

黑土区玉米养分高效利用根际综合调控技术

编制说明

一、目的意义

本标准旨在系统性地规范在东北黑土区，以“根际结构优化”为核心的养分高效与健康培育综合调控技术流程。其主要目的包括：确立从土壤深松耕作、根际激发剂施用、微生物菌剂强化的大豆/玉米间作、根际信号物质精准调控，到配套水肥管理及收获后处理的全链条技术规范。为黑土地保护利用提供一套科学、可操作、可复制的技术指南，明确关键环节的技术参数和质量要求，指导农业技术人员、种植户、农业企业等相关方科学、高效地开展黑土保育与可持续利用工作，实现根际微环境有效改善、养分库容显著提升、土壤健康持续培育和作物稳产增效。

我国东北黑土区是保障国家粮食安全的“压舱石”，但长期集约化耕作与不当管理导致耕层变薄、肥力下降、pH 值失衡及温室气体排放加剧等严峻问题，根际结构（根系-微生物-土壤）不匹配已成为制约养分利用效率和土壤健康的核心瓶颈。本标准的制定与推广，将为黑土地综合治理提供强大的技术支撑，助力“藏粮于地、藏粮于技”战略落地，对保障国家粮食安全和黑土资源永续利用具有重大战略意义。本标准整合了深松改土、根际激发剂活化、微生物菌剂协同间作、信号物质定向调控等先进实用技术，形成了一套以根际生态重塑为核心的综合解决方案。它的发布将加速这些前沿科技成果的转化与落地，

引领黑土健康培育与养分高效利用技术的发展方向。本标准强调“用养结合”和“绿色安全”原则，通过优化根际结构、强化微生物生态功能、减少化学投入品过度依赖等措施，在提升产量的同时，注重培肥地力、固碳减排和保护生态环境，符合现代农业绿色、可持续发展的要求。通过应用本标准，可有效破解根际结构与功能失衡的瓶颈，显著提高玉米等主要作物的产量和品质，同时降低环境风险，从而增加农民和农业生产经营主体的经济收入，并实现生态效益与经济效益的协同提升，具有显著的社会、经济和生态综合效益。

二、工作简况：包括任务来源、协作单位、主要工作过程、起草组成员及其所做的主要工作等。

1. 任务来源

本标准由中国科学院南京土壤研究所承担的中国科学院战略性先导科技专项子课题“作物根系水肥高效利用体系构建和技术（XDA28020301）”项目支持。

2. 协作单位

中国科学院沈阳应用生态研究所，中国科学院东北地理与农业生态研究所，东北农业大学。

3. 主要工作过程

黑土区玉米养分高效利用根际综合调控技术团体标准的编制过程可以分为以下步骤：

1) 资料收集和调研：对国内外黑土保护利用、根际生态调控、

深松耕作、微生物菌剂应用及根际信号物质等领域的技术文献、政策法规和行业标准进行调研，了解东北黑土区土壤退化现状、现有技术模式推广情况及本标准的技术需求。

2) 分析和试验验证：根据收集的资料和调研成果，团队成员进行分析和试验验证，筛选深根际激发剂施用、大豆/玉米间作、根际信号物质调控等核心技术组合，在典型黑土区开展定位试验，验证各项技术及其集成模式对根际构型、养分库容、微生物群落、作物产量的影响，确定最优技术参数。

3) 综述报告和技术经济论证：整理和总结试验和验证结果，编制综述报告，进行技术和经济论证，评估团体标准的可行性和效益，包括成本评估、社会效益评估等。

4) 草拟文本和征求意见：基于综述报告，编写团体标准的初步文本，征求各方意见和建议，进行修改和完善。

4. 起草组成员及其所做的主要工作

根据2023年4月3日中国土壤学会关于印发《中国土壤学会团体标准管理办法（试行）》的通知精神，于2025年10月成立以中国科学院南京土壤研究所，中国科学院沈阳应用生态研究所，中国科学院东北地理与农业生态研究所，东北农业大学为标准起草单位；施卫明，陆玉芳，阴黎明，王超，田春杰，张颖，信秀丽，王健等为主要起草人的标准编制工作组。于2025年12月8日将《黑土区玉米养分高效利用综合调控技术》立项申请表和标准草稿提交专家组审查，于2025年12

