东北农业科学　2025,50(3):50-55
Journal of Northeast Agricultural Sciences　DOI: 10.16423/j.cnki.1003-8701.2025.03.007

腐植酸在稻田生产中的应用研究进展

杨永志[1],侯立刚[1,2],李　闯[3],刘晓亮[1,2],刘　亮[1,2],王斯文[1],张静静[1],
孙一楠[1],马　巍[1,2]*
(1. 吉林省农业科学院水稻研究所,吉林 公主岭 136100;2. 农业农村部盐碱土改良与利用(东北内陆盐碱地)重点实验室,吉林 公主岭 136100;3. 吉林协联农业科技有限公司,吉林 镇赉 137399)

摘　要:水稻是世界上最重要的粮食作物之一,其产量和品质对保障我国粮食安全十分重要。腐植酸含有多种活性功能基团,在农业领域具有广泛的应用。本文从腐植酸改良稻田土壤、促进水稻生长发育、改善水稻对金属元素吸收、促进氮肥吸收、提高水稻产量、改善稻米品质以及提升水稻耐盐碱能力等方面进行了综述,旨在为腐植酸在稻田生产中的应用提供理论依据。

关键词:水稻;腐植酸;营养吸收;抗逆性;产量;品质
中图分类号:S511　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:2096-5877(2025)03-0050-06

Research Progress on the Application of Humic Acid in Rice Production

YANG Yongzhi[1], HOU Ligang[1,2], LI Chuang[3], LIU Xiaoliang[1,2], LIU Liang[1,2], WANG Siwen[1], ZHANG Jingjing[1], SUN Yinan[1], MA Wei[1,2]*
(1. *Rice Research Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Gongzhuling* 136100; 2. *Key Laboratory of Saline-Alkali Soil Reclamation and Utilization in Northeast China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China, Gongzhuling* 136100; 3. *Jilin Union Agricultural Technology Co., Ltd., Zhenlai* 137399, China)

Abstract: Rice is one of the most important food crops in the world. Its yield and quality are crucial for ensuring China's food security. Humic acid contains many kinds of active groups, which is widely used in the agricultural field. In this paper, the effect of humic acid on rice was reviewed, including the influence of soil properties, rice growth, absorption of metal element, nitrogen fertilizer utilization, rice yield and quality, and salt-alkali resistance. The review aims to provide a theoretical basis for the application of humic acid in rice paddy production.

Key words: *Oryza sativa*; Humic acid; Nutrient absorption; Adversity resistant; Yield; Quality

水稻是全球最重要的三大粮食作物之一,水稻稳产是我国粮食安全的重要保障。稻米富含大量营养和微量元素,对人类健康起重要作用[1]。水稻的产量和品质不仅受植物遗传因素的影响,还受外部环境条件的制约[2]。为了提高水稻产量,人们采用过量施肥、增施氮肥、减少有机肥施用量等措施,这不仅会导致肥料利用率低,还引发了农田生态问题,最终导致水稻减产和品质下降。因此,如何提高水稻肥料利用率、保障农业健康可持续发展,已成为当前亟待解决的关键问题。

收稿日期:2025-04-01
基金项目:吉林省科技发展计划项目(20220202025NC)
作者简介:杨永志(1988-),男,助理研究员,硕士,主要从事水稻耕作与栽培研究工作。
通信作者:马　巍,E-mail: mawei19840249@163.com

腐植酸主要由胡敏酸和富里酸组成,含有多种活性基团,具有较强的吸附能力和离子交换能力[3]。在农业方面,腐植酸常用于改善土壤质量、维持土壤肥力[4]。研究表明,施用腐植酸可显著提高肥料的利用率,增强作物光合效率,促进作物生长,从而提高作物的产量和品质[5]。此外,腐植酸在增强作物抗盐碱胁迫能力方面也表现出明显效果[6-7]。本文系统综述了近年来腐植酸在稻田生产中的应用研究进展,旨在为腐植酸的科学施用提供理论依据和技术参考。

