

控释掺混肥对沿江单季稻产量及磷流失风险的影响

王童语^{1,2,3}, 钟成虎⁴, 吴晓鹏⁵, 张睿^{1,6}, 王道中^{2,3}, 王静^{2,3}, 花可可^{2,3*}, 朱林^{1*}

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 养分循环与资源环境安徽省重点实验室, 合肥 230031; 3. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230001; 4. 茂施农业科技有限公司, 青阳 242800; 5. 萧县永垵镇农业技术推广服务站, 宿州 234000; 6. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610299)

摘要:控释掺混肥作为一种高效的新型肥料被广泛用于大田生产。为阐明不同用量控释掺混肥对单季稻产量、磷素利用效率和田面水磷流失风险的影响,以水环境敏感的沿江地区单季稻-休闲的种植模式为对象,研究不施肥(CK)、常规施肥(NPK,总磷量 $108\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、控释掺混肥减磷30%(CMF1)、控释掺混肥减磷40%(CMF2)和控释掺混肥减磷50%(CMF3)对沿江单季稻产量、磷素吸收利用和田面水磷形态浓度的影响。结果表明,CMF1、CMF2和CMF3处理均不会对水稻产量造成减产,并能减少单季稻田生态系统磷素盈余量,其中以CMF3处理效果最佳。与NPK处理相比,CMF1、CMF2和CMF3显著减少田面水中总磷、可溶性总磷和颗粒态磷的浓度,田面水总磷降低的比例分别为38.6%、47.9%和50.4%,可溶性总磷降低的比例为42.6%、45.9%和50.8%,颗粒态磷降低的比例为32.4%、58.6%和43.8%,且CMF1和CMF3处理减少了可溶性总磷和磷酸盐的占比,增加了颗粒态磷和可溶性有机磷的占比,改变了田面水磷素分布形态。整体而言,一次性施用控释掺混肥能在保障水稻产量的情况下,节本增收,减少稻田磷盈余量,从而降低田面水磷素浓度,对减少农田磷素流失和农业非点源磷污染防控具有显著效果,其中以CMF2综合经济效益最好,适宜在沿江单季稻区推广应用。

关键词:控释掺混肥;田面水磷;单季稻;沿江地区

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2023)04-0683-09

Effects of controlled release mixing fertilizer on yield of single-cropping rice and the risk of phosphorus loss along the Yangtze River

WANG Tongyu^{1,2,3}, ZHONG Chenghu⁴, WU Xiaopeng⁵, ZHANG Rui^{1,6},

WANG Daozhong^{2,3}, WANG Jing^{2,3}, HUA Keke^{2,3}, ZHU Lin¹

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036; 2. Key Laboratory of Nutrient Cycling and Resources Environment of Anhui Province, Hefei 230031; 3. Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230001; 4. Maoshi Agriculture Science and Technology Co., Ltd., Qingyang 242800; 5. Xiaoxian Yonggu Agricultural Technology Extension Service Station, Suzhou 234000; 6. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299)

Abstract: Controlled release mixing fertilizer as a high efficiency new type fertilizer is widely applied to the croplands in agroecological systems. In order to clarify the effects of controlled release mixing fertilizer on yield of single-cropping rice and to select an environmentally friendly phosphorus application practice, this study was oriented to analyze crop yield, phosphorus utilization efficiency and the risk of phosphorus loss in surface water based on a fertilization field experiment along the Yangtze River. Five treatments were designed, including none fertilization (CK), traditional fertilization (NPK, $108\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), reducing 30% phosphorus (CMF1), reducing 40% phosphorus (CMF2) and reducing 50% phosphorus (CMF3) by controlled release mixing fertilizer. Results showed that there was no significant difference in the rice yield among NPK, CMF1, CMF2 and CMF3 treatments. The controlled release mixing fertilizer treatments also reduced the phosphorus surplus in single season rice fields, with the CMF3 treatment being the most effective. Compared with NPK treatment, CMF1, CMF2 and CMF3 significantly reduced

收稿日期: 2022-08-28

基金项目: 安徽省科技重大专项(201903a06020028), 安徽省自然科学基金(2008085MD108)和安徽省重点研究与开发计划(2022107020004)共同资助。

作者简介: 王童语, 硕士研究生。E-mail: lewtongyu@163.com

* 通信作者: 朱林, 博士, 教授。E-mail: zhulin@ahau.edu.cn 花可可, 博士, 副研究员。E-mail: huakeke1220@126.com

the concentration of total phosphorus, dissolved total phosphorus and particulate phosphorus in field water by 38.6%, 47.9% and 50.4%, respectively, total soluble phosphorus by 42.6%, 45.9% and 50.8% and particulate phosphorus by 32.4%, 58.6% and 43.8%. The controlled release mixing fertilizer treatments, especially CMF1 and CMF3 treatments, changed the distribution pattern of phosphorus in field water by reducing the proportion of dissolved total phosphorus and phosphate and increasing the proportion of particulate phosphorus and dissolved organic phosphorus. In conclusion, our findings indicated that controlled release mixing fertilizer application, especially for reducing 40% phosphorus ($62.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), is a prefer phosphorus management practice for maintaining rice yield, improving phosphorus efficiency and reducing the risk of agricultural non point phosphorus pollution. Therefore, the practice should be recommended in the single cropping rice region along the Yangtze River.

Key words: controlled release mixing fertilizer; phosphorus in surface water; single cropping rice region; the area along the Yangtze River

磷素是保证水稻正常发育生长的重要营养元素,对水稻的增产具有十分重要的作用。人们往往为了追求水稻高产而过量使用磷肥,然而磷肥的当季利用率低,一般只有5%~15%^[1],磷肥的过量施用不但没起到增产的效果,反而降低了肥料利用率,且因为磷是水体富营养化的控制因子,磷在水体中的流失易造成水体富营养化等环境污染问题^[2]。因此,磷肥的合理施用对满足作物生长需求的同时降低环境风险十分重要。为提高磷素利用率,宋燕凤等通过田间陈化生物质炭来提高稻田磷素吸收效率^[3]。张忠学等^[4]通过在东北黑土区开展节水灌溉模式减施磷肥试验,研究表明节水灌溉下减施磷肥能提高水稻产量和磷肥利用率,且土壤磷素盈余量低。目前针对稻田磷素的流失已有较多的研究,有关稻田田面水的研究多是氮和总磷浓度变化,没有对各形态磷素进行研究。田面水中的磷是稻田磷素径流流失的直接来源^[5],稻季农田磷素的流失主要是由水分管理或施肥不当,磷素随田面水溢出田埂产生的径流所致^[6],因此研究田面水磷素的动态变化,加强稻田磷素的吸收利用,不但能反映各形态磷素所占比重,预测其对水体富营养化的贡献,还能根据田面水磷素动态变化指标指导田间水分管理,预测降雨带来的磷素径流流失量,对稻田磷素面源污染防控具有重要意义。

