中国乡村发展协会团体标准

《水肥一体化绿色高效精准施用技术规范》编制说明

一、工作简况

（一）任务来源

本标准由中国农业科学院农田灌溉研究所提出并负责组织，由中国乡村发展协会归口。项目已按《中国乡村发展协会团体标准管理办法》完成立项申请与技术审核，并由中国农业科学院农田灌溉研究所与中国乡村发展协会签订《团体标准制修订技术服务合同》，计划编制时间为2026年7月1日至2027年1月1日。

本标准的技术内容依托国家重点研发计划“西北华北主要粮食作物精准化施肥技术与装备研发”子课题“适用绿色增效产品的水肥一体化精准施用技术与装备研发”形成的研究基础，是课题成果标准化凝练的重要组成部分。

（二）项目背景与必要性

政策与项目依据。本标准的制定紧扣国家关于智慧农业、化肥减量增效和农业用能绿色低碳转型的战略部署：中央一号文件连续多年部署水肥一体化与节水农业推广；农业农村部《全国智慧农业行动计划（2024—2028年）》将精准水肥、智能装备列为重点任务；新一轮千亿斤粮食产能提升行动要求加快水肥一体化规模化应用，强化“新技术、新产品、新机具”三新集成；国家“双碳”目标与农业农村减排固碳行动方案要求农业机械装备加快应用太阳能等可再生能源，降低柴油发电依赖；《河南省加快建设农业强省规划（2025—2035年）》明确发展智慧农业与绿色低碳农业。除国家重点研发计划课题外，本标准还同步吸收了“绿色管控的水肥一体化移动式智能装备研发”项目（项目负责人：魏驰林，依托单位：中国农业科学院农田灌溉研究所）在多通道绿色肥料精准配施、肥液EC－pH在线检测与闭环调控、“太阳能板＋蓄电池＋智能能量管理”离网绿色能源选配等方面的研究成果，两项研究互为支撑，共同构成本标准的技术来源。

1. 水肥一体化正由“能施肥”向“精准施肥”升级。西北、华北灌区水资源紧缺、化肥利用效率有待提高，水肥一体化已成为主要粮食作物节水减肥的重要技术途径。随着

绿色增效肥料的推广，生产上不仅要求把肥料随水施下去，更要求按作物需求把不同养分按比例、按时序、按浓度精准送达根区。

2. 多组分配施对计量与调控提出了新要求。腐植酸类、微生物菌剂类、氨基酸类等绿色增效肥料常需与大量元素水溶肥、中微量元素肥配合施用，涉及多个母液通道同时注入。各组分理化特性差异大、相容性复杂，若配比不准、混合不匀或浓度失稳，既影响施肥效果，也会诱发沉淀、絮凝和生物膜，造成系统堵塞。

3. 现行标准对精准配比与闭环调控的规定不足。现行水肥一体化相关标准多侧重系统设计、设备通用要求和作物水肥管理，对绿色增效肥料理化特性测定方法与数据库字段、多组分堵塞机理与防堵构造、多源配比计量性能、肥液在线检测性能、闭环调控稳态误差与调节时间、安装调试验收项目、数据记录与信息安全等缺乏系统、可检验的规定，生产上难以统一评价装备与作业质量。

4. 制定本标准的意义。制定本标准有利于把课题形成的理化特性数据库、多源精准配比计量、在线检测与闭环调控、移动式智能首部装备等成果转化为可执行的技术要求；有利于统一装备选型、调试验收和运行维护的评价口径，推动社会化水肥服务规范化；有利于在保障绿色增效肥料活性的前提下提高养分利用效率，支撑化肥减量增效和农业绿色发展。

（三）起草单位及主要起草人

本标准起草单位：中国农业科学院农田灌溉研究所、黄河水利委员会黄河水利科学研究院、中国农业科学院农业信息研究所、西北农林科技大学、中国水利水电科学研究院、黑龙江省水利科学研究院、北京城市学院、聊城市位山灌区管理服务中心、河套灌区水利发展中心、巴彦淖尔市水利科学研究所、江苏农林职业技术学院、江苏华源节水股份有限公司、安徽朔源农业节水科技有限公司、沃达尔（天津）股份有限公司、聊城浩伦农业服务有限公司。

