

贾瑞峰,高璐阳,沈彦辉,等.脲酶抑制剂对植物生产力与土壤环境的影响[J].山西农业科学,2025,53(5):141-150.

JIA R F,GAO L Y,SHEN Y H,et al.Effects of urease inhibitors on plant productivity and soil environment[J].Journal of Shanxi Agricultural Sciences,2025,53(5):141-150.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2025.05.16

脲酶抑制剂对植物生产力与土壤环境的影响

贾瑞峰,高璐阳,沈彦辉,肖晨星,李婷婷,陈宏坤,武良

(养分资源高效利用湖北省工程研究中心/新洋丰农业科技股份有限公司,湖北荆门 448000)

摘要:为明确脲酶抑制剂(NBPT)对植物生产力与土壤环境的影响,探究最佳施氮量与NBPT含量,选用公开发表的105篇文献为研究对象,采用Meta分析方法定量分析NBPT对植物产量、生物量、氮素吸收量、氮肥利用率、农学利用率、肥料偏生产力、土壤铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)含量、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)含量、 NH_3 挥发量、 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放通量的影响。结果表明,与单施尿素相比,在尿素中添加NBPT可显著提高种植区域作物的产量,增产率达11.1%,生物量增幅为12.6%,作物氮素吸收量提升5.7%,氮肥利用率提高18.8%,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量增长5.9%,可显著减少 NH_3 和温室气体的排放。NBPT对氨挥发的抑制效果受土壤pH条件的显著影响,在中性至弱碱性(pH值为6~8)条件下 NH_3 挥发量和 NH_3 挥发损失率分别显著降低68.8%和63.6%;而在极端酸性条件下抑制效果较弱或不存在。NBPT的减排效率与施氮水平呈非线性关系,仅在中等氮投入水平(150~300 kg/hm²)下对 NH_3 挥发损失率产生显著抑制,降低32.2%,在较低或较高施氮条件下则无显著影响。综上,施氮量为180~225 kg/hm²、NBPT含量为1.0%~2.5%的优化施肥管理可较大程度提升植物生产力,改善土壤环境。

关键词: NBPT;植物生产力;土壤环境;氮素吸收量;氮肥利用率;温室气体

中图分类号: TQ440.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2481(2025)05-0141-10

Effects of Urease Inhibitors on Plant Productivity and Soil Environment

JIA Ruifeng,GAO Luyang,SHEN Yanhui,XIAO Chenxing,

LI Tingting,CHEN Hongkun,WU Liang

(Hubei Provincial Engineering Research Center for Efficient Utilization of Nutrient Resources/

Xinyangfeng Agricultural Technology Co.,Ltd.,Jingmen 448000,China)

Abstract: In order to clarify the effects of urease inhibitors(NBPT) on plant productivity and soil environment, and to explore the optimal nitrogen application rate and NBPT content, in this study, 105 papers published in public were selected as research objects. The effects of NBPT on plant yield, biomass, nitrogen uptake, nitrogen use efficiency, agricultural utilization rate, fertilizer partial productivity, soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content, NH_3 volatiles, CO_2 , CH_4 and N_2O emission fluxes were quantitatively discussed by Meta-analysis. The results showed that compared with urea application alone, urea with addition of urease inhibitor NBPT could significantly increase crop yield in planting areas, with a yield increase rate of 11.1%, a biomass increase of 12.6%, a 5.7% increase in crop nitrogen uptake, a 18.8% increase in nitrogen use efficiency, and a 5.9% increase in soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content. It could significantly reduce NH_3 and greenhouse gas emissions. The inhibitory effect of NBPT on ammonia volatilization was significantly affected by soil pH conditions. Under neutral to weakly alkaline(pH 6-8) conditions, the reduction effects on NH_3 volatiles and NH_3 volatilization and loss rate were 68.8% and 63.6%, respectively. While, under extreme acidic and alkaline conditions, the inhibitory effect was weak or absent. The emission reduction efficiency of NBPT showed a non-linear relationship with nitrogen application level, with only a significant inhibition of NH_3 volatilization loss rate at moderate nitrogen input levels(150-300 kg/ha), reducing it by 32.2%. There was no significant effect

收稿日期:2024-12-17

基金项目:国家重点研发计划(2022YFD1700604);湖北省重点研发计划(2024BBB070,2023BBB147)

作者简介:贾瑞峰,硕士,主要从事新型肥料开发与应用研究,E-mail:jiarui Feng@yonfer.com

通信作者:高璐阳,高级农艺师,硕士,主要从事新型肥料研发及养分资源高效利用研究,E-mail:gaoluyang81@126.com

under lower or higher nitrogen application conditions. In conclusion, the optimized fertilization management with nitrogen application rate of 180–225 kg/ha and NBPT content of 1%–2.5% could greatly increase plant productivity and improve soil environment.

Keywords: NBPT; plant productivity; soil environment; nitrogen uptake; nitrogen use efficiency; greenhouse gas

近年来,随着全球人口的持续增长,粮食安全和经济增长已成为全球性重大挑战问题^[1-2]。在这一背景下,由于集约化农业生态系统的生产在很大程度上依赖于氮肥的施用,全世界对氮的需求同步增加,这对于增加全球粮食产量至关重要^[3-4]。在全球范围内,农业对氮肥的需求迅速增加,多项策略主张找出氮肥的替代品解决氮肥(尿素)使用中遇到的问题。这些问题主要是由于土壤脲酶($\text{NH}_2\text{CONH}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_3 + \text{CO}_2$)将尿素快速水解为氨(NH_3)和二氧化碳(CO_2),导致土壤 pH 值升高和铵离子积累。土壤中的脲酶通过催化水解尿素,转化为植物生长发育所需的氮素^[5],为农业生产带来十分重要的影响。而不合理或过量施用脲酶也会造成不利影响,如尿素由于水解过快,造成大量 NH_3 挥发损失,过量 NH_3 产生也会引起植物幼苗的毒害现象,从而造成经济损失、环境污染等问题^[6]。

