植物营养与肥料学报 2014,20(1):237-246
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0127

配方施肥对水稻养分吸收动态及产量的影响

陈 敏[1], 马婷婷[1], 丁艳萍[1], 常 江[1*], 郜红建[1], 章力干[1], 丁玉宇[2]
(1 安徽农业大学资源与环境学院,合肥 230036;2 安徽怀宁县种植业局,安徽怀宁 246100)

摘要: 本文主要研究配方施肥与常规施肥对水稻养分吸收和产量的效应,检验大配方的区域适宜性和合理性。以水稻品种晚稻 187 为材料,采用大小区随机区组设计,在安徽省怀宁县进行了"大配方小调整"田间试验,结果表明,整个生育期内,水稻对氮素的总吸收量以小调整配方 T4 处理(施肥量为 N150 kg/hm^2、$P_2O_5$120 kg/hm^2、K_2O 105 kg/hm^2)最高,为 N 1.25 g/plant;对磷、钾的吸收总量配方施肥均高于常规施肥,也以小调整配方 T4 处理最高(P_2O_5 0.18 g/plant、K_2O 0.95 g/plant)。配方施肥的产量均高于常规施肥,以大配方 2(T3, 施肥量为 N 232.5 kg/hm^2、$P_2O_5$120 kg/hm^2、K_2O 120 kg/hm^2)的产量最高,达到了 11129 kg/hm^2,但小调整配方(T4)的产投比优于大配方。总体而言,配方施肥的施肥配比与肥料运筹较之常规施肥更为科学合理,大配方适宜该地区的水稻生产。

关键词: 配方施肥; 水稻; 养分吸收动态; 产量
中图分类号: S511.062.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)01-0237-10

Effects of formula fertilizer application on nutrient uptake and grain yield of rice

CHEN Min[1], MA Ting-ting[1], DING Yan-ping[1], CHANG Jiang[1*], GAO Hong-jian[1], ZHANG Li-gan[1], DING Yu-yu[2]
(*1 College of Resource and Environmental Sciences, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;*
2 Planting Industry Bureau of Huaining, Huaining, Anhui 246100, China)

Abstract: Fertilization can promote nutrient uptake and yield of rice. In order to compare the formula fertilizer treatments with the conventional fertilizer treatment on the effects of N, P and K fertilizer application on grain yield and nutrient uptake of rice and to test the regional adaptability and rationality of gross formula, a "gross formula and minor adjustment" yield experiment was carried out in Huaining county of Anhui province. The experiment used Wandao 187 as rice cultivar and was based a on design of a randomized block with different sizes. The results show that under the condition of formula fertilization and during all the grow periods, the N, P and K accumulation amounts of rice are higher than those of the conventional fertilizer treatment, and the N, P and K accumulation amounts of the minor adjustment (T4) is the highest (N 1.25 g per plant, P 0.18 g per plant, K 0.95 g per plant). In addition, the grain yield of the formula fertilization is higher than that of the conventional fertilizer treatment. Among all the treatments, the yield of the gross formula is the highest and reaches 11129 kg/ha, but the output input ratio of the minor adjustment is higher than that of the gross formula. Overall, compared with conventional fertilizer, the application of formua fertilizer is more scientific and reasonable, and the gross formula treatment is suitable for the rice production in this region.

Key words: formula fertilizer application; rice; nutrient uptake; yield

---

收稿日期: 2013-04-26 **接收日期:** 2013-09-15
基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAD20B05, 2012BAD04B09); 中国农大—司尔特测土配方施肥研究基地课题(横向)资助。
作者简介: 陈敏(1988—), 女, 安徽淮南人, 硕士研究生, 从事植物营养逆境生理研究。E-mail: katea2009@126.com
* 通信作者 E-mail: thbg@ahau.edu.cn

近年来我国粮食生产发展迅速,作物产量逐年提高,实现了9连增,总产突破了5亿吨,充分保证了13亿中国人粮食的数量安全。施肥是粮食增产的重要措施,随着粮食产量的提高,施肥量也在逐年增加,但由于盲目和不合理甚至是过量施肥,使肥料利用率逐年降低。我国氮肥利用率平均不到40%,磷肥利用率仅在20%左右,这不仅造成化肥资源的浪费,加大了成本投入,同时也引起环境污染和生态失衡,甚至引起粮食的质量安全问题[1-3]。因此,在保证粮食数量安全的同时,保证粮食的质量安全,以及环境友好,科学合理地施肥显得尤为重要。因此从2005年起,在全国范围内开展了测土配方施肥工作。各地农业研究和技术推广机构以土壤测试为基础,根据当地的土壤养分状况,开展了农作物肥效的田间试验,以解决农作物的肥料用量、肥料配比、施用方法等科学施肥问题,这对农业生产的可持续发展具有重大意义[4-9]。

全国测土配方施肥技术的推广与应用主要是根据土壤养分分析测试数据和"3414"田间试验结果,获取农作物施肥配方和研发各种作物的配方肥,并提供给化肥生产企业或配肥企业生产。但由于我国农业种植集约化程度低,分散度高,各县制定的配方多达十几种、甚至几十种,造成配方肥生产的困难或成本增加,难以实施与推广。针对配方肥实施、应用、推广的这一难题,在田间试验中提出了"大配方小调整"的施肥措施,具有一定的实践意义。"大配方"即建立区域性大配方,为配方肥的制造提供依据,以利于实现农业的集约化生产和肥料生产;"小调整"可根据具体的作物和土壤条件科学指导农民优化施肥,达到增产增收的目的。

