

基于 ASI 法的滨海滩涂地水稻土壤有效氮、磷、钾丰缺指标

魏义长^{1,2}, 白由路², 杨俐苹², 林昌华², 姚政³, 罗国安³, 徐四新³, 宋韦⁴, 朱春梅⁴

(¹华北水利水电学院资源与环境学院, 郑州 450011; ²中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;

³上海市农业科学院环境科学研究所, 上海 201106; ⁴上海海丰米业公司农业试验站, 上海 224153)

摘要: 【目的】为滨海滩涂地精准施肥提供理论依据。【方法】2005 和 2006 年运用 ASI 法对位于黄海之滨的海丰农场进行土壤养分含量测定及水稻氮、磷、钾肥施用的推荐。选取 60 块肥力从高到低田块, 利用不施肥、不施氮肥、不施磷肥、不施钾肥和施肥 5 个处理、3 次重复的设计方案进行田间小区试验, 按照相对产量 < 50% 时的土壤养分含量为“极低”、50%~75% 为“低”、75%~95% 为“中”、>95% 为“高”、再降为 95% 时为“过高”的标准建立土壤有效氮、磷、钾的丰缺指标体系。【结果】滨海滩涂水稻田土壤铵态氮的“极低”指标为 < 2.5 mg N·L⁻¹, “低”为 2.5~11.0 mg N·L⁻¹, “中”为 11.0~19.5 mg N·L⁻¹, “高”为 19.5~34.0 mg N·L⁻¹, “极高”为 > 34.0 mg N·L⁻¹; 土壤有效磷的“极低”指标在海丰农场供试田块没有表现出来, “低”为 < 13.0 mg P·L⁻¹, “中”为 13.0~28.5 mg P·L⁻¹, “高”为 28.5~60.0 mg P·L⁻¹, “极高”为 > 60.0 mg P·L⁻¹; 土壤有效钾的“极低”指标为 < 35.0 mg K·L⁻¹, “低”为 35.0~95.0 mg K·L⁻¹, “中”为 95.0~175.0 mg K·L⁻¹, “高”为 175.0~335.0 mg K·L⁻¹, “极高”为 > 335.0 mg K·L⁻¹。【结论】运用土壤养分状况系统分析法 (ASI) 和田间试验设计相结合是建立水稻土壤氮、磷、钾丰缺指标行之有效的方法。

关键词: 滨海滩涂地; 水稻; ASI; 氮; 磷; 钾; 丰缺指标

Abundance and Deficiency Indices of Soil Available N, P and K for Rice in Marine Foreland Based on ASI

WEI Yi-chang^{1,2}, BAI You-lu², YANG Li-ping², LIN Chang-hua², YAO Zheng³, LUO Guo-an³,
XU Si-xin³, SONG Wei⁴, ZHU Chun-mei⁴

(¹College of Resources and Environment, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450011;

²Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081;

³Institute of Environmental Science, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201106;

⁴Agricultural Experiment Station, Shanghai Haifeng Rice Industrial Co. Ltd., Shanghai 224153)

Abstract: 【Objective】To provide theoretic support for precision fertilization in the marine foreland to Yellow Sea of China. 【Method】This study used ASI (Agro Services International) method to test soil samples and recommend N, P, K fertilizers application rates, and conducted plot experiments of five treatments (①no fertilization, ② no N, ③no P, ④no K, ⑤all N, P, K and other fertilizers recommendation rates) and triplicate in 60 fields from low to high fertility in Haifeng Farm in 2005 and 2006, and calibrate ASI soil test according to the typical response categories (50%, 75%, 95% of relative yield to soil nutrient values) to establish the abundance and deficiency indices of soil available N, P and K for rice in marine foreland based on ASI soil testing and fertilizer recommendation. 【Result】The very low, low, medium, high and very high index for soil NH₄⁺-N were <2.5 mg N·L⁻¹, 2.5-11.0 mg N·L⁻¹, 11.0-19.5 mg N·L⁻¹, 19.5-34.0 mg N·L⁻¹, and >34.0 mg N·L⁻¹, respectively. The very low critical concentration index for soil available P was not appeared in Haifeng Farm, the low, medium, high and very high critical concentration for soil available P were <13.0 mg P·L⁻¹, 13.0-28.5 mg P·L⁻¹, 28.5-60.0 mg P·L⁻¹, and >60.0 mg P·L⁻¹, respectively. The critical very low, medium, high and very high concentration for soil available K were <35.0 mg K·L⁻¹, 35.0-95.0 mg K·L⁻¹, 95.0-175.0 mg K·L⁻¹,

