植物营养与肥料学报 2010,16(4):938 -946
Plant Nutrition and Fertilizer Science

福建早稻测土配方施肥指标体系研究

李 娟[1], 章明清[1*], 孔庆波[1], 姚宝全[2], 颜明娟[1], 林 琼[1]
(1 福建省农业科学院土壤肥料研究所,福州 350013;
2 福建省农田建设土壤肥料技术推广总站,福州 350003)

摘要:根据近年来完成的135个氮、磷、钾肥效试验结果,建立福建早稻测土配方施肥指标体系。结果表明,土壤对稻谷的平均贡献率为73.5%,施用氮、磷、钾平均增产18.1%、5.4%和8.6%,土壤贡献率和氮、磷、钾增产效果与肥力等级成正比。山区早稻高产临界指标分别为碱解氮212 mg/kg、Olsen-P 26 mg/kg和速效钾116 mg/ kg,沿海早稻则分别为碱解氮203 mg/kg、Olsen-P 22 mg/kg和速效钾104 mg/kg,明显低于山区稻田。早稻最高施肥量平均为N 166 kg/hm^2、P_2O_5 69 kg/hm^{2}和K_2O 113 kg/hm^2,经济施肥量平均为N 134 kg/hm^2、P_2O_5 35 kg/hm^{2}和K_2O 78 kg/hm^2,但不同生产区域和土壤肥力等级的氮、磷、钾推荐用量有一定差异。建立了土测值与氮、磷、钾推荐用量的回归方程式,从而达到因土施肥的目的。

关键词:早稻;氮、磷、钾;临界指标;推荐施肥
中图分类号:S147.21　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2010)04-0938-09

Soil testing and formula fertilization index for early rice in Fujian Province

LI Juan[1], ZHANG Ming-qing[1*], KONG Qing-bo[1], YAO Bao-quan[2], YAN Ming-juan[1], LIN Qiong[1]
(*1 Soil and Fertilizer Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China;*
2 Fujian Cropland Construction and Soil and Fertilizer Station, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Based on the results of 135 field experiments of early rice response to N, P and K fertilization in recent years, soil testing and formula fertilization indices for early rice in Fujian Province were developed. The results show that the average contribution rate of soil nutrients to rice is 73.5%, the average increased yield of N, P and K applications are 18.1%, 5.4% and 8.6% respectively, and the soil contribution rate and the increased efficiencies of N, P and K applications are closely related to soil fertility levels. The critical indices of alkali-hydrolyzable nitrogen, Olsen-P and available K for high yield of early rice in mountainous areas are 212 mg/kg, 26 mg/kg and 116 mg/kg respectively, and the indices in coastal areas are 203 mg/kg, 22 mg/kg and 104 mg/kg respectively, which indicate that the indices in coastal areas are obviously lower than those in mountainous areas. In general, the maximum application rates to early rice are N 166 kg/ha, P_2O_5 69 kg/ha and K_2O 113 kg/ha, and the economic application rates are N 134 kg/ha, P_2O_5 35 kg/ha and K_2O 78 kg/ha. However, the fertilization recommendations are dependent on production areas and soil fertility levels. The regression equations established between soil testing values and fertilization recommendations of N, P and K are satisfied with the purpose of soil testing and fertilization.
Key words: early rice; N, P and K; critical indicator; fertilization recommendation

测土配方施肥是实现农业增产和农民增收的重要技术措施,自20世纪80年代以来,我国开展了大规模的配方施肥技术研究,建立了肥料效应函数法、测土施肥法和植物营养诊断法的3大技术体系[1]。通过各种方法的交叉融合和取长补短,先后创造性地提出了多种配方施肥技术[2-5]。当时的研究表

收稿日期:2009-12-08　　**接受日期**:2010-02-21
基金项目:国际植物营养研究所(IPNI)合作项目(Fujian-13);国家测土配方施肥补贴项目(2005-2008)资助。
作者简介:李娟(1977—),女,福建建阳市,助理研究员,主要从事平衡施肥研究。E-mail:lj-95@163.com
* 通讯作者 E-mail:zhangmq2001@163.com

明,就定量水平而言,建立在肥料效应函数—养分丰缺指标法基础上的配方施肥技术,因其具有科学性和严密性使推荐施肥量和配方达到优化水平[6]。

施肥指标体系是测土配方施肥的核心技术,关系到该项技术的科学性和应用成效。福建在 20 世纪 80 年代和 90 年代初,曾进行了较大规模的水稻氮、磷、钾肥效试验,提出了稻田速效氮、磷、钾丰缺指标[7],最佳用量和比例[8],为当时配方施肥技术推广应用提供了科学依据。然而,当前福建早稻品种特性、产量水平和栽培方式等已发生了很大变化,施肥目标也已从过去的单一追求高产向高产、优质、高效和环保等多目标过渡。因此,合理施肥如何在现有基础上进一步完善和发展,使宏观控制与微观指导更好地结合,进一步提高施肥参数的科学性和针对性,制定和完善当前作物测土配方施肥指标是重要的研究课题。截止 2008 年底,福建在早稻上完成了 135 个氮、磷、钾肥效田间试验。本文汇总这些多年多点田间肥料试验结果,建立以肥料效应函数—养分丰缺指标法为主体的早稻施肥指标体系,以期为福建早稻测土配方施肥技术提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验采用“3414”设计方案[9],氮、磷、钾各 4 个水平,14 个处理,即: (1) $N_0P_0K_0$; (2) $N_0P_2K_2$; (3) $N_1P_2K_2$; (4) $N_2P_0K_2$; (5) $N_2P_1K_2$; (6) $N_2P_2K_2$; (7) $N_2P_3K_2$; (8) $N_2P_2K_0$; (9) $N_2P_2K_1$; (10) $N_2P_2K_3$; (11) $N_3P_2K_2$; (12) $N_1P_1K_2$; (13) $N_1P_2K_1$; (14) $N_2P_1K_1$。其中,“2”水平表示 N、P_2O_5、K_2O 的当地推荐施肥量,“0”水平表示不施肥,“1”水平的用量为“2”水平的 50%,“3”水平的用量为“2”水平的 150%。“2”水平的推荐施肥量分别是 N 150 kg/hm^2、P_2O_5 60 kg/hm^2 和 K_2O 105 kg/hm^2,各试验点根据产量和肥力水平可进行适当调整,其它处理施肥量按相应比例折算。试验地分散在全省各地的主要水稻产区,选择当地具有代表性的土壤类型和肥力水平的地块作为试验田。

