

中国南方潴育性水稻土产量演变及其肥力驱动因素分析*

李忠芳^{1,2} 徐明岗¹ 逢焕成^{1†} 张会民¹ 孙楠¹ 娄翼来¹ 李慧¹

(1 农业部作物营养与施肥重点开放实验室 / 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

(2 贺州学院化学与生物工程学院, 广西贺州 542899)

摘要 系统分析了我国广西桂林、钦州及玉林 3 个潴育性水稻土长期常规施肥(F)和不施肥(CK)处理下, 双季稻产量及土壤肥力随时间的变化趋势, 并借助通径分析探明主要肥力因素对各点水稻产量的驱动差异和关联。结果显示, 不施肥条件下, 桂林点的基础地力较低, 其产量随时间呈显著下降趋势(各季产量均值 $666 \sim 846 \text{ kg hm}^{-2}$), 而玉林和钦州点基础地力相对较高, 其产量在试验期间相对稳定(各季产量均值 $3\,500 \sim 4\,577 \text{ kg hm}^{-2}$)。常规施肥下, 桂林点产量显著提高(较 CK 增产 522%), 且随时间呈显著上升趋势, 另两试验点较 CK 增产 20%~67%。常规施肥下, 土壤肥力随时间呈稳定或不同程度的上升趋势, 其中土壤有效磷初始值低于 10 mg kg^{-1} 的桂林和钦州点上升幅度最大且均达到显著水平, 而初始值为 50 mg kg^{-1} 的玉林点变化不大。土壤有机质与全氮变化在各地不同, 气温偏低的桂林点有机质呈上升趋势且全氮含量较高($>3 \text{ g kg}^{-1}$), 气温偏高的玉林和钦州点有机质呈下降趋势且全氮含量较低($1 \sim 2.5 \text{ g kg}^{-1}$), 表明有机质的累积和释放上存在差异。双季稻产量的主要肥力驱动因子各地有差异, 桂北地区桂林点土壤有效磷为首要因素, 桂南地区玉林和钦州点土壤有机质及氮含量为主要的肥力因素。因此, 依据区域特征采取有针对性措施是持续、高效培肥土壤的保证。

关键词 长期施肥; 双季稻; 产量演变; 土壤肥力因素

中图分类号 S158.3

文献标识码 A

我国南方雨热条件丰富, 土壤养分易风化淋失, 导致土壤贫瘠^[1], 而南方水稻土有较好的水热稳定性、能够提供作物良好的生长环境^[2], 具有较好的稳产和高产性。因此, 稻田耕作体系为南方优先推荐的栽培模式。与旱地相比, 水稻土的基础地力贡献率较高, 表明水稻产量对基础地力的依赖更强^[2-3], 所以研究土壤肥力对提高水稻产量有重要意义。水稻土是自然土壤在人为水耕熟化过程中形成的特殊人为湿地土壤^[4], 使作物生长受不同区域水热影响相对较小, 而较多体现在生产力演变对土壤肥力的响应关系, 因此通过土壤肥力与生产力间变化的动态关联解释生产力演变特征和机制成为可能。

潴育性水稻土是水稻土中一个重要亚类, 起源于各类土壤的再积物及河流的冲积物或河湖相沉

积物。通常所处的地形部位条件优越, 种稻历史悠久, 耕作制度以种植双季稻为主, 水耕熟化程度较高, 是我国粮食生产的主要基地^[5]。因灌溉水和地下水丰富, 经长期的耕作培肥, 加之周期性的排灌影响, 氧化还原作用交替进行, 土壤剖面分化明显, 潢育层发育较好^[6]。因此, 潢育性水稻土一般具有较好的物理结构利于高产, 这时土壤养分含量则成为评价其肥力高低的重要指标, 这为研究水稻产量的肥力驱动机制提供了基础。

土壤肥力高低直接影响着水稻的产量。长期定位施肥研究表明, 合理施肥使土壤肥力得到培育, 作物产量也呈逐年上升趋势^[7-9]。但在不同地点, 因受气候环境以及施肥等人为管理的影响, 土壤肥力对产量的驱动作用不同。研究者通过统计分析大量农场资料认为土壤肥力低是双季稻产量

