

水稻产量对川西平原基础肥力和施肥的响应

郑盛华 陈红琳 朱孟琦 沈学善 陈尚洪 张楚儿 刘定辉*

(四川省农业科学院 土壤肥料研究所/农业农村部西南山地农业环境重点实验室,成都 610066)

摘要 为探明川西平原水田两熟区水稻产量对土壤基础肥力和施肥的响应,进一步指导水稻合理施肥和土壤培肥,2016—2017年通过在四川省绵竹市高、中、低产田水稻施肥和不施肥对比试验,研究基础肥力和施肥对水稻产量的影响。结果表明:试验点基础肥力贡献率为高产田>中产田>低产田,2016年平均基础肥力贡献率分别为84.5%、75.7%和72.5%,2017年分别为85.0%、80.7%和70.6%。水稻常规施肥产量与基础肥力产量呈极显著正相关($P<0.01$)。相同施肥水平下,各田块水稻增产幅度均表现为低产田>中产田>高产田。常规施肥下,2016年高、中和低产田平均增产19.3%、34.1%和40.0%;2017年平均增产为17.9%、24.6%和43.3%。连续不施肥处理下,各试验点基础肥力产量呈下降趋势,平均下降幅度达14.4%。有效穗数和千粒重是引起产量差异的主要因素。川西平原水稻基础肥力贡献率随基础肥力升高而升高,肥料贡献率则随基础肥力升高而降低。针对不同基础肥力合理施肥是保障水稻高产稳产的重要因素。该研究为川西平原水田两熟区不同基础肥力下水稻合理施肥提供参考依据。

关键词 水稻; 基础肥力; 施肥; 生长动态; 产量

中图分类号 S158 **文章编号** 1007-4333(2018)12-0013-08 **文献标志码** A

Responses of rice yields to basic soil fertility and fertilization in Western Sichuan Plain

ZHENG Shenghua, CHEN Honglin, ZHU Mengqi, SHEN Xueshan,
CHEN Shanghong, ZHANG Chuer, LIU Dinghui*

(Soil and Fertilizer Institute /Key Laboratory of Agricultural Environment in Southwest Mountain Areas of
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

Abstract To provide a method for reasonable fertilization and soil fertility improvement, the responses of rice yields to soil basic fertility and fertilization were studied in double-cropping paddy fields of Western Sichuan Plain of China, in order. Two-year field trails were conducted to investigate the effects of basic fertility and fertilization on the yields of rice by comparing the fertilization and non-fertilization of rice in high, medium and low yield fields in Mianzhu City, Sichuan Province. Two-factor randomized block design was used in the trial. The main factor was basic fertility, and the secondary factor was fertilization treatment, with 3 repetitions per treatment. The results showed: The contribution rates of basic fertility in descending order was high yield fields>medium yield fields>low yield fields. The average contribution rates of basic fertility were 84.5%, 75.7% and 72.5% in 2016, and 85.0%, 80.7% and 70.6% in 2017, respectively. There were significant positive correlations between the conventional fertilization and basic fertility ($P<0.01$). Under the same fertilization, growth rate of yields showed low yield fields>medium yield fields>high yield fields. Under the conventional fertilization, the average yield of high, medium and low yield fields increased by 19.3%, 34.1%, 40.0% in 2016, and 17.9%, 24.6%, 43.3% in 2017, respectively. Furthermore, under continuous non-fertilization, the base yields showed an average decline of 14.4%. Effective spike and 1 000-grain weight were the

收稿日期: 2018-03-13

基金项目: 农业部公益性行业(农业)科研专项(201503122-13);国家重点研发计划(2017YFD03017)

第一作者: 郑盛华,助理研究员,主要从事水田两熟与农业环境研究,E-mail:crazyzsh@163.com

通讯作者: 刘定辉,研究员,主要从事作物生态与农业环境研究,E-mail:dinghui@163.com

main factors of yield difference. The contribution rate of basic fertility increased with the increase of basic fertility, and the contribution rate of fertilizer decreased with the increase of basic fertility, in the trails of western Sichuan Plain. Consequently, rational fertilization under different base fertility was an important factor to ensure high and stable rice yields. This study provided references for rational fertilization under different base conditions in the paddy fields of Western Sichuan Plain.