起草单位的支撑条件如下：

1. 平台条件。牵头单位中国农业科学院农田灌溉研究所设有农业部农业水资源高效安全利用重点开放实验室、农业农村部节水工程重点实验室、河南省节水农业重点实验室、水利部节水灌溉设备质量检测中心和水利部节水灌溉试验总站，可为本标准

的配比精度、在线检测性能、闭环调控和验收判定等条款提供检测与试验支撑。

2. 试验条件。牵头单位拥有节水灌溉实验厅 400 m² 以上，配备高效液相色谱仪、全自动激光粒度分析仪、电感耦合等离子体质谱仪、化学吸附分析仪、激光拉曼光谱仪等仪器，可完成本标准表 1 所列理化特性测定项目；试验基地已建成大型平移式和指针式喷灌机，并依托“十四五”重点研发计划完成精准变量喷施水肥系统升级改造，具备水肥一体化变量施用自动化控制与台架试验条件。

3. 前期研究基础。起草组已采用 CFD 数值模拟分析多组分肥液在注入点、混合腔、过滤器及管道弯头与变径处的流场特征与颗粒沉积过程，确定了稀释雷诺数、通道串混率和混合响应时间等关键参数区间；并结合台架试验与河南典型农田多轮田间示范，取得了配比精度、EC－pH 调节时间与超调量、离网供能续航能力和节水节肥效果等成套试验数据，为本标准量化指标的确定提供了直接依据。

起草组按专业方向设置技术参数组、装备研制组、控制与信息组、田间验证组和标准文本组，分工与主要工作见表 1。

表 1　起草组分工与主要工作

工作组	承担单位	主要工作
技术参数组	中国农业科学院农田灌溉研究所牵头；江苏华源节水股份有限公司、安徽朔源农业节水科技有限公司、沃达尔（天津）股份有限公司、聊城浩伦农业服务有限公司参与	绿色增效肥料理化特性测定方法、数据库字段设计、相容性矩阵与堵塞风险分级；肥料产品与施用系统适配性验证
装备研制组	中国农业科学院农田灌溉研究所、黄河水利委员会黄河水利科学研究院牵头；中国水利水电科学研究院、黑龙江省水利科学研究院、江苏华源节水股份有限公司、安徽朔源农业节水科技有限公司、沃达尔（天津）股份有限公	多源精准配比计量单元、混合腔与防堵构造、移动式智能首部装备集成与台架试验；装备性能复核与试验验证

工作组	承担单位	主要工作
	司参与	
控制与信息组	中国农业科学院农业信息研究所牵头；北京城市学院、江苏农林职业技术学院参与	在线检测性能指标、闭环调控算法与联锁逻辑、数据记录与通信安全要求；信息化应用验证
田间验证组	西北农林科技大学牵头；聊城市位山灌区管理服务中心、河套灌区水利发展中心、巴彦淖尔市水利科学研究所、江苏农林职业技术学院参与	田间对照试验、配施均匀性与产量品质测定、条款适用性校核；华北、西北灌区及设施园艺、果园场景田间验证与技术数据采集
标准文本组	中国农业科学院农田灌溉研究所牵头，各工作组派员参加	标准文本起草、格式审核、编制说明与意见汇总处理

本标准主要起草人按标准文本前言所列名单执行，主要包括陈震、孙秀路、郭雷风、侯新月、王大伟、王艳华、邱志鹏、赵伟霞、于柯、陈亚军、周宏飞、余克强、黄修桥、段福义、程千、魏驰林等，具体名单以标准文本前言为准。牵头单位主要起草人分工为：陈震、孙秀路负责标准总体技术方案、起草组组织协调、文本统稿及征求意见处理；魏驰林负责多源精准配比计量系统、肥液在线检测与闭环调控、移动式智能首部及离网供能等条款起草与试验验证；黄修桥负责技术路线审核与关键指标论证；其他起草人按专业方向参加相应章节起草、试验验证和应用示范。王景雷负责标准立项组织与外部协调（非标准起草人）。

（四）主要编制过程

1. 第一阶段（第 1 个月）：成立标准起草组，明确任务分工，收集国家重点研发计划课题资料、肥料理化特性测定数据、配比计量与在线检测试验数据、装备样机资料、田间运行记录和现行标准，形成标准编制工作方案和大纲。

