

◆健康保育与环境修复◆

不同供磷水平对水稻产量、磷肥利用率的影响研究

张京萍¹, 余淋¹, 张雪儿², 夏雪¹, 张卫峰², 田达³, 丁茂⁴, 束维正⁴, 王坤⁴, 肖然¹(1. 西南大学 资源与环境学院, 重庆 400715; 2. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;
3. 安徽农业大学 资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; 4. 中盐安徽红四方肥业股份有限公司, 安徽 合肥 230000)

[摘要] 在安徽省肥西县开展田间小区试验, 分析不同供磷水平 (0、45、90、135 kg/hm²) 下水稻干物质积累、产量构成、磷肥利用率和经济效益等, 利用线性加平台方程和灰色关联度法综合评价确定该地区最佳磷用量。结果显示, 依据产量与施磷量的关系, 得出最高产量的施磷量为78.24 kg/hm², 产量为11.91 t/hm²; 综合评价水稻产量、磷肥利用率以及净收益等, P90处理效果最佳。结合水稻产量、经济收益、水稻磷肥利用效率及磷素表观收支平衡等指标, 在试验条件下, 推荐78.24~90.00 kg/hm²作为安徽省沿江圩丘双季稻种植区水稻生产中的最佳供磷量。

[关键词] 磷肥; 供磷水平; 水稻; 产量; 磷肥利用效率; 经济效益

[中图分类号] S147.5 [文献标志码] A [文章编号] 2097-4566 (2025) 06-0108-07

Study on the effects of different phosphorus supply levels on rice yield and phosphate fertilizer utilization rate

ZHANG Jingping¹, YU Lin¹, ZHANG Xueer², XIA Xue¹, ZHANG Weifeng², TIAN Da³,
DING Mao⁴, SHU Weizheng⁴, WANG Kun⁴, XIAO Ran¹

(1. College of Resources and Environment, Xinan University, Chongqing 400715, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193; 3. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 4. CNSG Anhui Hongsifang Co., Ltd, Hefei 230000, China)

Abstract: A field plot experiment is carried out in Feixi country, Anhui province to analyze the dry matter accumulation, yield composition, phosphate fertilizer utilization efficiency and economic benefits of rice under different phosphorus supply levels (0, 45, 90 and 135 kg/hm²). The optimal phosphorus dosage in the area is determined through a comprehensive evaluation using linear platform equations and grey correlation method. The results show that based on the relationship between yield and phosphorus application rate, the highest yield is 11.91 t/hm², which is obtained with a phosphorus application rate of 78.24 kg/hm²; The comprehensive evaluation of rice yield, phosphorus fertilizer utilization rate, and net income shows that P90 treatment has the best effect. Based on indicators such as rice yield, economic benefits, phosphorus fertilizer utilization efficiency, and apparent phosphorus balance, under experimental conditions, 78.24 - 90.0 kg/hm² is recommended as the optimal phosphorus supply in rice production in the Yanjiang planting area of Anhui province.

Key words: phosphate fertilizer; phosphorus supply level; rice; yield; phosphate fertilizer utilization rate; economic efficiency

水稻总产量约占我国粮食总产量的40%, 是我国重要粮食作物^[1]。磷作为水稻生长发育必需元素之一, 在保障农作物高产中发挥着不可替代的作用。水稻吸收利用的磷主要来源于土壤有效磷和施用的磷肥^[2], 磷元素在土壤中多以难以利用的固态磷形式存在, 导致农作物对土壤中磷素的吸收利用能力较差^[3], 当前农业生产中磷肥当季利用效率仅10%~25%^[4-5]。因此, 世界各国施用大量磷肥, 以满足农作物生长发育对磷素的需求^[6]。但磷肥施用不合理会出现土壤酸化板结、土壤结构破坏、肥料

利用率下降及水体富营养化等大量问题^[7-9]。另外, 我国磷矿资源有限, 且主要分布在云、贵、鄂、川等地区, 高品位磷矿资源可利用年限不足10年^[10]。因此, 合理施用磷肥对提高水稻磷肥吸收与利用以

[收稿日期] 2023-12-06; [修回日期] 2025-04-10

[作者简介] 张京萍(1997-), 女, 甘肃庆阳人, 在读硕士研究生, 主要从事新型肥料研发。

[通信作者] 肖然(1990-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事农业有机废弃物资源化研究。

[基金项目] 中盐红四方绿色智能复合肥产业研究院与巢湖面源污染关键技术研究项目(FYGS-JS-202111)

