



腐植酸有机肥创制及其在酸化土壤玉米种植中的应用效果研究

王婷婷^{1,2} 吴文涛^{1,2} 李善玲³ 辛言君¹ 赵自航^{1,2} 白静^{1,2} 周丽^{1,2}

1 史丹利农业集团股份有限公司 临沭 276700

2 山东省绿色肥料技术创新中心 临沭 276700

3 临沭县科技创新服务中心 临沭 276799

摘要:为解决酸化土壤导致的玉米生长受阻、氮肥利用率低及产量下降问题,本研究基于腐植酸增效原理,结合喷浆造粒工艺创制一种矿物源腐植酸有机肥,并探究其在酸化土壤玉米种植中的应用效果。供试土壤pH 4.7,设置空白对照(CK)、常规施肥(CF)及腐植酸有机肥+常规施肥(CHA)3个处理,开展玉米田间肥效试验,连续种植玉米—小麦—玉米3季作物。结果表明,CHA处理使土壤pH从初始4.7提升至5.2,土壤酸度降低10.6%,交换性酸含量降低15.4%;与CF处理相比,玉米氮肥利用率从29.07%提升至46.55%,增幅达17.48%;玉米籽粒产量10378.96 kg/hm²,较CF处理提升12.34%。该腐植酸有机肥可有效改良酸化土壤,提升氮肥利用率和玉米产量,为酸化土壤玉米高产提供技术支撑。

关键词:腐植酸有机肥;喷浆造粒;酸化土壤;玉米;氮肥利用率;产量

中图分类号: TQ440.2⁺², S513 **文章编号:** 1671-9212(2025)06-0076-06

文献标识码: A

DOI: 10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2025.06.008

Research on the Production Creation of Humic Acid Organic Fertilizer and Its Application Effects
in Maize Planting in Acidified Soil

Wang Tingting^{1,2}, Wu Wentao^{1,2}, Li Shanling³, Xin Yanjun¹, Zhao Zihang^{1,2}, Bai Jing^{1,2}, Zhou Li^{1,2}

1 Stanley Agricultural Group Co. Ltd., Linshu, 276700

2 Shandong Green Fertilizer Technology Innovation Center, Linshu, 276700

3 Linshu Science and Technology Innovation Service Center, Linshu, 276799

Abstract: In order to solve the problems of stunted maize growth, low nitrogen fertilizer utilization efficiency, and decreased yield caused by soil acidification, a mineral derived humic acid organic fertilizer was made based on the principle of humic acid efficiency enhancement combined with the spray granulation process, and its application effect on maize planting in acidified soil was investigated. Three treatments, which used acidified soil (initial pH 4.7) as the experimental base, were set up, i.e., blank control (CK), conventional fertilization (CF), and humic acid organic fertilizer combined with conventional fertilization (CHA). Field fertilizer efficiency experiments were conducted on maize, and relevant indicators were measured after three consecutive seasons of maize wheat maize crops. The results showed that CHA treatment increased the soil pH value from the initial 4.7 to 5.2, which reduced soil acidity by 10.6%, and decreased exchangeable

[基金项目] 山东省重点研发计划——科技示范工程(项目编号2022SFGC0302),国家重点研发计划(项目编号2023YFD150050506),2024年沂蒙创新领军人才岗位项目。

[收稿日期] 2025-09-08

[作者简介] 王婷婷,女,1986年出生,高级农艺师,主要从事新型肥料研发工作,E-mail:tingtingw1122@163.com。



acid content by 15.4%. Compared to the CF treatment, the nitrogen use efficiency of maize increased from 29.07% to 46.55%, with an increase of 17.48%. The yield of maize kernels reached $10378.96 \text{ kg}/\text{hm}^2$, which increased by 12.34% compared to the CF treatment. This humic acid organic fertilizer could effectively improve acidified soil, enhance nitrogen use efficiency and maize yield, and provide technical support for high-quality and high-yield maize in acidified soil.