1　腐植酸对稻田土壤性质的影响

1.1　腐植酸改善土壤理化性质

在稻田土壤中施用腐植酸类肥料,可改善土壤结构,促进土壤团粒结构的形成,提高土壤的透气性和保水能力[8]。研究表明,稻田土壤施用腐

植酸可有效增大盐渍土表层土(0~20 cm)和中层土(20~40 cm)的孔隙度、降低土壤容重,改良土壤性质;施用腐植酸后,表层土和中层土的土壤容重分别比对照组降低0.08 g/cm^{3}和0.11 g/cm^3[9]。土壤容重作为表征土壤物理性质的重要指标,与土壤水、肥、气、热状况密切相关,因此,利用腐植酸降低盐渍土容重对于调控水稻生产具有重要意义。此外,施用腐植酸能迅速增加稻田土壤有机质含量,研究表明,在浙江红壤中增施腐植酸,有机质含量较对照增加了19.60%[10]。总之,施用腐植酸有利于稻田土壤团粒结构的形成,改善土壤结构、提高土壤有机质含量、提升土壤保水、透气性能。

1.2　腐植酸提高土壤微生物活性

微生物是驱动土壤养分循环的重要参与者[11],其与植物交互作用是促进植物生长的关键因素。在农田生态系统中,添加腐植酸不仅影响土壤中微生物群落结构,而且可以协同提升土壤养分循环和作物产量。腐植酸能够增加土壤微生物数量,提高土壤酶活性。研究表明,在稻田土壤中施用腐植酸能迅速促进微生物的生长代谢和群落活性,增施腐植酸显著增加土壤中革兰氏阳性菌和总微生物含量,分别增加20.46%和7.42%[10]。腐植酸提高水稻生长前期(苗期和分蘖期)土壤细菌数量、微生物总数量和细菌/真菌值[12],还显著增强稻田土壤微生物分泌的过氧化氢酶活性[13]。过氧化氢酶作为微生物适应和抵御逆境的关键酶类,在清除活性氧过程中发挥重要作用。提升土壤中的过氧化氢酶活性,有助于减轻水稻在逆境条件下遭受的氧化损伤。

2　腐植酸对水稻生长发育的影响

水稻光合效率是决定其产量的重要因素[14]。腐植酸能增强水稻叶片的光合作用,不同腐植酸添加量对水稻叶片光合作用的影响不同。当腐植酸添加量低于10 kg/hm^2,水稻抽穗期叶片的净光合速率随腐植酸添加量的增加而增加,当腐植酸添加量达到10 kg/hm^{2}时,光合速率显著提高,但叶绿素的合成受到抑制[15]。控释尿素施用量为180 kg/hm^{2}配施腐植酸用量150 kg/hm^2,单位面积水稻穗数、分蘖成穗率、穗粒数、结实率、千粒重均有所增加,且产量达到最高[16]。

穗分化期是水稻穗部形态建成的关键时期[17]。抽穗期越长,病虫害发生的可能性越大;而灌浆期越长,光合产物积累越多,有利于产量提高。因此,水稻抽穗期越集中,越有利于产量提高。在水稻不同生长期施用腐植酸水溶性肥料,水稻的始穗期、齐穗期和成熟期均有所提前,生育期缩短2~6 d[18]。在孕穗期喷施含腐植酸的叶面肥可增加水稻抽穗期、灌浆期及成熟期的穗、叶、茎、根的干重;在孕穗期喷施含氨基酸和腐植酸叶面肥提高水稻成熟期农艺性状,株高、茎粗、叶绿素含量、剑叶长和宽均比仅施用氨基酸叶面肥分别提高4.59%、6.86%、7.68%、11.41%和14.41%[19]。腐植酸添加量在一定范围内时,收获期的株高、叶绿素含量、有效穗数、结实率和产量均呈先增加后降低的趋势[19],表明腐植酸的添加要适量。追施含腐植酸的液体肥料能增强水稻的返青能力,增加有效分蘖数,提高植株的生物量[20]。

3　腐植酸对水稻金属元素吸收的影响

3.1　腐植酸促进必需金属元素的吸收

腐植酸能够促进水稻吸收养分,改善营养状态,增强植物的抗逆性,提高激素调控水平,促进生长,还可提高水稻对必需金属元素的吸收能力[21]。钾可以调节细胞渗透压平衡、酶活性。作物缺钾会导致植株矮小、叶面积下降以及多种生理功能紊乱[22]。施用腐植酸后,稻田土壤速效钾含量增加了19.94%[23]。锌和铁是水稻生长的必需元素。锌是300多种酶和蛋白质的结构辅助因子,在生物膜稳定性、生物代谢和基因表达调控等生理功能中发挥重要作用;铁在植物呼吸作用、光合作用和金属蛋白催化反应中发挥重要功能。水稻缺乏锌、铁会导致植株矮小、生长不良、产量和品质下降[24]。腐植酸施入稻田土壤后,水稻体内必需元素铜、铁、锌、钙的含量随腐植酸施用量的增加有显著增加,但是腐植酸施用量对镁含量的影响不显著[15]。