及降低环境风险、节约磷资源至关重要^[11]。

水稻是安徽主要粮食作物之一，播种面积和总产量分别占全省的30%和40%以上^[12]。目前农户过度依赖平衡肥，未考虑水稻对不同养分吸收的差异性，造成安徽省水稻磷肥施用量29.4%^[13]。目前关于水稻磷肥用量的研究主要集中于农作物增产效果方面^[14-16]，而关于水稻季磷肥施用量对水稻产量、磷肥利用率和经济效益等的研究较少，尤其是关于水稻综合效益的评价未见报道。本研究通过田间小区试验，考察磷肥用量对于水稻产量、磷肥利用效率及经济效益的影响，利用线性加平台确定最佳磷肥用量，并通过灰色关联度法评价水稻综合效益，对实现安徽省水稻减肥增效和农业绿色发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于安徽省合肥市肥西县严店乡三元村，该地年平均气温15℃，平均年降水量在995.3mm，年平均日照时间2100h，为稻油轮作，一年两熟种植制度。供试土壤基础性质： w (碱解氮)112.73mg/kg， w (有效磷)19.91mg/kg， w (速效钾)87.24mg/kg， w (有机质)22.15g/kg，pH5.27。

1.2 试验设计与材料

试验于2022年5月开始，采用单因素随机区组试验，按照磷肥施用量设置P0(不施磷)、P45(45kg/hm²)、P90(90kg/hm²)和P135(135kg/hm²)4个磷水平处理。每个磷水平3次重复，共计12个小区。试验小区面积为30.25m²，按照每穴行距35cm，株行距30cm栽种。两边设保护行，各小区间设置单独排水口，筑埂后覆膜以防止水肥流窜。

供试水稻品种为徽两优882。供试肥料为常规复合肥(15-15-15)、尿素(w (N)46%)、过磷酸钙(w (P₂O₅)11%)、氯化钾(w (K₂O)60%)和赛料素I型脲铵氮肥(添加质量分数0.2%的脲酶抑制剂NBPT)。施肥方式为磷钾肥作基肥一次性混施。各处理氮钾肥用量均为当地常规施肥量，分别是氮肥(N)225kg/hm²、钾肥(K₂O)145kg/hm²，氮肥作基肥、分蘖肥和穗肥按6:3:1分3次施入，其中常规复合肥、尿素作基肥，I型脲铵氮肥作追肥。水稻育秧后6月进行人工移栽，9月成熟收获。其他管理措施与当地农户保持一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株测定

在水稻生长发育的分蘖期、穗期、灌浆期和成

熟期，根据单穴平均茎蘖数分别在每个处理小区选择3株代表性水稻，取其植株地上部装袋。样品先在105℃烘箱杀青30min，再在80℃下烘至恒质量，称量，其质量代表水稻植株干物质积累量。

水稻成熟期，在各小区选取1m²水稻单收测定产量，同时测定有效穗数、穗粒数、千粒质量和结实率，计算理论产量。将植株烘干后粉碎处理，测定全磷含量，分析方法参考《土壤农化分析》^[17]。

1.4 数据处理与分析

磷肥贡献率=(施磷区产量-不施磷区产量)×100%/施磷区产量；收获指数=(籽粒产量/地上部生物量)×100%；磷肥农学利用率=(施磷区产量-不施磷区产量)/磷肥用量；磷肥表观利用率=(施磷区地上部磷素积累量-不施磷区地上部磷素积累量)×100%/磷肥用量；磷肥偏生产力=施磷区产量/施磷量；磷素表观盈余=施磷量-成熟期地上部总磷吸收量；磷素实际平衡率=(输入-支出)/支出。净收益=作物产量×作物单价-总投入(所有物资和劳动力成本均按当年价计算)。

采用Excel 2016进行数据处理和图形绘制，用SPSS 20.0软件对所得数据进行统计分析，通过最小显著差异法(LSD)进行显著性检验($P < 0.05$)。利用灰色关联度法^[18]，对不同供磷水平处理的水稻产量效益进行综合评价。其中，正向指标如籽粒产量、磷肥表观利用率和净收益越高越好，而逆向指标如磷肥表观盈余和磷素实际平衡率则是越低越好。基于这些指标的最优值构建了一个相对理想的“参考处理”，该“参考处理”各项指标值所构成的数列作为参考数列。将本试验中不同供磷水平处理下水稻籽粒产量、收获指数等各单项指标所构成的数列作为比较数列，计算关联系数及关联度。关联度值越高，与理想“参考处理”关联越密切，关联度值越低，与理想“参考处理”关联越远。

2 结果与分析

2.1 不同供磷水平对水稻干物质积累的动态影响

不同供磷水平下水稻生育期干物质积累量见图1。

由图1可知，供磷水平对水稻地上部干物质积累量具有显著影响。在水稻生育期内，各处理水稻干物质积累量不断增加，成熟期达到最大。同一生育时期，不同供磷水平下干物质积累量存在一定差异，其中分蘖期P135处理水稻干物质积累显著低于P0处理；穗期P0处理水稻干物质积累量最少，为10.51t/hm²，P45、P135处理及P0、P135处理间差异不显著；灌浆期P45处理水稻干物质质量积累最

