

高海拔稻区水稻“3414”肥料效应研究

李刚^{1*}, 罗耀书², 蒋勤军², 王朝东^{2#}, 周富忠³

¹利川市元堡乡农业服务中心, 湖北 利川

²利川市凉雾乡农业服务中心, 湖北 利川

³利川市土壤肥料工作站, 湖北 利川

收稿日期: 2023年4月25日; 录用日期: 2023年5月23日; 发布日期: 2023年5月31日

摘要

在高海拔稻区(湖北利川), 设置“3414”肥料效应试验, 氮磷钾三要素的单因素和交互效应分析表明, 氮肥效应明显、磷钾肥基本无效应, 氮磷交互效应最高, 氮钾与氮磷钾相当, 磷钾无交互效应; 肥料利用率低, 氮肥利用率在27.55%~39.17%之间, 磷钾肥利用率基本为零或负值; 氮肥能很好拟合一元二次效应方程, 拟合的二元二次方程氮磷极显著、氮钾和磷钾不显著, 三元二次方程极显著; 综合一元、二元、三元二次方程计算的最佳或最大施肥量及水稻产量, 可将高海拔稻区的目标亩产定到600~750 kg, N、P₂O₅、K₂O亩用量18~25、10~15、16~22 kg, 根据水田的肥力水平适度调整。

关键词

湖北利川, 高海拔稻区, 水稻, “3414”, 肥料利用率, 施肥配方

Study on the Fertilizer Effect of Rice “3414” in High Altitude Rice Area

Gang Li^{1*}, Yaoshu Luo², Qinjun Jiang², Chaodong Wang^{2#}, Fuzhong Zhou³

¹Lichuan Yuanbao Township Agricultural Service Center, Lichuan Hubei

²Lichuan Liangwu Township Agricultural Service Center, Lichuan Hubei

³Lichuan Soil and Fertilizer Station, Lichuan Hubei

Received: Apr. 25th, 2023; accepted: May 23rd, 2023; published: May 31st, 2023

Abstract

In the high-altitude rice area (Lichuan, Hubei Province), the “3414” fertilizer effect test was set.

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 李刚, 罗耀书, 蒋勤军, 王朝东, 周富忠. 高海拔稻区水稻“3414”肥料效应研究[J]. 农业科学, 2023, 13(5): 433-445. DOI: 10.12677/hjas.2023.135059

The single factor and interaction effect analysis of the three elements of nitrogen, phosphorus and potassium showed that nitrogen had obvious effect, phosphorus and potassium had no effect, and the interaction effect of nitrogen and phosphorus was the highest. Nitrogen and potassium were equivalent to nitrogen, phosphorus and potassium, but phosphorus and potassium had no interaction effect. The utilization rate of fertilizer was low, and the utilization rate of nitrogen fertilizer was between 27.55% and 39.17%, while the utilization rate of phosphorus and potassium fertilizer was basically zero or negative. Nitrogen fertilizer can fit the one-element quadratic effect equation well. The fitting two-element quadratic equation is very significant for N and P, but not significant for N and P and K, and very significant for ternary quadratic equation. Based on the optimal or maximum fertilizer application and rice yield calculated by one-yuan, two-yuan and three-yuan quadratic equations, the target yield of high-altitude rice area can be set to 600~750 kg per mu, and the amount of N, P₂O₅ and K₂O mu can be 18~25, 10~15 and 16~22 kg, which can be moderately adjusted according to the fertility level of paddy field.

Keywords

Hubei Lichuan, High Altitude Rice Area, Rice, “3414”, Fertilizer Utilization Rate, Fertilization Formula

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

测土配方施肥是以土壤测试和田间试验结果为基础,根据作物需肥规律、土壤供肥性能和肥料效应,在合理施用有机肥的基础上,提出氮、磷、钾及中量、微量元素的施用品种、数量、施用时期及施用方法[1]。我国肥料效应相对较低,利用率氮肥为30%~35%,磷肥为10%~25%,钾肥为35%~50% [2];而农业先进发达国家氮肥利用率为40%~60% [3]。诸多的研究表明,“3414”肥料效应田间试验是获得作物最佳施肥量的有效方法[4] [5] [6] [7],更是提高肥料效率的必要途径。自2005年全国启动测土配方施肥项目以来,各地对不同作物的“3414”肥料效应研究较多,湖北利川在甘蓝、魔芋上也有报道[8] [9],但在水稻上暂无研究。按湖北省耕肥总站的统一安排,为探索高海拔稻区水稻科学施肥配方,2022年在湖北利川中部盆地海拔1100 m左右的水稻主产区设置“3414”肥效试验,现将结果报告如下。

2. 材料和方法

2.1. 试验时间与地点

时间为2022年4月~10月,地点在凉雾乡庄屋村3组,地处东经108.82367°、北纬30.22417°、海拔1069 m。土壤是石英砂岩发育的浅硅砂泥田,试验前取样检测,pH 5.82、有机质32.3 g/kg、全氮1.88 mg/kg、有效磷28.5 mg/kg、速效钾135.6 mg/kg;呈酸性,肥力水平高,按《湖北省耕地质量分级标准》(鄂耕肥[2018]16号)整体处于2级水平,在利川水田肥力水平中有较强的代表性。

2.2. 供试材料与作物

肥料: 尿素, N ≥ 46%; 过磷酸钙, P₂O₅ ≥ 12%; 氯化钾, K₂O ≥ 60%。

作物: 水稻, 品种为香稻——T 优 6135。

2.3. 试验设计与管理

根据水稻的需肥规律、利川水田的肥力水平及水稻施肥习惯，按“降氮稳磷增钾”的原则确定氮磷钾推荐施肥水平。按“3414”完全试验方案设 14 个处理，3 次重复，随机区组排列，各处理内容见表 1。小区面积 $10\text{ m} \times 2.1\text{ m} = 21\text{ m}^2$ ，小区间筑高 \times 宽 = $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 田埂覆膜间隔，保证不串肥串水，区组间留 60 cm 通道，便于田间观察。

