

丹江口库区麦套稻适宜施肥量及养分利用率研究

李承力¹ 杨特武¹ 徐君驰¹ 巴瑞先²
刘章勇³ 熊桂云² 陈 防⁴ 刘冬碧²

1. 华中农业大学植物科学技术学院, 武汉 430070; 2. 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 武汉 430064;
3. 长江大学农学院, 荆州 434023; 4. 中国科学院武汉植物园, 武汉 430074

摘要 为探讨丹江口库区麦套稻新型耕作方式的适宜施肥量, 采用“3414”肥效试验方案研究了氮、磷、钾施肥对水稻产量、生产效益和养分利用的影响。结果表明, 麦套稻系统水稻产量的形成主要决定于单位面积穗数和穗总粒数; 氮磷钾合理施肥可显著提高产量, 在 N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 168.0、75.0、90.0 kg/hm² 时产量最高; 在氮、磷、钾三因素中, 增产、增收效应的大小顺序为氮>钾>磷; 施氮增产量最高达 3 316 kg/hm², 增产率为 92.8%, 养分表观利用率最高为 52.9%; 施磷增产量最高达 546 kg/hm², 增产率为 8.6%, 养分表观利用率最高为 13.0%; 施钾增产量最高达 699 kg/hm², 增产率为 11.3%, 养分表观利用率最高为 69.8%。据模拟分析, 麦套稻系统水稻 N、P₂O₅ 和 K₂O 的适宜施用量分别为 188.0、30.0 和 85.0 kg/hm², 其理论产量可达 6 997 kg/hm²。

关键词 麦套稻; 免耕套种; 简化栽培; 施肥效应; 肥料利用率

中图分类号 S 511.506.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2011)05-0532-07

水稻免耕套种作为一种新型耕作技术, 兼具保护性耕作和轻简化栽培特点, 是继水稻抛秧、早育稀植之后又一轻简化栽培技术, 在当前农村劳动力日益短缺和农业面源污染不断加剧的情况下, 发展水稻免耕套种栽培具有重要意义。麦套稻是在小麦灌浆后期将稻种经浸种破胸后直接撒播于麦田, 与小麦形成一段共生期, 麦收时留茬 30 cm 左右自然还田^[1]。与常规耕作比较, 麦套稻具有根系发达、叶片功能强、穗数多、穗型较小等特点^[2], 但由于为免耕直播和未施基肥, 常存在分蘖发生迟、个体发育不足及生育期延长等问题^[2], 并易出现本田基本苗数过多、过少或不匀现象, 且出草量大、出草时间长、草相复杂^[3], 从而制约了麦套稻产量的提高, 急需加强田间管理和肥水调控技术研究, 形成高产栽培技术体系。

丹江口水库是国家重大水利工程南水北调中线工程水源地, 即将担负起为京津冀等省市提供饮用水的任务。近期调查显示, 丹江口库区及其上游流域水土流失比较严重, 侵蚀面积达总土地面积的

53.1%, 年均土壤侵蚀量 1.82×10^9 t, 土壤侵蚀模数 2 900 t/(km²·a), 每年输入丹江口水库的泥沙量达 880 万 t^[4], 迫切需要发展保护性耕作技术。本研究于 2009 年在丹江口库区以“3414”试验设计法^[5]开展麦套稻肥效试验, 通过分析氮、磷、钾施肥对水稻产量、养分利用和生产效益的影响, 为麦套稻生产提供科学施肥指导, 促进这一新型保护性耕作技术的推广应用。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

试验在湖北省丹江口市习家店镇小茯苓村进行, 前作为小麦。试验地土壤 pH 7.43, 有机质 18.04 g/kg, 碱解氮 98.67 mg/kg, 速效磷 17.39 mg/kg, 速效钾 189.7 mg/kg。

1.2 材料

供试水稻品种为武香 988。2009 年 5 月 12 日浸种, 2009 年 5 月 14 日直接撒播于麦田行间, 播种量为 67.5 kg/hm², 麦、稻共生期 8 d, 10 月 5 日水

表1 田间试验处理方案

Table 1 Experimental design and treatments

编号 Code	处理 Treatment	施肥养分量/(kg/hm ²) Fertilizer application rate			编号 Code	处理 Treatment	施肥养分量/(kg/hm ²) Fertilizer application rate		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	N ₀ P ₀ K ₀	0.0	0.0	0.0	8	N ₂ P ₂ K ₀	168.0	75.0	0.0
2	N ₀ P ₂ K ₂	0.0	75.0	90.0	9	N ₂ P ₂ K ₁	168.0	75.0	45.0
3	N ₁ P ₂ K ₂	84.0	75.0	90.0	10	N ₂ P ₂ K ₃	168.0	75.0	135.0
4	N ₂ P ₀ K ₂	168.0	0.0	90.0	11	N ₃ P ₂ K ₂	252.0	75.0	90.0
5	N ₂ P ₁ K ₂	168.0	37.5	90.0	12	N ₁ P ₁ K ₂	84.0	37.5	90.0
6	N ₂ P ₂ K ₂	168.0	75.0	90.0	13	N ₁ P ₂ K ₁	84.0	75.0	45.0
7	N ₂ P ₃ K ₂	168.0	112.5	90.0	14	N ₂ P ₁ K ₁	168.0	37.5	45.0

