

肖富容, 李东坡, 薛妍, 宋玉超, 张可, 张艺籍, 李永华, 郑野, 张金明, 崔永坤. 2022. 添加腐植酸与生化抑制剂尿素在黄土水稻栽培中施用效果. 生态学杂志, 41(9): 1717-1725.

Xiao FR, Li DP, Xue Y, Song YC, Zhang K, Zhang YJ, Li YH, Zheng Y, Zhang JM, Cui YK. 2022. Effects of urea added with humic acid and biochemical inhibitors on rice cultivation in loess. *Chinese Journal of Ecology*, 41(9): 1717-1725.

添加腐植酸与生化抑制剂尿素在黄土水稻栽培中施用效果

肖富容^{1,2} 李东坡^{1,5*} 薛妍¹ 宋玉超¹ 张可^{1,2} 张艺籍^{1,2} 李永华³
郑野⁴ 张金明⁴ 崔永坤⁴

(¹中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³北方华锦化学工业集团有限公司, 辽宁盘锦 124021; ⁴锦西天然气化工有限责任公司, 辽宁葫芦岛 125001; ⁵辽宁沈阳农田生态系统国家野外科学观测研究站, 沈阳 110107)

摘要 研究添加腐植酸和生化抑制剂尿素肥料在黄土水稻栽培中的施用效果, 可为黄土水田专用的新型高效稳定性增效尿素肥料配方的研制提供科学依据。采用盆栽试验方式, 以不施氮肥(CK)及单独施用尿素肥料(N)为对照, 将腐植酸(H)、N-丁基硫代磷酸三胺(NBPT)、3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)和2-氯-6-三甲吡啶(CP)及腐植酸与3种生化抑制剂分别组合添加至尿素肥料中, 制成7种高效稳定性增效尿素肥料。相比尿素单独施用, 腐植酸的添加能抑制土壤硝化作用, 明显促进水稻生长, 显著提高水稻稻谷产量、稻谷吸氮量, 分别提高13.3%、21.7%, 氮肥利用效率也有所提高($P < 0.05$)。相较NBPT处理, 腐植酸的添加未对尿素氮转化特征造成显著影响, 但其协同作用能显著提高植株总吸氮量、氮肥利用率, 分别提高8.0%、9.3%。相较DMPP处理, 腐植酸的添加能有效抑制生育前期土壤硝化作用, 显著提高水稻生物产量7.3%。相较CP处理, 腐植酸的添加能有效抑制土壤硝化作用, 但显著降低水稻稻谷产量、氮肥偏生产力及农学效率, 分别降低11.3%、11.3%、13.2% ($P < 0.05$)。结果表明, 在黄土地区种植水稻, 应首选腐植酸与DMPP结合配方制成新型高效稳定性增效尿素肥料, 其次NBPT与腐植酸配合施用效果也较好, 2种配方均有利于氮肥利用率的提高, 而CP与腐植酸结合产生负效应, 其效果明显不如单一添加CP的效果。

关键词 水稻; 生物刺激素; 脲酶抑制剂; 硝化抑制剂; 氮肥利用率

Effects of urea added with humic acid and biochemical inhibitors on rice cultivation in loess. XIAO Furong^{1,2}, LI Dong-po^{1,5*}, XUE Yan¹, SONG Yu-chao¹, ZHANG Ke^{1,2}, ZHANG Yi-ji^{1,2}, LI Yong-hua³, ZHENG Ye⁴, ZHANG Jin-ming⁴, CUI Yong-kun⁴ (¹*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; ²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; ³*North Huajin Chemical Industries Group Corporation, Panjin 124021, Liaoning, China*; ⁴*Jinxi Natural Gas Chemical Co. Ltd, Huludao 125001, Liaoning, China*; ⁵*National Field Observation and Research Station of Shenyang Agro-ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110107, China*).

Abstract: Understanding the effects of urea addition with humic acid and biochemical inhibitors in rice cultivation in loess can provide a theoretical basis for developing new types of high-efficiency and stable urea fertilizer for loess rice paddy field. In a pot experiment, blank (CK) and urea (N) were set as controls, and humic acid (H), N-butyl thiophosphate-triamine (NBPT), 3,4-dimethyl-pyrazolate phosphate (DMPP), 2-chloro-6-trimethyl-pyridine (CP), and humic acid combined respectively with three biochemical inhibitors were added into urea to form seven types of fertilizers. Compared with the application of urea alone, the addition of humic acid inhibited soil nitrification, promoted rice growth, and significantly increased grain yield by 13.3% and grain N uptake by 21.7%, with an increased nitrogen use efficiency (NUE) ($P < 0.05$). Addition of humic acid with NBPT did not affect the transformation characteristics of urea nitrogen compared with NBPT alone, but significantly increased total N uptake and

国家重点研发计划项目(2017YFD0200707)资助。

收稿日期: 2021-07-31 接受日期: 2022-01-03

* 通讯作者 E-mail: lidp@iae.ac.cn

NUE by 8.0% and 9.3%, respectively. Compared with the DMPP treatment, the addition of humic acid inhibited soil nitrification in the early growth stage and significantly increased the total biomass of rice by 7.3%. Compared with the CP treatment, the addition of humic acid inhibited soil nitrification, but significantly decreased grain yield, partial factor productivity and agronomic efficiency of applied nitrogen by 11.3%, 11.3%, and 13.2% ($P < 0.05$), respectively. Our results suggest that the combination of humic acid and DMPP should be the first choice for developing new type of high-efficiency and stable urea fertilizer for rice cultivation in loess areas, followed by NBPT + humic acid. The combination of CP and humic acid had negative effects, which was less effective than adding CP alone.

Key words: rice; biostimulant; urease inhibitor; nitrification inhibitor; nitrogen use efficiency.

