

网络出版时间: 2025-12-22

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20251219.1332.002>

天然/化学抑制剂对小麦生长、养分吸收及产量的影响

康丽霞, 胡丹, 罗维贵, 唐嘉俊, 李彬立, 易姚文, 刘涛

(石河子大学农学院, 新疆石河子 832003)

摘要:为探明天然/化学抑制剂对滴灌麦田的增效作用, 设置不施氮(CK)、单施氮肥(U)、氮肥配施化学硝化抑制剂(U+CP)、氮肥配施天然硝化抑制剂(U+MHPP)、氮肥配施化学硝化抑制剂与脲酶抑制剂(U+CP+NBPT)、氮肥配施天然硝化抑制剂与脲酶抑制剂(U+MHPP+DATS) 6 个处理, 分析其对小麦光合性能、生物量积累、养分吸收及产量的影响。结果表明, 与 U 处理相比, 各抑制剂处理均提高了小麦叶片 SPAD 值、各器官生物量以及氮、磷和钾的吸收量, 尤其是穗轴+颖壳+籽粒的养分积累更为显著。2022 年和 2023 年, 各抑制剂处理下小麦成熟期穗轴+颖壳+籽粒氮素吸收量较 U 处理分别提高 13.17%~19.38% 和 11.59%~15.68%, 磷素吸收量分别提高 14.26%~21.95% 和 9.84%~18.74%, 钾素吸收量分别提高 12.92%~24.61% 和 9.91%~22.41%。各抑制剂处理的小麦产量较 U 处理虽有提高但变化不显著, 氮肥利用效率提高 20.10%~36.14%。天然抑制剂处理(U+MHPP 和 U+MHPP+DATS) 的光合能力、生物量、养分吸收及产量略低于化学抑制剂处理(U+CP 和 U+CP+NBPT), 但差异不显著。综合来看, 氮肥配施天然/化学抑制剂均可促进小麦光合产物的积累和养分吸收, 显著提高麦田氮肥利用效率, 天然抑制剂的应用效果弱于化学抑制剂但差异不显著, 且抑制剂的联合施用效果优于单一施用。

关键词: 硝化抑制剂; 脲酶抑制剂; 养分吸收; 产量; 氮肥利用效率

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)02-0254-10

Effect of Natural/Chemical Inhibitors on the Growth, Nutrient Uptake and Yield of Wheat

KANG Lixia, HU Dan, LUO Weigui, TANG Jiajun, LI Binli, YI Yaowen, LIU Tao

(Agricultural College, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: To investigate the effectiveness of natural/chemical inhibitors in the drip-irrigated wheat field, six treatments were set up to study the effects of nitrogen(N) fertilizer applied with natural or chemical inhibitors on photosynthetic performance, biomass, nutrient uptake and yield of wheat. It were no N application(CK), N fertilizer applied alone(U), N fertilizer applied with chemical nitrification inhibitor(U+CP), N fertilizer applied with natural nitrification inhibitor(U+MHPP), N fertilizer applied with chemical nitrification and urease inhibitors(U+CP+NBPT), and N fertilizer applied with natural nitrification and urease inhibitors(U+MHPP+DATS). The results showed that SPAD value of wheat leaves, biomass of various organs, and uptake of N, phosphorus(P), and potassium(K) of wheat plants were increased under the inhibitor treatments compared with the U treatment, and especially in nutrient accumulation of the cob+glumes+grains. Nutrients uptake rate by cob+glumes+grains at maturity of wheat plants were significantly increased 13.17%–19.38% and 11.59%–15.68% for N uptake, 14.26%–21.95% and 9.84%–18.74% for P uptake, and 12.92%–24.61%

收稿日期: 2025-03-14

修回日期: 2025-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(42067021); 石河子大学科技计划体系-自主资助支持专项(ZZZC2023012); 石河子大学创新训练项目(SRP2024211)

第一作者 E-mail: 1735963902@qq.com(康丽霞)

通讯作者 E-mail: liutao20029@163.com(刘涛)

and 9.91%–22.41% for K uptake in 2022 and 2023 years respectively. Wheat yield was increased but not significant and nitrogen use efficiency(NUE) was significantly increased by 20.10%–36.14% under all inhibitor treatments as compared to the U treatment. Photosynthetic capacity, biomass, nutrient uptake, and yield under the natural inhibitor treatments(U + MHPP and U + MHPP + DATS) were slightly lower than that under the chemical inhibitor treatments(U + CP and U + CP + NBPT) with no significance. In conclusion, the addition of natural or chemical inhibitors to N fertilizer can promote the accumulation of photosynthetic products and nutrient uptake in wheat plants, and significantly improve NUE in wheat fields; the application effect natural of inhibitors was weaker than that of chemical inhibitors but the difference was not significant, and the effect of combined application of either chemical or natural inhibitors was better than that of applying an individual inhibitor.

Keywords: Nitrification inhibitors; Urease inhibitors; Nutrient uptake; Yield; Nitrogen use efficiency

小麦(*Triticum aestivum* L.)是全球种植最广的作物之一,在农业和经济发展中占据重要地位,在保障国家粮食安全方面也发挥着举足轻重的作用。中国小麦的氮肥利用效率约28%,显著低于世界平均水平(57%)^[1]。大量未被作物吸收的氮素通过氨挥发、硝化-反硝化、径流、淋溶等途径损失^[2],造成资源浪费和生态环境污染^[3]。如何有效提高氮肥利用效率并保证作物产量是现代农业发展亟需解决的实际问题。

硝化抑制剂(NIs)可通过抑制土壤中氨氧化细菌的活性来延缓硝化,从而减少氮氧化物排放、硝酸盐淋洗等损失^[4-5]。脲酶抑制剂(UIs)可通过抑制土壤中脲酶的活性延缓尿素水解,降低氨挥发损失^[6]。施用NIs和UIs是农业上常用的减少土壤氮损失和提高氮素利用效率的氮素管理策略^[7]。研究表明,尿素添加双氰胺(DCD)、3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)、2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP)等NIs,或N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)等UIs,均能在不同程度上促进玉米、小麦和水稻的氮素吸收,提高氮肥利用效率^[8-9]。已有研究指出,在不同施氮水平下添加抑制剂可使小麦氮肥利用效率增加8.3%~41.3%^[10-11]。抑制剂的添加也可影响作物的生长发育,促进产量的积累^[9,12]。此外,NIs与UIs联合施用可协同减少氨挥发和硝化损失,进一步提高氮肥利用效率。例如,DCD和NBPT混合添加能使大麦氮肥表观利用效率较单施尿素提高4.92%^[13],DCD和氢醌(HQ)混合添加可使油菜氮肥利用效率提高85.2%^[14]。

天然抑制剂多来源于植物提取物和微生物代谢产物,在减少环境污染、促进作物生长、改善土壤健康等方面具有潜在优势。例如,从高粱根系分泌物中提取出来的生物硝化抑制剂(BNI)对羟

