植物营养与肥料学报 2015,21(4):1056-1065 doi: 10.11674/zwyf.2015.0426
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

喀斯特地形区水稻测土配方施肥指标体系研究

赵 亮[1,2], 张贺翠[1], 廉小平[1], 陆广涛[2], 朱利泉[1*]
(1 西南大学农学与生物科技学院,重庆 400715;
2 广西壮族自治区德保县土肥工作站,广西百色 533700)

摘要:【目的】建立喀斯特地形区的水稻土壤养分丰缺指标,根据其制定水稻施肥指标体系并对其效用性进行验证,以期根据喀斯特地形区土壤的矿质养分含量进行合理配肥,达到合理施肥、节约资源、保护环境、增收增效的目的。**【方法】**利用丰缺指标法,对广西喀斯特地形区 44 个水稻"3414"试验的数据进行整理并统计分析,最后以相对产量 65%、71%、77%、83% 和 90%,将本地区土壤中的全氮、速效钾划分为 6 个等级,有效磷划分为 5 个等级,并利用三元二次方程、一元二次方程、线性加平台数学模型对每个试验点进行最佳施肥量的模拟,利用对数模型在 44 个试验点的土壤全氮、速效钾、有效磷和与其相对应的水稻最佳氮肥、钾肥、磷肥施用量之间建立土壤矿质元素与水稻最佳施肥量之间的回归方程。然后基于此方程对 10 个水稻田间验证试验区以最佳施肥量进行施肥,对试验中水稻苗期的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、CAT 酶活性、SOD 酶活性、POD 酶活性进行测量,最后对水稻的株高、公顷有效穗数、每穗粒数、每穗实粒数、结实率、千粒重、水稻产量等农艺性状进行考种,以验证测土配方施肥量的效用性。**【结果】**根据试验点土壤主要养分含量以及每个试验点的最佳施肥量建立测土配方施肥指标体系,其中六个等级的土壤全氮含量为 1.21～1.28、1.28～1.75、1.75～2.21、2.21～2.67, 2.67～3.22、>3.22 g/kg,对应的施肥量分别为 234～241、202～234、178～202、158～178、139～158、0～139 kg/hm^2;5 个等级的土壤有效磷含量为 3.5～5.50、5.50～11.7、11.7～17.85、17.85～25.00、>25.00 mg/kg,对应的磷肥施用量分别为 95～110、70～95、55～70、44～55、0～44 kg/hm^2;6 个等级的土壤速效钾含量为 6.99～19.50、19.50～37.10、37.10～54.60、54.60～72.10、72.10～92.50、>92.50 mg/kg,对应的钾肥施用量为 146～191、117～146、101～117、89～101、78～89、0～78 kg/hm^2。验证试验中测土配方施肥区水稻的产量、有效穗数、株高等农艺性状和多项生理指标都比不施肥区和传统施肥区有很大的提升,证明了该养分分级对应的推荐量的有效性。**【结论】**当前土壤养分呈现出多氮、多磷的特点,本次研究中建立的土壤养分丰缺指标修正并且细化了原有丰缺指标体系,验证试验和生化指标也说明,新建立的测土配方体系适合当前土壤养分状况,并可用于其他相似地形区的推荐施肥参考。

关键词: 土壤养分; 丰缺指标; 推荐施肥; 相对产量; "3414"试验
中图分类号: S511.062 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)04-1056-10

Research on optimum fertilizer application for lowland rice in karst area

ZHAO Liang[1,2], ZHANG He-cui[1], LIAN Xiao-ping[1], LU Guang-tao[2], ZHU Li-quan[1*]
(*1 College of Agronomy and Biology Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;*
2 Soil & Fertilizer Station of Debao, Baise, Guangxi 533700, China)

Abstract:【Objectives】Fertilization Indexes System was set up in Karst areas, the recommended rice fertilization system was then put forward and the reliability was verified, for the aim of high efficiency resources use and yield. 【Method】 Forty four sets of the "3414" field experiment results were counted in the karst area of Guangxi province in China. The relative yields of 65%, 71%, 77%, 83% and 90% were used to divide the soil mineral N and readily available K into 6 grades, available P into 5 grades. The optimum N, P and K fertilizer rates were

收稿日期: 2014-04-18 **接受日期:** 2014-05-30 **网络出版日期:** 2015-05-07
基金项目: 中央高校基本科研业务经费(XDJK2013D018,XDJK2013C121); 重庆市自然基金重点项目(cstc2012jjB80010); 重庆市基础与前沿研究计划(cstc2013jcyjA0198)资助。
作者简介: 赵亮(1984—),男,河北衡水人,硕士研究生,主要从事土地整理和植物营养生理生化研究。E-mail:shouwang_zhao@163.com
* 通信作者 E-mail:zhuliquan@swu.edu.cn