Keywords rice; basic fertility; fertilization; growth dynamics; yield

中国水稻产量近年来稳步增长^[1]。不合理的施肥管理带来的土壤退化、氮磷累积污染等问题仍较为突出^[2-3]。土壤基础肥力指特定立地条件、土壤剖面、农田基础建设水平下,经过多年培肥后,当季旱地无水肥投入,水田无养分投入时的土壤生产能力^[4],通常以不施肥条件下作物产量来估算^[5]。针对土壤基础肥力水平采取针对性施肥培肥管理,是提高作物产量和土壤持续生产力的有效途径^[6-7]。鲁艳红等^[8]研究认为,合理施肥可以提高土壤肥力,挖掘农田生产潜力,增加作物产量,可以减少环境风险。乔磊等^[9]研究表明,土壤基础肥力与最佳管理条件下的水稻产量呈显著正相关,土壤基础肥力越高,对产量的贡献越大,产量更加稳定。合理施肥是保证土壤高强度种植下产量稳定性、土壤基础肥力持续性的重要措施^[10]。但也有研究认为长期平衡施肥在提高土壤综合肥力的同时,对作物增产效果减弱,应调控施肥量或间隔不施肥以减轻土壤负担^[11]。目前四川水田两熟区,水稻生产中不合理施肥或过量施肥导致作物产量不稳定、土壤氮磷累积

等农业环境问题。川西平原不同基础肥力下施肥与水稻生长、产量响应的研究报道较少。本研究旨在通过田间定位试验,探究川西平原基础肥力和施肥对水稻生长动态和产量的响应关系,以期为四川地区不同基础肥力水平下针对性地施肥管理,提高水稻产量和土壤可持续生产力提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 试验地概况

试验于2016年4月—2017年10月在四川省绵竹市典型水田两熟区孝德镇(31°16'N,104°13'E)、遵道镇(31°21'N,104°07'E)、富新镇(31°21'N,104°14'E)进行。试验地年平均气温15.7℃,≥10.0℃的积温全年为5 000~6 500℃;≥10.0℃的积温天数全年为240~300 d;多年平均降水量1 053.2 mm,年日照时数1 011 h。参照平均单产法^[9]在每个镇分别确定水稻高产、中产、低产田试验点各1个,共9个试验点,各试点0~20 cm土层基础土壤养分见表1,种植模式为“水稻-青菜”。

表1 试验地土壤基础养分
Table 1 Soilbase nutrients in test sites

地点 Site	类别 Type	有机质/ (g/kg) Organic matter	pH	全氮/ (g/kg) Total N	全磷/ (g/kg) Total P	质量分数 全钾/ (g/kg) Total K	Mass fraction 碱解氮/ (mg/kg) Alkaline N	有效磷/ (mg/kg) Available P	速效钾/ (mg/kg) Available K
	高产田	36.8	5.2	2.11	0.81	19.78	186	15.4	109
孝德镇	中产田	32.9	5.3	1.95	0.92	20.50	156.	6.2	63
	低产田	22.7	6.7	1.38	0.81	20.94	101	11.6	81
富新镇	高产田	29.0	5.8	1.74	0.75	19.43	156	18.2	58
	中产田	31.0	5.7	1.64	1.41	19.69	127	22.9	75
	低产田	37.7	5.4	2.10	0.87	17.20	144	8.3	44
遵道镇	高产田	40.7	5.8	1.76	0.58	14.57	140	8.9	68
	中产田	24.6	5.8	1.33	0.46	12.87	95	4.0	42
	低产田	21.8	5.6	1.25	0.56	14.23	118	6.8	45

1.2 试验设计

每个镇设3个试验点,采用二因素随机区组设计,主因素为基础肥力水平,设高、中和低产田3个水平,副处理为施肥处理,2016年试验设置常规施肥(CF)、不施肥(CK)处理,2017年试验增加优化施肥(OF)处理。小区面积为 $6.0\text{ m}\times 5.0\text{ m}$,每个处理3次重复。小区四周用塑料薄膜扎埂隔离,埂宽 0.3 m 。水稻品种孝德镇为川优6203,富新镇为天优华占,遵道镇2016年为Y两优973,2017年为川优6203,均为当地大面积推广品种。水稻行株距 $25\text{ cm}\times 16\text{ cm}$ 。