稻收获。

1.3 方法

1) 试验设计。采用“3414”肥效试验方案。试验因素及水平见表1。小区面积15 m²,随机区组排列,3次重复。

2) 施肥方法。氮、磷、钾肥源分别用尿素(含46%N)、过磷酸钙(含12%P₂O₅)、氯化钾(含60%K₂O)。氮肥分4次施用,苗肥、分蘖肥、拔节肥和孕穗肥各占25%;磷肥于麦收后作苗肥1次施入;钾肥分2次施用,60%作苗肥,40%作孕穗肥。

3) 调查测定项目。每小区确定0.5 m×0.5 m代表性样方,分别在麦收后、分蘖盛期和孕穗期调查单位面积苗数、苗高、倒二叶叶长和叶宽、SPAD值及群体叶面积指数(AccuPAR植物冠层分析系统,美国DECAGON)等。收获期测定小区籽粒产量和地上部生物学产量,并选取15株典型植株调查主要农艺性状和产量构成,测定不同器官干物质积累量和氮、磷、钾养分含量。风干样品经80℃烘干后磨成粉末,过0.15 mm筛,采用微量凯氏定氮法测定消化液含氮量,钼锑抗比色法测定含磷量,火焰光度计法测定含钾量^[6]。参照文献^[7],计算氮、磷、钾养分的表观利用率和生理利用率。

4) 推荐施肥量确定。以产量为目标 y ,肥料用量为变量 x ,拟合三元二次和一元二次肥料效应模型并计算最高产量时的氮、磷、钾肥施用量;再根据稻谷及肥料售价,计算最佳经济效益时的施肥量。然后,对2种模型进行极值判别分析^[8],综合考虑其典型性、 F 值检验、 R^2 值检验及其施肥量的合理性,选择合适的肥效模型,最终确定推荐施肥量。

5) 统计分析方法。采用Excel进行试验数据处理,对水稻经济性状进行极差分析,确定影响各经济性状的关键因子^[9];采用SPSS 13.0(SPSS Inc. 2004)统计软件进行统计分析,应用新复极差法(SSR)对不同处理产量及氮磷钾不同施肥水平效应

的差异显著性进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 氮磷钾施肥水平对水稻生长发育的影响

麦收后调查表明,试验小区平均基本苗数为83.37万/hm²,处理间差异不显著。表2显示,施肥水平对麦套稻苗期生长发育具有明显影响。在相同施磷(75 kg/hm²)、钾(90 kg/hm²)的条件下,随着施氮水平的提高,在分蘖盛期和孕穗期单位面积苗数、苗高、倒二叶叶长和叶宽、倒二叶SPAD值呈上升趋势,叶面积指数明显提高。在相同施氮(168 kg/hm²)、钾(90 kg/hm²)条件下,在分蘖盛期单位面积苗数、苗高和倒二叶叶长以37.5 kg/hm²的施磷水平最高,倒二叶叶宽和叶面积指数以75 kg/hm²的施磷水平最高,倒二叶SPAD值以112.5 kg/hm²的施磷水平最高,但差异均未达显著水平;在孕穗期单位面积苗数和苗高随施磷量的增加而呈上升趋势,倒二叶SPAD值和叶面积指数则施磷水平为75 kg/hm²时最高,除苗高外,其余指标处理间差异未达显著水平。在相同施氮(168 kg/hm²)、磷(75 kg/hm²)条件下,苗高、叶面积指数和孕穗期苗数以135 kg/hm²的施钾水平最高,倒二叶SPAD值和分蘖盛期苗数以不施钾处理最高,除分蘖盛期的苗高、叶面积指数和倒二叶长外,其余指标处理间差异未达显著水平(表2)。

2.2 氮磷钾施肥水平对水稻产量形成及生产效益影响

1) 产量及其构成。施肥处理间水稻籽粒产量差异显著,在氮磷钾用量均为第3水平时,即N₂P₂K₂处理的产量最高(表3)。在相同施磷(75 kg/hm²)、钾(90 kg/hm²)条件下,施氮处理产量极显著高于不施氮处理,但3个不同施氮水平间差异不显著;在相同施氮(168 kg/hm²)、钾(90 kg/hm²)条件下,施磷处理间及其与不施磷处理间产量差异未达显著水