separately calculated using mathematics models of QEV_3, QEV_1 and LPP. Logarithmic models were used to simulate the correlation between the soil mineral nutrient contents and the optimum fertilizer rates. Ten fields were chosen for verification tests and laboratory analysis. The chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoid contents, the activity of CAT, POD and SOD were tested at seedling stage. The yield components of rice and yield were investigated finally. 【Result】The 6 grades of soil mineral N availability are 1.21–1.28, 1.28–1.75, 1.75–2.21, 2.21–2.67, 2.67–3.22 and >3.22 g/kg, the corresponding N fertilizer rates are set as: 234–241, 202–234, 178–202, 158–178, 139–158 and 0–139 kg/hm^2 respectively. The 5 grades of soil mineral P availability are 3.5–5.50, 5.50–11.70, 11.70–17.85, 17.85–25.00 and >25.00 mg/kg, the corresponding P_2O_5 fertilizer rates are 95–110, 70–95, 55–70, 44–55 and 0–44 kg/hm^2 respectively. The 6 grades of soil mineral K availability are 6.99–19.50, 19.50–37.10, 37.10–54.60, 54.60–72.10, 72.10–92.50, >92.50 mg/kg, and the corresponding K_2O fertilizer rates are 146–191, 117–146, 101–117, 89–101, 78–89 and 0–78 kg/hm^2 respectively. The plant height, grain number per panicle, filled grain number per panicle, POD and SOD activities showed significant differences among the different rates of N, P and K fertilizer input rates in the 10 field experiments, indicating the Fertilization Indexes System is applicable to fertilization recommendation. 【**Conclusions**】The Fertilization Indexes System could be helpful in the practical fertilization in farmland according to its soil mineral N, P and K levels. The method could be used for reference to build the similar fertilization system and the results also could be used in similar karst area to guide fertilization practice.

Key words: soil nutrient; nutrient deficiency index; relative yield; optimum fertilization; "3414" test

20 世纪就有很多国内外学者在耕地的土壤养分平衡、土壤肥力稳定等方面进行了很多试验。20 世纪 40 年代,国外学者认为农作物的养分吸收量或者作物产量与土壤中的有效矿物质的测试值之间有很好的关联,而且可以通过数学模型进行模拟[1]。国内外学者进行了大量的测土施肥配方的探索,提出了具有创造性意义的各种技术[2-9],并且利用"3414"试验构建了花生、油菜、小麦、水稻等不同作物在不同地区的施肥方法和施肥量体系[10-14]。广西壮族自治区在上世纪的 80 年代也在田间试验的基础上提出了稻田有效磷、速效钾丰缺指标,为当地配方施肥技术的推广及应用提供了科学依据[15]。但是过去 30 多年中,耕地的使用情况发生了巨大变化,当前迫切需要建立新的施肥体系。国家农业部 2005 年开始在广西开展实施"测土配方施肥"项目,旨在摸清本地耕地地力水平、土壤主要养分含量、主要养分的丰缺指标、建立测土配方施肥指标体系。广西自开展测土配方工作以来,到 2013 年止,积累了大量的"3414"试验样本,而由于广西壮族自治区内各个生态区域的自然地理条件差别较大,本研究选择典型喀斯特地貌类型的地区进行研究,拟建立广西喀斯特地形区水稻测土配方施肥指标体系,以指导喀斯特地貌类型地区的水稻合理施肥。

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

本试验数据来源于具有典型喀斯特地貌的德保县。由于喀斯特地貌的原因,德保县域内的耕地存在以下几个特征:1)山石所占国土面积份额大,可耕种土地有限。据 2011 年国土局数据显示,德保县域总国土面积达到 2559.32 hm^2,山地面积占 78.4%,农用耕地面积仅占国土面积的 7.4%。2)耕地的海拔有显著的差异,造成当地的立体化农业的现状。县域内从东南至西北的海拔逐步增高,最低海拔为 240 m,最高海拔为 1616 m,当地根据海拔差异来发展林业、特色水果、中草药、烟草等。3)当地成土母质复杂,土壤类型数目众多且相互交织分布。根据二次普查的数据显示,当地共有 7 个土类,20 个亚类,71 个土种。东凌乡、巴头乡主要分布有棕泥土、铁子土和碳酸盐渍水稻土,县域西北部的都安乡、敬德镇主要分布着由石灰岩和砂页岩发育而成的棕泥土、黄泥土、壤土田、棕泥田,县域中部的城关镇,主要分布着由石灰岩和第四纪红土发育而成的棕泥土、棕色石灰土、黄泥土和碳酸盐渍水稻土,县域东南部的龙光乡、燕垌乡主要分布着由砂页岩、洪积物发育而来的沙泥土、沙泥田、潮泥田等。4)

县域的土壤主要由砂页岩和石灰岩发育而来。石灰岩的成土速度缓慢,土壤呈碱性,耕层厚度薄,由于日益严重的掠夺式土地利用,造成水土流失问题非常严重,开始出现石漠化。

1.2 试验设计

研究地区中已经进行了44个水稻"3414"方案完全试验。"3414"试验即:3个因素、4个水平和14个处理。其中3个因素指的是氮素、磷素和钾素,4个水平指的是0水平(不施肥),1水平(当地习惯施肥的一半),2水平(当地习惯施肥),3水平(当地习惯施肥的1.5倍)。14个处理分别为:1)N_0P_0 K_0、2)$N_0P_2K_2$、3)$N_1P_2K_2$、4)N_2P_0 k_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)$N_2P_1K_1$。N、P_2O_5、K_2O的当地习惯施肥量分别是165、65、120 kg/hm^2。同一试验点的14个处理采用区组排列法[16],小区面积20 m^2。试验的肥料施用量及用法见表1。试验区周围设1 m宽以上的保护行,其他的栽培管理措施与大田生产一致。供试品种选用当地大面积种植的良种。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量。

表1 试验各处理氮、磷、钾肥施肥量及施肥方法(kg/20m^2)