基苯丙酸甲酯(MHPP)能抑制土壤硝化^[15-16],可有效提高作物产量(4.9%~12.6%)和氮肥利用效率(15.7%~23.9%)^[7,12],大蒜提取物大蒜素(DATS)来源安全、副作用小,是天然生物杀菌剂,对土壤脲酶活性和尿素水解具有一定的抑制和延缓作用^[17-18],可作为天然的脲酶抑制剂(NUI)使用^[19]。

目前,国内外学者就氮肥添加化学抑制剂对作物生长发育和氮素吸收利用的研究较多,但关于天然抑制剂对作物影响的相关研究仍较为有限。本研究通过两年田间试验,探明尿素添加植物提取的硝化抑制剂和脲酶抑制剂随水滴施对小麦光合特性、干物质积累、养分吸收及产量的影响,为天然抑制剂在农业中的应用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验分别于2022年和2023年在新疆石河子北泉镇滴灌农田(86°4'11"E, 44°21'14"N)进行。试验地土壤类型为灌耕灰漠土,质地为砂壤土,该地属于大陆性干旱气候区,年均气温8.1℃,冬季长而严寒,夏季短而炎热,年日照时数2 300~27 00h,年降水量180~270 mm,年蒸发量1 000~1 500 mm。7月份为全年最高气温月,平均气温25~26℃;1月份为全年最低气温月,平均气温约-15℃。播前0~20 cm耕层土壤有机碳含量18.19 g·kg⁻¹,铵态氮含量4.54 mg·kg⁻¹,硝态氮含量11.91 mg·kg⁻¹,碱解氮含量157.10 mg·kg⁻¹,速效磷含量71.2 mg·kg⁻¹,速效钾含量203 mg·kg⁻¹,pH值7.61,电导率201.4 μs·cm⁻¹。

1.2 试验设计

采用田间小区试验,单因素随机区组设计,设

置不施氮肥(CK)、单施氮肥(U)、氮肥配施化学硝化抑制剂(U+CP)、氮肥配施天然硝化抑制剂(U+MHPP)、氮肥配施化学硝化抑制剂与脲酶抑制剂(U+CP+NBPT)、氮肥配施天然硝化抑制剂与脲酶抑制剂(U+MHPP+DATS)共 6 个处理,每处理重复 3 次。供试品种为宁春 16 号。小区面积 15 m² (5 m×3 m),小区间设置 1 m 宽保护行。

供试氮肥为尿素(N 46.6%),磷钾肥选用磷酸二氢钾(P₂O₅ 51.5%,K₂O 34.0%)。化学硝化抑制剂选用 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶水溶性乳油(CP,纯度 24%),化学脲酶抑制剂为正丁基硫代磷酰三胺水溶性粉末(NBPT,纯度 98%);供试生物硝化抑制剂为对羟基苯丙酸甲酯(MHPP,纯度 98%)、天然脲酶抑制剂为大蒜素(DATS,纯度 98%)。其中,CP 为浙江奥复托化工有限公司提供,其余抑制剂均购自麦克林生化科技股份有限公司。施氮量为 225 kg·hm⁻²,磷酸二氢钾施用量为 180 kg·hm⁻²。化学抑制剂 CP 和 NBPT 施用量为纯氮施用量的 1%,生物抑制剂 MHPP 和 DATS 施用量为纯氮施用量的 20%,其施用量参考相关文献并适当调整^[20-22]。氮、磷、钾肥和抑制剂均作为追肥随水滴施 6 次,比例为分蘖期 15%、拔节期 35%、孕穗期 25%、抽穗期 10%、扬花期 5%、灌浆期 10%。

小麦分别于 2022 年 4 月 3 日和 2023 年 4 月 2 日播种,2022 年 7 月 9 日和 2023 年 7 月 11 日收获,播种量为 375 kg·hm⁻²。采用 1 管 4 行等行距田间配置,行距 15 cm,滴灌带间距 60 cm,滴管带铺设在第 2 行和第 3 行中间,滴头间距 25 cm。全生育期灌溉定额为 4 500 m³·hm⁻²,分别在两叶一心期、分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期、扬花期、灌浆期灌水,灌水量比例为 2:2:3:4:4:3:2。其他田间管理措施与大田相同。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质及养分含量测定

分别在分蘖期、拔节期、抽穗期、扬花期、灌浆期、成熟期,每小区取长势均匀的 10 株小麦,将植株按茎、叶、籽粒、穗轴和颖壳分离,分装于牛皮纸袋在 105 ℃下杀青 30 min,再于 75 ℃烘干至恒重并称重。将烘干样品粉碎过 0.25 mm 筛,分别采用奈氏比色法测定氮含量,钒钼黄比色法测定磷含量,醋酸铵浸提火焰光度法测定钾含量^[23]。

$$\text{氮/磷/钾吸收量} = \frac{\text{氮/磷/钾含量} \times \text{单位面积生物量}}{100}$$

$$\text{氮肥利用率} = \frac{\text{施氮处理小麦氮吸收量} - \text{不施氮处理小麦氮吸收量}}{\text{氮肥施用量}} \times 100\%$$

1.3.2 叶绿素含量(SPAD 值)测定

在分蘖期、拔节期、抽穗期、扬花期和灌浆期,每小区随机选取长势均匀的 10 株小麦,使用 SPAD-502 叶绿素仪测定小麦旗叶的上中下 3 个叶位点的 SPAD 值,并取平均值作为各小区小麦叶片 SPAD 值。

1.3.3 产量及其构成的测定

采用测产与实收相结合的方式产量测定,在小麦成熟期每小区划分测产区和实收区,在测产区测定每平方米穗数,每小区选取 10 株小麦调查穗粒数,实收区收获后取样测定千粒重,计算产量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 整理数据,用 R4.2.3 和 RStudio 进行绘图,用 SPSS 26.0 软件进行相关性分析、方差分析及差异显著性检验。使用 Duncan 法进行多重比较($P=0.05$)。