收稿日期: 2007-04-13; 接受日期: 2007-07-30

基金项目: 上海市科技兴农重点攻关项目 (农攻字 1-10); 华北水利水电学院高层次人才科研启动项目 (200723)

作者简介: 魏义长 (1967-), 男, 河南方城人, 副研究员, 博士, 研究方向为农业水土资源高效利用。Tel: 0371-66022646; E-mail: weiyichang@ncwu.edu.cn。通讯作者白由路 (1961-), 男, 河南温县人, 研究员, 博士, 研究方向为精准农业。Tel: 010-68918673; E-mail: ylbai@caas.ac.cn

175.0-335.0 mg K·L⁻¹, and >335.0 mg K·L⁻¹, respectively. 【Conclusion】 Combining ASI systematic approach and field experiments would be rational and effective methods to establish the critical indices of soil nutrients for rice.

Key words: Marine foreland; Rice; ASI; Nitrogen; Phosphorus; Potassium; Abundance and deficiency indices

0 引言

【研究意义】通过土壤养分测试和田间肥效试验结果,建立不同作物、不同区域的土壤养分丰缺指标是进行测土推荐施肥的关键^[1,2]。【前人研究进展】20世纪80年代,中国土肥科技工作者根据全国第二次土壤普查的结果,分土类、分作物开展了主要作物测土推荐施肥参数的研究,建立了适合当时生产条件的土壤养分丰缺指标体系^[3]。然而,20多年来,随着国家社会经济的快速发展,作物品种、栽培技术、土壤状况、生产条件和分析测试技术等都发生了巨大的变化,原有的参数和资料已经不能适应新形势下测土推荐施肥的要求^[4]。目前ASI法是测土施肥的推荐方法之一,与常规法^[5]、M3法^[6]、AB-DTPA法^[7,8]等相比较,它具有批量化的前处理技术、专业化的测试技术、自动化的数据采集技术和程序化的推荐施肥技术^[9,10],已对中国主要土壤类型和130多种作物建立了测土推荐施肥的丰缺指标体系^[11,12]。【本研究切入点】然而,ASI法在中国黄海之滨的滩涂地上研究较少,对滨海滩涂地水稻土壤的有效氮、磷、钾丰缺指标的研究更少。【拟解决的关键问题】本研究利用ASI法与“缺肥-全肥”田间小区试验相结合的方法建立海丰农场水稻测土推荐施肥的土壤有效氮、磷、钾丰缺指标体系,一方面对ASI法的丰缺指标体系进行补充和完善,另一方面为海丰农场水稻精准施肥提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 ASI法概述

ASI法是由美国佛罗里达的国际农化服务中心(Agro Services International Inc.)的A. H. Hunter在总结前人土壤测试工作的基础上,吸收美国北卡罗莱那州立大学的D. Waugh、R. B. Cate和L. Nelson的研究结果,于1980年提出一套用于土壤养分状况评价的实验室分析和盆栽实验方法^[13]。1989年该方法引入中国,1990年由加拿大政府资助,在中国农业科学院建立了“中国-加拿大(CAAS-PPIC)合作土壤-植物测试实验室”,同时,将该方法称为“土壤养分状况系统研究法”。十几年来,中国农业科学院和有关单位合作,通过在全国的试验网络,在31个省(市、自治