月23日通过了来自南京农业大学、江苏省农业科学院、辽宁省农业科学院、黑龙江省农业科学院、吉林省农业科学院的5位专家审查，专家论证委员会查阅了标准主编单位提交的立项申请表、标准草案内容，经质询、讨论，形成以下论证意见：

- 一、 标准主编单位提供的材料齐全、内容完整；
- 二、 标准主编单位对国内外方法标准及文献进行了充分调研；
- 三、 标准定位准确，技术路线可行。
- 四、 标准草案内容框架合理，章节内容待立项后须进一步细化、优化、完善。

2025 年 12 月 26 日根据《中国土壤学会团体标准管理办法（试行）》规定，经自愿申请、专家评审论证，确定《黑土区玉米养分高效利用综合调控技术》1 项团体标准符合立项要求，准予立项。

2026 年 1 月至 2026 年 6 月 25 日，起草组对标准草稿进一步细化和优化完善，并对外征求意见，共征集到 22 项意见，意见来自江苏省农科院、南京农业大学、南京林业大学、云南农业大学、河南农业大学、黑龙江省农业科学院、辽宁省农业科学院、吉林省农业科学院、山东省农业科学院、嘉兴市农业科学院 10 家单位，意见采纳 22 项，部分采纳 0 项，未采纳 0 项，具体意见详见意见汇总表。

2026 年 6 月 25 日至 2026 年 7 月 9 日，起草组根据行业相关专家征求的意见，对标准稿进行了修改完善，形成了正式的征求意见稿，提交中国土壤学会对外征求意见。

二、标准编制原则和确定标准主要内容（如技术指标、参数、公式、性能要求、试验方法、检验规则等）的论据

黑土区玉米养分高效利用根际综合调控技术团体标准的主要内容和技术指标的确定依据主要基于实地调研、查阅资料、试验论证等。

1. 实地调研

依托东北黑土区长期定位试验平台，联合相关科研机构在典型黑土带建立了根际结构优化与健康培育长期定位试验基地。平台已连续开展多年田间定位试验，累计采集土壤样品 2000 余份、植株样品 1000 余份。对土壤物理结构（容重、团聚体）、化学性质（有机质、pH、速效氮磷钾）、生物特性（微生物群落、根系构型）及作物农艺性状（株高、茎粗、产量）等指标进行系统监测。

2. 查阅资料

团队成员需系统搜集各类合规文件与学术资料，涵盖国家规范、行业准则、地方规程及国内外相关研究成果，全面梳理同类技术参数与管控要求，深入剖析现有研究成果与实践经验，为规范各项指标的划定提供理论支撑与参考依据。

3. 试验论证

根据标准中拟定的深松耕作参数、激发剂施用浓度与时期、间作配比、信号物质施用方案等技术内容，适配相应的检测手段与仪器设备，在定位试验基地开展定点试验与重复性验证，全方位检验各技术条款与参数设定的科学性。结合试验数据动态优化参数范围，保障最终规范内容贴合生产实际，具备落地价值。

4. 实地试验

结合东北黑土区实际种植条件，布设标准化大田试验小区。选用玉米为主栽作物，设置常规耕作、深松、间作、根际信号物质等处理，开展长期定点观测试验。系统监测根际微环境变化、作物养分利用效率、产量及土壤健康状况等核心指标，为技术规范的综合效果评价提供可靠的大田验证数据支撑。

三、主要试验（或验证）的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效果；

1. 深松联合根际激发剂增效技术

1.1 根际激发剂的筛选

本条规定了根际激发剂的优选类型，即优先选择糖类和氨基酸类物质。该规定的确定主要基于已发表的国内外文献 meta 分析结果与相关机理研究。通过对国内外已发表根系分泌物激发效应相关研究进行 meta 分析，系统评估了单糖（葡萄糖等）、氨基酸（甘氨酸/谷氨酸等）、有机酸（柠檬酸等）及酚类（对羟基苯甲酸等）等不同根系分泌物类型对土壤有机质矿化、微生物活性及养分转化的影响（图 1）。分析结果如下：（1）激发效应强度差异显著。根系分泌物总体上显著促进了土壤有机质分解，平均增加 39.0%，表现为正激发效应（ $P<0.001$ ）。不同分泌物类型之间激发效应强度存在显著差异：氨基酸添加诱导的正激发效应显著高于单糖和有机酸添加，而酚类物质添加则引起了负激发效应（-14.4%）。（2）微生物活性响应差异。根系分泌物添加使