3.2　腐植酸对重金属元素的吸附和稳定化作用

重金属是具有相对高原子质量、高密度的天然化学元素,当其含量超过特定阈值时会对水稻细胞造成毒害作用[25]。稻田土壤中的重金属元素普遍高于旱地土壤,例如砷、镉、铅、汞等。水稻是重要的粮食作物,如果水稻中积累过量的重金属,会严重影响人类健康。腐植酸对重金属离子的吸附作用与腐植酸浓度、植物个体、土壤组成和土壤pH值有关。

镉(Cd)、砷(As)和汞(Hg)是农田生态系统中危害性最强的重金属污染物,其在环境中的过量

积累会对植物、动物和人类健康构成严重威胁。其中，镉污染在水稻种植区尤为普遍。由于水稻对镉具有特殊的吸收和转运机制，加之镉在环境中难以降解，通过稻米进入食物链后会对人体健康造成严重损害[26]。研究表明，腐植酸中的胡敏酸（HA）和富里酸（FA）对镉污染修复具有重要作用。当土壤中胡敏酸与富里酸的比例（HA/FA）≥4/6时，可显著钝化土壤镉活性，使有效态镉含量降低15.2%~33.3%，同时水稻籽粒镉积累量相应减少，而HA/FA≤2/8时，则相反[27]。腐植酸可抑制苗期水稻根系对镉的吸收，尤其是同时添加硒和腐植酸的情况下，镉吸收抑制效果最为显著[28]。施用腐植酸还可以降低苗期和成熟期水稻植株中镉的含量[29-30]。砷在土壤中大量积累会导致土壤性质发生改变、影响水稻产量和品质。土壤中腐植酸的施用会增加砷在土壤中的迁移，促进甲基化砷的形成，减少水稻根系对砷的吸收。施用腐植酸可显著恢复砷导致的氧化损伤、增强抗坏血酸-谷胱甘肽库的功能，增强抗氧化防御和乙二醛酶的活性[6]。汞在特定环境下形成甲基汞，甲基汞可穿过血脑屏障，具有高神经毒性、致癌性和免疫毒性。水稻具有很强的汞富集能力，食用汞污染的稻米会对人体健康造成严重影响。腐植酸添加到土壤中增加了汞在土壤中的迁移和甲基化，减少汞在水稻根系中的吸收[31]，可降低水稻籽粒中重金属汞的含量[32]。

4 腐植酸对水稻氮素吸收的影响

氮素是制约水稻生长的重要元素之一。腐植酸与氮肥配合施用能促进作物对氮的吸收及作物生长[33]。腐植酸氮肥能够降低土壤氮素流失，增加表层土壤的氮素残留。研究表明，施用腐植酸后，土壤全氮含量达到0.97 g/kg，比对照组增加了35.12%[9]。腐植酸促进硝酸盐在水稻体内的传递[7]。腐植酸通过促进硝酸盐载体蛋白的表达和改变一些动力学参数促进NO_3^-的吸收[34]，还可通过降低水稻根表面的pH值促进H^+/NO_3^-的共转运[34]。还有研究表明，腐植酸通过提高细胞质膜H^+-ATP酶活性，增加根对硝酸盐的吸收，从而促进了细胞分裂素从根向地上部的转运，有利于水稻的生长[7]。

5 腐植酸对水稻耐盐碱能力的影响

盐碱土是盐土和碱土的统称，一般指土壤碱化度大于20%或含盐量高于2 g/kg。盐碱土严重影响水稻的生长发育，限制了产量和品质的提升。

5.1 腐植酸提高水稻耐盐能力

盐土容重一般偏大，结构紧实、渗透性差，作物很难在盐土中生长，改良与利用较为困难。一方面，腐植酸有较高的阳离子交换量，在土壤中吸附大量阴离子，减少土壤含盐量。另一方面，腐植酸能够改良土壤团聚结构，提高土壤疏松度，抑制盐分上升，发挥隔盐作用[9]。研究表明，施加腐植酸可显著降低表层（0~20 cm）土壤含盐量，比对照组降低了12.43%。高盐环境使水稻幼苗和根系中钾离子含量和K^+/Na^+降低、丙二醛积累，而施用腐植酸可以通过维持离子稳态、增加体内渗透液含量，从而提高水稻耐盐能力[35]。