尿素作为水稻种植中常用的氮素肥料,能显著影响水稻的生长发育(徐春梅等,2008),对我国水稻产量的提高具有重要作用。然而,研究表明,近年来我国水稻氮肥利用率仅为39.0%(于飞等,2015),大多数氮素以氨挥发、淋溶及表观硝化、反硝化等形式损失(Zhu *et al.*,2002),同时造成温室效应、水体富营养化等一系列环境问题(巨晓棠等,2003;Xia *et al.*,2017;Beeckman *et al.*,2018),因此降低我国水田氮肥施用量,提高氮肥利用率成为推进我国农业可持续发展必须解决的问题。

为提高氮素肥料利用率,减轻因大量施肥而带来环境污染,我国开始大力推动新型肥料的研制工作,其中,以脲酶抑制剂及硝化抑制剂为核心的稳定性肥料得到了广泛关注与应用。大量研究表明,脲酶抑制剂及硝化抑制剂的添加具有提高作物产量(Wallace *et al.*,2020),减少稻田温室气体排放(武开阔等,2019),提高氮肥利用率(Abalos *et al.*,2014)等功效,已在我国得到广泛的推广应用,但生化抑制剂的应用效果受到土壤环境因素的影响(孙志梅等,2008;Chen *et al.*,2010),因此生化抑制剂在不同土壤或作物上应用效果差异巨大,针对特定土壤或作物研制专用的高效稳定性肥料成为稳定性肥料发展的新方向和必然趋势。

近年来,生物刺激素在我国得到了快速发展,已经被广泛应用于农业生产实践中。腐植酸作为一种常见的生物刺激素,已经被证实具有刺激植物体内代谢过程(Ertani *et al.*,2013),促进叶绿体分化(Billard *et al.*,2014),增强植株抗旱能力(刘伟等,2014),提高土壤有机质含量(张务帅等,2015),改良土壤理化性质(Liu *et al.*,2020)的功能,同时腐植

酸与肥料配合施用能够有效提高作物产量(Manzoor *et al.*,2014),肥料利用率(庄振东等,2016)及果实品质(Akladios *et al.*,2018),目前腐植酸肥料在农业生产中已经大量施用并取得良好效果。腐植酸具有来源广泛,成本低及应用形式多样等特点(谷端银等,2016)。然而,当前腐植酸与肥料的结合方式多为传统的水溶性肥料、复合肥或叶面肥料,相关研究报道较多,关于腐植酸与生化抑制剂结合的稳定性肥料施用研究较少,腐植酸与生化抑制剂结合的稳定性肥料能否产生良好的施用效果还需进一步探究。哪种生化抑制剂能够与腐植酸结合具有正效应,哪些具有负效应还没有明确结论,因此针对腐植酸与生化抑制剂结合的稳定性增效尿素肥料的有效性研究十分必要,可为专用新型高效稳定性增效尿素肥料的研制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为黄土,采自陕西省咸阳市长武县(107°48'E,34°59'N)的农田0~20 cm耕层,土壤基本理化性质见表1。供试肥料尿素为国药集团生产,含氮量46%,重过磷酸钙由云天化集团有限责任公司生产,含 P_2O_5 43%,氯化钾由俄罗斯生产,含 K_2O 60%;本试验所用脲酶抑制剂N-丁基硫代磷酸三胺(NBPT)是由Macklin生物科技公司生产,硝化抑制剂3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)和2-氯-6-三甲基吡啶(CP)均由Maya Reagent生物科技公司生产,以上生化抑制剂均为分析纯。所用生物刺激素腐植酸(H)由国内某公司提供,含腐植酸70%。供试作物为粳稻,品种为“美锋1号”。塑料盆高度为

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of tested soil

土壤类型 Soil type	pH	有机质 Organic matter ($g \cdot kg^{-1}$)	全氮 Total N ($g \cdot kg^{-1}$)	铵态氮 NH_4^+-N ($mg \cdot kg^{-1}$)	硝态氮 $NO_3^- - N$ ($mg \cdot kg^{-1}$)	全磷 Total P ($g \cdot kg^{-1}$)	速效磷 Available P ($mg \cdot kg^{-1}$)	全钾 Total K ($g \cdot kg^{-1}$)	速效钾 Available K ($mg \cdot kg^{-1}$)
黄土	8.01	31.26	1.14	9.17	10.70	0.67	11.45	40.45	257.37

28 cm,直径为 26 cm。

1.2 试验设计

试验共设 9 个处理,分别为:(1)不添加尿素肥料(CK);(2)单施尿素(N);(3)添加腐植酸尿素(H);(4)添加 NBPT 尿素(NBPT);(5)添加 DMPP 尿素(DMPP);(6)添加 CP 尿素(CP);(7)添加 NBPT 和腐植酸尿素(NBPT+H);(8)添加 DMPP 和腐植酸尿素(DMPP+H);(9)添加 CP 和腐植酸尿素(CP+H)。每个处理 3 次重复。根据腐植酸肥料生产中的常用腐植酸含量及已有研究结果设置生物刺激素及生化抑制剂施用量(王小彬等,1998;油伦成等,2019;吴洪燕等,2020;李学红等,2021),其中腐植酸添加量为尿素量的 6‰,NBPT、DMPP、CP 添加量分别为尿素量的 0.25%、0.5%、0.25%。上述各处理施磷量 $0.12 \text{ g P}_2\text{O}_5 \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土,施钾量 $0.15 \text{ g K}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土,除 CK 处理外其余处理施氮量均为 $0.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土。采用水稻盆栽试验,每盆装土量折合干土 6 kg,每盆定植 5 穴水稻,每穴 3 株,一次性施肥,水稻生长期不追肥。

具体盆栽方法:将经过预先处理的土壤平整铺在塑料布上,将每盆需要的尿素肥料、腐植酸及生化抑制剂分别称重,其中每盆尿素肥料添加量为 9.13 g,腐植酸添加量为尿素肥料量的 6‰,NBPT、DMPP、CP 添加量分别为尿素量的 0.25%、0.5%、0.25%,之后将称好的腐植酸与生化抑制剂均匀混合,再与尿素肥料均匀混合,制备成高效稳定性增效尿素肥料,先与少量土壤混合,再与所有土壤均匀混合。混合完毕的土壤转移至高度为 28 cm,直径为 26 cm 的塑料盆中,浇水使土壤含水量为田间最大持水量的 60%。水稻生育期内人工浇水,保证每盆浇水量一致,水稻生育期内依照当地田间常规操作进行田间管理。