2 结果与分析

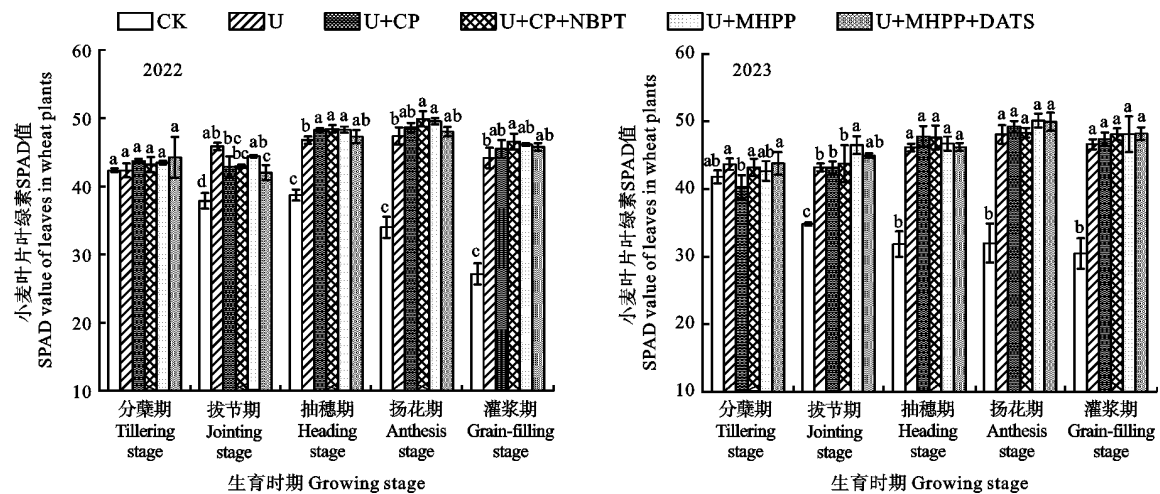
2.1 天然/化学抑制剂对小麦生长的影响

2.1.1 天然/化学抑制剂对小麦 SPAD 值的影响

2022 年和 2023 年 CK 条件下(对照)小麦叶片 SPAD 值随小麦生育进程的推进逐渐降低,而施氮及各抑制剂处理 SPAD 值随小麦生育进程呈先升后降趋势(图 1)。从拔节期起,施氮及所有抑制剂处理小麦叶片 SPAD 值均显著高于 CK,且差异随生育进程逐渐增大。与化学抑制剂处理(U+CP 和 U+CP+NBPT)相比,天然抑制剂处理(U+MHPP 和 U+MHPP+DATS)小麦叶片 SPAD 值无显著差异。

2.1.2 天然/化学抑制剂对小麦生物量的影响

各处理小麦茎和叶鞘、叶片以及穗轴+颖壳+籽粒的生物量分别为 73.24~5 826.45 kg·hm⁻²、165.08~2 228.90 kg·hm⁻² 和 1 008.85~10 411.35 kg·hm⁻²(图 2)。成熟期,与 U 处理相比,各抑制剂处理(U+CP、U+CP+NBPT、U+MHPP 和 U+MHPP+DATS)小麦茎和叶鞘、叶片以及穗轴+颖壳+籽粒的生物量分别提高 5.20%~34.99%、



图柱上字母不同表示同一时期不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下图同。
Different letters on the bars indicate significant differences between different treatments in the same period($P < 0.05$). The same in below.

图 1 不同处理下小麦各生育时期叶片 SPAD 值的变化

Fig. 1 Changes in SPAD values of wheat leaf at different growth stages under different treatments

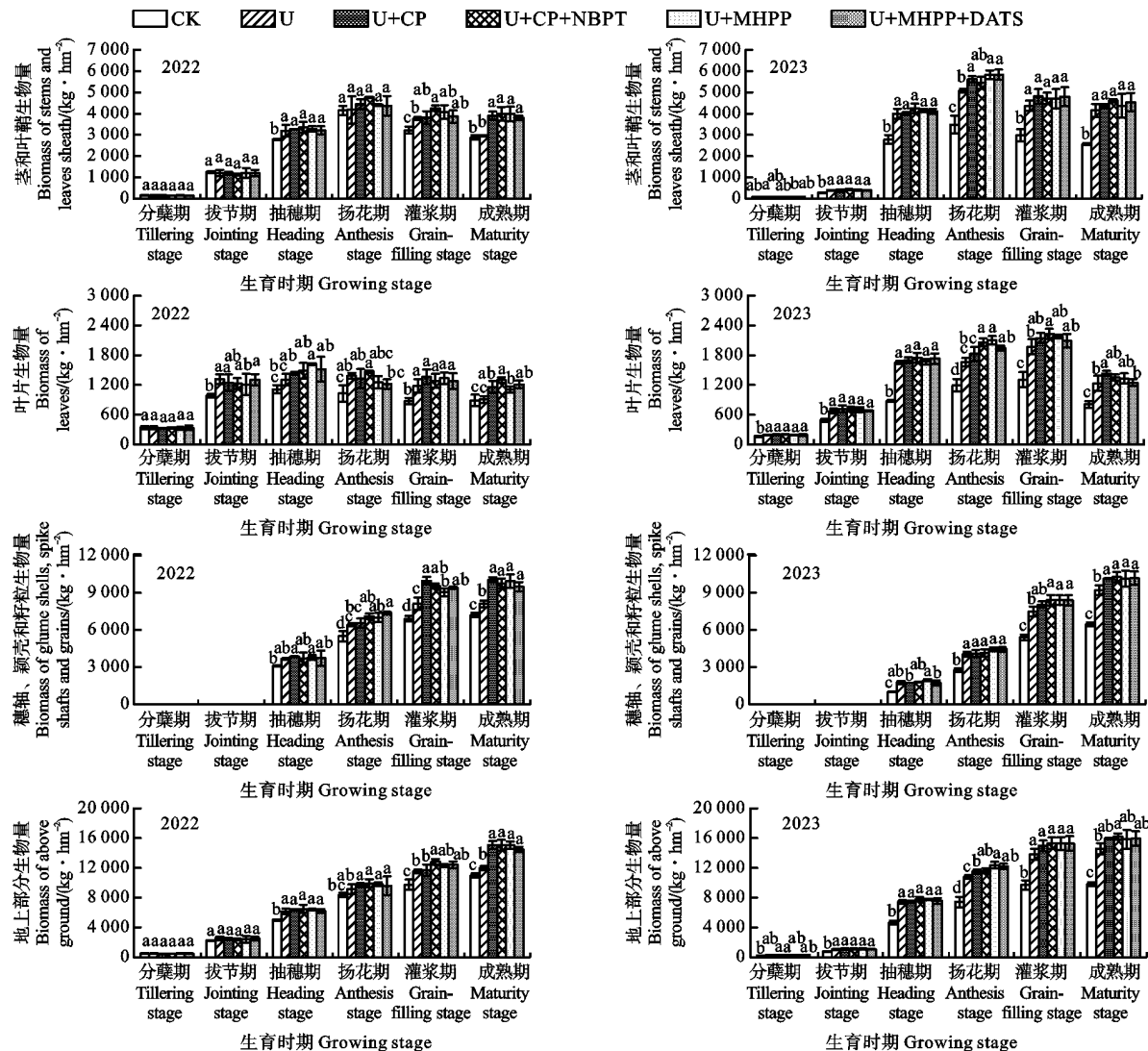


图 2 不同处理下小麦各生育时期植株生物量变化

Fig. 2 Changes in biomass of wheat plants at different growth stages under different treatments

1.26%~43.19%和12.48%~23.76%，地上部分总生物量提高了10.68%~26.10%，其中穗轴+颖壳+籽粒生物量增幅最为显著，表明抑制剂能促进小麦各器官的干物质积累，且对生殖器官的促进作用尤为突出。U+MHPP和U+MHPP+DATS处理的各器官生物量低于U+CP和U+CP+NBPT处理，表明天然抑制剂的添加对小麦生物量的促进作用小于化学抑制剂，但差异不显著。