5.2 腐植酸提高水稻耐碱能力

碱土的高pH环境严重抑制水稻生长。腐植酸可以显著降低强碱性土壤的pH值[9]，同时还能够促使水稻幼苗发根，提高植株对养分和水分的吸收能力，从而提高水稻的耐碱能力[36]。研究表明，施用40 mg/L腐植酸能够促进盐碱胁迫下水稻的生长发育[37]。腐植酸通过降低钠离子毒性、提高K^+/Na^+、调控渗透压保护剂浓度、提高抗氧化酶活性，降低盐碱环境造成的氧化损失，最终提高水稻耐盐碱能力[37]。

6 腐植酸对水稻产量和稻米品质的影响

6.1 腐植酸提高水稻产量

喷施腐植酸液体肥或添加腐植酸有机肥能有效提高水稻千粒重、穗粒数、结实率，从而提高水稻产量。研究表明，腐植酸可以提高日本粳稻产量[38]。在水稻不同生育时期施用腐植酸水溶肥的水稻产量比对照组增产20~85 kg/667 m^2，增幅3.01%~12.78%[18]。与仅喷施含氨基酸叶面肥组相比，在孕穗期喷施含氨基酸和腐植酸的叶面肥料，水稻产量显著增加[19]。多次低剂量施加腐植酸也可以提高水稻产量[39]。施用腐植酸缓释型复合肥料处理组水稻增产26.6%~52.9%[40]。施用2 000 kg/hm^2腐植酸改良剂（有效腐植酸含量51%），水稻产量和千粒重分别达到7 380 kg/hm^2和23.4 g，较对照分别提高了27.95%和13.59%，并且与施用脱硫石膏组和施用土壤改良剂组相比，施用腐植酸处理组获得了最大的产值和产投比[9]。

腐植酸不仅增加肥沃土壤中的水稻产量，还能增加盐碱土壤中的水稻产量。研究表明，腐植酸提高胁迫环境下光合作用效率和氮代谢，促进根系生长，从而提高水稻产量[41]。

6.2　腐植酸改善稻米品质

除了提高水稻产量,改善稻米品质也一直是稻米产业发展的重要工作目标。稻米品质主要包括碾米品质、外观品质、蒸煮品质和营养品质。施用不同剂量的腐植酸均能显著提升水稻“徽两优丝苗”整精米率,由对照的63.26%提升到66.68%~68.44%;施用不同剂量腐植酸肥后,水稻的垩白粒率、垩白度、直链淀粉含量均不同程度降低[42]。研究表明,腐植酸包膜缓释肥能够有效降低水稻“桃优香占”的垩白粒率和垩白度[43]。施用腐植酸可提高稻米整精米率、碱消值和胶稠度,降低垩白粒率、垩白度和直链淀粉含量[44]。

7　展　望

近年来,腐植酸已被广泛用于水稻生产过程中,但其具体机理仍不明确,需进一步研究腐植酸影响水稻生产的调控机制。此外,需要结合水稻的生产规律、施肥原则、土壤特性等进行合理施用,以达到促进水稻生长、提高抗逆性、提高产量和提升品质的要求。

参考文献:

[1] SINGH G, KAUR N, KHANNA R, et al. 2Gs and plant architecture: breaking grain yield ceiling through breeding approaches for next wave of revolution in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2024, 44(1): 139-162.

[2] MACKON E, MACKON G, MA Y F, et al. Recent insights into anthocyanin pigmentation, synthesis, trafficking, and regulatory mechanisms in rice (*Oryza sativa* L.) caryopsis[J]. Biomolecules, 2021, 11(3): 394.

[3] 才金玲,谢玉洁,刘兰军,等.腐殖酸的性质及应用进展[J].应用化工,2023,52(12):3418-3422,3427.
CAI J L, XIE Y J, LIU L J, et al. Nature of humic acid and its application progress[J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52 (12): 3418-3422,3427. (in Chinese)

[4] BHATT P, SINGH V K. Effect of humic acid on soil properties and crop production- A review[J]. Indian Journal of Agricultural Sciences, 2022, 92(12): 1423-1430.