区)进行了大量深入系统的研究,截至目前,已分析土壤样品30000多个,进行了7000多个田间试验,在此基础上,针对中国主要土壤类型和作物,研究形成了一整套测土推荐施肥的方法与技术体系^[12]。

ASI法样品的前处理采用专用的土壤样品风干设备、土样粉碎机、土样量样器、样品盘、样品车、专用加液器、多联搅拌器、样品盘冲洗器等设备,配以专用的纯水器,实现了批量化和半自动化,每批样品30个,所有设备均与之配套^[11]。

ASI法的主要特点是采用了联体杯色标技术和数据自动采集技术,使整个测定过程基本上不再记录数据;由于联体杯不能分离,所以整个测定过程中的样品次序不会发生错乱,基本实现了数据记录无纸化。ASI法的另一个特点是土壤养分含量的测定结果是用单位体积土壤进行计量的,即在土壤分析过程中是采用量样器量取一定体积的土壤样品,而不是称取一定重量的土壤样品进行各种化学处理,这是因为:(1)植物根系是生长在一定体积的土壤中,土壤养分含量以体积计算更能代表田间的养分的实际状况;(2)体积量样速度快,可有效地加快土壤样品的分析速度,缩短土壤养分分析的周期,从而适应测土推荐施肥的需要^[12]。

1.2 试验地点和时间

试验地点位于黄海之滨的海丰农场,地处江苏省大丰市,为滨海滩涂地,开垦10年以上。土壤质地为壤土,通透性好、易耕性强;地上地下水资源丰富;主要种植作物为水稻、小麦和大麦,一般是水稻-小麦(或大麦)轮作。

1.3 试验设计

供试水稻品种为武育粳3号。

根据海丰农场北垦区2004年秋的水稻产量资料和2005年春的土壤测定结果,按照土壤肥力从高到低顺序选取60块田,连续进行两年(2005和2006年)田间小区试验。

在60个肥力水平田块上的田间小区试验处理借鉴“3414”试验设计的5个常规处理^[14,15],即不施肥、不施氮肥、不施磷肥、不施钾肥和施肥,3次重复,完全随机区组排列;小区面积为50 m×100 m,氮、磷、钾的施肥量为ASI法测土推荐的最佳施肥量

(opt)，每个处理的其它肥料施用量(opt)也均为ASI法推荐的最佳施肥量(表1)。

表1 土壤养分的丰缺指标确定试验处理

Table 1 The experimental treatments of determining the critical indices of soil nutrients

处理 Treatments	N	P	K	其它 Others
不施肥 Control	0	0	0	0
不施氮肥 Without N application	0	opt	opt	opt
不施磷肥 Without P application	opt	0	opt	opt
不施钾肥 Without K application	opt	opt	0	opt
氮、磷、钾等肥全施 All fertilizers application	opt	opt	opt	opt

1.4 土壤样品采集和分析方法

土壤基础样品均在前茬作物收获后、水稻基肥施用前采集。以田块为大的采样单元，田块内按50 m×100 m为采样单元(即试验小区)采集；在取样单元内按“S”型线路用土钻取10钻0~20 cm的土样，充分混匀后用四分法取500 g左右装入土袋，系好标签，带回实验室供化学分析。土样的化学分析采用土壤养分状况系统研究法(ASI)^[12]。

1.5 水稻收获

水稻成熟时采用“样方”法^[3]，每个小区内采集3个样方，样方大小为2 m²，收获全部稻穗，以各小区3个样方水稻产量折合为该小区的产量。因即便是在同一肥力水平田块，3个重复小区的土壤测定值还是有小的差别，3个重复的相对产量单独计算，即相对产量点数为360个(60块×3重复×2年)；若因意外造成试验失败的小区，应去除，最后数据统计以实际小区的数量计算。

1.6 丰缺指标体系建立的标准和数据分析方法

根据水稻产量对土壤有效养分含量的响应，建立土壤养分丰缺指标体系^[3]：用缺肥区(氮或磷、钾不施用)产量占全施肥区(氮、磷、钾等全施)产量百分数，即相对产量的高低来表达土壤有效养分的丰缺状况。