常规施肥为移栽前基施纯 N 、 P_2O_5 、 K_2O 为99.0、36.0和 45.0 kg/hm^2 ,分孽期追施纯 N 51.8 kg/hm^2 。优化施肥为移栽前基施纯 N 、 P_2O_5 、 K_2O 为92.4、33.6和 42.0 kg/hm^2 ,分孽期追施纯 N 为 34.5 kg/hm^2 ,穗肥追施纯 N 和 K_2O 分别为13.8和 18.0 kg/hm^2 。基肥为水稻专用肥(N 、 P_2O_5 、 K_2O 质量比为22:8:10),追肥为尿素(含 $\text{N}\geq 46\%$),钾肥氯化钾($\text{K}_2\text{O}\geq 60\%$)。其中优化施肥根据试验点土壤养分测定情况,进行了施用量优化和施肥次数运筹。其他管理措施按当地高产管理。

1.3 测试项目

收获期每小区取代表性的连续5穴,调查穗粒数、结实率和千粒重。小区实收测产,测籽粒含水量,去除杂质,折算实际产量。

1.4 数据处理

为评价水稻产量对土壤基础肥力和肥料响应,计算土壤基础肥力贡献率、肥料贡献率和肥料增产率。其中:基础肥力贡献率 $=Y_{\text{CK}}/Y_{\text{CF}}\times 100\%$;肥料贡献率 $=(Y_{\text{CF}}-Y_{\text{CK}})/Y_{\text{CF}}\times 100\%$;肥料增产率 $=(Y_{\text{CF}}-Y_{\text{CK}})/Y_{\text{CK}}\times 100\%$ 。式中: Y_{CK} 为CK处理产量, Y_{CF} 为常规施肥产量。

试验数据用EXCEL 2007和SPSS 19.0软件进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 基础肥力和施肥对水稻产量及其构成因素的影响

如表2所示,孝德镇CK处理2016和2017年产量均表现为高产田>中产田>低产田,2016年高产田CK产量达到 $7\,932.5\text{ kg/hm}^2$,显著高于中、低产田,较中产田增加32.8%,较低产田增加33.3%。CF处理下高、中、低产田产量基本持平,均较CK大幅增高。从2017年水稻产量看,总体趋势表现为高

产田>中产田>低产田,OF处理中、低产田较CF处理增产。从产量构成因素看,高产田的千粒重和有效穗数均显著高于中、低产田。

如表3所示,富新镇2016和2017年CK处理产量也表现为高产田>中产田>低产田,其中2016年各小区产量差异在 $459\sim 595\text{ kg/hm}^2$ 。CF处理高产田产量达 $11\,719.5\text{ kg/hm}^2$,显著高于低产田,增幅为26.6%。2017年CK产量,高产田较中和低产田分别增产16.7%和29.8%。CF处理各小区产量顺序为低产田>高产田>中产田,产量均超过 $9\,000\text{ kg/hm}^2$ 。OF处理各小区产量较CF处理产量略微升高。从产量构成因素看,2016年高产田和中产田有效穗数显著高于低产田。2017年高产田千粒重显著高于低产田($P<0.05$)。

由表4可知,遵道镇2016和2017年CK产量均为高产田>中产田>低产田。其中2016年CK处理下高产田产量显著高于中、低产田,增幅分别为25.5%和43.4%。CF处理中高产田产量较CK增产7.1%。但CF和OF处理产量均为低产田最高,高产田OF产量较CF有所降低,中产田OF较CF增产4.1%,较CK增产23.4%。从产量构成因素上看,产量差异主要表现于有效穗数和穗粒数,其中OF处理下高产田和中产田有效穗数、千粒重达显著差异($P<0.05$)。2016年产量构成因素中,除穗粒数外高产田其余各项因素均为最高,其中千粒重达显著差异($P<0.05$)。

2.2 基础肥力产量和常规施肥产量的关系

如表5所示,2016—2017年3个试验点的水稻基础肥力贡献率均为高产田>中产田>低产田,其中2016年平均基础肥力贡献率分别为84.5%、75.7%和72.5%;2017年分别为85.0%、80.7%和70.6%。相同施肥水平下,各田块水稻增产幅度均表现为低产田>中产田>高产田,其中2016年高产田平均增产为19.3%、中产田为34.1%、低产田为40.0%;2017年高产田平均增产为17.9%、中产田为24.6%、低产田为43.3%。肥料贡献率和肥料增产率也均表现为低产田>中产田>高产田。基础肥力产量随基础肥力下降而降低,连续不施肥下2017年CK平均产量较2016年下降达14.4%。2017年试验中,常规施肥和优化施肥较CK处理分别平均增产28.6%、31.1%。如图1所示,相关性分析表明,2016—2017年常规施肥产量与基础肥力产量呈极显著正相关($P<0.01$)。