2012年在安徽怀宁县通过实施大配方小调整施肥项目,根据全县养分测定值和水稻的养分需求特性,结合水稻历年的"3414"试验结果,参照本县目前使用的水稻配方肥,协同制定了适应该区水稻生长的最佳施肥配方,确定了目标产量分别为9000 kg/hm^{2}和9750 kg/hm^{2}的怀宁县水稻生产的大配方,并根据具体的试验田块的土壤养分实测值,制定适应该田块的小调整配方。本研究通过田间小区试验对比配方肥和常规复合肥对水稻养分吸收和产量的影响,探讨最佳施肥配方,检验区域性大配方的合理性与适应范围,以期为该地区水稻的合理施肥增加产量和农民增收提供技术支持,同时为配方肥生产企业提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选择在安徽省怀宁县,地处长江中下游北岸,大别山南麓前沿,东经116°28′～117°03′,北纬30°20′～30°50′之间。试验地土壤为水稻土,土壤有机质含量21.9 g/kg、碱解氮142.6 mg/kg、速效磷6.9 mg/kg、速效钾118.0 mg/kg。供试水稻品种为"晚稻187"。供试肥料为司尔特复合肥(养分含量45%,N-P-K为18-12-15),常规复合肥(养分含量51%,N-P-K为17-17-17)),尿素(含N 46%),过磷酸钙(含P_2O_5 12%)和KCl(含K_2O 60%)。

1.2 试验设计

根据怀宁县2006年以来的土壤养分测定数据和"3414"田间氮、磷、钾肥效试验,拟定了全县目标产量为9000 kg/hm^{2}和9750 kg/hm^{2}的一季水稻最佳施肥大配方。本试验采用水稻目标产量为9000 kg/hm^{2}的大配方推荐施肥量(T2),为N180 kg/hm^2,$P_2O_5$105 kg/hm^2,K_2O 105 kg/hm^2;产量为9750 kg/hm^{2}的大配方推荐施肥量(T3),为N 232.5 kg/hm^2,$P_2O_5$120 kg/hm^2,K_2O 120 kg/hm^2;根据试验田块土壤实测的氮、磷、钾养分数据,应用平衡施肥原理,计算出的"小调整"配方(T4),施肥量为N150 kg/hm^2,$P_2O_5$120 kg/hm^2,K_2O 105 kg/hm^2;同时设不施肥对照(CK)处理;农民常规施肥(T1),施肥量为N 199.5 kg/hm^2;$P_2O_5$123 kg/hm^2;K_2O 72 kg/hm^2,共5个处理,每个处理3次重复,小区面积60 m^2。每个小区随机埋入12个根袋,供采样用。水稻于4月28日播种,5月30日秧苗移栽,9月20日收获。具体施肥量和肥料运筹见表1。

1.3 测定项目和方法

分别于6月30日(分蘖期),7月25日(拔节期),8月13日(抽穗期),9月8日(成熟期)在每个小区随机取出3个根袋,用自来水洗净,并用蒸馏水冲洗后,分成茎、叶、穗不同部位,在105℃杀青30 min,于70℃烘干后称干重,粉碎过0.15 mm筛,备用。

植物样品的氮含量用凯氏定氮法,磷用钼锑抗比色法,钾用火焰光度计法测定[10]。

试验数据用Excel和SPSS统计软件进行分析。

表 1　各处理的肥料运筹

Table 1　Fertilizer application of each treatment

处理 Treat.	养分施用量 Nutrient appl. rate (kg/hm²)			基肥 Base fertilizer (kg/hm²)				分蘖肥 Till. fert. (kg/hm²)	穗肥 Ear fert. (kg/hm²)
	N	P_2O_5	K_2O	配方肥 Form. fert. (N-P-K)	尿素 Urea	普钙 SSP	KCl	尿素 Urea	尿素 Urea
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T1	199.5	123	72	424.3(17-17-17)	169.4	424.3	0.0	106.4	0.0
T2	180	105	105	600.0(18-12-15)	0.0	275.0	25	116.7	38.3
T3	232.5	120	120	750.0(18-12-15)	0.0	250.0	12.5	150.0	60.0
T4	150	120	105	500.0(18-12-15)	0.0	500.0	50	98.3	33.3

注(Note):T1—常规 Conventional fertilizer; T2—大配方 1 Gross formula 1; T3—大配方 2 Gross formula 2; T4—小调整 Minor adjustment; SSP—普钙 Single superphosphate.

2　结果与分析

2.1　施肥对水稻养分含量的影响

2.1.1 施肥对水稻体内氮含量的影响　从表 2 可以看出,水稻植株地上部氮含量从分蘖期至拔节期先降低,拔节期以后逐渐增加;所有部位施肥处理的氮含量均高于对照(CK)。不同部位中的氮素含量表现为,营养生长时期(分蘖期和拔节期)主要分布在叶中,拔节期以后氮素逐渐向穗部转移,含量顺序为叶 > 穗 > 茎(叶 14.77 ~ 21.61 g/kg,茎 6.59 ~ 10.70 g/kg,穗 10.68 ~ 14.08 g/kg);到达成熟期时,穗部氮含量进一步提高(穗 13.70 ~ 18.40 g/kg,叶 11.84 ~ 22.04 g/kg)。由此可见,氮素在不同部位的含量虽随生育进程有所变化,但主要分布在叶中,这可能与光合作用需要足够的氮源有关[11-12]。

表 2　不同施肥措施对水稻氮含量的影响(g/kg)

Table 2　Effect of different fertilization treatments on nitrogen content in rice

处理 Treat.	分蘖期 Tillering stage		拔节期 Shooting stage		抽穗期 Heading stage			成熟期 Maturity stage		
	叶 Leaf	茎 Stem	叶 Leaf	茎 Stem	穗 Spike	叶 Leaf	茎 Stem	穗 Spike	叶 Leaf	茎 Stem
CK	40.71 cB	24.15 bB	18.65 dC	7.03 cC	10.68 dD	14.77 dC	6.59 cC	13.70 cC	11.84 dD	8.28 dD
T1	40.98 bcB	25.02 aAB	22.23 bA	8.80 bAB	11.95 cC	18.09 cB	8.88 bB	16.42 bB	16.59 cC	11.28 cC
T2	42.30 bAB	25.26 aA	23.30 aA	9.51 abA	13.67 aAB	21.61 aA	9.66 abAB	16.60 bB	19.57 bB	12.94 bB
T3	43.83 aA	24.94 aAB	23.70 aA	9.67 aA	12.82 bBC	20.59 abA	10.70 aA	18.15 aA	22.04 aA	13.12 bB
T4	41.04 bcB	24.86 aAB	20.67 cB	7.76 cBC	14.08 aA	20.38 bA	10.16 aA	18.40 aA	19.82 bB	13.80 aA

注(Note):同列数据后不同小、大写字母分别表示处理间差异达 5% 和 1% 显著水平 Values followed by different small and capital letters in same column mean significant at the 5% and 1% levels, respectively.

