

规模经营稻田土壤养分空间变异 特征与高效平衡施肥效应

黄立梅¹, 黄绍文¹, 刘双全², 周 卫¹

(1. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;

2. 黑龙江省农业科学院 土壤肥料研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要: 采用传统统计和地统计相结合的方法, 对规模经营的黑龙江江川农场 76.5 hm² 水稻田土壤养分空间变异特征与高效平衡施肥效应进行了研究。试区土壤养分主要限制因子是 N、P、K 和 Zn, 不同土壤养分的变异情况各不相同; 三种网格(50 m×50 m、100 m×100 m 和 150 m×150 m) 取样尺度下试区 9 个水稻田块间土壤主要养分含量差异总体上均显著, 但同一田块三种网格取样尺度下土壤主要养分含量差异总体上均不显著; 三种网格取样尺度的同一土壤速效养分在空间分布上具有较明显的空间相似性。表明按 150 m×150 m 网格进行土壤取样, 能对规模经营稻田不同田块土壤主要养分状况进行正确评价; 对规模经营的江川农场试区稻田可按田块(6.3~12.9 hm²/田块) 为管理单元进行土壤养分分区管理。在上述工作基础上, 利用作物优质高产推荐施肥咨询服务系统, 形成了试区水稻高效分区平衡施肥技术。该技术增产 4.3%~11.2%, 增收 779~1 532 元/hm², 提高氮肥利用率 12.6~14.0 个百分点。

关键词: 规模经营稻田; 土壤养分; 作物产量; 空间变异; 平衡施肥效应

中图分类号: S143 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2010) 增刊-0205-07

Spatial Variability of Soil Nutrients and Crop Response to Balanced Fertilization in a Rice Production Area under the Collective Contract System

HUANG Li-mei¹, HUANG Shao-wen¹, LIU Shuang-quan², ZHOU Wei¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Soil and Fertilizer Institute, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: This study was conducted to determine spatial variability of soil nutrients and crop response to balanced fertilization in a 76.5 ha rice production area of Jiangchuan farm in Heilongjiang Province using traditional statistics and geo-statistics. The results showed that soil nutrient limiting factors were N, P, K and Zn in the study area. Significant differences in contents of soil nutrients among 9 fields were found under three grid-sampling scales (50 m×50 m, 100 m×100 m and 150 m×150 m). Whereas insignificant differences in contents of each nutrient in soil were observed under the three grid-sampling scales. Distinct spatial distribution similarity for each soil nutrient under the three grid-sampling scales was found with relatively high contents in some areas of the study area and relatively low contents in other areas, indicating that status of main soil nutrients under the collective contract system can be evaluated on 150 m×150 m grid-sampling scale and it was technically feasible to develop regionalized N, P, K and Zn nutrient management at the level of the field in this study area. Regionalized balanced fertilization techniques for high-yield rice production in the study area were developed based on the regionalized soil nutrient GIS maps and a computerized fertilizer recommendation system. The balanced fertilization techniques increased rice yield, income and nitrogen recovery rate by 4.3%–11.2%, 779–1 532 RMB Yuan/ha and 12.6–14.0 percentage point, respectively.

收稿日期: 2010-06-08

基金项目: 国家“973”课题(2007CB109306); 国家科技支撑计划课题(2006BAD02A14; 2006BAD25B01); 现代农业(水稻)产业技术体系建设专项; 国际植物营养研究所(IPNI)项目资助

作者简介: 黄立梅(1984-), 女, 四川泸州人, 硕士, 主要从事土壤养分精准管理研究。

通讯作者: 黄绍文(1965-), 男, 湖南桃源人, 研究员, 博士, 主要从事土壤养分管理与施肥技术研究。

Key words: Rice production area under the collective contract system; Soil nutrients; Spatial variability; Crop yield; Balanced fertilization

水稻是黑龙江的主要粮食作物,2005 年黑龙江省水稻种植面积为 $165.03 \times 10^4 \text{ hm}^2$,产量 $1\,121.5 \times 10^4 \text{ t}$ ^[1]。但在松辽流域水稻生产中氮磷肥施用过量、配比不平衡、肥料利用率低等问题较突出,水稻生产大县桦川县每年化肥施用量高达 $400 \sim 750 \text{ kg/hm}^2$,易造成植株生长过旺,感染稻瘟病或贪青晚熟倒伏^[2,3]。传统推荐施肥技术通过土壤养分测试平均值确定施肥量和施肥方法,易导致低肥力区域肥料施用量不足,作物难以高产,而高肥力区域肥料施用量过量,作物不能充分吸收利用,累积的盈余养分还可能威胁生态环境安全^[3,4]。基于粮食高产、肥料高效、环境友好和农业可持续发展等多重目标,高效利用农田养分资源成为亟待解决的重大技术问题。土壤养分具有高度空间异质性,土壤养分供应与作物养分吸收在空间上的不协调是限制作物高产和养分高效利用的关键因素之一^[5-7]。土壤养分空间变异程度取决于土壤形成过程在空间和时间上的平衡,主要受区域性因素(如气候条件、地形、土壤母质等)和随机因素(如施肥、灌溉、作物品种、田间管理水平等)影响^[8-10];它也是尺度的函数,在区域、景观、地块甚至几厘米的空间范围内都存在变异性^[11-15],某一种取样尺度只能揭示相应的变化规律,某种空间结构特征也只能在一定取样尺度下才能表现出来^[16-18]。土壤养分的空间有效性是导致作物产量空间变异的主要因子,应用 GIS 平台研究土壤养分空间变异性,构建作物产量、土壤养分数据等内容的空间信息数据库,从不同侧面、不同层次提取和组织作物生长过程时空特征信息,进行作物生长对土壤养分变异的响应分析,估算土壤养分限制作物生产的指标水平,是制定变量施肥策略的重要依据^[19]。