微生物生物量碳平均增加 26.7% ($P<0.001$), 细菌和真菌生物量均显著提升 ($P<0.05$)。碳获取酶 (β -1,4-葡萄糖苷酶) 和氮获取酶 (β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶) 活性分别提升 17.0% 和 37.9%, 表明糖类和氨基酸可全面激活微生物分解代谢功能。(3) 土壤氮素有效性变化。根系分泌物添加显著降低了土壤无机氮含量 ($P<0.001$), 表明微生物在激发效应过程中对有效氮产生了固定或同化作用。其中氨基酸同时提供碳源和有机氮源, 更有利于缓解微生物碳氮共同限制, 从而维持持续的激发效应。

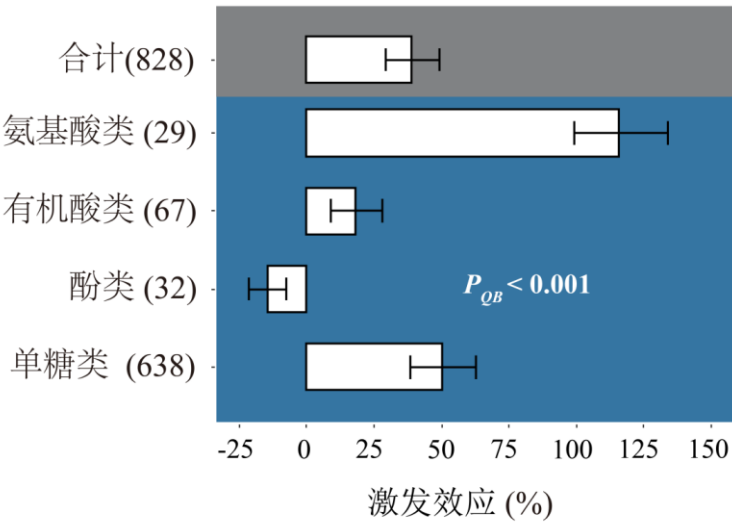


图 1 根系激发效应对土壤有机质矿化的影响

单糖分子结构简单, 可快速被微生物同化用于合成代谢, 产生较高的微生物生长效率和周转速率, 从而增强激发效应; 氨基酸同时提供碳源和有机氮源, 其元素组成与微生物生物量化学计量比最为匹配, 符合微生物化学计量分解假说, 因而诱导的激发效应最强。基于上述综合分析证据与机理认识, 本标准将糖类和氨基酸列为首选根际激发

剂类型，氨基酸综合效果最优，糖类次之。

1.2 根际激发剂对玉米生长与氮转化的影响

针对根际激发剂添加比例与增效效应，依托“中国科学院黑土保护与利用创新工程”昌图实验站（123.97°E，42.81°N）开展定位试验。由表 1 可知，根际激发剂糖类（L-甘露糖）和氨基酸（L-谷氨酰胺）按体积比 1/3 混合的添加明显提高土壤总氮矿化速率。开花期土壤总氮矿化速率高于拔节期，表明随着温度的提高，土壤有机氮矿化能力提高。这是由于根际激发剂显著提高了根际土壤微生物生物量及活性。总氮矿化速率的提高使得土壤无机氮含量显著提高，表明土壤氮可利用性在整个生育期得到改善。根际激发剂的施用使得玉米侧根比根长和比根表面积显著增加（表 2）。这可能与养分可利用、根际微生物群落结构的改变等有关。拔节期比根长和比根表面积的增加幅度显著高于开花期，表明玉米的觅养策略因生育期而异，在拔节期玉米须根性状对于养分吸收而言具有较高的重要性。

表 1 根际激发剂施用土壤总氮矿化速率及无机氮含量的影响

	拔节期		开花期	
	总氮矿化速率 (mg N kg ⁻¹ day ⁻¹)	无机氮 (mg N kg ⁻¹)	总氮矿化速率 (mg N kg ⁻¹ day ⁻¹)	无机氮 (mg N kg ⁻¹)
根际激发剂	1.46 ± 0.9	98 ± 10	2.11 ± 1.5	89 ± 1.0
对照	0.41 ± 0.5	45 ± 6	0.53 ± 0.0	66 ± 0.7