从各施肥处理来看,除不施肥处理外,分蘖期叶片中氮含量以 T3 为最高,常规施肥处理 T1 最低,两者存在极显著差异。拔节期氮含量同样以 T3 处理最高,而以小调整配方(T4)最低。可能是因为 T4 处理氮肥总用量小,基、蘖肥相对较少的缘故。抽穗期和成熟期,各部位氮素含量配方施肥处理均显著高于常规施肥,主要是因为常规施肥肥料集中在基肥和分蘖肥,后期供肥不足,该时期小调整配方 T4 与大配方 T2 和 T3 处理之间无显著差异。

2.1.2 施肥对水稻体内磷含量的影响　由水稻不同

生育期不同部位磷含量的动态变化(表3)可以看出,各施肥处理水稻各部位磷含量均高于对照。与氮素不同,营养生长时期磷素主要集中在茎部(分蘖期为2.84 ~ 3.90 g/kg,拔节期2.73 ~ 3.19 g/kg)。抽穗期,与氮素类似,磷逐渐向穗部转移,茎叶中磷含量降低,但仍以茎中含量最高(2.38 ~ 2.74 g/kg)。成熟期,大量磷素向穗部转移,茎叶中磷含量显著降低,穗部含量最高(2.56 ~ 3.02 g/kg)。这与宇万太等[13]的研究结果一致。

从不同施肥处理看,分蘖期叶、茎中磷含量均以T4处理最高,T2最低,差异极显著;拔节期配方施肥处理(T2,T3,T4)中叶、茎的磷含量均高于常规施肥(T1),达到极显著水平。抽穗期以后茎、叶、穗中磷含量也均表现为配方施肥高于常规施肥,差异显著。说明配方施肥更有利于水稻对磷的吸收,而施磷过多或养分比例不合理往往会降低磷的吸收[14]。

表3 不同施肥措施对水稻体内磷含量的影响(g/kg)

Table 3 Effect of different fertilization treatments on phosphorus content in rice

处理 Treat.	分蘖期 Tillering stage		拔节期 Shooting stage		抽穗期 Heading stage			成熟期 Maturity stage		
	叶 Leaf	茎 Stem	叶 Leaf	茎 Stem	穗 Spike	叶 Leaf	茎 Stem	穗 Spike	叶 Leaf	茎 Stem
CK	2.44 cB	2.84 cC	1.97 cC	2.73 cC	1.74 dC	1.43 cC	2.38 cC	2.56 dC	1.07 eD	1.36 eE
T1	2.87 aA	3.87 aA	1.98 cC	2.81 cC	2.09 cB	1.50 bBC	2.64 bB	2.58 dC	1.11 dD	1.43 dD
T2	2.53 cB	3.49 bB	2.19 aA	3.19 aA	2.47 aA	1.63 aA	2.74 aA	2.94 bA	1.27 cC	1.69 bB
T3	2.74 bA	3.71 abAB	2.09 bB	3.08 bAB	2.16 bcB	1.52 bB	2.73 aA	3.02 aA	1.44 aA	1.79 aA
T4	2.87 aA	3.90 aA	1.95 cC	3.04 bB	2.21 bB	1.53 bB	2.73 aA	2.71 cB	1.33 bB	1.56 cC

注(Note):同列数据后不同小、大写字母分别表示处理间差异达5%和1%显著水平 Values followed by different small and capital letters in same column mean significant at the 5% and 1% levels, respectively.

2.1.3 施肥对水稻体内钾含量的影响 表4显示,各施肥处理钾的含量均高于对照,配方施肥处理(T2、T3、T4)高于常规施肥(T1);钾主要分布于茎中,含量高低顺序为茎>叶>穗,越到生育后期茎中的分配比例越大,这与大多数的试验结果类似[15]。

不同处理间、不同生育时期水稻体内钾含量变化有所不同。分蘖期配方施肥处理叶中钾含量高于常规施肥,差异显著,茎中则相反,但差异不显著;拔节期有相反趋势,即叶中钾含量配方施肥处理低于常规施肥,茎中则高于常规施肥,差异极显著。这说明配方施肥处理在水稻拔节期钾的吸收就开始逐步向茎中累积,这一现象越到后期越明显。而常规施肥的变化趋势与不施肥处理(CK)相同,后期茎中钾含量极显著低于配方施肥,这可能会降低水稻对逆境条件的抵御能力[16-17]。

表4 不同施肥措施对水稻体内钾含量的影响(g/kg)

Table 4 Effect of different fertilization treatments on potassium content in rice

处理 Treat.	分蘖期 Tillering stage		拔节期 Shooting stage		抽穗期 Heading stage			成熟期 Maturity stage		
	叶 Leaf	茎 Stem	叶 Leaf	茎 Stem	穗 Spike	叶 Leaf	茎 Stem	穗 Spike	叶 Leaf	茎 Stem
CK	32.88 dC	38.66 bB	17.55 bB	20.46 dD	3.90 dC	13.01 cB	19.41 dD	2.13 cC	6.79 cC	25.63 cC
T1	39.14 cB	41.41 aA	19.09 aA	23.13 cC	4.39 cB	13.33 cB	21.84 cC	2.34 bB	8.98 bB	27.38 bB
T2	39.94 bcAB	39.75 abAB	19.35 aA	27.72 aA	4.75 aA	14.08 bA	23.41 aA	2.34 bB	11.77 aA	27.40 bB
T3	40.35 abAB	40.98 aAB	17.59 bB	26.35 bB	4.59 bA	14.52 aA	22.71 bB	2.48 aA	12.07 aA	28.97 aA
T4	41.02 aA	40.36 aAB	17.88 bB	25.61 bB	4.69 abA	14.52 aA	23.33 aA	2.34 bB	11.50 aA	27.89 bAB

注(Note):同列数据后不同小、大写字母分别表示处理间差异达5%和1%显著水平 Values followed by different small and capital letters in same column mean significant at the 5% and 1% levels, respectively.