脲酶抑制剂能够有效地降低土壤中脲酶的活性,从而显著延缓酰胺态氮转化为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的转化速率,进而抑制 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 向 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的转化,有效减少土壤中硝酸盐的积累,最终降低 N_2O 的排放^[7]。目前研究普遍认为,NBPT(N-丁基硫代磷酸三胺)因其显著的抑制效果和多次检测的可靠性,被广泛认为是优质的脲酶抑制剂,在农业应用及商业开发上取得重大的突破,并成为当前使用最为广泛的脲酶抑制剂。其商品名称为 Agrotain,并于 1996 年由美国的 IMC-Agrico 公司投放市场^[8]。当前,国内外学者对于 NBPT 的施用效果已做了大量深入的研究,王薇等^[9]研究结果显示,NBPT 的施用能够显著提高水稻的产量,增产 2.79%,同时提高了土壤硝态氮含量和氮肥利用率,有效减少了土壤氮的损耗,促进了土壤养分的保持;SUTER 等^[10]研究同样表明,NBPT 施用能够为植物氮吸收提供更多机会,从而减少氮的损失,提高氮肥利用效率;叶会财等^[11]研究了脲酶抑制剂(NBPT)与尿素的配比对作物产量的影响,发现在每季 135 kg/hm² 尿素施肥水平下,配施 0.75% 尿素含量的 NBPT 具有明显的增产效果,

氮肥农学利用率得到显著提高;辛苏宁等^[12]研究表明,添加 NBPT 能够显著提高土壤中肥料氮的残留量,并减少了累积 NH_3 挥发量和 N_2O 累积排放量;彭玉净等^[13]研究发现,添加 NBPT 可以使稻田氨挥发损失降低 53%。此外,脲酶抑制剂在降低 NH_3 挥发的同时,也会对土壤中的硝化和反硝化速率产生影响^[14]。MARTINS 等^[15]研究表明,NBPT 能够通过抑制 NH_3 挥发来降低 N_2O 的间接排放;李君等^[16]通过研究施用脲酶抑制剂对石灰性土壤的影响,结果表明,NBPT 可抑制土壤尿素水解转化,有效降低土壤 N_2O 浓度。上述研究结果仅仅是针对某一区域施用 NBPT 对植物生产力与土壤环境的影响,且对于施氮量与 NBPT 含量的优化施肥策略研究多集中于单个区域。

本研究通过 Meta 的方法探求 NBPT 对植物生产力(产量、生物量、氮素吸收量、氮肥利用率、农学利用率、肥料偏生产力)和土壤环境(土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 NH_3 挥发量、 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放通量)的影响,同时考虑氮施用量与 NBPT 含量对稳定性肥料施用效应的影响,通过提取相关性研究试验数据,进行整合分析,以期明确 NBPT 对植物生产力与土壤环境的影响,为优化含 NBPT 的稳定性肥料施肥策略提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 数据搜集

本研究数据来源于中国知网(CNKI)和 Web of Science 数据库,检索收录截至 2024 年 6 月 25 日国内外公开发表的添加 NBPT 对田间作物生产力及土壤环境因子影响的相关文献,中文检索词包括稳定性肥料、肥料抑制剂、脲酶抑制剂、NBPT,英文检索词包括 Stable fertilizer、Fertilizer inhibitor、Urease inhibitor、NBPT。

1.2 数据筛选

为减小分析偏差,采用以下标准进行文献筛选。第一,试验必须是大田试验,且标明试验地地点(经纬度)、土壤基础理化性质、作物类型、作物品种等田间试验的基本信息;第二,试验的对照组

和试验组必须在同一实验条件下进行,采用相同的管理措施,以单施尿素作为对照组,尿素+NBPT处理作为试验组;第三,研究中的每组数据必须包含试验重复次数,准确的氮肥施用量和NBPT施用量;第四,试验所测试指标包括农作物产量、生物量、氮素吸收量、氮肥利用率、农学利用

率、肥料偏生产力、土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量、 NH_3 挥发量、 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放通量。所筛文献至少包括其中一项指标。基于以上标准,共筛选出105篇文献,按照试验地点、作物种类、土壤类型、氮素形态、氮肥施用量、抑制剂用量等进行数据提取、录入与整理,数据统计描述见表1。

表1 数据统计描述

Tab.1 Description of data statistics

地区 Regions	作物种类 Crops types	土壤质地 Soil texture	年降雨量/mm Annual rainfall	年均温/ $^{\circ}\text{C}$ Annual mean temperature
西北(甘肃、宁夏、山西、陕西、新疆) Northwest(Gansu, Ningxia, Shanxi, Shaanxi, Xinjiang)	小麦、玉米、棉花、 辣椒、马铃薯	黄棉土、黄土、 沙壤土	200~400	<10
东南(浙江、湖南、江西、江苏) Southeast(Zhejiang, Hunan, Jiangxi, Jiangsu)	小麦、玉米、油菜、 水稻	黏壤土、红壤土、 沙壤土	1300~1900	18~23

使用GetData Graph Digitizer 2.25软件来提取文献中以图形式表示的数据,对于试验数据只提供标准误差(SE)的研究,使用公式(1)转化为标准差(SD)。

$$SD=SE \times \sqrt{n} \quad (1)$$

1.3 数据分析

使用MetaWin 2.1进行Meta分析,采用对数反应比 $\ln R$ 表示NBPT对植物生产力和土壤环境因子影响的效应值。

$$\ln R = \ln(X_i/X_c) \quad (2)$$

式中, R 为响应比, X_i 为添加NBPT的植物生产力或土壤环境因子指标, X_c 为对照植物生产力或土壤环境因子指标。

通过Meta分析得到综合效应值,为便于理解和展示,通过公式(3)计算变化百分数。

$$\ln R_R = (\ln R - 1) \times 100\% \quad (3)$$

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2021软件进行录入和整合试验数据,并建立Meta分析数据库,分析数据前对每组数据的效应值进行柯尔莫戈洛夫-斯米诺夫(K-S)检验。用IBM SPSS Statistics 27软件中的单因素方差分析(One-way ANOVA)和 $P < 0.05$ 水平下的最小显著差异法(LSD)对数据进行统计分析。用Origin 2021软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 植物生产力及土壤环境的偏倚性分析