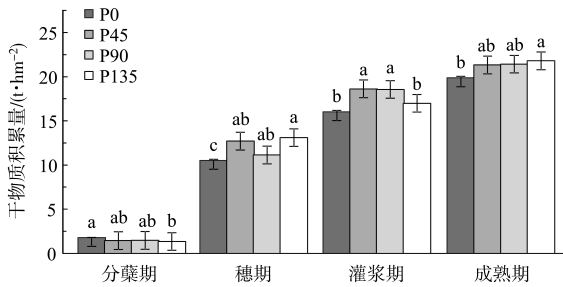


图1 不同供磷水平下水稻生育期干物质积累量

Fig. 1 Dry matter accumulation of rice during the reproductive period under different levels of phosphorus supply

注:同一行中的不同小写字母分别表示不同供磷水平的显著差异 ($P < 0.05$)。

多,为18.62 t/hm²,显著高于P0、P135处理;成熟期P135处理水稻干物质质量积累最多,为21.80 t/hm²,显著高于P0处理,与P45、P90处理间差异不显著。不同供磷水平下水稻收获指数见表1。随施磷量增加,收获指数呈现出先增后减的趋势,其中P90收获指数显著高于P0、P135处理。说明施用磷肥可相对促进水稻干物质积累,但供磷水平过高会导致收获指数下降。

表1 不同供磷水平下水稻收获指数

Table 1 Rice harvest index under different phosphorus supply levels

处理	收获指数/%	处理	收获指数/%
P0	47.57c	P90	55.71a
P45	53.35ab	P135	49.72b

2.2 不同供磷水平对水稻产量及产量构成因子的影响

不同供磷水平对水稻产量的影响见表2。由表2可知,供磷水平对水稻产量具有显著影响。P45、P90和P135处理下水稻产量较P0处理均显著增加,增产幅度为14.71%~26.35%。随着供磷水平提高,水稻产量呈现出先增后减趋势,P90处理下水稻产量最高,达到11.94 t/hm²。不同供磷水平

表2 不同供磷水平对水稻产量的影响

Table 2 Effect of different levels of phosphorus supply on rice yield

处理	理论产量/(t·hm ⁻²)	较P0处理增产率/%	磷肥贡献率/%
P0	9.45±0.50 b		
P45	11.39±0.31 a	20.53	17.03
P90	11.94±0.51 a	26.35	20.85
P135	10.84±0.33 a	14.71	12.82

注:同一行中的不同小写字母分别表示不同供磷水平的显著差异 ($P < 0.05$),下同。

下,水稻增产率和磷肥贡献率均表现为P90最高,分别达到26.35%和20.85%。由此可见,供磷对水稻具有明显的增产效果,以P90处理效果最好。

不同供磷水平对水稻产量构成因子的影响见表3。由表3可知,施用磷肥可以提高水稻有效穗数、单穗粒数、千粒质量和结实率。水稻有效穗数和千粒质量在不同施磷处理下均有所提高,但各处理之间无显著性差异;P45、P90处理水稻穗粒数均显著高于P135处理和P0处理 ($P < 0.05$);与P45处理相比,P135处理下水稻结实率显著提高 ($P < 0.05$),P90处理水稻结实率有所提高,但差异不显著。与P0处理相比,P45、P90和P135处理下水稻结实率分别提高了0.41%、1.09%和4.06%。由此说明,施用磷肥可以通过提高水稻每穗粒数和结实率来提高产量。

表3 不同供磷水平对水稻产量构成因子的影响

Table 3 Effect of different levels of phosphorus supply on yield components of rice

处理	每公顷有效穗数/10 ⁴	单穗粒数	千粒质量/g	结实率/%
P0	237.80 ± 8.34 a	223.08 ± 1.83 b	21.42 ± 0.99 a	82.24 ± 0.75 ab
P45	249.46 ± 3.39 a	245.75 ± 3.84 a	22.49 ± 0.58 a	82.65 ± 1.57 b
P90	256.14 ± 10.53 a	248.10 ± 4.26 a	22.55 ± 0.34 a	83.31 ± 0.54 ab
P135	252.47 ± 7.12 a	223.42 ± 7.64 b	22.32 ± 0.84 a	86.30 ± 0.51 a