2. 第二阶段（第 2 个月）：开展绿色增效肥料理化特性测定与相容性试验，构建理化特性数据库字段体系；调研多源配比计量、在线检测与闭环调控的现场需求和装备现状，形成关键技术参数清单。

3. 第三阶段（第 3—4 个月）：编写标准草案，重点形成理化特性测定与数据库、多组分堵塞机理与防堵设计、多源精准配比计量、在线检测与闭环调控、系统控制与

管理、安装调试与验收、运行维护等章节；组织起草组内部研讨和专家咨询。

4. 第四阶段（第 5 个月）：依托实验室检测、台架试验、移动式智能首部装备样机和田间示范系统开展条款验证，重点核验配比精度、配施均匀性、EC 与 pH 控制误差、调节时间与超调量、联锁响应时间、接驳时间和连续作业稳定性。

5. 第五阶段（第 6 个月）：形成征求意见稿，面向科研院所、推广部门、装备企业、肥料企业、信息化服务企业、种植主体和社会化服务组织征求意见；完成意见汇总处理、标准送审稿、编制说明和验证材料。

6. 第六阶段（第 7 个月及以后）：根据协会审查意见修改完善，形成报批稿；配合完成专家论证、发布实施和宣贯培训。

截至本编制说明形成之日，起草组已完成第一至第四阶段工作，形成本征求意见稿。

二、确定标准主要技术内容的论据

（一）标准结构与总体思路

本标准按照 GB/T 1.1—2020 的规定起草，采用“范围—规范性引用文件—术语和定义—肥料特性与数据库—堵塞机理与防堵设计—配比计量—在线检测与闭环调控—系统控制与管理—安装调试与验收—运行维护”的结构。总体思路是以“数据支撑、精准配比、在线感知、闭环调控、可检可评”为主线，把精准施用由经验设定转变为以数据和反馈为依据的过程控制。

（二）范围与适用对象的确定

范围与适用对象依据《团体标准制修订技术服务合同》第二条约定确定，即适用于以绿色增效肥料（含腐植酸类、微生物菌剂类、氨基酸类等）为施用对象的大田作物、设施园艺作物及果园等场景的水肥一体化精准施用系统，其他类型功能性液体肥料的水肥一体化精准施用可参照执行。技术验证以西北、华北典型灌区小麦、玉米等主要粮食作物为重点，同时兼顾设施园艺和果园的适用性。

（三）主要技术指标的确定依据

1. 理化特性测定项目与方法（第 4.2 条、表 1）。14 个测定项目取自课题肥料特性

测试的实际测项，覆盖计量换算（密度、EC）、注入阻力（黏度）、过滤匹配（水不溶物、D50/D90）、储存稳定（沉降率、悬浮稳定性、溶解时间）、活性保持（有效活菌数及保持率）、配方约束（相容性矩阵）、季节调整（温度敏感性）和材质选择（腐蚀性）。规定每项不少于 3 次重复、相对偏差不大于 5 %、在（20 ± 1）℃ 下测定，是为保证不同单位测定结果可比。

2. 数据库字段（第 4.3 条、附录 A）。字段组按“产品标识—理化特性—相容性—风险等级—施用参数—数据来源”组织，使数据库既能支撑配方计算，又能追溯数据来源。要求提供 JSON 或 CSV 通用接口，是为便于与不同厂商的控制系统对接；要求配方变更时重测、无变更时每 2 a 复测，是兼顾数据时效性与检测成本。

3. 堵塞风险分级（第 5.1 条、表 2）。以 D90、黏度、沉降率和相容性四项指标分级，指标阈值与配套标准《绿色增效肥料水肥一体化施用防堵塞技术规范》保持一致，避免同一产品在两项标准中得到不同的风险判定。分级结果直接对应通道分配、母液浓度和冲洗周期的设计要求，使分级具有可操作的技术含义。

4. 防堵设计要求（第 5.2 条）。通道独立化与通道串混率不大于 1 %，是课题多通道试验中避免不相容组分在共用管路二次混合的必要条件；注入点雷诺数不小于 4 000，依据混合腔流场试验与浓度衰减测试确定，用于抑制注入点局部高浓度诱发的沉淀与絮凝；一级 80 μm ~ 120 μm 加二级 55 μm 左右的分级过滤及施肥装置布置于一级后二级前，与配套标准的规定一致。

