有效抑制土壤脲酶活性,

延缓尿素分解,减少作物的氨挥发与 N_2O 排放,减少氮损失,提升作物氮肥利用率,进而实现作物增产^[11];与其他硝化抑制剂相比,DMPP 可在更少的用量下达到较好的硝化抑制效果,尿素配施硝化抑制剂 DMPP 可抑制 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 转化,提高硝化抑制率,提高氮肥利用率^[12]。水肥一体化技术多被用于蔬菜^[13]和果园^[14]设施中,节水省肥的肥水运筹模式在大田作物上应用较少,而脲酶抑制剂 NBPT 和硝化抑制剂 DMPP 多添加在固体氮肥中,在水肥一体化条件下进行应用也较少,相关添加技术及其增效机理研究欠缺,有必要进行深入地研究,因此,本研究在水肥一体化追氮条件下添加不同增效剂,探讨添加氮肥增效剂对小麦生长、产量及氮素利用率的影响,以期小麦高效施用氮肥提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于 2023 年 10 月至 2024 年 6 月在山东省泰安市马庄镇农田(35°99'N,117°01'E)进行,试验区域属于暖温带半湿润季风气候,多年平均气温为 11.8~13.7℃,年平均降水量为 720 mm。试验区土壤类型为潮棕壤,耕层土壤 pH 为 6.88,电导率 54 $\mu\text{S}/\text{cm}$,全氮 0.35 g/kg,铵态氮 6.00 mg/kg,硝态氮 13.01 mg/kg,速效钾 76.39 mg/kg,速效磷 28.93 mg/kg。试验期间气象资料见图 1。

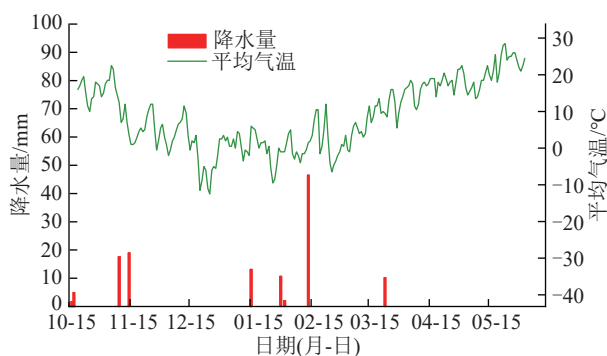


图1 试验区冬小麦季日平均气温与降水的分布

Fig.1 Distribution of daily average temperature and precipitation during winter wheat growing season in test area

1.2 试验设计

试验共设对照(CK)、U(T1)、U+NBPT(T2)、U+DMPP(T3)、U+NBPT+DMPP(T4)5个处理,每个处理重复3次,试验小区面积为35 m²,随机区组排列。供试作物为冬小麦(*Triticum aestivum* L.),品种为“济麦22”,小麦播种量为150 kg/hm²,2023年10月15日播种,2024年6月3日收获。

施肥及灌溉。肥料N、P₂O₅、K₂O施用量分别为240、105、105 kg/hm²,磷肥和钾肥分别由磷酸一铵和氯化钾提供,磷钾肥一次性播前撒施。氮肥的基肥:追肥=4:6,基肥氮由磷酸一铵和普通尿素提供,播前撒肥翻耕,追肥氮由普通尿素水肥一体化提供,追肥中NBPT(正丁基硫代磷酰三胺)按N素用量的0.4%施用^[11],DMPP(3,4-二甲基吡唑磷酸盐)按N素用量的0.8%施用^[12],NBPT的添加比例根据前人试验结果适当减量20%确定的添加量,所用肥料和氮肥增效剂均为市售。灌溉方式为微喷灌,拔节期和开花期分别灌水40 mm,灌浆期灌水10 mm,在拔节期进行微喷灌水肥一体化追氮,其他管理措施同当地正常水平。

1.3 样品采集与测定

于小麦孕穗期、灌浆期、成熟期在田间测定小麦株高,在晴朗的上午测定小麦叶片叶绿素相对质量分数(SPAD值)。在小麦苗期、拔节期、孕穗期、灌浆期、成熟期采集0~20 cm土层土壤样品,将样品分为两部分,一部分风干后用于土壤基本理化性质测定;一部分保存于-20℃,用于土壤硝态氮、铵态氮和氮转化相关酶活性的测定。在小麦孕穗期和灌浆期采集小麦旗叶样品,保存于-80℃,用于叶片抗氧化系统的测定。成熟期测定小麦产量及产量构成因素。

小麦成熟期产量测定。小麦成熟期按常规方法取样,将小麦植株置于105℃烘箱中杀青1 h,然后置于80℃烘干至恒重,称重并计算干物质积累量;在各

小区内选取长势均匀的2个区域,划定1 m×1 m(共计1 m²)的面积调查穗数,然后2个区域全部由人工收割、脱粒,自然风干至水分体积分数12.5%,用于籽粒千粒重的测定,在长势均匀的区域随机取30个穗,用于每穗穗粒数的调查。

土壤样品的测定。用烘干法^[15]测定土壤水分体积分数;用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定土壤脲酶活性,用酚二磺酸比色法测定土壤硝酸还原酶活性,土壤脲酶活性和土壤硝酸还原酶活性分别以24 h每克土壤中产生的NH₃⁺-N和NO₃⁻-N的毫克数表示;通过亚硝酸盐与显色剂反应,测定酶促反应前后NO₂⁻-N的变化量,用以表示土壤亚硝酸还原酶活性;通过羟胺与醋酸酐、氧化铁的生色反应,计算羟胺与土壤作用后剩余的未被还原的量,用以表示土壤羟胺还原酶活性^[15];土壤NH₄⁺-N和NO₃⁻-N质量分数采用1 mol/L的KCL浸提,全自动流动分析仪(AA3,德国)测定。

植株样品的测定。采用卷尺测量小麦株高,采用SPAD-520 Plus叶绿素测定仪测定叶片SPAD值;叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、丙二醛(MDA)和超氧阴离子(O₂⁻·)分别采用氮蓝四唑法、愈创木酚法、紫外吸收法、硫代巴比妥酸法和羟胺氧化法^[16]测定。