1.2　试验方法

试验采用多点分散不设重复和区组排列的试验方法,小区面积 13～20m^2,同一个试验的小区面积相同。供试品种选用当地大面积种植的良种,试验时间都在当地正常早稻生产季节内进行。氮肥用尿素(含 N 46%),磷肥用过磷酸钙(含 $P_2O_5$12%),钾肥则用氯化钾(含 K_2O 60%)。基肥中的氮钾肥占总用量的 50%,磷肥做基肥,余下的氮钾肥做分蘖肥施用。试验区周围设 1 m 宽以上的保护行,其它的栽培管理措施与大田生产一致。试验田作物收获时各小区单收单称,分别记录产量鲜重和晒干重。

1.3　土样采集和测定

每个田间试验实施前,按规范取一个混合基础土样。采用常规方法[10]测定土壤主要理化性状,其中,pH 为电位法; 有机质为重铬酸钾容量法; 碱解氮为碱解扩散法; Olsen-P 为 0.5 mol/L 碳酸氢钠提取—钼锑抗比色; 速效钾为 1 mol/L 乙酸铵提取—火焰光度计测定。各供试土壤基本性状见表 1。

表 1　供试土壤主要理化性状

Table 1　Main physical and chemical properties of the selected soils

区域 Area	试验点数(n) Number of trials	肥力水平 Soil fertility	pH	有机质 OM (g/kg)	碱解氮 Alkali-hydr. N (mg/kg)	Olsen-P (mg/kg)	速效钾 Avail. K (mg/kg)
山区	8	高 High	5.0 ±0.7	34.6 ±7.5	198.9 ±24.2	47.9 ±23.4	123.7 ±16.4
Mountain area	23	中 Medium	5.2 ±0.4	29.7 ±7.7	132.6 ±35.1	42.5 ±21.0	86.8 ±42.0
	23	低 Low	5.0 ±0.3	32.8 ±5.3	147.3 ±32.4	25.7 ±22.0	86.9 ±46.9
沿海平原	25	高 High	5.6 ±0.6	24.8 ±7.3	135.6 ±37.9	46.0 ±27.6	95.1 ±47.9
Coastal plain	40	中 Medium	5.7 ±0.9	24.5 ±0.7	124.9 ±32.0	41.7 ±34.2	69.8 ±41.8
	16	低 Low	5.4 ±0.8	29.7 ±6.9	122.6 ±31.4	20.2 ±9.6	51.4 ±30.0

1.4　数据整理与计算

氮、磷、钾化肥的增产效果 = (平衡施肥区产量 - 缺素区产量)/平衡施肥区产量 ×100; 相对产量 = 缺素区产量/平衡施肥区产量。用 MATLAB 软件的统计工具箱对试验结果进行统计分析,肥效模型采用二次多项式,参数估计方法采用最小二乘法或

Monte Carlo 法[11]，绘图则用 MATLAB 语言编程完成。

2 结果与分析

2.1 不同土壤肥力水平对早稻产量的影响

2.1.1 空白区产量对氮、磷、钾平衡施肥区产量的影响 在测土配方施肥中，目标产量是关键参数之一。如何根据试验所得的空白区产量转化为目标产量，是测土配方施肥工作中需要解决的一个实际应用问题。20 世纪 80 年代国内配方施肥研究提出“以地定产式”[12]，用于根据土壤肥力水平确定目标产量。根据 135 个早稻试验结果，空白区产量与氮、磷、钾平衡施肥区产量之间存在显著的线性关系，山区稻田为 $Y=4059+0.5646X(n=54, F=24.2^{**})$，沿海稻田为 $Y=4473+0.4945X(n=81, F=8.3^{**})$，其中，$X$ 和 Y 分别为空白区产量和平衡施肥区产量（kg/hm^2）。

回归关系式的建立，为福建早稻测土配方施肥确定目标产量提供了一个较为精确的计算式，从而把经验性估产提高到计量水平。有了该回归关系式，不仅可以通过空白区产量推算目标产量，还可根据农户施肥产量反向估算空白区产量，从而给实际应用带来了方便。