目前有部分学者进行了稻田土壤养分空间变异性的研究^[20-21],但多局限于某一取样尺度。我国部分规模化经营农场已初步具备了实施精准农业的基础,但对其养分管理发展模式的探讨报道较少。本研究探讨了规模经营条件下水稻田不同取样尺度土壤养分空间变异特征及高效平衡施肥效应,对我国土壤养分精准管理,实现作物高产和培肥土壤具有一定的指导意义。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

选择黑龙江省桦川县规模经营江川农场二连

76.5 hm^2 连片水稻田作为本研究的试区,该研究区由 9 个农户经营,地处三江平原西部、松花江下游南岸的北部高寒稻区,东经 $130^\circ 16' \sim 131^\circ 34'$,北纬 $46^\circ 37' \sim 47^\circ 14'$,地势平坦,海拔 $60 \sim 70 \text{ m}$,年平均气温 2.5°C ,年降雨量 476 mm ,无霜期 133 d 。土壤类型为水稻土。在水稻生育季节,试区气温高、昼夜温差大、日照时间长、水资源充足,利于水稻生长。

1.2 土壤、植株样品采集

采用 GPS (Promarke³) 全球卫星定位技术,于 2008 年 4 月中旬在水稻种植前按 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 取样尺度采集 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤样品 300 个(图 1)。分别按隔行隔列去掉 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 网格取样点进行二次抽样,形成 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 网格取样点 80 个和 $150 \text{ m} \times 150 \text{ m}$ 网格取样点 35 个。于 2009 年 9 月水稻收获前,按 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 取样尺度采集水稻籽粒和秸秆样品各 80 个。土壤和植株样品风干,磨碎,测定土壤 pH 和速效养分样品过 2 mm 筛,测定土壤 OM 样品过 0.149 mm 筛,测定植株养分样品过 0.25 mm 筛。

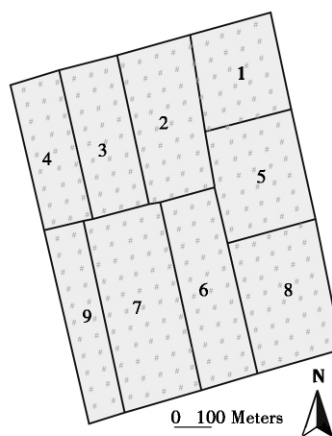


图 1 江川农场稻田试区 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 土壤网格取样点及田块分布图

Fig. 1 Overlay between diagram of soil sampling sites on a $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ grid and map of fields in a rice production area of Jiangchuan farm

1.3 田间试验设计

2009 年 5-9 月在试区中高肥力和中低肥力区域分别安排平衡施肥校验试验(试区土壤养分肥力状况见图 2)。试验处理设计及养分用量见表 1,3 次重复,随机排列,小区面积 30 m^2 。供试水稻品种为空育 131,2009 年 5 月 10 日播种,9 月 8 日收获。供试肥料氮肥为尿素,磷肥为重过磷酸钙,钾肥为氯化钾,锌肥为氧化锌。氮肥 40% 做基肥施用,其余

氮肥按 30%、20%、10% 比例分别作分蘖肥、穗肥和粒肥施用；磷肥、钾肥和锌肥均作基肥施用。收获期各小区单打单收，测定籽粒和秸秆产量，取样分析籽粒和秸秆全氮含量。

表 1 试验处理设计

Tab.1 Experimental treatments

不同肥力区域 Fertility category	处理设计 Treatment	养分用量/(kg/hm ²) Fertilizer application rate			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Zn
中高肥力 Relatively high soil fertility	NPKZn	150.0	60.0	60.0	6.0
	NPK	150.0	60.0	60.0	0.0
	NPKZn - N	0.0	60.0	60.0	6.0
	习惯施肥	165.0	55.0	50.0	0.0
	习惯施肥 - N	0.0	55.0	50.0	0.0
	不施肥	0.0	0.0	0.0	0.0
中低肥力 Relatively low soil fertility	NPKZn	180.0	90.0	90.0	6.0
	NPK	180.0	90.0	90.0	0.0
	NPKZn - N	0.0	90.0	90.0	6.0
	习惯施肥	165.0	55.0	50.0	0.0
	习惯施肥 - N	0.0	55.0	50.0	0.0
	不施肥	0.0	0.0	0.0	0.0

注：N、P、K 和 Zn 分别代表 N、P₂O₅、K₂O 和 Zn，下同。
Note: N, P, K and Zn denote N, P₂O₅, K₂O and Zn, respectively, the same below.