表 2 根际激发剂施用对玉米须根系比根长和比根表面积的影响

	拔节期		开花期	
	比根长 (m g ⁻¹)	比根表面积 (cm ² g ⁻¹)	比根长 (m g ⁻¹)	比根表面积 (cm ² g ⁻¹)
根际激发剂	110 ± 10	1008 ± 50	71 ± 5	1084 ± 64
对照	65 ± 7	901 ± 61	58 ± 6	1037 ± 91

此外，根际激发剂的施用提高了玉米氮利用效率，减少了氮素流失，有利于肥料的减量施用，并有助于降低过量施肥带来的环境风险（表 3）。土壤有机质矿化速率提高引起的土壤无机氮可利用性的提高可能是氮利用效率提高的主要原因。另一方面，玉米须根比根长和比根表面积的增加有助于无机氮的高效吸收。总体上，根际激发剂的施用使得玉米籽实产量增加 3.3%。

表 3 根际激发剂施用对玉米氮利用效率和籽实产量的影响

	氮利用率（%）	产量（t ha ⁻¹ ）
根际激发剂	43.4 ± 5	12.6 ± 1
对照	42.5 ± 2	12.2 ± 5

1.2 根际激发剂经济效益分析

根际激发剂为由 L-谷氨酰胺和 L-甘露糖按体积比 0.3~1 混合，通过喷施或浇灌的方式作用于玉米根系周围土壤，其优势在于快速改善根际土壤微生物活性进而提高氮可利用性，并且对根系性状的改善有一定的效果，从而大幅提高无机氮吸收和利用效率，可节约肥料用量 8%，节省化肥成本约 15 元/亩，促进粮食增产 3%，增收约 36 元/亩。如东北黑土区 2.78 亿亩耕地中 10%的农田使用本项目研发的技术，肥料使用效率和粮食产量提升方面经济效益折算人民币约 13 亿元/年。

2. 微生物菌剂强化的大豆/玉米间作高产高效技术

2.1 试验材料与供试菌剂分类

表 4 各类试验供试菌剂参数

菌剂名称	菌株组成	有效活菌标准	功能特性
芽孢杆菌菌剂 (BAC)	胶冻样类芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌 RL-126	$\geq 5 \times 10^8 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$	活化土壤难溶性磷,提升土壤有效磷
生物磷钾肥 (BPA)	复合解磷、解钾功能菌群	$\geq 2 \times 10^8 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$, 有机质 $\geq 40\%$	同步活化土壤磷、钾,提升速效钾与有机质
复合微生物菌剂 (CMA)	多菌种复合菌群	$\geq 200 \times 10^3 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$	提升土壤有机质,优化土壤细菌群落结构
土壤修复菌剂 (SRM)	高效解钾胶冻样类芽孢杆菌	$\geq 500 \times 10^8 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$	改良贫瘠耕地,活化土壤速效养分
ARC 微生物菌剂	专用复合功能菌	$\geq 2 \times 10^8 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$	提升土壤全氮含量,提高细菌丰富度
WSW 盐碱专用菌剂	农用复合促生菌群	商品标准农用菌剂	降低盐碱地 pH、电导率,活化氮磷钾
EM 复合菌剂	芽孢杆菌、乳酸菌、酵母菌、放线菌	$\geq 200 \text{ 亿} \cdot \text{g}^{-1}$	促进根系发育,提升氮素利用效率
荧光假单胞杆菌	F1 生防菌株 CGMCC NO.8820	$\geq 5 \times 10^3 \text{ cfu/mL}$	抑制土传病害,提升青贮玉米产量与饲用品质
AM+R+B 复合菌群	AM 真菌 + 根瘤菌 + 芽孢杆菌	盆栽扩繁试验菌剂	玉米大豆间作体系提升氮磷吸收

供试玉米品种： MC121、先玉 1225、中玉 335、沃玉 3 号、河西制种玉米 R20-1

2.2 不同微生物菌剂筛选对比试验（分区域、种植模式）

2.2.1 河北丰润大豆玉米 6:4 带状复种菌剂筛选试验^[1]