2022 年 4 月 8 日播种，塑料棚保温早育方式育苗；5 月 20 日移栽，移栽规格 $26\text{ cm} \times 16\text{ cm}$ ，亩密度 16,000 蔸；移栽前按处理设计施入肥料，处理 1 不施；5 月 27 日，用细土拌除草剂撒施防除田间杂草；始穗期防稻飞虱、稻纵卷叶螟及穗颈稻瘟。10 月 6 日收获，按小区单打单收，计实产。收获前田间调查水稻株高、亩有效穗等指标，并按小区取样测量穗长、穗粒数、实粒数、结实率、千粒重等性状，检测稻谷、稻草全氮磷钾含量。

Table 1. Calculation of fertilizer application rates for different treatments

表 1. 不同处理肥料施用量计算表

处理号	处理内容	N kg/亩	P ₂ O ₅ kg/亩	K ₂ O kg/亩	尿素 kg/小区	过磷酸钙 kg/小区	氯化钾 kg/小区
1	N0P0K0	0	0	0	0	0	0
2	N0P2K2	0	6	10	0.00	1.57	0.52
3	N1P2K2	6	6	10	0.41	1.57	0.52
4	N2P0K2	12	0	10	0.82	0.00	0.52
5	N2P1K2	12	3	10	0.82	0.79	0.52
6	N2P2K2	12	6	10	0.82	1.57	0.52
7	N2P3K2	12	9	10	0.82	2.36	0.52
8	N2P2K0	12	6	0	0.82	1.57	0.00
9	N2P2K1	12	6	5	0.82	1.57	0.26
10	N2P2K3	12	6	15	0.82	1.57	0.79
11	N3P2K2	18	6	10	1.23	1.57	0.52
12	N1P1K2	6	3	10	0.41	0.79	0.52
13	N1P2K1	6	6	5	0.41	1.57	0.26
14	N2P1K1	12	3	5	0.82	0.79	0.26

2.4. 数据统计与分析

试验结果采用 Excel 进行数据分析，作 F 检验，新复极差法比较处理间差异。拟合氮磷钾三要素的一元、二元、三元二次回归方程，计算水稻最佳及最高产量氮磷钾的施用量，再结合大面积调查结果及不同区域水田肥力水平，推荐利川水稻氮磷钾的合理用量范围。

3. 结果与分析

3.1. 不同处理对水稻产量及效益的影响

由表 2 可知, 试验田基础地力较高, 贡献率(无肥区产量/施肥区产量)在 65.72%~100.51%之间。处理 8 (中氮磷无钾)稻谷产量最高, 其次分别是处理 11 (高氮中磷钾)、处理 14 (高氮低磷钾), 推荐施肥处理 6 居第 5 位, 处理 2 (无氮中磷钾)最低, 无肥区居倒数第 2 位。各施肥处理比不施肥增产-2.1~216.9 kg/亩, 增幅-0.51%~52.16%。方差分析处理间差异极显著, 区组间差异不显著; 新复极差检验, 不施肥与无氮中磷钾差异不显著, 与其它处理差异显著至极显著; 几个低氮处理之间差异不显著, 且与中氮磷低钾差异不显著, 低氮磷中钾与中氮磷高钾达显著水平; 几个中、高氮处理之间水稻产量差异不显著。

Table 2. Analysis of rice yield under different treatments

表 2. 不同处理水稻产量分析表

处理	处理内容	I	II	III	平均	多重比较	亩产	基础地力%	比 1 ± kg	比 1 ± %	位次
1	N0P0K0	13.2	12.6	13.5	13.10	eD	415.9	/	/	/	13
2	N0P2K2	13.8	11.4	13.9	13.03	eD	413.8	100.51	-2.1	-0.51	14
3	N1P2K2	18.4	16.7	14.3	16.47	cdBC	522.8	79.55	106.9	25.70	11
4	N2P0K2	18.2	20.2	18.0	18.80	abABC	596.8	69.68	181.0	43.51	4
5	N2P1K2	18.6	19.1	18.2	18.63	abcABC	591.5	70.30	175.7	42.24	6
6	N2P2K2	19.1	18.0	19.0	18.70	abcABC	593.7	70.05	177.8	42.75	5
7	N2P3K2	18.8	19.4	17.5	18.57	abcABC	589.4	70.56	173.5	41.73	7
8	N2P2K0	21.1	19.9	18.8	19.93	aA	632.8	65.72	216.9	52.16	1
9	N2P2K1	18.2	17.9	17.9	18.00	abcdABC	571.4	72.78	155.6	37.40	9
10	N2P2K3	18.1	19.2	17.3	18.20	abcABC	577.8	71.98	161.9	38.93	8
11	N3P2K2	20.1	19.7	19.2	19.67	aA	624.3	66.61	208.5	50.13	2
12	N1P1K2	18.6	13.2	15.9	15.90	dCD	504.8	82.39	88.9	21.37	12
13	N1P2K1	18.7	15.8	16.5	17.00	bcdABC	539.7	77.06	123.8	29.77	10
14	N2P1K1	19.1	20.5	17.9	19.17	abAB	608.5	68.35	192.6	46.31	3

注: 多重比较, 处理间无相同小写字母, 差异显著; 无相同大写字母, 差异极显著。

生产一亩水稻, 肥料以外的投入在 800 元左右, 肥料 N、P₂O₅、K₂O 的单价按 5.43、6.67、9.67 元/kg 计算, 稻谷单价按 3.0 元/kg 计算, 亩收入 1241.4~1898.4 元, 亩投入 800~1050.23 元, 亩肥料投入 0~250.23 元, 亩净收益 304.68~993.22 元, 产投比在 1.33~2.10 之间, 效益排位与产量排位略有差异(表 3)。