1.4 土壤样品分析

土壤速效 N、P、K 和 Zn 等含量分析应用土壤养分状况系统研究法^[22]；土壤有机质采用 H₂SO₄-K₂CrO₄容量法测定。

植株籽粒和秸秆用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮，消煮液碱化后用蒸馏定氮法测定。

1.5 数据处理

本研究运用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS16.0 进行传统统计分析，采用 GS⁺ 3.1 (Gamma Design Software) 软件进行半方差分析，应用 ArcGIS 平台进行 Kriging 插值分析。

2 结果与分析

2.1 稻田土壤养分空间变异特征

2.1.1 稻田土壤养分状况 按照土壤养分综合系统评价法所设定的土壤养分肥力评价的临界值指标对试区土壤养分状况进行了初步评价。试区土壤主要养分限制因子为 N、P、K 和 Zn (表 2)。试区土壤 N 和 Zn 普遍缺乏，3 种网格 (50 m × 50 m、100 m × 100 m 和 150 m × 150 m) 取样尺度下 N 和 Zn 含量低于临界值的土样数占总土样数的百分数分别为 100% 和 98.3% ~ 100.0%；土壤 P 和 K 有一定程度的缺乏，3 种网格取样尺度下其速效含量低于临界值的土样数占总土样数的百分数分别为 22.7% ~ 31.4% 和 31.3% ~ 40.0%。显示试区土壤养分管理的重点是 N、P、K 和 Zn。

同一田块 3 种网格取样尺度下土壤养分含量差异总体上均不显著 (表 2)，其含量均值的变异系数一般均较小 (表 3)，显示按 150 m × 150 m 网格进

行土壤取样，能对规模经营稻田不同田块土壤主要养分状况进行比较正确的评价。

3 种网格取样尺度下试区 9 个水稻田块间土壤养分含量差异总体上均显著 (表 2)，但田块内取样点间土壤养分含量差异不大，9 个水稻田块间土壤养分含量变异系数总体上差异均不明显 (表 4)，显示对规模经营的江川农场试区稻田可按田块 (6.3 ~ 12.9 hm²/田块) 为管理单元进行土壤养分分区管理。

不同土壤养分的变异情况各不相同 (表 4)，土壤 NO₃⁻-N 和速效 P 测试值变异较大 (35.7% ~ 45.7%)，其次为土壤速效 K、NH₄⁺-N、速效 N (NH₄⁺-N + NO₃⁻-N) 和速效 Zn (变异系数 12.8% ~ 26.0%)，土壤 pH 测试值变异相对较小 (变异系数 4.8% ~ 6.4%)。

2.1.2 水稻田土壤养分的空间分布特征 根据所得到的半方差函数模型，应用地统计学的 Kriging 最优内插法和土壤养分综合系统评价法的养分含量分级标准，对试区稻田土壤 OM 和速效养分含量的空间分布特征进行探讨。图 2 表明，3 种网格取样尺度的土壤 OM 和同一土壤速效养分在空间分布上具有较明显的空间相似性，其含量在一些区域均相对较高，而在其他区域均相对较低。3 种网格取样尺度的土壤 OM 总体上均处于较高水平 (2.0% ~ 4.0%)，在试区东南部含量相对较高，而试区中部含量相对较低。3 种网格取样尺度的土壤速效 N 含量总体上分布比较均匀，均分布在 20.1 ~ 35.0 mg/L 含量等级范围内。3 种网格取样尺度的土壤速效 P 含量总体上均分布在一般缺乏 (6.1 ~ 12.0 mg/L) 和中等 (12.1 ~ 24.0 mg/L) 2 个含量等级范

围内,空间分布上呈较大的斑块状,含量自西北向西南逐渐降低。3种网格取样尺度的土壤速效K含量总体上均分布在一般缺乏(60.1~80.0 mg/L)和中等(80.1~100.0 mg/L)2个含量等级范围内,含量相对较高的区域集中在试区西北部,而含量相对较低的区域均集中分布在试区中东部。3种网格取样尺度的土壤速效Zn含量总体上均分布在一般缺乏

(1.01~2.00 mg/L)含量等级范围内。表明按150 m×150 m网格进行土壤取样,能对规模经营稻田不同田块土壤主要养分状况进行正确评价,可大大降低成本和工作量;对规模经营的江川农场试区稻田可按田块(6.3~12.9 hm²/田块)为管理单元进行土壤养分分区管理,也易于指导平衡施肥和有利于提高生产效益。