2.2 天然/化学抑制剂对小麦养分吸收的影响

2.2.1 天然/化学抑制剂对小麦氮素吸收的影响

两年试验结果均表明，U处理和抑制剂处理(U+CP、U+CP+NBPT、U+MHPP和U+MHPP+DATS)的各器官吸氮量自拔节期起均显著高于CK处理；各抑制剂处理的茎秆和叶鞘、

叶片吸氮量较U处理有所增加但不显著，穗轴+颖壳+籽粒氮吸收量在进入灌浆期后开始显著高于U处理(图3)。成熟期，与U处理相比，U+CP和U+CP+NBPT处理的茎+叶鞘氮吸收量在2022年分别增加了20.37%和14.63%，2023年分别增加了13.44%和10.07%；U+CP、U+CP+NBPT、U+MHPP和U+MHPP+DATS处理的叶片氮吸收量2022年分别提高了19.10%、36.37%、16.61%和28.10%，2023年分别提高26.00%、37.85%、12.07%和15.52%；穗轴+颖壳+籽粒氮吸收量在2022年分别显著提高13.17%、19.38%、14.63%和16.72%，2023年分别显著提高11.59%、14.10%、15.68%和12.62%；地上部分总氮吸收量则在2022年分别显著提高14.29%、19.94%、13.29%和14.46%，2023年分别显著提

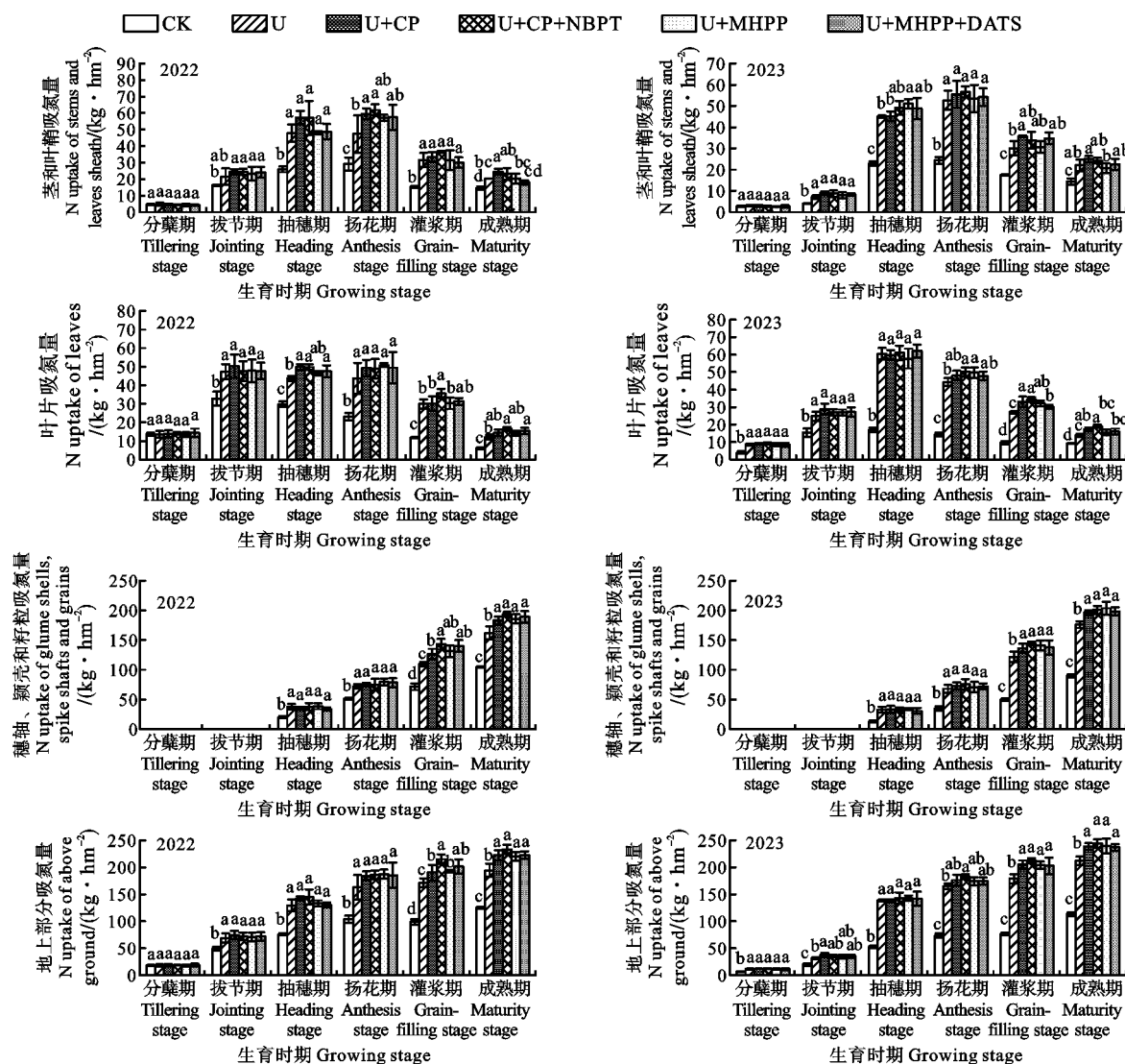


图3 不同生育时期小麦植株氮吸收量的变化

Fig. 3 Changes in N uptake amounts of wheat plants at different growth stages

高 12.72%、15.22%、13.15% 和 11.71%。U+MHPP 和 U+MHPP+DATS 处理的氮吸收量均低于 U+CP 和 U+CP+NBPT 处理但差异不显著,U+CP+NBPT 处理整体上效果最佳,说明抑制剂的联合添加在一定程度上促进了小麦对氮素的吸收。

2.2.2 天然/化学抑制剂对小麦磷素吸收的影响

两年试验结果均表明,U 处理和各抑制剂处理(U+CP、U+CP+NBPT、U+MHPP 和 U+MHPP+DATS)的小麦各器官磷吸收量自拔节期后显著高于 CK(图 4)。与 U 处理相比,成熟期各抑制剂处理的茎+叶鞘磷吸收量在 2022 年显著增加了 37.92%、45.37%、59.22%和 48.41%,2023 年增加了 7.62%、12.50%、7.39%和 8.24%;叶片磷吸收量在 2022 年分别显著提高 62.39%、69.79%、

30.38%、和 45.14%,在 2023 年分别提高 16.04%、19.25%、12.98%和 12.75%;穗轴+颖壳+籽粒磷吸收量在 2022 年分别显著提高 19.05%、21.95%、20.36%和 14.26%,在 2023 年分别提高 18.01%($P<0.05$)、18.74%($P<0.05$)、9.84%($P>0.05$)和 11.85%($P>0.05$);地上部分总磷吸收量在 2022 年分别显著提高 24.33%、28.16%、26.76%和 21.13%,在 2023 年分别提高 15.36%($P<0.05$)、17.26%($P<0.05$)、9.46%($P>0.05$)和 11.04%($P<0.05$)。U+MHPP 和 U+MHPP+DATS 处理的小麦磷吸收量均低于 U+CP 和 U+CP+NBPT 处理但差异不显著,整体上以 U+CP+NBPT 处理效果最优。相较于抑制剂的单一施用,抑制剂的联合添加进一步促进了小麦植株对磷的吸收。