对数据的效应值进行K-S检验,结果表明(图

1),农作物产量、生物量、氮素吸收量、肥料氮肥利用率、农学利用率、偏生产力、土壤全氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 NH_3 挥发量、 CO_2 、 N_2O 排放量的效应值频率分布均不服从正态分布,因此,采用非参数估计方法(Bootstrapping)生成的综合效应值($\ln R'$)和95% Bootstrap CI(64 999次迭代次数)进行数据分析。

2.2 脲酶抑制剂对植物生产力及土壤环境效应分析

从图2可以看出,添加NBPT对植物生产力和土壤环境效应存在显著差异。从土壤环境效应来看,NBPT的施用显著提高了土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量($P < 0.05$),平均提高5.9%,而对于土壤全氮、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量无显著性变化;NBPT抑制剂的添加下气体排放有明显的减少,与单施尿素相比, NH_3 挥发量显著降低($P < 0.05$),降幅为56.0%,温室气体 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放量分别显著减少16.9%、16.2%和34.6%($P < 0.05$);从NBPT抑制剂对植物生产力的效应可见,NBPT可显著提升作物产量11.1%($P < 0.05$),植物的生物量平均提高12.6%,同时,氮素吸收量显著增长5.7%($P < 0.05$);NBPT的施用显著提高了肥料利用率($P < 0.05$),其中,肥料氮素利用率显著提高18.8%($P < 0.05$),农学利用率提高51.2%,肥料偏生产力显著提高9.4%($P < 0.05$)。综上,在尿素中添加NBPT可提高土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量,降低 NH_3 挥发量,减少温室气体 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放量,提升作物产量。

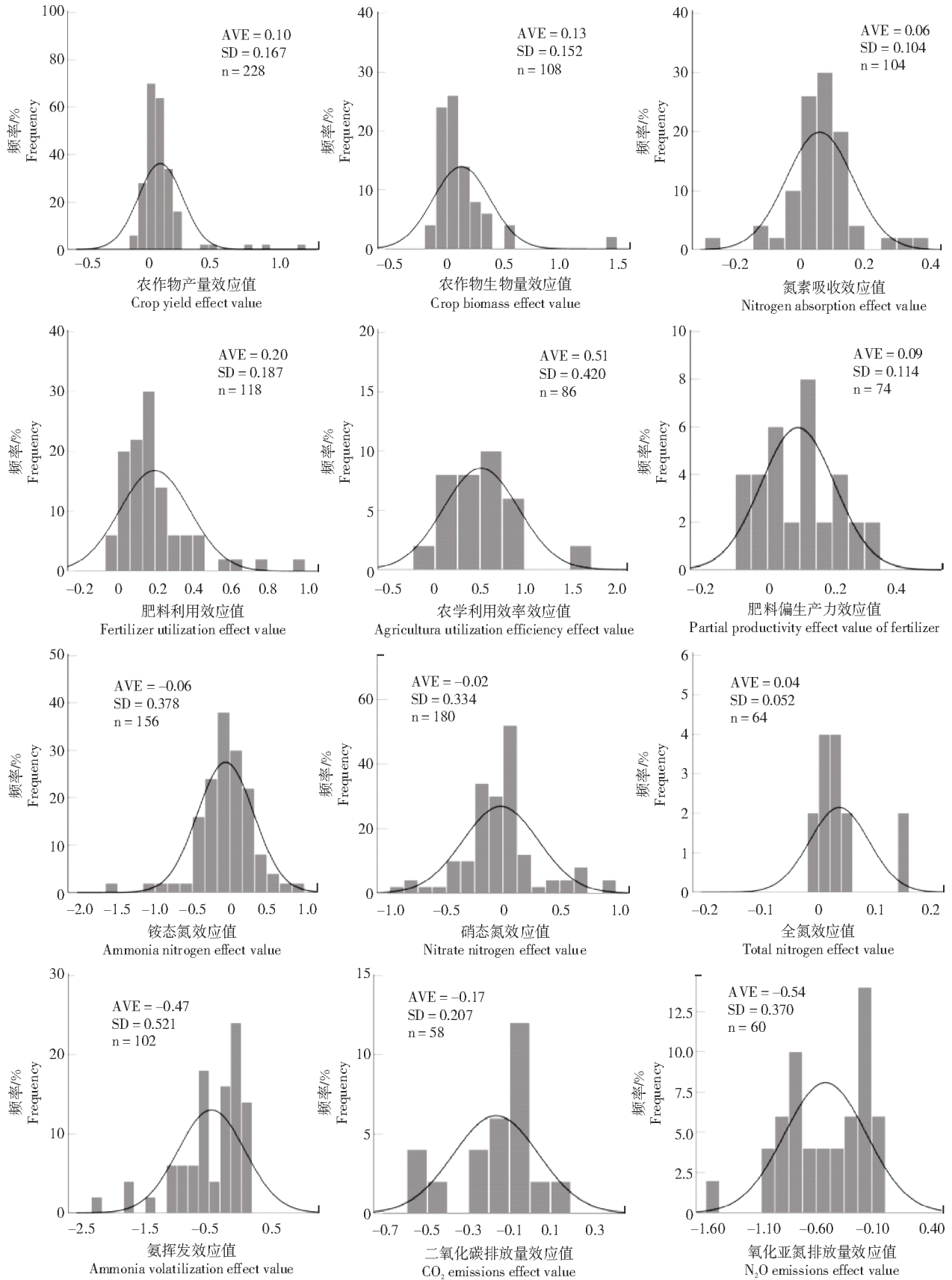
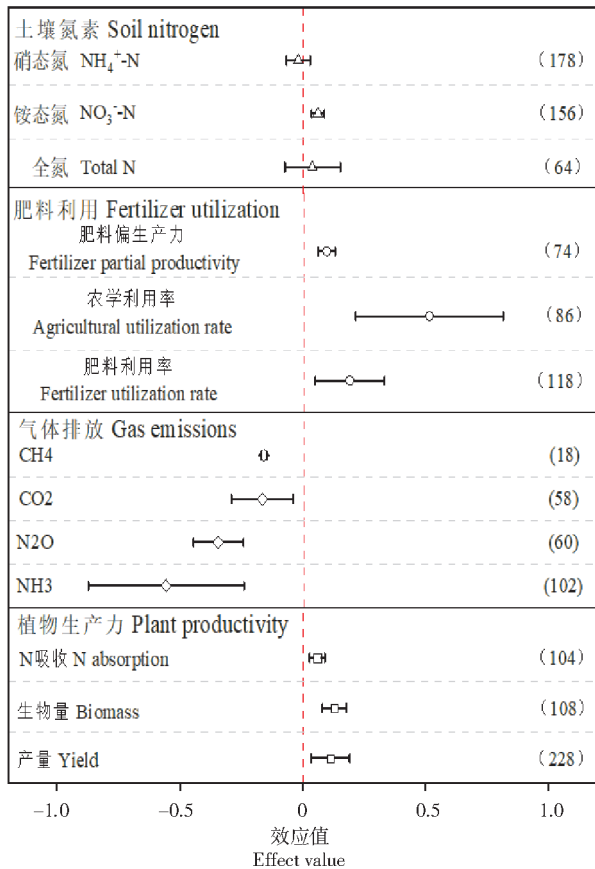