1.3 样品采集

试验于 2020 年 5 月 12 日装盆插秧,10 月 7 日收获。采用五点取样法,在水稻 4 个生育时期(分蘖期、抽穗开花期、灌浆期、成熟期)采集土壤样品,将采集的土壤样品混合均匀,去除细根杂物等,混匀备用。于水稻抽穗末期测定叶面积指数及叶绿素含量,计算均值。成熟期收获整盆植株样品,收集稻谷、茎叶及根系,风干后测定稻谷产量、生物产量及根生物量等。同时采集稻谷、秸秆及根系样品进行全氮含量分析。

1.4 测定指标及方法

土壤尿素态氮测定:混匀土壤样品用 $2 \text{ mol} \cdot$

L^{-1} 氯化钾-乙酸苯汞溶液浸提(土:水=1:10),在 $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下震荡 1 h,过滤土壤得浸提液,滤液用 AA3 型流动分析仪测定;土壤铵态氮和硝态氮含量的测定,混匀土壤样品用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯化钾溶液浸提(土:水=1:10),在 $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下震荡 1 h,过滤土壤得浸提液,用 AA3 型流动分析仪测定,两者之和称为土壤速效氮含量。

在水稻抽穗末期使用叶绿素仪及叶面积仪测定水稻叶片叶绿素含量、叶面积,计算平均值。在成熟期测定水稻茎蘖数及株高,收获后对水稻样品进行考种。将稻谷、茎叶、秸秆、根系在 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘至恒重,用粉碎机粉碎,过 0.5 mm 筛,使用 VARIO MACRO 元素分析仪测定植株全氮含量。

1.5 计算方法

$$\text{硝化抑制率}(\%) = (a-b)/a \times 100$$

式中, a 为只施普通尿素处理的土壤硝态氮含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), b 为添加抑制剂尿素处理土壤硝态氮含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)(油伦成等,2019)。

土壤表观硝化速率($\%$)=土壤硝态氮含量/(土壤铵态氮含量+土壤硝态氮含量)(林江辉等,2004)

参照葛均筑等(2016)的方法进行以下指标计算:

水稻植株吸氮量($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$)=水稻植株含氮量×水稻植株干物质重

水稻氮肥吸收利用率($\%$)=(施氮处理水稻植株氮积累量-不施氮肥处理水稻植株氮积累量)/施氮量×100

水稻氮肥偏生产力($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)=施氮处理水稻稻谷产量/施氮量

水稻氮肥农学效率($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)=(施氮处理水稻稻谷产量-不施氮处理水稻稻谷产量)/施氮量

肥料氮贡献率($\%$)=(施氮处理水稻稻谷产量-不施氮处理水稻稻谷产量)/施氮处理水稻生物产量×100

1.6 数据处理

统计分析均采用 Microsoft Excel 2010 与 SPSS 21.0 软件进行,采用 Origin 2021 作图,采用 Duncan 最小显著极差法进行差异显著性检验,腐植酸及生化抑制剂对水稻植株性状等的影响采用单变量方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理黄土中氮素变化特征

水稻分蘖期,所有处理黄土土壤中没有检测到尿素态氮,说明此时施入土壤中的尿素态氮已全部

水解。因此,此后3个时期所取土壤均没有检测尿素态氮含量。

2.1.1 不同处理土壤铵态氮变化特征 随水稻生育进程,各处理铵态氮含量呈降低趋势,分蘖期土壤铵态氮含量最高(表2)。CK处理在水稻分蘖期铵态氮含量低于施氮处理,抽穗开花期与其他处理趋于一致,灌浆期起CK处理铵态氮含量高于其他处理,是因CK处理水稻植株矮小,生育中后期吸氮能力较弱,导致土壤中铵态氮的积累(表2)。

分蘖期至抽穗开花期,CP+H处理铵态氮含量均显著高于其他处理,铵态氮含量在 $18.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上($P<0.05$);其次是DMPP+H处理铵态氮含量较高,生育前期土壤铵态氮含量在 $17.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,显著高于除CP+H外处理,相较硝化抑制剂DMPP、CP单一施用,腐植酸的添加能够显著提高生育前期土壤铵态氮含量,二者结合施用能有效抑制土壤中铵态氮向硝态氮的转化。灌浆期DMPP处理铵态氮含量显著高于DMPP+H处理,表明生育后期腐植酸的添加降低了DMPP的硝化抑制效果,缩短其作用时间。NBPT与NBPT+H处理、CP与CP+H处理之间均无显著差异。成熟期添加腐植酸的生化抑制剂处理铵态氮含量均显著高于N处理,添加腐植酸与生化抑制剂的各处理之间无显著差异($P<0.05$)(表2)。

2.1.2 不同处理土壤硝态氮变化特征 由于水稻土壤长期处于淹水条件,氧气含量较低,硝化作用较弱,因此各处理黄土土壤硝态氮含量均处于较低水平,施氮处理与CK处理土壤硝态氮含量并未表现出明显差异,同时随水稻生育进程呈先升高后降低的趋势(表2)。

相比普通尿素,添加腐植酸与生化抑制剂处理在水稻生育前期硝态氮含量均有所降低(表2),表明腐植酸及生化抑制剂的添加在一定程度上能够减少土壤中硝态氮的累积,而生育后期与其他处理硝态氮含量趋于一致。添加腐植酸及生化抑制剂处理中,分蘖期DMPP+H处理硝态氮含量最高,达到 $2.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于DMPP处理;抽穗开花期H处理硝态氮含量最高,为 $5.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,DMPP处理显著高于DMPP+H处理;生育前期NBPT与NBPT+H处理、CP与CP+H处理之间均无显著差异;灌浆期NBPT处理硝态氮含量最高,为 $3.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于NBPT+H处理;DMPP处理与DMPP+H处理之间无显著差异;CP处理显著高于CP+H处理。成熟期NBPT+H处理硝态氮含量最高,为 $5.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于其他处理;DMPP处理显著高于DMPP+H处理;CP处理显著高于CP+H处理($P<0.05$)(表2)。

2.2 不同处理对黄土土壤表观硝化率的影响

水稻生育期内土壤表观硝化率呈先升高后降低的趋势,与土壤速效氮含量变化规律相一致。生育前期,单独尿素处理土壤表观硝化率高于添加腐植酸与生化抑制剂处理,进一步印证腐植酸及生化抑制剂的加入在一定程度上能够抑制土壤硝化作用的进行(表3)。