* 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB100501)、公益性行业(农业)科研专项(201103001)、国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD14B04, 2011BAD16B15)和广西自然科学基金项目(2011GXNSFB018056)资助

† 通讯作者, E-mail: hcpang@caas.ac.cn

作者简介: 李忠芳(1976—), 男, 广西贺州人, 博士, 副教授, 主要从事土壤肥力培育方面的研究。E-mail: lizhongfang08@126.com

收稿日期: 2013-07-16; 收到修改稿日期: 2013-09-22

主要限制因素^[10],但不同区域影响水稻产量的因素较多且复杂^[11],如不同母质发育的土壤对双季稻产量有显著的影响^[12]。各肥力因素中,目前认为土壤磷为影响水稻产量的重要因子^[8, 13]。但是较大的区域内引起产量变化的主要原因尚不明确^[14],这就需要借助长期施肥试验作为平台,需选择土壤类型及管理相对一致的试验点,找出具体条件下影响地力的某一关键因素才利于开展当地地力提升工作,其结果才更有价值^[5, 15]。

本研究借助趋势图、方差分析、回归和通径分析,探讨我国广西灌育性水稻土水稻产量和土壤肥力变化及空间变异规律,遴选出不同区域及早晚稻季驱动产量的主要肥力因子以及驱动特征差异,明确不同区域农田基础地力及肥力关键要素对农田生产力的制约和权重,为建设肥沃健康的农田,提

高水田生产力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

依托我国南方同一地理区域(广西)水稻土典型区桂林、玉林和钦州3个试验点的长期定位施肥试验(10年以上,时间分别为1987—2006年,1987—2003年和1997—2010年),其各点土壤类型均为灌育性水稻土,耕作制度均为早稻—晚稻,小区面积为100 m²,无重复。各试验点均设对照(不施肥)和常规施肥(依据当地农民的施肥量)处理。试验点的地理和气象情况见表1,可知桂林点地处广西北部(桂北),而玉林与钦州处于广西南部,桂林的降雨量和气温均低于玉林和钦州,桂林点成土

表1 长期肥料试验点概况

Table 1 General information of the long-term experiment sites

地理位置与气象 Geographic locations and climate conditions							
地点 Site	东经 Longitude (° E)	北纬 Latitude (° N)	成土母质 Parent materials	年均气温 Mean annual temperature (° C)			
桂林 Guilin	110.32	25.08	石灰岩坡积物 Limestone deluvium	19			
玉林 Yulin	110.15	22.62	砂页岩坡积物 Sandy shale deluvium	21.8			
钦州 Qinzhou	108.65	21.95	砂页岩坡积物 Sandy shale deluvium	22.2			
地理位置与气象 Geographic locations and climate conditions							
地点 Site	年降雨量 Annual precipitation (mm)	有效积温 Effective accumulative temperature (° C)	平均每日太阳辐射 Sun light (kW m ⁻² d ⁻¹)	无霜期 Frostless period (d)			
桂林 Guilin	1 926	5 063	3.633	310			
玉林 Yulin	1 592	7 536	3.985	340			
钦州 Qinzhou	2 150	8 010	4.129	342			
初始土壤的理化性质 Initial physical and chemical properties of the soil							
地点 Site	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	速效氮 Readily available N (mg kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)	缓效钾 Slowlyavailable K (mg kg ⁻¹)	pH
桂林 Guilin	49.9	3.05	254	2.1	27	67	6.7
玉林 Yulin	42	2.11	172	50	32	40	7.4
钦州 Qinzhou	33.5	1.24	131	6.4	22	64	5.4
年施肥量 Fertilizer application rates per year							
地点 Site	N (kg hm ⁻² a ⁻¹)	P (kg hm ⁻² a ⁻¹)	K (kg hm ⁻² a ⁻¹)	有机养分所占比值(%)			
桂林 Guilin	346.6 ± 11.7	58.0 ± 2.8	222.4 ± 8.4	16.40%			
玉林 Yulin	358.8 ± 12.5	59.5 ± 2.8	162.5 ± 7.7	13.30%			
钦州 Qinzhou	322.2 ± 13.6	39.7 ± 2.3	112.4 ± 5.3	7.10%			