2.2　施肥对水稻养分吸收量的影响

2.2.1 施肥对氮吸收总量和净吸收量的影响　随着生育时期的推移,各处理水稻体内的氮素累积量呈上升趋势,成熟期达到最大值(N 0.58 ~ 1.25 g/plant)(图 1)。各施肥处理各时期氮累积量均显著高于对照(LSR = 0.01),表现为小调整(T4) > 大配方 1(T2) > 常规施肥(T1) > 大配方 2(T3) > CK。水稻对氮素的吸收动态规律为分蘖期~抽穗期平缓增加,抽穗~成熟期迅速增加,可能因为该时期是谷粒形成的重要时期,需要吸收大量的氮素营养完成其抽穗灌浆[12],也反映了水稻生长发育对氮素供应的需求规律。

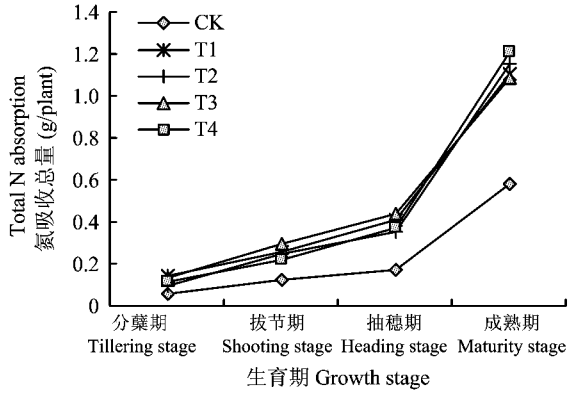

图 1　施肥对水稻氮吸收总量的影响

Fig. 1　Effect of fertilization on total nitrogen absorption in rice

不同施肥处理对水稻植株氮累积量影响显著(图 1),分蘖期,常规施肥(T1)处理氮累积量为 0.15 g/plant,显著高于其他施肥处理(LSR = 0.01)。这是因为 T1 处理的氮肥均用作基肥和分蘖肥,前期氮素用量最大,其累积量也最高。拔节期与抽穗期,以氮用量最高的大配方(T3)的氮累积量最高,与其他施肥处理差异达到了显著水平(LSR = 0.01)。成熟期,小调整(T4)处理的累积量最大(1.25 g/plant),显著高于其他施肥处理。T4 处理的氮肥施用量是根据本田块氮素实测数值推荐的施肥量,因而更为合理。而常规施肥氮肥全部施在前期,满足不了水稻后期对氮的需求。大配方虽然肥料运筹合理,氮水平也高,但其是针对全县土壤设置的施肥配比,高于此块试验田的养分需求,因而针对这一特定田块的特定肥力特性,氮素用量偏多。过量施用氮肥会造成水稻无效分蘖增多以致影响成穗率及结实率,从而造成氮素的浪费[18]。虽然水稻体内的氮素累积量随生育期的推进呈上升趋势,但各个时期的净吸收量有差异(图 2),水稻在前 3 个时期,氮素的净吸收量相对较少,抽穗期以后,吸收量迅速增大,净吸收量显著增加,占整个生育时期的 60.17%~70.14%。从不同施肥处理来看,不同生育期的氮净吸收量均显著高于对照(LSR = 0.05),分蘖期常规施肥(T1)的氮净吸收量高于配方施肥,均达到极显著水平(LSR = 0.01)。这是由于常规施肥处理前期氮素供应量大的缘故。成熟期以小调整处理(T4)最高,净吸收量达到了 0.84 g/plant,显著高于施氮量高的常规施肥(T1)和大配方施肥(T2, T3)。由此可见,氮肥运筹方式的不同,对水稻不同生育时期氮素的吸收与累积会产生很大影响,进而影响到水稻的灌浆与成熟,甚至是产量[19-20]。

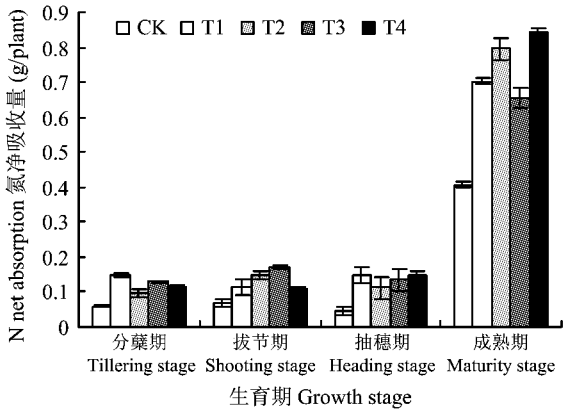

图 2　不同施肥处理对水稻不同生育时期氮吸收的影响

Fig. 2　Effect of different fertilization on nitrogen net absorption of rice in different growth periods

2.2.2 施肥对磷吸收总量和不同时期净吸收量的影响　水稻整个生育期磷吸收量动态变化各处理趋势一致,抽穗期以前缓慢增加,抽穗期以后迅速增加,均在成熟期达到最高值(0.10 ~ 0.18 g/plant),各施肥处理不同时期磷吸收总量显著高于对照(LSR = 0.05),大小顺序为小调整(T4) > 大配方 1(T2) > 大配方 2(T3) > 常规施肥(T1) > CK(图 3),T4 和 T2 显著高于其他处理。由此可见,配方施肥可促进营养元素的均衡吸收。