添加腐植酸与生化抑制剂处理中,相比NBPT单独使用,腐植酸的添加并未对生育前期土壤表观硝化率造成显著差异($P<0.05$)。相比DMPP、CP单独使用,腐植酸的添加均起到降低表观硝化率的作用。灌浆期腐植酸与DMPP、CP配合使用表观硝化率均显著高于单独添加DMPP、CP处理,DMPP+H

表2 水稻不同生育时期不同处理黄土铵态氮及硝态氮含量变化($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 Ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents of loess under different treatments at different growth stages of rice

处理 Treatment	NH_4^+-N				NO_3^--N			
	分蘖期 Tillering	抽穗开花期 Heading to flowering	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity	分蘖期 Tillering	抽穗开花期 Heading to flowering	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity
CK	16.05±0.66 e	15.25±1.37 c	16.93±0.90 a	13.68±0.58 a	1.95±0.13 cd	4.81±0.23 cde	2.51±0.25 b	2.47±0.03 e
N	16.72±0.31 de	15.00±0.31 c	16.04±0.79 a	9.44±0.22 c	2.32±0.01 a	5.90±0.56 a	2.25±0.14 c	2.70±0.06 de
H	17.52±0.26 de	15.37±0.49 c	12.76±1.29 c	12.37±0.75 ab	2.02±0.02 c	5.55±0.32 ab	2.66±0.05 b	2.72±0.17 de
NBPT	17.89±0.84 de	14.53±0.47 c	15.55±0.45 ab	12.92±0.61 ab	1.88±0.02 de	5.14±0.42 bcd	3.50±0.11 a	3.27±0.02 c
DMPP	20.81±0.06 c	15.20±0.40 c	15.62±0.41 ab	12.83±0.91 ab	1.58±0.04 f	5.17±0.47 bcd	2.16±0.07 c	2.78±0.19 d
CP	18.84±1.61 cd	14.00±0.90 c	10.88±1.03 d	12.10±0.48 b	1.89±0.04 de	4.26±0.03 ef	1.74±0.06 d	4.63±0.22 b
NBPT+H	18.41±0.13 de	14.07±0.94 c	14.61±0.45 b	12.98±1.02 ab	1.84±0.02 e	5.42±0.24 abc	2.09±0.11 c	5.65±0.33 a
DMPP+H	53.12±0.59 b	17.29±1.35 b	10.08±0.76 d	12.03±0.96 b	2.18±0.01 b	4.03±0.38 f	2.22±0.02 c	2.16±0.13 f
CP+H	62.78±3.32 a	18.87±1.23 a	11.22±0.21 d	12.32±0.39 b	1.85±0.03 e	4.59±0.42 def	2.48±0.21 b	3.32±0.03 c

注: 同列字母不同表示在 $P<0.05$ 水平差异显著,下同。

Note: Different letters in the same line represent significant difference at 0.05 level. The same below.

表3 水稻不同生育时期不同处理黄土表观硝化率变化 (%)

Table 3 Apparent nitrification rate of loess under different treatments at different growth stages of rice

处理 Treatment	分蘖期 Tillering	抽穗开花期 Heading to flowering	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity
CK	10.83±0.49 b	24.04±0.77 bc	12.88±0.66 b	15.29±0.63 f
N	12.18±0.26 a	28.18±1.81 a	12.31±1.20 b	22.26±0.33 c
H	10.32±0.14 b	26.52±1.54 ab	17.34±1.30 a	18.05±0.57 e
NBPT	9.53±0.43 c	26.12±2.03 abc	18.40±0.74 a	20.23±0.64 d
DMPP	7.05±0.16 d	25.37±2.18 abc	12.13±0.13 b	17.82±1.51 e
CP	9.15±0.55 c	23.39±1.28 c	13.84±0.95 b	27.70±1.74 b
NBPT+H	9.11±0.12 c	27.85±2.08 a	12.54±0.91 b	30.39±1.92 a
DMPP+H	3.95±0.06 e	18.91±0.87 d	18.12±1.22 a	15.23±0.27 f
CP+H	2.88±0.18 f	19.56±1.52 d	18.12±1.31 a	21.22±0.60 cd

处理表观硝化率的升高可能是腐植酸的添加促使DMPP在土壤中降解加快,缩短其作用时间所致。CP+H处理表观硝化率的升高是由于土壤中铵态氮含量较高,硝化作用底物浓度的升高导致表观硝化率升高(表2、表3)。成熟期DMPP、CP单独施用处理均显著高于DMPP、CP处理,可能是相比DMPP、CP处理,腐植酸的添加提高了水稻植株吸氮能力,土壤铵态氮含量较低,因此土壤表观硝化率较低。

2.3 不同处理对水稻分蘖期黄土硝化抑制率的影响

由图1可知,添加生化抑制剂处理中,DMPP处理硝化抑制率最高,为32.0%,显著高于其他处理,表明在黄土中DMPP具有较好的硝化抑制效果。相比NBPT、CP单独使用,腐植酸的加入并未对水稻分蘖期土壤硝化抑制率产生显著影响,这与土壤速效氮含量及表观硝化率变化规律相符($P<0.05$) (表2、表3、图1)。相比DMPP单独施用,腐植酸的加入显著降低了硝化抑制率,结合土壤铵态氮含量分析,是由于分蘖期DMPP+H处理土壤铵态氮含量较

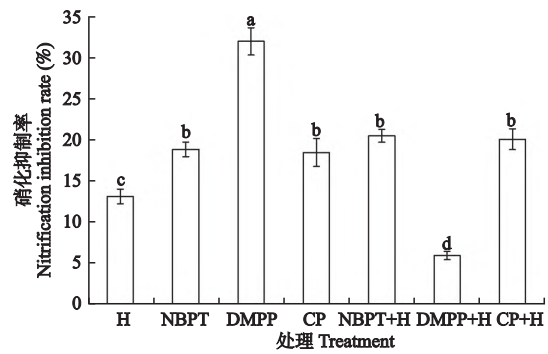


图1 不同处理水稻分蘖期黄土硝化抑制率

Fig.1 Nitrification inhibition rate of loess under different treatments at rice tillering stage