Table 3. Analysis of benefits of different treatments on rice
表 3. 不同处理水稻效益分析表

处理	处理内容	亩收入元	亩总投入	亩肥料投入	亩净收入	产投比	净收益位次
1	N0P0K0	1247.7	800	0	447.7	1.56	13
2	N0P2K2	1241.4	936.72	136.72	304.68	1.33	14
3	N1P2K2	1568.4	969.3	169.3	599.1	1.62	11
4	N2P0K2	1790.4	961.86	161.86	828.54	1.86	4
5	N2P1K2	1774.5	981.87	181.87	792.63	1.81	5
6	N2P2K2	1781.1	1001.88	201.88	779.22	1.78	6
7	N2P3K2	1768.2	1021.89	221.89	746.31	1.73	8
8	N2P2K0	1898.4	905.18	105.18	993.22	2.10	1
9	N2P2K1	1714.2	953.53	153.53	760.67	1.80	7
10	N2P2K3	1733.4	1050.23	250.23	683.17	1.65	10
11	N3P2K2	1872.9	1034.46	234.46	838.44	1.81	3
12	N1P1K2	1514.4	949.29	149.29	565.11	1.60	12
13	N1P2K1	1619.1	920.95	120.95	698.15	1.76	9
14	N2P1K1	1825.5	933.52	133.52	891.98	1.96	2

3.2. 氮磷钾增产效应分析

3.2.1. 缺素及交互效应分析

将表 2 中 1、2、4、8、6 处理提出, 组成不施肥、缺氮、缺磷、缺钾和推荐施肥结果表 4。试验田基础肥力产量为稻谷 415.9 kg/亩, 相对产量 70.05%, 试验地肥力中等, 不施肥减产率 29.95%, 土壤供肥能力为 70.05%。缺氮、缺磷、缺钾的相对产量分别为 69.70%、100.52%、106.59%, 三种肥料对水稻产量的影响为氮 > 磷 > 钾, 与吴寿华等[10]、金昆等[11]的研究结果相似, 氮营养左右了水稻产量、磷钾基本无影响。与不施肥相比, 增产幅度由高到低是 N2P2K0、N2P0K2、N2P2K2、N0P2K2, 分别为 52.15%、43.50%、42.75%、-0.50%。说明氮磷交互效应最高, 其次是氮钾、氮磷钾, 交互效应相当, 磷钾无交互效应, 与张志才等[12]、曹伟等[13]的研究结果相似。

Table 4. Analysis of nitrogen, phosphorus, and potassium deficiency and interaction effects
表 4. 氮磷钾缺素及交互效应分析表

处理号	处理内容	kg/亩	比 6 相对产量%	比 6 减产率%	比 1 增产率%
1	N0P0K0	415.9	70.05	29.95	0.00
2	N0P2K2	413.8	69.70	30.30	-0.50
4	N2P0K2	596.8	100.52	-0.52	43.50
8	N2P2K0	632.8	106.59	-6.59	52.15
6	N2P2K2	593.7	100.00	0.00	42.75

3.2.2. 单因素分析

根据氮、磷、钾施肥量与水稻产量作曲线图(图 1)可见,氮肥呈半边抛物线,氮肥用量与水稻单产尚未达到峰值,说明推荐氮肥用量偏低。磷肥用量与水稻产量的关系基本呈直线,钾肥用量与水稻产量的关系呈波状变化,进一步证明磷、钾对水稻单产影响很小。

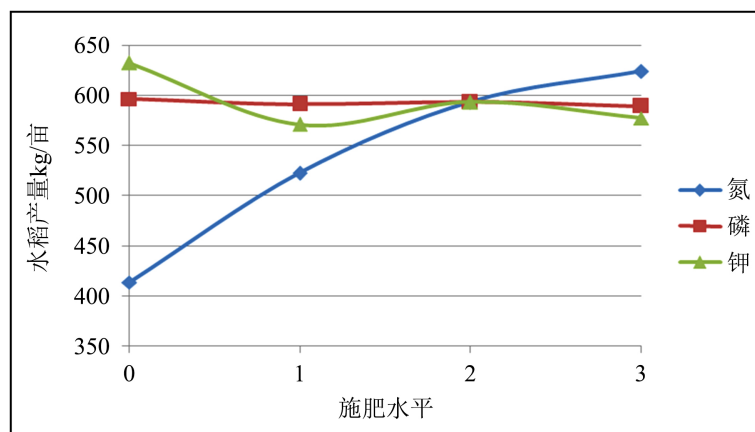


Figure 1. Relationship between nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer application and rice yield

图 1. 氮磷钾施肥量与水稻产量关系图

3.3. 氮磷钾肥料效应方程拟合与推荐施肥量确定

3.3.1. 一元二次效应方程拟合

将表 2 数据按氮、磷、钾三因素分解,氮抽取 2、3、6、11 处理,磷抽取 4、5、6、7 处理,钾抽取 8、9、6、10 处理,按 $Y = aX^2 + bX + c$ 一元二次回归模型进行回归分析,在 Excel 中绘制 N (P_2O_5 、 K_2O) 的施用量及稻谷产量的散点图,勾选显示公式及 R^2 值,拟合水稻产量(Y)与各养分因子(X)施用量的效应方程。氮的效应方程基本呈“抛物线”(图 2),相关系数为 1,达极显著水平;磷、钾拟合不成功,二次偏回归系数 > 0 ,呈倒“抛物线”,相关系数分别为 0.827、0.822,也未达显著水平($df = 4 - 2 = 2$ 时 $r_{0.05} = 0.950$ 、 $r_{0.01} = 0.990$)。