水稻的相对产量与土壤养分测定值间的方程拟合标准是以决定系数(R^2)大小来决定的^[3]，选定决定系数(R^2)最大的拟合方程作为响应方程。最后运用响应方程按照相对产量在50%以下的土壤养分测定值为“极低”、50%~75%为“低”、75%~95%为“中”、大于95%为“高”、再降为95%为“极高”的标准计

算并绘制出丰缺指标。

数据分析和图形绘制全部在Excel中进行。

2 结果与分析

根据收获后小区水稻产量对试验小区土壤有效养分含量的响应，通过逐步回归得知，本研究拟合出的相对产量与各试验小区土壤养分测定值间的一元三次响应方程的决定系数(R^2)较一元二次、对数、指数等响应方程的决定系数大，因此，本研究建立的土壤有效氮、磷、钾丰缺指标体系的响应方程均为一元三次方程。

2.1 土壤铵态氮丰缺指标

土壤铵态氮的丰缺指标，“极低”为<2.5 mg N·L⁻¹，“低”为2.5~11.0 mg N·L⁻¹，“中”为11.0~19.5 mg N·L⁻¹，“高”为19.5~34.0 mg N·L⁻¹，“极高”为>34.0 mg N·L⁻¹。由于海丰农场田块一半以上的土壤有机质含量较低(<10 g·L⁻¹)，因此，其土壤铵态氮的含量也都相应较低，近一半田块的土壤铵态氮含量为“中”等水平以下含量。从图1中还可看出，当土壤铵态氮的含量超过34.0 mg N·L⁻¹后水稻的相对产量就开始降为最高产量的95%。在试验中也观察到，在这样的小区水稻贪青晚熟，并有倒伏，从而导致减产，因此，在土壤铵态氮含量超过34.0 mg N·L⁻¹后就要严格控制氮肥的施用。

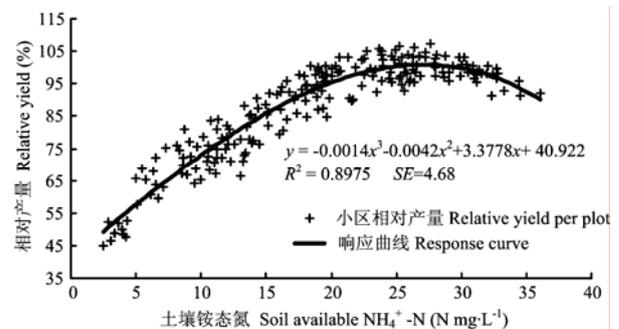


图1 水稻相对产量与土壤铵态氮之间的关系

Fig. 1 The relationship between rice relative yield and soil available $\text{NH}_4^+\text{-N}$ level

2.2 土壤有效磷丰缺指标

土壤有效磷的“极低”指标在海丰农场供试田块没有表现出来，“低”为<13.0 mg P·L⁻¹，“中”为13.0~28.5 mg P·L⁻¹。“高”为28.5~60.0 mg P·L⁻¹，“极高”为>60.0 mg P·L⁻¹。由于海丰农场的土壤为滨

海滩涂土,以及多年来海丰农场比较注重磷肥的施用,因此一半以上田块土壤有效磷属于“中”等水平的,但当土壤有效磷的含量超过 $60.0 \text{ mg P}\cdot\text{L}^{-1}$ 后就会造成一定程度减产(图 2),但在本试验研究中还没有发现因土壤有效磷过多而造成水稻大幅度减产的现象。实际上,在本研究中水稻相对产量降为 95% 小区的土壤有效磷含量过高,导致了土壤有效钾的含量特别的偏低 ($<0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),从而造成水稻千粒重下降,这与进行的有关钾肥研究结果^[16]一致,因磷和钾是具有拮抗作用^[17],所以,土壤有效磷的含量还是要控制在 $60.0 \text{ mg P}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下为好,以免降低土壤有效钾的含量,最终影响到水稻的产量。