Table 1 The N,P and K fertilizer rates and application methods in each treatment

处理 Treatment	N			P_2O_5			K_2O		
	总量 Total	基肥 Base	追肥 Side dress	总量 Total	基肥 Base	追肥 Side dress	总量 Total	基肥 Base	追肥 Side dress
N_0P_0 K_0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$N_0P_2K_2$	0	0	0	0.12	0.12	0	0.24	0.12	0.12
$N_1P_2K_2$	0.165	0.066	0.099	0.12	0.12	0	0.24	0.12	0.12
N_2P_0 k_2	0.33	0.132	0.198	0	0	0	0.24	0.12	0.12
$N_2P_1K_2$	0.33	0.132	0.198	0.06	0.06	0	0.24	0.12	0.12
$N_2P_2K_2$	0.33	0.132	0.198	0.12	0.12	0	0.24	0.12	0.12
$N_2P_3K_2$	0.33	0.132	0.198	0.18	0.18	0	0.24	0.12	0.12
$N_2P_2K_0$	0.33	0.132	0.198	0.12	0.12	0	0	0	0
$N_2P_2K_1$	0.33	0.132	0.198	0.12	0.12	0	0.12	0.06	0.06
$N_2P_2K_3$	0.33	0.132	0.198	0.12	0.12	0	0.36	0.18	0.18
$N_3P_2K_2$	0.495	0.198	0.297	0.12	0.12	0	0.24	0.12	0.12
$N_1P_1K_2$	0.165	0.066	0.099	0.06	0.06	0	0.24	0.12	0.12
$N_1P_2K_1$	0.165	0.066	0.099	0.12	0.12	0	0.12	0.06	0.06
$N_2P_1K_1$	0.33	0.132	0.198	0.06	0.06	0	0.12	0.06	0.06

1.3 土壤养分分析方法

每个试验区试验实施前,按规范取一个混合基础土样。土壤主要理化性状采用常规方法测定[16],速效钾含量采用乙酸铵浸提—原子吸收分光光度计法,有效磷采用碳酸氢钠提取—钼锑抗比色法,全氮采用凯氏定氮法,有机质含量采用重铬酸钾氧化—电容法,pH值采用电位法。

1.4 土壤养分分级指标

根据"3414"试验点的耕地土壤矿质元素测试值与作物相对产量的关系建立土壤的养分丰缺指标。以区组内缺素区产量除以区组内最高产量计算相对产量,用相对产量与相应的土壤养分建立线性方程式。以相对产量90%、83%、77%、71%和65%将土壤养分划分为6个等级:极高、高、较高、中、低和极低。

1.5 施肥指标体系的确定

用三元二次方程、一元二次方程、线性加平台的模型进行最佳施肥量模拟[17],根据模拟效果来确定最佳模型,利用边际效应计算出每个试验区最佳施肥量[18]。

其中,三元二次方程模拟为,

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_1^2 + b_3x_2 + b_4x_2^2 + b_5x_3 + b_6x_3^2 + b_7x_1x_2 + b_8x_1x_3 + b_9x_2x_3 \quad (1)$$

式中:x_1、x_2、x_3分别为N、P_2O_5、K_2O施用量;y代表

水稻产量。如果式中一次项为正,二次项为负,且 F 检验显著,则方程模拟成功。边际效应可以简化为边际成本等于边际收益,即 $dy \cdot y_p = dx \cdot x_p$,可以根据这个公式计算经济最佳产量施肥量,以 x_1、x_2、x_3 为变量,双边求导,得出:

$$b_1 + 2b_2x_1 + b_7x_2 + b_8x_3 = x_{1p}/y_p \quad (2)$$

$$b_3 + 2b_4x_2 + b_7x_1 + b_9x_3 = x_{2p}/y_p \quad (3)$$

$$b_5 + 2b_6x_3 + b_8x_1 + b_9x_2 = x_{3p}/y_p \quad (4)$$

式中:y_p 和 x_{1p}、x_{2p}、x_{3p} 分别代表水稻、N、P_2O_5 和 K_2O 的价格,将水稻、肥料价格和(1)式中的系数 b_i 值代入到(2)(3)(4)方程中,解方程组可得最佳施肥量。

一元二次方程模拟为:

$$y = a + bx + cx^2 \quad (5)$$

式中:x 为肥料用量;y 为水稻产量。选用处理 6)、8)、9)、10)的产量模拟 K_2O 的推荐用量,选用处理 4)、5)、6)、7)的产量模拟 P_2O_5 的推荐用量,选用处理 2)、3)、6)、11)的产量模拟 N 的推荐用量。如果式中的 b 为正系数,c 为负系数,且 F 检验显著,则方程模拟成功,边际效应可以简化为边际成本等于边际收益,即 $dy \cdot y_p = dx \cdot x_p$,可以根据这个公式计算经济最佳产量施肥量,以 x 为变量,双边求导,得出:

$$b + 2cx = x_p/y_p \quad (6)$$

式中:y_p 为水稻价格,x_p 为肥料价格,把水稻、肥料价格和 c 值、b 值代入上述方程,解方程得到最佳施肥用量。

线性加平台方程模拟为:

$$y = a + bx(x \leqslant C) \quad (7)$$

$$y = P(x > C) \quad (8)$$

式中:P 为最高产量(即平台产量),C 为最佳产量施肥量(直线与平台的交点),x 为肥料用量,y 为水稻产量。

在进行实际运算时,粮食和肥料价格均以当时市价为准[3]。价格分别为:K_2O 5.2 yuan/kg,P_2O_5 5.1 yuan/kg、N 5.4 yuan/kg、稻谷 3.1 yuan/kg。