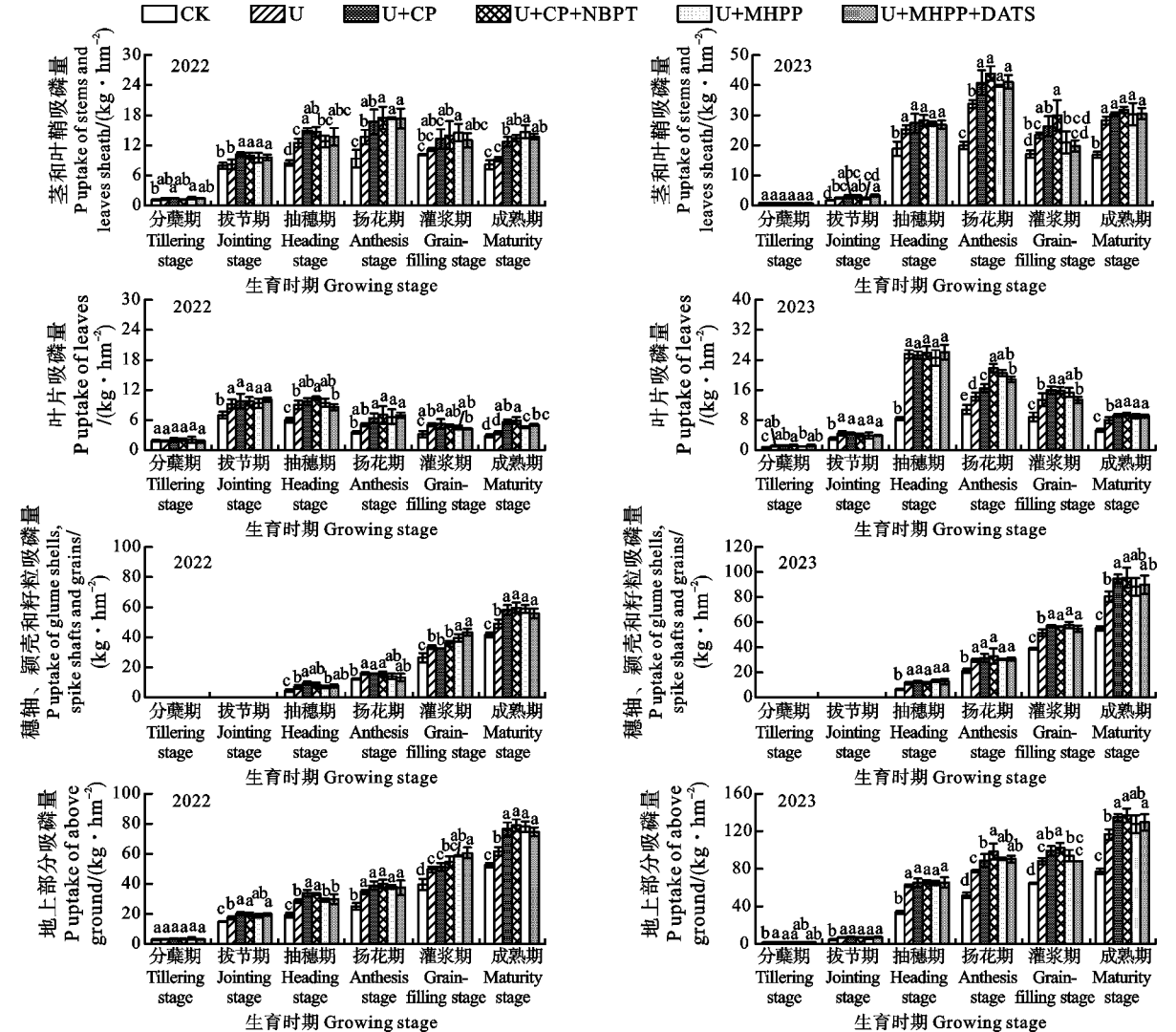


图 4 不同生育时期小麦植株磷吸收量的变化

Fig. 4 Changes in P uptake amounts of wheat plants at different growth stages

2.2.3 天然/化学抑制剂对小麦钾素吸收的影响

U 处理和各抑制剂(U+CP、U+CP+NBPT、U+MHPP 和 U+MHPP+DATS)处理的小麦各器官钾吸收量在进入拔节期后显著高于 CK(图 5)。成熟期,与 U 处理相比,各抑制剂处理茎和叶鞘钾吸收量在 2022 年增加了 31.37%、33.69%、34.24%和 27.21%($P<0.05$),2023 年增加了 10.70%、13.00%、4.46%和 7.62%($P>0.05$);叶片钾吸收量 2022 年增加了 29.78%、26.47%、22.87%、和 17.06%($P>0.05$),2023 年增加了 13.19%、23.61%、12.45%和 7.24%($P>0.05$);穗轴、颖壳、籽粒钾吸收量 2022 年提高了 24.61%、16.92%、24.07%和 12.92%($P<0.05$),2023 年提高了 19.68%($P<0.05$)、22.41%($P<0.05$)、11.81%($P>0.05$)和 9.91%($P>0.05$);地上部分总钾吸收量 2022 年提高了 29.91%、29.57%、30.69%和 23.10%($P<0.05$),2023 年提高了 14.10%($P<0.05$)、17.35%

($P<0.05$)、7.83%($P>0.05$)和 8.39%($P>0.05$)。U+MHPP 和 U+MHPP+DATS 处理的小麦钾吸收量均低于 U+CP、U+CP+NBPT 处理但差异不显著,且抑制剂的联合添加较单独添加在一定程度上提高了小麦的钾吸收量。

2.3 天然/化学抑制剂对小麦产量及氮肥利用效率的影响

两年里 U 处理和各抑制剂处理的小麦产量均显著高于 CK(表 1)。与 U 处理相比,各抑制剂处理(U+CP、U+CP+NBPT、U+MHPP 和 U+MHPP+DATS)主要通过提高小麦穗数,进而实现小麦增产,其中小麦产量在 2022 年分别显著增加了 12.42%、15.59%、16.55%和 19.50%,2023 年分别增加了 11.07%、9.90%、8.87%和 8.51%。各抑制剂处理的氮肥利用效率均显著高于 U 处理,但抑制剂处理间差异不显著,其中,U+CP+NBPT 处理的氮肥利用效率最高。