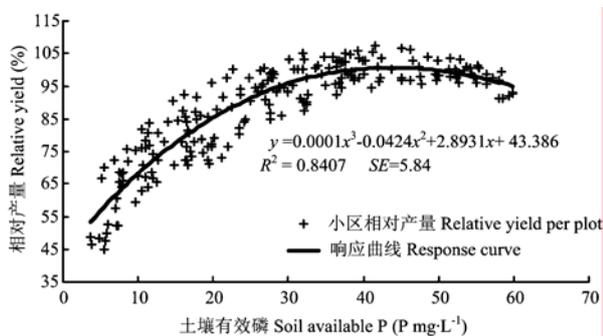


图 2 水稻相对产量与土壤有效磷之间的关系

Fig. 2 The relationship between rice relative yield and soil available P level

2.3 土壤有效钾丰缺指标

土壤有效钾的丰缺指标中的“极低”指标为 $<35.0 \text{ mg K}\cdot\text{L}^{-1}$,“低”为 $35.0\sim 95.0 \text{ mg K}\cdot\text{L}^{-1}$,“中”为 $95.0\sim 175.0 \text{ mg K}\cdot\text{L}^{-1}$,“高”为 $175.0\sim 335.0 \text{ mg K}\cdot\text{L}^{-1}$,“极高”为 $>335.0 \text{ mg K}\cdot\text{L}^{-1}$ 。也是由于海丰农场的土壤为滨海滩涂土,以及多年来海丰农场非常注重钾肥的施用,近一半以上田块土壤有效钾都属于“高”水平,但当土壤有效钾的含量超过 $335.0 \text{ mg K}\cdot\text{L}^{-1}$ 后就会造成水稻减产(图 3),这是由于在土壤有效钾含量高时,土壤溶液的碱度增大,影响了土壤溶液离子间的平衡,不利于水稻根系发育,水稻叶面积反而减少,叶片较硬挺,含水量也较低^[3]。

3 讨论

在不同的土壤类型、气候条件、作物品种、土壤养分测试方法等条件下建立的作物土壤养分丰缺指标是不同的^[3,5]。

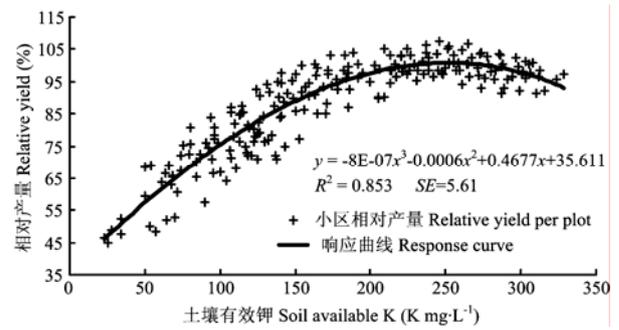


图 3 水稻相对产量与土壤有效钾之间的关系

Fig. 3 The relationship between rice relative yield and soil available K concentration