试验设计：设置 CF 常规化肥对照、BAC、BPA、CMA、SRM、ARC 共 6 组；化肥统一减量 10%，各类菌剂施用 $15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1. 土壤养分提升：BAC 有效磷提升 27.20%；BPA 速效钾提升 53.33%；ARC 全氮提升 19.67%；
2. 土壤细菌多样性排序：ARC > SRM > CMA > BPA > BAC > CF；
3. 玉米产量排序：BPA > CMA > BAC > ARC > SRM > CF；
4. 大豆产量排序：BPA > CMA > SRM > ARC > BAC > CF；
5. 综合筛选结论：生物磷钾肥 BPA 综合改良、增产效果最优。

2.2.2 宁夏银北盐碱地覆膜配套菌剂筛选试验^[2]

试验共 8 组：CK 常规不覆膜、CKF 覆膜、XH 硝化抑制剂、XHF 覆膜 + 硝化、NM 脲酶、NMF 覆膜 + 脲酶、WSW 单施菌剂、WSWF 覆膜配菌剂。

1. 土壤改良：WSWF 处理铵态氮提升 37.14%、有效磷提升 118.17%；
2. 产量与水分利用：WSWF 玉米增产 29.3%，水分利用效率提升 34.3%；
3. 结论：覆膜 + WSW 菌剂是盐碱玉米田最优改良方案。

2.2.3 宁夏永宁引黄灌区减氮梯度 EM 菌剂试验^[3]

处理设置：F0 传统全量氮肥、F1 减氮 15%+EM、F2 减氮 30%+EM、F3 减氮 45%+EM、空白 CK；菌剂随灌溉分 2 次施用。

1. 干物质：F2 干物质最大积累速率较 F0 提升 10.607%，峰值提前 2.56 d；

2. 经济效益：两年平均净收益 $F2>F1>F0>F3>CK$;

3. 最优方案：减氮 30% 配 EM 复合菌剂。

2.2.4 玉米大豆单/间作复合菌群盆栽筛选^[4]

接种处理：单菌 A/R/B、双菌 A+R/A+B/R+B、三菌 A+R+B。

1. 玉米：A+B、R+B 干重、氮磷含量提升显著；三菌组合存在菌种竞争，效果下降；
2. 大豆：R+B 处理干重、氮磷提升幅度最大，可缓解间作抑制效应；
3. 结论：双菌种复合菌群促生效果优于单一、三菌种混合。

2.2.5 青贮玉米荧光假单胞杆菌试验^[5]

仅拌种处理组 vs 空白对照组，无用量梯度；菌剂拌种用量 75 mL/kg 种子。

施用后青贮玉米生物产量提升 6.45%，粗蛋白、淀粉含量显著提高，根际抗病有益毛壳菌丰度上升。

2.3 微生物菌剂对土壤氮素及相关理化性质改良效果

1. 氮素提升规律：ARC、WSW、EM 复合菌可显著提升土壤全氮，增幅 15%~48%；芽孢杆菌侧重解磷，对全氮提升幅度有限；根瘤菌复合菌群主要提升豆科固氮、间接供给玉米氮源。
2. 盐碱土壤改良：微生物菌剂降低土壤 pH、电导率，缓解盐分胁迫；覆膜与菌剂存在协同作用，土壤铵态氮、硝态氮提升幅度

增加 20% 以上。

3. 土壤微生物调控：菌剂提高变形菌、装甲菌相对丰度（与产量正相关）；降低放线菌、厚壁菌丰度（抑制养分吸收、大豆结瘤）。

2.4 菌剂施用对玉米干物质、氮磷吸收的调控作用

1. 干物质积累：所有菌剂处理均可提升玉米地上干物质；减氮 30% 配 EM 处理干物质总量较传统施氮提升 15.55%，花前干物质转运量、转运率显著提高，是增产核心途径。
2. 养分吸收机制：芽孢杆菌、AM 真菌活化土壤难溶性磷；根瘤菌与大豆共生固氮；双复合菌群改善根系总长、根表面积，扩大养分吸收面积。
3. 负面效应：三菌种混合菌群存在营养竞争，植株干重、氮磷积累量下降，田间生产不建议 3 类及以上菌种盲目复配。