高,因此硝化作用强度较高,导致硝化抑制率较低。

2.4 不同处理对水稻生理及生物学指标的影响

由表4可知,施氮处理水稻分蘖数、株高、叶绿素含量、叶面积指数、根生物量、生物产量及稻谷产量均显著高于CK处理,表明氮肥的添加能有效促进水稻生长,提高产量。

相比普通尿素,腐植酸的加入提高了水稻分蘖数、株高、叶绿素含量、叶面积指数、根生物量、生物产量及稻谷产量。

相比NBPT单独施用,腐植酸的添加提高了水稻分蘖数、株高、叶绿素含量、叶面积指数及根生物量,但水稻生物产量、稻谷产量有所降低,均未造成显著影响,说明腐植酸的添加能够促进水稻的生长发育,但不利于产量的提高($P<0.05$)。相比DMPP单独施用,腐植酸的添加提高了水稻分蘖数、株高、根生物量、生物产量,而水稻叶绿素含量、叶面积指数及稻谷产量有所降低。相比CP单独施用,腐植酸的添加提高了水稻分蘖数、株高、根生物量及生物产量,同时水稻叶绿素含量、叶面积指数及稻谷产量均有所降低(表4)。

表4 不同处理水稻植株生理和生物学指标

Table 4 Physiological and biological index of rice under different treatments

处理 Treatment	分蘖数 Tiller number	株高 Plant height (cm)	叶绿素含量 Chlorophyll content	叶面积指数 Leaf area (cm ²)	根生物量 Root biomass (g·pot ⁻¹)	生物产量 Total biomass (g·pot ⁻¹)	稻谷产量 Grain yield (g·pot ⁻¹)
CK	3.87±0.31 d	56.01±1.09 d	3.95±0.21 f	7.17±0.62 c	9.11±0.08 d	48.10±0.93 e	17.23±0.68 e
N	10.80±0.60 c	81.93±0.90 c	9.39±0.16 e	24.99±2.43 b	42.63±2.92 bc	280.51±20.30 d	77.62±4.09 d
H	11.33±0.92 bc	85.59±1.27 ab	12.63±0.82 d	28.18±2.03 a	43.35±2.58 bc	283.36±3.03 d	87.96±4.04 c
NBPT	10.47±0.31 c	84.44±1.90 bc	16.18±0.13 bc	28.91±2.21 a	43.01±0.51 bc	295.98±7.20 cd	104.29±2.68 b
DMPP	11.33±0.23 bc	82.75±2.84 c	18.71±0.54 a	29.69±2.15 a	43.44±1.16 bc	302.50±3.54 bc	116.15±2.71 a
CP	12.27±0.61 ab	82.27±1.62 c	19.00±0.79 a	28.84±1.05 a	40.57±1.92 c	313.22±11.33 ab	116.40±6.97 a
NBPT+H	11.40±0.53 abc	87.05±0.54 ab	16.86±1.62 b	29.13±1.05 a	43.15±1.36 bc	294.74±8.61 cd	97.16±1.33 b
DMPP+H	11.40±0.20 abc	87.63±1.72 a	16.50±1.05 b	28.64±1.48 a	46.19±2.24 b	324.58±10.30 a	114.07±5.64 a
CP+H	12.33±0.50 a	87.08±0.69 ab	14.90±0.54 c	26.73±1.30 ab	56.40±3.95 a	315.67±3.12 ab	103.30±4.62 b

相比单独施用尿素,腐植酸的加入促进了根生物量的增加,相比单独添加生化抑制剂,与腐植酸配合施用处理根生物量均有所提高,印证了腐植酸能够促进水稻根系的生长发育。相比单独添加 NBPT,腐植酸的添加对水稻产量并未形成显著影响。相比单独添加 DMPP、CP,腐植酸的添加能促进水稻分蘖数及株高的提高,但不利于水稻叶片叶绿素含量及叶面积指数的增加,二者配合施用均提高水稻根生物量及生物产量,降低稻谷产量(表4)。表明腐植酸与 DMPP、CP 结合均能促进养分向水稻根系转运,不利于经济产量的增加。

2.5 不同处理对水稻植株氮肥利用效率及肥料氮贡献率的影响

由表5可知,施氮处理水稻植株吸氮量显著高于CK处理,表明氮肥的添加能有效促进水稻对养分的吸收。添加腐植酸与生化抑制剂处理水稻植株吸氮量及氮肥利用效率均高于普通尿素处理,表明腐植酸及生化抑制剂的添加均能有效促进水稻对氮素的吸收,提升尿素肥料性能,提高肥料利用效率。

相比单独添加 NBPT,腐植酸的添加显著提高水稻植株总吸氮量及氮肥利用率,对稻谷吸氮量及

其他氮肥利用效率均无显著影响,结合 NBPT+H 处理水稻产量数据分析,可能是水稻植株光合作用产物的一部分向根系转移,提高了根生物量,增强了植株对养分的吸收能力,进而提高植株总吸氮量,但对稻谷吸氮量及其他氮肥利用效率无显著影响($P < 0.05$)(表5)。

相比单独添加 DMPP,腐植酸的添加对植株吸氮量及氮肥利用效率指标均无显著影响。相比单独添加 CP,添加腐植酸处理的植株吸氮量、氮肥利用率及肥料氮贡献率均无显著差异,而氮肥偏生产力及农学效率显著降低(表5),结合产量数据分析,由于腐植酸对植株根系生长的促进作用,水稻光合作用产物向水稻植株根部转移,进而造成稻谷产量的降低,致使氮肥偏生产力及农学效率的下降。

2.6 腐植酸及生化抑制剂与水稻植株吸氮量、生理和生物学指标的交互效应分析

由表6可知,相比普通尿素,添加腐植酸及3种生化抑制剂尿素对水稻植株吸氮量、生理及生物学指标的影响有所不同。添加腐植酸尿素显著影响水稻植株根生物量、稻谷产量,而对生物产量无显著影响,表明添加腐植酸能有效影响氮素养分在水稻