中国农业科学院国家测土施肥中心实验室、加拿大钾磷研究所中国项目部通过在全国 31 个省(市、自治区)进行大量深入系统研究建立起来的水稻土壤有效氮、磷、钾丰缺指标体系^[18]中有效氮的“极低”水平为 $<20.0 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$ 、“低”为 $20.0\sim 35.0 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$ 、“中”为 $35.0\sim 50.0 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$ 、“高”为 $50.0\sim 100.0 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$ 、“极高”为 $>100.0 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$;有效磷的“极低”为 $<7.0 \text{ mg P}\cdot\text{L}^{-1}$ 、“低”为 $7.0\sim 12.0 \text{ mg P}\cdot\text{L}^{-1}$ 、“中”为 $12.0\sim 24.0 \text{ mg P}\cdot\text{L}^{-1}$ 、“较高”为 $24.0\sim 40.0 \text{ mg P}\cdot\text{L}^{-1}$ 、“高”为 $40.0\sim 60.0 \text{ mg P}\cdot\text{L}^{-1}$ 、“极高”为 $>60.0 \text{ mg P}\cdot\text{L}^{-1}$;有效钾的“极低”为 $<40.0 \text{ mg K}\cdot\text{L}^{-1}$ 、“低”为 $40.0\sim 80.0 \text{ mg K}\cdot\text{L}^{-1}$ 、“中”为 $80.0\sim 120.0 \text{ mg K}\cdot\text{L}^{-1}$ 、“高”为 $120.0\sim 160.0 \text{ mg K}\cdot\text{L}^{-1}$ 、“极高”为 $160.0 \text{ mg K}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这与本研究所建立的丰缺指标体系基本一致,只不过针对滨海滩涂地的水稻田来说,具体的指标值会有小的变动,其中土壤有效氮(铵态氮)丰缺指标均较原 ASI 指标偏低。这是因为在灌溉水稻种植中,土壤中的氮主要以铵态氮的形式存在,所以往往测定铵态氮作为土壤有效氮的诊断内容^[19,20],因此本研究中建立的土壤有效氮丰缺指标体系只是土壤铵态氮丰缺指标体系,其结果和全国平均指标体系^[18]相比均偏低。再者,由于滨海滩涂地土壤质地偏轻,土壤有机质含量偏低,土壤缓冲能力较低^[21-23],从而降低了土壤铵态氮的保持能力;另外,滨海滩涂地灌溉用水为内陆地表水,含有一定氮,因此水稻的生长中会得到来自灌溉水中氮素的补充,从而使土壤有效氮丰缺指标偏低,这和国外的研究结果^[24,25]基本一致。

本研究建立的土壤有效磷和钾的丰缺指标体系和全国平均指标体系^[18]相比基本一致,但本研究的土壤有效钾丰缺指标体系中“过高”指标 ($335.0 \text{ mg K}\cdot\text{L}^{-1}$)

远高于全国的指标 ($160.0 \text{ mg K}\cdot\text{L}^{-1}$), 这是因为在滨海滩涂地上, 土壤本身含盐量较高, 再加之在该地区所种植的水稻品种多是耐盐碱的^[26], 从而使土壤有效钾的“过高”指标值偏高。

尽管本研究结果是在两年大量田间试验的基础上获得的, 但由于影响作物土壤养分丰缺指标体系的因素较多, 且本研究只建立了土壤有效氮、磷、钾的丰缺指标体系, 还需要对其它土壤养分的丰缺指标进行全面研究, 才能更准确地为滨海滩涂地水稻精准施肥提供科学指导。因此, 黄海滨海滩涂地水稻土壤养分丰缺指标体系的建立还将是一个长期艰巨的工作。

ASI 法与田间试验相结合为中国测土推荐施肥提供了一套建立土壤养分丰缺指标体系的系统研究方法, 二者相得益彰。以 ASI 法测土推荐施肥量作为设计田间试验方案的依据, 反过来以田间试验的结果验证并校正 ASI 施肥模型, 通过两三年的田间试验一般就可建立特定作物在特定土壤上的丰缺指标体系。

4 结论

运用土壤养分状况系统分析法 (ASI) 和田间小区试验相结合的方法建立的滨海滩涂地水稻土壤有效氮、磷、钾丰缺指标对 ASI 法土壤养分丰缺指标体系进行了补充和完善, 即土壤有效氮 (铵态氮) 的“极低”指标为 $<2.5 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$, “低”为 $2.5\sim 11.0 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$, “中”为 $11.0\sim 19.5 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$, “高”为 $19.5\sim 34.0 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$, “极高”为 $>34.0 \text{ mg N}\cdot\text{L}^{-1}$; 土壤有效磷的“极低”指标在海丰农场供试田块没有表现出来, “低”为 $<13.0 \text{ mg P}\cdot\text{L}^{-1}$, “中”为 $13.0\sim 28.5 \text{ mg P}\cdot\text{L}^{-1}$, “高”为 $28.5\sim 60.0 \text{ mg P}\cdot\text{L}^{-1}$, “极高”为 $>60.0 \text{ mg P}\cdot\text{L}^{-1}$; 土壤有效钾的“极低”指标为 $<35.0 \text{ mg K}\cdot\text{L}^{-1}$, “低”为 $35.0\sim 95.0 \text{ mg K}\cdot\text{L}^{-1}$, “中”为 $95\sim 175 \text{ mg K}\cdot\text{L}^{-1}$, “高”为 $175.0\sim 335.0 \text{ mg K}\cdot\text{L}^{-1}$, “极高”为 $>335 \text{ mg K}\cdot\text{L}^{-1}$ 。本研究建立的土壤有效氮、磷、钾丰缺指标可以用来指导黄海滨海滩涂水稻田氮、磷、钾肥的精准施用。