Key words: humic acid organic fertilizer; spray granulation; acidified soil; maize; nitrogen use efficiency; yield

土壤酸化已成为制约我国农业可持续发展的重要问题，在长期过量施用化学氮肥的区域尤为突出。酸化土壤会破坏土壤胶体结构，引起土壤板结，使根系伸展困难、发根力弱、缓苗困难，进而影响其吸收功能，最终导致植物长势衰弱、产量下降^[1]。山东省临沂市临沭县作为农业大县，其耕地酸化问题严重，全县 pH 小于 5.5 的耕地面积达 37.3 万亩，占耕地总面积的 43%，严重威胁当地农业生产。

在现有酸化土壤改良措施中，石灰虽能快速中和土壤酸性，但长期施用易导致土壤板结、钙镁养分失衡，且改良效果短暂。腐植酸富含羧基、酚羟基、酮基等官能团，具有调节土壤 pH、螯合微量元素、优化微生物群落及提升养分利用率的多重功能。然而，当前市售腐植酸肥料普遍存在矿物源腐植酸水溶性差、生物腐植酸有效成分低等问题，难以同时满足土壤改良与养分高效供给的双重需求^[2]。基于此，本研究创新采用“化学改性矿物源腐植酸+生物降解矿物源腐植酸”复合配伍模式，结合喷浆造粒工艺创制高效腐植酸有机肥，系统探究其改良酸化土壤、提升玉米氮肥利用率及增产效果，旨在为解决酸化土壤玉米生产难题提供技术方案，同时为腐植酸类肥料在粮食作物上的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

微生物菌粉：包含地衣芽孢杆菌、哈茨木霉、巨大类芽孢杆菌等，有效活菌数 $> 5.0 \text{ 亿}/\text{克}$ ，均为市售。

作物品种：玉米品种为“登海 685”，小麦品种为“临麦 9 号”，均为市售。

风化煤：产地新疆，有机质含量 72.5%，总腐

植酸含量 61.2%，市售。

复合肥：N-P₂O₅-K₂O 分别为 26-10-12、18-18-18、28-6-6 3 种配方，均由史丹利农业集团股份有限公司生产。

1.2 试验地点和土壤基础理化性质

试验在山东省临沂市临沭县黄金斗村酸化土壤试验基地进行，土壤类型为棕壤，种植制度为玉米—小麦—玉米轮作（玉米生育期 6 月—10 月，小麦生育期 10 月一次年 5 月），2023 年 6 月玉米种植时布置试验，至 2024 年 10 月玉米收获时结束。

试验前采集 0 ~ 40 cm 土层土壤样品，测定基础理化性质：pH 4.7、有机质 10.8 g/kg、碱解氮 62.5 mg/kg、速效磷 13.8 mg/kg、速效钾 89.2 mg/kg、交换性酸 3.9 cmol/kg。

1.3 腐植酸有机肥的创制

1.3.1 复合腐植酸料浆制备

复合腐植酸料浆制备基于前期试验结果，按矿物源腐植酸料浆与生物降解矿物源腐植酸料浆按质量比 1 : 8 混合而成，具体制备方法如下。

化学改性矿物源腐植酸料浆：称取 10 g 风化煤原料，分散于 50 mL 去离子水中，加入氢氧化钾调节 pH 至 9 ~ 10，置于 95 °C 恒温水浴锅，磁力搅拌 2 h 得溶液 A；向溶液 A 中添加腐植酸质量 4% 的甲醛及 8% 的亚硫酸钠，混合均匀后转移至高压反应釜，在 95 °C、0.1 MPa 条件下搅拌 2 h，随后于 121 °C 高压灭菌 20 min，冷却后即得矿物源腐植酸料浆。采用重铬酸钾法^[3] 测定其腐植酸溶解度为 92.3%。

生物降解矿物源腐植酸料浆：将风化煤经球磨机破碎后过 100 目筛，用 10 mol/L 硝酸浸泡氧化 48 h，随后用去离子水反复洗涤至中性（pH 7.0），80 °C 烘干 12 h，再经 121 °C 灭菌 30 min，



得到预处理煤样。称取 80 g 预处理煤样、10 g 矿物源腐植酸料浆，加入 10 mL 复合发酵菌液及 30 g 营养料，调节水分含量至 65%，置于 28 ℃ 恒温培养箱发酵 10 d。发酵结束后，采用 GB/T 35107—2017 方法，测定其游离腐植酸含量为 78.6%。