2.5 菌剂用量 / 减氮配施对玉米产量及产量构成影响

2.5.1 不同菌剂处理玉米增产幅度及产量构成汇总

种植区域 / 栽培模式	施用菌剂类型	较常规对照增产幅度	核心增产性状
河北玉豆带状复种 ^[1]	BPA 生物磷钾肥	14.58%	穗粒数、百粒重同步显著提高
河北玉豆带状复种 ^[1]	CMA 复合菌剂	12.65%	穗粗、单穗重提升
河北玉豆带状复种 ^[1]	BAC 芽孢杆菌	8.42%	穗粒小幅增加

种植区域 / 栽培模式	施用菌剂类型	较常规对照增产幅度	核心增产性状
宁夏盐碱覆膜玉米 ^[2]	WSWF 覆膜 + 菌剂	29.30%	穗长、穗粗、百粒重全面提升
宁夏盐碱不覆膜玉米 ^[2]	WSW 单施菌剂	18.00%	穗粒数提升，穗长增幅有限
引黄灌区减氮15%+EM ^[3]	EM 复合菌剂 (F1)	4.34%	穗粒数、百粒重增加
引黄灌区减氮30%+EM ^[3]	EM 复合菌剂 (F2)	0.20%	改善穗秃尖，花前干物质转运量大增
青贮玉米拌种 ^[5]	荧光假单孢杆菌	6.45%	全株生物量提升
玉米大豆间作 ^[4]	R+B 双复合菌群	13.31%	根系发达，单穗重上升

2.5.2 宁夏永宁不同减氮梯度配施 EM 菌剂产量对比^[3]

处理编号	施肥方案	穗粒数 (粒)	百粒重 (g)	玉米产量 (kg · hm ⁻²)	相对 F0 增产幅度
CK	无肥空白对照	592.22	40.61	9759.29	-32.58%
F0	传统全量氮肥	640.00	39.15	14471.79	0
F1	减氮 15%+EM 菌剂	740.22	41.24	15153.01	+4.34%
F2	减氮 30%+EM 菌剂	756.00	35.00	14581.06	+0.20%
F3	减氮 45%+EM 菌剂	674.22	36.63	11033.85	-23.76%

2.5.3 河西制种田单一菌剂不同施用量产量对比^[2]

处理 施肥方案	百粒重 (g)	产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	较常规化肥增产
T1 常规化肥、不施菌剂	32.4	8245	0
T2 常规化肥 + $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-1}$ 菌剂	34.0	8707	+5.60%
T3 化肥减量 10%+ $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-1}$ 菌剂	32.6	8282	+0.45%

2.5.4 分种植模式产量差异分析

1. 大豆玉米带状复种：BPA 生物磷钾肥最优，同步提升玉米、大豆穗粒、百粒重；
2. 西北盐碱地：覆膜搭配菌剂增产幅度远高于单施菌剂，覆膜存在协同增效作用；
3. 灌区减肥栽培：减氮 15% 籽粒产量最高，减氮 30% 稳产且经济效益最优，减氮 45% 氮供给不足大幅减产；
4. 制种玉米：足量菌剂配合常规化肥才有明显增产，同步减氮无效果；
5. 青贮玉米：菌剂侧重提升全株生物量与饲用营养，籽粒增产幅度偏低。

2.6 最优菌剂类型、标准化施用综合结论

2.6.1 分区域 / 种植模式推荐菌剂方案

1. 黄淮海大豆玉米带状复种^[1]：生物磷钾肥 BPA， $15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，化肥减量 10%；

2. 宁夏银北盐碱滴灌玉米^[2]: 地膜覆盖 + WSW 微生物菌剂;
3. 宁夏引黄灌区普通籽粒玉米^[3]: EM 复合菌剂, 氮肥减量 30%;
4. 玉米大豆间作田^[4]: 根瘤菌 + 芽孢杆菌 (R+B) 双接种;
5. 青贮饲用玉米^[5]: 荧光假单孢杆菌拌种, 75 mL/kg 种子。

2.6.2 通用田间施用技术要点

1. 菌群搭配: 优先双菌种复合菌, 不使用 3 种及以上菌种复配, 避免种间竞争降低效果;
2. 盐碱地块必须配套地膜覆盖, 最大化改良土壤与增产效果;
3. 氮肥削减上限为 30%, 过度减氮会抵消菌剂活化养分的增产潜力;
4. 施用方式: 固体菌剂基肥沟施; 液体菌剂可拌种, 或拔节、大喇叭口期分两次随水滴灌。