表2 孝德镇水稻产量及其构成因素

Table 2 The rice yields and its components of Xiaode Town

年份 Year	类别 Type	有效穗数/ ($\times 10^4 / \text{hm}^2$)			穗粒数 Spikelet No. per panicle			结实率/% Seed setting rate			千粒重/g 1 000-grain weight			产量/(kg/hm ²) Yield		
		CK	CF	OF	CK	CF	OF	CK	CF	OF	CK	CF	OF	CK	CF	OF
2016	高产田	161.9 a	203.9 a		156.0 a	142.0 a		88.6 a	86.3 b		30.4 a	29.3 a		7 932.5 a	9 392.8 a	
	中产田	140.9 ab	203.9 a		139.0 a	153.0 a		93.2 a	91.7 a		28.5 b	29.3 a		5 974.5 b	9 460.3 a	
	低产田	131.9 b	184.4 a		147.0 a	145.0 a		90.5 a	91.8 a		27.9 b	29.5 a		5 947.5 b	9 478.3 a	
2017	高产田	217.2 a	240.2 a	263.2 a	147.8 a	132.1 a	116.7 a	82.0 a	79.7 a	72.8 a	26.4 a	27.4 a	25.7 ab	7 140.9 a	8 022.5 a	7 571.2 a
	中产田	201.9 a	242.8 a	268.3 a	127.6 a	134.9 a	133.4 a	81.3 a	80.1 a	75.5 a	25.9 a	25.6 b	24.9 b	6 385.3 ab	7 518.7 a	8 481.3 a
	低产田	161.0 a	209.6 a	184.0 a	133.4 a	98.8 a	127.0 a	83.5 a	75.2 a	70.4 a	25.3 a	27.7 a	27.2 a	5 118.4 b	6 629.7 ab	6 797.6 ab

注:CK;不施肥;CF;常规施肥;OF;优化施肥。同列数据后不同字母表示差异达0.05显著水平。下同。

Note: Different letters denote significant differences at 5% level. The same below.

表3 富新镇水稻产量及其构成因素

Table 3 Rice yields and its components of Fuxin Town

年份 Year	类别 Type	有效穗数/ ($\times 10^4 / \text{hm}^2$)			穗粒数 Spikelet No. per panicle			结实率/% Seed setting rate			千粒重/g 1 000-grain weight			产量/(kg/hm ²) Yield		
		CK	CF	OF	CK	CF	OF	CK	CF	OF	CK	CF	OF	CK	CF	OF
2016	高产田	205.4 a	244.4 a		144.0 b	178.0 a		95.9 a	92.9 a		31.5 a	25.4 b		88 51.5 a	11 719.5 a	
	中产田	182.9 b	233.9 a		149.0 b	165.0 a		94.5 a	94.6 a		25.5 b	29.0 a		82 56.0 a	10 342.5 ab	
	低产田	125.9 c	161.9 b		191.0 a	174.0 a		94.4 a	93.6 a		29.0 ab	30.9 a		77 97.0 a	9 258.0 b	
2017	高产田	263.2 a	255.6 a	273.4 a	155.5 a	175.6 a	157.0 a	82.9 a	86.8 a	73.6 ab	22.9 a	22.5 a	22.6 a	8 211.4 a	10 172.4 a	10 331.3 a
	中产田	207.0 a	242.8 a	293.9 a	168.8 a	191.8 a	167.9 a	86.7 a	86.0 a	77.0 a	21.5 b	22.7 a	23.0 a	7 037.5 a	9 677.7 a	9 857.6 a
	低产田	242.8 a	288.8 a	304.1 a	145.8 a	160.9 a	138.4 a	72.8 a	72.8 b	63.5 b	22.3 ab	23.1 a	22.0 a	6 331.3 a	10 533.2 a	10 547.2 a