从水稻各生育期磷的净吸收量(图 4)来看,配方施肥大致有两个净吸收高峰期,一个是拔节期,吸收量占整个生育期吸收总量的 18.01%~22.35%;另一个是成熟期,占整个生育期的 56.42% ~ 64.24%。而常规施肥与对照相同,只有一个吸收高峰期(成熟期),表明施肥不合理,导致养分吸收不

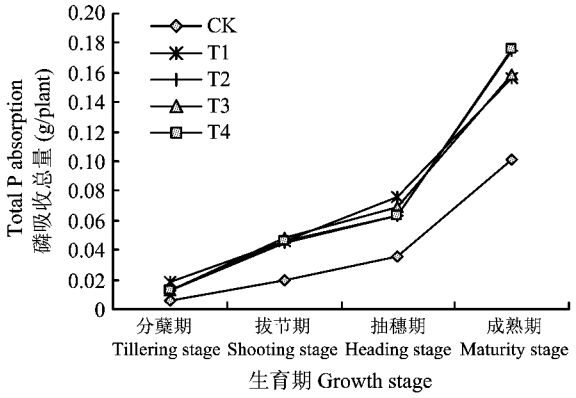

图3 施肥对水稻磷吸收总量的影响

Fig. 3 Effect of fertilization on total phosphorus absorption in rice

平衡,使前期磷吸收量不足,不利于水稻分蘖的形成[21-22]。不同施肥处理表现为,分蘖期常规施肥(T1)的磷净吸收量显著高于其他施肥处理(LSR = 0.01)。常规施肥的肥料集中在在基肥和分蘖肥,分蘖期氮素的吸收量最大,由于元素之间的交互作用,促进了磷的吸收,所以磷的累积量高于各配方施肥处理。分蘖期到拔节期磷的净吸收量配方施肥均高于常规施肥处理,以大配方2(T3)最高,常规施肥最低,差异极显著。由于该时期常规施肥磷吸收量不足,会降低分蘖,减弱代谢与抗逆性,从而会降低水稻产量[23]。抽穗期至成熟期磷的净吸收量表现为配方施肥极显著高于常规施肥,其大小顺序为小调整(T4) > 大配方1(T2) > 大配方2(T3) > 常规施肥(T1)。

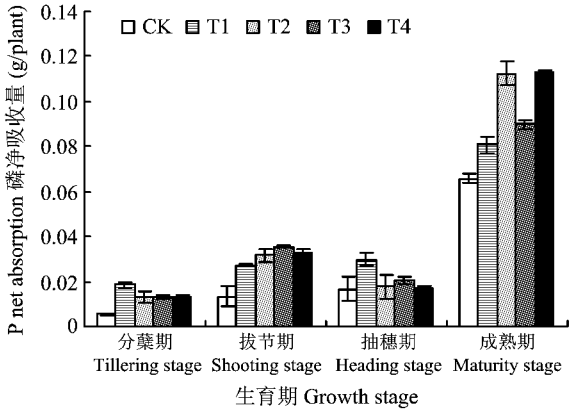

图4 不同施肥处理对水稻不同生育时期磷素吸收的影响

Fig. 4 Effect of different fertilization on phosphorus net absorption of rice in different growth periods

2.2.3 施肥对钾吸收动态的影响 水稻对钾吸收的累积曲线均为随生物量的增加而增大,成熟期达到最大值(0.53 ~ 0.95 g/plant)。钾的吸收与累积配方施肥与常规施肥处理明显不同(图5),常规施肥钾的吸收累积曲线几乎为线性,而配方施肥均表现为两段式,即从分蘖到拔节期吸收量迅速上升,拔节至抽穗期变缓,抽穗至成熟期又是一个快速吸收的过程。整个生育期钾的累积量以小调整处理(T4)最高,常规施肥(T1)最低,但均显著高于对照(LSR = 0.05)。

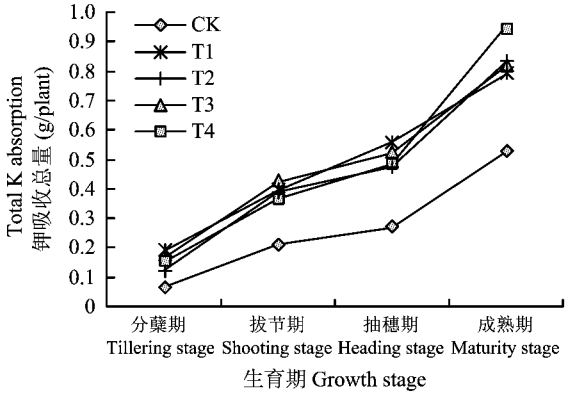

图5 施肥对水稻钾吸收总量的影响

Fig. 5 Effect of fertilization on total potassium absorption in rice

比较不同施肥处理可知,分蘖期常规施肥的钾累积量最大(0.19 g/plant),较之配方施肥差异达到了显著水平(LSR = 0.05)。常规施肥的肥料集中在基肥和分蘖肥,分蘖期的氮素吸收量最大,钾有助于氮素代谢和蛋白质的合成,所以吸收氮越多,钾的需求量也就相应增加[24]。而成熟期,吸收总量配方施肥均高于常规施肥处理,以小调整处理最高(0.95 g/plant),常规施肥最低(0.79 g/plant),差异极显著,配方施肥处理间差异不显著。

水稻整个生育期内钾的净吸收动态与磷类似,配方施肥处理大致也有两个净吸收高峰期(图6),一是拔节期,占全生育期总吸收量的22.82% ~ 32.55%;另一个是成熟期,占全生育期总吸收量的35.94% ~ 48.97%。而常规施肥处理各时期对钾素的净吸收量比较平衡。如果后期钾吸收量不足,不利于氮、磷向穗部的转移,也易倒伏[25]。