植物磷素70%~80%是在植物生长前期吸收^[7],农业生产上习惯将磷肥作基肥一次性施入,但磷肥施入土壤后,由于土壤对磷的固定作用和磷在土壤中的移动性差等原因,大部分不易被植物吸收利用。磷肥全部作基肥很难满足水稻生长后期对磷素的需求,使产量和磷肥当季利用率降低^[8]。而寻求合理的施肥方式提高水稻产量和磷肥利用效率一直是诸多学者研究的重点。为解决磷肥浪费等问题,国内外学者运用控释肥施用对水稻磷素利用及田面水磷素形态进行研究。控释肥作为一种新型肥料,其养分

释放速率缓慢、释放期长,养分释放规律能够与作物养分吸收基本同步,达到养分供需平衡,一次施肥就能够满足作物整个生长期对养分的需求,为现代农业生产简化施肥过程、减少施肥成本、减轻环境污染、降低施肥强度、提高磷素利用率提供了可能^[9-10]。许多研究也已证实,施用缓控释肥对水稻产量增效起到一定效果。黄思怡等试验表明,较常规施肥处理,缓控释肥在减量施肥10%~20%条件下,仍可保证水稻增产4.7%^[11]。金丹丹等研究表明,与常规施肥相比,施用缓控释肥可提高中晚熟粳稻有效穗数,从而提高水稻产量^[12]。但目前关于控释肥施用的研究多集中于对水稻产量和经济效益的影响,关于控释掺混肥一次性施用对水稻磷素吸收利用和田面水的磷形态变化还缺乏系统研究。

综上所述,目前已有一些关于稻田田面水磷素动态变化的研究,该类研究大多集中于巢湖、太湖流域以及江汉平原等地区^[13-14],而不同地区稻田田面水中的磷素动态变化特征势必明显不同,限制了人们对稻田生态系统磷的环境风险的全面评估。沿江地区是我国水稻主要产区之一,也是水环境的敏感区,该区气候多雨,年降雨量在1200 mm以上,且梅雨季节强降雨频发,增加稻田田面水的磷素流失风险^[15]。本地区从植株-土壤-水体的角度系统阐述控释掺混肥对单季稻磷素利用及磷环境效应的影响鲜有研究。因此,本研究拟通过对沿江地区设置不同磷用量控释掺混肥田间肥效试验,分析沿江地区单季稻种植制度下的水稻产量情况及田面水磷素形态及磷素流失风险,阐明控释掺混肥一次性施用对水稻磷素农学利用率、土壤磷素盈余量和磷环境效应的影响,以为沿江地区磷素高效施肥、稻田磷素面源污染防控和提高生态和经济效益提供科学依据。

1 材料与方

1.1 试验区域概况

试验区位于长江下游南岸, 安徽省池州市贵池区江镇梅丽村, 气候属亚热带季风性湿润性气候区, 年平均气温 16.1 °C, 年平均日照时间为 1 900 h, 多年平均降雨量在 1 500 mm, 6 月中旬至 7 月中旬是主要雨季, 为梅雨期。平均无霜期 242 d, 作物种植方式为单季稻-休闲。土壤类型为水稻土, 质地为中壤, 0~20 cm 土壤基本理化性质为: pH 值 (1: 2.5, 土质量与水体积比) 值为 6.4, 有机质含量为 20.4 g·kg⁻¹, 总氮含量为 2.2 g·kg⁻¹。

1.2 试验材料

试验所用水稻品种为“昌两优 8 号”, 普通复合肥配方为 (18N-18P₂O₅-13K₂O), 普通氮肥为尿素 (含 N 46.4%)。控释掺混肥由茂施农业科技有限公司提供, 配方为 28N-9P₂O₅-13K₂O, 其中控释氮 13%, 释放期 120 d, 释放曲线为 S 型, 控释氮包膜材料为植物油合成的聚氨酯, 控释掺混肥中磷肥为磷酸二铵, 钾肥为氯化钾。

1.3 试验设计

试验共设 5 个处理: 不施任何肥料 (CK)、常规施肥 (NPK)、控释掺混肥减磷 30% (CMF1)、控释掺混肥减磷 40% (CMF2)、控释掺混肥减磷 50%

(CMF3)。每个处理 3 次重复, 小区面积为 30 m² (6 m×5 m)。试验于 2020 年 6 月 20 日开始, 10 月 9 日结束。单季稻试验于 2020 年 5 月 23 日播种育秧, 6 月 20 日移栽人工栽秧, 行距和株距分别为 0.25 m 和 0.18 m, 移栽密度为 22.2 万穴·hm⁻², 10 月 9 日收获。整个试验过程中的所有处理田间管理与当地农民习惯保持一致。根据当地农民习惯, NPK 代表常规施肥水平, 总氮用量为 225 kg·hm⁻², P₂O₅ 和 K₂O 用量均为 108 kg·hm⁻², 其中氮肥分 3 次施用, 分别为基肥 108 kg·hm⁻², 分蘖肥 70.5 kg·hm⁻², 穗肥 49.5 kg·hm⁻²。基肥为复合肥 (18N-18P₂O₅-18K₂O), 追肥为尿素。CMF1、CMF2、CMF3 均为控释掺混肥一次性施用, 总施氮量分别为 225 kg·hm⁻²、191 kg·hm⁻² 和 169 kg·hm⁻², 总施磷量分别为 72.9 kg·hm⁻²、62.1 kg·hm⁻² 和 51.0 kg·hm⁻², 总施用钾肥的量分别为 105.3 kg·hm⁻²、89.7 kg·hm⁻² 和 78 kg·hm⁻², 对应控释肥料施用量分别为 810 kg·hm⁻²、690 kg·hm⁻²、600 kg·hm⁻²。各处理详细施肥见表 1。

1.4 样品采集与分析方法

样品采集: 在水稻基肥施用后定期采集田面水, 采样时间为施基肥后定期采集, 每份田面水样品采用五点法采集后混合, 注入聚乙烯塑料瓶中。水样取回后立即测定, 少量不能测定的, 滴加浓硫酸并冰冻保存, 7 d 内测定完毕。