图 1 效应值频率分布

Fig.1 Frequency distribution of effect values



图形和误差线分别代表各项指标的平均值和95%置信区间,括号内的数值表示各样本数;在P=0.05水平下,95%的置信区间与零线(红线)没有重叠,则表示处理组与对照组可视为有显著性的统计相关性。下同

The graph and error line represented the average value and 95% confidence interval of each indicator, respectively. The values in parentheses indicated the number of samples; At the P=0.05 level, if the 95% confidence interval did not overlap with the zero line (red line), it indicated a significant statistical correlation between the treatment group and the control group. The same as below

图2 NBPT对植物生产力及土壤环境的影响

Fig.2 Effects of NBPT on plant productivity and soil environment

2.3 脲酶抑制剂对NH₃挥发及损失率效应分析

NBPT在不同土壤pH值与氮投入条件下对NH₃挥发量和NH₃挥发损失率存在显著性差异(图3),在不同土壤pH值时,NBPT减少NH₃挥发量与损失率程度不同,当土壤pH≤6时,NBPT对NH₃挥发损失率和NH₃挥发量的变化无显著性影响,土壤pH值在6~8时,NH₃挥发量和NH₃挥发损失率分别显著降低68.8%和63.6%(P<0.05),土壤pH值≥8时,NH₃挥发量显著降低55.9%,且

NH₃挥发损失率显著减少83.1%(P<0.05);当氮投入≤150 kg/hm²或≥300 kg/hm²时,NBPT对NH₃挥发量无显著性影响,NH₃挥发损失率分别减少了25.4%和65.7%,当氮投入在150~300 kg/hm²时,NH₃挥发量和NH₃挥发损失率分别显著降低61.0%和32.2%(P<0.05)。

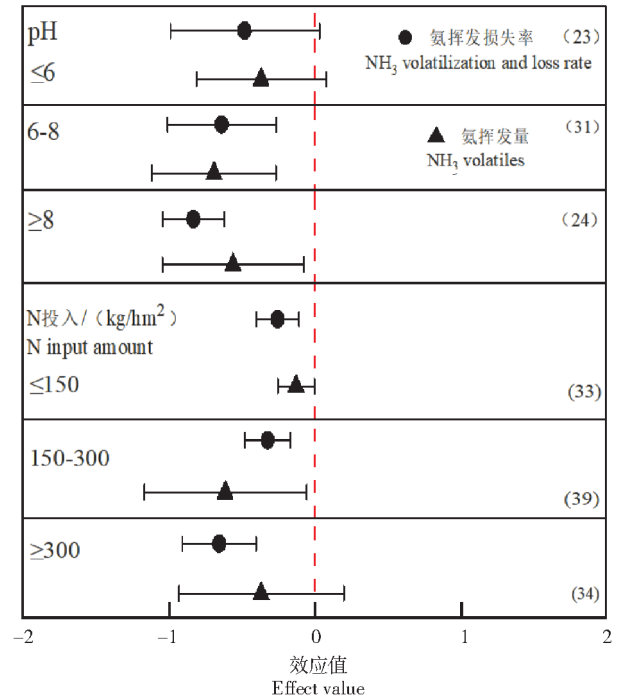


图3 NBPT对NH₃挥发及损失率的影响

Fig.3 Effect of NBPT on NH₃ volatilization and loss rate

2.4 施氮量与NBPT含量对植物生产力及土壤环境的影响

不同施氮量下的农作物产量与生物量、氮肥利用率、土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N含量、NH₃挥发量的变化关系如图4所示。当施肥量在100~300 kg/hm²时,添加NBPT对作物产量呈现显著的积极影响,当施氮量达到180 kg/hm²时,添加NBPT对作物的产量影响最大;生物量随着施氮量的增加呈现先降低后升高的趋势,当施氮量≥200 kg/hm²,作物生物量趋于增加趋势;氮肥利用率随着施氮量的增加则呈现先升高后降低的趋势,当施氮量达到225 kg/hm²时,氮肥利用率最高;对于土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N含量的显著性影响,施氮量多集中于100~250 kg/hm²,当施氮量达到180 kg/hm²时,对土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N含量产生积极影响;NH₃挥发效应随施氮量的增加呈现先下降后升高的趋势。