母质与另两点不同,为石灰岩坡积物。试验初始时,桂林点土壤有机质、全氮和速效氮含量均高于玉林和钦州点的含量,但有效磷含量低。各试验点的施肥量代表农民的施肥水平,每年施肥量根据当地最常用施肥量作调整,氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为氧化钾。有机养分所占比值是施用有机肥中分别提供养分与总施用养分(主要计算N、P、K)百分数均值,用以表示有机肥所提供的养分占总体的份额。

1.2 样品采集与分析

土壤样品于每年晚稻收获后采集,自然风干后磨细,依据测定需要过1和0.25 mm筛后,妥善保存备用。土壤有机质测定采用油浴加热重铬酸钾氧化法容量法,pH采用电位法,全氮采用凯氏蒸馏法;速效氮采用碱解扩散法;有效磷采用0.5 mol L⁻¹ NaHCO₃浸提—钼锑抗比色法;速效钾采用1 mol L⁻¹ NH₄OAc浸提—火焰光度法;缓效钾采用1 mol L⁻¹热HNO₃浸提—火焰光度法^[16]。

1.3 数据统计分析方法

1.3.1 水稻产量和肥力因素随着时间变化过程

为便于分析各系列产量和7大土壤肥力指标随着试验时间的变化趋势,本文采用制作散点图及直线回归拟合所得斜率(b)作为变化趋势大小的衡量,作图软件为SigmaPlot 10.0。拟合趋势线即 $y = bx + c$,y为产量,x为持续试验的时间从第1年至第20年,通过比较斜率(b)大小及拟合的显著性(r)来说明产量变化趋势及程度。

1.3.2 土壤肥力因素对水稻产量的驱动差异

采用SAS软件参照任红松等^[17]方法进行水稻产量与土壤肥力之间的多因素回归分析和通径分析,对各产量系列(3个试验点早晚稻6个产量系列)拟合回归方程, $y = ax_1 + \dots + gx_7 + k$,y为施肥籽粒产量, $x_1 \sim x_7$ 分别为7大肥力因素指标:土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、速效氮(AN)、有效磷(AP)、速效钾(AK)、缓效钾(SAK)和pH。首先通过逐步回归法选出能使多元一次方程达到显著的因素,然后分析计算入选因素的标准化系数,即通径系数(为无量纲,各点间可比较),筛选出各试验点中影响产量的主要肥力因素及其大小,达显著水平并大于2个影响因素者则需进一步计算间接通径系数并分析其影响过程。

2 结 果

2.1 长期不同施肥下水稻产量差异

各长期试验点早、晚稻年均产量见图1。不施肥条件下,各地产量均较低,早稻产量为846~4 222 kg hm⁻²,晚稻产量在666~4 577 kg hm⁻²间。3个试验点相比,玉林和钦州点的不施肥水稻产量(3 500~4 577 kg hm⁻²)显著高于桂林点(666~846 kg hm⁻²)。常规施肥条件下,基础肥力较低的桂林点产量仍为最低,但各试验点间的产量无显著差异,表明施肥减小了基础肥力对产量的影响。

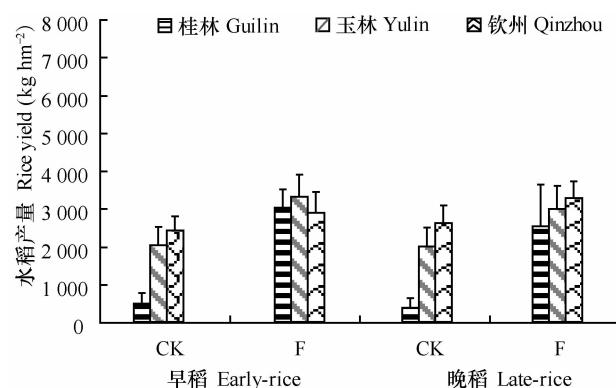


图1 不同施肥条件下3个试验点早、晚稻年均产量

Fig. 1 Annual mean yields of early-rice and late-rice under different treatments at the three experiment sites