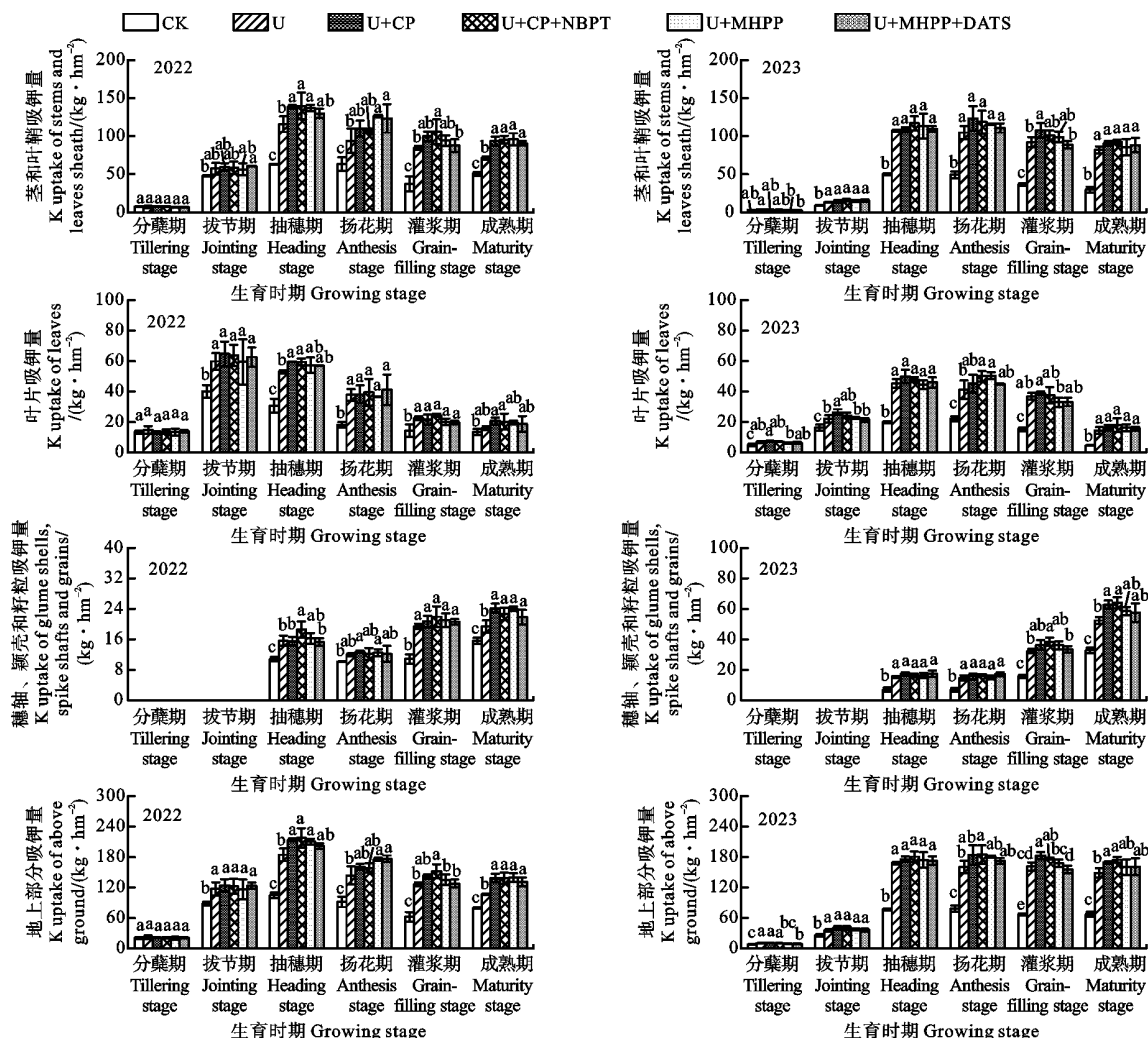


图 5 不同生育时期小麦植株钾吸收量的变化

Fig. 5 Changes in K uptake amounts of wheat plants at different growth stages

表 1 不同处理下小麦产量及氮肥利用效率
Table 1 Yield and nitrogen use efficiency under the different treatments

年份 Year	处理 Treatment	穗数 Spike number/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 Thousand- grain weight/g	产量 Yield/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	氮肥利用效率 Nitrogen use efficiency/%
2022	CK	410±4.24c	26±0.90b	53.40±0.66a	4 878±104.44c	—
	U	517±43.41b	28±1.04a	51.80±2.91a	6 450±51.30b	30.43±5.17b
	U+CP	550±9.81ab	30±1.92a	51.20±2.43a	7 251±203.71a	42.77±4.29a
	U+CP+NBPT	569±24.48a	30±0.46a	51.85±0.35a	7 455±364.64a	47.64±3.75a
	U+MHPP	566±39.91a	30±0.50a	52.15±0.15a	7 517±440.03a	41.90±2.45a
	U+MHPP+DATS	570±3.74a	31±1.62a	52.10±2.40a	7 707±30.00a	42.92±2.73a
2023	CK	534±4.13a	18±0.38b	48.26±1.12a	4 006±39.39b	—
	U	556±60.38a	33±0.57a	46.86±0.59a	7 235±780.40a	43.80±5.06b
	U+CP	603±46.38a	33±1.55a	47.26±2.79a	8 036±414.06a	55.77±4.05a
	U+CP+NBPT	609±51.50a	33±1.66a	46.30±2.56a	7 952±795.81a	58.13±2.26a
	U+MHPP	599±47.75a	33±1.03a	46.72±1.97a	7 877±670.91a	56.18±5.59a
	U+MHPP+DATS	605±102.97a	33±0.95a	46.42±1.34a	7 851±991.18a	54.82±2.48a

表中数据为平均值±标准差($n=3$);同一年同列后不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。
The data in the table is mean ± SD($n=3$); Different letters indicate significant difference in the same column within same year between different treatments($P<0.05$).

3 讨论

3.1 天然/化学抑制剂对小麦生长的影响

本研究发现,与单施尿素相比,化学和天然抑制剂添加均提高了小麦叶片 SPAD 值和各器官生物量,其中地上部总生物量提高了 10.68%~26.10%,这可能与抑制剂能够提高作物叶片中叶绿素水平、促进光合作用有关^[24]。前人研究认为,氮肥添加抑制剂可使玉米叶片光合速率提高 5%~19%^[25],小麦生物量提高 38%^[26],本研究结果略低,这可能与土壤质地、光照条件及降水量有关。本研究中,尿素配施氮肥稳定剂有效促进植株干物质和氮素积累的结果与前人研究^[27]一致,这主要是由于脲酶抑制剂会减缓土壤中尿素向铵态氮的转化速率,从而降低土壤中铵离子浓度^[28],对尿素养分释放速率与小麦养分需求的耦合起到有效调控作用^[29-30],从而促进小麦生长和氮素吸收。硝化抑制剂可延缓尿素水解产物铵的硝化过程,使有效氮缓慢释放,从而提高小麦氮素利用效率和生物量形成^[31-32]。此外,抑制剂的添加不仅会促进氮素吸收,还可增强作物对磷、钾等营养元素的吸收^[27,33-34]。本研究中,添加抑制剂在一定程度上提高了小麦氮素吸收,从而缓解小麦养分损失,促进了氮、磷、钾的高效利用,一方面,这可能是脲酶抑制剂和硝化抑制剂增加了土壤对 NH_4^+ 的吸附,改变了土壤 pH 值,从而提升