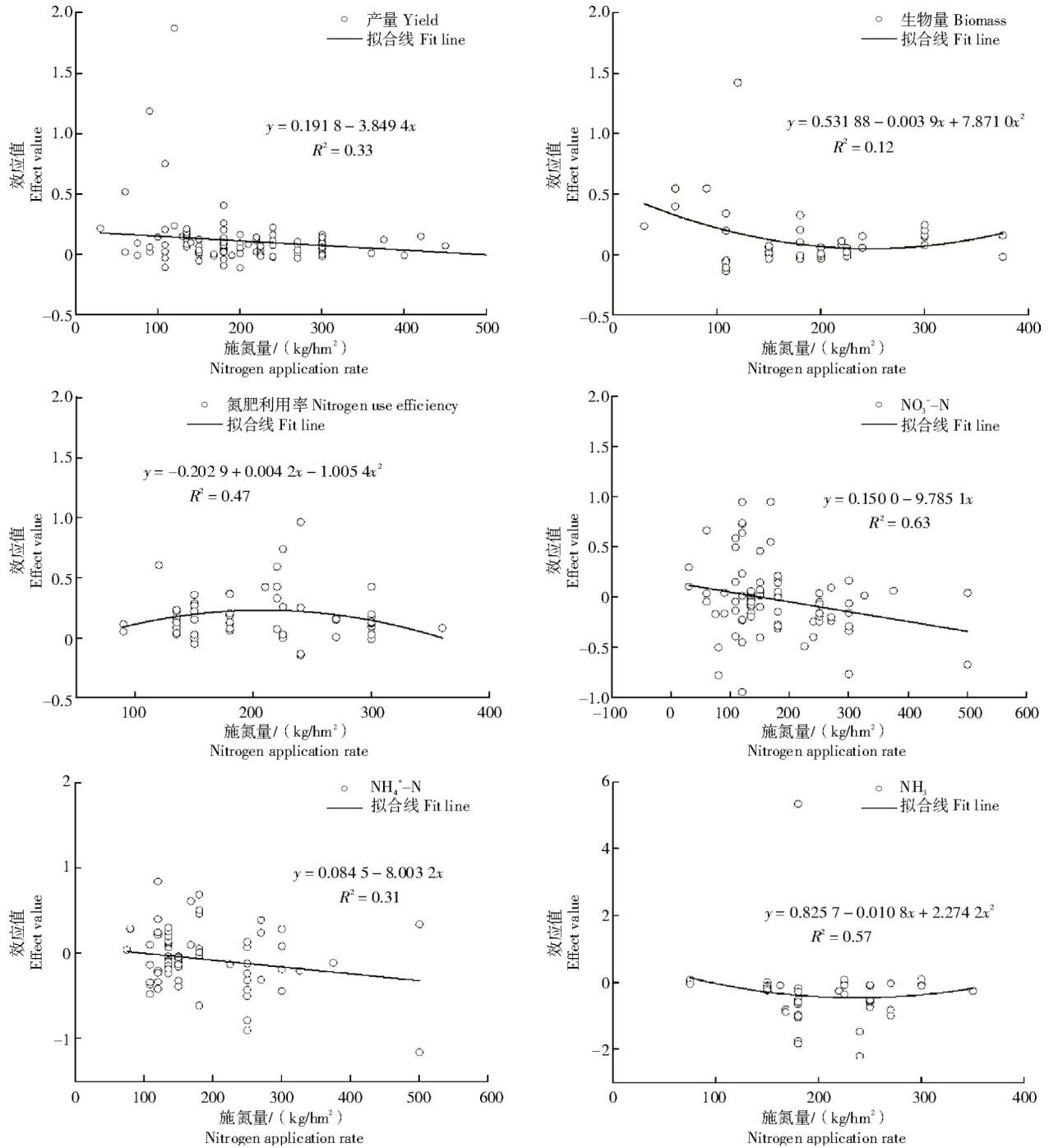


图 4 不同施氮量对植物生产力和土壤环境的影响

Fig.4 Effects of different nitrogen application rates on plant productivity and soil environment

尿素结合 NBPT 处理对农作物产量、生物量、氮肥利用率、土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 含量、NH₃ 挥发量的影响如图 5 所示。当 NBPT 含量达到 1% 时,对农作物产量产生积极影响;农作物生物量随着 NBPT 含量的增加呈现下降趋势,当 NBPT 含量达到 1% 时,农作物生物量达到最大值;氮肥利用率随着 NBPT 含量的增加呈现先升高后下降的

趋势,当 NBPT 含量达到 2.5% 时,氮肥利用率呈现降低的趋势;土壤 NO₃⁻-N 含量随着 NBPT 含量的增加呈现较大幅度的下降趋势,而土壤 NH₄⁺-N 含量随着 NBPT 含量的增加呈现先升高后降低的趋势,当 NBPT 含量达到 1% 时,对土壤 NH₄⁺-N 含量的影响最大;NH₃ 挥发量随着 NBPT 含量的增加呈现先升高后降低的趋势。