与不施肥相比,试验期内施肥可以显著提高各点水稻产量,3个试验点水稻产量(早稻5 047~5 789 kg hm⁻²,晚稻4 426~5 736 kg hm⁻²)均显著高于不施肥处理,其中桂林点提高的幅度最大,早晚稻籽粒产量分别增产522%和564%,而玉林点早、晚稻增产率分别为63%和49%,钦州点较小,为20%和25%。表明不施肥产量较低的低肥力区域施肥增产率大。

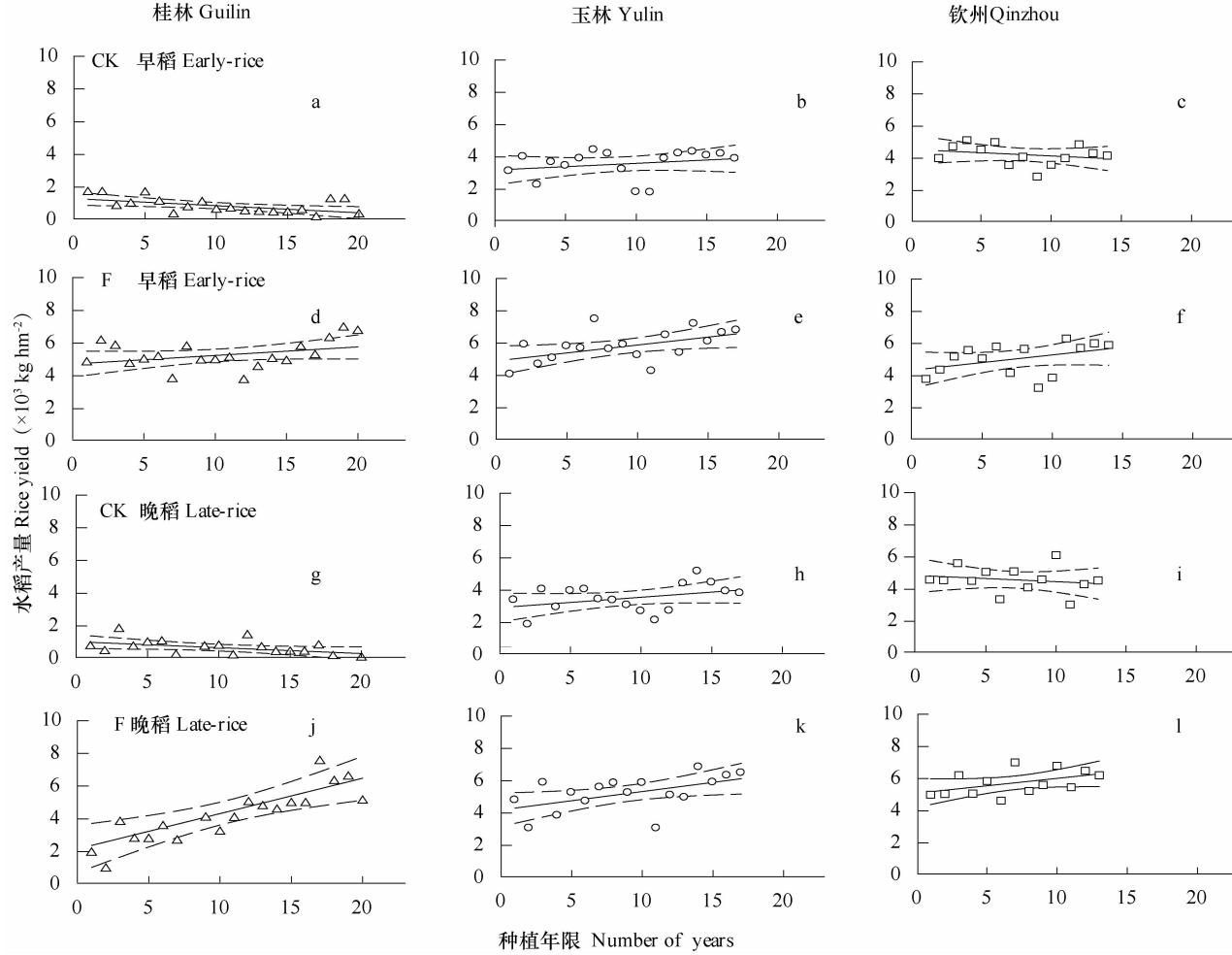
2.2 长期不同施肥条件下水稻产量变化趋势

长期不同施肥条件下水稻产量随试验时间(种植年限)呈显著上升或下降的变化趋势($p < 0.05$)(图2)。不施肥条件下,桂林点的早晚稻产量均呈显著下降趋势($p < 0.05$),95%的置信区间较小,表明随时间变化趋势较一致(图2 a, 图2 g),变化速率为-36.1~-40.8 kg hm⁻² a⁻¹(表明该点总体各年的早晚稻产量较前一年下降36.1~40.8 kg hm⁻²,下同);钦州点的早、晚稻均呈下降趋势但未达到显著水平(表2),早、晚稻的变化速率分别为-39.5和-39.7 kg hm⁻² a⁻¹;玉林点的早、晚稻产

量稳中有升,年际间变异较大(图2 b、图2 h),早、晚稻变化速率分别为 41.3 和 $63.7 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (表2)。总体而言,不施肥处理下基础地力低的桂林点水稻产量呈下降趋势,而另两点的水稻产量较稳定。

常规施肥下,各地早晚稻产量均呈上升趋势。桂林点晚稻年际变异较大,产量上升最大(图2 j),达极显著水平($p < 0.01$),产量的变化速率为 215.9

$\text{kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,而早稻上升较小($47.5 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$),未达到显著水平(表2)。玉林点早晚稻产量整体上升明显,均达到显著或极显著水平(图2 e、图2 k),其中晚稻上升速率大于早稻 $15 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (表2)。钦州点早、晚稻产量略有上升但未达到显著水平,分别为 $92.4 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $95.1 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (表2)。总体而言,常规施肥下水稻产量呈上升趋势。