表 1 各处理肥料施用量

Table 1 Application rates of fertilizers among different treatments

处理	肥料种类	施氮量/ (kg·hm ⁻²)	施磷量/ (kg·hm ⁻²)	施钾量/ (kg·hm ⁻²)
CK				
NPK	复合肥 (基肥, 18N-18P ₂ O ₅ -18K ₂ O)、尿素 (追肥)	225	108	108
CMF1	控释掺混肥 (28N-9 P ₂ O ₅ -13 K ₂ O)	225	72.9	105.3
CMF2	控释掺混肥 (28N-9 P ₂ O ₅ -13 K ₂ O)	191	62.1	89.7
CMF3	控释掺混肥 (28N-9 P ₂ O ₅ -13 K ₂ O)	169	51.0	78

分析方法: 田面水样品分析参照文献[16]的方法。田面水总磷 (total phosphorus, TP) 浓度、经过 0.45 μm 微孔滤膜过滤后的可溶性总磷 (dissolved total phosphorus, DTP) 和磷酸盐 (phosphate, PO₄³⁻) 浓度用钼酸铵分光光度法测定。颗粒态磷 (particulate phosphorus, PP)=总磷-可溶性总磷; 可溶性有机磷 (dissolved organic phosphorus, DOP)=可溶性总磷-磷酸盐。

1.5 水稻磷肥利用相关指标

结合磷肥施用量与当季作物吸磷量计算磷素累积盈亏量, 具体计算公式如下:

$$\text{土壤磷素盈亏量 (kg·hm}^{-2}\text{)} = \text{当季施用磷总量 (kg·hm}^{-2}\text{)} - \text{当季作物 (籽粒+秸秆) 吸磷量 (kg·hm}^{-2}\text{)}$$

1.6 数据分析

所有数据采用 Excel 2019 对数据进行整理汇总、绘图, 用 SPSS 19.0 进行统计分析, 多重比较采用最小显著差异法 (LSD) 检验, 显著水平 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 控释掺混肥对水稻产量及磷素吸收的影响

所有施肥处理中水稻产量均显著高于 CK ($P < 0.05$)。与 CK 相比, NPK、CMF1、CMF2、CMF3 处理的水稻产量分别增加 47.4%、46.5%、57.6% 和 45.9%, 地上植株吸磷量分别提高 36.3%、31.8%、27.3% 和 27.3% (表 2), 这表明施磷利于提高水稻

对磷素的吸收和积累。与 NPK 处理相比, CMF2 的水稻产量提高了 6.9%, 但差异不显著。CMF1、CMF2、CMF3 处理对籽粒的含磷量无显著影响, CMF1、CMF2 处理提高了秸秆含磷量, 分别提高 8.3%、8.4%, CMF1、CMF2、CMF3 处理减少了植株磷素吸收量, 分别减少 3.3%、6.7%和 6.7%, 这主要与水稻产量和植株磷含量有关。

基于作物产量计算的磷素盈余量是评价磷肥施用效应最直接的手段, 可通过土壤磷素盈亏量 (PS)

来描述水稻对施入磷肥吸收利用的程度。与 NPK 相比, CMF1、CMF2 和 CMF3 处理的土壤盈余量大幅减少, PS 分别减少 53.3%、68.1%和 85.7%, CMF3 处理的土壤盈余量基本处于输入与输出的平衡状态, 控释掺混肥的施用对提高水稻磷素的利用率效果显著, 其中以 CMF3 处理的效果最佳。各处理土壤磷素盈余量与磷肥施用量之间的线性拟合方程为 $y=0.943 8x-38.997$, 磷肥施用量对磷素盈余量有较大贡献。

表 2 控释掺混肥对水稻磷吸收和磷素利用的影响

Table 2 Effect of controlled release mixed fertilizer on phosphorus uptake and phosphorus utilization efficiency of rice

处理	产量/ (kg·hm ⁻²)	籽粒磷含量/ (g·kg ⁻¹)	秸秆磷含量/ (g·kg ⁻¹)	地上植株吸磷量/ (kg·hm ⁻²)	磷素盈亏量 PS/ (kg·hm ⁻²)
CK	7 325.7 ^b	3.2 ^a	1.5 ^a	33.0 ^c	
NPK	10 801.5 ^a	3.1 ^a	1.2 ^b	45.0 ^a	63.0 ^a
CMF1	10 732.9 ^a	2.9 ^a	1.3 ^b	43.5 ^a	29.4 ^b
CMF2	11 547.9 ^a	2.7 ^b	1.3 ^b	42.0 ^b	20.1 ^c
CMF3	10 691.3 ^a	3.1 ^a	1.0 ^c	42.0 ^b	9.0 ^d

注: CK, 不施肥处理; NPK, 常规施肥处理; CMF1, 减磷 30%; CMF2, 减磷 40%; CMF3, 减磷 50%; PS, 磷素盈亏量。表中不同小写字母表示处理间显著差异 ($P<0.05$)。下同。

表 3 控释掺混肥对水稻产量构成因素的影响

Table 3 Effect of controlled release mixed fertilizer on factors of grain yield of rice

处理	穴有效穗/穗	平均穗长/cm	千粒重/g	穗粒数/粒	结实率/%
CK	8.4±0.3 ^d	27.205±0.2 ^b	21.935±0.1 ^c	193.75±2.2 ^c	91.25±1.9 ^a
NPK	12.0±0.1 ^b	26.985±0.1 ^b	21.855±0.0 ^c	198.35±4.3 ^c	89.05±1.5 ^b
CMF1	12.9±0.3 ^a	25.725±0.5 ^c	21.96±0.1 ^c	189.15±5.0 ^c	87.5±2.8 ^c
CMF2	10.35±0.4 ^c	28.465±0.0 ^a	22.27±0.0 ^b	231.15±9.1 ^a	89.4±0.8 ^b
CMF3	10.65±0.2 ^c	28.11±0.1 ^a	22.51±0.0 ^a	211.6±2.5 ^b	91.25±0.2 ^a