3. 根际信号物质氮肥减施增效技术

3.1 根际信号物质丁香酸对玉米产量与氮肥利用率的影响

针对根际信号物质添加比例与氮肥减量效应, 依托“中国科学院黑土保护与利用创新工程”昌图实验站 (123.97°E, 42.81°N) 开展定位试验。试验设不施氮, 常规施氮 (纯氮 200 kg/hm²)、减氮 20%+2% 信号物质丁香酸、减氮 20%+5% 信号物质丁香酸 4 个处理, 每个处理 3 个重复。小区面积为 46m² (46m × 10m)。供试玉米品种为先玉 1483, 每年播种时, 各小区 N、P、K 肥料一次性施入。于成熟期测产, 采

集土壤与玉米植株样品，系统考察不同信号物质添加量对产量及氮素利用率（NUE）的影响。

在产量表现方面，常规施氮处理玉米籽粒产量为 12187 kg/hm²。减氮 20%并添加 2%信号物质丁香酸处理的产量为 12521 kg/hm²，与常规施氮处理产量持平，实现了减氮不减产的目标。减氮 20%并添加 5%信号物质丁香酸处理的产量为 12743 kg/hm²，较常规施氮处理增产 4.6%，较 2%添加处理增产 1.8%。结果表明，在减氮 20%条件下，2%和 5%信号物质丁香酸添加均可保证高产。

在氮素利用率方面，常规施氮处理的 NUE 为 26.3%。减氮 20%并添加 2%信号物质丁香酸处理的 NUE 提升至 34.8%，较常规施氮提高 8.5 个百分点（相对提升 32.3%）。减氮 20%并添加 5%信号物质处理的 NUE 达到 36.1%，较常规施氮提高 9.8 个百分点（相对提升 37.3%），较 2%添加处理再提高 1.3 个百分点。这表明信号物质丁香酸添加比例从 2%提高至 5%时，对产量与 NUE 有进一步的提升幅度，但差异不显著。

表 5 根际信号物质丁香酸对玉米产量与氮肥利用率的影响

处理	玉米产量（kg/hm ² ）	氮肥利用率%
常规施氮（CN）	12187 ± 192 a	26.3 ± 0.58 b
减氮 20%+2%丁香酸	12521 ± 154 a	34.8 ± 1.40 a
减氮 20%+5%丁香酸	12743 ± 350 a	36.1 ± 0.70 a

综合以上结果，在减氮 20%条件下，信号物质丁香酸添加比例 2%

即可实现稳产目标，NUE 提升约 32%；添加比例提高至 5%时，产量和 NUE 继续提升，但增幅收窄。从经济性和效果平衡角度考虑，1%~5%的添加区间可覆盖不同投入水平的生产需求，其中 2%为经济适用型方案，5%为高产高效型方案。本标准将信号物质用量确定为纯氮量的 1%~5%，氮肥减量确定为常规用量的 10%~20%，具有充分的数据支撑和实践依据。

3.2 根际信号物质丁香酸的经济效益评估

在减氮 20%条件下，根际信号物质的经济效益主要体现在肥料成本节约和增产增收两个方面。以常规施氮量 200 kg/hm²（纯氮）为基准，减氮 20%即减少纯氮用量 40 kg/hm²，按当前尿素市场价格（约 1.80 元/kg 纯氮）计算，每公顷可节约化肥投入 72 元；同时，添加 2%根际信号物质（纯氮量 2%即 4 kg/hm²，信号物质按市场均价 50 元/kg 计）的成本约为 200 元/hm²，二者相抵后投入成本净增约 128 元/hm²。

在增产方面，减氮 20%并添加 2%信号物质处理较常规施氮增产约 5.2%，按玉米籽粒 2.2 元/kg、常规产量 12187 kg/hm²计算，每公顷增产约 334 kg，增收约 735 元。综合考虑肥料成本节约 72 元/hm²、增产效益 735 元/hm²后，扣除信号物质投入净成本 200 元，仅以常规化肥与信号物质投入计，即可实现节本增收约 607 元/hm²。若进一步计入氮素利用率提升带来的环境效益（如减少氮素淋失的面源污染治理成本节约），其综合经济效益更为可观。综上，应用“减氮 20%+2%根际信号物质”模式，在保障产量的前提下，扣除物质投入成本后每公顷可实现节本增收，兼顾了经济效益与生态效益的统一。