最后将 44 个试验点的最佳施肥量与其对应的土壤养分含量建立对数模型,用于模拟在任意养分含量下的最佳肥料施用量,建立施肥指标体系。

1.6　施肥指标体系验证

10 个验证试验用于验证施肥体系的有效性,其中每个试验包括 1 个测土配方施肥区(测土配方施肥,用 O 表示),1 个农民习惯施肥区(按照农户的习惯进行施肥,用 T 表示),1 个对照区(不施肥,用 CK 表示),田间措施与"3414"试验完全相同。在水稻播种四十天后,对秧苗进行取样,用 NBT 还原法测量 SOD 活性[19],愈创木酚法测量 POD 活性[20],紫外吸收法测量 CAT 含量[21],分光光度计法[22]测量叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量。所有图、表制作,最佳施肥量计算,方程集合均用 Excel 软件进行,处理间显著性差异分析使用 DPS 进行。

2　结果与分析

2.1　养分分级指标体系的建立

在获取 44 个试验点的数据之后,建立土壤全氮、有效磷和速效钾含量与相对产量的模型(图 1)。

分别把相对产量 65%、71%、77%、83%、90% 代入这 3 个方程,最后得到 5 个土壤全氮、有效磷和

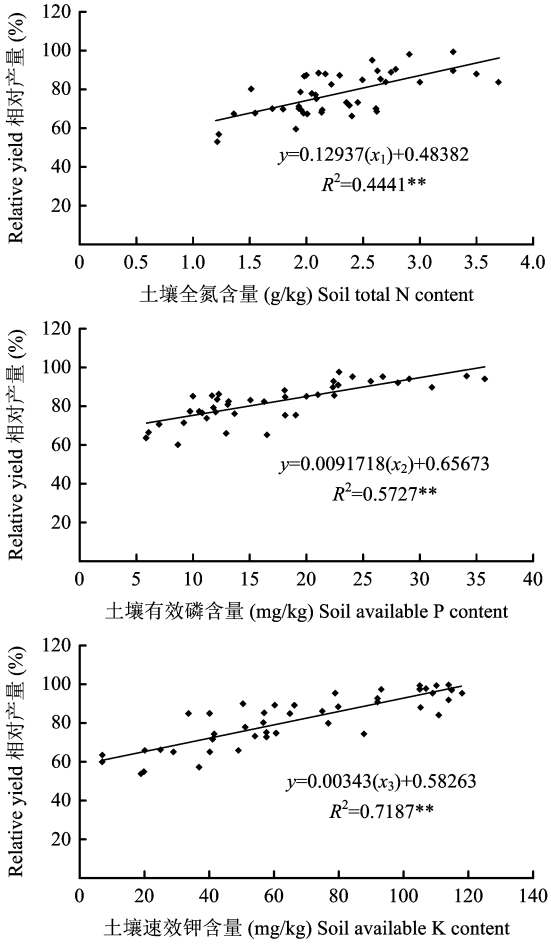

图 1　土壤全氮、有效磷、速效钾和相对产量之间的关系

Fig. 1　The relationship between soil nutrients content and relative crop yield

[注(Note):y—相对产量 Relative yield;x_1—土壤全氮含量 Soil total N content;x_2—土壤有效磷含量 Soil available P content;x_3—土壤速效钾含量 Soil available K content, $n = 44$.]

有效钾分级指标值。利用这五个指标将德保县的耕地全氮和速效钾分为了6个等级,有效磷分为5个等级(表2),即,极低、低、中、较高、高、极高。

表2 土壤矿质营养的丰缺指标分级

Table 2 Grades of soil mineral nutrient indices

等级 Grade	相对产量 Relative yield	全氮(g/kg) Total N	有效磷(mg/kg) Avail. P	速效钾(mg/kg) Avail. K
极低 Very low	$y<65\%$	$x_1<1.28$	—	$x_3<19.50$
低 Low	$65\%\leqslant y<71\%$	$1.28\leqslant x_1<1.75$	$x_2<5.50$	$19.50\leqslant x_3<37.10$
中 Medium	$71\%\leqslant y<77\%$	$1.75\leqslant x_1<2.21$	$5.50\leqslant x_2<11.70$	$37.10\leqslant x_3<54.60$
较高 Higher	$77\%\leqslant y<83\%$	$2.21\leqslant x_1<2.67$	$11.70\leqslant x_2<17.85$	$54.60\leqslant x_3<72.10$
高 High	$83\%\leqslant y<90\%$	$2.67\leqslant x_1<3.22$	$17.85\leqslant x_2<25.00$	$72.10\leqslant x_3<92.50$
极高 Very high	$y\geqslant 90\%$	$x_1\geqslant 3.22$	$x_2\geqslant 25.00$	$x_3\geqslant 92.50$

2.2 氮磷钾推荐施肥量的确定

在利用三元二次方程对44个“3414”田间试验进行最佳施肥模拟的时候发现,三元二次方程拟合成功率低于20%,而利用一元二次方程分别对钾、磷、氮进行模拟,成功率大幅度提高,分别为84%、86%、68%。推荐施肥量和土壤全氮、有效磷、速效钾之间的模拟关系见图2。

根据表2的养分分级指标和图2中的模拟公式,计算得到各试验点的最佳施肥推荐量(表3)。

2.3 验证试验农艺与生化指标

测土配方施肥验证区与农民常规施肥区相比,每亩总有效穗数、每穗实粒数都有所增加。在10组验证试验中,有7组作物产量显著高于农户习惯施肥区,其中有3组有效分蘖数、株高、每穗实粒数显著高于农户习惯施肥区(表4)。此外,从水稻苗期的生化指标(表5)可以看到,T处理和O处理的生化指标普遍高于CK处理,而且差异显著。但是T处理和O处理之间的生化指标差异显著的实验组不是很多,尽管也有普遍的差异性存在。