表 4 遵道镇水稻产量及其构成因素

Table 4 Rice yields and its components of Zundao Town

年份 Year	类别 Type	有效穗数/ ($\times 10^4 / \text{hm}^2$)		穗粒数 Spikelet No. per panicle		结实率/% Seed setting rate		千粒重/g 1 000-grain weight		产量/(kg/hm ²) Yield		
		CK	CF	OF	CK	CF	OF	CK	CF	CK	CF	OF
	高产田	172.4 a	196.4 a	140.0 a	172.0 a	94.7 a	96.5 a	28.6 a	28.3 a	9 054.0 a	9 699.0 a	
2016	中产田	134.9 ab	184.4 a	183.0 a	186.0 a	92.5 a	92.9 a	27.8 a	27.5 b	7 213.5 b	8 569.5 ab	
	低产田	125.9 b	181.4 a	168.0 a	181.0 a	93.1 a	94.0 a	27.4 a	27.5 b	6 313.5 b	8 946.0 a	
	高产田	191.7 a	255.6 a	186.6 b	115.7 a	142.5 a	87.5 a	77.6 a	25.5 a	26.2 a	5 866.6 a	6 506.7 a
2017	中产田	168.7 a	224.9 a	195.0 a	116.3 a	136.8 a	137.3 a	84.0 a	82.5 a	23.9 b	5 554.7 a	6 586.2 a
	低产田	171.2 a	204.4 a	225.1 a	134.1 a	140.7 a	136.8 a	83.4 a	72.9 a	25.1 ab	5 454.3 a	7 314.8 a

表 5 不同基础肥力稻田基础肥力贡献率

Table 5 Basicfertility contribution rates in different basic fertile rice fields

年份 Year	类型 Type	CK 平均产量/ (kg/hm ²)		CF 平均产量/ (kg/hm ²)		基础肥力贡献率/% Contributionrates of basic fertility		肥料贡献率/% Contribution rate of fertilizer	
		Average yields of CK	Average yields of CF	Contributionrates of basic fertility	Contribution rate of fertilizer	Contribution rate of fertilizer	Output growth rate of fertilizer		
	高产田	8 612.7	10 270.4	83.9	16.1	19.2			
2016	中产田	7 148.0	9 457.4	75.6	24.4	32.3			
	低产田	6 686.0	9 227.4	72.5	27.5	38.0			
	高产田	7 073.0	8 360.3	84.6	15.4	18.2			
2017	中产田	6 325.8	7 927.5	79.8	20.2	25.3			
	低产田	5 634.7	8 159.2	69.1	30.9	44.8			

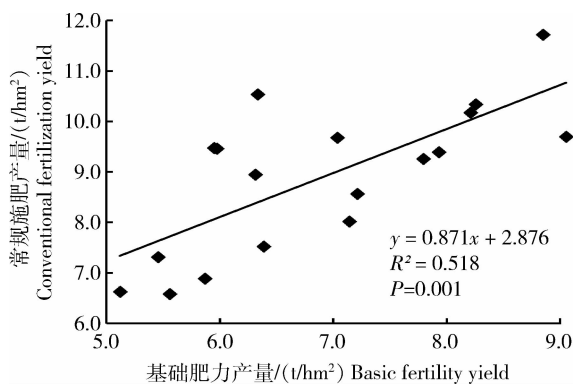


图1 基础肥力产量和常规施肥产量的相关性

Fig. 1 Correlations between basic fertility yields and conventional fertilization yield

3 讨论

3.1 土壤基础肥力对水稻产量的影响

土壤基础肥力是影响作物产量的重要因素^[12]。基础肥力提升有助于增加作物产量稳定性和可持续性^[13]。曾祥明等^[14]研究表明无论施肥或不施肥,基础肥力较高的土壤获得的水稻产量始终高于基础肥力较低的土壤。王寅等^[15]研究表明,油菜产量随基础肥力升高而提升。高静等^[16]研究表明,玉米基础肥力贡献率由1988年的79%下降到1996年的42%。玉米的施肥产量和基础肥力产量呈极显著正相关($P < 0.01$)。本试验中,水稻常规施肥与CK处理产量呈极显著正相关($P < 0.01$)。无论施肥或不施肥,基础肥力条件对水稻产量都有重要的影响。此外,试验中的个别施肥处理产量与基础肥力产量趋势不一致。分析其原因,一方面试验地土壤基础肥力较好,大部分小区基础肥力贡献率在70%以上,可能存在施肥后水稻成熟期贪青而影响水稻籽粒产量形成。另一方面试验小区采取塑料薄膜扎埂隔离,不能保证绝对的水肥隔离,因而实际产量可能受大田试验影响,存在一定试验误差。