从不同施肥处理看,分蘖期常规施肥处理(T1)的钾净吸收量显著高于其他施肥处理(LSR = 0.01)。可能是因为分蘖期常规施肥对氮、磷的吸收量较大,氮、磷的吸收促进了对钾素的吸收,分蘖期到拔节期钾净吸收量配方施肥处理高于常规施肥,以T2最高,常规施肥最低,差异极显著。拔节期到

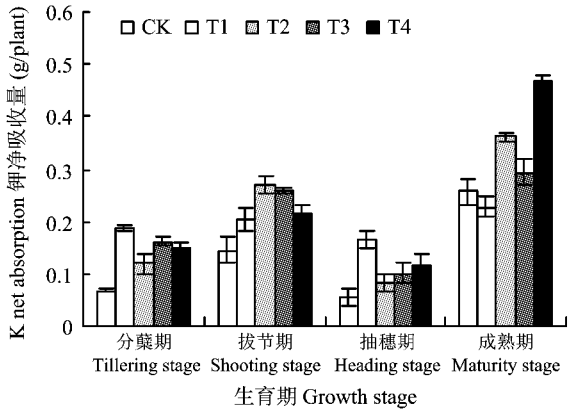

图 6　不同施肥处理对水稻不同生育期钾吸收的影响

Fig. 6　Effect of different fertilization on potassium net absorption of rice in different growth periods

抽穗期，常规施肥处理的钾净吸收量最大，其原因尚待进一步研究。抽穗到成熟期，配方施肥钾净吸收量均高于常规施肥处理，其中以 T4 处理最高，差异显著（LSR = 0.05）。

2.3　施肥对水稻氮磷钾吸收比例的影响

水稻对氮磷钾的吸收比例随生长期不同而变化（表 5）。总的来说，水稻对氮的需求量最大，钾次之，磷最少。从表 5 可知，氮磷钾的总吸收比例配方施肥钾的吸收比例高于常规施肥。但各施肥处理间变化较小，这可能与水稻品种有关，主要受基因型控制。从不同生育期来看，分蘖期、拔节期均表现为钾的吸收比例远高于氮素，集中在拔节期，随后逐渐降低，说明这个时期是钾的重要吸收时期，应注重钾肥供应。值得注意的是，氮肥供应与钾的吸收有着密切关系，氮肥不足或较少时，钾的吸收比例增加（如 CK 和 T4）。从吸收动态来看，常规施肥钾吸收比例下降比较快，尤其是在成熟期，而配方施肥则不同，后期下降较慢，有利于抗逆和增产。

表 5　施肥对水稻不同时期氮磷钾吸收比例的影响（$N:P_2O_5:K_2O$）

Table 5　Effect of different fertilization treatments on N, P and K absorption ratios of rice

处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Shooting stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity stage	总吸收比例 Total absorption ratio
CK	1:0.10:1.18	1:0.19:2.09	1:0.36:1.24	1:0.16:0.64	1:0.18:0.91
T1	1:0.13:1.28	1:0.24:1.82	1:0.20:1.12	1:0.12:0.33	1:0.14:0.71
T2	1:0.14:1.26	1:0.21:1.83	1:0.16:0.72	1:0.14:0.45	1:0.15:0.72
T3	1:0.10:1.26	1:0.21:1.52	1:0.15:0.75	1:0.14:0.45	1:0.15:0.75
T4	1:0.11:1.31	1:0.31:2.04	1:0.12:0.80	1:0.13:0.55	1:0.15:0.79

2.4　施肥对水稻产量构成因素的影响

在一定施氮范围内，增施氮肥可以显著增加水稻产量[7, 26]。本试验结果显示（表 6），配方施肥各处理产量随施氮量增加而增加，以大配方 2（T3）的

表 6　不同施肥处理水稻产量构成因素

Table 6　The yield composition of rice in different fertilization treatments

处理 Treatment	有效穗 Valid panicle (No./m^2)	每穗总粒数 Total grain (No./panicle)	每穗实粒数 Solid grain (No./panicle)	千粒重 1000-seed wt. (g)	理论测产 theoretical yield (kg/hm^2)	实际产量 harvest output (kg/hm^2)
CK	136.4 bB	205.2 aA	195.4 aA	28.6 aA	7566 aA	7650 bB
T1	200.9 aA	191.4 aA	181.8 aA	28.7 aA	10493 aA	10562 aA
T2	175.4 abAB	219.6 aA	208.0 aA	29.9 aA	10955 aA	10856 aA
T3	181.4 aAB	226.1 aA	214.2 aA	28.6 aA	11198 aA	11129 aA
T4	178.4 aAB	212.6 aA	199.0 aA	28.2 aA	10053 aA	10566 aA

注（Note）：同列数据后不同小、大写字母分别表示处理间差异达 5% 和 1% 显著水平 Values followed by different small and capital letters in same column mean significant at the 5% and 1% levels, respectively.

产量最高,主要是显著提高了水稻单位面积有效穗数和每穗实粒数。配方施肥的产量均高于常规施肥(T1),这是因为常规施肥的氮素投入量虽然很大,但其肥料运筹和氮磷钾配比不合理,氮素全部用作基肥和分蘖肥,分蘖期氮素吸收量很大,过分加强叶中有机物的合成作用,抑制了水解作用,使得其合成的有机物质从茎叶转移到籽粒的过程受到阻碍,致使灌浆不充分,每穗实粒数降低,从而致使产量降低[27]。

2.5 经济效益

由表7可以看出,氮素投入量大的大配方2(T3)成本最高,常规施肥(T1)次之,小调整(T4)的肥料投入量最小,成本也最小。大配方2带来的收益最大,常规施肥最低。由产投比可知,小调整配方(T4)最大,其次为大配方1(T2),既增产又增效。比较单位纯养分效应也可以明显看出,配方施肥每公斤氮磷钾的增产量均高于常规施肥,单位肥料的效益大。配方施肥的施肥配比更有利于提高产量,发挥单位肥料的最大效应。