2.1.2 不同肥力等级的土壤对产量的贡献率 作物施肥效应与土壤肥力水平密切相关。研究表明，以空白区产量水平划分土壤肥力等级是较可靠的方法[13]。金耀青等人[6]认为，由于作物生长受诸多因素的影响从而产生的年度间产量变化幅度，足以掩盖被划分得过细的肥力级差，肥力等级划分为 3 级或 4 级就已足够。因此，将福建稻田土壤肥力划分为“高”、“中”、“低”三个等级。在 135 个试验中，无肥区产量水平变化幅度在 2592 kg/hm^2～7470 kg/hm^2。因而，将无肥区产量高于 6000 kg/hm^2 的土壤肥力水平定为“高”，无肥区产量在 6000kg/hm^2 至 4500 kg/hm^2 的土壤肥力水平定为“中”，无肥区产量小于 4500 kg/hm^2 则定为“低”。

表 2 中的山区包括龙岩市、三明市、南平市和宁德市等闽西北地区和闽东地区，地处中亚热带；沿海则包括福州市、莆田市、泉州市和漳州市等闽东南地区，地处南亚热带。根据无肥区和氮、磷、钾平衡施肥区的试验产量，计算土壤对早稻的贡献率。表 2 结果表明，无肥区平均产量为 5193 ± 1099 kg/hm^2，氮、磷、钾平衡施肥区平均产量为 7068 ± 1090 kg/hm^2，土壤对稻谷的贡献率平均为 73.5%。其中，山区的 54 个试验中，土壤对稻谷产量的平均贡献率是 71.4%，沿海的 81 个试验平均则为 74.3%，说明沿海地区土壤对水稻产量的贡献率高于山区。高肥力等级的土壤对水稻产量的贡献率较高，并与土壤肥力水平成正比。

表 2 基础土壤肥力对早稻产量的贡献率

Table 2 Contribution rate of basal soil to early rice yield

区域 Area	肥力水平 Soil fertility	试验点数(n) Number of trials	产量 Yield(kg/hm^2) CK	产量 Yield(kg/hm^2) NPK	贡献率(%) Contribution rate
山区 Mountain area	高 High	8	6823 ± 665	7957 ± 473	85.8
	中 Medium	23	5173 ± 378	6967 ± 1029	74.3
	低 Low	23	3859 ± 399	6235 ± 1011	61.9
沿海平原 Coastal plain	高 High	25	6608 ± 465	7806 ± 1080	84.7
	中 Medium	40	5224 ± 456	7286 ± 786	71.7
	低 Low	16	4032 ± 567	6267 ± 876	64.3

2.2 氮、磷、钾肥对早稻产量的影响

135 个试验结果（表 3）表明，早稻氮、磷、钾肥的平均增产率分别为 18.1%、5.4% 和 8.6%。用配对法进行 t 测验，表明增产效果均达到极显著水平，且增产效果是氮 > 钾 > 磷。平均每公斤氮、磷、钾的增产稻谷量分别为 8.2kg、6.2kg 和 5.7kg，与 80 年代的结果[8]相比，氮、钾有所下降，而磷则上升，主要是由于磷肥用量下降导致增谷量提高。山区氮、磷、钾平均增产效果高于沿海，说明氮、磷、钾对水稻的增产效果有明显的地域差异。

对不同土壤肥力等级的氮、磷、钾肥效试验结果进行统计分析，表 4 结果表明，高、中、低土壤肥力等

级的氮、磷、钾肥效有明显的差异。土壤肥力水平越低,氮、磷、钾化肥的增产率越高,表明化肥优先用于中低产田可发挥最大的增产效果。

表 3　氮、磷、钾化肥对早稻产量的影响

Table 3　Early rice yield response to N, P and K fertilization

区域 Area	试验点数(n) No. of trial	$N-P_2O_5-K_2O$ (kg/hm^2)	产量 Yield(kg/hm^2)				增产 Increased yield(%)		
			NPK	-N	-P	-K	N	P	K
山区 Mountain area	54	154-64-105	6802±1116	5513±1174	6416±1310	6115±1218	19.0	5.7	10.1
沿海平原 Coastal plain	81	157-61-107	7245±1042	5974±1038	6863±1036	6697±1092	17.5	5.3	7.6
合计 Total	135	156-62-106	7068±1090	5789±1113	6685±1170	6464±1175	18.1	5.4	8.6

表 4　不同土壤肥力水平的氮、磷、钾化肥对早稻产量的影响

Table 4　Early rice yield response to N, P and K fertilization in different soil fertility levels

区域 Area	肥力水平 Soil fertility	试验点数(n) No. of trial	平均产量 Average yield (kg/hm^2)				平均增产(%) Average increased yield		
			$N_2P_2K_2$	$N_0P_2K_2$	$N_2P_0K_2$	$N_2P_2K_0$	N	P	K
山区	高 High	8	7957	7109	7805	7731	10.7	1.9	2.8
Mountain	中 Medium	23	6967	5572	6561	6258	20.0	5.8	10.2
area	低 Low	23	6235	4899	5789	5409	21.4	7.2	13.3
沿海平原	高 High	25	7806	6918	7535	7471	11.4	3.5	4.2
Coastal	中 Medium	40	7286	5893	6906	6642	19.1	5.2	8.8
plain	低 Low	16	6267	4699	5706	5627	25.0	9.0	10.2