平;在相同施氮(168 kg/hm²)、磷(75 kg/hm²)条件下,施钾处理间及其与不施钾处理间产量差异也未达显著水平(表 3)。

产量构成因素调查显示,在相同施磷、钾条件下,随施氮量的提高,穗总粒数增加,成穗率降低,其中高氮水平(252 kg/hm²)与缺氮和低氮(84 kg/hm²)水平间差异达显著水平;单位面积有效穗数、结实率和千粒重随施氮水平提高呈先升后降趋势,其中,有效穗数以 168 kg/hm² 的施氮水平最高,并与其他施氮水平,差异达显著水平,千粒重以 84 kg/hm² 的施氮水平最高,并显著高于 252 kg/hm² 施氮水平,但结实率在不同施氮水平间差异

不显著(表 3)。在相同施氮、钾条件下,随施磷水平的提高穗总粒数呈增加趋势,但处理间差异不显著,单位面积有效穗数和结实率呈先升后降趋势,有效穗数在施磷水平为 75 kg/hm² 时最高,并显著高于缺磷和低磷(37.5 kg/hm²)水平,结实率在不同施磷水平间差异不显著;成穗率除 37.5 kg/hm² 施磷水平外也随施磷量的提高而上升,千粒重以 75 kg/hm² 的施磷水平最低,但处理间差异不显著(表 3)。在相同施氮、磷条件下,单位面积有效穗数和成穗率以 90 kg/hm² 施钾水平最高,显著高于缺钾和高钾(135 kg/hm²)水平;单穗总粒数、结实率和千粒重在不同施钾水平间差异不显著(表 3)。

表 2 不同施肥处理对水稻植株生长和群体结构影响¹⁾

Table 2 Effects of fertilizer application on the plant growth and population structure of rice

处理 Treatment	分蘖盛期 Full tillering stage (2009-07-18)						孕穗盛期 Full tillering stage (2009-08-14)			
	苗数/ Seedl. No.	苗高/cm Seedling height	倒二叶长/cm Length of penul. leaf	倒二叶宽/cm Width of penul. Leaf	倒二叶 SPAD 值 SPAD value of penul. leaf	叶面积指数 LAI	苗数/ Seedl. No.	苗高/cm Seedl. height	倒二叶 SPAD 值 SPAD value of penul. leaf	叶面积 指数 LAI
N ₀ P ₀ K ₀	166 d	48.4 f	32.35 d	0.76 de	33.21 d	0.48 h	160.0 c	79.5 h	34.11 d	1.43 e
N ₀ P ₂ K ₂	185 d	46.9 f	26.20 e	0.69 e	33.09 d	0.54 h	210.7 bc	84.4 g	34.56 cd	1.86 de
N ₁ P ₂ K ₂	262 c	56.5 e	35.50 cd	0.89 cd	34.35 cd	1.28 g	224.0 ab	96.1 ef	35.76 bcd	2.68 cd
N ₂ P ₀ K ₂	324 abc	61.7 cde	34.15 cd	1.00 bc	33.31 d	1.36 fg	234.0 ab	100.6 cde	38.90 abc	3.01 bc
N ₂ P ₁ K ₂	340 ab	65.4 abcde	37.00 bcd	1.06 abc	34.31 cd	1.53 fg	244.0 ab	105.9 ab	38.44 abcd	3.40 abc
N ₂ P ₂ K ₂	328 abc	58.6 de	36.10 bcd	1.12 ab	35.44 bcd	1.83 cdefg	260.0 ab	106.7 ab	39.71 ab	3.58 abc
N ₂ P ₃ K ₂	316 abc	63.9 bcde	36.85 bcd	1.06 abc	35.52 bcd	1.66 cdefg	268.0 ab	107.4 ab	39.08 abc	3.47 abc
N ₂ P ₂ K ₀	336 abc	67.0 abc	42.17 a	1.11 ab	36.85 ab	2.19 abc	277.3 a	104.0 bc	39.73 ab	3.61 abc
N ₂ P ₂ K ₁	321 abc	65.1 abcde	40.10 abc	1.05 abc	35.73 abc	1.72 cdefg	266.7 ab	102.9 bcd	38.94 abc	3.64 abc
N ₂ P ₂ K ₃	330 abc	70.8 ab	37.97 abc	1.06 abc	36.61 ab	2.27 ab	286.7 a	107.3 ab	38.51 abcd	3.96 ab
N ₃ P ₂ K ₂	354 a	71.7 a	41.50 ab	1.21 a	37.78 a	2.39 a	264.0 ab	110.7 a	41.88 a	4.27 a
N ₁ P ₁ K ₂	309 abc	59.3 cde	35.00 cd	0.90 cd	33.25 d	1.21 g	258.7 ab	92.7 f	36.47 bcd	3.06 bc
N ₁ P ₂ K ₁	274 bc	58.5 de	36.60 bcd	0.91 cd	35.08 bcd	1.35 fg	230.7 ab	96.5 ef	37.40 abcd	2.82 c
N ₂ P ₁ K ₁	342 ab	63.6 bcde	39.40 abc	0.99 bc	35.24 bcd	2.07 abcd	289.3 a	99.1 de	38.96 abc	3.52 abc

1) 表中同列相同指标的小写字母示 $P < 0.05$ 水平显著性。下同。Letters in lower case indicates significant differences at $P < 0.05$ when different letters are used within the same indicator of a column. The same as below.