表2 试区不同网格取样尺度下各田块土壤pH、OM(%)和速效养分含量(mg/L)均值

Tab. 2 Average soil OM and available nutrient contents and pH in the 9 fields under the three grid-sampling scales in the study area

项目 Item		F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	F 6	F 7	F 8	F 9	Exp. Area
pH	50×50	5.9 a ab	5.9 ab	5.8 a ab	5.9 a ab	5.8 a a	6.2 a c	5.8 a ab	5.9 a b	6.1 a c	5.9
	100×100	5.8 a a	5.9 a ab	5.7 a a	5.9 a ab	5.8 a a	6.1 a bc	5.9 a ab	6.1 a bc	6.2 a c	5.9
	150×150	5.7 a a	6.0 a ab	6.0 a ab	6.0 a ab	5.7 a a	6.5 a b	6.0 a a	6.0 a ab	6.2 a ab	6.0
OM	50×50	2.6 a a	2.8 a bc	2.6 a a	3.0 a c	2.7 a ab	2.9 a c	2.7 a ab	3.3 a d	2.6 a a	2.8
	100×100	2.6 a a	2.9 a a	2.6 a a	2.9 a a	2.7 a a	3.1 a ab	2.7 a a	3.4 a b	2.6 a a	2.9
	150×150	2.6 a a	2.7 a a	2.3 a a	3.3 a a	2.5 a a	2.8 a a	2.9 a a	3.4 a a	2.5 a a	2.8
N	50×50	21.7 a a	23.4 a b	22.9 a ab	22.8 a ab	22.5 a ab	22.4 a ab	22.5 a ab	22.0 a ab	22.5 a ab	22.5
	100×100	21.4 a a	23.5 a a	22.2 a a	23.9 a a	22.3 a a	23.9 a a	21.7 a a	22.3 a a	22.2 a a	22.5
	150×150	23.8 a ab	22.9 a ab	22.4 a ab	26.6 a b	22.7 a ab	21.1 a a	24.7 b ab	23.1 a ab	22.0 a a	23.3
NH ₄ ⁺ -N	50×50	14.7 a a	16.9 a bc	17.4 a bc	16.9 a bc	15.5 a a	16.7 a b	17.6 a c	15.5 a a	14.9 a a	16.4
	100×100	14.2 a a	16.1 a ab	18.8 b c	17.7 a bc	15.3 a a	18.2 b bc	17.6 a bc	15.3 a a	14.1 a a	16.3
	150×150	15.2 a abc	17.2 a abc	16.3 a abc	19.6 a c	16.8 a abc	14.9 a ab	18.1 a bc	16.7 a abc	14.2 a a	16.8
NO ₃ ⁻ -N	50×50	7.0 a cd	6.5 a bed	5.5 a ab	5.8 a abc	6.9 a cd	5.7 a abc	4.9 a b	6.5 a bed	7.7 a d	6.1
	100×100	7.2 a b	7.4 a b	3.4 a a	6.3 a ab	7.0 a b	5.7 a ab	4.1 a a	7.0 a b	8.1 a b	6.1
	150×150	8.6 a a	5.7 a a	6.1 a a	7.0 a a	6.0 a a	6.2 a a	6.6 b a	6.4 a a	7.8 a a	6.6
P	50×50	14.2 a abc	22.8 a f	19.6 a b e	22.7 a f	16.9 a cd	13.3 a ab	16.9 a d	12.1 a a	15.6 a bed	17.0
	100×100	15.4 a ab	24.4 a c	24.7 b c	24.9 a c	16.6 a b	16.1 a ab	17.6 a b	10.0 a a	15.2 a ab	17.6
	150×150	15.3 a abc	23.2 a cd	17.0 a abc	30.4 a d	21.7 a bcd	11.2 a ab	15.1 a ab	10.0 a a	17.0 a abc	17.7
K	50×50	79.5 a abc	78.5 a ab	100.6 a d	105.2 a d	86.6 a bc	77.0 a a	85.2 a bc	88.5 a c	89.9 a c	87.1
	100×100	81.0 a a	83.1 a a	117.8 a c	109.8 a bc	89.9 a a	74.7 a a	88.5 a a	86.5 a a	91.2 a ab	89.8
	150×150	76.5 a a	83.7 a a	83.1 a a	123.1 a b	102.1 a ab	72.6 a a	90.7 a a	82.8 a a	91.5 a ab	88.8
Zn	50×50	1.3 a abc	1.4 a bed	1.6 a e	1.3 a ab	1.4 a cd	1.4 a bc	1.2 a a	1.5 a d	1.4 a cd	1.4
	100×100	1.3 a ab	1.4 a abc	1.6 a c	1.3 a ab	1.4 a abc	1.3 a ab	1.2 a a	1.4 a bc	1.4 a abc	1.3
	150×150	1.2 a a	1.5 a ab	1.5 a ab	1.3 a ab	1.4 a ab	1.5 a ab	1.2 a a	1.4 a ab	1.6 a b	1.4