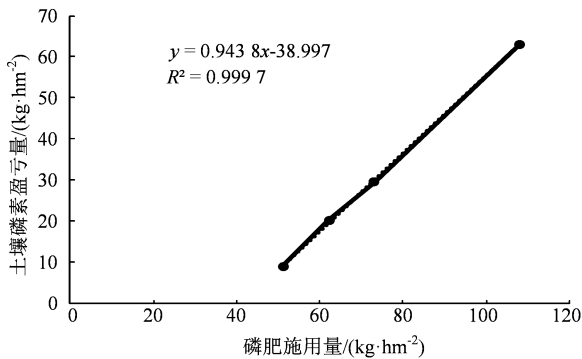


图 1 土壤磷素盈亏量与磷肥施用量之间的关系

Figure 1 Relationship between the surplus of soil phosphorus and the amount of phosphorus fertilizer applied

有效穗数、穗粒数和千粒重是水稻高产的基本三要素。与 CK 相比, 所有施肥处理增加水稻有效穗数, 与 NPK 相比, 控释掺混肥处理的千粒重增加 0.5%~3.0%。CMF2 处理的穗粒数相比 NPK 增加 16.5%。在一次性基施条件下, 控释肥具有显著的促蘖增穗效应, 可减少无效分蘖, 提高成穗率, 同时穗粒数、结实率和千粒重较常规施肥处理均有显

著提高 (表 3)。

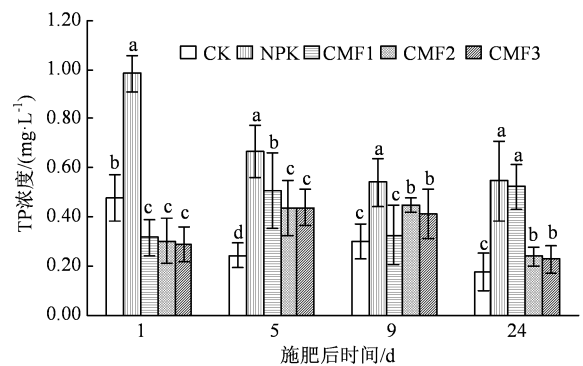


图 2 控释掺混肥对田面水总磷 (TP) 的影响

Figure 2 Effects of controlled release mixed fertilizer on TP concentration in field surface water

2.2 控释掺混肥对田面水总磷、可溶性磷和颗粒态磷形态的影响

整个观测期内, 田面水的 TP、DTP 及 PP 浓度的变化规律如图 2、图 3 和图 4 所示, 其中 NPK 处理的田面水 TP、DTP 及 PP 浓度较 CK 处理均有大幅度升高。NPK 处理的 TP 浓度在第 1 天达到最高,

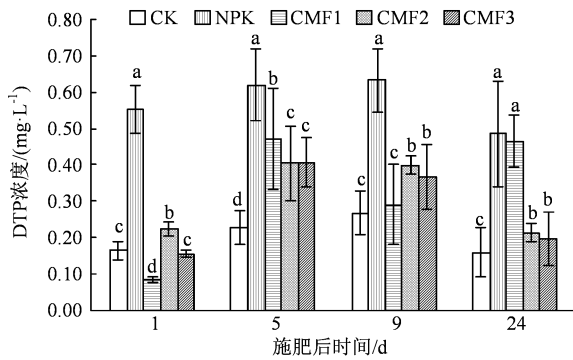


图 3 控释掺混肥对田面水可溶性磷 (DTP) 的影响

Figure 3 Effects of controlled release mixed fertilizer on DTP concentration in field surface water

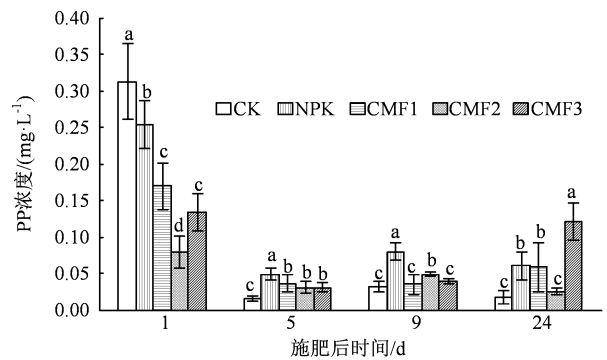


图 4 控释掺混肥对田面水颗粒态磷 (PP) 浓度的影响

Figure 4 Effects of controlled release mixed fertilizer on PP concentration in field surface water

随后在 5 d 后迅速下降, 在第 9 天达到稳定。NPK 处理的 TP、DTP 和 PP 平均浓度分别较 CK 处理增加 128.8%、180.2% 和 16.9%。随施肥天数的变化, NPK 处理的各形态磷浓度大体呈下降趋势, 且在 9 d 内下降迅速, 尤其以 PP 浓度下降最快, 在 24 d 后达到最低水平。控释掺混肥处理田面水各形态磷浓度变化趋势基本一致。与 NPK 相比, 观测期内 CMF1、CMF2 和 CMF3 处理的 TP 平均浓度分别减少了 38.6%、47.9% 和 50.4%, DTP 浓度分别减少了 42.6%、45.9% 和 50.8%, PP 浓度分别减少了 32.4%、58.6% 和 43.8%, 均呈现显著差异 ($P < 0.05$)。说明控释掺混肥对田面水 TP、DTP 及 PP 浓度控制均具

有较好的效果。

从 DTP 与 PP 占 TP 的比例来看 (表 4), 与 CK 相比, 除 CMF1 外, NPK、CMF2、CMF3 处理提高了田面水中 DTP 占 TP 的比例, 占 82.8%~87.3%, 减少了 PP 占 TP 的比例, 其中 CMF2 处理作用效果最显著, DTP 占比提高 12.8%, PP 占比减少 42.9%。与 NPK 相比, 除 CMF2 外, CMF1 和 CMF3 处理减少了 DTP 占 TP 的比例, 分别减少 13.7% 和 4.9%; 增加了 PP 的占比, 分别增加了 92.2% 和 52.7%。总体说明, 控释掺混肥处理不仅可以有效降低对田面水磷形态的浓度, 还可有效降低可溶性磷占比, 增加颗粒态磷的比例, 改变磷素的形态分布。

表 4 施肥后田面水 DTP 和 PP 占 TP 的比例

Table 4 Ratio of DTP or PP to TP in field surface surface water after fertilization