表 3 不同施肥处理对水稻产量及其构成的影响

Table 3 Effects of fertilizer application on the grain yield and its component factors of rice

处理 Treatment	产量/ (kg/hm ²) Grain yield	有效穗数/ (万/hm ²) Effect. panicle No.	成穗率/% Percent. of product. Culm	单穗总粒数 Total grains per panicle	结实率/% Seed setting rate	千粒重/g 1 000-grain weight
N ₀ P ₀ K ₀	2 844 c	126.7 d	76.3 ab	127.8 c	66.0 a	26.35 ab
N ₀ P ₂ K ₂	3 573 c	148.0 d	79.9 a	138.7 bc	65.8 a	27.12 ab
N ₁ P ₂ K ₂	6 006 ab	206.7 bc	78.9 a	157.3 bc	67.9 a	27.83 a
N ₂ P ₀ K ₂	6 343 a	202.7 bc	64.1 def	165.3 ab	70.6 a	27.21 ab
N ₂ P ₁ K ₂	6 621 a	205.3 bc	54.6 f	170.6 ab	71.8 a	26.20 ab
N ₂ P ₂ K ₂	6 889 a	238.7 a	75.5 abc	170.9 ab	66.6 a	25.97 ab
N ₂ P ₃ K ₂	6 474 a	230.0 ab	76.7 ab	171.1 ab	62.2 a	26.63 ab
N ₂ P ₂ K ₀	6 190 ab	197.3 c	64.6 def	172.2 a	67.5 a	26.75 ab
N ₂ P ₂ K ₁	6 585 a	217.3 abc	67.6 bcde	171.2 ab	68.5 a	26.07 ab
N ₂ P ₂ K ₃	6 597 a	204.0 bc	56.9 ef	178.2 ab	68.6 a	25.86 ab
N ₃ P ₂ K ₂	6 654 a	209.3 bc	59.0 def	206.9 a	61.8 a	25.04 b
N ₁ P ₁ K ₂	6 283 a	202.7 bc	65.5 cdef	165.3 ab	72.1 a	25.98 b
N ₁ P ₂ K ₁	5 068 b	190.7 c	69.4 abcd	156.3 bc	63.7 a	27.27 ab
N ₂ P ₁ K ₁	6 669 a	217.3 abc	63.4 def	173.1 ab	66.6 a	26.83 ab

相关性分析显示,与麦套稻产量形成关系最密切的因素是单位面积有效穗数($r=0.9731, P<0.01$),其次是穗总粒数($r=0.9176, P<0.01$)。对氮、磷、钾施肥效果分别进行极差分析表明,氮是影响水稻有效穗数、穗总粒数和千粒重的主要因素,磷是影响结实率的主要因素,钾对有效穗数有一定的影响但不是主要因素。

2)施肥效应分析。在肥料三要素中,施氮的增产和经济效益最高,其次为施钾,施磷最低。在等量

施用磷、钾肥的条件下,与不施氮处理相比,以施氮水平为 168 kg/hm^2 处理的增产率和净收入增加最高,但产投比低于低氮处理。在等量施用氮、钾肥的条件下,以施磷水平为 75 kg/hm^2 处理的增产率和净收入增加最高,产投比高于高磷处理,但低于低磷和不施磷处理。在等量施用氮、磷肥的条件下,以施钾水平为 90 kg/hm^2 处理的增产率和净收入增加最高,产投比高于高钾处理,但低于低钾和不施钾处理(表4)。

表4 氮磷钾各因素对水稻产量和经济效益的影响

Table 4 Effects of different application rate of N, P and K on the yield and the economic benefit of rice

肥料 Fertilizer	处理 Treatment	施肥量/ (kg/hm ²) Fertilizing rate	增产量/ (kg/hm ²) Yield increment	增产率/% Grain yield increasing percentage	净增收入/ (¥/hm ²) Net income increment	产投比 Output/input ratio
N	N ₀ P ₂ K ₂	0.0	—	—	—	8.3
	N ₁ P ₂ K ₂	84.0	2 433	68.1	4 029	9.8
	N ₂ P ₂ K ₂	168.0	3 316	92.8	5 325	8.7
	N ₃ P ₂ K ₂	252.0	3 081	86.2	4 564	6.9
P ₂ O ₅	N ₂ P ₀ K ₂	0.0	—	—	—	10.8
	N ₂ P ₁ K ₂	37.5	278	4.4	205	9.6
	N ₂ P ₂ K ₂	75.0	546	8.6	510	8.7
	N ₂ P ₃ K ₂	112.5	132	2.1	-440	7.3
K ₂ O	N ₂ P ₂ K ₀	0.0	—	—	—	11.0
	N ₂ P ₂ K ₁	45.0	395	6.4	396	9.8
	N ₂ P ₂ K ₂	90.0	699	11.3	745	8.7
	N ₂ P ₂ K ₃	135.0	533	7.1	-1	7.3