采用线性加平台模型,对不同供磷水平下水稻的籽粒产量进行拟合,获取磷肥用量和对应理论产量,结果见图2。由图2可知,产量肥料模型为 $y = 9.43 + 0.0317 \cdot x$ ($x < 78.24$ kg/hm²),相关系数 R^2 为0.657,达到显著水平。根据拟合方程可知,在本试验条件下最佳磷用量为78.24 kg/hm²,对应的理论经济产量为11.91 t/hm²。继续增加磷肥的投入量,产量虽能小幅度增加,但处理间并无明显差异,且会造成经济效益下降。

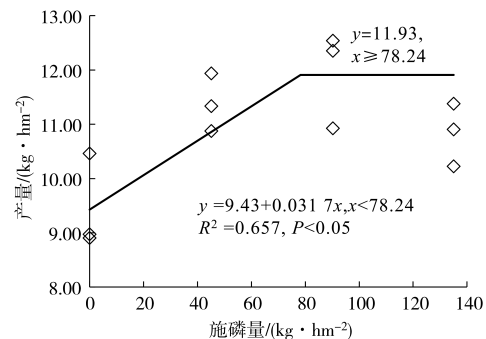


图2 不同供磷水平下水稻产量线性加平台分析

Fig. 2 Linear plus plateau analysis of rice yield under different levels of phosphorus supply

2.3 不同供磷水平对水稻磷肥利用效率的影响

不同供磷水平对水稻磷肥利用效率的影响见表4。由表4可知,随着施磷量增加,磷肥农学利用效率、表现利用率和偏生产力均表现为显著降低(P45 > P90 > P135)。

表4 不同供磷水平对水稻磷肥利用效率的影响

Table 4 Effect of phosphorus fertilizer use efficiency in rice under different levels of phosphorus supply

处理	磷肥施用量/ (kg·hm ⁻²)	磷肥农学利用率/ (kg·kg ⁻¹)	磷肥表现 利用率/%	磷肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)
P0	0			
P45	45	41.50 a	21.46 a	253.11 a
P90	90	27.67 b	16.36 b	132.67 b
P135	135	10.30 c	9.46 c	120.44 c

2.4 不同供磷水平对磷素表观收支平衡的影响

不同供磷水平对磷素表观收支平衡的影响见表5。由表5可知,不同供磷水平对水稻成熟期磷素收支平衡有不同程度的影响。P45、P90和P135磷肥处理下磷携出量均显著高于不施磷肥处理(P < 0.05),分别提高了47.89%、72.98%和56.62%,P90处理磷携出量最高。在土壤磷素表观盈亏量中,P0处理处于磷素亏缺状态,磷素亏缺量随供磷供应水平的增加而显著降低(P < 0.05)。此外,

磷素实际平衡率随供磷水平的增加而增加。

表5 不同供磷水平对磷素表观平衡的影响

Table 5 Effect of different levels of phosphorus supply on the apparent balance of phosphorus

处理	磷肥施用量 ^① / (kg·hm ⁻²)	作物磷携出量 ^② / (kg·hm ⁻²)	磷素表观盈亏 量 ^① /(kg·hm ⁻²)	磷素实际 平衡率/%
P0	0	20.17 b	-20.17 d	-100.00
P45	45	29.83 a	15.17 c	52.20
P90	90	34.89 a	55.11 b	162.19
P135	135	31.59 a	103.41 a	333.28

注:①以P₂O₅计;②不同小写字母表示差异显著(P < 0.05)。

2.5 不同供磷水平下水稻经济效益分析

不同供磷水平下水稻经济效益分析见表6。由表6可知,不同供磷水平对水稻经济效益存在影响。水稻磷供应量增加可提高水稻产值和净收益,各处理水稻产值表现为P90处理最大,P0处理最小;净收益在P90处理下达到最高,为26 366.99元/hm²,分别是P0处理和P135处理的1.23倍和1.16倍。4种处理的种子、用工等成本基本一致,但化肥成本差异较大。P135处理化肥成本最高,经济效益和产投比均大幅度下降。从经济效益与成本投入角度考虑,在单位面积上取得相同净产值的情况下,低投入的磷用量较为合理。

表6 不同供磷水平下水稻经济效益分析

Table 6 Analysis of economic benefits of rice under different levels of phosphorus supply

处理	产量/ (t·hm ⁻²)	总产值/ (元·hm ⁻²)	总投入/(元·hm ⁻²)				净收益/ (元·hm ⁻²)	产投比
			肥料成本	种子费用	用工成本	其他费用		
P0	9.45	24 570	2 055.70	540.00	180.00	280.00	21 514.30	7.04
P45	11.39	29 614	2 866.36	540.00	180.00	280.00	25 747.64	6.66
P90	11.94	31 044	3 677.01	540.00	180.00	280.00	26 366.99	5.64
P135	10.84	28 184	4 487.66	540.00	180.00	280.00	22 696.34	4.14