处理	田面水 DTP 占 TP 的比例					田面水 PP 占 TP 的比例				
	第 1 天	第 5 天	第 9 天	第 24 天	平均	第 1 天	第 5 天	第 9 天	第 24 天	平均
CK	36.5±9.2 ^{bc}	93.4±0.2 ^a	89.4±0.2 ^a	90.2±0.6 ^b	77.4±2.6 ^c	63.5±9.2 ^a	6.6±0.2 ^a	10.6±0.2 ^b	9.8±0.6 ^b	22.6±27.3 ^a
NPK	77.7±7.7 ^a	92.7±0.1 ^b	88.9±0.1 ^b	89.1±0.2 ^b	87.1±2.0 ^a	22.2±7.7 ^b	7.3±0.1 ^b	11.1±0.1 ^a	10.9±0.2 ^a	12.9±6.5 ^c
CMF1	29.3±6.3 ^c	92.9±0.1 ^{ab}	89.4±0.3 ^a	89.1±0.4 ^b	75.2±1.8 ^c	70.7±6.3 ^a	7.1±1.4 ^b	10.6±0.3 ^b	10.9±0.4 ^a	24.8±30.6 ^a
CMF2	77.4±18.2 ^a	93.0±0.2 ^{ab}	89.1±0.0 ^{ab}	89.6±0.2 ^b	87.3±4.6 ^a	22.5±18.2 ^b	7.0±0.2 ^b	10.9±0.0 ^{ab}	10.4±0.2 ^{ab}	12.7±6.7 ^c
CMF3	55.1±9.2 ^b	92.9±0.0 ^{ab}	89.2±0.1 ^{ab}	93.9±6.7 ^a	82.8±4.5 ^b	55.1±9.2 ^a	7.1±0.1 ^b	10.8±0.1 ^{ab}	6.1±6.8 ^{ab}	19.7±23.6 ^b

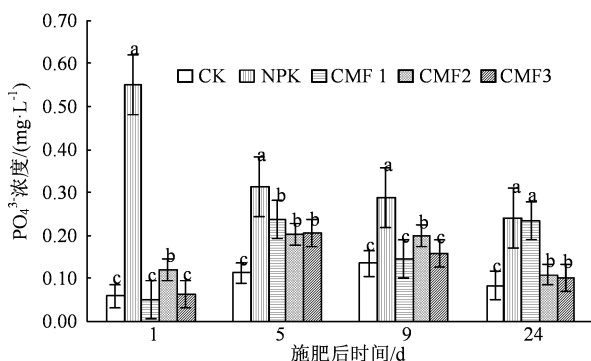


图 5 控释掺混肥对田面水 PO₄³⁻ 浓度的影响

Figure 5 Effects of controlled release mixed fertilizer on PO₄³⁻ concentration in field surface water

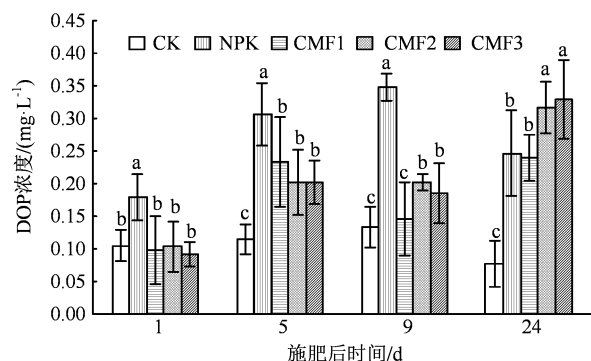


图 6 控释掺混肥对田面水 DOP 浓度的影响

Figure 6 Effects of controlled release mixed fertilizer on DOP concentration in field surface water

表 5 施肥后面水 PO₄³⁻和 DOP 占 DTP 的比例Table 5 Ratio of PO₄³⁻ or DOP to DTP in field surface water after fertilization

%

处理	田面水 PO ₄ ³⁻ 占 DTP 的比例					田面水 DOP 占 TP 的比例				
	第 1 天	第 5 天	第 9 天	第 24 天	平均	第 1 天	第 5 天	第 9 天	第 24 天	平均
CK	35.5±14.1 ^{ab}	49.5±0.4 ^b	50.4±0.6 ^a	52.4±1.6 ^{ab}	46.9±7.7 ^a	64.5±14.1 ^{ab}	50.5±0.4 ^a	49.6±0.6 ^b	47.6±1.6 ^{ab}	53.1±7.7 ^a
NPK	61.5±10.1 ^a	50.6±0.1 ^a	46.0±5.2 ^b	49.4±0.5 ^b	51.9±6.7 ^a	38.5±10.1 ^b	49.4±0.1 ^b	53.9±5.2 ^a	50.6±0.5 ^a	48.1±6.7 ^a
CMF1	17.2±2.0 ^c	50.3±0.2 ^a	50.3±0.9 ^a	49.6±1.0 ^b	41.9±16.4 ^a	82.7±2.0 ^a	49.7±0.2 ^b	49.7±0.9 ^b	50.4±1.0 ^a	58.1±16.4 ^a
CMF2	52.5±22.1 ^a	50.2±0.3 ^a	49.5±0.1 ^{ab}	51.0±0.3 ^b	50.8±1.2 ^a	47.5±22.1 ^c	49.8±0.3 ^b	50.5±0.1 ^{ab}	49.0±0.3 ^a	49.2±1.2 ^a
CMF3	40.3±11.9 ^{ab}	50.2±0.1 ^a	50.0±0.1 ^a	63.4±14.0 ^a	51.0±9.6 ^a	59.7±11.9 ^{ab}	49.7±0.1 ^b	50.0±0.1 ^b	36.4±14.0 ^b	49.0±9.6 ^a

表 6 田面水 TP、DTP、PP、PO₄³⁻、DOP 浓度动态变化模型Table 6 Dynamic model of TP, DTP, PP, PO₄³⁻ and DOP concentrations in field surface water