2.3 氮磷钾施肥水平对水稻物质积累、分配及养分吸收利用的影响

1)物质积累与分配。表5显示,氮磷钾施肥对水稻成熟期植株干物质积累与分配具有明显影响。与不施肥(N₀P₀K₀)比较,施肥处理的地上部干物质积累量显著提高,其中在实粒中分配比例增加,而在茎鞘+穗轴中分配比例减少,收获指数提高;与不施氮(N₀P₂K₂)处理比较,施氮处理(N₂P₂K₂)的干物质重显著增加,其中在实粒和叶片中分配比例增加,在空秕粒和茎鞘+穗轴中分配降低;与不施磷(N₂P₀K₂)处理相比,施磷处理(N₂P₂K₂)的干物质积累量差异不大,但在实粒中分配比例提高,而在空秕粒、茎鞘+穗轴和叶片中分配比例均减少;与不施钾(N₂P₂K₀)处理相比,施钾处理(N₂P₂K₂)的干物质重显著增加,其中在茎鞘+穗轴和叶片中分配比例有所增加,而在空秕粒中分配降低(表5)。

2)养分吸收与分配。表6结果表明,与不施肥(N₀P₀K₀)比较,施肥处理的植株氮、磷、钾养分吸收量显著提高。受生物量和养分含量的影响,养分在植株不同器官中的分配量存在差异。与不施氮(N₀P₂K₂)处理比较,施氮(N₂P₂K₂)处理中除空秕粒外,其余

表5 氮磷钾配施对水稻各器官干物质积累的影响

Table 5 Effect of combined application of N, P and K on dry matters accumulation in different organs

处理 Treatment	地上部生物量/ (kg/hm ²) Above-ground biomass	各器官占干物质总量百分比/% Allocation proportion of dry matter in different organs			
		实粒 Full grain	空秕粒 Unfilled grain	茎鞘+穗轴 Culm sheath+ panicle axis	叶片 Leaf blade
N ₀ P ₀ K ₀	7 720 d	34.12	3.20	51.96	10.72
N ₀ P ₂ K ₂	8 765 c	38.88	4.71	45.63	10.79
N ₂ P ₀ K ₂	15 765 a	37.56	2.93	46.23	13.29
N ₂ P ₂ K ₀	13 593 b	41.67	3.50	43.06	11.77
N ₂ P ₂ K ₂	15 333 a	41.64	2.27	44.05	12.04

器官中的氮、磷、钾积累量均显著增加;与不施磷(N₂P₀K₂)处理比较,施磷(N₂P₂K₂)处理实粒中氮、磷、钾积累量显著增加,茎鞘+穗轴中氮、磷积累量显著增加,但钾积累量显著降低,空秕粒中氮、钾积累量显著降低,叶片中养分积累量差异不明显;与不施钾(N₂P₂K₀)处理比较,施钾(N₂P₂K₂)处理的实粒、茎鞘+穗轴和叶片中氮、磷、钾积累量显著增加,而在空秕粒中积累量显著降低。

表 6 氮磷钾肥配施对水稻养分吸收与分配的影响

Table 6 Effects of combined application of N, P and K on nutrient uptake and allocation in rice

养分/(kg/hm ²) Nutrient	处理 Treatment	实粒 Full grain	空秕粒 Unfilled grain	茎鞘+穗轴 Culm sheath+panicle axis	叶片 Leaf blade	总计 Total
N	N ₀ P ₀ K ₀	29.1 d	2.3 d	18.3 d	6.0 d	55.7 e
	N ₀ P ₂ K ₂	33.4 c	3.6 c	18.5 d	7.3 c	62.8 d
	N ₂ P ₀ K ₂	71.9 b	4.8 b	37.5 b	25.4 a	144.9 b
	N ₂ P ₂ K ₀	71.8 b	5.0 a	39.4 c	20.5 b	136.7 c
	N ₂ P ₂ K ₂	76.7 a	3.9 c	46.3 a	24.8 a	151.7 a
P ₂ O ₅	N ₀ P ₀ K ₀	17.7 e	1.0 c	9.6 c	2.1 d	30.4 e
	N ₀ P ₂ K ₂	20.6 d	1.9 b	9.5 c	2.6 c	34.6 d
	N ₂ P ₀ K ₂	34.6 c	1.8 b	16.8 b	5.3 a	58.5 c
	N ₂ P ₂ K ₀	39.2 b	2.2 a	16.6 b	5.0 b	62.9 b
	N ₂ P ₂ K ₂	43.3 a	1.8 b	18.0 a	5.3 a	68.4 a
K ₂ O	N ₀ P ₀ K ₀	14.6 e	1.6 c	87.4 e	10.4 d	113.9 d
	N ₀ P ₂ K ₂	16.8 d	2.8 b	106.4 d	12.1 c	138.0 c
	N ₂ P ₀ K ₂	32.9 b	3.7 a	193.0 a	27.8 a	257.1 a
	N ₂ P ₂ K ₀	25.3 c	3.7 a	142.2 c	18.2 b	189.5 b
	N ₂ P ₂ K ₂	37.5 a	2.8 b	186.9 b	25.1 a	252.3 a