1.4 计算公式

氮素吸收效率 NUPE(kg/kg)=地上部氮素积累量/供氮量×100

氮肥偏生产力 NPFP(kg/kg)=籽粒产量/施氮量

氮肥农学效率 NFAE(kg/kg)=(施氮区籽粒产量-不施氮区籽粒产量)/施氮量

氮肥贡献率 NFCR(%)=(施氮区籽粒产量-不施氮区籽粒产量)/施氮区籽粒产量×100%

水分利用效率 WUE[kg/(hm²·mm)]=籽粒产量/(播种时土壤水分体积分数×土壤体积质量×土层厚度×0.1-收获期土壤水分体积分数×土壤体积质量×土层厚度×0.1+生育期灌水量+有效降水量)

土壤 NH₄⁺-N 表观硝化率(%)=NO₃⁻-N/(NH₄⁺-N+NO₃⁻-N)×100%

1.5 数据处理与分析

试验数据采用Excel 2019和Origin 2021软件进行处理与绘图,采用SPSS 27软件进行统计分析,采用单因素ANOVA检验和邓肯(Duncan)法进行差异显著性检验($p<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 水肥一体化追氮配施氮肥增效剂对小麦株高的影响

由图 2 可知,水肥一体化追氮配施氮肥增效剂可促进小麦的生长,提高小麦株高。与 T1 处理相比,在孕穗期 T2、T3 和 T4 处理株高分别显著提高,增幅分别达 8.94%、7.86% 和 20.04%,其中以 T4 处理提高最为显著;在灌浆期和成熟期 T4 处理株高分别显著提高 6.1% 和 8.26%,T2 和 T3 处理无显著性影响。说明尿素配施氮素增效剂追肥对小麦后期株高的影响均优于纯普通尿素追肥,其中 NBPT+DMPP 复合处理对小麦株高生长的促进效果最优。

2.2 水肥一体化追氮配施氮肥增效剂对小麦产量的影响

由表 1 可知,与 CK 相比,T1~T4 处理干物质积累量分别显著提高 22.98%、49.17%、55.07% 和 62.64%,产量分别显著提高 23.82%、34.34%、35.62% 和 45.1%,说明施用氮肥能够增加小麦产量。与 T1 处理相比,T2、T3 和 T4 处理小麦干物质积累量分别显著提高 21.29%、26.09% 和 32.35%,产量分别显著提高 8.50%、9.53% 和 17.19%,其中以 T4 处理效果最优,说明 DMPP+NBPT 复合处理氮肥对小麦干物质积累量和产量效果最好。

表 1 小麦产量及产量构成因素

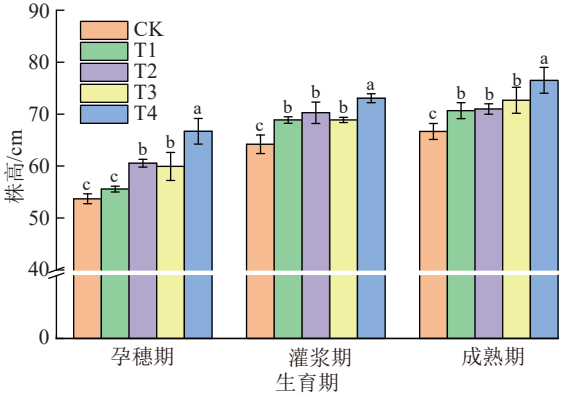
Table 1 Wheat yield and yield components

处理	干物质积累量/(kg·hm ⁻²)	穗数/(10 ⁴ hm ⁻²)	穗粒数/粒	千粒重/g	产量/(kg·hm ⁻²)
CK	15 112d	547d	31.67c	39.83c	6 557d
T1	18 585c	589c	34.33c	43.23ab	8 119c
T2	22 542b	648b	38.00b	43.67a	8 809b
T3	23 434b	635b	39.00ab	42.67ab	8 893b
T4	24 578a	686a	41.33a	42.13b	9 515a

注:CK、T1、T2、T3、T4 分别为不施肥、U、U+NBPT、U+DMPP、U+NBPT+DMPP;NBPT、DMPP 分别为脲酶抑制剂、硝化抑制剂。同列不同字母表示差异达 5% 显著水平。下同。

2.3 水肥一体化追氮配施氮肥增效剂对小麦水氮利用效率的影响

氮素吸收效率,氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮肥贡献率可分别从不同角度描述小麦对氮素的吸收利用程度。由表 2 可知,小麦 NPEP、NFAE 和 NFCR 的变化趋势相一致,与 T1 处理相比,T2、T3 和 T4 处理小麦 NPEP、NFAE 和 NFCR 均显著提高,其中以 T4 处理提高最为显著,分别提高 17.19%、89.36% 和 61.57%。与 T1 处理相比,T2、T3 和 T4 处理小麦 NUPE 均显著提高,增幅分别达 34.5%、23.59% 和 18.96%,T4 处理提高幅度最小,T2、T3 和 T4 处理间无显著性差异。说明水肥一体化配施氮肥



注:CK、T1、T2、T3、T4 分别为不施肥、U、U+NBPT、U+DMPP、U+NBPT+DMPP;NBPT、DMPP 分别为脲酶抑制剂、硝化抑制剂。图柱上方不同字母表示同生育期不同处理差异达 5% 显著水平。下同。

图 2 不同施肥处理对小麦不同生育期株高的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on wheat plant height at different growth stages

从产量构成因素来看,与 T1 处理相比,T2、T3 和 T4 处理间小麦千粒重差异不明显。不同施肥处理间产量差异明显与穗数和穗粒数有关,与 T1 处理相比,T2、T3 和 T4 处理小麦穗数分别显著增加 9.97%、7.84% 和 16.47%;T2、T3 和 T4 处理小麦穗粒数分别显著增加 10.68%、13.59% 和 20.39%,其中,T4 增加小麦穗数和穗粒数的效果最优,获得产量最高,说明 DMPP+NBPT 复合处理对氮肥的增效作用更明显。