3.2 水稻产量对施肥的响应

施肥是水稻增产的主要途径^[17]。试验表明,通过优化施肥等综合管理措施,可实现水稻增产,同时减少环境代价^[18]。王飞等^[19]研究表明连续27年施用化肥,较不施肥处理水稻产量平均增加74.9%。王伟妮等^[20]研究表明平衡施肥下水稻3年平均增产率为46.7%。徐春丽等^[21]研究表明,西南地区玉米基础肥力越低,施肥增产效果越高,反之则施肥增

产效果越低。若长期不施肥,基础肥力越高的土壤,其基础肥力下降速率越快^[22-23]。本试验中,不同基础肥力水平下常规施肥和优化施肥较CK均大幅增产,增产率随基础肥力提升而降低,与前人^[24-25]研究结果基本一致。2017年基础肥力产量较2016年呈下降趋势,高产田下降幅度略高于中、低产田。从产量构成因素看,有效穗数和千粒重是引起产量差异的主要因素。由此,基于目前普遍高强度种植制度下,针对不同基础肥力土壤进行合理施肥,是补偿土壤养分消耗培肥地力,保证水稻生产稳定性和土壤可持续性的必要措施。

4 结论

2016—2017年川西平原水田两熟区定位试验表明,3个试验点的水稻基础肥力贡献率均为高产田>中产田>低产田。水稻基础肥力贡献率随基础肥力升高而升高,肥料贡献率则随基础肥力升高而降低。相同施肥水平下,各田块水稻增产幅度均表现为低产田>中产田>高产田,低产田增产潜力更大。连续不施肥,各试验点基础肥力产量呈下降趋势。针对不同基础肥力合理施肥是保障水稻高产稳产和土壤可持续生产的重要措施。

参考文献 References

- [1] 鲁艳红, 廖育林, 周兴, 聂军, 谢坚, 杨曾平. 长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础肥力的影响[J]. 土壤学报, 2015(3): 597-606
Lu Y H, Liao Y L, Zhou X, Nie J, Xie J, Yang Z P. Effect of long-term fertilization on rice yield and basic soil productivity in red paddy soil under double-rice system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015(3): 597-606 (in Chinese)
- [2] 张国荣, 李菊梅, 徐明岗, 高菊生, 谷思玉. 长期不同施肥对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(20): 543-551
Zhang G R, Li J M, Xu M G, Gao J S, Gu S Y. Effects of chemical fertilizer and organic manure on rice yield and soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(20): 543-551 (in Chinese)
- [3] 梁涛, 陈轩敬, 赵亚南, 黄兴成, 李鸿, 石孝均, 张跃强. 四川盆地水稻产量对基础肥力与施肥的响应[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4759-4768
Liang T, Chen X J, Zhao Y N, Huang X C, Li H, Shi X J, Zhang Y Q. Response of rice yield to inherent soil productivity of paddies and fertilization in sichuan basin [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4759-4768 (in Chinese)