1.3.2 微生物菌液制备

将供试菌粉与糖蜜按质量比 2 : 1 混合，分散于去离子水中，置于 28 ℃ 恒温摇床（120 r/min）振荡 24 h，制备有效活菌数 ≥2 亿 /mL 的菌液。

1.3.3 原料组成

腐植酸有机肥原料按重量份计为：复合腐植酸料浆 75 份、微量元素（硼酸：硫酸锌：硫酸亚铁 = 1 : 1 : 1）0.3 份、变性淀粉（羟丙基淀粉）15 份、微生物菌液（地衣芽孢杆菌：哈茨木霉 = 1 : 1）0.3 份。

1.3.4 喷浆造粒工艺

按重量份比例，将复合腐植酸料浆、微量元素、变性淀粉加入双螺杆混合机，搅拌 30 min 得喷浆料浆；将料浆输送至双螺杆造粒机进行喷浆造粒；造粒后颗粒经 2 ~ 4 mm 滚筛筛选，筛下物（< 2 mm）及超大颗粒（> 4 mm）返回混合机重新造粒；选取合格颗粒置于冷却滚筒中冷却 20 min，至颗粒温度 ≤30 ℃；最后将微生物菌液通过雾化喷头均匀涂覆于颗粒表面（菌液喷涂量为颗粒质量的 0.5%），自然晾干，经检验合格后包装入库，即得成品腐植酸有机肥。

1.4 试验设计

1.4.1 试验处理

试验设置 3 个处理，每个处理 3 次重复，每个重复面积 20 m²（4 m × 5 m），随机区组排列，除施肥外，其他田间管理措施一致，具体处理如下：

空白对照处理（CK）：不施用任何肥料，仅进行常规田间管理（如浇水、除草、病虫害防治）。

常规施肥处理（CF）：玉米底肥一次性施用 26-10-12 复合肥，每公顷用量 750 kg。小麦底肥施用 18-18-18 复合肥，每公顷用量 525 kg；返青期追施 28-6-6 复合肥，每公顷用量 225 kg。

腐植酸有机肥处理（CHA）：玉米底肥一次性施用 26-10-12 复合肥 + 腐植酸有机肥，复合

肥每公顷用量 750 kg，腐植酸有机肥每公顷用量 1500 kg。小麦底肥施用 18-18-18 复合肥 + 腐植酸有机肥，复合肥每公顷用量 525 kg，腐植酸有机肥每公顷用量 1500 kg；返青期追施 28-6-6 复合肥，每公顷用量 225 kg。

1.4.2 测定指标与方法

土壤酸度：于 2024 年 10 月玉米收获后，采集 0 ~ 40 cm 土层土壤样品，采用电位法（土水比 1 : 2.5）^[4] 测定土壤 pH；采用氯化钾提取 - 中和滴定法^[4] 测定交换性酸含量；按公式计算土壤酸度降低幅度：土壤酸度降低幅度 = （处理前交换性酸 - 处理后交换性酸）/ 处理前交换性酸 × 100%^[5]。

氮肥利用率：采用差减法计算氮肥利用率，公式为：氮肥利用率（%）=（施肥处理植株氮吸收量 - 空白对照植株氮吸收量）/ 施氮肥量 × 100%。

植株氮吸收量：于每季玉米成熟期选取代表性植株（每个重复 3 株），分茎、叶、籽粒 3 部分采样，105 ℃ 杀青 30 min 后 80 ℃ 烘干至恒重，测定各器官干重；采用凯氏定氮法^[5] 测定各器官氮含量，计算单株地上部分总氮吸收量。

玉米生长与产量指标：于 2024 年 8 月玉米大喇叭口期，每个小区随机取 3 点，每点取 3 株，测定株高（卷尺测量，从地表至雄穗顶端）、茎粗（游标卡尺测量，距地表 10 cm 处）、叶片 SPAD 值（便携式叶绿素仪 SPAD-502，测定功能叶中部）；于 2024 年 10 月收获期，测定单株穗数、穗粒数、百粒重（电子天平，精度 0.1 g），并实测各小区产量，按小区面积折算公顷产量。

有效活菌数：采用 NY/T798—2004《复合微生物肥料》5.3.2 中规定的检测方法。

1.5 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2021 和 SPSS 19.0 软件进行数据统计和差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 创制腐植酸有机肥的基本理化性质