项目	处理	拟合方程	相关系数	<i>p</i>
TP	CK	$Y = -0.09\ln(x) + 0.4555$	0.8618	0.030
	NPK	$Y = -0.147\ln(x) + 0.9421$	0.8910	0.009
	CMF1	$Y = 0.0002x^2 + 0.0029x + 0.3651$	0.3897	0.007
	CMF2	$Y = -0.0015x^2 + 0.0337x + 0.2799$	0.9727	0.009
	CMF3	$Y = -0.0014x^2 + 0.0303x + 0.2769$	0.9035	0.011
	DTP	CK	$Y = -0.0009x^2 + 0.0217x + 0.1422$	0.9993
NPK		$Y = -0.0009x^2 + 0.0196x + 0.5369$	0.9948	0.001
CMF1		$Y = -0.0012x^2 + 0.0423x + 0.1138$	0.5350	0.057
CMF2		$Y = -0.0016x^2 + 0.0395x + 0.204$	0.9114	0.016
CMF3		$Y = -0.0019x^2 + 0.0475x + 0.1403$	0.7998	0.033
PP		CK	$Y = 0.0018x^2 - 0.055x + 0.3312$	0.8247
	NPK	$Y = 0.0011x^2 - 0.0347x + 0.2605$	0.7545	0.301
	CMF1	$Y = 0.0009x^2 - 0.0268x + 0.1813$	0.8541	0.499
	CMF2	$Y = 0.0002x^2 - 0.0058x + 0.0759$	0.6376	0.763
	CMF3	$Y = 0.0008x^2 - 0.0211x + 0.1424$	0.8663	0.650
	PO ₄ ³⁻	CK	$Y = -0.0006x^2 + 0.0154x + 0.046$	0.9919
NPK		$Y = -0.11\ln(x) + 0.5229$	0.9216	0.023
CMF1		$Y = -0.0005x^2 + 0.0199x + 0.0654$	0.5069	0.079
CMF2		$Y = -0.0007x^2 + 0.0177x + 0.1122$	0.9074	0.023
CMF3		$Y = -0.0009x^2 + 0.0221x + 0.0629$	0.6254	0.080
DOP		CK	$Y = -0.0003x^2 + 0.0064x + 0.0962$	0.9657
	NPK	$Y = -0.0013x^2 + 0.034x + 0.1522$	0.9776	0.009
	CMF1	$Y = -0.0002x^2 + 0.0098x + 0.1184$	0.4404	0.033
	CMF2	$Y = -0.0003x^2 + 0.016x + 0.0995$	0.9428	0.038
	CMF3	$Y = -0.0002x^2 + 0.0148x + 0.094$	0.9114	0.052

表 7 控释掺混肥对水稻生产经济效益的影响

Table 7 Effects of controlled release mixed fertilizer on economic benefit of rice

处理	水稻产值/ (元·hm ²)	肥料成本/ (元·hm ²)	人工成本/ (元·hm ²)	相对收益/ (元·hm ²)	较 NPK 增加量/ (元·hm ²)	较 NPK 增加 比例/%
NPK	23 763.3 ^b	1 931.1 ^b	4 500.0 ^a	17 332.2 ^c		
CMF1	23 612.5 ^b	2 187.0 ^a	1 500.0 ^b	19 925.5 ^b	2 593.3	15.0
CMF2	25 405.4 ^a	1 859.0 ^b	1 500.0 ^b	22 046.4 ^a	4 714.2	27.2
CMF3	23 520.8 ^b	1 640.0 ^c	1 500.0 ^b	20 380.8 ^b	3 048.6	17.6

2.3 控释掺混肥对田面水磷酸盐和可溶性有机磷的影响

由图 5 和图 6 可知,在整个观测期内, NPK 处理的 PO₄³⁻浓度在第 1 天达到最大,在 2~5 d 迅速降低,但始终高于 CK, DOP 浓度在 1~9 d 内升高,随后下降,在 24 d 前低于 CMF2 和 CMF3 的 DOP

浓度。与 NPK 相比, CMF1、CMF2、CMF3 处理田面水 PO₄³⁻浓度均显著低于 NPK 处理,降低的比例分别为 52.2%、54.7%和 62.1%。相应控释肥处理 DOP 浓度显著减少 33.5%、23.7%和 25.1%,说明控释掺混肥处理均可有效降低田面水 PO₄³⁻和 DOP 的浓度,对减少 PO₄³⁻效果最显著。

从分布比例上来看(表 5), 与 CK 相比, NPK 处理能增加 PO_4^{3-} 占 DTP 的比例, 增加比例为 10.7%, 减少 DOP 占 DTP 的比例, 降低比例为 9.4%。与 NPK 处理相比, CMF1、CMF2、CMF3 处理的 PO_4^{3-} 占比分别减少 19.3%、2.1% 和 1.7% (表 6), 增加 DOP 占 DTP 的比例, 分别增加 20.8%、2.3% 和 1.9%, 说明控释肥处理不仅可以有效降低无机磷和可溶性有机磷的浓度, 还可改变田面水磷酸盐和可溶性有机磷的形态分布。

2.4 田面水不同形态磷动态变化的模型表征

对施基肥后 24 d 内不同处理田面水 TP、DTP、PP、 PO_4^{3-} 、DOP 的浓度随施肥天数进行拟合(表 6), 控释掺混肥处理的 TP 最优回归方程为 $Y=AX^2+BX+C$, (式中 Y 为磷浓度; A 为二次项系数, B 为一次项系数, C 为反应常数, X 为时间)。

CK、NPK 处理的 TP 最优回归方程均为 $Y=A\ln(x)+B$, (式中 Y 为磷浓度; A 为系数; B 为反应常数)。由表 6 可知, 除 PP 外, 其他形态磷的拟合结果基本均达到显著水平, 符合一元二次方程或指数方程。控释掺混肥处理田面水中 TP、DTP、PP、DOP、 PO_4^{3-} 的浓度变化随施肥天数的增加呈先缓慢增加再降低的抛物线变化趋势。

2.5 控释掺混肥对经济效益的影响

综合肥料价格、人工成本以及水稻产量, 得出各施肥处理的经济效益。如表 7 所示, 2020 年人工成本为 $1\ 500\ \text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$, 在单季稻种植方式下, 虽然控释掺混肥的成本高于普通复合肥和尿素, 但控释掺混肥通过一次性施肥, 且无需后期追肥, 可减少人工成本, 弥补控释肥价格高的不足。通过经济效益比较(表 10), CMF1、CMF2 和 CMF3 处理 NPK 处理收益分别增加 2 593.3、4 714.2 和 3 048.6 $\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$, 增加的比例分别为 15.0%、27.3% 和 17.6%。这说明在单季稻种植模式下, 施用控释掺混肥能够提高收益, 其中以 CMF2 处理为最佳。

3 讨论

3.1 控释掺混肥提高水稻磷素利用率的机理

施磷能促进磷素从营养器官向生长中心转移, 提高磷素的吸收和利用效率, 利于提高水稻对磷素的吸收和积累^[7]。研究表明, 与常规施肥处理相比, 控释掺混肥处理可显著减少磷素盈亏量, 提高磷素利用率, 其中以 CMF3 处理效果最明显。这主要因为: 一方面, 控释掺混肥中的控释氮肥的施用可有效控制肥料中氮的释放, 有效控制养分释放速率, 实现养分释放曲线与作物生长需养规律相吻合, 促