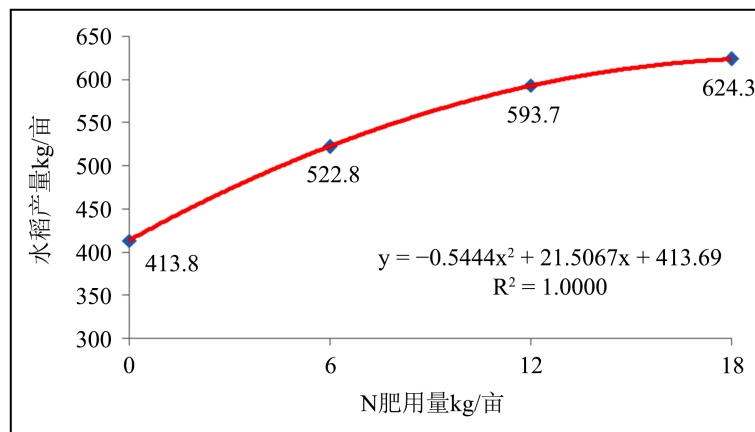


Figure 2. Univariate quadratic regression model of nitrogen fertilizer application and rice yield

图 2. 氮肥用量与稻谷产量一元二次回归模型图

对氮的一元二次效应方程求 x 的一价导数, 按 $b + 2aX = 0$ 、 $b + 2aX = Px/Py$ 分别求取最大、最佳施氮量, 预测稻谷最高、最佳产量, 结果见表 5。最高与最佳施氮量差异不大, 而水稻的最高与最佳产量基本没有差别。

Table 5. Prediction results of the application of the monovariate quadratic effect equation (kg/mu)

表 5. 一元二次效应方程应用预测结果(kg/亩)

因子	一阶求导	Px/Py	最高施肥	最高产	最佳施肥	最佳产
N	$dy/dx = 21.5067 - 2 \times 0.5444x$	1.81	19.75	626.10	18.09	624.59

注: 水稻价格按 3 元/kg 计算, 氮肥单价(以 N 计算)为 5.43 元/kg。

3.3.2. 二元二次效应方程拟合

将表 2 数据分别抽取 2、3、4、5、6、7、11、12 处理, 2、3、6、8、9、10、11、13 处理, 4、5、6、7、8、9、10、14 处理, 按二元二次回归模型 $Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_1X_1 + a_4X_2X_2 + a_5X_1X_2$ 分别拟合氮(N)磷(P)、氮钾(K)或磷钾二因素与水稻产量(Y)的效应方程, 再利用 Excel 中数据分析的回归, 求回归方程的回归统计 R^2 (R Square)、方差分析 F 值和系数, 系数(Coefficients)栏中 a_0 为截距(Intercept)、 a_1 为(X Variable 1)、 a_2 为(X Variable 2)…… a_n 为(X Variable n), 回归时 Y 值输入区域为稻谷产量矩阵 Y, X 值输入区域为施肥量系数矩阵 X (如表 6 中 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$), 结果见表 7。

也可用矩阵法计算二元二次、三元二次回归方程系数, 以拟合 N、P 二元二次回归方程为例:

矩阵 $A = X'X$ (矩阵 X 由表 6 中 $a_0 \sim a_5$ 组成, X' 为 X 的转置矩阵);

矩阵 $B = X'Y$ (矩阵 Y 由表 6 中稻谷亩产量组成);

矩阵 $C = A^{-1}$ (A^{-1} 为 A 的逆矩阵);

矩阵 $a = CB$ (该矩阵就是回归方程的系数 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$)。

Table 6. Sorting table of fertilization amount and yield results by solving NP binary quadratic regression equation coefficients

表 6. NP 二元二次回归方程系数求解施肥量与产量结果整理表

处理号	常数项 a_0	N(a_1)	P(a_2)	NN(a_3)	PP(a_4)	NP(a_5)	亩产量(Y)
2	1	0	6	0	36	0	413.8
3	1	6	6	36	36	36	522.8
4	1	12	0	144	0	0	596.8
5	1	12	3	144	9	36	591.5
6	1	12	6	144	36	72	593.7
7	1	12	9	144	81	108	589.4
11	1	18	6	324	36	108	624.3
12	1	6	3	36	9	18	504.8

Table 7. Fitting results of the binary quadratic effect equation between rice yield and fertilization rate
表 7. 水稻产量与施肥量二元二次效应方程拟合结果表

因子	二元二次效应方程	R ²	F 值
NP	$Y = 341.41 + 27.54N + 12.07P - 0.527N^2 + 0.0064P^2 - 1.064NP$	0.9997	1254.7**
NK	$Y = 515.56 + 13.78N - 13.41K - 0.387N^2 + 0.356K^2 + 0.451NK$	0.9732	14.515
PK	$Y = 690.00 - 14.53P - 12.85K + 0.6317P^2 + 0.378K^2 + 0.7455PK$	0.6626	0.7854

注: $F_{0.05(5,2)} = 19.30$ 、 $F_{0.01(5,2)} = 99.30$, “**”表示差异极显著,下同。

对表 7 中二元二次效应方程求一阶导数,得到以下三个方程组。

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \text{ NP 组: } & \begin{cases} dY/dN = 27.54 - 2 \times 0.527N - 1.064P \\ dY/dP = 12.07 + 2 \times 0.0064P - 1.064N \end{cases}; \\ \textcircled{2} \text{ NK 组: } & \begin{cases} dY/dN = 13.78 - 2 \times 0.387N + 0.451K \\ dY/dK = -13.41 + 2 \times 0.356K + 0.451N \end{cases}; \\ \textcircled{3} \text{ PK 组: } & \begin{cases} dY/dP = -14.53 + 2 \times 0.6317P + 0.7455K \\ dY/dK = -12.85 + 2 \times 0.378K + 0.7455P \end{cases}。 \end{aligned}$$