注:土壤养分肥力评价的临界值(mg/L):N为50,P为12,K为80,Zn为2^[22];50 m×50 m、100 m×100 m和150 m×150 m三种网格取样尺度下土壤样品数分别为300、80和35个;应用LSD法进行多重比较,不同字母表示 $P < 0.05$ 水平差异显著;前边字母表示同一网格取样尺度下9个田块同一养分含量均值比较;后边字母表示同一田块3种网格取样尺度下同一养分含量均值比较。

Note: The critical value of soil nutrient fertility evaluation was 50 for N, 12 for P, 80 for K, 2 for Zn. 300, 80 and 35 sampling sites were evaluated under 50 m×50 m, 100 m×100 m and 150 m×150 m grid-sampling scales, respectively. Means with the same letter are not significantly different at $P < 0.05$ by LSD. Means with the same letter (front) not significantly different for the 9 fields under same grid-sampling scale, whereas means with the same letter (back) within a column are not significantly different for same field under the three grid-sampling scales.

表3 试区三种网格取样尺度下土壤养分含量均值的变异情况

Tab. 3 CV of average soil nutrient contents under the three grid-sampling scales in the study area (CV, %)

项目 Item	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	F 6	F 7	F 8	F 9	Exp. Area
pH	1.7	1.0	2.6	1.0	1.0	3.3	1.7	1.7	0.9	1.0
OM	0.0	3.6	6.9	6.8	4.4	5.2	4.2	1.7	2.2	2.0
N	5.9	1.4	1.6	8.0	0.9	6.2	6.8	2.5	1.1	2.0
NH ₄ ⁺ -N	3.4	3.4	7.2	7.7	5.1	10.0	1.6	4.8	3.0	1.6
NO ₃ ⁻ -N	11.5	13.0	28.4	9.5	8.3	4.9	24.6	4.8	2.6	4.6
P	4.4	3.5	19.2	15.3	15.6	18.2	7.8	11.3	5.9	2.2
K	2.9	3.5	17.3	8.2	8.8	2.9	3.1	3.4	0.9	1.5
Zn	4.6	4.0	3.7	0.0	0.0	7.1	0.0	4.0	7.9	4.2

表 4 试区不同取样尺度下土壤养分变异情况

Tab.4 CV of soil nutrient content under different grid-sampling scales in the study area (CV %)											
	项目 Item	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	F 6	F 7	F 8	F 9	Exp. Area
pH	50 × 50	6.7	5.5	3.6	3.5	3.8	6.5	5.2	5.6	5.4	5.6
	100 × 100	4.7	3.6	4.7	3.9	3.1	4.5	4.5	5.1	6.5	4.8
	150 × 150	11.3	5.3	3.5	6.8	2.5	10.0	3.6	3.5	7.7	6.4
OM	50 × 50	7.6	12.7	11.7	11.8	12.7	23.7	17.6	10.7	9.3	16.4
	100 × 100	8.5	18.0	12.0	11.6	17.9	28.8	18.5	10.4	8.9	17.9
	150 × 150	0.0	9.4	17.8	4.6	17.0	31.2	19.4	7.8	6.9	18.4
N	50 × 50	7.6	16.0	9.7	19.1	14.8	17.4	12.7	13.2	8.6	13.9
	100 × 100	9.6	10.2	7.8	18.2	13.7	24.1	8.7	10.6	5.5	12.8
	150 × 150	0.6	8.6	7.2	22.1	10.6	12.8	13.4	10.4	9.7	12.8
NH ₄ ⁺ -N	50 × 50	11.1	13.4	8.9	20.3	9.1	11.0	11.7	12.8	7.2	13.7
	100 × 100	10.9	14.3	4.5	22.6	7.8	10.1	9.4	12.7	5.3	14.9
	150 × 150	20.5	17.1	2.5	31.1	1.3	12.7	15.0	17.1	7.9	17.6
NO ₃ ⁻ -N	50 × 50	28.2	56.0	41.8	30.4	45.5	61.1	47.5	36.7	29.9	45.2
	100 × 100	37.3	50.2	44.0	27.1	36.5	80.5	43.9	29.0	22.0	45.7
	150 × 150	37.8	45.7	29.0	15.7	36.8	63.0	33.3	28.5	35.1	35.7
P	50 × 50	19.9	34.5	24.0	28.3	20.6	29.7	40.2	33.0	28.3	37.9
	100 × 100	20.4	43.6	26.2	33.5	24.5	27.4	46.1	22.3	29.2	44.3
	150 × 150	19.0	27.8	4.5	37.8	3.6	33.5	42.7	9.0	39.2	44.1
K	50 × 50	19.8	25.4	23.0	15.6	23.3	23.9	25.0	14.3	21.7	23.5
	100 × 100	9.7	31.0	14.2	14.6	22.4	30.4	23.8	10.7	20.8	22.8
	150 × 150	24.4	27.6	21.0	5.4	16.9	19.0	33.4	10.5	23.1	26.0
Zn	50 × 50	13.6	16.7	14.1	17.2	11.5	16.7	18.2	15.2	16.8	17.1
	100 × 100	17.6	21.3	8.0	22.2	11.2	6.4	16.2	12.0	16.7	16.4
	150 × 150	11.8	14.3	10.4	18.9	20.2	9.8	14.9	14.3	18.4	16.5