致谢: 本研究得到了上海市农委、上海市农工商集团的大力支持, 特别是在样品采集和水稻考种中得到了海丰米业公司农业试验站全体科技工作者的全力帮助, 在此深表感谢。

References

[1] Dahnke W C, Olson R A. Soil test correlation, calibration, and recommendation. In: Westerman R L. *Soil Testing and Plant Analysis*

(3rd ed.). Madison, Wiaconsin USA: Soil Science Society Inc., 1990: 45-71.

[2] 自由路, 张景略, 李有田. 测土施肥的原理与技术. 郑州: 河南科学技术出版社, 1993: 220.

Bai Y L, Zhang J L, Li Y T. *Theory and Technology of Soil Testing and Fertilization*. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1993: 220. (in Chinese)

[3] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国肥料. 上海: 上海科学技术出版社, 1994: 431-450.

Institute of Soil and Fertilizers of Chinese Agricultural Sciences. *Chinese Fertilizers*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1994: 431-450. (in Chinese)

[4] 张福锁. 测土配方施肥技术要鉴. 北京: 中国农业大学出版社, 2006: 93-11.

Zhang F S. *Overview of Soil Testing and Formulation Fertilization*. Beijing: Chinese Agricultural University Press, 2006: 93-11. (in Chinese)

[5] Mallarino A P, Blackmer A M. Comparison methods for determining critical concentrations of soil test phosphorus for corn. *Agronomy Journal*, 1992, 84: 850-856.

[6] Beegle D B, Oravec T C. Comparison of field calibrations for Mehlich 3 P and K with Bray-Kurtz P1 and ammonium acetate K for corn. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 1990, 21: 1025-1036.

[7] Mallarino A P. Interpretation of soil phosphorus tests for corn in soils with varying pH and calcium carbonate content. *Journal of Production Agriculture*, 1997, 10: 163-167.

[8] McCollum R E. Buildup and decline in soil phosphorus: 30-year trends on a Typic Umbrabult. *Agronomy Journal*, 1991, 83: 77-85.

[9] 黄德明. 十年来我国测土施肥的进展. 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. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(4): 495-499. (in Chinese)

[10] 高祥照, 马常宝, 杜 森. 测土配方施肥技术. 北京: 中国农业出版社, 2005: 149.

Gao X Z, Ma C B, Du S. *Soil Testing and Fertilizer Recommendation Technique*. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2005: 149. (in Chinese)

[11] 自由路, 杨俐苹. 我国农业中的测土配方施肥. 土壤肥料, 2006, (2): 3-7.

Bai Y L, Yang L P. Soil testing and fertilizer recommendation in Chinese agriculture. *Soils and Fertilizers*, 2006, (2): 3-7. (in Chinese)