注:各图中实线为趋势线,虚线内为95%的置信区间 Note: The solid lines stand for yield trends, and the confidence intervals within the dotted lines are 95%

图2 广西3个长期施肥点双季稻产量变化趋势

Fig. 2 Variation of the two crops of rice in yield with the long-term fertilization at three experiment sites in Guangxi

总体分析可知,不同试验点上,钦州的早晚稻产量最为稳定,不施肥或常规施肥下其产量随时间均无显著变化。其次为玉林的早晚稻产量,在不施肥条件下较稳定,在施肥条件下呈显著上升趋势。桂林的早晚稻产量变化对施肥的响应最为敏感,不

施肥下呈显著下降趋势,而施肥后晚稻产量呈极显著上升趋势,早稻未达到显著水平。表明基础地力高双季稻产量较稳定,早晚稻变化趋势在各地对施肥的响应并不一致,可能与基础地力有关。

表2 长期不同施肥条件下广西水稻产量变化的相关参数

Table 2 Related parameters of the variation of rice in yield with the long-term fertilization at three experiment sites in Guangxi

地点 Site	样本 n	早稻 Early-rice				晚稻 Late-rice			
		CK		F		CK		F	
		b	r	b	r	b	r	b	r
桂林 Guilin	20	-40.8	-0.54*	47.5	0.35	-36.1	-0.47*	215.9	0.66**
玉林 Yulin	17	41.3	0.25	98.3	0.52*	63.7	0.37	113.3	0.52*
钦州 Qinzhou	13	-39.5	-0.24	95.1	0.41	-39.7	-0.19	92.4	0.48

注:b为趋势线的斜率,表示单位面积产量的年变化量,单位为 $\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$;r为拟合该趋势线的相关系数。*表示达5%显著水平,**表示达1%极显著水平 Note: b stands for slope of the trend of rice yield; r for correlation coefficient fitting the trend; * for significant difference at 5% level, and ** for significant difference at 1% level