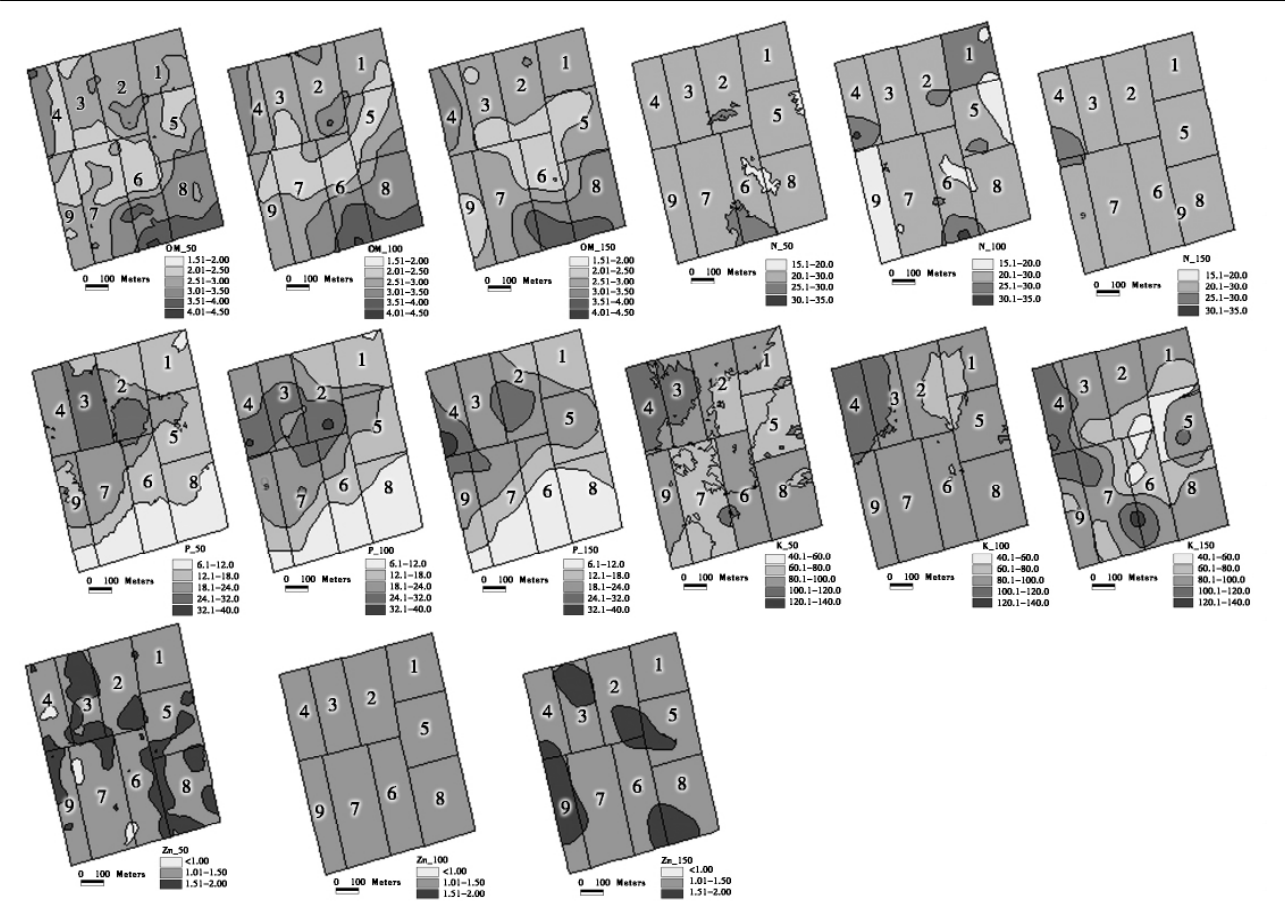


图 2 试区三种取样尺度下土壤 OM(%) 和速效养分(mg/L) 分布与田块叠加图

Fig.2 Overlay between map of fields and contour map of soil OM and available nutrients under the three grid-sampling scales in the study area