3) 养分利用率。以缺施单质养分为基础计算的养分表观利用率显示, 氮肥表观利用率随施肥量增加呈升高趋势, 而磷肥和钾肥表观利用率均随相应肥料用量的增加呈先升后降趋势, 最高值分别出现在 P₂O₅ 75 kg/hm² 水平和 K₂O 90 kg/hm² 水平(表 7)。氮、磷和钾肥生理利用率均在第二水平即 N 为 84 kg/hm², P₂O₅ 为 37.5 kg/hm², K₂O 为 90 kg/hm² 时分别达到最大, 然后随施肥量的增加而下降(表 7)。

表 7 不同肥料用量的氮磷钾肥利用率

Table 7 N, P and K utilization efficiency under different fertilizing rate

养分 Nutrient	处理编号 (施肥量)/ (kg/hm ²) Code (Fert. amount)	总吸收量/ (kg/hm ²) Total uptake	表观利 用率/% Apparent efficiency	生理利用率/ (kg/kg) Physio. efficiency
N	2 (0)	62.8 d	—	—
	3 (84)	96.5 c	40.2	72.1
	6 (168)	151.7 b	52.9	37.3
	11 (252)	204.1 a	56.1	21.8
P ₂ O ₅	4 (0)	58.6 c	—	—
	5 (37.5)	61.4 b	7.3	101.1
	6 (75)	68.4 a	13.0	55.9
K ₂ O	7 (112.5)	67.6 a	8.0	14.7
	8 (0)	189.5 d	—	—
	9 (45)	215.1 c	56.9	15.43
	6 (90)	252.3 b	69.8	11.1
	10 (135)	274.0 a	62.6	4.8

4) 氮磷钾养分互作效应分析。图 1 结果表明, 氮、磷、钾施肥对产量影响存在一定的互作效应。在施钾量为 90 kg/hm² 的条件下, 施氮量从 84 kg/hm² 上升到 168 kg/hm² 时, 中磷(75 kg/hm²)

处理较低磷(37.5 kg/hm²)处理增产 545 kg/hm²; 在施磷量为 75 kg/hm² 的条件下, 施氮量从 84 kg/hm² 上升到 168 kg/hm² 时, 低钾(45 kg/hm²)处理较中钾(90 kg/hm²)处理增产 634 kg/hm²(图 1-A), 说明在中磷、低钾水平时, 最有利于氮肥效果的发挥。

在施钾量为 90 kg/hm² 的条件下, 施磷量从 37.5 kg/hm² 上升到 75 kg/hm² 时, 中氮(168 kg/hm²)处理增产 268 kg/hm², 低氮(84 kg/hm²)处理减产 277 kg/hm²; 在施氮量为 168 kg/hm² 的条件下, 施磷量从 37.5 kg/hm² 上升到 75 kg/hm² 时, 低钾(45 kg/hm²)处理减产 84 kg/hm², 而中钾(90 kg/hm²)处理增产 268 kg/hm²(图 1-B), 说明在中氮、中钾水平下施磷的增产效果最好。

在施磷量为 75 kg/hm² 的条件下, 施钾量从 45 kg/hm² 上升到 90 kg/hm² 时, 低氮(84 kg/hm²)和中氮(168 kg/hm²)处理分别增产 938 kg/hm² 和 304 kg/hm²; 在施氮量为 168 kg/hm² 的条件下, 施钾量从 45 kg/hm² 上升到 90 kg/hm² 时, 低磷(37.5 kg/hm²)处理减产 48 kg/hm², 中磷(75 kg/hm²)处理增产 304 kg/hm²(图 1-C), 说明在低氮、中磷水平下施钾效果最好。

2.4 氮磷钾推荐施肥量的确定

依据本试验结果, 拟合得到三元二次肥效方程: $y = 2836.5990 + 33.9570x_1 - 21.7295x_2 + 35.9799x_3 - 0.0823x_{12} - 0.0567x_{22} - 0.0738x_{32} + 0.1506x_1x_2 - 0.1415x_1x_3 + 0.0157x_2x_3$ (其中 x_1 、 x_2 、 x_3 分别代表 N、P₂O₅、K₂O 用量; $F = 69.37$, $R^2 = 0.9968$), 达极显著水平。通过极值判别分析, 该三元二次方