- [4] 高菊生, 黄晶, 董春华, 徐明岗, 曾希柏, 文石林. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. 土壤学报, 2014(2): 314-324
Gao J S, Huang J, Dong C H, Xu M G, Zeng X B, Wen S L. Effects of long-term combined application of organic and chemical fertilizers on rice yield and soil available nutrients [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014(2): 314-324 (in Chinese)
- [5] 查燕, 武雪萍, 张会民, 蔡典雄, 朱平, 高洪军. 长期有机无机配施黑土土壤有机碳对农田基础肥力提升的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4649-4659
Zha Y, Wu X P, Zhang H M, Cai D X, Zhu P, Gao H J. Effects of long-term organic and inorganic fertilization on enhancing soil organic carbon and basic soil productivity in black soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4649-4659 (in Chinese)
- [6] 贡付飞, 查燕, 武雪萍, 黄绍敏, 徐明岗, 张会民, 刘海龙, 姜志伟, 王小彬, 蔡典雄. 长期不同施肥措施下潮土冬小麦农田基础肥力演变分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 120-129
Gong F F, Zha Y, Wu X P, Huang S M, Xu M G, Zhang H M, Liu H L, Jiang Z W, Wang X B, Cai D X. Analysis on basic soil productivity change of winter wheat in fluvo-aquic soil under long-term fertilization [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(12): 120-129 (in Chinese)
- [7] An N, Fan M, Zhang F, Christie P, Yang J, Huang J, Guo S, Shi X, Tang Q, Peng J, Zhong X, Sun Y, Lv S, Jiang R, Dobermann A. Exploiting co-benefits of increased rice production and reduced greenhouse gas emission through optimized crop and soil management [J]. *Plos One*, 2015, 10(10): 14-23
- [8] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 周兴, 谢坚, 杨曾平. 连续施肥对不同肥力稻田土壤基础肥力和土壤养分变化的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(21): 4169-4178
Lu Y H, Liao Y L, Nie J, Zhou X, Xie J, Yang Z P. Effect of successive fertilization on dynamics of basic soil productivity and soil nutrients in double cropping paddy soils with different fertilities [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(21): 4169-4178 (in Chinese)
- [9] 乔磊, 江荣凤, 张福锁, 范明生. 土壤基础肥力对水稻体系的增产与稳产作用研究[J]. 中国科技论文, 2016, 11(9): 1031-1034
Qiao L, Jiang R F, Zhang F S, Fan M S. Improving inherent soil productivity enhances yield and resilience of rice farming systems [J]. *China Science Paper*, 2016, 11(9): 1031-1034 (in Chinese)
- [10] 李忠芳, 张水清, 李慧, 孙楠, 逢焕成, 姜翼来, 徐明岗. 长期施肥下我国水稻土基础肥力变化趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1394-1402
Li Z F, Zhang S Q, Li H, Sun N, Pang H C, Lou Y L, Xu M G. Trends of basic soil productivity in paddy soil under long-term fertilization in China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1394-1402 (in Chinese)
- [11] 包耀贤, 黄庆海, 徐明岗, 于寒青. 长期不同施肥下红壤性水稻土综合肥力评价及其效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 74-81
Bao Y X, Huang Q H, Xu M G, Yu H Q. Assessment and effects of integrated soil fertility in red paddy soil under different long-term fertilization [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(1): 74-81 (in Chinese)
- [12] 张军, 张洪程, 段祥茂, 徐宗进, 杨波, 郭保卫, 杜斌, 戴其根, 许轲, 霍中洋, 魏海燕. 地力施氮量对超级稻产量、品质及氮素利用的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(11): 2020-2029
Zhang J, Zhang H C, Duan X M, Xu Z J, Yang B, Guo B W, Du B, Dai Q G, Xu K, Huo Z Y, Wei H Y. Effects of soil fertility and nitrogen application rates on super rice yield, quality, and nitrogen use efficiency [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(11): 2020-2029 (in Chinese)
- [13] 黄兴成, 石孝均, 李渝, 张雅蓉, 刘彦伶, 张文安, 蒋天明. 基础肥力对黄壤区粮油高产、稳产和可持续生产的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(8): 1476-1485
Huang X C, Shi X J, Li Y, Zhang Y R, Liu Y L, Zhang W A, Jiang T M. Effect of the inherent soil productivity on high, stable and sustainable yield of grain and oil crops in yellow soil region [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(8): 1476-1485 (in Chinese)
- [14] 曾祥明, 韩宝吉, 徐芳森, 黄见良, 蔡红梅, 石磊. 不同基础肥力土壤优化施肥对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(14): 2886-2894
Zeng X M, Han B J, Xu F S, Huang J L, Cai H M, Shi L. Effect of optimized fertilization on grain yield of rice and nitrogen use efficiency in paddy fields with different basic soil fertilities [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(14): 2886-2894 (in Chinese)
- [15] 王寅, 李小坤, 李雅颖, 李继福, 肖国滨, 郑伟, 袁福生, 鲁艳红, 廖育林, 鲁剑巍. 红壤不同地力条件下直播油菜对施肥的响应[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 121-129
Wang Y, Li X K, Li Y Y, Li J F, Xiao G B, Zheng W, Yuan F S, Lu Y H, Liao Y L, Lu J W. Responses of direct-seeding rapeseed to fertilization in fields of red soil different in fertility [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(1): 121-129 (in Chinese)
- [16] 高静, 马常宝, 徐明岗, 徐志强, 张淑香, 孙楠. 我国东北黑土区耕地施肥和玉米产量的变化特征[J]. 中国土壤与肥料, 2009(6): 28-31
Gao J, Ma C B, Xu M G, Xu Z Q, Zhang S X, Sun N. Change characteristic of fertilization and maize yield on black soil in the Northeast China [J]. *Soil And Fertilizer Sciences in China*, 2009(6): 28-31 (in Chinese)
- [17] 沈善敏. 长期土壤肥力试验的科学价值[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(1): 1-9