增效剂能够提高小麦氮素吸收效率,氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮肥贡献率,更好地促进小麦对氮肥的吸收利用,减少氮损失,其中 DMPP+NBPT 复合处理对氮肥的控制效果更优。

不同肥料处理对小麦 WUE 的影响不同,与 CK 处理相比,T1~T4 处理 WUE 均显著增加,增幅分别达 19.11%、28.09%、26.67% 和 40.06%,说明施用氮肥能够提高小麦的水分利用效率;与 T1 处理相比,T2、T3 和 T4 处理 WUE 分别显著增加 7.54%、6.35% 和 17.59%,其中 T4 处理增加最为显著,说明水肥一体化配施氮肥增效剂能够提高水分利用效率,其中 DMPP+NBPT 复合处理提高水分利用效率的效果最好。

表 2 不同施肥处理对小麦水氮利用效率的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on water and nitrogen use efficiency of wheat

处理	NUPE/%	NPFP/(kg·kg ⁻¹)	NFAE/(kg·kg ⁻¹)	NFCR/%	WUE/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
CK	—	—	—	—	27.36 e
T1	59.13b	33.83c	6.51c	19.24c	32.59d
T2	79.53a	36.71b	9.38b	25.56b	35.05b
T3	73.08a	37.05b	9.73b	26.26b	34.66c
T4	70.34a	39.64a	12.32a	31.08a	38.32a

注:NUPE、NPFP、NFAE、NFCR和WUE分别为氮素吸收效率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥贡献率 and 水分利用效率。

2.4 水肥一体化追氮配施氮肥增效剂对土壤供氮能力及NH₄⁺-N表观硝化率的影响

由图 3a 可知,不同生育期小麦各处理土壤 NH₄⁺-N 质量分数均显著高于 CK,说明施用氮肥能够提高土壤中 NH₄⁺-N 质量分数。T1~T4 处理拔节期追肥之后,在孕穗期,与 T1 处理相比,T2、T3 和 T4 处理土壤 NH₄⁺-N 质量分数分别显著降低 8.02%、6.70% 和 6.04%,T2~T4 处理间无显著性差异;在灌浆期,与 T1 处理相比,T2 处理土壤 NH₄⁺-N 质量分数显著提高 18.09%,T3 和 T4 处理无显著性差异;在成熟期,与 T1 处理相比,T3 处理土壤 NH₄⁺-N 质量分数显著减少 5.26%,T2 和 T4 处理无显著性

差异。由图 3b 可知,在小麦生长前期,T1~T4 处理虽然施肥模式相同,对小麦土壤 NO₃⁻-N 质量分数影响不同,且都显著高于 CK 处理。拔节期追肥后在孕穗期,与 T1 处理相比,T2、T3 和 T4 处理土壤 NO₃⁻-N 质量分数分别显著降低 11.13%、20.60% 和 18.74%;在灌浆期与成熟期,与 T1 处理相比,T3 和 T4 处理土壤 NO₃⁻-N 质量分数分别显著降低 8.24% 和 13.62%,T2 处理无显著性差异。说明施用氮肥能够提高土壤中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 质量分数,并且尿素配施 NBPT 能够延缓尿素水解进程,减少 NH₄⁺-N 挥发损失,尿素配施 DMPP 能够减少土壤中氨的转化,减少土壤中 NO₃⁻-N 淋溶损失。

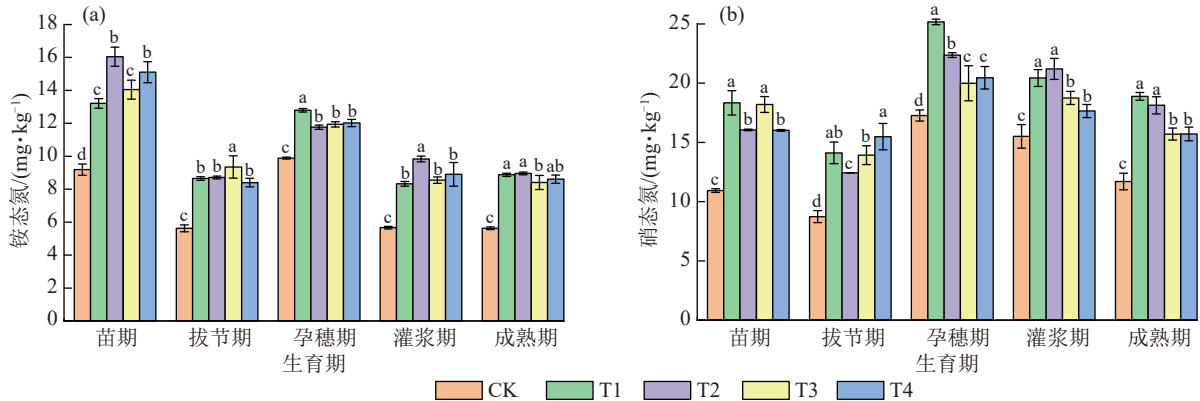


图 3 不同施肥处理下小麦不同生育期土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 质量分数变化

Fig. 3 Changes of soil NH₄⁺-N and NO₃⁻-N contents at different wheat growth stages under different fertilization treatments

由表 3 可知,T1 处理土壤中 NH₄⁺ 的硝化作用在小麦生长过程中稳定保持高位状态。拔节期追施氮肥后,在孕穗期,与 T1 处理相比,T3 和 T4 处理土壤 NH₄⁺-N 表观硝化率分别显著降低 5.65% 和 5.03%,T2 处理无明显差异;在灌浆期,与 T1 处理相比,T2、T3 和 T4 处理土壤 NH₄⁺-N 表观硝化率分别显著降低 5.83%、3.32% 和 6.37%;在成熟期,与 T1 处理相比,T3 和 T4 处理土壤 NH₄⁺-N 表观硝化率分别显著降低 4.26% 和 5.04%,T2 处理无明显差异。说明尿素配施 DMPP 能够降低追肥后生育期土壤硝化作用,降低土壤 NH₄⁺-N 表观硝化率。单独添加 DMPP 和 NBPT+DMPP 复合处理土壤 NH₄⁺-N 表观硝化率均处于较低水平,说明 NBPT 与 DMPP 复合处理能够抑制小麦生长过程中土壤 NH₄⁺ 的