- [12] 加拿大钾磷研究所北京办事处主编. 土壤养分状况系研究法. 北京: 中国农业科技出版社, 1992: 54-70.
PPI/PPIC Beijing Office. *Systematic Approach for Soil Nutrient Evaluation*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1992: 54-70. (in Chinese)
- [13] 杨俐苹, 金继运, 自由路, 黄绍文. 土壤养分综合评价法和平衡施肥技术及其产业化. 磷肥与复肥, 2001, 16(4): 63-65.
Yang L P, Jin J Y, Bai Y L, Huang S W. Comprehensive evaluation of soil nutrients balanced fertilization technique and its industrialization. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2001, 16(4): 63-65. (in Chinese)
- [14] 王圣瑞, 陈新平, 高祥照, 毛达如, 张福锁. “3414”肥料试验模型拟合的探讨. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 409-413.
Wang S R, Chen X P, Gao X Z, Mao D R, Zhang F S. Study on simulation of “3414” fertilizer experiments. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(4): 409-413. (in Chinese)
- [15] 陈新平, 张福锁. 通过“3414”试验建立测土推荐施肥技术指标体系. 中国农技推广, 2006, 22(4): 36-39.
Chen X P, Zhang F S. Establishing technical index system of soil testing and fertilizer recommendation from “3414” experiments. *China Agricultural Technology Extension*, 2006, 22(4): 36-39. (in Chinese)
- [16] 魏义长, 自由路, 杨俐苹, 林昌华, 姚政, 罗国安, 宋韦, 朱春梅. 测土推荐施肥对水稻产量结构及土壤有效养分的影响. 中国水稻科学, 2007, 21(2): 197-202.
Wei Y C, Bai Y L, Yang L P, Lin C H, Yao Z, Luo G A, Song W, Zhu C M. Effects of recommended zinc application according to soil testing on yield components of rice and soil available nutrients. *Chinese Journal of Rice Science*, 2007, 21(2): 197-202. (in Chinese)
- [17] Harrell D L. Chemistry, testing and management of phosphorus and zinc in calcareous Louisiana soils. Ph.D. Dissertation of Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2005: 229.
- [18] 金继运, 自由路, 杨俐苹. 高效土壤养分测试技术与设备. 北京: 中国农业出版社, 2006: 187.
Jin J Y, Bai Y L, Yang L P. *Soil Nutrients Testing and Equipments in High Efficiency*. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 187. (in Chinese)
- [19] Sheehy J E, Dionora M J A, Mitchell P L, Peng S, Cassman K G, Lemaire G, Williams R L. Critical nitrogen concentrations: implications for high-yielding rice (*Oryza sativa* L.) cultivars in the tropics. *Field Crops Research*, 1998, 59: 31-41
- [20] Peng S B, Cassman K G. Upper thresholds of nitrogen uptake rates and associated nitrogen fertilizer efficiencies in irrigated rice. *Agronomy Journal*, 1998, 90: 178-185.
- [21] Suwanarit A, Buranakarn S, Kreetapirom S, Kangkae P, Phumphet J, Phiatanen P, Somboonpong S, Ratanasupa S, Romyen P, Wattanapayapkul S, Naklang K, Rotjanakusol S, Charoendham P, Palaklang W, Satawathananon S, Inthalang W. Equations for calculating N-fertilizer rates for Khaw Dauk Mali-105 rice from soil analysis. *Kasetsart Journal (Nature Sciences)*, 1999, 33: 224-233.
- [22] Hossain M F, White S K, Elahi S F, Sultana N, Choudhury M H K, Alam Q K, Rother J A, Gaunt J L. The efficiency of nitrogen fertiliser for rice in Bangladeshi farmers' fields. *Field Crops Research*, 2005, 93: 94-107.
- [23] Russell C A, Dunn B W, Batten G D, Williams R L, Angus J F. Soil tests to predict optimum fertilizer nitrogen rate for rice. *Field Crops Research*, 2006, 97: 286-301.
- [24] Aivelu K, Subba R A, Sanjay S, Singh K N, Raju N S, Madhuri P. Prediction of optimal nitrogen application rate of rice based on soil test values. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25: 71-73.
- [25] Hasegawa H. High-yielding rice cultivars perform best even at reduced nitrogen fertilizer rate. *Crop Science*, 2003, 43(3): 921-926.
- [26] Juang K W, Liou D C, Lee D Y. Site-specific phosphorus application based on the Kriging fertilizer-phosphorus availability index of soils. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31: 1248-1255.

(责任编辑 李云霞)