磷的有效性并促进其吸收^[33];另一方面,植物对养分的吸收存在协同效应,优化氮素管理可间接促进磷和钾的吸收^[35-36]。本研究中化学抑制剂的添加在两年内均显著提高了植株磷和钾的含量,而天然抑制剂仅在第一年表现出显著促进作用,其原因可能是天然抑制剂主要通过调节土壤 pH 值、有机质含量、微生物群落结构^[37]等途径,间接影响小麦根系生长及养分吸收。此外,光照、温度、水分等环境因素在第一年和第二年的差异也可能是影响植物对磷和钾的吸收的重要原因。目前,天然抑制剂的研究主要集中于短期室内土壤模拟或水培条件下的作用机理探究,其在田间长期应用下的稳定性和效果仍需进一步研究与验证。

3.2 天然/化学抑制剂对小麦产量及氮肥利用效率的影响

尿素配施硝化抑制剂或脲酶抑制剂主要通过调控土壤氮转化过程来提高土壤有效氮的持续供应,从而协同提高作物的氮素吸收与利用效率,促进氮肥的高效利用并提高产量^[10,38-39]。前人研究表明,脲酶抑制剂和硝化抑制剂的添加有利于促进作物生长、增加氮肥利用效率以及提高作物产量^[40];脲酶抑制剂可以减少氨挥发损失,但增产效果却未达显著水平^[41];硝化抑制剂虽提高了作物对氮素的吸收,但对作物产量无显著影响^[42]。本研究发现,与单施尿素相比,无论单独或联合添加抑制剂均可使氮肥利用效率提高 20.10%~

36.14%,增产8.51%~19.50%,与部分文献报道的小麦氮肥利用效率提升幅度相比仍存在差异^[10],可能与试验土壤质地、抑制剂施用量及环境条件有关。总体上,抑制剂的联合添加对小麦产量和氮肥利用效率的贡献更大,天然抑制剂对产量和氮肥利用效率的作用弱于化学抑制剂,这可能是因为化学抑制剂具有明确的作用靶点和高效的抑制能力,能够迅速在植物体内发挥作用,而天然抑制剂可能依赖于微生物的活性或代谢产物,受环境条件影响较大。

4 结论

尿素添加天然/化学抑制剂均能在一定程度上提高小麦叶片的光合能力,促进光合产物的积累与养分的吸收,增加氮肥利用效率及产量。抑制剂的联合添加对小麦生长、养分吸收及产量的促进作用大于单独添加,天然抑制剂对小麦生长、养分吸收及产量的影响略低于化学抑制剂但不显著。因此,本研究条件下氮肥配施化学硝化抑制剂与脲酶抑制剂随水滴施是可作为滴灌农田氮肥增效和环境保护双重目标的有效氮素调控措施。

参考文献:

- [1]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.
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.
- [2]AZEEM B, KUSHAARI K, MAN Z B, *et al.* Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer [J]. *Journal of Controlled Release*, 2014, 181:11.
- [3]LASSALETTA L, BILLEN G, GRIZZETTI B, *et al.* Food and feed trade as a driver in the global nitrogen cycle: 50-year trends [J]. *Biogeochemistry*, 2014, 118(1):225.
- [4]BYRNE M P, TOBIN J T, FORRESTAL P J, *et al.* Urease and nitrification inhibitors: As mitigation tools for greenhouse gas emissions in sustainable dairy systems: A review [J]. *Sustainability*, 2020, 12(15):6018.
- [5]SHA Z P, MA X, LOICK N, *et al.* Nitrogen stabilizers mitigate reactive N and greenhouse gas emissions from an arable soil in North China Plain: Field and laboratory investigation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 258:121025.
- [6]BYRNES B, VILSMEIER K, AUSTIN E, *et al.* Degradation of the urease inhibitor phenyl phosphorodiamidate in solutions and floodwaters [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1989, 37(2):473.
- [7]LAN T, HE X Q, WANG Q, *et al.* Synergistic effects of biological nitrification inhibitor, urease inhibitor, and biochar on NH₃ volatilization, N leaching, and nitrogen use efficiency in a calcareous soil-wheat system [J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 174:104412.
- [8]崔磊,李东坡,武志杰,等.不同硝化抑制剂对红壤氮素硝化作用及玉米产量和氮素利用率的影响[J].应用生态学报,2021,32(11):3953.
CUI L, LI D P, WU Z J, *et al.* Effects of different nitrification inhibitors on nitrification, maize yield, and nitrogen use efficiency in red soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11):3953.
- [9]王甄烨,焉莉,蒋富琛,等.脲酶/硝化抑制剂配施氮肥对春玉米农田氨排放的影响[J].玉米科学,2022,30(1):138.
WANG Z Y, YAN L, JIANG F C, *et al.* Effect of urease/nitrification inhibitor combined application of nitrogen fertilizers on ammonia emission from spring corn farmland [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(1):138.
- [10]刘红江,殷跃军,郭智,等.硝化抑制剂对小麦产量和氮素吸收利用的影响[J].生态学报,2019,38(2):443.
LIU H J, YIN Y J, GUO Z, *et al.* Effects of nitrification inhibitor on yield and nitrogen use efficiency of wheat [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(2):443.
- [11]DAWAR K, SARDAR K, ZAMAN M, *et al.* Effects of the nitrification inhibitor nitrapyrin and the plant growth regulator gibberellic acid on yield-scale nitrous oxide emission in maize fields under hot climatic conditions [J]. *Pedosphere*, 2021, 31(2):323.
- [12]曾科,王书伟,朱文彬,等.不同硝化抑制剂对稻季N₂O排放、NH₃挥发和水稻产量的影响[J].土壤,2023,55(3):503.
ZENG K, WANG S W, ZHU W B, *et al.* Effects of different nitrification inhibitors on N₂O emission, NH₃ volatilization and yield in rice season [J]. *Soils*, 2023, 55(3):503.
- [13]唐冲,杨劲松,姚荣江,等.生物质炭及硝化/脲酶抑制剂对滨海盐渍土壤盐分及作物氮素吸收利用的影响[J].土壤,2021,53(2):291.
TANG C, YANG J S, YAO R J, *et al.* Effects of biochar and nitrification/urease inhibitors on soil salinity and crop nitrogen absorption and utilization in coastal saline soil [J]. *Soils*, 2021, 53(2):291.
- [14]宋燕燕,赵秀娟,张淑香,等.水肥一体化配合硝化/脲酶抑制剂实现油菜减氮增效研究[J].植物营养与肥料学报,2017,23(3):632.
SONG Y Y, ZHAO X J, ZHANG S X, *et al.* Reducing nitrogen input and improving yield and quality of rape through combination of fertigation and nitrification/urease inhibitor addition [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(3):632.
- [15]LU Y F, ZHANG X N, JIANG J F, *et al.* Effects of the biological nitrification inhibitor 1,9-decanediol on nitrification and ammonia oxidizers in three agricultural soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 129:48.
- [16]SUBBARAO V, NAKAHARA K, ISHIKAWA T, *et al.* Biological nitrification inhibition (BNI) activity in sorghum and its characterization [J]. *Plant and Soil*, 2013, 366(1):243.
- [17]苏循发,龚道新,项裕昆,等.大蒜素对植烟土壤酶活性的影响[J].湖南农业科学,2011(1):47.
SU X F, GONG D X, XIANG Y K, *et al.* Effect of allicin on enzyme activity in tobacco planted soil [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2011(1):47.
- [18]曾东方,陈玢,曾麟,等.大蒜素对三种农作物病原真菌的抑制作用[J].湖北农业科学,2011,50(11):2247.
ZENG D F, CHEN F, ZENG L, *et al.* Inhibitory activity of garlic against fungal pathogens of crops [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, 50(11):2247.