[5] LIU J, XIAO L, GUAN F, et al. Psychrophilic microbial consortium addition promotes degradation of returned rice straw at tillering stage[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2023, 23(3): 4620-4631.

[6] HASANUZZAMAN M, NOWROZ F, RAIHAN M R H, et al. Application of biochar and humic acid improves the physiological and biochemical processes of rice (*Oryza sativa* L.) in conferring plant tolerance to arsenic-induced oxidative stress[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(1): 1562-1575.

[7] TAVARES O C H, SANTOS L A, FERREIRA L M, et al. Humic acid differentially improves nitrate kinetics under low- and high-affinity systems and alters the expression of plasma membrane H+/ATPases and nitrate transporters in rice[J]. Annals of Applied Biology, 2017, 170(1): 89-103.

[8] 陈剑,薛仁风,赵阳,等.腐殖酸不同施用量对小豆生长及产量的影响[J].东北农业科学,2023,48(6):54-58,106.
CHEN J, XUE R F, ZHAO Y, et al. Effects of different humic acid dosage on growth and yield of adzuki bean[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(6): 54-58,106.

[9] 庞喆,王启龙,李娟.不同土壤改良剂对陕北低洼盐碱地土壤理化性质及水稻产量和经济效益的影响[J].中国农业科技导报,2023,25(6):174-180.
PANG Z, WANG Q L, LI J. Effects of different soil amendments on soil physical and chemical properties, rice yield and economic benefits in low-lying saline alkali land in northern Shaanxi[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(6): 174-180. (in Chinese)

[10] 朱铭,刘琛,林义成,等.不同调理剂组合对浙江红壤土壤肥力、微生物群落多样性和水稻产量的影响[J].浙江农业学报,2022,34(6):1258-1267.
ZHU M, LIU C, LIN Y C. Effects of conditioning agents on soil fertility, microbial community diversity and rice yield in red soil [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2022, 34(6): 1258-1267. (in Chinese)

[11] 卓鑫鑫,刘昆,周舟,等.土壤微生物对水稻根系形态活力影响的研究进展[J].东北农业科学,2023,48(2):78-85.
ZHUO X X, LIU K, ZHOU Z, et al. Research progress on the effect of soil microorganisms on root morphology and activity in rice[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(2): 78-85.

[12] 崔月贞,吴玉红,郝兴顺,等.汉中盆地水稻产量和土壤微生物对新型肥料的响应[J].西南农业学报,2019,32(11):2592-2599.
CUI Y Z, WU Y H, HAO X S, et al. Response of rice yield and soil microorganisms to new fertilizations in Hanzhong Basin[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(11): 2592-2599. (in Chinese)

[13] 张玉菲.改良剂与水分管理对潜育化稻田土壤还原性物质及微生物群落特征影响[D].武汉:华中农业大学,2023.
ZHANG Y F. Effects of amendments and water management on soil reducing substances and microbial community characteristics in submerged rice fields[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[14] 徐孟亮,丁绿萍,罗佳,等.超级稻超高产形成的光合机制研究进展[J].生命科学研究,2021,25(5):386-392.
XU M L, DING L P, LUO J. Research progress of photosynthetic mechanisms of super high-grain-yield rice[J]. Life Science Research, 2021, 25(5): 386-392. (in Chinese)

[15] 张沁怡,李文蔚,阳晶,等.腐殖酸对水稻剑叶光合特性、必需元素和产量的影响及其相关性研究[J].云南农业大学学报(自然科学),2015,30(2):185-191.
ZHANG Q Y, LI W W, YANG J, et al. Effects of humic acid on the photosynthetic characteristics, essential elements and yield

of *Oryza sativa* L. and their correlation analysis[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2015, 30(2): 185-191. (in Chinese)

[16] 张秀顺,鲍红春,钱永德.不同氮肥配施对垦鉴稻6号生长发育及产量的影响[J].北方农业学报,2018,46(5):62-67.
ZHANG X S,BAO H C, QIAN Y D. Effects of different nitrogen application rates on growth, development and yield of Kenjiandao No.6[J]. Journal of Northern Agriculture, 2018, 46(5): 62-67. (in Chinese)