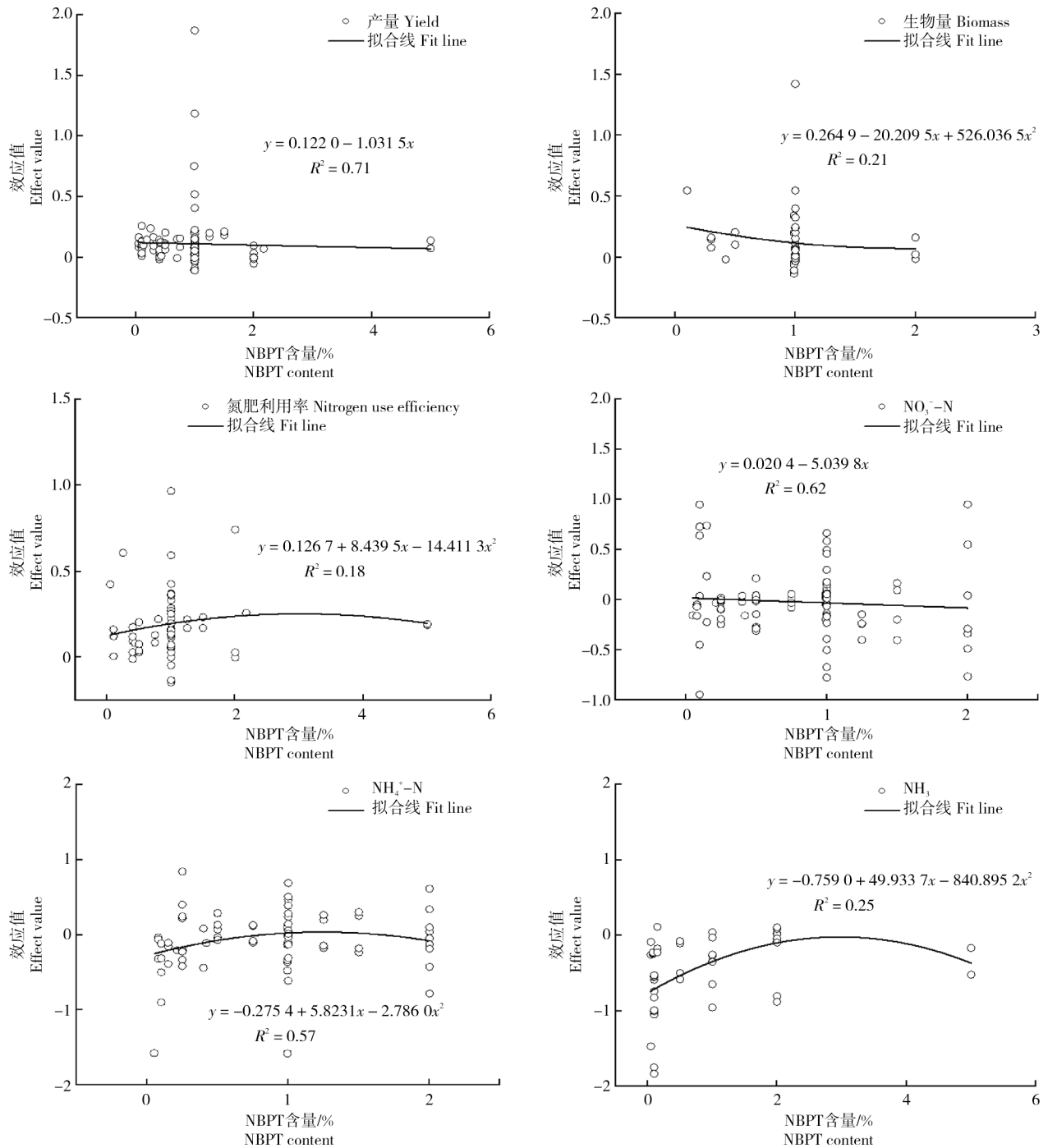


图5 不同NBPT含量对植物生产力和土壤环境的影响

Fig.5 Effects of different NBPT contents on plant productivity and soil environment

3 结论与讨论

3.1 添加NBPT对植物生产力与土壤无机氮的影响

本研究发现,添加NBPT后对作物产量、生物量、氮素吸收和土壤 NH_4^+ -N 积累具有显著正效应,不同的氮施用量和NBPT含量对植物生产力

与土壤无机氮的影响效果不同。张文学等^[17]研究发现,当NBPT的添加量为尿素用量的1%时,在双季稻田中,早、晚稻的产量分别增长了8.54%和12.87%,氮素吸收量也分别提高6.78%和9.46%,土壤中 NH_4^+ -N 含量对农作物产量影响显著,同样本研究结果也表明,NBPT可显著提升作物产量11.1%,同时氮素吸收量显著增加5.7%,土壤中

NH_4^+-N 含量平均提高 5.9%，土壤总体氮素水平无显著提升，这可能与 NBPT 有效作用时间持续较短有关。然而，王静等^[18]研究则指出，单添加 NBPT 对于作物产量的提升并不明显，而硝化/脲酶组合施用可以有效提高作物产量，提高氮素吸收量。这一差异可能源于 NBPT 并不直接抑制脲酶，而需要先转化为其氧类似物 NBPTO 后才能发挥抑制作用。因此，NBPT 的效果主要取决于其施用后转化为 NBPTO 的速率^[19-20]。此外，NBPT 转化为 NBPTO 的速度会受到土壤的理化特性、土壤水分、土壤温度、脲酶活性以及 NBPT 浓度等因素的影响^[21]。在氮施用量与 NBPT 添加量上，本研究结果表明，当施氮量达到 180 kg/hm² 时，对作物的产量影响最大，且对土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量产生积极影响，而万年鑫等^[22]的研究则表明，NBPT 在 120 kg/hm² 氮水平下，农作物产量显著提高，但在 30~60 kg/hm² 低氮水平下，其作用并不显著；当 NBPT 含量达到 1% 时，对作物产量和土壤 NH_4^+-N 产生最大积极影响，这与张文学等^[23]研究结果相似。添加 NBPT 能够保持作物生育期内土壤 NH_4^+-N 含量的高水平，这可能是其增产与提高氮素吸收的主要原因。

3.2 添加 NBPT 对肥料利用率的影响

已有研究表明，尿素因其快速的水解速率，能在短时间内释放大量的 NH_4^+-N ，导致过量铵离子在土壤中迅速累积，由于作物无法立即吸收利用，往往引发 NH_3 挥发及反硝化损失^[24-25]。与此同时，土壤中的 NO_3^--N 易受雨水或其他形式的水分作用，发生淋溶现象，不仅造成氮素的无效损失，还可能对环境构成风险。NBPT 通过抑制土壤中的脲酶活性，有效延缓了氮素的转化过程，从而调控土壤的供氮强度，减少氮素的损失^[26-27]，提高氮肥利用率。本研究结果表明，NBPT 的施用显著提高了肥料利用率，其中，肥料氮素利用率显著提高 18.8%，农学利用率增长 51.2%，肥料偏生产力显著提高 9.4%，且随着施氮量的增加而呈现先升高后降低的趋势，当施肥量达到 225 kg/hm² 时，肥料利用率最高，而当 NBPT 含量达到 2.5% 时，肥料利用率呈现降低的趋势。王静等^[28]研究结果与本研究结果相似，尿素单独配施 NBPT 显著提高了氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率、氮素吸收效率和氮肥偏生产力 ($P < 0.05$)。此外，另有研究指出^[29]，尿素态氮在水解过程中，NBPT 仅能抑制特