最佳施肥量及产量计算:因 $dY/dX = P_x/P_y$ 时(尿素、过磷酸钙、氯化钾单价分别为 2500、800、5800 元/吨, P_x 分别表示 N、 P_2O_5 、 K_2O 的单价 5.43、6.67、9.67 元/kg, P_y 表示稻谷单价 3.0 元/kg), Y 有最佳效益值,代入① ② ③并求解,得到亩最佳施肥量及相应水稻产量。由④ ⑤ ⑥可知,水稻 N、 P_2O_5 、 K_2O 亩最佳用量分别在 9.43~21.24 kg、1.71~14.84 kg、9.91~19.57 kg 之间,变幅皆较大;稻谷亩最佳产量 585.3~597.0 kg,差异较小。

矩阵法求二元一次方程的解:用函数 MINVERSE 求 N、P 系数(或 N、K 系数, P、K 系数)矩阵的逆矩阵,再用函数 MMULT 求逆矩阵与常数项矩阵的积,即为 N、P(或 N、K, P、K)的解。

$$\textcircled{4} \text{ NP 组: } \begin{cases} 5.43 \div 3 = 27.54 - 2 \times 0.527N - 1.064P \\ 6.67 \div 3 = 12.07 + 2 \times 0.0064P - 1.064N \end{cases} \xrightarrow{\text{求解}} \begin{cases} N = 9.43 \\ P = 14.84 \end{cases}, \text{代入 NP 二元一次效应方程 } Y_{NP} = 585.9 \text{ kg/亩};$$

$$\textcircled{5} \text{ NK 组: } \begin{cases} 5.43 \div 3 = 13.78 - 2 \times 0.387N + 0.451K \\ 9.67 \div 3 = -13.41 + 2 \times 0.356K + 0.451N \end{cases} \xrightarrow{\text{求解}} \begin{cases} N = 21.24 \\ K = 9.91 \end{cases}, Y_{NK} = 597.0 \text{ kg/亩};$$

$$\textcircled{6} \text{ PK 组: } \begin{cases} 6.67 \div 3 = -14.53 + 2 \times 0.6317P + 0.7455K \\ 9.67 \div 3 = -12.85 + 2 \times 0.378K + 0.7455P \end{cases} \xrightarrow{\text{求解}} \begin{cases} P = 1.71 \\ K = 19.57 \end{cases}, Y_{PK} = 585.3 \text{ kg/亩}。$$

最高产量及施肥量计算: $dY/dX = 0$ 时, Y 有最高产量,代入① ② ③方程组求解,得到亩最高施肥量及产量。由⑦ ⑧ ⑨可知,水稻最高产量的 N、 P_2O_5 、 K_2O 亩用量分别在 11.52~21.02 kg、3.52~14.47 kg、5.52~13.53 kg 之间,差距较大,氮、磷与最佳用量相当,钾用量反而大幅度低于最佳用量;稻谷的最高产量 577.52~623.4 kg,与最佳产量相差不大。

$$\textcircled{7} \text{ NP 组: } \begin{cases} 27.54 - 2 \times 0.527N - 1.064P = 0 \\ 12.07 + 2 \times 0.0064P - 1.064N = 0 \end{cases} \xrightarrow{\text{求解}} \begin{cases} N = 11.52 \\ P = 14.47 \end{cases}, Y_{NP} = 587.4 \text{ kg/亩};$$

$$\textcircled{8} \text{ NK 组: } \begin{cases} 13.78 - 2 \times 0.387N + 0.451K = 0 \\ -13.41 + 2 \times 0.356K + 0.451N = 0 \end{cases} \xrightarrow{\text{求解}} \begin{cases} N = 21.02 \\ K = 5.52 \end{cases}, Y_{NK} = 623.4 \text{ kg/亩};$$

$$\textcircled{9} \text{ PK 组: } \begin{cases} -14.53 + 2 \times 0.6317P + 0.7455K = 0 \\ -12.85 + 2 \times 0.378K + 0.7455P = 0 \end{cases} \xrightarrow{\text{求解}} \begin{cases} P = 3.52 \\ K = 13.53 \end{cases}, Y_{PK} = 577.5 \text{ kg/亩}。$$

NP、NK、PK 为 0 水平时，稻谷亩产分别为 341.4、515.6、690.0 kg，最优交互作用下分别可提高稻谷亩产 246.0、107.8、-104.7 kg，进一步验证了 NP 交互效应高于 NK，PK 无交互效应。

3.3.3. 三元二次效应方程拟合

用三元二次模型： $Y = b_0 + b_1N + b_2P + b_3K + b_4N^2 + b_5P^2 + b_6K^2 + b_7NP + b_8NK + b_9PK$ 进行回归分析，得到水稻产量(Y)与 N(N)、P(P₂O₅)、K(K₂O)养分施用量的三元二次效应方程。

$$Y = 416.8 + 24.63N + 8.33P - 9.36K - 0.46N^2 + 0.29P^2 + 0.25K^2 - 1.14NP + 0.17NK + 0.13PK. R^2 = 0.9836, F = 26.69^{**} (F_{0.05(9,4)} = 6.00, F_{0.01(9,4)} = 14.66)$$

按最大边际效应求偏导函数， $dY/dX = 0$ 时，Y 有最高产量； $dY/dX = Px/Py$ 时，Y 有最佳效益值。依然用矩阵求三元一次方程的解，函数 MINVERSE 求 N、P、K 系数矩阵的逆矩阵，函数 MMULT 求逆矩阵与常数项矩阵的积，即为 N、P、K 的解。