表5 不同处理水稻植株氮肥利用效率及肥料氮贡献率

Table 5 Plant nitrogen use efficiency and fertilizer nitrogen contribution rate under different treatments

处理 Treatment	稻谷吸氮量 Grain N uptake (g)	植株吸氮量 Total N uptake (g)	氮肥利用率 NUE (%)	氮肥偏生产力 NFPF (g · g ⁻¹)	氮肥农学效率 ANUE (g · g ⁻¹)	肥料氮贡献率 FCR (%)
CK	0.16±0.01 e	0.33±0.03 e	-	-	-	-
N	0.84±0.04 d	2.03±0.14 d	40.41±3.36 d	18.48±0.97 d	14.38±0.97 d	82.79±1.28 c
H	1.02±0.07 c	2.19±0.02 d	44.21±0.41 d	20.94±0.96 c	16.84±0.96 c	83.02±0.18 c
NBPT	1.20±0.08 b	2.39±0.09 c	49.13±2.08 c	24.83±0.64 b	20.73±0.64 b	83.74±0.40 bc
DMPP	1.39±0.09 a	2.68±0.16 ab	56.05±3.74 ab	27.66±0.64 a	23.55±0.64 a	84.10±0.19 ab
CP	1.38±0.06 a	2.66±0.06 ab	55.54±1.54 ab	27.71±1.66 a	23.61±1.66 a	84.63±0.55 ab
NBPT+H	1.21±0.02 b	2.58±0.13 b	53.69±3.01 b	23.13±0.32 b	19.03±0.32 b	83.67±0.49 bc
DMPP+H	1.35±0.03 a	2.74±0.09 ab	57.38±2.09 ab	27.16±1.34 a	23.06±1.34 a	85.17±0.47 a
CP+H	1.36±0.08 a	2.82±0.09 a	59.27±2.22 a	24.59±1.10 b	20.49±1.10 b	84.76±0.15 ab

表6 腐植酸及生化抑制剂与水稻植株吸氮量、生理和生物学指标交互效应(F值)

Table 6 Analysis of interaction effects of humic acid and biochemical inhibitors on rice yield, nitrogen uptake, growth indicators(F)

处理 Treatment	根生物量 Root biomass	生物产量 Total biomass	稻谷产量 Grain yield	植株吸氮量 Total N uptake	分蘖数 Tiller number	株高 Plant height	叶绿素含量 Chlorophyll content	叶面积指数 Leaf area
H	32.60**	2.70	13.20**	7.24*	1.97	29.56**	22.57**	1.35
NBPT	0.01	5.38*	51.15**	38.20**	0.18	4.63*	129.61**	5.53*
DMPP	1.87	29.83**	166.12**	97.14**	0.94	2.41	185.66**	6.22*
CP	16.87**	31.55**	116.40**	105.92**	15.83**	0.98	150.54**	1.34
H×NBPT	0.05	0.12	12.13**	0.09	0.42	0.32	7.01*	2.06
H×DMPP	0.57	2.76	6.13*	0.76	0.57	0.43	31.72**	4.20
H×CP	31.85**	0.00	21.83**	0.00	0.57	0.38	57.57**	6.57*

*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$.

植株间的分配,这与前述分析结果相一致;同时,显著影响植株吸氮量、株高及叶绿素含量,但未对分蘖数及叶面积指数造成显著影响。添加3种生化抑制剂的尿素对水稻生物及稻谷产量均有显著影响,但对水稻根系生长发育均无显著影响,添加3种抑制剂的尿素均对水稻植株吸氮量产生显著影响,是因生化抑制剂的添加降低了肥料氮损失,提高氮肥利用率。腐植酸与3种抑制剂结合对水稻稻谷产量及叶绿素含量均存在着显著的交互效应,腐植酸与CP结合对水稻植株根生物量及叶面积指数具有显著的交互效应。

3 讨论

3.1 腐植酸与生化抑制剂配合使用对尿素氮转化的影响

添加生化抑制剂能有效延缓尿素态氮向铵态氮、硝态氮转化的生物化学过程,与在黑土和褐土土壤上已有研究结果相一致(李学红等,2021)。相比普通尿素,添加腐植酸能在一定程度上抑制硝化作用进行,是因腐植酸能与尿素分子形成络合物腐脲(闫双堆等,2008),同时腐植酸能够抑制脲酶活性,提高脲酶稳定性,避免尿素添加初期土壤脲酶活性急剧增强(Dong *et al.*, 2009a),起到延缓尿素水解的作用。同时腐植酸能以生物或非生物方式与土壤中的铵态氮结合(Dong *et al.*, 2009b),已有在泥炭土土壤上研究结果腐植酸分子中的羧基也被证明能够提高土壤中铵态氮的保留量(Susilawati *et al.*, 2009),因此腐植酸在一定程度上具有抑制黄土土壤硝化作用的效果,因此腐植酸的添加在水稻生育前期表现出一定的硝化抑制效果。

相比单独添加NBPT尿素,添加腐植酸并未对黄土尿素氮转化的生物化学过程产生显著影响。相比单独添加DMPP、CP尿素,添加腐植酸显著提高了土壤铵态氮含量,降低表观硝化率,与硝化抑制剂配合施用能够分别在尿素水解及氨氧化过程中产生抑制作用,因而导致铵态氮含量的提高。结合土壤速效氮及表观硝化率等指标推测,腐植酸的添加缩短了DMPP的有效抑制硝化作用时间,这与添加腐植酸尿素提高了土壤有机质含量(张务帅等,2015)有关,而有机质含量的增加会降低DMPP的作用效果(薛妍等,2012)。添加腐植酸能够促进土壤团聚体的形成(穆金丽等,2017),从而导致土壤对DMPP吸附能力增强,进一步降低DMPP在土壤中的有效作用时间。