- Shen S M. The scientific value of long-term soil fertility experiment [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 1995, 1(1): 1-9 (in Chinese)
- [18] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, Peter V, Zhao M, Ma W Q, Wang Z L, Zhang W J, Yan X Y, Yang J C, Deng X P, Gao Q, Zhang Q, Guo S W, Ren J, Li S Q, Ye Y L, Wang Z H, Huang J L, Tang Q Y, Sun Y X, Pen X L, Zhang J W, He M R, Zhu Y J, Xue J Q, Wang G L, Wu L, An N, Wu L Q, Ma L, Zhang W F & Zhang F S. Producing more grain with lower environmental Costs [J]. *Nature*, 2014, 514 (7523): 486-489
- [19] 王飞, 林诚, 李清华, 何春梅, 李昱, 林新坚. 长期不同施肥方式对南方黄泥田水稻产量及基础肥力贡献率的影响[J]. *福建农业学报*, 2010, 25(5): 631-635
- Wang F, Lin C, Li Q H, He C M, Li Y, Lin X J. Effects of long-term fertilization on rice yield and contribution rate of basic soil productivity on the yellow paddy of southern China [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 25(5): 631-635 (in Chinese)
- [20] 王伟妮, 鲁剑巍, 李银水, 邹娟, 苏伟, 李小坤, 李云春. 当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(19): 3997-4007
- Wang W N, Lu J W, Li Y S, Zou J, Su W, Li X K, Li Y C. Study on fertilization effect and fertilizer contribution rate of different crops at present production conditions [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(19): 3997-4007 (in Chinese)
- [21] 徐春丽, 谢军, 王珂, 李丹萍, 陈轩敬, 张跃强, 陈新平, 石孝均. 中国西南地区玉米产量对基础肥力和施肥的响应[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(1): 129-138
- Xu C L, Xie J, Wang K, Li D P, Chen X J, Zhang Y Q, Chen X P, Shi X J. The response of maize yield to inherent soil productivity and fertilizer in the Southwest China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(1): 129-138 (in Chinese)
- [22] 黄欠如, 胡锋, 李辉信, 赖涛, 袁颖红. 红壤性水稻土施肥的产量效应及与气候、地力的关系[J]. *土壤学报*, 2006, 43(6): 926-933
- Huang Q R, Hu F, Li H X, Lai T, Yuan Y H. Crop yield response to fertilization and its relations with climate and soil fertility in red paddy soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(6): 926-933 (in Chinese)
- [23] 李忠芳, 徐明岗, 张会民, 李慧, 孙楠. 长期施肥下作物产量演变特征的研究进展[J]. *西南农业学报*, 2012, 25(6): 2387-2392
- Li Z F, Xu M G, Zhang H M, Li H, Sun N. Summarize of crop yield dynamic under long-term fertilization [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 25(6): 2387-2392 (in Chinese)
- [24] 张祥明, 郭熙盛, 武际, 王允青, 李霞红, 陈景道. 江淮地区稻田基础土壤肥力与水稻合理施用技术研究[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(15): 131-135
- Zhang X M, Guo X S, Wu J, Wang Y Q, Li X H, Chen J D. Research on basic soil fertility and reasonable fertilization technology in paddy fields in the Jianghuai region [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(15): 131-135 (in Chinese)
- [25] 廖育林, 郑圣先, 聂军, 鲁艳红, 谢坚, 杨曾平. 长期施用化肥和稻草对红壤水稻土肥力和生产力持续性的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(10): 3541-3550
- Liao Y L, Zheng S X, Nie J, Lu Y H, Xie J, Yang Z P. Effects of long-term application of fertilizer and rice straw on soil fertility and sustainability of a reddish paddy soil productivity [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(10): 3541-3550 (in Chinese)

责任编辑: 王燕华