定的转化步骤，而不能全面控制整个转化过程。因此，与硝化抑制剂协同施用，可以更有效地影响土壤氮素的转化机制，进一步提升氮素的吸收利用率。

3.3 添加 NBPT 对 NH_3 与温室气体减排的影响

本研究结果表明，在添加 NBPT 的条件下，气体排放有明显的减少。与单施尿素相比， NH_3 挥发量显著降低，降幅为 56.0%，当土壤 pH 值在 6~8 时， NH_3 挥发量和 NH_3 挥发损失率分别显著降低 68.8% 和 63.6%，当氮投入在 150~300 kg/hm² 时， NH_3 挥发量和 NH_3 挥发损失率分别显著降低 61.0% 和 32.2%。这与周旋等^[30]研究结果相似。张奇等^[31]研究表明，添加 NBPT 能够显著地减少氨挥发量，NBPT 的用量从 0.1% 增加到 0.5%，虽然能够减少氨挥发损失但是作用效果并不显著，而本研究结果发现随着 NBPT 含量的增加 NH_3 挥发量呈现先升高后降低的趋势，且 NBPT 含量为 2.5% 达到最大效应，这可能与温度较高有关，导致尿素的水解速度超过 NBPT 的抑制速度。针对 N_2O 排放量的研究表明^[32]，NBPT 能有效延缓尿素的水解过程，从而降低 NH_4^+-N 的浓度，在降低 NH_3 挥发的同时，会对硝化和反硝化速率产生影响，从而减少 N_2O 排放。DAWAR 等^[33]研究也表明，尿素添加 NBPT 能减少 N_2O 排放。本研究结果同样显示，NBPT 可减少 N_2O 排放通量 34.6%。然而，有研究发现^[34]，通过大气沉降、硝化和反硝化过程，不断挥发损失的 NH_3 中有 1%~5% 会再次转化为 N_2O ，表示 NBPT 在减少 N_2O 排放方面的效果将会因 NH_3 排放量负面影响的加剧而相对减弱。因此，NBPT 在温室气体减排方面的效果仍需进行更深入的研究。

在肥料中添加 NBPT 可显著提高种植区域作物的产量及生物量，促进作物氮素吸收，提高氮肥利用率，增加土壤 NH_4^+-N 积累，抑制 NH_4^+-N 转化，减少 NH_3 挥发和温室气体的排放，对保持植物生产力和维持土壤环境具有积极影响。在不同土壤 pH 值与肥料氮投入下 NBPT 均对 NH_3 挥发与损失率产生不同程度的影响，此外当施氮量在 180~225 kg/hm²、NBPT 含量在 1%~2.5% 时可最大程度提升植物生产力，改善土壤环境。通过适配合理的 NBPT 和肥料施用量可促进增产增收与培肥地力。添加 NBPT 的稳定性肥料对温室气体的减排效应有待进一步研究，未来可就含 NBPT

的稳定性肥料施用对主要粮食作物、土壤性质和环境效应的影响实施更全面的分析。

参考文献:

- [1] WEST P C, GERBER J S, ENGSTROM P M, et al. Leverage points for improving global food security and the environment[J]. *Science*, 2014, 345:325-328.
- [2] ZHANG M, CHENG G, FENG H, et al. Effects of straw and biochar amendments on aggregate stability, soil organic carbon, and enzyme activities in the Loess Plateau, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(11): 10108-10120.
- [3] 韩锐锋, 牛培锡, 王鑫悦, 等. 控释尿素和普通尿素混合基施对冬小麦氮素吸收利用和产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(11):2042-2058.
- HAN R F, NIU Y X, WANG X Y, et al. Effect of mixed basal application of controlled release urea and common urea on the nitrogen uptake, utilization and yield of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(11):2042-2058.
- [4] 马尚英, 夏婷婷, 韩鹏彬, 等. 施氮量和施氮方式对宽窄行种植冬小麦氮素吸收利用、产量及土壤氮残留的影响[J]. *河南农业科学*, 2025, 54(8):38-50.
- MA S Y, XIA T T, HAN P B, et al. Effects of application rate and method of nitrogen on winter wheat nitrogen uptake and utilization, yield and soil nitrate nitrogen residue under wide-narrow row planting[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2025, 54(8):38-50.
- [5] ZAMAN M, NGUYEN M L, BLENNERHASSETT D, et al. Reducing NH_3 , N_2O and N losses from a pasture soil with urease or nitrification inhibitors and elemental S-amended nitrogenous fertilizers[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 44(5): 693-705.
- [6] BEHERA S N, SHARMA M, ANEJA V P, et al. Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(11):8092-8131.
- [7] 杨柳青, 季加敏, 巨晓棠. 硝化/脲酶抑制剂对石灰性潮土 N_2O 减排效果及氮素转化的比较[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(3):605-612.
- YANG L Q, JI J M, JU X T. Effects of nitrification/urease inhibitors on mitigating N_2O emission and transformation of N from calcareous fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3):605-612.
- [8] CHIEN S H, PROCHNOW L I, CANTARELLA H. Chapter 8 recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts [J]. *Advances in Agronomy*, 2009:267-322.
- [9] 王薇, 张耀玲, 郝兴顺, 等. 不同增效剂与氮肥减量配施在水稻上的应用效果[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(5):84-87.
- WANG W, ZHANG Y L, HAO X S, et al. Application effect of different synergists and nitrogen fertilizer reduction on rice [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(5):84-87.
- [10] SUTER H, LAM S K, WALKER C, et al. Enhanced efficiency fertilisers reduce nitrous oxide emissions and improve fertiliser ^{15}N recovery in a Southern Australian pasture[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 699:134147.
- [11] 叶会财, 李大明, 柳开楼, 等. 脲酶抑制剂配施比例对红壤双季稻产量的影响[J]. *土壤通报*, 2014, 45(4):909-912.
- YE H C, LI D M, LIU K L, et al. Effects of combined application rate of urease inhibitor on rice yield in red paddy soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(4):909-912.
- [12] 辛苏宁, 王磊, 卢艳丽, 等. 添加脲酶/硝化抑制剂条件下基于 ^{15}N 示踪的夏玉米当季肥料氮去向研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(6):1092-1102.
- XIN S N, WANG L, LU Y L, et al. Study on the fate of fertilizer nitrogen during summer maize season based on high abundance of ^{15}N under application of urease/nitrification inhibitors [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(6): 1092-1102.
- [13] 彭玉净, 田玉华, 尹斌. 添加脲酶抑制剂 NBPT 对麦秆还田稻田氨挥发的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(1): 19-23.
- PENG Y J, TIAN Y H, YIN B. Effects of NBPT urease inhibitor on ammonia volatilization in paddy fields with wheat straw application[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(1):19-23.
- [14] ZAMAN M, SAGGAR S, BLENNERHASSETT J D, et al. Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(6):1270-1280.
- [15] MARTINS M R, SANT'ANNA S A C, ZAMAN M, et al. Strategies for the use of urease and nitrification inhibitors with urea: Impact on N_2O and NH_3 emissions, fertilizer- ^{15}N recovery and maize yield in a tropical soil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 247:54-62.
- [16] 李君, 刘涛, 褚贵新. 脲酶抑制剂对石灰性土壤尿素转化及 N_2O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(9):1866-1872.
- LI J, LIU T, CHU G X. Responses of urea transformation dynamics and nitrous oxide to three urease inhibitors in calcareous soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(9):1866-1872.
- [17] 张文学, 孙刚, 何萍, 等. 双季稻田添加脲酶抑制剂 NBPT 氮肥的最高减量潜力研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4):821-830.
- ZHANG W X, SUN G, HE P, et al. Highest potential of subtracting nitrogen fertilizer through addition of urease inhibitor NBPT in double-cropping paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4):821-830.
- [18] 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[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5):211-216.
- WANG J, WANG Y Q, ZHANG F Z, et al. Effects of urease/nitrification inhibitors on yield and nitrogen utilization efficiency of rice and soil nitrogen of paddy field in plain along the Huaihe River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5):211-216.
- [19] 李元, 洪坚平, 李桃, 等. 多酶金缓释尿素对土壤氮素形态和