2.3　土壤速效氮、磷、钾丰缺指标

2.3.1 土壤速效氮、磷、钾校验曲线模型　土壤速效氮、磷、钾丰缺指标法是测土配方施肥的经典方法[14],通常采用校验曲线模型来确定丰缺指标值。根据同时具有试验产量结果和基础土样测定结果的试验点,分别计算氮、磷、钾缺素区和氮、磷、钾平衡施肥区的相对产量,与相应的基础土壤碱解氮、Olsen-P、速效钾含量测定值,在座标图上绘制散点图,其中,沿海早稻土壤速效氮、磷、钾含量与稻谷相对产量的关系如图 1 所示。根据碱解氮、Olsen-P 和速效钾校验曲线散点图的总体变化趋势,碱解氮校验模型选用对数模型,Olsen-P 选用指数模型,速效钾则选用幂函数模型,分别建立校验曲线模型(表 5),并根据中亚热带和南亚热带的界线将福建划分为山区和沿海 2 个区域。结果表明,6 个回归方程的F 值均达到极显著水平。

需要指出的是,由于碱解氮指标本身存在的问题,从国内已总结的大量试验数据和本文的试验结果看,土壤碱解氮与作物相对产量基本无法建立数学关系。但在座标图上可发现,只要剔除 10% 左右的试验点,碱解氮各点分布的整体即可满足对数模型所描述的动态特征。考虑到当前测土配方施肥工作的需要,本文依此办法建立了土壤碱解氮丰缺指标。

2.3.2 土壤速效氮、磷、钾的丰缺指标　根据 20 世纪 80 年代配方施肥的研究结果[4-5],同时考虑到作物产量年度间的变化和应用上的方便,将土壤养分丰缺指标划分 3 级,即相对产量大于 95% 的相应速效养分含量定为“高”,相对产量在 95%~75% 时的相应速效养分含量定为“中”,相对产量小于 75% 的相应速效养分含量定为“低”。由此得到福建早稻土壤碱解氮、Olsen-P 和速效钾的丰缺指标如表 5。结果表明,在山区的土壤碱解氮、Olsen-P 和速效钾的高产临界指标都高于沿海地区的临界指标。这是由于闽西北和闽东地处中亚热带地区,常年温度较地处南亚热带的沿海地区低,土壤供应养分的能力较弱,因而要求有较高的土壤速效养分临界指标。

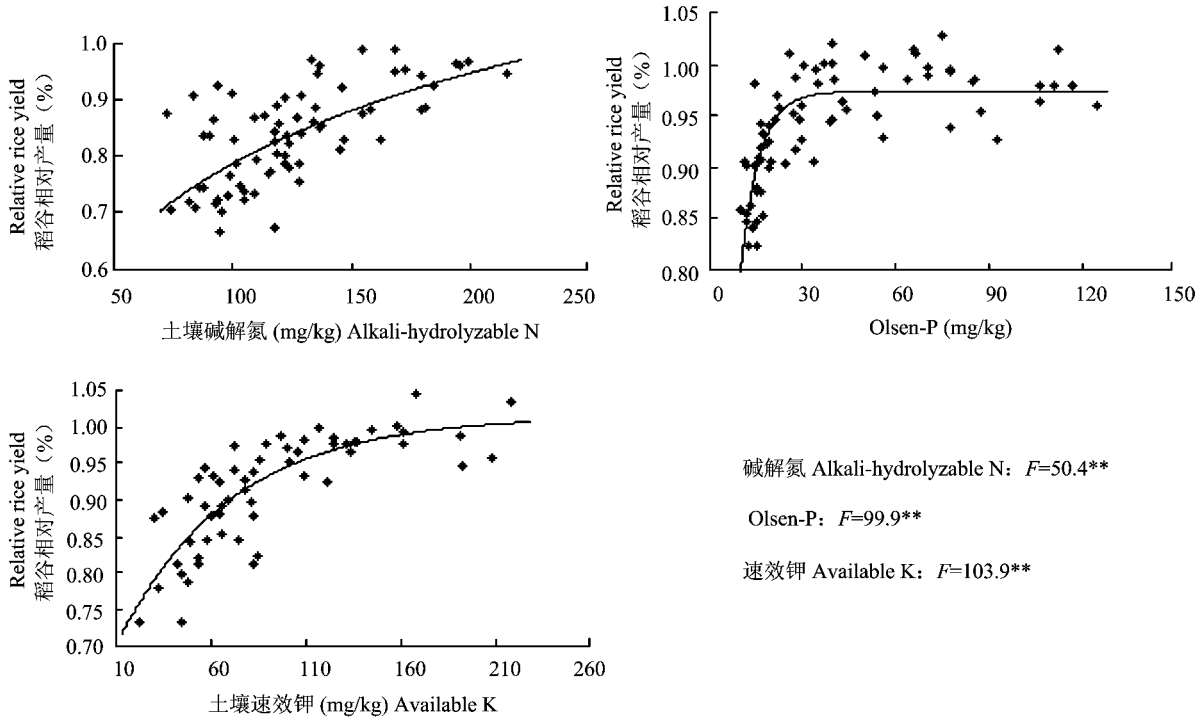

图1 沿海早稻土壤速效氮、磷、钾与稻谷相对产量之间的校验曲线

Fig. 1 Calibration curves between soil available N, P and K and relative rice yield in coastal areas

[注(Note)："✦"为实测值 Means experimental value.]