注:稻谷价格2.6元/kg;产值=产量×稻谷价格;收益=总产值-总投入成本;产投比=净收益/总投入;其他费用包括地膜、农药等费用。

2.6 不同供磷水平产量效益综合评价

利用灰色关联度分析法,分析不同供磷水平下水稻磷素表观盈亏、磷素实际平衡率、收获指数、磷肥表现利用率和净收益等指标的综合影响,筛选

出最佳供磷水平处理。如表7所示,在各单一指标关联度中,净收益关联度最大为0.499 3,其次是籽粒产量关联度为0.496 3,表明不同供磷水平对水稻净收益和籽粒产量的影响较大。通过比较各单一

表7 关联系数、关联度及综合评价排序

Table 7 The correlation coefficients, correlation degree, and comprehensive evaluation sorting

处理	关联系数					净收益	综合指标 关联度	排序
	磷素表观盈亏量	磷素实际平衡率	籽粒产量	收获指数	磷肥表现利用率			
P0	0.295 5	0.266 9	0.497 2	0.491 5	0.348 9	0.498 5	0.399 7	4
P45	0.376 4	0.386 6	0.495 9	0.493 5	0.437 2	0.500 2	0.448 3	2
P90	0.429 3	0.426 9	0.500 6	0.496 9	0.486 9	0.500 6	0.473 5	1
P135	0.269 4	0.250 6	0.491 6	0.498 9	0.426 4	0.498 1	0.405 8	3
单指标关联度	0.342 7	0.332 7	0.496 3	0.495 2	0.424 9	0.499 3		

指标的关联系数,发现P90处理对水稻籽粒产量、净收益影响最大。从综合评价结果与排序可知,P90处理关联度最高,P0处理关联度最低。

3 讨论

3.1 不同供磷水平对水稻干物质积累、产量及产量构成因素的影响

大量研究表明,在一定用量范围内,磷肥可以提高水稻产量,但超过一定用量,水稻产量呈下降趋势,造成水稻减产^[13,19]。本试验结果也证实过量施磷会造成水稻减产。干物质积累是水稻产量形成的基础,施磷显著增加水稻的中后期干物质质量积累,施磷量90 kg/hm²达到最大。然而,磷肥施用过量容易抑制水稻对氮肥的吸收利用,从而造成地上部干物质质量的积累不足,收获指数下降,并导致高供磷水平处理下水稻减产^[20]。

有效穗数、穗粒数、结实率和千粒质量是水稻产量构成的四大因子,共同决定水稻产量。研究表明,在保证结实率和千粒质量的基础上,促进水稻群体发育(单位面积穗数×每穗粒数)是水稻增产的关键^[21]。本试验结果也证实施用磷肥可显著影响水稻的穗粒数,对千粒质量无明显影响。P45和P90处理穗粒数均高于不施磷处理,但结实率P135处理高于其他处理,表明适量施用磷肥可以通过增加水稻穗粒数来实现增产或稳产,但高结实率并不一定能保证高产量。

3.2 不同供磷水平对水稻磷素磷肥效率及收支平衡的影响

肥料农学利用率、表观利用率和偏生产力作为肥料增产效应的适宜评价指标,受施肥量、养分积累和产量水平的影响较大。合理的磷肥施用量,能够提高水稻磷肥利用率^[22]。水稻磷肥农学利用效率、磷肥生理利用率、磷肥偏生产力和磷肥利用率均呈现随施磷量增加而下降的趋势^[23],这与本试验研究结果规律基本一致。磷肥施用过量导致土壤残存大量的磷,磷肥利用率下降,减少施磷量是提高磷肥利用率的有效途径之一,但一味减少施磷量无法达到高产的目标,因此施磷应以高产和养分高效利用为目标,合理适量施用磷肥,才可保证农业可持续发展,节约资源,提高磷肥利用率^[24]。

3.3 不同供磷水平对水稻经济效益的影响及产量效益综合评价

经济效益是衡量农作物生产力的关键指标。本试验结果表明总产值和净收益均以P90处理最高,其次是P45处理;而产投比是以P135处理最低。虽然

P45处理的产投比优于P90处理,但P90处理总产值和净收益最高,从农户角度考虑,P90处理可实现水稻增产增收,提高农户收益。

利用灰色关联法对上述与水稻产量效益的主要指标进行综合评价,克服了利用单一指标评价水稻产量效果的局限性,能真实反映不同供磷水平处理的实际产量效益。发现籽粒产量关联度最大,其次是净收益,因此推断出籽粒产量和净收益可作为不同供磷水平水稻产量效果的主要评价指标。通过比较各单一指标的关联系数,P90处理对水稻籽粒产量、净收益、收获指数影响最大,从综合评价结果与排序来看,P90处理关联度最高,P0处理关联度最低。进一步证实了供磷对于水稻籽粒产量、农户增收具有较好效果。综上所述,筛选出P90处理为最佳供磷处理,兼顾水稻减肥增效目的,对于保护粮食安全和环境安全具有重要意义。本试验仅为一年大田试验结果,有待进一步开展多年田间试验验证。