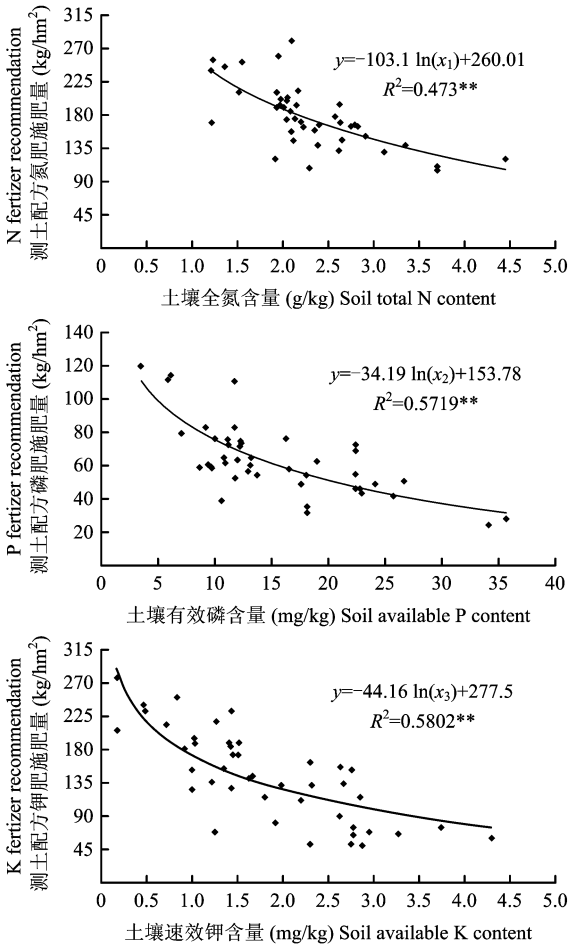

图2 土壤全氮、有效磷和速效钾与推荐施肥量之间的关系

Fig. 2 Relationship between soil total N, available P and K content and fertilization recommendation amount

3 讨论

土壤养分丰缺指标对于测土配方施肥具有十分重要的意义。李娟等[10]将土壤养分丰缺指标划分为3个等级;孙义祥等[23]则将指标划分为4个等级。广西喀斯特地貌所特有的复杂成土母质和地形条件造成地块间的土壤养分含量差别很大,地块间肥沃程度差别悬殊,土壤养分丰缺指标过于粗犷会

表 3　基于土壤养分丰缺指标的最佳施肥推荐量

Table 3　Optimum fertilizer recommendation rates based on soil nutrient grades

土壤养分 Soil nutrient	等级 Grade	土壤养分含量 Soil nutrient content	试验点数 Site number	肥料推荐量(kg/hm^2) Recommended nutrient rate
N	很低 Very low	1.21～1.28	3	N 234～241
	低 Low	1.28～1.75	3	N 202～234
	中等 Medium	1.75～2.21	19	N 178～202
	较高 Higher	2.21～2.67	10	N 158～178
	高 High	2.67～3.22	5	N 139～158
	极高 Very high	>3.22	4	N 0～139
P_2O_5	很低 Very low	—	—	—
	低 Low	3.5～5.50	1	P_2O_5 95～110
	中等 Medium	5.50～11.70	14	P_2O_5 70～95
	较高 Higher	11.70～17.85	13	P_2O_5 55～70
	高 High	17.85～25.00	12	P_2O_5 44～55
	极高 Very high	>25.00	4	P_2O_5 0～44
K_2O	很低 Very low	6.99～19.50	3	K_2O 146～191
	低 Low	19.50～37.10	4	K_2O 117～146
	中等 Medium	37.10～54.60	8	K_2O 101～117
	较高 Higher	54.60～72.10	10	K_2O 89～101
	较高 High	72.10～92.50	5	K_2O 78～89
	极高 Very high	>92.50	14	K_2O 0～78

注(Note):土壤全氮单位含量为 g/kg,有效磷和速效钾含量单位为 mg/kg The unit for soil total N content is g/kg, for available P and K are mg/kg.

降低推荐的准确性[24]。一般施肥曲线在相对产量达到 90% 以上时,施肥量与产量之间曲线趋于平缓,导致肥料利用率降低,所以本次研究中细化了指标体系,以便达到节能增效、保护环境、精细施肥的目的,具体分级如下:>90% 为极高,83%～90% 为高,77%～83% 为较高,71%～77% 为中,65%～71% 为低,<65% 为极低。

已有研究大多以行政区域作为推荐的范围[13,23]。然而在相同行政区域内经常会有不同的生态区域,使用同样施肥指标体系是不合理的。为了保证施肥指标体系的效用性和针对性,我们选择了典型喀斯特地形区作为研究区域。

土壤中氮素主要来源是有机质,全氮含量与有机质含量相关密切。全氮含量代表着土壤氮素的总储量和供氮潜力,与有机质一样是土壤肥力的主要指标之一,故在本研究中采用了全氮含量来作为氮素高低的指标。

在第二次土壤普查时,本地区土壤有效磷丰缺指标划分为 4 个等级:0～3.00、3.00～5.00、5.00～10.00、>10.00 mg/kg;速效钾划分为 4 个等级:0～30.00、30.00～50.00、50.00～100.00、>100.00 mg/kg,对本地区农业生产起到过一定的指导作用[15]。2012 年耕地地力评价发现,随着化肥的使用,本区土壤肥力发生了变化[25]。以德保县为例,其耕地有机质含量 ≥30.00 g/kg 的比例由第二次土壤普查时的 22.14% 上升到 52.99%,增加了 30.85 个百分点,有效磷 ≥10.00 mg/kg 的比例由第二次土壤普查时的 10.75% 上升到 76.11%,速效钾的含量变化不大(表 6)。因此,此次建立的土壤有效磷丰缺分级指标由 80 年代的 4 个增加到为 5 个,速效钾增加到 6