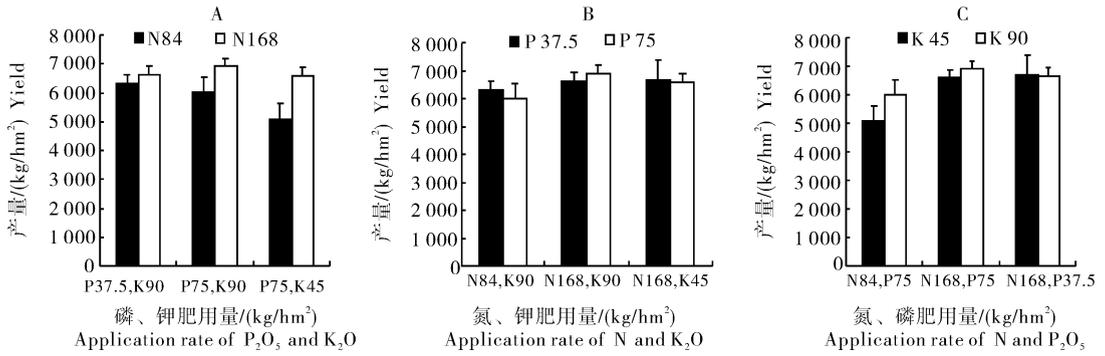


图 1 氮磷钾施用对水稻产量的互作分析

Fig. 1 Mutual effects of N, P and K application on the yield of rice

表 8 肥效拟合模型

Table 8 Models of fertilizer application

肥料 Fertilizer	效应方程 Equation	R ²	最佳施肥量/ (kg/hm ²) Optimum fertilizing rates	理论产量/ (kg/hm ²) Designable yield
N	$y = -0.094 5x_1^2 + 35.880 7x_1 + 3 594.261 0$	0.999 3 **	188	6 997
P ₂ O ₅	$y = -0.042 3x_2^2 + 2.885 8 x_2 + 6 704.961 0$	0.615 1	30	6 789
K ₂ O	$y = -0.084 7x_3^2 + 14.833 1x_3 + 6 164.351 0$	0.973 9 **	85	6 813

1) * * 表示显著性达 0.01 水平 Means significance at P<0.01 level.

程属于非典型肥效模型。由于非典型肥效模型的推荐施肥量会出现远大于或远小于试验施肥量范围的外推结果^[12],因此本试验不能采用三元二次模型进行拟合。进一步拟合得到一元二次肥料效应模型见表 8,所有单因素肥料效应模型都属于典型的一元二次模型,其中氮、钾肥效应模型的 R² 值达极显著水平。根据效应方程可求得 N、P₂O₅ 和 K₂O 最佳施用量分别为 188、30 和 85 kg/hm²。

3 讨论

麦套稻生产系统中水稻的生长发育和产量形成不同于常规耕作方式。本研究显示,影响麦套稻产量形成的首要因子是有效穗数,因此控制好田间播种密度并加强肥水管理和杂草防治工作,是保证实现水稻高产的前提条件。试验结果表明,施肥对麦套稻具有明显增产效果,在一定施肥范围内,水稻产量随肥料用量的增加而提高。在麦套稻系统中由于在水稻种植前没有进行土壤翻耕和施用底肥,植株前期的生长发育比较缓慢且根系分布较浅,在田间管理上采取措施促进早生分蘖、及时建立高产群体

结构非常必要。本研究表明,氮磷钾配施显著影响水稻苗期个体和群体的生长发育,其中以氮素的影响最大,在一定范围内随施氮量的增加,水稻个体和群体发育加快。同时,根据产量构成分析,在本试验条件下施氮可明显促进有效穗数和穗总粒数的增加,是提高麦套稻产量作用最大的因素;施钾的作用居次,主要促进有效穗数的形成,而施磷的增产效果有限。

在麦套稻生产系统中,水稻对氮、磷、钾养分的利用也不同于常规耕作方式。王华良等^[13]对常规耕作水稻研究表明, N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别在 0~225、0~67.5 和 0~101.3 kg/hm² 的范围内,随施肥量的增加氮肥利用率下降,磷、钾肥利用率呈先升后降趋势,最高利用率分别在 P₂O₅ 45 kg/hm² 和 K₂O 67.5 kg/hm²。在本试验条件下,水稻的氮肥表观利用效率随施用量的增加呈上升趋势,这可能与本试验中氮肥采用少量多次的方式施用有关;磷、钾肥表观利用率随施用量增加呈先升后降趋势,这与本试验的土壤磷、钾基础肥力较高有关。