表5 土壤碱解氮、Olsen-P和速效钾的校验曲线模型及其养分丰缺指标

Table 5 Calibration curves of soil alkali-hydrolyzable, Olsen-P and available K and their plentiful and lack indices

区域 Area	土壤养分 Soil nutrient	校验曲线回归模型 Calibration curves regression model	养分丰缺指标 Abundance and deficiency index		
			高 High	中 Medium	低 Low
山区	碱解氮 Alkali-hydr. N	$Y=-0.5060+0.2708\ln X, F=67.6^{**}, n=45$	217	217～103	103
Mountain	有效磷 Olsen-P	$Y=0.9586[1-\exp(-0.1842X)], F=25.3^{**}, n=47$	26	26～8	8
area	速效钾 Avail. K	$Y=1.0103-0.4634\times0.9826^{X}, F=114.0^{**}, n=49$	116	116～33	33
沿海平原	碱解氮 Alkali-hydr. N	$Y=-0.2871+0.2328\ln X, F=50.4^{**}, n=74$	203	203～86	86
Coastal	有效磷 Olsen-P	$Y=0.9744[1-\exp(-0.1671X)], F=99.9^{**}, n=79$	22	22～9	9
plain	速效钾 Avail. K	$Y=1.0155-0.3759\times0.9834^{X}, F=103.9^{**}, n=80$	104	104～21	21

注(Note)："**"表示 $p=0.01$ 的显著水平 Means significance level of $p=0.01$.

2.4 不同土壤肥力等级的区域施肥模型及其推荐施肥

2.4.1 不同土壤肥力等级的区域施肥模型 肥料效应函数是确定最佳施肥量的主要方法[2,15-17]，二次多项式能较好地反映施肥量与产量的抛物线型关系及养分间的交互作用，而且易于统计分析和计算最佳施肥量。因此，首先将各点试验结果按二次多项式模型进行回归分析，剔除统计不显著的试验点。结果表明，山区和沿海分别有42个和51个试验点的资料是可用的。然后，在相同肥力等级内，对不同试验点的各处理施肥量和产量用最小二乘法或Monte Carlo法[11]建立相应等级的早稻区域施肥模型(表6)。结果表明，采用上述建模方法，所建立的区域施肥模型的 R^2 均达到统计显著水平。

对通过统计显著性检验的三元肥效模型，进一步进行模型典型性判别[18]。表6的结果表明，在6个三元肥效模型中，有4个模型为典型式，说明采用上述建模方法可有效提高典型肥效模型的出现机率。

表 6　早稻区域施肥模型及其模型典型性

Table 6　Regional fertilization models of early rice and their typical models

区域 Area	肥力水平 (试验点数,n) Soil fertility (No. of trials, n)	区域施肥模型 Regional fertilization model	R^2	模型典型性 Typical character of the model
山区 Mountain area	高 High ($n=1$)	$Y=7119+0.1694N+1.9621P+17.561K-0.0201N^2-0.0547P^2-0.1438K^2+0.0518NP+0.0096NK+0.0505PK$	0.9116*	非典型式 Non-typical
	中 Medium ($n=19$)	$Y=5120+14.447N+0.9740P+7.1084K-0.0599N^2-0.0495P^2-0.0391K^2+0.0366NP+0.0176NK+0.0134PK$	0.9528**	典型式 Typical
	低 Low ($n=22$)	$Y=3927+21.383N+4.1662P+3.1139K-0.0752N^2-0.0870P^2-0.0164K^2+0.0060NP+0.0206NK+0.0206PK$	0.9605**	非典型式 Non-typical
沿海平原 Coastal plain	高 High ($n=16$)	$Y=6684+10.248N+0.9102P+5.1816K-0.0349N^2-0.0283P^2-0.0454K^2+0.0049NP+0.0060NK+0.0190PK$	0.9495**	典型式 Typical
	中 Medium ($n=23$)	$Y=5071+12.406N+11.645P+9.7617K-0.0457N^2-0.0675P^2-0.0236K^2+0.0126NP+0.0073NK-0.0485PK$	0.9659**	典型式 Typical
	低 Low ($n=12$)	$Y=4086+13.545N+10.851P+12.012K-0.0525N^2-0.1040P^2-0.0535K^2+0.0503NP+0.0128NK-0.0532PK$	0.9541**	典型式 Typical

注(Note): "n"表示试验点数 Means experimental number; "*"表示 $p=0.05$ 的显著水平 Means significance level of $p=0.05$; "**"表示 $p=0.01$ 的显著水平 Means significance level of $p=0.01$.

2.4.2 不同土壤肥力等级的氮、磷、钾推荐用量和比例　对典型肥效模型,用边际产量导数法求最高产量施肥量,以每公斤 N 4.3 元、P_2O_5 5 元、K_2O 4 元和稻谷 2.0 元的平均市场价计算经济施肥量;对非典型肥效模型则以试验所得最高产量为目标产量,采用 Monte Carlo 法[11]在试验施肥量范围内,寻找产量大于目标产量的各个氮、磷、钾组合,然后计算这些组合的平均氮、磷、钾用量,作为适宜推荐用量。表 7 是区域施肥最佳用量和产量预报结果。

结果表明,早稻平均最高施肥量为 N 166 kg/hm^2、P_2O_5 69 kg/hm^2 和 K_2O 113 kg/hm^2,氮、磷、钾比例为 1:0.42:0.68。由于最高产量施肥量排除了肥料和农产品价格因素的干扰,真实反映了施肥量与产量的响应关系。20 世纪 90 年代初的 51 个试验结果[19],表明早稻氮、磷、钾最高产量施肥量为 N 162 kg/hm^2、P_2O_5 70 kg/hm^2、K_2O 98 kg/hm^2,氮、磷、钾比例为 1:0.43:0.60。表明近 15 年来,氮、磷平均推荐用量和比例没有明显的变化,但钾肥平均推荐用量则提高了 15.3%,比例也从 0.60 增加到 0.68。