硝化作用,减少 NO₃⁻-N 淋溶损失,提高氮肥利用率。其中 T4 处理土壤中 NH₄⁺ 的硝化作用在小麦追肥后生育期稳定处于较低水平,说明 NBPT+DMPP 复合处理能够抑制 NH₄⁺ 氧化,提高土壤中有效氮质量分数。

表 3 不同施肥处理下小麦不同生育期土壤 NH₄⁺-N 的表观硝化率

Table 3 Apparent nitrification rate of soil NH₄⁺-N at different wheat growth stages under different fertilization treatments

处理	拔节期	孕穗期	灌浆期	成熟期
CK	60.80b	59.06c	69.36b	67.48a
T1	61.96ab	66.29a	71.03a	68.02a
T2	58.80b	65.52a	66.88c	66.92a
T3	59.80b	62.55b	68.67b	65.13b
T4	64.77a	62.96b	66.50c	64.60b

2.5 水肥一体化配施氮肥增效剂对小麦土壤氮转化酶活性的影响

由图 4 可知,小麦生长过程中各施肥处理土壤氮转化酶活性均显著高于 CK,酶活性随小麦生长呈先上升后下降趋势。在小麦生育前期,土壤氮转化酶活性普遍较低,且与 T1 处理相比无明显差异,可能是与小麦生育前期土壤温度有关,低温抑制土壤氮转化酶活性。

由图 4a 可知,土壤脲酶活性在小麦孕穗期达到最大值。在孕穗期,与 T1 处理相比,T2 和 T4 处理土壤脲酶活性分别显著降低 22.75% 和 30.37%,T3 处理无明显差异;在灌浆期,与 T1 处理相比,T4 处理土壤脲酶活性显著降低 23.64%,T2 和 T3 处理无明显差异;在成熟期,与 T1 处理相比,尿素配施氮素抑制剂处理土壤脲酶活性无明显差异。说明尿素配施 NBPT 能够有效抑制土壤脲酶活性,降低尿素水解速率,其中,NBPT 与 DMPP 复合处理对土壤脲酶活性的抑制效果最好。

由图 4b 可知,土壤硝酸还原酶活性在小麦孕穗期达到最大值。与 T1 处理相比,T2、T3 和 T4 处理小麦土壤硝酸还原酶活性在孕穗期分别显著降低 16.52%、17.32% 和 20.04%,在灌浆期分别显著降低 22.74%、19.7% 和 22.38%,在成熟期分别降低 23.47%、30.06% 和 9.65%,说明尿素配施氮素抑制

剂可有效抑制土壤硝酸还原酶活性,抑制土壤反硝化作用,减少氮肥损失。

由图 4c 可知,土壤亚硝酸还原酶活性在施肥后生育期达到高峰,说明追肥可提高土壤亚硝酸还原酶的活性。在孕穗期,与 T1 处理相比,T2、T3 和 T4 处理土壤亚硝酸还原酶活性分别显著减少 12.62%、14.15% 和 14.54%;在灌浆期,与 T1 处理相比,T2、T3 和 T4 处理土壤亚硝酸还原酶活性分别显著减少 10.54%、15.42% 和 31.08%;在成熟期,与 T1 处理相比,T4 处理土壤亚硝酸还原酶活性显著减少 27.71%,T2 和 T3 处理无明显差异。说明尿素配施氮素抑制剂可抑制土壤中亚硝酸还原酶的活性,其中,NBPT 与 DMPP 复合处理对酶活性的抑制效果最好。

由图 4d 可知,土壤羟胺还原酶活性在小麦孕穗期达到最大值。与 T1 处理相比,T2、T3 和 T4 处理小麦土壤羟胺还原酶活性在孕穗期分别显著降低 4.97%、11.76% 和 7.04%,在灌浆期分别显著降低 6.11%、7.64% 和 5.42%,在成熟期无明显差异。说明添加抑制剂在小麦追肥后时期可有效抑制土壤中羟胺还原酶活性,在成熟期抑制效果不明显。尿素配施氮素抑制剂可有效抑制土壤中氮转化酶活性,其中,NBPT 与 DMPP 复合处理抑制效果最好,可延缓尿素转化进程,减少氮素损失,提高氮肥利用率。