表7 施肥对经济效益的影响

Table 7 Effect of fertilization on economic benefits

处理 Treatment	实际产量 Output (kg/hm^2)	增产率 Yield incr. rate (%)	成本 Cost ($Yuan/hm^2$)	收益 Income ($Yuan/hm^2$)	产投比 Output-input ratio	肥料效应 Fertilizer effect (kg/kg)
T1	10562		1924	25348	13.18	19.11
T2	10856	2.78	1901	26053	13.71	22.96
T3	11129	5.37	2293	26708	11.65	19.84
T4	10566	0.042	1846	25358	13.74	22.82

注(Note):尿素、普通过磷酸钙、氯化钾、复合肥按成本分别为2.08、0.77、2.96、2.85 Yuan/kg,稻谷按2.4 Yuan/kg计,人工等未计入成本 The prices of urea, SPP, KCl, compound fertilizer and rice are 2.08, 0.77, 2.96, 2.85 and 2.4 Yuan/kg, respectively.

3 讨论

以往的试验研究表明,氮磷钾肥配合施用可以促进水稻个体发育,建立良好的群体结构[1,14],本试验结果进一步说明合理的氮磷钾配比对各养分的吸收动态及产量也有重要的影响。各施肥条件下水稻对氮磷钾的吸收总量均以配方施肥高于常规施肥。配方施肥水稻产量也均高于常规施肥。

由此可以看出,配方施肥的肥料用量、肥料配比以及肥料运筹更有利于水稻体内氮、磷、钾的累积,促使体内氮、磷、钾的平衡吸收,而常规施肥重氮肥,轻钾肥,只重视前期肥料的投入,后期养分供应不足,不利于水稻的生长发育和产量的形成。根据全县区域制定的两个大配方,获得了较高的产量和较好的经济效益,表明区域性大配方有广泛的适应性,大配方施肥条件下的水稻氮、磷、钾吸收累积量较高,仅次于小调整配方(T4),产量与经济效益也高于农户惯用的常规施肥,与小调整配方相差不大,适用于该地的农业生产。

通过大配方小调整项目的实施以及试验后的工作总结对农户进行科学施肥、合理施肥的培训,进一步增强了农民的科学施肥意识,改变了农户盲目施肥、重施氮肥、轻钾肥及有机肥等不合理的习惯。通过大配方小调整试验的实施,还可以有效地减少化肥使用量,控制化肥对环境的污染。最主要的是带给农户切实的经济利益以及减少化肥企业生产配方肥的不便之处,是把测土配方施肥工作真正推广应用到农业生产的重要一环。

4 结论

1)水稻营养生长期吸收的氮素主要分布在叶部,生殖生长期逐步向穗部转移,到成熟期氮素含量为穗>叶>茎;磷在生长期多集中在茎部,后期逐步向穗部转移;钾整个生育期都集中在茎部。

2)整个生育期内,水稻对氮素的吸收主要集中在抽穗期以后,占全生育期的60.17%~70.14%,总吸收量以小调整配方最高,为1.25 g/plant;水稻对磷、钾的吸收配方施肥在拔节期与成熟期有两个高峰,而常规施肥对磷的吸收只有一个高峰期(成熟期),对钾的吸收全生育期相对比较均衡;磷、钾吸收总量配方施肥均高于常规施肥。

3)各施肥处理较之对照产量均显著增加,配方施肥处理产量均大于常规施肥,以大配方2(T3)的

产量最高，比常规施肥增产 5.37%，而小调整配方施肥(T4)处理下的产投比最大。

参 考 文 献：

[1] 王光火，张奇春，黄昌勇，等. 提高水稻氮肥利用率控制氮肥污染的新途径—SSNM[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版)，2003，29(1)：67-70.
Wang G H, Zhang Q C, Huang L Y *et al*. SSNM—A new approach to increasing fertilizer N use efficiency and reducing N loss from rice fields[J]. J. Zhejiang Agric. Univ. (Agric. Life Sci. Ed.), 2003, 29(1): 67-70.

[2] Li J T, Zhang B. Paddy soil stability and mechanical properties as affected by long-term application of chemical fertilizer and animal manure in subtropical China[J]. Pedosphere, 2007, 17(5): 568-579.

[3] Karl D M. Aquatic ecology: phosphorus, the staff of life[J]. Nature, 2000, 406: 31-33.

[4] 高祥照，马常宝，杜森. 测土配方施肥技术[M]. 北京：中国农业出版社，2005. 1-25.
Gao X Z, Ma C B, Du S. Formula fertilization by soil testing [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005. 1-25.

[5] 王伟妮，鲁剑巍，何予卿，等. 氮、磷、钾肥对水稻产量、品质及养分吸收利用的影响[J]. 中国水稻科学，2011，25(6)：645-653.
Wang W N, Lu J W, He Y Q *et al*. Effects of N, P, K Fertilizer application on grain yield, quality, nutrient uptake and utilization of rice[J]. Chin. J. Rice Sci., 2011, 25(6): 645-653.

[6] 马常宝. 美国艾奥瓦洲测土配方施肥现状与启示[J]. 世界农业，2007，(1)：58-59.
Ma C B. The present situation and enlightenment of formula fertilization of Iowa[J]. World Agric., 2007, (1): 58-59.

[7] 黄德明. 十年来我国测土施肥的进展[J]. 植物营养与肥料学报，2003，9(4)：495-499.
Huang D M. Soil testing and fertilizer recommendations in China during the past decade[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2003, 9(4): 495-499.

[8] 周春萍，杨晓力，龙安西. 水稻 3414 测土配方施肥试验结果分析[J]. 耕作与栽培，2011，(4)：17-18.
Chou C P, Yang X L, Long A X. Analysis of rice 3414 formula fertilization[J]. Till. Cult., 2011, (4): 17-18.

[9] 张福锁，江荣凤，陈新平，等. 测土配方施肥技术[M]. 北京：中国农业大学出版社，2011.
Zhang F S, Jiang R F, Chen X P *et al*. Formula fertilization by soil testing[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2011.