进作物生长, 间接促进了作物对磷素的利用, 最终可实现对氮、磷等养分的高效利用。减磷施肥也能有效避免一次性大量施用导致的磷素损失, 段然等^[18]的研究表明, 在控释减氮 30% 和减磷 20% 处理下, 玉米和油菜的磷素养分利用率显著提高, 玉米的磷素利用率提高 2.02%, 油菜的磷素利用率提高 2.56%, 并且控释掺混肥减氮减磷增产效果明显。磷素的利用率提高可能与控释氮对水稻的生长促进作用以及减磷施肥有关, 作物生长后期磷肥吸收充足不仅能防止叶片早衰、增强后期光合作用, 还有利于维持生育后期较强的根系活力, 增强根系磷养分吸收能力, 进而提高水稻磷的利用效率。

另一方面, 包膜控释肥中可降解的树脂包膜施入土壤后, 为土壤微生物提供了有效碳源, 刺激微生物的生长, 从而改变微生物群落的组成和结构^[19]。包膜控释肥的降解结构也为微生物分解含磷有机物或无机物提供合适的场所, 加快了土壤中磷素的周转速率, 从而降低了田面水磷的含量。土壤磷酸酶活性的大小对土壤有机磷矿化、水解作用及其对植物的有效性有着巨大的影响, 是有机磷转化为无机磷被植物利用这一过程的关键酶^[20]。树脂控释肥降解产生的残膜, 能使土壤容重降低, 孔隙度增加, 提高了土壤的透气性, 改善了土壤的物理性质, 对土壤细菌、真菌和放线菌数量以及土壤脲酶、转化酶和中性磷酸酶活性有促进作用, 为土壤微生物和酶提供了更为适宜的生存环境。

总体而言, 本研究中植物油聚氨酯包膜肥的施用, 显著提高了水稻对磷素的累积和利用, 对单季稻磷素利用效率有显著的提升效果。

3.2 控释掺混肥对田面水磷形态及其流失风险的影响

本研究表明, 整个观测期内施用控释掺混肥处理(CMF1、CMF2、CMF3)的田面水 TP、DTP、PP 浓度变化趋势与常规施肥(NPK)类似, 但含量始终低于 NPK 处理, 而控释减量施肥处理(CMF2、CMF3)的 TP、DTP、PP 含量又低于控释等量施肥处理(CMF1), 说明控释掺混肥的施用尤其是减量施肥可有效降低田面水中 TP、DTP、PP 浓度。此外, 本研究中 PO_4^{3-} 的比例高于 DOP, 这可能是由于长期淹灌条件下形成的嫌气环境可显著降低土壤黏粒和有机质对磷的吸附, 使得土壤中蓄闭态磷含量增加, 淹水后 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 向 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 转化, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 溶解产生 PO_4^{3-} ^[21]。磷素释放现象的可能原因有 NPK 处理的田面水磷素含量在施入水田时因释放速率过快且未被土壤吸附固定而迅速升高, 控释掺混肥处理的

磷素含量因肥效释放缓慢, 所以其磷素浓度显著低于 NPK 处理, 之后由于土壤对磷素的吸附固定、水稻对磷素的吸收、以及磷素的淋溶下渗等途径, 使得田面水中的磷素浓度逐步降低。

高强度的磷肥施用是造成农田径流磷流失量大的主要原因, 同时也与施肥方式、水肥管理方式及种植制度有关。郑小龙等^[22]研究表明生物质炭配施化肥处理的田面水总磷浓度在施肥后第 3 天达到最高, 而后迅速下降, 一周后趋于稳定; 可溶磷浓度在施肥后 4~5 d 内处于一个平稳的状态, 而后平缓下降至施肥前水平。本研究中掺混控释肥施用下的总磷浓度在施肥后第 5 天达到最高, 随后下降, 这可能是由于包膜控释肥的释放相较生物质炭配施化肥处理更加缓慢, 导致田面水总磷浓度、可溶性磷浓度峰值向后推移。焉莉等^[23]和袁浩凌^[24]等研究表明, 控释肥施用下的磷素流失量显著低于常规施肥处理及其他处理。说明控释肥能够有效控制养分释放速率, 降低田面水中磷浓度和可溶性磷以及颗粒态磷的含量, 能够降低磷素损失量, 降低农田面源污染。本研究表明, 施肥后 5 d 磷素浓度较高, 说明施肥后 5 d 是稻田磷素流失的最大风险期, 此时是控制水体养分流失的最佳时期, 应严格控制灌水深度和田面水排放。

3.3 控释掺混肥施用对水稻经济效益的影响

控释肥一次性施用可保障作物产量, 提高肥料利用率, 减少人工追肥的成本, 增加直接经济收入。本试验结果表明, 控释肥处理较常规施肥处理相对收益分别增加 2 593.3~4 714.2 元·hm⁻², 直接经济收入增加 15.0%~27.2%, 控释掺混肥收益明显高于常规肥料处理。这说明通过控释掺混肥一次性施用和磷肥减量措施减少了磷肥的投入量, 保证了水稻产量, 提升了水稻磷肥利用率, 节约了人力成本, 而且降低了磷素损失, 其中以减磷 40% 的效果最好, 可有效地提高肥料利用率, 具有减磷、增产、增效的多重效果, 进一步发挥了控释肥的减施增效的潜能, 符合目前化肥减施增效的农业需求。

4 结论

(1) 一次性施用控释掺混肥对提高单季稻磷素吸收量和磷肥的利用效率效果显著。在磷肥盈余量指标上显著优于常规施肥;

(2) 控释掺混肥处理可有效降低田面水磷浓度, 还可降低可溶性磷占比, 增加颗粒态磷的比例, 改变磷素的形态分布;

(3) 控释掺混肥处理的田面水中总磷、可溶性

总磷、颗粒态磷、可溶性有机磷和磷酸盐的浓度变化随施肥天数的增加呈先缓慢增加再降低的抛物线变化趋势, 符合一元二次方程 $Y=ax^2+bx+c$, 该方程能较好预测田面水中磷素浓度变化;

(4) 综合考虑单季稻种植模式下水稻产量、施肥成本和磷肥利用率, 相较常规施肥, 控释掺混肥在降低农业污染非点源磷污染和提高经济效益上具有一定的优势, 其中以控释减磷 40% 处理的施肥效果最好。

参考文献:

- [1] 程明芳, 何萍, 金继运. 我国主要作物磷肥利用率的研究进展[J]. 作物杂志, 2010(1): 12-14.
- [2] 严磊, 吴田乡, 赵素雅, 等. 雨强及播栽方式对太湖地区麦田径流氮磷流失的影响[J]. 土壤, 2022, 54(2): 358-364.
- [3] 宋燕凤, 张前前, 吴震, 等. 田间陈化生物质炭提高稻田土壤团聚体稳定性和磷素利用率[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(4): 613-621.
- [4] 张忠学, 孙迪, 李铁成, 等. 节水灌溉减施磷肥对黑土稻作产量及土壤磷利用与平衡的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 67-74.
- [5] 田玉华, 贺发云, 尹斌, 等. 不同氮磷配合下稻田田面水的氮磷动态变化研究[J]. 土壤, 2006, 38(6): 727-733.
- [6] 周萍, 范先鹏, 何丙辉, 等. 江汉平原地区潮土水稻田面水磷素流失风险研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4): 47-50, 116.
- [7] 蒋炳伸, 沈健林, 王娟, 等. 秸秆还田稻田土壤生物有效性磷及水稻磷吸收[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 309-317.
- [8] 郭文, 郭华春, 卢义宣, 等. 不同氮肥施用量与磷肥运筹对云光 109 叶长及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2012, 25(3): 935-939.
- [9] 黄允, 徐天成, 高恒宽, 等. 缓控释肥应用研究进展[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(S1): 32-36.
- [10] 赵秉强, 张福锁, 廖宗文, 等. 我国新型肥料发展战略研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 536-545.
- [11] 黄思怡, 周旋, 田昌, 等. 控释尿素减施对双季稻光合特性和经济效益的影响[J]. 土壤, 2020, 52(4): 736-742.
- [12] 金丹丹, 宫亮, 李波, 等. 2 种缓/控释肥对滨海盐碱地区水稻产量及氮代谢的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 334-339.
- [13] 斯林林, 周静杰, 吴良欢, 等. 生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5383-5390.
- [14] 叶玉适, 梁新强, 李亮, 等. 不同水肥管理对太湖流域稻田磷素径流和渗漏损失的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(4): 1125-1135.
- [15] 花可可, 李蒙蒙, 钟成虎, 等. 沿江单季稻区控释掺混肥施用效应研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 314-323.

- [16] 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: 13-52.
- [17] 徐壮, 王婉瑕, 徐磊, 等. 水稻磷素吸收与转运分子机制研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5): 1378-1385.
- [18] 段然, 汤月丰, 文炯, 等. 减量施肥对湖垵旱地作物产量及氮磷径流损失的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 536-543.
- [19] 纪洋, 于海洋, RALF C, 等. 间隙灌溉和控释肥施用耦合措施对稻麦轮作系统土壤微生物群落丰度的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(10): 1696-1703.
- [20] 刘明, 张民, 杨越超, 等. 控释肥残膜对小麦各生育期土壤微生物和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 1012-1017.
- [21] 田仓, 虞铁俊, 吴龙龙, 等. 不同灌溉和施肥模式对稻田磷形态转化和有效性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(24): 112-122.
- [22] 郑小龙, 吴家森, 陈裴裴, 等. 不同施肥与生物质炭配施对水稻田面水氮磷流失及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 39-43, 48..
- [23] 焉莉, 冯国忠, 卢文喜, 等. 干旱年际施肥方式对径流淋溶氮磷流失的影响[J]. 中国农村水利水电, 2017(9): 32-35.
- [24] 袁浩凌, 黄思怡, 孔小亮, 等. 不同施肥模式对早稻季农田氮磷径流流失的影响[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(4): 776-784.

安徽农业大学殷宗俊教授团队成功培育安徽省首批体细胞克隆地方猪

2月8日, 安徽农业大学殷宗俊教授团队在安徽大自然种猪股份有限公司开展的定远猪体细胞克隆和胚胎移植实验获得成功, 4头通过胚胎移植受孕的大白母猪, 已顺利产下56头全身被毛黑色、健康状况良好的纯种淮猪(定远猪)仔猪, 胎均产仔数14头。定远猪是中国优良地方品种之一, 原产我省江淮之间的古老地方品种, 具有繁殖力高、耐粗饲、肉质优良、适应性强等优点, 2006年被列入《国家级畜禽遗传资源保护名录》, 是国家畜禽遗传资源的基因库, 也是今后培育自有知识产权良种猪的宝贵素材。体细胞克隆定远猪的成功分娩, 标志着安徽已经全面掌握地方猪遗传资源体细胞冻存方式, 实现了遗传资源的长期保存和活体恢复, 优质畜禽种质资源保护工作迈上了新的高度, 也意味着向破解相关‘卡脖子’问题、实现我省种业振兴迈出了关键一步。

2022年上半年, 在第三次全国畜禽遗传资源普查及精准鉴定项目及安徽省农业农村厅的支持下, 殷宗俊教授团队采集了我省淮猪(定远猪、皖北猪、霍寿黑猪)、圩猪、安庆六白猪、皖南花猪和皖南黑猪等7个地方猪品种/品系350头猪(覆盖全部血统)的组织、基因和精液样本, 开展了我省地方猪种的组织样、基因组和冻精等全方位的生物保存, 实现了我省地方猪遗传资源的活体+生物双重保存体系, 有效保障了地方猪遗传基因库。2022年下半年, 课题组在安徽省生猪良种联合攻关、国家生猪种业提升项目、安徽省科技重大专项等项目的支持下, 联合安徽省大自然种猪股份有限公司和河南创源生物公司, 开展了定远猪体细胞克隆研究, 经过种猪采集组织样品、培养克隆胚胎、筛选代孕母猪等一系列步骤, 于10月完成5头代孕母猪的体细胞克隆胚胎移植, 成功怀胎4头, 本次研究的胚胎移植受孕率和产仔数均达到了国际先进水平。

畜禽遗传资源是生物多样性的的重要组成部分, 是畜牧业可持续发展的物质基础, 良种是养殖业的“芯片”。相对于常规的活体保存和冻精保存方式, 体细胞克隆技术的高妙之处在于, 只需采集优秀种猪的耳缘组织, 分离培养成纤维细胞, 再利用核移植技术生产胚胎, 就能让这些优秀个体重生。这种长效保存技术既规避了引进活猪可能存在的生物安全风险, 也极大地挽救了濒临灭绝的地方种质资源。特别是在非洲猪瘟等重大疫情下保护地方猪种质资源和现实可持续生产都具有重大的理论和现实意义。