早稻平均经济产量施肥量为 N 134 kg/hm^2、P_2O_5 35 kg/hm^2 和 K_2O 78 kg/hm^2,氮、磷、钾比例为 1:0.26:0.58。20 世纪 90 年代初的 51 个试验结果[19]表明,早稻推荐施肥量为 N 137 kg/hm^2、P_2O_5 51 kg/hm^2、K_2O 81 kg/hm^2,氮、磷、钾比例为1:0.37:0.59。经济施肥量由于受到近年来肥料价格猛涨以及肥效模型斜率等因素的影响,氮、磷、钾推荐用量都降低了。结果还表明,我省早稻不同生产区域,由于光温等自然条件和产量水平的差异,不同肥力等级的稻田氮、磷、钾推荐施肥量有明显差异。

2.5　土壤速效氮、磷、钾测定值与最佳施肥量的关系

对能通过统计显著性检验的山区 42 个试验点和沿海 51 个试验点的试验资料,逐个建立三元肥效模型(表 2),对典型肥效模型和非典型肥效模型分别采用边际产量导数法和 Monte Carlo 法[11]求推荐施肥量。以基础土样碱解氮或 Olsen-P 或速效钾的测定结果为 X 轴,以相应试验点的推荐施肥量为 Y 轴,得到土测值与推荐施肥量的关系图。

表 8 的回归分析表明,这种关系满足指数回归方程,即 $Y=ae^{bx}$,氮、磷、钾的回归方程均达到显著水平。回归关系式的建立,使得本来只有相对意义的土壤速效养分测定值转变为直接用于确定施肥量

表7 不同土壤肥力等级早稻推荐施肥量

Table 7 Fertilization recommendations for early rice with different soil fertility levels

区域 Area	肥力水平 Soil fertility	试验点数 No. of trials (n)	最高产量施肥量(kg/hm^2) Application rate of the maximum yield				经济产量施肥量(kg/hm^2) Application rate of economic yield			
			N	P_2O_5	K_2O	产量 Yield	N	P_2O_5	K_2O	产量 Yield
山区	高 High	1	114	72	77	7942				
Mountain	中 Medium	19	170	92	145	6908	132	47	103	6769
area	低 Low	22	163	46	136	6111				
沿海平原	高 High	16	158	56	79	7723	119	0	42	7570
Coastal	中 Medium	23	170	81	97	7075	140	64	78	7002
plain	低 Low	12	174	69	99	6234	144	54	84	6168

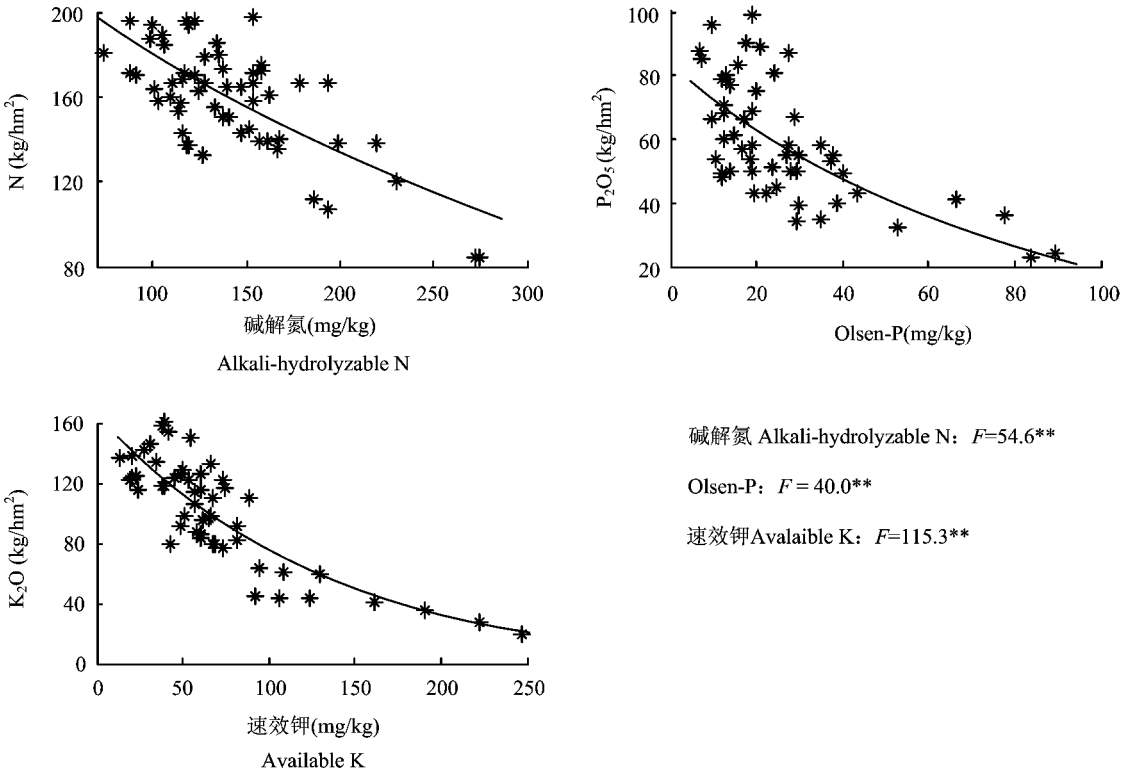

图2 早稻土壤碱解氮、Olsen-P和速效钾含量测定值与推荐施肥量的关系

Fig. 2 Relations between soil testing values of alkali-hydrolyzable nitrogen, Olsen-P and available K and fertilization recommendations of early rice

[注(Note): "*"为实测值 Means experimental value.]