个,精准度有所增加。新指标体系中有效磷各等级的含量也均有所提高,分别为0～5.50、5.50～11.70、11.70～17.85、17.85～25.00、>25.00 mg/kg;速效钾各等级含量变化不大,分别为0～19.50、19.50～37.10、37.10～54.60、54.60～72.10、72.10～92.50、>92.50 mg/kg。

表4 测土配方施肥验证区水稻农艺性状

Table 4 Agronomic characteristics and yield of rice in the testify plots using recommended fertilization

验证区 Testify plot	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	有效穗数 Effective panicle ($\times 10^4/hm^2$)	每穗粒数 Grains per panicle	每穗实粒数 Filled grains per panicle	结实率(%) Seed setting percentage	千粒重(g) 1000-grain weight	水稻产量 Crop yield (kg/hm^2)
1	CK	73.9 c	264.0 b	69.7 b	63.4 b	91.0 a	29.8 a	4837.5 c
	T	85.2 b	303.0 a	99.0 a	82.0 a	82.8 b	29.5 a	7329.0 b
	O	99.8 a	322.5 a	102.0 a	82.9 a	81.3 b	29.5 a	7887.0 a
2	CK	96.4 a	126.0 c	198.8 a	167.4 a	84.2 a	20.8 a	4387.5 b
	T	97.0 a	172.5 b	191.6 a	161.4 ab	84.2 a	20.7 a	5763.0 a
	O	97.7 a	190.5 a	176.9 b	153.6 b	86.8 a	20.4 b	5979.0 a
3	CK	90.1 b	208.5 b	121.5 b	107.9 b	88.8 a	27.3 a	6132.0 b
	T	109.8 a	220.5 b	122.5 b	108.4 b	88.5 a	26.3 b	6283.5 b
	O	111.5 a	237.0 a	132.0 a	117.0 a	88.6 a	25.0 c	6933.0 a
4	CK	102.1 b	118.5 b	124.0 c	88.3 c	71.1 b	28.7 a	2983.5 c
	T	117.3 a	208.5 a	134.8 b	101.5 b	75.3 a	29.5 a	6247.5 b
	O	118.5 a	210.0 a	156.2 a	116.5 a	74.6 a	29.1 a	7125.0 a
5	CK	107.0 b	126.0 b	129.1 b	113.8 b	88.1 a	28.9 a	4144.5 b
	T	110.3 b	190.5 a	136.4 ab	113.3 b	83.1 b	28.9 a	6237.0 a
	O	122.3 a	193.5 a	136.4 a	130.2 a	95.5 a	27.3 b	6877.5 a
6	CK	67.5 c	234.0 b	136.4 b	53.6 b	39.3 b	24.2 a	3036.0 c
	T	93.0 b	267.0 a	136.4 a	80.6 a	59.1 a	22.3 b	4788.0 b
	O	97.8 a	280.5 a	136.4 a	85.7 a	62.8 a	22.2 b	5343.0 a
7	CK	70.2 c	189.0 c	136.4 a	90.5 b	66.3 a	27.0 a	4611.0 c
	T	74.6 b	208.5 b	136.4 a	97.0 a	71.1 a	26.8 a	5430.0 a
	O	77.9 a	243.0 a	136.4 a	75.5 a	55.4 b	25.4 b	4668.0 b
8	CK	96.0 b	178.5 b	136.4 a	111.6 a	81.8 a	30.7 a	6136.5 c
	T	103.9 a	240.0 a	136.4 a	110.8 a	81.2 b	29.7 a	7908.0 b
	O	104.1 a	252.0 a	136.4 a	117.4 a	86.1 a	29.3 a	8679.0 a
9	CK	112.0 b	165.0 b	136.4 a	156.0 c	114.4 b	26.2 a	6744.0 c
	T	113.0 ab	180.0 b	136.4 a	165.0 b	121.0 a	24.7 b	7336.5 b
	O	118.0 a	225.0 a	136.4 a	143.0 a	104.8 b	23.5 c	7561.5 a
10	CK	78.9 b	169.5 b	136.4 a	140.0 a	102.6 a	22.5 a	5340.0 a
	T	83.9 a	187.5 a	136.4 a	131.8 a	96.6 b	22.9 a	5659.5 a
	O	84.3 a	193.5 a	136.4 a	127.2 a	93.3 b	23.1 a	5685.0 a

注(Note):同一小区内,不同处理间测试值后边的字母不相同时表示差异显著($P<0.05$) Values followed by different letters in a plot are significatly different among treatments($P<0.05$).