5. 管网水力与冲洗设计（第 5.3 条）。干支管流速 0.6 m/s ~ 2.0 m/s 为微灌工程设计的通行取值区间；毛管末端冲洗流速不低于 0.45 m/s、施肥前预冲洗不少于 5 min、施肥后冲洗不少于 20 min 且不少于管网输水时间的 2 倍，与配套标准的三段制要求相衔接。

6. 配比计量性能（第 6.2 条、表 3）。单通道配比精度不大于 ± 5 %、多通道同时配比精度不大于 ± 8 %，依据台架试验中单通道与多通道工况下的实测偏差分布确定，多通道适度放宽是考虑通道间水力干扰的客观影响；注入量调节范围 10 % ~ 100 %，是为满足苗期小量施肥到盛期大量施肥的跨度需要；配施均匀性以 EC 变异系数不大于 5 % 表征、混合响应时间不大于 60 s（从注入开始至 EC 进入允许偏差带），为控制系统可实现水平。

7. 母液与通道要求（第 6.3 条）。菌剂母液搅拌转速不大于 200 r/min，是为避免剪切损伤菌体；母液现配现用并宜在 6 h 内施用完毕，与表 1“有效活菌数及 6 h、24 h 保持率”测定项目相互对应；具体保持率限值按配套防堵塞标准执行；吸肥口高于罐底 100 mm 并设 60 目～80 目预滤网，用于避免吸入罐底沉渣。

8. 移动式装备要求（第 6.4 条）。接驳时间不大于 10 min、工作环境温度不窄于 0 ℃～45 ℃、整机防护等级不低于 IP54 且控制柜不低于 IP55，依据样机在多地块转场作业的实测能力确定，用于保障“一机多地块”的服务模式。

9. 在线检测性能（第 7.1 条、表 4）。EC 量程 0 mS/m～20 mS/m、准确度 ± 2 % FS、响应时间不大于 10 s，pH 量程 2～12、准确度 ± 0.1、响应时间不大于 15 s，是在满足闭环调控采样周期的前提下，市场上工业级传感器可稳定达到的水平。要求 EC 与 pH 传感器安装在混合腔下游不少于 10 倍管径的稳流段，是为避免未完成混合的肥液造成测值失真。

10. 闭环调控性能（第 7.3 条）。EC 稳态误差不大于 ± 5 %、pH 稳态误差不大于 ± 0.3、调节时间不大于 120 s、超调量不大于 10 %，依据课题闭环调控试验中流量比例前馈加 EC/pH 反馈控制的实测响应曲线确定。规定 EC 实测值超过设定上限值的 1.2 倍、pH 低于 4.5 或高于 8.5、系统压力超出设定范围、母液罐低液位、过滤器压差超限时，应自动降低或切断施肥并转清水运行，同时报警；从触发条件成立到执行动作的响应时间不应大于 30 s，是为在传感器或工况异常时优先保护作物和系统。

11. 数据记录与信息安全（第 8.3 条、第 8.4 条）。原始数据存储期不少于 1 a，汇总数据保存期不少于 2 a，记录完整率不低于 98%，是为满足追溯与效果评价需要；通信支持 Modbus 或 MQTT 等通用协议、远程访问应经认证授权且不应使用默认空口令，是为兼顾互联互通与基本信息安全。

12. 验收项目与判定（第 9.3 条、表 5）。12 项验收指标由第 6 章至第 8 章的性能要求直接映射而来，逐项可测、可判；移动式智能首部装备还应按 9.3.2 验收接驳时间（不大于 10 min）和防护等级（整机不低于 IP54，控制柜不低于 IP55）；规定单项不合格允许整改后复检一次，是为兼顾工程实际与质量控制。

13. 效果评价（第 10.5 条）。以肥料偏生产力、肥料利用率、灌溉水生产力、产量与品质、经济与环境效益为评价维度，与化肥减量增效的政策目标一致，也便于与常

规施肥方式进行对照。在作物产量不降低的前提下，氮肥施用量较常规施肥宜降低8%～10%，肥料偏生产力或肥料利用率宜提高10%及以上。。

三、采用国际标准和国外先进标准情况

本标准未采用国际标准，也未等同或修改采用国外标准。

起草过程中查阅了国际灌溉排水委员会及主要滴灌设备生产国关于施肥装置、比例注入、灌溉控制器和灌溉均匀度的技术资料。国际上水肥一体化装备的比例注入精度、控制器功能和灌溉均匀度已有较成熟做法，但针对绿色增效肥料多组分精准配比、理化特性数据库、肥液在线检测与闭环调控的成套技术要求较少，尚无可直接采用的国际标准或国外先进标准。本标准在借鉴上述通行做法的基础上，突出多源精准配比、在线感知与闭环调控，具有自主性和针对性。