水稻最高产量及施肥量、最佳施肥量及产量结果见⑩ ⑪。N、P 的最高施肥量与最佳施肥量相差极小，K 的最佳施肥量反而大于最高施肥量，与二元一次效应函数计算结算一致；最高产量与最佳产量也相差很小。最佳施肥量 N:P₂O₅:K₂O = 13.38:11.84:17.54 与试验前推荐施肥量 12-6-10 差异较大，推荐用量肥料总量不足，特别是磷钾偏低，须加大施肥量。

$$\textcircled{10} \begin{cases} 24.63 - 2 \times 0.46N - 1.14P + 0.17K = 0 \\ 8.33 + 2 \times 0.29P - 1.14N + 0.13K = 0 \\ -9.36 + 2 \times 0.25K + 0.17N + 0.13P = 0 \end{cases} \xrightarrow{\text{求解}} \begin{cases} N = 14.43 \\ P = 11.57, Y_{\text{最高}} = 602.3 \text{ kg/亩} \\ K = 10.86 \end{cases}$$

$$\textcircled{11} \begin{cases} 24.63 - 2 \times 0.46N - 1.14P + 0.17K = 5.43 \div 3 \\ 8.33 + 2 \times 0.29P - 1.14N + 0.13K = 6.67 \div 3 \\ -9.36 + 2 \times 0.25K + 0.17N + 0.13P = 9.67 \div 3 \end{cases} \xrightarrow{\text{求解}} \begin{cases} N = 13.38 \\ P = 11.84, Y_{\text{最佳}} = 592.1 \text{ kg/亩} \\ K = 17.54 \end{cases}$$

二元、三元二次效应方程计算的氮磷钾用量与缺素分析、单因素分析的结果相差较大，主要表现在缺素分析、单因素分析磷钾效应都很小，而二元二次、三元二次计算的磷钾施用量反而较高。

3.4. 不同处理水稻生育期及生物学性状变化

3.4.1. 不同处理水稻生育期变化

在水稻各生育期观察，不施肥和不施氮肥处理水稻的株高明显低于其它处理，分蘖期分蘖相对较少，拔节期开始出现脱肥现象，叶片颜色逐渐变黄，株高也明显低于其它处理。拔节期开始略提前，后期出现早衰，提前成熟，大田生育期缩短一周左右。随着氮肥用量增加，水稻生育期呈上升之势(表 8)。

Table 8. Record of rice growth period at experimental sites
表 8. 试验点水稻生育期记载表

处理	处理内容	播种期	移栽期	分蘖期	拔节期	始穗期	齐穗期	成熟期	收获期
1	N0P0K0	4/8	5/20	6/18	7/12	7/25	8/10	9/25	10/6
2	N0P2K2	4/8	5/20	6/18	7/12	7/25	8/10	9/25	10/6
3	N1P2K2	4/8	5/20	6/18	7/13	7/27	8/12	9/28	10/6
4	N2P0K2	4/8	5/20	6/18	7/15	7/29	8/15	10/2	10/6
5	N2P1K2	4/8	5/20	6/18	7/15	7/29	8/15	10/2	10/6
6	N2P2K2	4/8	5/20	6/18	7/15	7/29	8/15	10/2	10/6

Continued

7	N2P3K2	4/8	5/20	6/18	7/15	7/29	8/15	10/2	10/6
8	N2P2K0	4/8	5/20	6/18	7/15	7/29	8/15	10/2	10/6
9	N2P2K1	4/8	5/20	6/18	7/15	7/29	8/15	10/2	10/6
10	N2P2K3	4/8	5/20	6/18	7/15	7/29	8/15	10/2	10/6
11	N3P2K2	4/8	5/20	6/18	7/15	7/29	8/15	10/2	10/6
12	N1P1K2	4/8	5/20	6/18	7/13	7/27	8/12	9/28	10/6
13	N1P2K1	4/8	5/20	6/18	7/13	7/27	8/12	9/28	10/6
14	N2P1K1	4/8	5/20	6/18	7/15	7/29	8/15	10/2	10/6

3.4.2. 不同处理水稻生物学性状变化

收获时调查水稻的株高、有效穗、穗长、穗粒、实粒、千粒重等指标,结果见表9。经方差分析和新复极差多重比较,不施肥和不施氮肥处理的株高显著低于其它处理,氮水平越高差异越明显,氮高磷钾中等的处理11与其它处理株高差异显著;有效穗、穗长、穗实粒数、结实率及千粒重各处理间差异未达到显著水平。计算的理论产量与实产排位差异较大。

Table 9. Questionnaire on economic characters of rice under different treatments

表9. 不同处理水稻经济性状调查表

处理	处理内容	株高 cm	有效穗 (穗/蔸)	穗长 cm	穗实粒 (粒/穗)	结实率 %	千粒重 g	理论产量 (kg/亩)	位次
1	N0P0K0	93.33d	7.13	21.66	117.74	79.34	28.64	384.7	14
2	N0P2K2	92.27d	8.23	22.38	105.06	77.01	29.25	404.7	13
3	N1P2K2	103.53bc	8.37	21.62	108.20	75.59	28.87	418.3	12
4	N2P0K2	106.33bc	10.47	22.57	113.82	74.68	28.52	543.8	4
5	N2P1K2	106.70bc	9.53	22.80	126.08	75.46	28.54	548.7	2
6	N2P2K2	105.63bc	10.93	21.41	105.36	73.02	27.92	514.4	7
7	N2P3K2	107.23b	9.47	22.24	122.76	78.06	28.53	530.7	5
8	N2P2K0	105.00bc	9.50	22.16	117.28	83.08	28.37	505.7	8
9	N2P2K1	105.50bc	9.03	22.70	101.06	71.18	29.23	426.8	11
10	N2P2K3	107.07b	9.83	22.45	121.33	71.25	27.61	526.9	6
11	N3P2K2	112.60a	9.87	22.94	127.11	78.83	28.42	570.5	1
12	N1P1K2	100.07c	8.90	22.13	124.81	79.73	28.10	499.4	10
13	N1P2K1	102.10c	9.63	21.92	114.37	76.26	28.58	503.6	9
14	N2P1K1	107.37b	8.80	22.03	130.35	77.89	29.63	543.8	3