[17] 王斯文,柏程瀚,吉林爽,等.秸秆还田条件下水分调控对水稻生长发育和稻田生态系统的影响研究[J].东北农业科学,2024,49(6):1-6.
WANG S W, BAI C H, JI L S, et al. A Review of the effects of water regulation under straw returning to fields on rice growth, yield and field ecosystem[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2024, 49(6): 1-6. (in Chinese)

[18] 徐际根.不同叶面肥在水稻上试验效果初报[J].耕作与栽培,2023,43(1):93-95,100.
XU J G. Preliminary report om the effect of different foliar fertilizers on rice[J]. Tillage and Cultivation, 2023, 43(01): 93-95, 100. (in Chinese)

[19] 刘陈晨,冯学宁,黄明彩.含有机质叶面肥料对水稻生物量及产量的影响[J].安徽农业科学,2022,50(4):162-164,168.
LIU C C, FENG X N, HUANG M C. Effects of foliar fertilizer with organic matter on biomass and yield of rice[J]. J. Anhui Agric. Sci., 2022, 50(4): 162-164,168. (in Chinese)

[20] 张梦君,陈辉,王亮亮,等.含腐殖酸液体肥料对水稻返青分蘖的影响[J].肥料与健康,2023,50(4):56-59.
ZHANG M J, CHEN H, WANG L L, et al. Effects of liquid fertilizer containing humic acid on rice regreening and tillering[J]. Fertilizer and Health, 2023, 50(4): 56-59. (in Chinese)

[21] 孔丽丽,侯云鹏,都钧,等.不同酸土改良剂对玉米产量、干物质积累和土壤pH值的影响[J].东北农业科学,2023,48(5):1-5.
KONG L L, HOU Y P, DU J, et al. Effects of different amendments of acidic soil on maize yield, dry matter accumulation and soil pH[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(5): 1-5. (in Chinese)

[22] 矫金航,张雅琳,王赞彭,等.水稻耐盐响应中钾运输载体的研究进展[J].西北植物学报,2023,43(10):1791-1800.
JIAO J H, ZHANG Y L, WANG Z P, et al. Advances in potassium carriers to salt stress in rice[J]. Acta Bot.Boreal.-Occident. Sin, 2023, 43(10): 1791-1800. (in Chinese)

[23] 朱芸,傅庆林,郭彬,等.腐殖酸和脱硫石膏对滨海盐土及水稻产量的影响[J].浙江农业科学,2022,63(6):1139-1143.
ZHU Y, FU Q L, GUO B, et al. Effects of humic acid and desulfurized gypsum on coastal saline soil and rice yield[J]. Zhejiang Agricultural Sciences, 2022, 63(6): 1139-1143. (in Chinese)

[24] 孟璐,孙亮,谭龙涛.水稻锌铁转运蛋白ZIP基因家族研究进展[J].遗传,2018,40(1):33-43.
MENG L, SUN L, TAN L T. Progress in ZIP transporter gene family in rice[J]. Hereditas, 2018, 40(1): 33-43. (in Chinese)

[25] 郭俊,潘虎,张晓明,等.微生物耐受重金属的作用机制[J].东北农业科学,2023,48(1):136-139.
GUO J, PAN H, ZHANG X M, et al. Advance on mechanisms for heavy metals tolerance of microorganisms[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(1): 136-139. (in Chinese)

[26] DENG X, CHEN B, CHEN Y X, et al. Flag leaf cell wall functional groups and components play a crucial role in the accumulation and translocation of Cd in rice grain via foliage application of humic acid[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 239: 113658.

[27] 胡秀芝,宋毅,王天雨,等.腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值[J].环境科学,2024,45(1):439-449.
HU X Z, SONG Y, WANG T Y, et al. Regulation effects of humus active components on soil cadmium availability and critical threshold for rice safety[J]. Environmental Science, 2024, 45(1): 439-449. (in Chinese)

[28] ZHANG H Y, XIE S Y, BAO Z Y, et al. Underlying dynamics and effects of humic acid on selenium and cadmium uptake in rice seedlings[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(1): 109-121.

[29] YU Y, WAN Y N, CAMARA A Y, et al. Effects of the addition and aging of humic acid-based amendments on the solubility of Cd in soil solution and its accumulation in rice[J]. Chemosphere, 2018, 196: 303-310.

[30] YU Y, YUAN S L, WAN Y N, et al. Effect of humic acid-based amendments on exchangeable cadmium and its accumulation by rice seedlings[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2017, 36(5): 1308-1313.