四、与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

1. 本标准符合国家节水农业、化肥减量增效、农业绿色发展、智慧农业和标准化支撑科技成果转化的政策导向，与《中华人民共和国农产品质量安全法》《肥料登记管理办法》等法律法规及相关管理制度不相抵触。

2. 本标准规范性引用了GB 5084《农田灌溉水质标准》、GB 4208《外壳防护等级（IP代码）》和GB/T 5226.1《机械电气安全》，涉及的水质、防护和电气安全要求严格执行上述标准的规定，未作降低。

3. 本标准与NY/T 2624《水肥一体化技术规范　总则》、GB/T 43908《水肥一体化设备》、GB/T 50485《微灌工程技术标准》、GB/T 17187《农业灌溉设备　灌水器一般要求和试验方法》、NY/T 496《肥料合理使用准则　通则》、NY/T 1535《肥料合理使用准则　微生物肥料》等现行标准相协调，在其基础上就多组分精准配比、在线检测与闭环调控作出细化补充，不重复、不冲突。

4. 本标准为团体标准，属推荐性文件，不替代任何强制性国家标准；涉及电气安全、防护等级、化学品作业和废液排放的条款均要求执行国家有关规定。

五、标准中涉及专利的情况

经起草单位核查，本标准不涉及必要专利。立项阶段已按协会要求填报《必要专利信息披露表》，披露结果为“不涉及”。

征求意见期间，如有单位或个人认为本标准涉及必要专利，请在反馈意见时一并提供专利权人、专利号、涉及的标准条款以及是否同意作出实施许可声明等信息，起草组将按《中国乡村发展协会团体标准管理办法》的规定处理。

六、重大分歧意见的处理经过和依据

截至本征求意见稿形成之日，起草组内部及专家咨询过程中未出现重大分歧意见。对下列三项曾有不同认识，经研讨后达成一致：

1. 关于多通道同时配比精度的取值。部分意见认为应与单通道一致取 ± 5 %。台架试验表明，三通道及以上同时注入时通道间水力干扰不可完全消除，统一取 ± 5 % 将显著提高装备成本且现场难以稳定达到；最终确定多通道取 ± 8 %，同时通过配施均匀性（EC 变异系数不大于 5 %）从作业结果端加以约束。

2. 关于闭环调控是否强制要求采用模型预测控制。部分意见认为应明确要求采用模型预测控制以提高响应速度。考虑到现场装备控制器算力差异较大，标准最终只规定控制性能指标（稳态误差、调节时间、超调量）和前馈加反馈的基本结构，不限定具体算法，比例—积分—微分控制与模型预测控制均可采用。

3. 关于 pH 联锁下限取值。部分意见建议取 5.0。考虑到部分腐植酸类和酸性水溶肥在正常作业时 pH 可短时接近 5.0，取 5.0 易造成频繁误联锁；最终确定联锁下限取 4.5，并在第 7.3 条要求同时监测 EC 与压力，避免单一参数误判。

征求意见期间收到的意见将按《团体标准征求意见汇总处理表》逐条记录采纳程度与理由，重大分歧意见将提交标准审查会审议。

七、其他应予说明的事项

1. 关于标准名称。本征求意见稿的标准名称按《团体标准制修订技术服务合同》第二条约定采用《水肥一体化绿色高效精准施用技术规范》。立项申请书中该项目名

称为《绿色增效肥料水肥一体化精准施用技术指南》，两者在名称表述和文件类型（“技术规范”与“技术指南”）上存在差异。建议在征求意见期内确认最终名称并保持立项文件、合同、标准文本和编制说明一致，报批前统一修订。

2. 关于规范性引用文件。第 2 章所列引用文件在报批前将逐一核对标准号、标准名称及最新有效版本，并根据正文实际引用情况增删。

3. 关于起草人名单。前言及本编制说明已列出牵头单位主要起草人及其承担的工作。参与单位（黄河水利科学研究院、西北农林科技大学、中国农业科学院农业信息研究所）派员名单按表 1 分工确定，将在征求意见结束后随送审稿一并确认公布。