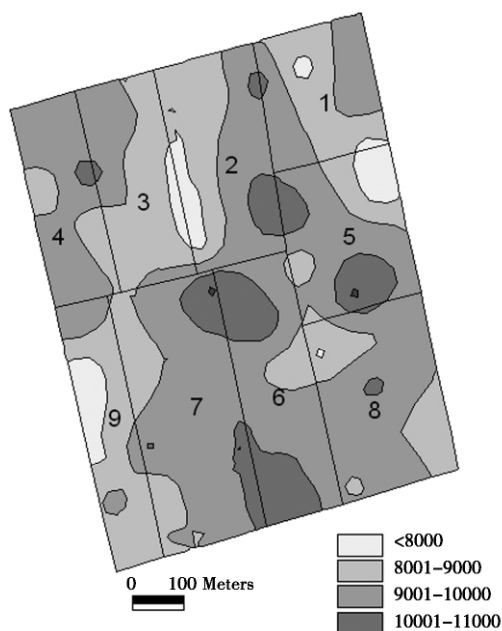


图3 试区水稻籽粒产量(kg/hm^2)的空间分布图
Fig.3 Overlay between map of fields and contour
map of rice grain yield in the study area

2.2 水稻产量空间分布特征

许多土壤特性变量都与作物产量相关,但相关程度则随研究区域的具体条件有所差异,且在地块之间差别较大^[23]。利用地统计方法进行作物产量空间变异特征分析是获取田间变异信息、反映作物产量潜力、研究作物高产高效生产模式快速而有效

的方法。试区水稻籽粒产量变幅为 $7\,300 \sim 11\,200 \text{ kg}/\text{hm}^2$,平均 $9\,192 \text{ kg}/\text{hm}^2$,试区产量变异系数为 9.7% ,表明试区水稻籽粒产量空间分布总体上变异较小,其中田块4、5、6、7和8产量相对较高,田块9和3产量相对较低(图3)。相关分析表明,水稻籽粒产量的空间变异与土壤OM和速效N的空间变异之间密切相关(相关系数分别为0.30和0.25; $n=80$, $r_{0.05}=0.22$, $r_{0.01}=0.28$)。

2.3 稻田高产高效平衡施肥效应

在明确试区土壤养分限制因子与空间分布特征等工作基础上,应用已建成的作物优质高产平衡施肥咨询服务系统,同时综合考虑各种大、中、微量营养元素均衡供应的原则,在试区不同肥力区域开展了水稻高效平衡施肥校验研究。

表5表明,中高肥力区域水稻高效平衡施肥的增产幅度较小,能较明显提高经济效益,而中低肥力区域平衡施肥能显著提高水稻产量和经济效益;试区水稻施用锌肥效果不明显(表5)。平衡施肥与习惯施肥比较,中高肥力区域水稻增产4.3%,增收778.70元/ hm^2 ;中低肥力区域水稻增产11.2%,增收1532.00元/ hm^2 。

试区水稻高效平衡施肥能显著提高氮肥利用率。平衡施肥的氮肥利用率为35.9%~40.1%,比习惯施肥提高12.6~14.0个百分点。

表5 试区水稻高效平衡施肥的增产增收效果

Tab.5 Response of site-specific balanced fertilization in rice in the study area

不同肥力 区域 Fertility category	处理 Treatment	产量 / (kg/hm^2)				增产 / % Yield increase	收入 /(元/ hm^2) Income	增收 /(元/ hm^2) Income increase	氮肥利用率 / % Recovery rate for applied N
		I	II	III	平均 Mean				
中高肥力区域 Relatively high soil fertility	NPKZn	9 850.0	9 875.0	9 950.0	9 891.7	3.0	17 412.67	451.20	35.9
	NPK	9 900.0	10 350.0	9 800.0	10 016.7	4.3	17 740.17	778.70	
	习惯施肥	9 950.0	9 600.0	9 250.0	9 600.0	—	16 961.50	—	23.3
	不施肥	7 275.0	6 975.0	6 850.0	7 033.3		13 363.33		
中低肥力区域 Relatively low soil fertility	NPKZn	9 350.0	10 650.0	9 450.0	9 816.7	5.0	16 820.17	333.70	40.1
	NPK	10 250.0	10 650.0	10 300.0	10 400.0	11.2	18 018.50	1 532.00	
	习惯施肥	9 450.0	9 350.0	9 250.0	9 350.0	—	16 486.50	—	26.1
	不施肥	6 050.0	5 925.0	6 000.0	5 991.7		11 384.17		

注:2009年N、 P_2O_5 、 K_2O 、Zn和水稻籽粒价格分别为4.35、5.65、5.00、15.00和1.90元/kg;土壤N素贡献为不施N处理的水稻地上部吸N量。

Note: Price of N, P_2O_5 , K_2O , Zn and rice grains in 2009 is 4.35, 5.65, 5.00, 15.00 and 1.90 IMB Yuan/kg, respectively. The contributed N from soil is a total N uptake of rice straw and grain without N fertilizer.