表 5　验证小区水稻苗期生化指标

Table 5　Biochemical indexes of rice seedlings in testify plots

验证小区 Testify plot	处理 Treatment	叶绿素 a Chlorophyll a (mg/g)	叶绿素 b Chlorophyll b (mg/g)	类胡萝卜素 Carotenoid (mg/g)	CAT 酶活性 CAT activity [H_2O_2 mg/(g·min), FW]	SOD 酶活性 SOD activity (U/g, FW)	POD 酶活性 POD activity [U/(g·min)]
1	CK	0.43 c	0.13 b	0.13 b	129.51 b	43.15 b	40.75 a
	T	0.79 b	0.21 a	0.19 a	145.42 a	51.21 a	43.52 a
	O	0.97 a	0.23 a	0.18 a	149.45 a	50.12 a	45.25 a
2	CK	0.64 b	0.17 c	0.09 b	135.73 b	47.51 b	43.52 b
	T	1.11 a	0.21 b	0.18 a	151.51 a	55.11 a	49.52
	O	1.26 a	0.25 s	0.17 a	152.61 a	55.52 a	49.45 a
3	CK	0.53 b	0.13 b	0.17 c	135.52 b	43.21 b	35.94 a
	T	0.55 b	0.21s	0.21 b	141.92 a	51.21 a	41.25 b
	O	1.11 a	0.21s	0.24 a	143.82 a	53.14 a	45.21 a
4	CK	1.14 b	0.21 b	0.11 b	148.48 c	54.52 b	46.71 b
	T	1.44 a	0.30 s	0.15 a	168.64 b	61.12 a	51.21 a
	O	1.5 a	0.31s	0.17 a	170.42 a	62.21 a	53.55 a
5	CK	0.51 b	0.11 c	0.08 b	132.42 c	44.52 b	39.52 b
	T	0.88 a	0.20 b	0.15 a	149.21 b	53.21 a	45.52 a
	O	0.96 a	0.25 a	0.17 a	151.21 a	55.27 a	47.52 a
6	CK	0.56 c	0.11 b	0.11 b	131.24 c	46.57 b	42.21 b
	T	0.77 b	0.22 a	0.17 a	149.52 b	56.22 a	49.52 a
	O	0.86 a	0.23 a	0.18 a	162.21 a	60.5 a	53.21 a
7	CK	0.44 c	0.14 b	0.08 b	129.52 c	39.99 b	38.52 c
	T	0.74 b	0.19 a	0.17 a	143.21 b	55.52 a	42.02 b
	O	0.86 a	0.20 a	0.15 a	152.21 a	57.21 a	46.23 a
8	CK	0.49 b	0.13 b	0.09 b	141.22 c	53.2 ac	46.85 c
	T	0.78 a	0.26 a	0.13 a	160.21 b	66.21 a	51.86 b
	O	0.76 a	0.25 a	0.15 a	171.21 a	59.52 b	55.52 a
9	CK	0.51 b	0.13 b	0.11 c	128.52 c	43.2 c	39.52 c
	T	0.63 a	0.23 a	0.17 b	146.85 b	55.72 b	44.52 b
	O	0.71 a	0.23 a	0.21 a	157.21 a	60.21 a	49.52 a
10	CK	0.61 b	0.17 b	0.13 b	132.57 c	47.53 b	40.05 c
	T	0.81 a	0.22 a	0.19 a	143.21 b	56.52 a	46.53 b
	O	0.88 a	0.23 a	0.18 a	152.21 a	60.52 a	49.52 a

表6 第二次普查和本试验期间土壤养分含量的变化

Table 6 Variation of nutrients in farmlands at present and during the second national soil survey

有机质 OM (g/kg)	第二次普查 2nd survey 面积 Area (hm^2)	第二次普查 2nd survey 比例 Percentage (%)	本次调查 At present 面积 Area (hm^2)	本次调查 At present 比例 Percentage (%)
≥40	66	0.3	2492	13.21
30～40	4796	21.85	7504	39.78
20～30	11378	51.81	8325	44.13
10～20	3896	17.74	539	2.86
<10	1823	8.3	5	0.02

有效磷 Avail. P (mg/kg)	第二次普查 2nd survey 面积 Area (hm^2)	第二次普查 2nd survey 比例 Percentage (%)	本次调查 At present 面积 Area (hm^2)	本次调查 At present 比例 Percentage (%)
≥30	191	0.87	2615	13.86
20～30	300	1.37	3674	19.48
10～20	1868	8.51	8068	42.77
5～10	5014	22.83	3934	20.85
<5	14586	66.42	574	3.04

速效钾 Avail. K (mg/kg)	第二次普查 2nd survey 面积 Area (hm^2)	第二次普查 2nd survey 比例 Percentage (%)	本次调查 At present 面积 Area (hm^2)	本次调查 At present 比例 Percentage (%)
≥150	234	1.07		
100～150	1178	5.36	316	1.68
50～100	5747	26.17	5123	27.15
30～50	4291	19.54	6982	37.01
<30	10509	47.86	6444	34.16

4 结论

1)根据44个试验点的结果,把试验区的土壤根据全氮、速效钾的含量分为极低、低、中、较高、高、极高6个水平,其中全氮对应的含量为1.21～1.28、1.28～1.75、1.75～2.21、2.21～2.67、2.67～3.22、>3.22 g/kg,相应的推荐施肥量为234～241、202～234、178～202、158～178、139～158、0～139 kg/hm^2;速效钾对应的含量为6.99～19.50、19.50～37.10、37.10～54.60、54.60～72.10、72.10～92.50、>92.50 mg/kg,相应的推荐施肥量为146～191、117～146、101～117、89～101、78～89、0～78 kg/hm^2。并把土壤有效磷的含量分为低、中、较高、高、极高5个水平,对应的含量分别为3.5～5.50、5.50～11.7、11.7～17.85、17.85～25.00、>25.00 mg/kg,磷肥推荐施肥量为95～110、70～95、55～70、44～55、0～44 kg/hm^2。

2)在本次的10个验证试验中,有7组试验点的最佳施肥区的水稻产量显著高于农户习惯施肥区的产量。主要原因为有效分蘖数、每穗实粒数、株高的增加,证明了技术体系的有效性和可行性。

参 考 文 献:

[1] Bray R H, Kurtz L T. Determination of total, organic and available form of phosphorus in soil[J]. Soil Science, 1945, 59: 39-45.