表8 土测值(X,mg/kg)对推荐施肥量(Y,kg/hm^2)的影响

Table 8 Effects of soil testing values(X, mg/kg) on fertilization recommendations(Y, kg/hm^2)

养分 Nutrient	试验点数 Number of trials(n)	回归方程 Regression equation	F 值 F value	标准差 SE
N	93	$Y=244.12\exp(-0.002999X)$	54.6**	19.7
P_2O_5	93	$Y=84.360\exp(-0.01350X)$	40.0**	14.2
K_2O	93	$Y=168.95\exp(-0.008103X)$	115.3**	19.9

注(Note): "**"表示 $p=0.01$ 的显著水平 Means significance level of $p=0.01$.

的参数。因此,可以利用这种关系式,根据土测值预测推荐施肥量。标准误(Se)分布在 14.2～19.9 kg/hm^{2}之间,平均为 17.9 kg/hm^2,表明每公顷氮、磷、钾推荐施肥量平均误差在±18 kg。

3 讨论

3.1 土壤速效养分肥力分级

土壤肥力分级主要是根据生产实践对精度的需要,以及校验曲线的高度和斜率特征等因素而确定。从测土配方施肥的角度看,似乎级数越多施肥就越精确。周鸣铮[5]和陆允甫等人[4]建议将土壤肥力等级划分为 5 级,即"极低"、"低"、"中"、"高"和"极高",但黄德明[20]和金耀青等人[6]认为,由于作物生长受众多因素的影响从而产生的年度间产量变化幅度,足以掩盖被划分得过细的肥力级差,肥力指标划分为 3 级或 4 级就已足够。因而,本文根据早稻上完成的氮、磷、钾肥效田间试验结果以及考虑到基层应用上的方便,将水稻土速效氮、磷、钾养分肥力划分为"高"、"中"、"低"3 个等级。

3.2 校验曲线模型

土壤速效养分丰缺指标是测土配方施肥的关键参数之一,校验曲线模型是制定养分丰缺指标的主要方法。众多研究表明,校验曲线虽然同属于指数模型或对数模型[6],但研究发现,在相同测定方法和作物下,不同区域确定的养分临界指标竟有两倍之差[6],给推荐施肥造成困惑。应用图 1 相同的试验资料,分别采用对数模型、指数模型和幂函数模型拟合试验结果,回归方程均能达到统计显著水平,但对数模型确定的高产临界指标分别为碱解氮 203 mg/kg、Olsen-P 37 mg/kg 和速效钾 118 mg/kg,指数模型确定的高产临界指标分别为碱解氮 248 mg/kg、Olsen-P 22 mg/kg 和速效钾 98 mg/kg,幂函数模型确定的高产临界指标则分别为碱解氮 194 mg/kg、Olsen-P 26 mg/kg 和速效钾 104 mg/kg。结果表明,不同校验模型确定的丰缺指标有很大差异。因而,如何选择最佳校验模型是个重要问题。

图 1 的结果表明,多数情况下早稻产量对氮素营养最为敏感,过多或过少的氮素供应将导致明显的减产,各点分布特征满足对数模型。而磷素则不同,过多的磷素在多数情况下对产量表现出既不增产也不减产的趋势,而出现一个平台的现象,各点分布特征满足指数模型。钾素存在奢侈吸收现象,较高钾素供应在产量上也不会出现明显减产现象,各点分布特征介于氮、磷之间,而满足幂函数模型。因此,综合考虑土壤养分状况、作物的氮、磷、钾营养特点、不同校验曲线模型的高度和斜率特征、对试验数据分布特征的要求以及农业环保需求等因素,本文提出碱解氮校验曲线选用对数模型,Olsen-P 选用指数模型,速效钾则选用幂函数模型。

3.3 土壤速效养分丰缺指标

在 20 世纪 80～90 年代,国内众多学者对水稻、小麦和玉米等粮食作物种植地土壤速效氮、磷、钾丰缺指标进行了许多研究和总结[4-5,20],但养分指标具有时效性[21]。由于高产品种推广应用和栽培水平提高等因素,适宜的养分临界指标产生明显的变化,例如,福建稻田当时确定的 Olsen-P 高产临界指标[7]是 7 mg/kg,而当前山区稻田 Olsen-P 高产临界指标应为 26 mg/kg,沿海地区则为 22 mg/kg。因此,研究和制定满足当前农业生产需求的养分临界指标,是测土配方施肥技术的重要课题。

研究表明,无论是 20 世纪 80～90 年代还是本文的丰缺指标研究结果,"低"肥力等级的碱解氮和速效钾的指标值都偏低,主要是由于在"低"肥力部分的校验曲线的斜率过大造成的,如何在校验研究中克服这一缺陷,有待今后进一步探讨。

参 考 文 献:

[1] 金耀青. 配方施肥的方法及其功能—对我国配方施肥工作的述评[J]. 土壤通报,1989,20(1): 46-48.
Jin Y Q. Soil testing and formula fertilization methods and its function-Review the work of soil testing and formula fertilization in China[J]. Chin. J. Soil Sci. ,1989,20(1): 46-48.