本研究创制的腐植酸有机肥基本理化性质见表



1。可以看出，该有机肥有机质含量 62.3%、有效活菌数 5.2 亿/g、可溶性腐植酸含量 40.3%，颗粒强度 28.0 N，物理稳定性良好，可避免运输、仓储及田间施用过程中发生颗粒破碎与结块现象，保障其施用便利性与养分释放稳定性。

表 1 腐植酸有机肥的基本理化性质

Tab.1 Basic physical and chemical properties of humic acid organic fertilizer

指标	数值
有机质含量 (%)	62.3
有效活菌数 (亿/g)	5.2
可溶性腐植酸含量 (%)	40.3
水分含量 (%)	3.5
pH	7.2
颗粒强度 (N)	28.0
总钾含量 (%)	4.0

2.2 腐植酸有机肥对酸化土壤酸度的影响

连续种植玉米—小麦—玉米 3 季作物后，不同处理对酸化土壤酸度的影响见表 2。可以看出，CK 处理土壤 pH 略有下降，从 4.7 降至 4.6；交换性酸略有增加，说明自然种植条件下土壤酸化仍在持续。CF 处理土壤 pH 与 CK 处理趋势一致；交换性酸增加至 4.1 cmol/kg，说明单纯施用化学复合肥无法缓解土壤酸化，甚至可能因化肥残留加剧酸化程度。而 CHA 处理显著降低土壤酸度，土壤 pH 提升至 5.2，较初始值提高 10.6%；交换性酸从 3.9 cmol/kg 降至 3.3 cmol/kg，降低 15.4%。这一结果源于复合腐植酸的协同作用：矿物源腐植酸经碱提改性后，大量羧基、酚羟基可快速中和土壤 H⁺，同时吸附交换性 Al³⁺；生物降解矿物源腐植酸经菌剂发酵后产生小分子有机酸，可进一步调节土壤胶体电荷平衡，抑制交换性酸与有毒金属离子生成，形成“快速中和 + 长效调节”的土壤酸度改良机制。

表 2 不同处理对酸化土壤酸度的影响

Tab.2 Effects of different treatments on acidity of acidified soil

处理	土壤 pH			交换性酸		
	初始	改良后	提升幅度 (%)	初始 (cmol/kg)	改良后 (cmol/kg)	降低幅度 (%)
CK	4.7	4.6b	-2.1	3.9	4.0a	-2.6
CF	4.7	4.6b	-2.1	3.9	4.1a	-5.1
CHA	4.7	5.2a	10.6	3.9	3.3b	15.4

注：（1）同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，下同。（2）表中数据为 2024 年 10 月玉米收获后测定。

2.3 腐植酸有机肥对玉米氮肥利用率的影响

不同处理对玉米氮肥利用率的影响见表 3。可以看出，CF 处理玉米氮肥利用率仅为 29.07%，这与常规化肥氮素易发生淋失、挥发及固定有关，酸性土壤中铵态氮易转化为硝态氮，随降水或灌溉淋失至深层土壤，同时土壤胶体吸附的 Al³⁺、Fe³⁺ 会与氮肥中的铵离子竞争吸附位点，降低氮素有效性^[6]；而 CHA 处理显著提升氮肥利用率，达 46.55%，较 CF 提高 17.48%。从植株氮吸收量看，CHA 处理下玉米地上部总吸氮量为 237.43 kg/hm²，分别较 CK、CF 处理提高 61.90%、16.72%，且叶片、茎秆、籽粒的氮吸收量均显著高于其他处理。这主要得益于：腐植酸中羧基、酚羟基等官能团可与铵

离子形成稳定的氢键吸附体系，减少氮素淋失与挥发；同时，腐植酸可螯合土壤中的 Al³⁺、Fe³⁺，避免其与铵离子竞争，提升氮素有效性^[7]；此外，微生物菌液中的有益菌在土壤中定殖，可激活土壤脲酶活性，加速有机氮矿化为可吸收的无机氮，为玉米生长提供持续的氮素供给，进而提升氮肥利用率。

2.4 腐植酸有机肥对玉米生长指标的影响

不同处理对玉米生长关键指标的影响见表 4。可以看出，与 CK 相比，CF 处理玉米株高、茎粗、叶片 SPAD 值分别提升 13.7%、20.0%、19.4%，表明施用常规化肥可在一定程度上促进玉米生长；而 CHA 处理促进玉米生长效果更为显