[2] Williams J D, Crozier C R, White J G *et al*. Illinois soil nitrogen test predicts southeastern US corn economic optimum nitrogen rates [J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(3): 735-744.

[3] Olfs H W, Blankenau K, Brentrup F *et al*. Soil and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2005, 168(4): 414-431.

[4] Attanandana T, Yost R., Verapattananirund P. Empowering farmer leaders to acquire and practice site-specific nutrient management technology[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2007, 30(1): 87-107.

[5] Saleque M A, Naher U A, Choudhury N N *et al*. Variety-specific nitrogen fertilizer recommendation for lowland rice [J]. Communications in Soil Science and plant Analysis, 2004, 35(13-14): 1891-1903.

[6] Quaggio J A, Cantarella H, Van Raji B. Phosphorus and Potassium soil test and nitrogen leaf analysis as a base for citrus fertilization[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 52(1): 67-74.

[7] Peltovuori T. Precision of commercial soil testing practice for phosphorus fertilizer recommendations in Finland[J]. Agricultural and Food Science in Finland, 1999, 8(3): 299-308.

[8] Anderson-Cook C M, Alley M M, Noble R *et al*. Phosphorous and potassium fertilizer recommendation variability for two mid-Atlantic Coastal Plain fields[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(6): 1740-1747.

[9] Heckman J R, Jokela W, Morris T *et al*. Soil test calibration for predicting corn response to phosphorus in the northeast USA[J]. Agronomy Journal, 2006, 98(2): 280-288.

[10] 李娟, 章明清, 孔庆波, 等. 福建早稻测土配方施肥指标体系研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 938-946.
Li J, Zhang M Q, Kong Q B *et al*. Soil testing and formula fertilization indexes for early rice in Fujian Province[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(4): 938-946.

[11] 戢林, 张锡洲, 李廷轩. 基于"3414"试验的川中丘陵区水稻测土配方施肥指标体系构建[J]. 中国农业科学, 2011, 44

(1)：84-92.
Ji L, Zhang X Z, Li T X. Establishing fertilization recommendation index for paddy soil based on the "3414" field experiments in the middle of Sichuan Hilly regions[J]. Scientia Agriculture Sinica, 2011, 44(1)：84-92.

[12] 李磊，阎敏，阎坚中，等. 祁县小麦"3414"肥料效应试验报告[J]. 山西农业科学，2010，38(10)：34-36.
Li L, Yan M, Yan J Z *et al*. The "3414" fertilizer response test report for wheat in Qixian[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2010, 38(10)：34-36.

[13] 杨俐苹，白由路，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.
Yang L P, Bai Y L, Wang H *et al*. Application of "3414" field trial design for establishing soil testing and fertilizer recommendation index [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4)：1018-1023.

[14] 娄春荣，董环，王秀娟，姜娟. 辽宁省花生"3414"肥料试验施肥模型探讨[J]. 土壤通报，2008，39(4)：892-895.
Lou C R, Dong H, Wang X J, Jiang J. A study on peanut simulation of "3414" fertilizer experiments in Liaoning Province [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(4)：892-895.

[15] 周清湘，黄绍富. 广西稻田土壤磷、钾丰缺指标的试验初探[J]. 土壤肥料，1983，3：18-23.
Zhou Q X, Huang S F. Preliminary work of soil nutrition plentiful-lack rank index of paddy farmland in Guangxi province [J]. Soil and Fertilizers, 1983, 3：18-23.

[16] 张福锁. 测土配方施肥技术要览[M]. 北京：中国农业大学出版社，2006. 93-110.
Zhang F S. Main points on soil testing and fertilizer recommendation technology [M]. Beijing：China Agricultural University Press, 2006. 93-110.

[17] 王圣瑞，陈新平，张福锁，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 R, Chen X P, Zhang F S *et al*. Study on simulation of "3414" experiments[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(4)：409-413.

[18] Cerrato M E, Blackmer A M. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer[J]. Agronomy Journal, 1990, 82：138-143.

[19] Giannopolitis C N, Ries S K. Superroxide dismutases：I. Occurrence in higher plants[J]. Plant Physiology, 1977, 59：309-314.

[20] Omra R G. Peroxide levels and the activities of catalase, peroxidase and indoleacetic acid oxidase during and after chilling cucumber seedlings[J]. Plant Physiology, 1980, 65：407-408.

[21] Chance M. Assay of calatare and peroxide [J]. Methods Enzyrnol, 1995, 2：764-775.

[22] 代旭峰. 不同施肥方式对玉米产量、生理生化指标及经济效益的影响[D]. 重庆：西南大学硕士学位论文，2013.
Dai X F. Effects of different fertiling modes on yield, physiological and biochemical indices and economic benefit of maize[D]. Chongqing：MS Thesis of Southwest University, 2013.

[23] 孙义祥，郭跃升，张福锁，等. 应用"3414"试验建立冬小麦测土配方施肥指标体系[J]. 植物营养与肥料学报，2009，15(1)：197-203.
Sun Y X, Guo Y S, Zhang F S *et al*. Establishing phosphorus and potassium fertilization recommendation index based on the "3414" field experiment [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(1)：197-203.

[24] Fageria N K, Baligar V C, Jones C A. Growth and mineral nutrition of field crops [M]. America, New York：Marcel Dekker, Inc., 1997.

[25] 赵亮，韦学成，朱利泉，等. 喀斯特地貌区耕地地力评价与分级[J]. 农业工程学报，2013，29(8)：232-241.
Zhao L, Wei X C, Zhu L Q et al. Evaluation and gradations of cultivated land fertility in karst area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(8)：232-241.