2.3 长期施肥条件下水稻土主要肥力因素演变趋势

长期施肥条件下土壤7大肥力指标随试验时间(种植年限)变化趋势可知(图3):桂林点有机质含量较玉林和钦州点高,且随时间呈上升趋势,玉林和钦州点的略有下降,含量也较桂林点低;桂林点有机质年际间变异较另两点小,表明其有机质组成中可能以稳定组分为主。3个试验点全氮含量与有机质较一致,桂林点的含量较高,最低为钦州点,表明更多的氮从有机质中释放出来被作物吸收利用。但以上的两个指标即有机质与全氮在3点中的变化趋势均未达到显著上升或下降趋势(表3)。土壤速效氮含量年际间变化较大,桂林和玉林点的含量随时间呈上升趋势而钦州点呈下降趋势,均未达到显著水平。土壤有效磷含量各点年际间变化相对较小,初始值较低($< 10 \text{ mg kg}^{-1}$)的桂林和钦州点的均呈显著或极显著的上升趋势,分别为 $0.649 \text{ mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ 和 $0.583 \text{ mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ (表3),这与其产量变化较一致。而玉林点总体有效磷含量较高(40 mg kg^{-1}),且无显著变化,表明当前这3点的施肥量不仅能维持作物吸收还能使土壤磷有所增加。有研究表明,产量最高的处理需磷量较多导致全磷累积量少^[7],高产的钦州点因消耗的磷较多,导致磷累积量较桂林的少。3个试验点中土壤速效钾和缓效钾中,桂林点含量较高,随时间变化稳定,而另两个试验点含量较低(图3),其中钦州点的含量下降较为严重,为 $-3.069 \text{ mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ (图3),这与施钾量大小密切相关,表明钦州点施钾量($112.4 \pm 5.3 \text{ kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)不足以维持作物吸收利用,为了保持和提升土壤钾的平衡,施钾量需达到 $162.5 \sim 222.4 \text{ kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。土壤pH仅玉林点呈极显著下降趋势($r = -0.632^{**}$),另两个试验点较为稳定。