- [19] NOOR AFFENDI N M, MANSOR N, SAMIRI S S. Addition of chemical and natural urease inhibitors in reducing ammonia and nitrous oxide losses [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 20(1): 253.
- [20] 赖晶晶, 兰婷, 王启, 等. 硝化抑制剂对紫色土硝化作用及 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6): 1420.
- [21] LAI J J, LAN T, WANG Q, et al. Effects of nitrification inhibitors on purple soil nitrification and N_2O emissions [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6): 1420.
- [22] MA Z W, GAO X P, TENUTA M, et al. Urea fertigation sources affect nitrous oxide emission from a drip-fertigated cotton field in northwestern China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 265: 22.
- [23] MATHIALAGAN R, MANSOR N, AL-KHATEEB B, et al. Evaluation of allicin as soil urease inhibitor [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 184: 449.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [25] BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [26] 李淑贤, 鲍锦辉, 姜兰, 等. 缓释氮肥配施脲酶抑制剂对棉花光合特征的影响[J]. 中国棉花, 2021, 48(10): 1.
- [27] LI S X, BAO J H, JIANG L, et al. Effects of slow-release nitrogen fertilizer combined with urease inhibitor on photosynthetic characteristics of cotton [J]. *China Cotton*, 2021, 48(10): 1.
- [28] 王彬, 王玉波, 佟桐, 等. 不同施氮模式对玉米光合特性和氮代谢关键酶的影响[J]. 玉米科学, 2020, 28(2): 135.
- [29] WANG B, WANG Y B, TONG T, et al. Effects of different nitrogen application patterns on photosynthetic characteristics and key enzymes of nitrogen metabolism in maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2020, 28(2): 135.
- [30] DAWAR K, RAHMAN U, ALAM S S, et al. Nitrification inhibitor and plant growth regulators improve wheat yield and nitrogen use efficiency [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2022, 41(1): 216.
- [31] 周旋, 吴良欢, 戴锋, 等. 生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田水稻养分累积及利用率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(10): 1495.
- [32] ZHOU X, WU L H, DAI F, et al. Effects of combined biochemical inhibitors and fertilization models on nutrient uptake and use efficiency of rice in yellow clayey field [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(10): 1495.
- [33] KIRSCHKE T, SPOTT O, VETTERLEIN D. Impact of urease and nitrification inhibitor on NH_4^+ and NO_3^- dynamic in soil after urea spring application under field conditions evaluated by soil extraction and soil solution sampling [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2019, 182(3): 441.
- [34] 宋涛, 尹俊慧, 胡兆平, 等. 脲酶/硝化抑制剂减少农田土壤氮素损失的作用特征[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4): 585.
- [35] SONG T, YIN J H, HU Z P, et al. Characteristics of urease/nitrification inhibitors in reducing nitrogen losses in farmland soils [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(4): 585.
- [36] 鲁艳红, 裴军, 廖育林, 等. 氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 95.
- [37] LU Y H, NIE J, LIAO Y L, et al. Effects of urease and nitrification inhibitor on yield, nitrogen efficiency and soil nitrogen balance under double-rice cropping system [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 95.
- [38] WATSON C, PREIBING T, WICHERN F. Plant nitrogen uptake from insect frass is affected by the nitrification rate as revealed by urease and nitrification inhibitors [J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2021, 5: 721840.
- [39] REHMAN H U, ALHARBY H F, AL-ZAHRANI H S, et al. Enriching urea with nitrogen inhibitors improves growth, N uptake and seed yield in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) affecting photochemical efficiency and nitrate reductase activity [J]. *Plants*, 2022, 11(3): 371.
- [40] 王静, 王允青, 万水霞, 等. 脲酶/硝化抑制剂对沿淮平原水稻养分吸收利用的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(1): 77.
- [41] WANG J, WANG Y Q, WAN S X, et al. Effects of urease/nitrification inhibitor on nutrient uptake of glutinous rice in plain along the Huaihe River [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 36(1): 77.
- [42] KAWAKAMI E M, OOSTERHUIS D M, SNIDER J L, et al. Physiological and yield responses of field-grown cotton to application of urea with the urease inhibitor NBPT and the nitrification inhibitor DCD [J]. *European Journal of Agronomy*, 2012, 43: 147.
- [43] 陈新红, 徐国伟, 王志琴, 等. 结实期水分与氮素对水稻氮素利用与养分吸收的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(2): 35.
- [44] CHEN X H, XU G W, WANG Z Q, et al. Effects of water and nitrogen on nitrogen utilization and nutrient uptake of rice at late stage [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(2): 35.
- [45] ZHANG M, FAN C H, LI Q L, et al. A 2-yr field assessment of the effects of chemical and biological nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions and nitrogen use efficiency in an intensively managed vegetable cropping system [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 201: 43.
- [46] LAN T, XIE N, CHEN C, et al. Effects of biological nitrification inhibitor in regulating NH_3 volatilization and fertilizer nitrogen recovery efficiency in soils under rice cropping [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 838: 155857.
- [47] BORZOU EI A, MANDER U, TEEMUSK A, et al. Effects of the nitrification inhibitor nitrapyrin and tillage practices on yield-scaled nitrous oxide emission from a maize field in Iran [J]. *Pedosphere*, 2021, 31(2): 314.
- [48] MOHD ZUKI M M, MD JAAFAR N, SAKIMIN S Z, et al. N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT)-coated urea (NCU) improved maize growth and nitrogen use efficiency (NUE) in highly weathered tropical soil [J]. *Sustainability*, 2020, 12(21): 8780.
- [49] CUI L, LI D P, WU Z J, et al. Effects of combined nitrification inhibitors on nitrogen transformation, maize yield and nitrogen uptake in two different soils [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2022, 53(8): 1039.
- [50] LIU G Y, YANG Z P, DU J, et al. Adding NBPT to urea increases N use efficiency of maize and decreases the abundance of N-cycling soil microbes under reduced fertilizer-N rate on the North China Plain [J]. *PLoS One*, 2020, 15(10): e0240925.
- [51] CHEN Z M, LI Y, XU Y H, et al. Spring thaw pulses decrease annual N_2O emissions reductions by nitrification inhibitors from a seasonally frozen cropland [J]. *Geoderma*, 2021, 403: 115310.