3.5. 肥料利用率计算

收获时取稻谷及稻草样测试其全氮、全磷、全钾含量，并利用公式“肥料当季利用率 = (施肥区产量 - 无肥区产量) × 作物养分含量/当季施肥量”计算氮、磷、钾肥利用率及肥料综合利用率，结果见表 10、表 11。推荐施肥处理 6 氮磷钾总养分综合利用率为 29.57%，水平较低；13 个施肥处理的氮磷钾综合利用率平均为 27.99%；肥料综合利用率最高为 51.71%，即中氮中磷无钾处理 8；其次分别是中氮无磷中钾处理 4、高氮中磷中钾处理 11、中氮低磷中钾处理 5、中氮中磷低钾处理 9，这三个处理肥料利用率都在 30%~40%；再次是推荐施肥处理 6、中氮低磷低钾处理 14、低氮中磷中钾处理 3、中氮高磷中钾处理 7、低氮中磷低钾处理 13、中氮中磷高钾处理 10，这六个处理肥料利用率在 20%~30%；低氮低磷中钾处理 12 的肥料利用率低于 20%；最低为无氮中磷中钾处理 2，肥料利用率仅为 3.13%。

Table 10. Analysis of comprehensive utilization efficiency of fertilizers under different treatments

表 10. 不同处理肥料综合利用率分析表

处理	处理内容	稻谷产量(kg/亩)及养分含量(%)				稻草产量(kg/亩)及养分含量(%)				总养分利用率%
		产量	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	产量	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
1	N0P0K0	415.9	0.94	0.292	0.318	398.2	0.73	0.108	1.55	/
2	N0P2K2	413.8	0.94	0.312	0.340	397.6	0.76	0.122	1.60	3.13
3	N1P2K2	522.8	1.00	0.304	0.317	510.6	0.79	0.135	1.66	25.99
4	N2P0K2	596.8	1.00	0.288	0.313	587.5	0.75	0.117	1.57	35.98
5	N2P1K2	591.5	1.02	0.276	0.303	585.2	0.82	0.131	1.61	33.96
6	N2P2K2	593.7	0.95	0.275	0.307	586.8	0.78	0.130	1.67	29.57
7	N2P3K2	589.4	0.99	0.304	0.331	582.3	0.72	0.125	1.61	25.54
8	N2P2K0	632.8	0.97	0.264	0.302	615.8	0.71	0.114	1.70	51.71
9	N2P2K1	571.4	1.00	0.275	0.303	564.8	0.77	0.130	1.69	33.43
10	N2P2K3	577.8	0.97	0.275	0.312	569.5	0.70	0.116	1.61	20.78
11	N3P2K2	624.3	1.15	0.290	0.313	613.2	0.88	0.142	1.73	34.89
12	N1P1K2	504.8	0.93	0.287	0.314	495.6	0.69	0.117	1.49	16.62
13	N1P2K1	539.7	0.91	0.269	0.307	528.7	0.60	0.096	1.59	24.42
14	N2P1K1	608.5	0.93	0.287	0.323	595.7	0.77	0.092	1.18	27.90

抽取磷钾推荐水平，氮分别为 0、1、2、3 水平的四个处理，计算的氮肥利用率在 27.55%~39.17% 之间，明显低于陈兴维等[14]在重庆长寿的研究结果，但高于冯静等[15]在湖北钟祥的研究结果；抽取氮钾推荐水平，磷分别为 0、1、2、3 水平的四个处理，计算磷肥利用率基本为零；抽取氮磷推荐水平，钾分别为 0、1、2、3 水平的四个处理，计算钾肥利用率皆为负值。氮肥施肥量与利用率基本呈负相关趋势。

Table 11. Calculation of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer utilization efficiency
表 11. 氮磷钾肥料利用率计算表

施肥水平 kg/亩			稻谷养分含量 kg/亩			稻草养分含量 kg/亩			肥料利用率%		
N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
0	0	0	3.890	1.719	1.911	3.022	0.687	10.469	/	/	/
6	3	5	5.228	1.633	1.731	4.034	0.767	9.545	39.17	-0.23	-22.06
12	6	10	5.640	1.633	1.823	4.577	0.763	9.800	27.55	-0.18	-7.57
18	9	15	7.179	1.792	1.803	5.396	0.728	9.169	31.47	1.26	-9.39

4. 结论与讨论

4.1. 讨论

湖北利川水田多颁布在海拔 1100 m 左右的二高山, 因温光资源相对不足, 亩产在 500 kg 左右, 试验田最高亩产达到 632.8 kg, 说明推荐的施肥配方较为合理, 同时, 试验田肥力水平高。试验田为石英砂岩母质发育的浅硅砂泥田, 呈酸性, 有机质、全氮、有效磷、速效钾含量都处于《湖北省耕地质量分级标准》的 2 级水平; 基础地力高, 不施肥稻谷产量占施肥处理的 65% 以上。

本次试验氮肥效应最高, 磷钾肥基本无效应, 这与利川水稻大面积生产的实际结果不完全一致, 多数水田的磷钾效应较高, 有点甚至高于氮肥效应。这应该与水田磷钾含量较低有关, 因此在指导水稻施肥中还是要注重磷钾肥的配合施肥。试验田化肥利用率低, 氮肥利用率与全国水平相当, 但离近期要达到 45% 的目标要求差距还较大; 特别是磷钾肥利用率基本为零, 提升空间还很大。