著, 株高达 261.2 cm, 较 CK 增加 10.6%, 较 CF 增加 -2.76%; 茎粗 3.2 cm, 较 CK 增加 28.0%, 较 CF 增加 6.67%; 叶片 SPAD 值 57.7, 较 CK 提升 27.4%, 较 CF 提升 6.65%。这一结果与 CHA 改善土壤酸度与玉米根系生长环境密切相关: 一方面,

CHA 处理能够提升土壤 pH, 减少有害离子对玉米根系的毒害, 促进根系伸长与侧生根萌发, 增强养分吸收能力; 另一方面, CHA 提供的长效养分与微生物菌液促进养分转化, 提升了叶片光合作用效率。

表 3 不同处理对玉米氮肥利用率的影响

Tab.3 Effects of different treatments on nitrogen use efficiency of maize

处理	施氮量 (kg/hm ²)	叶片吸氮量 (kg/hm ²)	茎秆吸氮量 (kg/hm ²)	籽粒吸氮量 (kg/hm ²)	地上部吸氮量 (kg/hm ²)	氮肥利用率 (%)
CK	0	41.55c	4.38c	100.72c	146.65c	—
CF	195	50.14b	5.09b	148.10b	203.33b	29.07
CHA	195	59.63a	6.14a	171.66a	237.43a	46.55

注: 表中数据为 2024 年 10 月玉米收获后测定。

表 4 不同处理对玉米生长指标的影响

Tab.4 Effects of different treatments on maize growth indicators

处理	株高 (cm)	茎粗 (cm)	叶片 SPAD 值
CK	236.2b	2.5c	45.3c
CF	268.6a	3.0b	54.1b
CHA	261.2a	3.2a	57.7a

注: 表中数据为 2024 年 8 月玉米大喇叭口期测定。

2.5 腐植酸有机肥对玉米产量的影响

不同处理对玉米产量及产量构成因素的影响

见表 5。可以看出, 与 CK 相比, CF 处理玉米穗粒数、百粒重及小区产量分别提升 32.15%、14.07%、45.63%, 而 CHA 处理玉米穗粒数、百粒重及小区产量分别提升 38.53%、17.43%、63.60%; CHA 处理与 CF 相比, 产量显著提高 12.34%。在产量构成因素中, 穗粒数对产量的贡献最大。CHA 处理通过改善玉米授粉期养分供给, 为雌穗分化提供充足养分; 此外, 腐植酸可以调节植株体内激素平衡, 减少秃尖长度, 显著增加穗粒数, 最终实现增产。

表 5 不同处理对玉米产量及产量构成因素的影响

Tab.5 Effects of different treatments on yield and yield composition factors of maize

处理	单株穗数 (穗)	穗粒数 (粒)	百粒重 (g)	小区产量 (kg)	折合公顷产量 (kg/hm ²)	较 CK 增产 (%)	较 CF 增产 (%)
CK	1.1a	423c	30.63c	12.69c	6344.37	—	—
CF	1.1a	559b	34.94b	18.48b	9239.08	45.63	—
CHA	1.2a	586a	35.97a	20.76a	10378.96	63.60	12.34

注: 表中数据为 2024 年 10 月玉米收获后测定。

2.6 腐植酸有机肥作用机制分析

本研究创制的腐植酸有机肥在酸化土壤玉米种植中的应用效果显著, 其核心优势源于“原料配伍—工艺创新—功能协同”的技术体系, 其作用机制与应用价值可从以下三方面探讨。

2.6.1 复合腐植酸的土壤酸度协同改良机制

“化学改性矿物源腐植酸 + 生物降解矿物源

腐植酸”复合模式, 是有效降低土壤酸度的关键。矿物源腐植酸经氢氧化钾改性后, 溶解度提升至 92.3%, 大量羧基、酚羟基可通过质子化反应快速中和土壤 H⁺, 同时通过离子交换作用吸附交换性 Al³⁺, 减少有毒离子对玉米根系的毒害^[8]; 生物降解矿物源腐植酸经菌剂复配发酵后, 小分子腐植酸(分子量 < 5000 Da)占比提升, 可深入土壤胶体