3 结论

规模经营的江川农场水稻试区,土壤养分主要限制因子是N、P、K和Zn。3种网格(50 m × 50 m、100 m × 100 m和150 m × 150 m)取样尺度下试区9个水稻田块间土壤主要养分含量差异总体上均显著,但同一田块3种网格取样尺度下土壤主要养分含量差异总体上均不显著。3种网格取样尺度的

同一土壤速效养分在空间分布上具有较明显的空间相似性。表明按150 m × 150 m网格进行土壤取样,能对规模经营稻田不同田块土壤主要养分状况进行正确评价;对规模经营的江川农场试区稻田可按田块(6.3~12.9 hm^2 /田块)为管理单元进行土壤养分分区管理。

试区水稻籽粒产量的空间分布总体上变异较小,其空间变异与土壤OM和速效N的空间变异之

间密切相关。由于作物产量不仅受到土壤养分状况影响,还受到作物品种、施肥、气候、田间管理等因素的影响,因此建立土壤有效养分含量和作物生长的关系模型还需要考虑更多参数,有待于进一步的研究。

水稻高效分区平衡施肥在中高和中低肥力区域均能较明显提高产量、经济效益和氮肥利用率。分区平衡施肥比农民习惯施肥增产 4.3% ~ 11.2%,增收 779 ~ 1 532 元/hm²,提高氮肥利用率 12.6 ~ 14.0 个百分点。

参考文献:

- [1] 国家粮食局. 中国粮食年鉴 [M]. 北京: 经济管理出版社 2006: 586
- [2] 杨忠生, 赵丽岩, 刘君阁. 桦川县土壤肥力现状及有机肥、化肥施用调查与思考 [J]. 黑龙江农业科学, 2005 (4): 39 - 49.
- [3] 王秀娟, 刘瑞民, 何孟常. 松辽流域非点源污染 TN 时空变化特征研究 [J]. 水土保持研究, 2009, 16(4): 192 - 202.
- [4] 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响 [J]. 生态环境, 2003, 12(1): 24 - 28.
- [5] Warrick A W, Nielsen D R. Spatial variability of soil physical properties in the field [M] // Hillel D. Applications of Soil Physics. London: Academic Press, 1980: 319 - 344
- [6] 徐海燕, 聂宜民, 赵文武. 寿光市土壤养分特性及空间变异性分析 [J]. 农业现代化研究, 2009, 30(1): 118 - 121.
- [7] Frauke K B, Robert F S, Helmut E. Soil nutrient-landscape relationships in a lowland tropical rainforest in Panama [J]. Forest Ecology and Management, 2008(255): 1135 - 1148.
- [8] Samake O, Smaling E M A, Kropff M J, et al. Effects of cultivation practices on spatial variability of soil fertility and millet yields in the Sahel of Mali [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, 109(3-4): 335 - 345.
- [9] Lina Lindell, Mats Åström, Tomas Öberg. Land-use versus natural controls on soil fertility in the Subandean Amazon, Peru [J]. Science of the Total Environment, 2010 (408): 965 - 975.
- [10] 杨艳丽, 史学正, 于东升. 区域尺度土壤养分空间变异及其影响因素研究 [J]. 地理科学, 2008, 28(6): 788 - 792.
- [11] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soil [J]. Soil Sci Soc Am J, 1994(58): 1501 - 1511.
- [12] 赵莉敏, 史学正, 黄耀等. 太湖地区表层土壤养分空间变异的影响因素研究 [J]. 土壤, 2008, 40(6): 1008 - 1012.
- [13] Emmerling C, Udelhoven T. Discriminating factors of the spatial variability of soil quality parameters at landscape-scale [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2002, 165(6): 706 - 712.
- [14] Gisela Wachinger, Sabine Fiedler, Kornelia Zepp, et al. Variability of soil methane production on the micro-scale: spatial association with hot spots of organic material and Archaeal populations [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000(32): 1121 - 1130.
- [15] Brian Slater. Spatial Variability [J]. Encyclopedia of Soil Science, 2006, 1(1): 1670 - 1674.
- [16] Saldan a A, Stein A, Zinck J A. Spatial variability of soil properties at different scales within three terraces of the Henares River (Spain) [J]. Catena, 1998(33): 139 - 153.
- [17] Wilcke W. Small-scale variability of metal concentrations in soil leachates [J]. Soil Sci Soc Am J, 2000, 64: 138 - 143
- [18] 于婧, 聂艳, 周勇, 等. 江汉平原典型区农田土壤全氮空间变异的多尺度套合 [J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 938 - 944
- [19] Parkin T B. Spatial variability of microbial process in soil - a review [J]. Environ Qual, 1993, 22: 409 - 417.
- [20] 徐英, 陈亚新, 史海滨, 等. 土壤水盐空间变异尺度效应的研究 [J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 1 - 5.
- [21] 唐国勇, 苏以荣, 肖和艾, 等. 湘北红壤丘岗稻田土壤有机碳、养分及微生物生物量空间变异 [J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1): 15 - 21.
- [22] 加拿大钾磷研究所北京办事处. 土壤养分状况系统研究法 [J]. 北京: 中国农业科技出版社, 1992.
- [23] Han S, Hummel J W, Goering C E, et al. Cell size selection for site-specific crop management [J]. Trans, ASAE, 1994, 37: 19 - 26.