3.2 腐植酸与生化抑制剂配合使用对水稻生理和生物学指标及氮肥利用效率的影响

相比普通尿素,添加腐植酸起到了促进水稻植株生长的效果,水稻生理和生物学指标及尿素氮肥利用效率均有所提高,这与前人在盐渍土壤及棕壤上研究结果相符(Manzoor *et al.*, 2014; 谷端银等, 2016; 庄振东等, 2016)。单独添加腐植酸显著提高水稻稻谷产量,但对生物产量及根生物量并未产生显著影响,可能是由于添加腐植酸提高了水稻叶片叶绿素含量及叶面积指数,而光合作用的强弱显著影响水稻稻谷干物质的积累量(蔡昆争等, 1999),添加腐植酸尿素提高了水稻叶片光合作用强度,因此稻谷产量显著提高,进而显著提高稻谷吸氮量及氮肥偏生产力。

相比单独添加生化抑制剂,添加腐植酸均提高水稻分蘖数、株高、根生物量、植株吸氮量及氮肥利用率,这与已有在棕壤土壤条件下的研究结果相符(谷端银等, 2016; 庄振东等, 2016)。相比单独使用NBPT,添加腐植酸尿素显著提高水稻总吸氮量及氮肥利用率,对其他指标则无显著影响,是由于氨挥发是水稻田氮肥损失的主要途径(Fillery *et al.*, 1986),试验所用黄土属于碱性土壤,因此氨挥发损失更为剧烈,而添加腐植酸尿素能够有效延缓尿素水解,进而降低氨挥发损失,其作用原理与NBPT相近,二者配合施用能进一步降低黄土稻田氨挥发损失,因此水稻植株总体吸氮量增加及氮肥利用率提高。相比单独添加NBPT,腐植酸的添加能够提高水稻植株不同部位的含氮量,这与腐植酸能够提高水稻植株氮同化能力,进而促进氨基酸的合成(Vaccaro *et al.*, 2009)有关。相比单独使用硝化抑制剂,与腐植酸结合的尿素均降低了水稻叶片叶绿素含量、叶面积,可能是环境胁迫下,腐植酸能降低植株叶片中乙醇酸氧化酶活性(朱珊珊等, 2021),而其活性又对水稻植株光呼吸代谢起到关键作用,因而能明显增强叶片光合效率,同时可能由于NBPT降解较快,在未灭菌土壤中半衰期仅为6.5~7.6天(李涛等, 2006),因此相比单独使用NBPT,添加腐植酸并未造成水稻叶片叶绿素含量及叶面积指数的下降。相比单独使用DMPP,添加腐植酸显著提高水稻生物产量,而水稻稻谷产量、稻谷吸氮量及氮肥偏生产力有所降低,可能是添加腐植酸提高了DMPP的硝化抑制效果,有利于提高水稻生育前期土壤氮素养分含量,但在水稻生育后期,由于DMPP作用时间缩短,不利于水稻生殖生长导致稻谷产量等指

标下降。相比单独添加 CP, 添加腐植酸尿素显著降低稻谷产量及氮肥偏生产力, 而生物产量及氮肥利用效率却有所增高, 腐植酸与 CP 配合使用对水稻根生物量的提高存在极显著的交互效应, 可以认为是腐植酸的添加促进了水稻体内干物质及养分向根部的转运, 导致 CP+H 根生物量显著提高, 致使稻谷产量及水稻氮肥偏生产力的降低, 同时由于添加腐植酸更有利于抑制土壤硝化作用, 因此水稻植株吸氮量及氮肥利用率有所增加。

相比 NBPT 单独施用, 腐植酸的添加并未对尿素氮转化特征造成显著影响, 但能有效促进水稻生长, 提高植株吸氮量及氮肥利用率等, 但稻谷产量及氮肥偏生产力有所下降。相比 DMPP 单独施用, 腐植酸的添加能有效抑制黄土土壤硝化作用的进行, 提高生育前期土壤铵态氮含量, 显著提高水稻生物产量, 植株总吸氮量及氮肥利用率也有所提高。相比 CP 单独施用, 腐植酸的添加进一步抑制土壤硝化作用的进行, 提高生育前期土壤铵态氮含量, 促进水稻生长, 提高植株总吸氮量及氮肥利用率, 然而显著降低水稻稻谷产量及氮肥偏生产力, 水稻叶片叶绿素含量及叶面积指数也有所降低。综上, 可以认为, 在黄土水稻种植地区, 腐植酸与 DMPP 结合添加到尿素中制成高效稳定性增效尿素肥料施用, 有利于水稻产量及氮肥利用率的提高, 同时将腐植酸与 NBPT 配合施用也能得到良好效果, 有利于肥料利用率的提高。结合肥料成本等因素考虑, 不建议将腐植酸与 CP 结合制成高效稳定性增效尿素肥料施用, 不利于水稻生产经济效益的提高。同时, 由于本试验为盆栽试验, 仅进行一季水稻作物的种植, 受当季气候降水等因素干扰较大。在今后的研究中, 可以推广至田间小区试验, 并设置多年多点的长期试验, 进一步探究腐植酸与生化抑制剂配合施用在黄土水稻栽培中施用效果。