内部，通过电荷吸附调节土壤阳离子交换量，抑制交换性酸生成^[9]。二者复合形成“快速中和+长效缓冲”的协同改良机制，最终使土壤pH从4.7提升至5.2，为玉米根系生长创造适宜的pH环境。

2.6.2 腐植酸—微生物—根系协同提升氮肥利用率机制

CHA处理将玉米氮肥利用率从29.07%（CF处理）提升至46.55%，其核心在于构建了“腐植酸保氮—微生物转化—根系吸氮”的三维协同体系。一方面，复合腐植酸的官能团可与铵离子形成稳定的氢键吸附体系，减少氮素淋失与挥发；另一方面，微生物菌液中的有益菌可在土壤中定殖，分泌脲酶、硝酸还原酶等，加速有机氮矿化与无机氮转化^[10]。

2.6.3 喷浆造粒工艺的缓释控效机制

喷浆造粒工艺不仅提升肥料颗粒稳定性（颗粒强度28.0 N，水分含量3.5%），还通过变性淀粉形成“缓释膜”，实现氮素的精准释放。该工艺控制使料浆快速固化形成颗粒，同时变性淀粉在颗粒表面形成半透性保护膜，调控氮素释放速率，避免常规化肥“前期氮素过剩导致徒长、后期氮素不足导致脱肥”的问题，这是其较CF增产12.34%的重要原因。

3 结论

（1）本研究创制的腐植酸有机肥，经“矿物源腐植酸碱提改性—生物降解矿物源腐植酸—喷浆造粒”工艺制备，产品有机质≥60%、游离腐植酸≥80%、有效活菌数≥4亿/g、总钾含量4.0%，能满足酸化土壤玉米种植的需求。

（2）施用该腐植酸有机肥可有效改良酸化土壤，使土壤pH从4.7提升至5.2，土壤酸度降低10.6%，交换性酸含量降低15.4%。

（3）施用该腐植酸有机肥可显著提升玉米氮肥利用率，从常规施肥的29.07%提升至46.55%，增幅达17.48%。

（4）施用该腐植酸有机肥可显著增加玉米产量，较空白对照提升63.60%，较常规施肥增产

12.34%，同时促进玉米生长。

综上，本研究创制的腐植酸有机肥可有效解决酸化土壤玉米生产中土壤酸度偏高、氮肥利用率低、产量下降等问题，具备广阔的推广应用前景。需要指出的是，目前该腐植酸有机肥仍处于实验室研发与田间试验阶段，尚未进入产业化环节，其生产成本未进行系统性核算。未来可进一步开展不同玉米品种、不同酸化程度土壤的适用性研究，进一步优化施肥量与施用时期，持续提升该技术成果的产业化应用价值。

参考文献

- [1] 郑希平. 增产8%，临沭酸化耕地治理见成效[N]. 农村大众，2025年5月13日.
- [2] 洪国胜. 土壤酸化原因、阻控技术及改良策略分析[J]. 安徽农学通报，2025，31(3)：80～84.
- [3] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国农业科技出版社，2000.
- [4] 全国肥料和土壤调理剂标准化技术委员会. 矿物源腐植酸肥料中可溶性腐植酸含量的测定：GB/T 35107—2017[S]. 北京：中国标准出版社，2017.
- [5] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京：中国农业出版社，2000.
- [6] Liu X, Zhang M, Li Z, et al. Inhibition of urease activity by humic acid extracted from sludge fermentation liquid[J]. Bioresource Technology, 2019, 290: 121767.
- [7] 周丽，高进华，解学仕，等. 不同土壤调理剂对酸化土壤改良及在黄瓜品质和产量上的应用效果[J]. 腐植酸，2024(1)：40～44, 49.
- [8] 赵蕾蕾，舒艺周，漆增连，等. 酸性土壤施用含聚合磷肥料对玉米生长性状及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料，2025(4)：162～170.
- [9] 冯泽坤，袁学武，马莉，等. 4种环境材料复合配施对北方果园酸化土壤性状改良研究[J]. 腐植酸，2025(4)：18～26.
- [10] 李丹，曹云，汪吉东，等. 土壤调理剂对酸性土壤的改良及夏玉米增产效果[J]. 中国土壤与肥料，2025(1)：170～177.