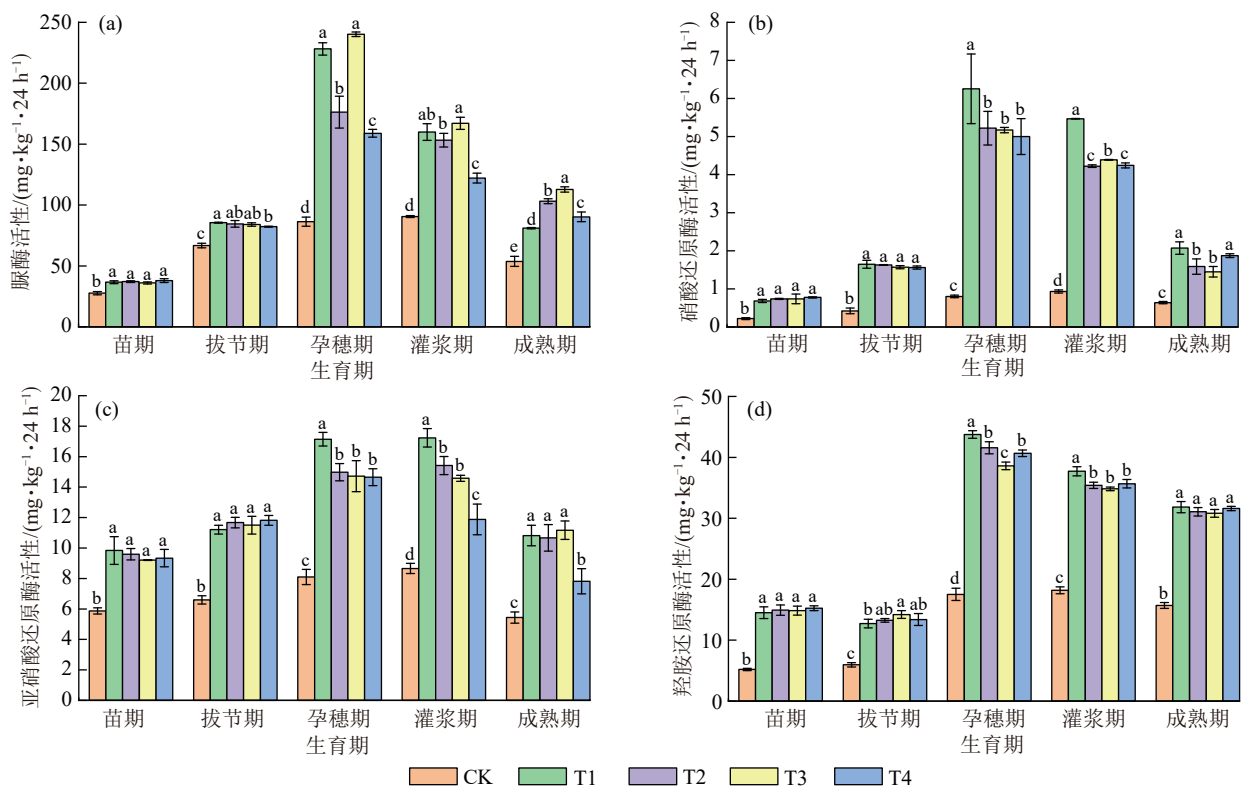


图 4 不同肥料处理下小麦不同生育期土壤氮转化酶活性

Fig. 4 Activities of soil urease at different wheat growth stages under different fertilizer treatments

2.6 水肥一体化配施氮肥增效剂对小麦 SPAD 的影响

由图 5 可知,除 T3 处理外,不同施肥处理小麦叶片 SPAD 值随小麦生长呈先上升后下降趋势,在小麦灌浆期达到最大值。与 T1 处理相比,T2、T3 和 T4 处理小麦叶片 SPAD 值在孕穗期分别提高 6.60%、13.57% 和 32.75%,在灌浆期分别显著增加 10.15%、11.54% 和 33.23%,在成熟期分别显著增加 25.12%、12.38% 和 28.04%。说明尿素配施氮素抑制剂能提高叶绿素相对质量分数,延缓叶片衰老,其中,NBPT 与 DMPP 复合处理对小麦叶片衰老的延缓效果最好。

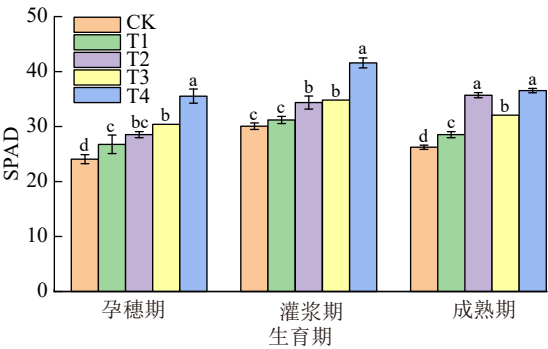


图 5 不同肥料处理对小麦不同生育期 SPAD 的影响
Fig.5 Effects of different fertilizer treatments on SPAD values at different wheat growth stages

2.7 水肥一体化配施氮肥增效剂对小麦叶片生理特性的影响

由表 4 可知,不同施肥处理小麦叶片抗氧化酶活性均高于 CK,MDA 质量分数和 O₂^{·-}产生速率均低于 CK,说明施用氮肥可以提高小麦抗衰老能力。与 T1 处理相比,T2、T3 和 T4 处理小麦叶片 SOD 活性在孕穗期分别显著提高 2.88%、5.35% 和 4.54%,在灌浆期分别显著提高 14.60%、9.04% 和 16.46%;T2、T3 和 T4 处理小麦叶片 POD 活性在孕穗期分别显著提高 9.69%、25.24% 和 54.76%,在灌浆期分别显著提高 17.16%、20.78% 和 10.88%;T2 处理小麦叶片 CAT 活性在孕穗期和灌浆期均显著提高 15.38% 和 31.5%;T2、T3 和 T4 处理小麦叶片 MDA 质量分数在孕穗期分别降低 9.85%、25.82% 和 20.74%,在灌浆期分别显著降低 17.77%、12.40% 和 19.62%;T2、T3 和 T4 处理小麦叶片 O₂^{·-}产生速率在孕穗期分别显著降低 50.52%、22.86% 和 21.55%,在灌浆期分别降低 20.38%、10.88% 和 0.11%。说明尿素配施氮素抑制剂可以提高小麦叶片抗氧化酶活性,降低小麦叶片 MDA 质量分数和 O₂^{·-}产生速率,增强清除体内活性氧能力,延缓小麦衰老进程,提高产量,其中 NBPT 与 DMPP 复合处理延缓小麦衰老效果最好。

表 4 不同肥料处理对小麦叶片生理特性的影响

Table 4 Effects of different fertilizer treatments on the physiological characteristics of wheat leaves										
处理	SOD 活性/ (U·g ⁻¹ FW)		POD 活性/ (U·g ⁻¹ ·min ⁻¹ FW)		CAT 活性/(μmol H ₂ O ₂ ·mg ⁻¹ ·min ⁻¹ FW)		MDA 质量分数/ (μmol·g ⁻¹ FW)		O ₂ ^{·-} 产生速率/ (μmol·g ⁻¹ h ⁻¹)	
	孕穗期	灌浆期	孕穗期	灌浆期	孕穗期	灌浆期	孕穗期	灌浆期	孕穗期	灌浆期
CK	182.94c	159.29c	205.60 e	232.27 e	53.60c	21.26d	12.34a	14.09a	164.35a	216.10a
T1	205.30b	177.09b	231.20d	290.33d	66.47b	25.89c	11.03b	12.42b	172.08a	126.73b
T2	211.21a	202.95a	253.60c	340.16b	76.69a	34.04a	9.97b	10.21c	85.15c	100.90c
T3	216.27a	193.11a	289.33b	350.65a	67.14b	29.91b	8.18c	10.88c	132.75b	112.95c
T4	214.61a	206.24a	357.80a	321.91c	65.35b	28.08bc	8.74c	9.98c	135.00b	126.60b