参考文献

- 蔡昆争, 骆世明. 1999. 不同生育期遮光对水稻生长发育和产量形成的影响. 应用生态学报, **10**(2): 66-69.
- 葛均筑, 徐莹, 袁国印, 等. 2016. 覆膜对长江中游春玉米氮肥利用效率及土壤速效氮素的影响. 植物营养与肥料学报, **22**(2): 296-306.
- 谷端银, 王秀峰, 魏珉, 等. 2016. 腐植酸类物质与植物抗性研究进展. 山东农业大学学报(自然科学版), **47**(3): 321-326.
- 巨晓棠, 张福锁. 2003. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响. 生态环境, **12**(1): 24-28.
- 李涛, 石元亮, 李学文, 等. 2006. NBPT 在土壤中的降解及其影响因子. 生态学杂志, **25**(9): 1082-1086.
- 李学红, 李东坡, 武志杰, 等. 2021. 脲酶/硝化抑制剂在黑土和褐土中对尿素氮转化的调控效果. 应用生态学报, **32**(4): 1352-1360.
- 林江辉, 李辉信, 胡锋, 等. 2004. 干土效应对土壤生物组成及矿化与硝化作用的影响. 土壤学报, **41**(6): 924-930.
- 刘伟, 刘景辉, 萨如拉, 等. 2014. 腐植酸水溶肥料对燕麦叶片保护酶活性和渗透物质的影响. 灌溉排水学报, **33**(1): 107-109.
- 穆金丽, 谭钧, 刘国顺, 等. 2017. 腐植酸和氮肥用量及其交互对植烟土壤质量的影响. 土壤, **49**(1): 27-32.
- 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 等. 2008. 硝化抑制剂的施用效果、影响因素及其评价. 应用生态学报, **19**(7): 1611-1618.
- 王小彬, Bailey LD, Grallt CA, 等. 1998. 关于几种土壤脲酶抑制剂的作用条件. 植物营养与肥料学报, **4**(3): 211-218.
- 吴洪燕, 吴钦泉, 杨越超, 等. 2020. 不同分子量腐植酸组分对小麦幼苗和油菜生长的影响. 腐植酸, (6): 51-55.
- 武开阔, 张丽莉, 宋玉超, 等. 2019. 稳定性氮肥配合秸秆还田对水稻产量及 N₂O 和 CH₄ 排放的影响. 应用生态学报, **30**(4): 1287-1294.
- 徐春梅, 王丹英, 邵国胜, 等. 2008. 施氮量和栽插密度对超高产水稻中早²²产量和品质的影响. 中国水稻科学, **22**(5): 507-512.
- 薛妍, 武志杰, 张丽莉, 等. 2012. 土壤含水量、pH 及有机质对 DMPP 硝化抑制效果的影响. 应用生态学报, **23**(10): 2663-2669.
- 闫双堆, 刘利军, 洪坚平. 2008. 腐植酸-尿素络合物对尿素转化及氮素释放的影响. 中国生态农业学报, **16**(1): 109-112.
- 油伦成, 李东坡, 崔磊, 等. 2019. 不同硝化抑制剂组合对铵态氮在黑土和褐土中转化的影响. 植物营养与肥料学报, **25**(12): 2113-2121.
- 于飞, 施卫明. 2015. 近 10 年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析. 土壤学报, **52**(6): 1311-1324.
- 张务帅, 张建青, 谷端银, 等. 2015. 腐植酸复合肥对苹果生长及土壤肥力的影响. 水土保持学报, **29**(2): 177-182.
- 朱珊珊, 米俊珍, 赵宝平, 等. 2021. 腐植酸对干旱胁迫下燕麦叶片碳同化酶活性及产量的影响. 麦类作物学报, **41**(6): 722-730.
- 庄振东, 李絮花. 2016. 腐植酸氮肥对玉米产量、氮肥利用及氮肥损失的影响. 植物营养与肥料学报, **22**(5): 1232-1239.
- Abalos D, Jeffery S, Sanz-Cobena A, et al. 2014. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **189**: 136-144.
- Akladios SA, Mohamed HI. 2018. Ameliorative effects of calcium nitrate and humic acid on the growth, yield component and biochemical attribute of pepper (*Capsicum annuum*) plants grown under salt stress. *Scientia Horticulturae*, **236**: 244-250.

- Beeckman F, Motte H, Beeckman T. 2018. Nitrification in agricultural soils: Impact, actors and mitigation. *Current Opinion in Biotechnology*, **50**: 166–173.
- Billard V, Etienne P, Jannin L, *et al.* 2014. Two biostimulants derived from algae or humic acid induce similar responses in the mineral content and gene expression of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Journal of Plant Growth Regulation*, **33**: 305–316.
- Chen DL, Suter HC, Islam A, *et al.* 2010. Influence of nitrification inhibitors on nitrification and nitrous oxide (N_2O) emission from a clay loam soil fertilized with urea. *Soil Biology & Biochemistry*, **42**: 660–664.
- Dong LH, Cordova-Kreylos AL, Yang JS, *et al.* 2009a. Humic acids buffer the effects of urea on soil ammonia oxidizers and potential nitrification. *Soil Biology & Biochemistry*, **41**: 1612–1621.
- Dong LH, Yuan HL. 2009b. Nitrogen incorporation into lignite humic acids during microbial degradation. *Geomicrobiology Journal*, **26**: 484–490.
- Ertani A, Pizzeghello D, Baglieri A, *et al.* 2013. Humic-like substances from agro-industrial residues affect growth and nitrogen assimilation in maize (*Zea mays* L.) plantlets. *Journal of Geochemical Exploration*, **129**: 103–111.
- Fillery IRP, Vlek PLG. 1986. Reappraisal of the significance of ammonia volatilization as an N loss mechanism in flooded rice fields. *Fertilizer Research*, **9**: 79–98.
- Liu ML, Wang C, Liu XL, *et al.* 2020. Saline-alkali soil applied with vermicompost and humic acid fertilizer improved macroaggregate microstructure to enhance salt leaching and inhibit nitrogen losses. *Applied Soil Ecology*, **156**: 10.
- Manzoor A, Khattak RA, Dost M. 2014. Humic acid and micronutrient effects on wheat yield and nutrients uptake in salt affected soils. *International Journal of Agriculture and Biology*, **16**: 991–995.
- Susilawati K, Ahmed OH, Majid NM, *et al.* 2009. Effect of organic based N fertilizer on dry matter (*Zea mays* L.), ammonium and nitrate recovery in an acid soil of Sarawak, Malaysia. *American Journal of Applied Sciences*, **6**: 1289–1294.
- Vaccaro S, Muscolo A, Pizzeghello D, *et al.* 2009. Effect of a compost and its water-soluble fractions on key enzymes of nitrogen metabolism in maize seedlings. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **57**: 11267–11276.
- Wallace AJ, Armstrong RD, Grace PR, *et al.* 2020. Nitrogen use efficiency of ^{15}N urea applied to wheat based on fertilizer timing and use of inhibitors. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **116**: 41–56.
- Xia LL, Lam SK, Chen DL, *et al.* 2017. Can knowledge-based N management produce more staple grain with lower greenhouse gas emission and reactive nitrogen pollution? A meta-analysis. *Global Change Biology*, **23**: 1917–1925.
- Zhu ZL, Chen DL. 2002. Nitrogen fertilizer use in China: Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **63**: 117–127.
-
- 作者简介 肖富容,男,1997年生,硕士研究生,主要研究方向植物营养与新型肥料。E-mail: xiaofurong0911@163.com
责任编辑 魏中青
-