利川水稻生产劳动力投入占比大, 占总投入的 70% 左右; 正常年份, 效益在 500 元/亩左右, 目前的千家万户分散种植模式基本无效益可言; “农业的根本出路在于机械化”, 只有迅速加快高标准农田建设, “山水林田路” 统一规划, 集中连片、排灌配套, 提高机械化作业水平, 适度规模种植, 利用高海拔、富硒带地域优势, 打造优质特色产品, 提升产品附加值, 水稻产业的发展才会持续稳定, 粮食安全才会有保障。

4.2. 结论

1) 试验田的基础地力较高, 不施肥亩产为 415.9 kg, 贡献率 65.72%~100.51%。不同施肥水平稻谷产量在 413.9~632.8 kg/亩之间, 亩收入 1241.4~1898.4 元, 亩净收入为 304.68~993.22 元, 产投比 1.33~2.10。N2P2K0 (无钾) 产量最高, 比无肥区增产超过 50%, 比利川的平均水平增产 20% 以上, 氮磷交互作用最高; N0P2K2 (无氮) 最低, 略低于无肥区产量, 磷钾基本无交互作用; N2P0K2 (无磷) 居第四, 比推荐的 N2P2K2 (中等氮磷钾) 还高, 氮钾交互作用中等偏上。氮肥用量基本左右了本次试验稻谷产量, 无氮、低氮处理皆居倒数几位, 高氮、中氮处理则居前几位。

2) 化肥利用率整体较低, 氮肥为 27.55%~39.17%, 磷肥利用率基本为零, 钾肥利用率皆为负值; 肥料综合利用率平均为 27.99%, 氮磷钾推荐施肥综合利用率为 29.57%, 中氮中磷无钾最高 51.71%, 无氮中磷中钾最低仅为 3.13%。肥料效应氮肥 > 磷肥 > 钾肥, 不施氮肥稻谷减产 30% 左右, 而不施磷钾肥对稻谷产量基本无影响; 氮肥用量对水稻生育期及株高影响较大, 随着氮肥用量增加水稻生育期加长, 株高增高。

3) 拟合的一元二次方程, 氮肥效应有意义, 曲线图呈较典型抛物线, 极显著相关, 计算的最佳及最

高施 N 量差异不大, 在 18~20 kg/亩, 水稻产量也相当, 在 625 kg/亩左右; 拟合的 NP 二元二次方程相关性极显著, NK、PK 二元二次方程相关性不显著, 计算的 N、P₂O₅、K₂O 最高及最佳用量差异较大, 分别为 9~22、2~15、5~20 kg/亩, 稻谷产量为 580~630 kg/亩; 拟合的三元二次方程相关性极显著, 计算的 N、P₂O₅、K₂O 最高及最佳用量差异较小, 分别为 13~16、11~13、10~19 kg/亩, 稻谷产量为 600 kg/亩左右。以上结果明显高于福建[10]、安徽[16]等地的试验结论, 这应与利川海拔高、温光资源不足, 肥料的利用率相对较低有关。

4) 结合利川水稻大面积生产实际, 目标产量可确定为 600~750 kg/亩, 推荐 N、P₂O₅、K₂O 用量 18~25、10~15、16~22 kg/亩, 根据水田的肥力水平进行适度调整。

参考文献

- [1] 农业部. NY/T 2911-2016 测土配方施肥技术规程[S]. 2016.
- [2] 杨青林, 桑利民, 孙吉茹, 季志强, 袁文利, 郭玉炜, 盖颜欣. 我国肥料利用现状及提高化肥利用率的方法[J]. 山西农业科学, 2011, 39(7): 690-692.
- [3] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [4] 秦荣昆. 广西桂林市全州县测土配方施肥水稻“3414”肥料效应田间试验结果分析[J]. 农业资源与环境学报, 2013, 30(6): 64-67.
- [5] 廖佳丽. 测土配方施肥水稻 3414 肥料效应的研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(13): 213-218.
- [6] 杨俐苹, 自由路, 王贺, 等. 测土配方施肥指标体系建立中“3414”试验方案应用探讨——以内蒙古海拉尔地区油菜“3414”试验为例[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 1018-1023.
- [7] 毛伟, 李文西, 唐宝国, 等. 县级测土配方施肥指标体系建立研究——以江苏省江都市水稻为例[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 396-406.
- [8] 周富忠, 熊建成, 林泽安. 高山甘蓝京丰一号“3414”肥效初步研究[J]. 长江蔬菜, 2014(10): 54-58.
- [9] 周富忠, 吴卓耕, 田祚旭, 余宗波, 张德才, 郭兰, 郑兴飞, 胡中立. 多叶花魔芋 3414 肥效试验研究初报[J]. 长江蔬菜, 2010(20): 63-65.
- [10] 吴寿华, 范晓晖, 吴国灿, 陈慕松, 林鸾芳, 翁琳琳, 刘文婷. 福建省福安市水稻“3414”肥料效应试验[J]. 湖南农业科学, 2019(8): 42-45.
- [11] 金昆, 曾德志, 李慧, 等. 大安区水稻“3414”肥料效应研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(21): 1-8.
- [12] 张志才. 金湖县丘陵地区水稻 3414 肥效试验[J]. 农技服务, 2022, 39(10): 31-36.
- [13] 曹伟, 周鹤, 薛莉. 2013 年江阴市水稻氮磷钾利用率初探[J]. 上海农业科技, 2014(6): 110-111.
- [14] 陈兴维, 车建中. 水稻 3414 肥效试验分析——以重庆市长寿区新市街道新市村为例[J]. 乡村科技, 2017(21): 55-59.
- [15] 冯静, 李京蓉, 关绍华, 李红俊. 钟祥市潜育型土壤水稻“3414”肥料效应完全试验分析[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(24): 48-50.
- [16] 张慧. 安徽省龙亢农场 2020 年水稻“3414”肥料效应田间试验报告[J]. 园艺与种苗, 2021(9): 65-66+71.