依据本试验结果进行的肥效函数计算,在丹江口库区麦套稻生产系统中水稻的氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)推荐施用量分别为 188、30 和 85 kg/hm²。但是,由于肥效函数只能反映进行本试验特定条件下的施肥与产量关系^[9],因此要全面了解麦套稻的施肥效应,还需在更大范围内布置田间试验来揭示水稻产量、施肥量及土壤供肥水平之间的关系,建立综合的肥料效应函数,提出适合于不同自然条件下麦套稻经济合理肥料用量。

参 考 文 献

[1] 杨力,俞勇权,周正宽,等. 超高茬麦套稻高效生产机理及其技

- 术初探[J]. 江苏农业科学, 2003(2): 7-9.
- [2] 蒋植宝, 赵书东. 麦套稻高产栽培技术的研究与实践[J]. 农业与技术, 1997(3): 42-43.
- [3] 陈德辉, 李群, 陆瑞平, 等. 超高茬麦套稻高产群体质量控制技术研究[J]. 作物研究, 2006(3): 210-212, 219.
- [4] 赵文耀, 胡家庆. 丹江口水库流域面源污染现状分析[J]. 南北水北调与水利科技, 2007, 5(2): 5, 15, 25.
- [5] 陈新平, 张福锁. 通过“3414”试验建立测土配方施肥技术指标体系[J]. 中国农技推广, 2006(4): 36-39.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-107, 127.
- [7] RATHKE G W, CHRISTEN O, DIEPENBROEK W. Effects of nitrogen source and rate on productivity and quality of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown in different crop rotations[J]. Field Crops Research, 2005, 94(2-3): 101-113.
- [8] 章明清, 林仁坝, 林代炎, 等. 极值判别分析在三元肥效模型推荐施肥中的作用[J]. 福建省农科院学报, 1995, 10(2): 54-59.
- [9] 戴平安, 刘向华, 易国英, 等. 氮磷钾及有机肥不同配施量对水稻品质和产量效应的研究[J]. 作物研究, 1999(3): 26-30, 42.
- [10] 刘光文, 胡富女, 朱聂, 等. 油一稻一稻种植制下晚稻氮、磷、钾肥施用效果[J]. 湖北农业科学, 2006, 45(2): 174-176.
- [11] 申建波, 李仁岗. 不同土壤肥力水平下水稻氮磷肥效应与经济合理施肥量的确定[J]. 河北农业大学学报, 1994, 17(增刊): 7-14.
- [12] 姜瑞芒, 曾凡成. 麦套稻栽培在丹江口市示范表现与技术改进意见[J]. 江苏农业科学, 2009(6): 114-116.
- [13] 王华良, 何小卫. 2008年绩溪县水稻“3414”肥料效应田间试验报告[J]. 土壤, 2009, 41(2): 320-323.

Appropriate rate of fertilizer application and efficiency of nutrient utilization in relay cropping rice with wheat in Danjiangkou Region

LI Cheng-li¹ YANG Te-wu¹ XU Jun-chi¹ BA Rui-xian²
LIU Zhang-yong³ XIONG Gui-yun² CHEN Fang⁴ LIU Dong-bi²

1. College of Plant Science and Technology,

Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Plant Protection and Soil Fertilizer Institute,

Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China;

3. Agronomy College, Yangtze University, Jingzhou 434023, China;

4. Wuhan Botanical Garden of Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China

Abstract ‘3414’ field trial was adopted to study the appropriate rate of fertilizer application and efficiency of fertilizer usage in relay cropping rice with wheat, a new cropping system in Danjiangkou region. Results showed that the yield of relay cropping rice was mainly determined by the effective panicle number per hectare and total grains per panicle. Appropriate application of N, P and K fertilizer increased yield significantly and farmer’s economic income. The highest grain yield reached up to 6 889 kg/hm² when the rate of fertilization was N 168.0 kg/hm², P₂O₅ 75.0 kg/hm² and K₂O 90.0 kg/hm². Among the effects of N, P and K fertilization, the increase of yield and economic income decreased in the order of N>K>P. The highest increment of yield was 3 316 kg/hm² with an increment rate of 92.8% and the apparent nutrient efficiency of 52.9% under N application. The highest increment of yield, the increment rate and the apparent nutrient efficiency was 546 kg/hm², 8.6% and 13.0% under P application, and 699 kg/hm², 11.3% and 69.8% under K application. The modeling of fertilization effect showed that the appropriate rate of applying N, P₂O₅ and K₂O was 188.0, 30.0 and 85.0 kg/hm² and the designable yield was 6 997 kg/hm² in relay cropping rice with wheat in this region.

Key words relay cropping rice with wheat; ‘3414’ field trial; no-tillage plus interplant; simplified cultivation; fertilization effect; efficiency of fertilizer utilization

(责任编辑: 杨锦莲)