[31] RAN S, HE T R, ZHOU X, et al. Effects of fulvic acid and humic acid from different sources on Hg methylation in soil and accumulation in rice[J]. Journal of Environmental Sciences, 2022, 119: 93-105.

[32] 王明明,王剑,张层,等.农用地土壤重金属污染调理剂及叶面阻控剂集成技术的筛选研究[J].中国资源综合利用,2023,41(6):50-52.
WANG M M, WANG J, ZHANG C, et al. Study on screening of integrated technology for heavy metal pollution regulators and leaf surface inhibitors in agricultural land soil[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2023, 41(6): 50-52. (in Chinese)

[33] 梁帅,郭景丽,郎朗,等.腐殖酸与缓释剂复配复合肥对玉米产量的影响[J].肥料与健康,2021,48(6):57-59,63.
LIANG S, GUO J L, LANG L, et al. Effects of compound fertilizer with humic acid and slow-release agent on yield of maize [J]. Fertilizer and Health, 2021, 48(6): 57-59,63. (in Chinese)

[34] NARDI S,ERTANI A,FRANCIOSO O,等.植物-土壤的交互作用:腐殖质的作用[J].腐植酸,2022(3):60-66,115.
NARDI S, ERTANI A, FRANCIOSO O, et al. Soil-root cross-talking: the role of humic substances[J]. Humic Acid, 2022(3): 60-66,115. (in Chinese)

[35] ABU-RIA M, SHUKRY W, ABO-HAMED S, et al. Humic acid modulates ionic homeostasis, osmolytes content, and antioxidant defense to improve salt tolerance in rice[J]. Plants-Basel, 2023, 12(9): 1834.

[36] 赵小春.腐殖酸对水稻产量和品质的影响[J].农业技术与装备,2022(7):28-29.
ZHAO X C. Effect of humic acid on yield and quality of rice[J]. Agricultural Technology and Equipment, 2022(7): 28-29. (in Chinese)

[37] SHUKRY W M, ABU-RIA M E, ABO-HAMED S A, et al. The efficiency of humic acid for improving salinity tolerance in salt sensitive Rice (*Oryza sativa*): growth responses and physiological mechanisms[J]. Gesunde Pflanzen, 2023, 75(6): 2639-2653.

[38] ZHENG E N, ZHU Y H, HU J Y, et al. Effects of humic acid on japonica rice production under different irrigation practices and a TOPSIS-based assessment on the Songnen Plain, China [J]. Irrigation Science, 2022, 40(1): 87-101.

[39] LIAO L X, LIU B Y, HAMEED F, et al. Improving rice yield by frequently applying humic acid liquid organic fertilizer at low fertilization rate[J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2020, 57(6): 1705-1710.

[40] 田文涛,党程成,郝蓉蓉,等.缓释肥一次性施肥在水稻上增产增效的农学基础研究[J].江苏农业科学,2023,51(4):71-77.
TIAN W T, DANG C C, HAO R R, et al. Agronomic basic research on increasing rice yield and efficiency by one-time application of slow-release fertilizer[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(4): 71-77. (in Chinese)

[41] DE CASTRO T A V, BERBARA R L L, TAVARES O C H, et al. Humic acids induce a eustress state via photosynthesis and nitrogen metabolism leading to a root growth improvement in rice plants[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 162: 171-184.

[42] 葛晓阳.不同腐殖酸施入量对水稻产量及品质的影响[J].特种经济动植物,2023,26(11):34-35,79.
GE X Y. Effects of different humic acid application rates on rice yield and quality[J]. Pecial Economic Animals and Plants, 2023, 26(11): 34-35,79. (in Chinese)

[43] 田文涛,胡玉婷,严鹏,等.环境和缓控释肥复合处理对稻米品质的影响[J].江苏农业科学,2024,52(14):54-63.
TIAN W T, HU Y T, YAN P, et al. Effects of combined treatment of environment and slow-release fertilizer on rice quality [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(14): 54-63. (in Chinese)

[44] 龙继锐,郭夏宇,李建武,等.不同生长调节剂对水稻产量和品质的影响[J].作物研究,2023,37(4):317-321.
LONG J R, GUO X Y, LI J W, et al. Effects of different rice growth regulators on rice yield and quality[J]. Crop Research, 2023, 37(4): 317-321. (in Chinese)

(责任编辑:范杰英)