注:SOD、POD、CAT、MDA 和 O₂^{·-}分别为超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶、丙二醛和超氧阴离子。

3 讨论

3.1 水肥一体化配施氮肥增效剂对小麦生长、产量和水氮利用效率的影响

施用氮肥增效剂可促进小麦生长,提高小麦产量和水氮利用效率,脲酶抑制剂和硝化抑制剂作为氮肥增效剂,主要通过调控氮素转化、延长氮肥肥效和减少氮素损失来提高氮肥利用率。阚建鸾等^[17]研究表明,硝化抑制剂的减肥增效效果要大于脲酶抑制剂,能够有效增加小麦产量;漆增连等^[18]研究表明,将 NBPT 与 DMPP 与尿素共包膜可以延缓尿素溶出和尿素转化过程,能够促进小麦生长,改善小麦产量构成,增加小麦产量。本研究表明,尿素配施氮

素抑制剂能够显著提高小麦株高,增加小麦产量,且小麦穗数和穗粒数同步增加,尿素配施 DMPP 处理的产量和干物质积累量大于尿素配施 NBPT 处理,但差异不显著,并且 NBPT+DMPP 复合处理对小麦增产效果最明显。可能是由于尿素配施 NBPT+DMPP 能够保证氮素的均衡足量供应,促进小麦幼穗分化,从而增加小麦有效穗数和穗粒数,实现小麦产量的提高。

张俊等^[19]研究表明,将硝化/脲酶抑制剂结合氮肥施用可调控作物根区氮素供给形态,增加作物生育期内的吸氮量,氮肥配施 NBPT 和 DCD 可提高夏玉米水分利用效率和氮肥偏生产力,其中氮肥配施

双效抑制剂效果最优。本研究表明,尿素配施氮素抑制剂可提高小麦氮素吸收效率,氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥贡献率 and 水分利用效率,其中配施双抑制剂效果更优。可能是由于尿素配施 NBPT+DMPP 能够延缓尿素分解,抑制土壤氮素的硝化-反硝化作用,延长土壤供氮持续时间,增加土壤氮素供应量,引起小麦对土壤氮素吸收利用和土壤水分吸收的增加。NBPT+DMPP 复合处理小麦干物质积累较高,氮素吸收效率较低,可能是因为吸收氮素促进植株生长,造成植株碳水化合物积累量偏高,导致单位干物质中平均含氮量降低。王静等^[20]证实氮素配施 DMPP 或者配施 NBPT+DMPP 可显著提高氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率、氮素吸收效率和氮肥偏生产力,与本研究结果基本一致。氮素配施 NBPT+DMPP 能够更好地促进小麦生长,增加小麦干物质积累量和产量,提高小麦水氮利用效率。

3.2 水肥一体化配施氮肥增效剂对土壤氮素供应及转化的影响

在小麦生产上,施入土壤中的氮素主要通过硝态氮淋溶发生流失,未被作物吸收的铵态氮在硝化作用下逐步转化为硝态氮^[21]。通过监测土壤中硝态氮与铵态氮的动态变化,既可判断植株对养分的利用效率,也能预警因氮素迁移可能引发的环境污染风险。张如梦等^[22]研究表明,硝化抑制剂 DMPP 的添加可提高所有处理的铵态氮质量分数,降低硝态氮质量分数,提高土壤铵硝比,降低土壤表观硝化率。本研究表明,尿素配施 NBPT 能够缓解尿素在土壤中的水解,增加小麦生育后期土壤铵态氮质量分数,尿素配施 DMPP 能够减少硝态氮的淋失,NBPT 与 DMPP 复合处理可使小麦生育后期土壤铵态氮质量分数保持在中等水平,硝态氮质量分数保持较低水平。可能是因为尿素施入土壤中在脲酶的催化作用下水解为铵态氮,铵态氮在微生物的作用下形成硝态氮,硝态氮又可通过硝化-反硝化作用其他形式的氮而损失,脲酶抑制剂抑制脲酶活性,延长尿素水解的过程,使生育后期土壤中铵态氮质量分数增加,硝化抑制剂抑制铵态氮在土壤中的硝化作用,降低土壤中硝态氮的质量分数和铵态氮表观硝化率。贺云霞等^[23]证实尿素同时配施 NBPT 和 DMPP 双抑制剂能够减缓潮土中铵态氮向硝态氮的转化,提高土壤中铵态氮质量分数,降低土壤中硝态氮质量分数,与本研究结果基本一致。

土壤氮代谢相关酶是驱动土壤氮素转化的生物催化剂,其活性与土壤理化性质、微生物群落和环境因子等息息相关,可作为反映土壤养分状况的重要

指标。土壤脲酶抑制剂可直接作用于尿素水解过程,有研究^[24]表明,脲酶抑制剂 HQ 部分包膜与尿素掺混施用,能够使土壤酶活性在小麦生长过程中维持在较低水平;胡丹等^[25]研究表明,硝化抑制剂包膜尿素的施用抑制石灰性土壤的硝化作用,在一定程度上降低土壤蛋白酶和脲酶活性,从而间接抑制有机氮矿化和尿素水解,提高土壤亚硝酸还原酶和硝酸还原酶活性,从而减少氮淋失。本研究表明,尿素配施脲酶/硝化抑制剂能够有效抑制土壤脲酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶和羟胺还原酶活性,尿素配施 NBPT+DMPP 对土壤氮转化酶活性的抑制效果最好,可能是由于在施肥初期,NBPT 抑制土壤脲酶的活性,降低土壤中铵态氮质量分数,同时,DMPP 通过竞争性结合氨单加氧酶(AMO)的活性位点,阻断 AOB 将铵态氮(NH_4^+)氧化为亚硝酸盐(NO_2^-)的过程,从而抑制土壤中的硝化作用,导致土壤中硝态氮质量分数降低,造成反应原料减少,抑制土壤中硝酸还原酶、亚硝酸还原酶和羟胺还原酶的活性,与 LI 等^[26]研究结果相似。尿素配施双抑制剂能够延缓尿素水解,减少氨挥发和硝态氮淋溶损失,抑制土壤中氮转化相关酶活性,延长土壤供氮时间和增加土壤供氮量,促进作物生长。