[2] 侯彦林,陈守伦. 施肥模型研究综述[J]. 土壤通报,2004,35(4): 493-501.
Hou Y L, Chen S L. Summarization of fertilization model research [J]. Chin. J. Soil Sci. ,2004,35(4): 493-501.

[3] 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 decades[J]. Plant Nutr. Fert. Sci. ,2003,9(4): 495-499.

[4] 陆允甫,吕晓男. 中国测土施肥工作的进展和展望[J]. 土壤学报,1995,32(3): 241-251.
Lu Y P, Lu X N. Progrss and prospect in fertilizer recommendation based on soil testing in China[J]. ACTA Pedol. Sin. ,1995,32(3): 241-251.

[5] 周鸣铮. 中国的测土施肥[J]. 土壤通报,1987,18(1): 7-13.
Zhou M Z. Soil testing and fertilizer recommendations in China [J]. Chin. J. Soil Sci. ,1987,18(1): 7-13.

[6] 金耀青,张中原. 配方施肥方法及其应用[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社,1993. 1-60.
Jin Y Q, Zhang Z Y. The method of formula fertilization and its ap-

plication[M]. Shengyang: Liaoning Science and Technology Press, 1993. 1-60.

[7] 陈秋舲,王新,王文美,等.水稻土养分丰缺指标配方施肥研究[J].福建农业科技,1987,3: 2-4.
Chen Q L, Wang X, Wan W M *et al*. Plentiful and lack index of nutrients in formula fertilization[J]. Fujian Agric. Sci. Techn., 1987,3: 2-4.

[8] 林辉,陈祖仁,唐福钦,等.福建省稻田化肥的适宜用量和配比的研究[J].福建农业学报,1989,4(1): 23-32.
Lin Hui, Chen Z R, Tang F Q *et al*. Studies on adequate fertilization and formula of fertilizer in paddy soil in Fujian Province[J]. Fujian J. Agric. Sci.,1989,4(1): 23-32.

[9] 王圣瑞,陈新平,高祥照,等."3414"肥料试验模型拟合的探讨[J].植物营养与肥料学报,2002,8(4): 409-413.
Wang S L, Chen X P, Gao X Z *et al*. Study on simulation of "3414" fertilizer experiments[J]. Plant Nutr. Fert. Sci.,2002,8(4): 409-413.

[10] 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. 146-196.
Lu R K. Methods of soil agricultural chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Scientech Press,2000. 146-196.

[11] 章明清,徐志平,姚宝全,等. Monte Carlo 法在多元肥效模型参数估计和推荐施肥中的应用[J].植物营养与肥料学报,2009,15(2): 366-373.
Zhang M Q, Xu Z P, Yao B Q *et al*. Using Monte Carlo method for parameter estimation and fertilization recommendation of multivariate fertilizer response model[J]. Plant Nutr. Fert. Sci.,2009, 15(2): 366-373.

[12] 王竺美,周鸣铮.浙江省水稻土壤基本肥力与水稻最高可得产量之间的关系探讨(初报)[J].土壤学报,1982,19(3): 315-322.
Wang Z M, Zhou M Z. Discuss about the relation between basic fertility of rice soils and the maximum yield of rice in Zhejiang Province[J]. Acta Pedol. Sin.,1982,19(3): 315-322.

[13] 杨守春,陈伦寿.黄淮海平原主要作物优化施肥和土壤培肥技术[M].北京: 中国农业科技出版社,1991: 1-26.
Yang S C, Chen L S. Optimization fertilization of main crop and improvement of soil fertility in Huanghuaihai Plain[M]. Beijing: China Agricultural Scientech Press,1991. 1-26.

[14] Fagenia N K, Baligar V C. Response of common bean, upland rice, com, wheat and soybean to soil fertility of an oxisol[J]. Plant Nutr.,1997,20: 1279-1289.

[15] 王兴仁,陈新平,张福锁,等.施肥模型在我国推荐施肥中的应用[J].植物营养与肥料学报,1998,4(1): 67-74.
Wang X R, Chen X P, Zhang F S *et al*. Application of fertilization model for fertilizer recommendation in China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci.,1998,4(1): 67-74.

[16] Bangar A R. Fertilization of sorghum based on modified mitscherlich-bray equation under semi-arid tropics[J]. Indian Soc. Soil Sci.,1998,46(3): 383-391.

[17] Cerrato M E, Blackmer A M. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer[J]. Agron. J., 1990,82: 38-143.

[18] 章明清,林仁勋,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.
Zhang M Q, Lin R X, Lin D Y *et al*. Function of distinguish analysis on extreme value in recommendatory fertilization for three-fertilizer efficiency model[J]. Fujian J. Acad. Agric. Sci.,1995,10(2): 54-59.

[19] 章明清,林代炎,林仁埙.福建水稻区域施肥模型及其推荐施肥研究[J].福建省农科院学报,1996,12(1): 51-55.
Zhang M Q, Lin D Y, Lin R X. Studies on the regional fertilizer response model and fertilizer recommendation on rice in Fujianl[J]. Fujian J. Acad. Agric. Sci.,1996,12(1): 51-55.

[20] 黄德明.我国农田土壤养分肥力状况及丰缺指标[J].华北农学报,1988,3(2): 46-53.
Hunag M D. Farmland soil nutrients condition in China and plentiful and lack index[J]. Acta Agric. Bor-Sin.,1988,3(2): 46-53.

[21] Cox F, R. Range in soil phosphorus critical levels with time[J]. Soil Soc. Am. J., 1992,56(5): 1504-1509.