四、标准涉及的相关知识产权说明；

无。

五、采用国际标准的程度与水平的简要说明，与现行有关法律法规和强制性标准的关系；

经查，目前我国已有涉及黑土保护、耕作技术、肥料施用及微生物菌剂等方面的基础性国家标准和行业标准，如 NY/T 3694-2020《东北黑土区旱地肥沃耕层构建技术规程》、GB 20287-2006《农用微生物菌剂》、NY/T 496-2010《肥料合理使用准则 通则》、NY/T 1105-2006《肥料合理使用准则 氮肥》、NY/T 3504-2019《肥料增效剂 硝化抑制剂及使用规程》等，DB21/T 3498-2021《黑土地厚沃耕层培育技术规程》等地方标准也为本标准制定提供了基础支撑。本标准在土壤采样、理化性状测定、肥料用量计算等操作环节中均遵循或引用了上述标准的相应条款。

传统黑土地保护标准多聚焦于单一耕作措施或施肥量调整，侧重于物理改良或化学补充的单一维度。本标准的核心创新在于将“根际结构优化”提升至技术体系核心，系统集成深松改土、微生物菌剂强化间作、根际信号物质调控等前沿技术，形成“物理耕作—生物强化—化学调控”三位一体的综合技术路径。创新性体现在三个方面：一是理念创新，突破重物理改良、轻生物调控的局限，以根际微生态系统为调控靶向，强调根系-微生物-土壤互作关系的系统优化；二是技

术突破，将根际信号物质作为氮素管理的核心增效手段写入标准，明确其添加比例（纯氮量 1%~5%）、施用方式及时效性要求；三是系统集成创新，围绕养分高效利用与土壤健康培育进行协同设计——深松创造物理空间，间作引入生物固氮，信号物质保障氮素根际滞留与高效吸收，三者互为条件、协同增效。本标准在遵循和引用上述基础标准的前提下，针对东北黑土区玉米养分高效利用提供了一套完整的、创新的技术解决方案，填补了该领域标准空白，不与现行法律法规和强制性标准存在冲突，符合国家黑土地保护利用工程的总体要求。

六、重大意见分歧的处理经过和依据；

无。

七、其他应予说明的事项。

本标准在编制过程中，根据专家审查意见对标准名称进行了调整，现就修改情况说明如下：

2026 年 6 月 25 日至 2026 年 7 月 9 日，起草组根据行业相关专家征求的意见，对标准稿进行了修改完善。专家建议“围绕根际调控技术修改标准名称”，由于原标准名称《黑土区玉米养分高效利用综合调控技术》侧重于“养分管理”视角，未能充分体现本标准的核心技术内核与创新特色。经起草组研究决定，对标准名称进行修改。原标准名称《黑土区玉米养分高效利用综合调控技术》修改后名称为《黑土区玉米养分高效利用根际综合调控技术》。

参考文献

- [1] 高顺娟, 张树明, 付长青, 等。大豆/玉米带状复种下添加不同微生物菌剂对土壤生态环境及产量的影响 [J]. 中国农业科技导报(中英文), 2026, 28 (2): 197-207.
- [2] 张微, 李茜, 张配配, 等。覆膜配施硝化/脲酶抑制剂、微生物菌剂对根际土壤细菌群落多样性及玉米产量 [J]. 节水灌溉, 2026.
- [3] 王烁, 邵克依, 乔茜, 等。减氮配施菌剂对玉米干物质积累及产量的影响 [J]. 核农学报, 2026, 40 (2): 344-355.
- [4] 黄活志, 刘洋, 陈康, 等。接种复合菌群对间作系统中玉米、大豆生长及氮磷吸收的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2025, 46 (5): 607-618.
- [5] 杨硕, 王玉丽, 吴江爱, 等。微生物菌剂对青贮玉米生长及根际真菌群落结构的影响 [J]. 玉米科学, 2025, 33 (3): 100-108.
- [6] 李月辉。氮肥减量配施微生物菌剂对玉米产量及籽粒品质的影响 [J]. 现代农业科技, 2026 (11): 64-66.