- 含量及油菜产量的影响[J]. 山西农业科学, 2014, 42(1): 39-42.
- LI Y, HONG J P, LI T, et al. Survey of influence of multi enzyme gold slow-release urea to soil nitrogen forms/content and yield of rapeseed[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2014, 42(1): 39-42.
- [20] ENGEL R, JONES C, WALLANDER R. Ammonia volatilization from urea and mitigation by NBPT following surface application to cold soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(6): 2348-2357.
- [21] ENGEL R E, WILLIAMS E, WALLANDER R, et al. Apparent persistence of N-(n-butyl) thiophosphoric triamide is greater in alkaline soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(4): 1424-1429.
- [22] 万年鑫, 黄强, 郑顺林, 等. 硝化/脲酶抑制剂对秋马铃薯植株及土壤氮素利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(1): 83-89.
- WAN N X, HUANG Q, ZHENG S L, et al. Effects of nitrification/urease inhibitors on potato yield and soil mineral nitrogen content[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(1): 83-89.
- [23] 张文学, 王萍, 孙刚, 等. 脲酶抑制剂不同用量对土壤氮素供应的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(6): 38-44.
- ZHANG W X, WANG P, SUN G, et al. Effects of urease inhibitor addition rate on nitrogen transformation in paddy soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018(6): 38-44.
- [24] COSKUN D, BRITTO D T, SHI W M, et al. Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition[J]. Nature Plants, 2017, 3: 17074.
- [25] 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.
- [26] 李欠欠. 脲酶抑制剂LIMUS对我国农田氨减排及作物产量和氮素利用的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- LI Q Q. Effects of urease inhibitor LIMUS on ammonia emission reduction, crop yield and nitrogen utilization in farmland in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [27] 郭延轲, 赵长盛, 刘伟, 等. 硝化/脲酶抑制剂和生物炭对设施农业土壤微生物及碳氮循环影响的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(9): 1-11.
- GUO Y K, ZHAO C S, LIU W, et al. Research progress on influences of nitrification/urease inhibitor and biochar on soil microorganisms and carbon nitrogen cycle in protected agriculture[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(9): 1-11.
- [28] 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): 77-82.
- 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): 77-82.
- [29] 傅丽, 苏壮, 石元亮, 等. 脲酶抑制剂(NBPT)与不同硝化抑制剂组合对土壤尿素氮转化的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(3): 339-341.
- FU L, SU Z, SHI Y L, et al. Effects of urease inhibitors (NBPT) and nitrification enhibitors on urea transformation[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010, 41(3): 339-341.
- [30] 周旋, 吴良欢, 董春华. 生化抑制剂组合对黄泥田土壤氨挥发及累积特性的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1081-1088.
- ZHOU X, WU L H, DONG C H. Effects of combined biochemical inhibitors on ammonia volatilization and cumulation in yellow clayey soil[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(4): 1081-1088.
- [31] 张奇, 王宏, 罗付香, 等. 抑制剂NBPT对紫色土稻油轮作体系氨挥发和产量的影响[J]. 四川农业大学学报, 2023, 41(1): 14-20.
- ZHANG Q, WANG H, LUO F X, et al. The effect of urease inhibitor application on ammonia volatilization and crop yield of rice-rapeseed rotation system in purple soil[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2023, 41(1): 14-20.
- [32] ZHAO Z C, WU D, BOL R, et al. Nitrification inhibitor's effect on mitigating N₂O emissions was weakened by urease inhibitor in calcareous soils[J]. Atmospheric Environment, 2017, 166: 142-150.
- [33] DAWAR K, ZAMAN M, ROWARTH J S, et al. Urease inhibitor reduces N losses and improves plant-bioavailability of urea applied in fine particle and granular forms under field conditions[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 144(1): 41-50.
- [34] 马智勇, 贾俊香, 谢英荷, 等. 硝化抑制剂和生物炭对菜地土壤N₂O与CO₂排放的影响[J]. 山西农业科学, 2019, 47(6): 1019-1022.
- MA Z Y, JIA J X, XIE Y H, et al. Effects of nitrification inhibitor and biochar on N₂O and CO₂ emissions from vegetable soil[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, 47(6): 1019-1022.