3.4 磷肥合理施用量推荐

基于土壤基础供磷量,目标产量需磷量、作物养分吸磷量和磷素的利用率等,我国在推荐作物磷肥用量确定最优施磷量方面开展了大量研究^[25-26],为我国农业可持续发展提供重要科学依据。陈新平等^[27]根据测土配方施肥给出了不同区域三大粮食作物磷肥推荐施用量,指出长江中游水稻磷肥推荐施入量为65~83 kg/hm²。通过对比刘钦普^[28]计算出的各区域的磷肥施用环境安全阈值(长江中游地区平均为79.37 kg/hm²)。本试验利用肥料效应函数法对水稻产量和施磷量进行拟合,建立线性加平台方程,得出安徽省沿江圩丘双季稻种植区水稻生产中磷肥的最佳施用量为78.24 kg/hm²时,最高产量为11.91 t/hm²。本试验结果推荐水稻季适宜施磷量低于环境安全阈值,说明推荐此磷肥施用量对环境是友好的,既可以提高磷肥偏生产力,又能降低农田磷素淋失风险。

4 结论

供磷可提高水稻干物质积累量和产量,并对水稻产量及构成因素影响显著。施磷量在45~135 kg/hm²范围内,水稻产量呈现出先增加后减少的规律。与不施磷肥相比,增产幅度为14.71%~26.35%。水稻农学利用效率、磷肥吸收利用率、偏生产力随着施磷量的增加而显著降低。通过线性加平台模型和灰色关联度法,结合水稻产量与经济效益,水稻磷肥利用效率及磷素表观收支平衡等因素

综合分析,在本试验条件下,安徽省沿江圩丘双季稻种植区水稻生产中的推荐供磷量在78.24~90.00 kg/hm²范围内,可以达到减肥增效的目的。但如何实现水稻高产与磷素养分高效利用的协调统一,还需要进一步研究探讨。