[10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京：中国农业出版社，2000. 30-107.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 30-107.

[11] 陈晓群，张学军，白建忠. 基于水稻不同生育期叶绿素值推荐追施氮量的研究初报[J]. 中国农学通报，2010，26(7)：147-151.
Chen X Q, Zhang X J, Bai J Z. Preliminary study on amount of recommended topdressing nitrogen using chlorophyll SPAD of rice during different growth stages[J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2010, 26(7): 147-151.

[12] 晏娟，尹斌，张绍林，等. 不同施氮量对水稻氮素吸收与分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2008，14(5)：835-839.
Yan J, Yin B, Zhang S L *et al*. Effect of nitrogen application rate on nitrogen uptake and distribution in rice[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(5): 835-839.

[13] 宇万太，马强，周桦，等. 不同施肥模式对下辽河平原水稻生态系统生产力及养分收支的影响[J]. 生态学杂志，2007，26(9)：1350-1354.
Yu W T, Ma Q, Zhou H *et al*. Effects of different fertilization patterns on the productivity and nutrient budget of rice ecosystem in lower reaches of Liaohe River plain[J]. Chin. J. Ecol., 2007, 26(9): 1350-1354.

[14] 郭再华，贺屯源，徐才国. 磷水平对不同磷效率水稻生长及磷、锌养分吸收的影响[J]. 中国水稻科学，2005，19(4)：355-360.
Guo Z H, He T Y, Xu C G. Effects of supplied P levels on plant growth and uptake of P and Zn in different P-efficiency rice[J]. Chin. J. Rice Sci., 2005, 19(4): 355-360.

[15] 敖和军，王淑红，邹应斌，等. 不同施肥水平下超级杂交稻对氮、磷、钾的吸收累积[J]. 中国农业科学，2008，41(10)：3123-3132.
Ao H J, Wang S H, Zou Y B *et al*. Characteristics of NPK nutrient uptake and utilization of super hybrid rice under different fertilizer application rates[J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41(10): 3123-3132.

[16] 王强盛，甄若宏，丁艳锋，等. 钾肥用量对优质粳稻钾素积累利用及稻米品质的影响[J]. 中国农业科学，2004，37(10)：1444-1450.
Wang Q S, Zhen R H, Ding Y F *et al*. Effects of potassium fertilizer application rates on plant potassium accumulation and grain quality of japonica rice[J]. Sci. Agric. Sin., 2004, 37(10): 1444-1450.

[17] 胡泓，王光火，张奇春. 田间低钾胁迫条件下水稻对钾的吸收和利用效率[J]. 中国水稻科学，2004，18(6)：527-532.
Hu H, Wang G H, Zhang Q C. Potassium uptake and use efficiency of rice under low-potassium stress field conditions[J]. Chin. J. Rice Sci., 2004, 18(6): 527-532.

[18] 杨连新，王余龙，吕贞龙，等. 淮北生土地区肥料运筹对水稻产量形成及氮素吸收的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版)，2003，24(1)：50-54.
Yang L X, Wang Y L, Lü Z L *et al*. Effect of fertilizer supplying method on yield formation and nitrogen absorption in immature soil in Huaibei[J]. J. Yangzhou Univ. (Agric. Life Sci. Ed.), 2003, 24(1): 50-54.

[19] Dordas C. Dry matter, nitrogen and phosphorus accumulation, partitioning and remobilization as affected by N and P fertilization

and source-sink relations[J]. Eur. J. Agron. 2009, 30: 129-139.

[20] 吴文革，张四海，赵决建，等. 氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2007，13(5)：757-764.
Wu W G, Zhang S H, Zhao J J *et al*. Nitrogen uptake, utilization and rice yield in the north rimland of double-cropping rice region as affected by different nitrogen management strategies [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(5): 757-764.

[21] 陆景陵. 植物营养学[M]. 北京：北京农业大学出版社，1994.
Lu J L. Plant nutrition science [M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1994.

[22] 潘圣刚，翟晶，曹凑贵，等. 氮肥运筹对水稻养分吸收特性及稻米品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(3)：522-527.
Pan S G, Zhai J, Cao C G *et al*. Effects of nitrogen management practices on nutrient uptake and grain quality of rice[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(3): 522-527.

[23] 黎忠祥，栾阴强，许石昆，等. 不同氮磷钾用量对水稻产量的效应研究[J]. 中国稻米，2009，15(2)：27-29.
Li Z X, Luan Y Q, Xu S K *et al*. Effect of different N, P, K dosage on the yield of rice[J]. China Rice, 2009, 15(2): 27-29.

[24] 饶立华，蒋德安，薛建明，洪健. 钾营养对水稻光合器功能的效应与谷粒产量的影响[J]. 植物生理学报，1989，15(2)：191-197.
Rao L H, Jiang D A, Xue J M, Hong J. Effect of potassium on the function of photosynthetic apparatus and grain yield of rice [J]. J. Plant Physiol., 1989, 15(2): 191-197.

[25] 胡泓，王光火. 钾肥对杂交水稻养分积累以及生理效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2003，9(2)：184-189.
Hu H, Wang G H. Influence of potassium fertilizer on nutrient accumulation and physiological efficiency of hybrid rice [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2003, 9(2): 184-189.

[26] 张福锁，马文奇. 肥料投入水平与养分资源高效利用的关系[J]. 土壤与环境，2000，9(2)：154-157.
Zhang F S, Ma W Q. The relationship between fertilizer input and nutrient use efficiency[J]. Soil Environ. Sci., 2000, 9(2): 154-157.

[27] 李国生，张耗，王志琴，等. 氮素水平对水稻产量与品质的影响[J]. 扬州大学学报（农业与生命科学版），2007，28(4)：66-70.
Li G S, Zhang H, Wang Z Q *et al*. Effects of nitrogen levels on grain yield and quality of rice[J]. J. Yangzhou Univ. (Agric. Life Sci. Ed.), 2007, 28(4): 66-70.