3.3 水肥一体化配施氮肥增效剂对小麦叶绿素质量分数和生理特性的影响

植物叶片是对氮素供应最敏感的器官之一,氮在小麦叶片叶绿素合成中发挥着重要作用。有研究^[27]表明,添加硝化抑制剂 DMPP 在一定程度上可提高叶片 SPAD 值。本研究表明,脲酶抑制剂 NBPT、硝化抑制剂 DMPP 及 NBPT 和 DMPP 复合处理都能够提高叶片 SPAD 值,可能是由于不同种类抑制剂的施用都能提高土壤氮质量分数,促进小麦生育后期对土壤氮素的吸收。植物体内活性氧积累导致细胞膜脂过氧化程度提高,进而影响植物的生长发育,而植物可通过酶促系统来清除活性氧^[28]。李澳旗^[29]研究表明,施用氮肥增效剂能够明显提升细胞抗氧化酶活性,推迟衰老启动时间。本研究表明,尿素配施抑制剂可提高小麦叶片 SOD、POD 和 CAT 活性,降低 MDA 和 $\text{O}_2\cdot$ 产生速率,且 NBPT 和 DMPP 复合处理效果更好。可能是由于 NBPT 可通过抑制脲酶活性,延缓尿素分解,避免膜损伤,DMPP 则可通过抑制土壤硝化作用,减少硝态氮质量分数,从而降低小麦因硝态氮积累引发的氧化应激。尿素配施 NBPT 和 DMPP 双抑制剂通过差异化的氮素调控路径提高小麦叶绿素质量分数和抗氧化酶活性,清除氧自由基,延缓叶片衰老。氮素供应匹配度高可提高光

合性能,增加干物质积累量;后期氮素供应能力强可引起抗氧化酶类活性的提高,延缓小麦的衰老进程,提高干物质转运和积累能力从而提高产量。

4 结论

1)水肥一体化追施氮肥添加追施氮肥纯氮质量0.4%的脲酶抑制剂NBPT和0.8%的硝化抑制剂DMPP能显著促进小麦生长、提高产量和氮素利用率,其中以添加双抑制剂处理效果最优。

2)水肥一体化添加氮肥增效剂主要是通过提高不同生育期土壤氮供应能力,特别是显著增加生育后期土壤有效氮供应强度,显著延缓小麦的衰老进程,提高叶绿素值,延缓衰老进程,促进干物质积累。

参考文献:

- [1] 陈亮之,孙建好,赵建华,等.氮肥增效剂对春小麦产量和效益的影响[J].寒旱农业科学,2023,2(6):564-566.
CHEN L Z, SUN J H, ZHAO J H, et al. Effects of nitrogen fertilizer synergists on the yield and economic benefit of spring wheat[J].Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences,2023,2(6):564-566.
- [2] 张永强,陈传信,徐其江,等.氮肥增效剂与氮肥减量配施对冬小麦叶片生理及产量的影响[J].新疆农业科学,2023,60(6):1319-1325.
ZHANG Y Q, CHEN C X, XU Q J, et al. Effects of combined application of nitrogen enhancer and nitrogen reduction on leaf physiology and yield of winter wheat[J].Xinjiang Agricultural Sciences,2023,60(6):1319-1325.
- [3] LEGESSE N, WU S, WANG Y, et al. Optimal fertilizer rates towards the improvement of nitrogen use efficiency and reduction of nitrogen export in paddy rice-wheat intensive farming [J].Frontiers in Environmental Science,2023,11(10):e1239785.
- [4] 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[J].应用生态学报,2023,34(9):2391-2397.
LI C Q, JI M, MA M M, et al. Effects of combined natural synergists and chemical inhibitors on yield, nitrogen utilization and balance in wheat/maize rotation system [J].Chinese Journal of Applied Ecology,2023,34(9):2391-2397.
- [5] 文廷刚,贾艳艳,顾大路,等.氮水运筹对苏北平原稻茬麦干物质积累、产量和氮肥利用的影响[J].麦类作物学报,2023,43(3):321-331.
WEN T G, JIA Y Y, GU D L, et al. Effect of nitrogen and water management on dry matter accumulation, yield and nitrogen utilization of wheat following rice in northern Jiangsu Plain[J].Journal of Triticeae Crops,2023,43(3):321-331.
- [6] FANG P P, ABLER D, LIN G H, et al. Substituting organic fertilizer for chemical fertilizer: Evidence from apple growers in China[J].Land,2021,10(8):e858.
- [7] 于淑慧,朱国梁,董浩,等.微喷灌追肥减量对小麦产量和水分利用率的影响[J].山东农业科学,2020,52(11):46-50.
YU S H, ZHU G L, DONG H, et al. Effects of micro-sprinkling irrigation integrated with topdressing reduction on wheat yield and water use efficiency [J].Shandong Agricultural Sciences,2020,52(11):46-50.
- [8] 李海翠.水肥一体化技术在小麦种植过程中应用效果的分析研究[J].种子世界,2025(2):114-116.
LI H C. Analysis and study on the application effect of water and fertilizer integration technology in wheat planting process[J].Seed World,2025(2):114-116.
- [9] 崔振坤,于振文,石玉,等.水氮运筹对土壤氮代谢酶活性和小麦氮素利用的影响[J].水土保持学报,2025,39(1):160-169.
CUI Z K, YU Z W, SHI Y, et al. Effects of water and nitrogen management on soil nitrogen metabolism enzyme activity and wheat nitrogen utilization[J].Journal of Soil and Water Conservation,2025,39(1):160-169.
- [10] PETERS N, THIELE-BRUHN S. Major metabolites of NBPT degradation pathways contribute to urease inhibition in soil[J].Chemosphere,2022,303(2):e135163.
- [11] 黄铂轩,李鹏程,郑苍松,等.不同氮素抑制剂对棉花生长发育、氮素利用与产量的影响[J].新疆农业科学,2024,61(9):2122-2131.
HUANG B X, LI P C, ZHENG C S, et al. Effects of different nitrogen inhibitors on growth, nitrogen utilization and yield of cotton [J].Xinjiang Agricultural Sciences,2024,61(9):2122-2131.
- [12] 马丽,梁雄英,李冬佳,等.硝化抑制剂与不同氮肥配施对土壤硝化过程的抑制效果[J].土壤,2024,56(4):726-734.
MA L, LIANG X Y, LI D J, et al. Inhibitory effects of nitrification inhibitors combined with different nitrogen fertilizers on soil nitrification process [J].Soils,2024,56(4):726-734.
- [13] MICELI A, MONCADA A, VETRANO F, et al. Response of *Tagetes patula* L. and *Ageratum houstonianum* Mill. to microbial biostimulant inoculation and organic fertilization[J].Agronomy,2023,13(10):e2522.
- [14] 张青,孔庆波,栗方亮,等.水肥一体化模式下不同水肥套餐对蜜柚产量、品质及经济效益的影响[J].热带作物学报,2025,46(1):123-134.
ZHANG Q, KONG Q B, LI F L, et al. Effects of different water and fertilizer packages on yield, quality and economic benefit of honey pomelo under water and fertilizer integration mode [J].Chinese Journal of Tropical Crops,2025,46(1):123-134.
- [15] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
GUAN S Y. Soil enzyme and its research method [M].

- Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [16] 李小方, 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- LI X F, ZHANG Z L. Experimental instruction of plant physiology [M]. 5th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2016.
- [17] 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[J]. 中国农学通报, 2023, 39(5): 69-74.
- KAN J L, WANG X Y, SU J P, et al. Effects of different nitrogen fertilizer inhibitors on wheat yield, soil fertility and nitrogen use efficiency [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(5): 69-74.
- [18] 漆增连, 贺明荣, 代兴龙, 等. 天然橡胶与生化抑制剂联合包膜控释尿素对土壤供氮及冬小麦生长的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(5): 1408-1419.
- QI Z L, HE M R, DAI X L, et al. The effect of controlled release of urea coated with natural rubber and biochemical inhibitor on soil nitrogen supply and winter wheat growth [J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(5): 1408-1419.
- [19] 张俊, 王小昌, 崔晓路, 等. 灌溉量和氮肥增效剂对夏玉米产量及水肥利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(1): 123-132.
- ZHANG J, WANG X C, CUI X L, et al. Effects of irrigation amount and nitrogen synergists on yield and utilization of water and fertilizer of summer maize [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(1): 123-132.
- [20] 王静, 万水霞, 李帆, 等. 抑制剂对稻茬小麦产量及氮素利用效率的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(9): 1165-1173.
- WANG J, WAN S X, LI F, et al. Effect of biochemical inhibitors on yield and nitrogen efficiency of wheat following rice stubble [J]. Journal of Triticeae Crops, 2023, 43(9): 1165-1173.
- [21] XIAO F R, LI D P, ZHANG L L, et al. Effect of urease inhibitors and nitrification inhibitors combined with seaweed extracts on urea nitrogen regulation and application [J]. Agronomy, 2022, 12(10): e2504.
- [22] 张如梦, 李冬佳, 梁雄英, 等. 多形态氮和硝化抑制剂协同供应对土壤氮素转化的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(7): 69-78.
- ZHANG R M, LI D J, LIANG X Y, et al. Effects of combined application of polymorphic nitrogen and nitrification inhibitors on soil nitrogen transformation [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(7): 69-78.
- [23] 贺云霞, 马建辉, 张黛静, 等. 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[J]. 作物杂志, 2025, 41(3): 108-115.
- HE Y X, MA J H, ZHANG D J, et al. Effects of different nitrogen fertilizer synergists on reducing gaseous nitrogen loss and increasing yield in wheat fields in northern Henan Province [J]. Crops, 2025, 41(3): 108-115.
- [24] 李玉, 王茂莹, 张倩, 等. 包膜脲酶抑制剂增效尿素对小麦生长的影响及其机理研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 283-289.
- LI Y, WANG M Y, ZHANG Q, et al. Effects of coated urease inhibitor synergic urea on wheat growth and its mechanism [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2): 283-289.
- [25] 胡丹, 李培楚, 康丽霞, 等. 抑制剂包膜尿素对石灰性土壤硝化及相关酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(15): 231-238.
- HU D, LI P C, KANG L X, et al. Effects of inhibitor coated urea on nitrification and related enzyme activities in calcareous soils [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(15): 231-238.
- [26] LI H, LIANG X Q, CHEN Y X, et al. Effect of nitrification inhibitor DMPP on nitrogen leaching, nitrifying organisms, and enzyme activities in a rice-oilseed rape cropping system [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(2): 149-155.
- [27] 刘刚, 窦飞飞, 朱敬敬, 等. DMPP与尿素配施对新疆沙砾土壤氮素转化和葡萄叶片光合的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(11): 84-91.
- LIU G, DOU F F, ZHU J J, et al. Effects of DMPP applied with urea on nitrogen transformation in gravel soil and photosynthesis of grape leaves in Xinjiang [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(11): 84-91.
- [28] 李培华, 李杰, 孟祥宇, 等. 高温胁迫下冷型小麦的抗逆性评估及其生理响应研究[J]. 作物学报, 2025, 51(4): 1118-1130.
- LI P H, LI J, MENG X Y, et al. Evaluation of stress tolerance and physiological response of cold-type wheat under heat stress [J]. Acta Agronomica Sinica, 2025, 51(4): 1118-1130.
- [29] 李澳旗. 灌水量和氮肥增效剂对夏玉米叶片衰老进程及产量形成的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- LI A Q. Effects of irrigation amount and nitrogen fertilizer synergist on leaf senescence and yield formation of summer maize [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2024.