【参考文献】

- [1] 刘红江,郭智,郑建初,等.太湖地区氮肥减量对水稻产量和氮素流失的影响[J].生态学报,2017,36(3):713-718.
LIU H J, GUO Z, ZHENG J C, et al. Effects of nitrogen reduction on rice yield and nitrogen loss in Taihu area [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(3): 713-718.
- [2] 闫金垚,鲁君明,侯文峰,等.磷肥用量对不同水稻品种产量和磷肥利用率的影响[J].中国农业科技导报,2018,20(8):74-81.
YAN J Y, LU J M, HOU W F, et al. Influence of phosphorus application dosage on the yield and phosphorus recovery efficiency of different rice varieties [J]. China Agricultural Science and Technology Bulletin, 2018, 20(8): 74-81.
- [3] 马畅,付雪蛟,吕小红,等.施磷量对水稻盐丰47产量、需磷量及磷肥利用率的影响[J].东北农业科学,2022,47(6):20-24.
MA C, FU X J, LV X H, et al. Effects of phosphorus application on rice yield, phosphorus uptake and phosphorus use efficiency of Yanfeng 47 [J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2022, 47(6): 20-24.
- [4] 赵玉芬,尹应武.我国肥料使用中存在的问题及对策[J].科学通报,2015,60(36):3527-3534.
ZHAO Y F, YIN Y W. Key scientific problems on establishing green fertilizer insurance system (in Chinese) [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(36): 3527-3534.
- [5] 戴佩彬.模拟条件下磷肥配施有机肥对土壤磷素转化迁移及水稻吸收利用的影响[D].杭州:浙江大学,2016.
DAI P B. Effects of combined application of phosphorus fertilizer with organic manure on soil phosphorus transformation and phosphorus absorption and utilization by rice plants under simulated condition [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [6] BALEMI T, NEGISHO K. Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: a review [J]. Journal of soil science and plant nutrition, 2012,12(3):547-562.
- [7] 汪玉,袁佳慧,陈浩,等.太湖流域典型农田土壤磷库演变特征及环境风险预测[J].土壤学报,2022,59(6):1640-1649.
WANG Y, YUAN J H, CHEN H, et al. Soil phosphorus pool evolution and environmental risk prediction of paddy soil in the Taihu lake region [J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(6): 1640-1649.
- [8] 夏文建,冀建华,刘佳,等.长期不同施肥红壤磷素特征和流失风险研究[J].中国生态农业学报,2018,26(12):1876-1886.
XIA W J, JI J H, LIU J, et al. Effect of long-term fertilization on soil phosphorus characteristics and loss risk of red soil [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(12): 1876-1886.
- [9] LÓPEZ-ARREDONDO D L, LEYVA-GONZÁLEZ M A, et al. Phosphate Nutrition: Improving Low-Phosphate Tolerance in Crops [J]. Annual Review of Plant Biology, 2014, 65(1): 95-123.
- [10] 李维,高辉,罗英杰,等.国内外磷矿资源利用现状、趋势分析及对策建议[J].中国矿业,2015,24(6):6-10.
LI W, GAO H, LUO Y J, et al. Status, trends and suggestions of phosphorus ore resources at home and abroad [J]. China Mining Magazine, 2015, 24(6): 6-10.
- [11] 朱德峰,陈惠哲,徐一成,等.我国双季稻生产机械化制约因子与发展对策[J].中国稻米,2013,19(4):1-4.
ZHU D F, CHEN H Z, XU Y C, et al. Constraints and Development Strategies for Mechanization of Double-Season Rice Production in China [J]. China Rice, 2013, 19(4): 1-4.
- [12] 孔令娟,杨森,潘广元.安徽省水稻生产现状与产业发展思考[J].中国稻米,2023,29(1):98-102.
KONG L J, YANG S, Pan G Y. Rice production status and industrial development in Anhui province [J]. China Rice, 2023, 29(1): 98-102.
- [13] 王家宝,程焱,胡荣根,等.安徽省水稻施肥现状及技术需求[J].中国土壤与肥料,2021(4):162-171.
WANG J B, CHENG Y, HU R G, et al. Current situation and technical demand of rice fertilization in Anhui province [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(4): 162-171.
- [14] 王朋,刘洪伏.不同磷肥运筹对水稻产量形成的影响[J].安徽农学通报,2018,24(24):30-31.
WANG P, LIU H F. Effects of Different Phosphorus Fertilizer Management on Rice Yield Formation [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2018, 24(24): 30-31.
- [15] 刘洪伏,王朋,孙杰.磷肥运筹对华粳5号产量及其构成因素的影响[J].农业科技通讯,2018(12):97,253.
LIU H F, WANG P, SUN J. Effects of phosphorus fertilizer management on yield and its components of Huajing 5 rice [J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2018(12): 97,253.
- [16] 王丽萍,解保胜,顾春梅,等.磷肥运筹和试验品种对寒地粳稻干物质积累与转运的影响[J].中国土壤与肥料,2017(2):76-81.
WANG L P, XIE B S, GU C M, et al. Effects of phosphorus fertilizer management and varieties on dry matter accumulation and translocation in cold-region japonica rice [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017(2): 76-81.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2015.
- [18] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中理工大学出版社,1987.
- [19] 易均,谢桂先,刘强,等.磷肥减施对双季稻生长和产量及磷肥利用率的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2016,42(2):197-201.
YI J, XIE G X, LIU Q, et al. Effects of phosphorus fertilizer reduction on the growth, yield and its utilization efficiency of double cropping rice [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2016, 42(2): 197-201.
- [20] 陈磊,王盛锋,刘荣乐,等.不同磷供应水平下小麦根系形态及根际过程的变化特征[J].植物营养与肥料学报,2012,18(2):324-331.
CHEN L, WANG S F, LIU R L, et al. Changes of root morphology and rhizosphere processes of wheat under different phosphate supply [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2012, 18(2): 324-331.
- [21] 王伟妮,鲁剑巍,鲁明星,等.湖北省早、中、晚稻施磷增产效应

- 及磷肥利用率研究[J].植物营养与肥料学报,2011,17(4):795-802.
- WANG W N, LU J W, LU M X, et al. Effect of phosphorus fertilizer application and phosphorus use efficiency of early, middle and late rice in Hubei Province [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(4): 795-802.
- [22] 李前,侯云鹏,高军,等.不同供磷水平对水稻干物质累积、磷素吸收分配及产量的影响[J].吉林农业科学,2015,40(3):37-41.
- LI Q, HOU Y P, GAO J, et al. Effect of different phosphorus application on dry matter accumulation, phosphorus uptake and distribution and yield of rice [J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2015, 40(3): 37-41.
- [23] 侯云鹏,孔丽丽,李前,等.不同施磷水平下水稻产量、养分吸收及土壤磷素平衡研究[J].东北农业科学,2016,41(6):61-66.
- HOU Y P, KONG L L, LI Q, et al. Studies on effect of different phosphorus levels on yield, nutrient absorption of rice and soil phosphorus balance [J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2016, 41(6): 61-66.
- [24] 李莉,张锡洲,李廷轩,等.高产磷高效水稻磷素吸收利用特征[J].应用生态学报,2014,25(7):1963-1970.
- LI L, ZHANG X Z, LI T X, et al. Characteristics of phosphorus uptake and use efficiency of rice with high yield and high phosphorus use efficiency [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(7): 1963-1970.
- [25] 邓九胜,张炜,朱荣松,等.基于土壤有效磷水稻磷肥施用推荐体系的探讨[J].西北农业学报,2011,20(2):81-84.
- DENG J S, ZHANG W, ZHU R S, et al. Rice phosphorus fertilizer recommendation system study based on soil available phosphorus [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2011, 20(2): 81-84.
- [26] 单德鑫,王春宏,姜佰文,等.黑土中玉米平衡施肥法的有关参数测定[J].东北农业大学学报,2007(4):464-466.
- SHAN D X, WANG C H, JIANG B W, et al. Study on parameters of balanced fertilizer application of corn in black soil [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2007 (4): 464-466.
- [27] 陈新平,吴良泉,张福锁.中国三大粮食作物区域大配方与施肥建议[M].北京:中国农业出版社,2016.
- [28] 刘钦普.中国化肥面源污染环境风险时空变化[J].农业环境科学学报,2017,36(7):1247-1253.
- LIU Q P. Spatio-temporal changes of fertilization environmental risk of China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(7): 1247-1253.