4. 关于本标准与配套标准的衔接。本标准与同期制定的《绿色增效肥料水肥一体化施用防堵塞技术规范》为配套关系：本标准侧重多源精准配比、在线检测与闭环调控，配套标准侧重堵塞的防范与治理。两项标准的术语、绿色增效肥料分类、堵塞风险分级指标、过滤配置参数和效果评价指标已作协调，避免概念不一致和要求冲突。使用时宜同时执行。

5. 关于附录性质。附录 A、附录 B 均为资料性附录，提供数据库字段和作业记录表的推荐格式，使用单位可根据管理需要调整表格形式，但字段和记录内容不应少于附录所列项目。

6. 关于封面标识。标准封面的 ICS 号、CCS 号已按本文件适用领域填写；标准编号中的顺序号及发布、实施的具体日期需由中国乡村发展协会统一编号和审查通过后确定，故暂以占位形式表示，不影响技术内容的完整性。

7. 关于实施建议。建议本标准发布后由起草单位配合协会开展宣贯培训，编制配套的作业与验收操作手册，并结合灌区示范应用持续收集使用反馈，视技术进展适时修订。

附　主要参考文献

本标准编制过程中主要参考了以下文献和政策文件。

[1] 黄友锐, 陆森, 韩涛, 等. 基于 GOHBA-Fuzzy-PID 算法的施肥控制系统优化研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(11): 320-328.

[2] 刘赛赛, 张晋, 吴俊, 等. 水肥一体化施肥装置研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2026, 48(7): 268-275.

[3] 善盈盈, 祝勇仁, 徐芬. 基于 PLC 的集成式智能穴盘喷淋灌溉系统设计与实现[J]. 节水灌溉, 2026(4): 26-30.

[4] 唐晨光, 张瑞金, 易辉君. 基于山地可移动式水肥一体控制系统首部设计[J]. 农业与技术, 2026, 46(1): 66-70.

[5] 朱德兰, 阮汉铬, 吴普特, 等. 水肥一体机肥液电导率远程模糊 PID 控制策略[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 186-191.

[6] GUO P, YU J, ZHONG P, et al. Study on multi-phase flow characteristics and anti-clogging mechanism of liquid fertiliser distributors using CFD-DEM coupling method[J]. Biosystems Engineering, 2025, 260: 104324.

[7] LIU Z, XU L, BAI Y, et al. Mitigating emitter clogging in high-sediment water drip irrigation systems through selection of appropriate organic fertilizers[J]. Agricultural Water Management, 2026, 332: 110482.

[8] LI X, WANG H, YANG X, et al. Standard nutrient-solution-based water-fertilizer machine: design, control, and decision[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 238: 110774.

[9] ZHANG W J, TONG J, ZHANG F, et al. Integrated irrigation of water and fertilizer with superior self-correcting fuzzy PID control system[J]. PLOS ONE, 2025, 20(5).

[10] LIU X, ZHOU J, XIAO J, et al. Application of fuzzy adaptive PID control in integrated water and fertilizer system[C]. 2018 IEEE CSAA Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), 2018.

[11] DUAN X, WANG Q, MU W, et al. Optimizing water and fertilizer management for apple under organic fertilizer application based on entropy weight-TOPSIS[J]. Agricultural

Water Management, 2026, 327: 110292.

[12] LI Z, WANG X, LI C, et al. Fungal-mediated microbial carbon pump drives synergistic carbon sequestration in reclaimed soils amended with humic acid and straw[J]. Applied Soil Ecology, 2026, 225: 107206.

[13] SAIRAM A, LAL K, SINDHU V K, et al. Coupling subsurface drip irrigation and integrated crop management in a maize-wheat rotation for increased food, water, and energy security in northwest India[J]. Food and Energy Security, 2025, 14(6).

[14] MEENA M D, DOTANIYA M L, JAT R S, et al. Sustainable phosphorus management through enriched compost and mineral fertilizers improves soil biological indicators and mustard productivity[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2026, 27: 102783.

[15] 农业农村部. 全国智慧农业行动计划（2024—2028 年）[Z]. 2024.

[16] 河南省人民政府. 河南省加快建设农业强省规划（2025—2035 年）[Z]. 2025.