(上接15页)

- [9] WANG Y C, QU C L, YU K, et al. PTFE-based flame retardant coatings optimized by melamine polyphosphate/aluminum diethyl hypophosphite/anhydrous transparent powder through orthogonal experiment [J]. Progress in Organic Coatings, 2024, 191:108423.
- [10] LI Z, YU S C, GONG Z W, et al. A natural glue paste aminated graphene oxide onto ammonium polyphosphate towards "multiphase integrated" polymer composites: synthesis and application [J]. Sustainable Materials and Technologies, 2025, 44:e01336.
- [11] 王娜,栾鸿赫,张静,等.介孔分子筛和 Cr_2O_3 协同膨胀阻燃体系对阻燃天然橡胶性能的影响[J].复合材料学报,2017,34(5):963-969.
- WANG N, LUAN H H, ZHANG J, et al. Synergistic effect of mesoporous molecular sieve and Cr_2O_3 with intumescent flame retardant on properties of flame-retarded natural rubber [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(5): 963-969.
- [12] ABDELKHALIK A, MAKHLOUF G, ABDEL-HAKIM A. Fire Behavior of Natural Rubber Filled with Intumescent Flame Retardant Containing Graphite [J]. J Vinyl Addit Technol, 2020, 26(2):155-164.
- [13] WANG J C, WANG X Y, ZHOU Z W, et al. Flame-retardant effect of tannic acid-based intumescent fire-retardant applied on flammable natural rubber [J]. Rsc Advances, 2022, 12(46): 29928-29938.
- [14] 徐立杰,张旭,徐瑞龙,等.聚磷酸铵和微囊化聚磷酸铵对NR/BR复合材料的性能影响[J/OL].山东科学. <https://link.cnki.net/urlid/37.1188.N.20250226.1200.006>.
- XU L J, ZHANG X, XU R L, et al. Effects of ammonium polyphosphate and microencapsulated ammonium polyphosphate on NR/BR composite properties [J/OL]. Shandong Science. <https://link.cnki.net/urlid/37.1188.N.20250226.1200.006>.
- [15] WANG J S, XUE L, ZHAO B, et al. Flame Retardancy, Fire Behavior, and Flame Retardant Mechanism of Intumescent Flame Retardant EPDM Containing Ammonium Polyphosphate/Pentaerythritol and Expandable Graphite [J]. Materials, 2019, 12(24):4035.
- [16] 姜豪,朱苗苗,朱远蹊,等.磷氮协同本征阻燃剂的制备及其阻燃丙烯酸酯的研究[J].现代化工,2021,41(9):81-85,91.
- [17] ZHANG W J, XU Y, YAN C T, et al. Preparation of novel and efficient arylphosphonate flame retardants for simultaneously enhancement of fire safety and UV-shielding properties of transparent thermoplastic polyurethane [J]. Polymer Degradation and Stability, 2024, 230:111029.
- [18] QIU S L, ZHOU Y E, ZHOU X, et al. Air-stable polyphosphazene-functionalized few-layer black phosphorene for flame retardancy of epoxy resins [J]. Small, 2019, 15(10):e1805175.
- [19] 兰昊,张强,唐凌君,等. P/N/B 协效阻燃剂合成及其在水性丙烯酸涂料中的应用 [J/OL]. 材料导报. <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.TB.20250418.1012.005>.
- LAN H, ZHANG Q, TANG L J, et al. Synthesis of P/N/B synergistic flame retardant and its application in aqueous acrylic coatings [J/OL]. Materials Reports. <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.TB.20250418.1012.005>.