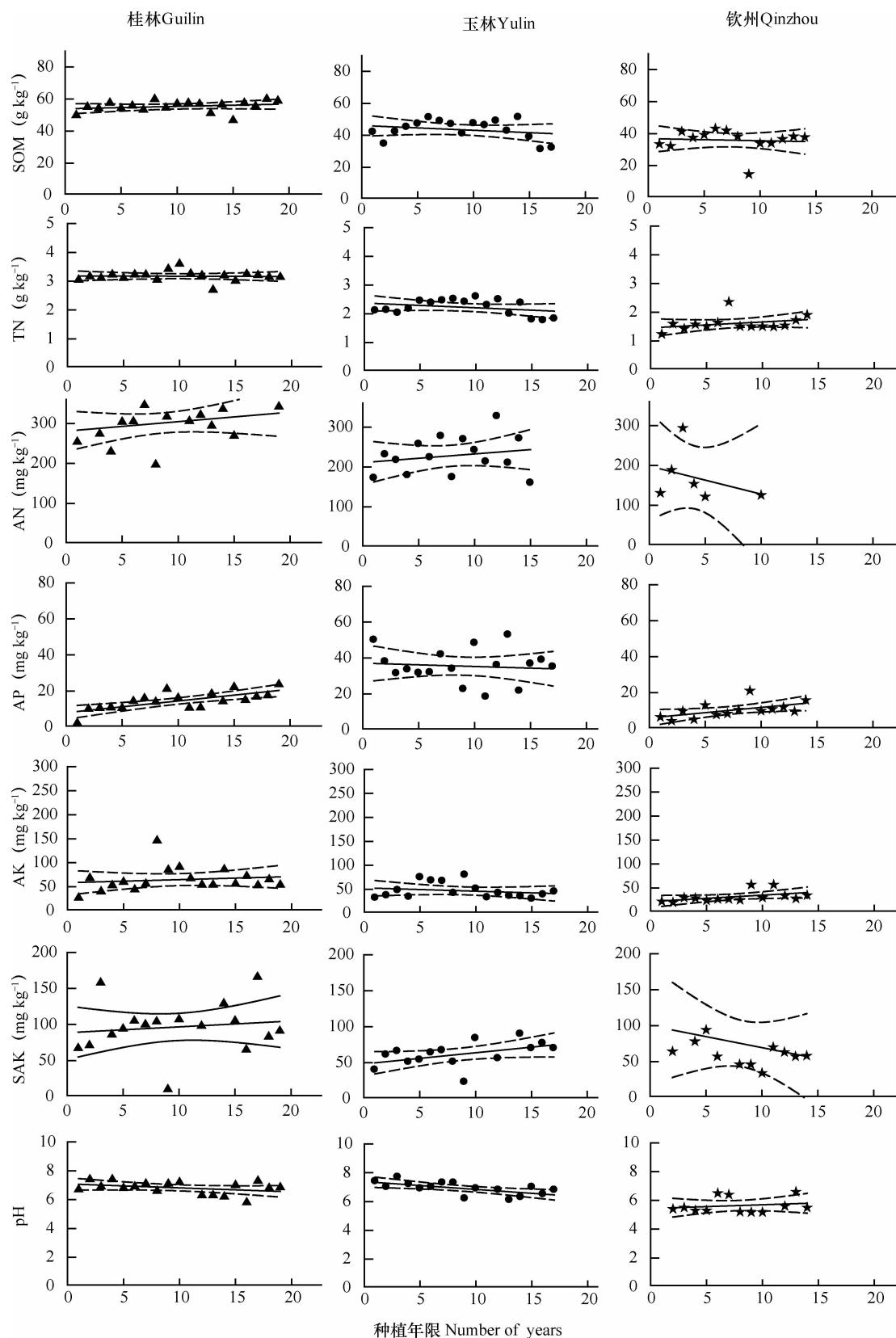
总体而言,土壤肥力随时间变化稳定且部分呈上升趋势,表明长期施肥条件下水稻土肥力得到保持或提高。低肥力土壤提高速率较大,如桂林点的土壤养分除了全氮外,其他均得到不同程度的提高,其中有效磷含量呈极显著增加趋势($r = 0.716^{**}$),年增加速率为 0.649 mg kg^{-1} 。同时,初始值含量相对较低的玉林点的缓效钾和钦州的有效磷含量均随着时间呈显著的上升趋势。桂林点的pH相对较高且稳定,主要由于其成土母质为石灰岩坡积物,同时温度相对较低有关。而玉林和钦州点成土母质为砂页岩坡积物,温度相对高,同时研究认为施用氮肥引起酸化现象^[18],所以这两点的pH较低,且初始pH较高的玉林点下降更显著,具体原因还需进一步研究。

2.4 长期不同施肥条件下水稻土主要肥力因素对产量的驱动差异

分别对桂林、玉林和钦州点土壤的7大肥力因素与早晚稻产量作通径分析其结果如下:

桂林点早稻产量与各肥力因素的拟合方程为:
 $y = 39.62x_4 + 4554.61 (R^2 = 0.26)$,y为施肥籽粒产量, x_4 为土壤有效磷(AP)含量。 x_4 标准化系数(通径系数)为0.51($p = 0.06$);桂林晚稻产量与各肥力因素间不能达到10%最低显著水平,不适合进行相关分析。

玉林点早稻产量与各肥力因素的拟合方程为:
 $y = 11.52x_3 + 3135.81 (R^2 = 0.38)$,y为施肥籽粒产量, x_3 为土壤速效氮(AN)含量。 x_3 标准化系数(通径系数)为0.61($p = 0.03$);玉林晚稻产量与各肥力因素:
 $y = 94.71x_1 + 961.39 (R^2 = 0.23)$,y为施肥籽粒产量, x_1 为土壤有机质(SOM)含量。 x_1 标准化系数(通径系数)为0.48($p = 0.09$)。



SOM: 土壤有机质 Soil organic matter; TN: 全氮 Total N; AN: 速效氮 Readily available N; AP: 有效磷 Available P;

AK: 速效钾 Available K; SAK: 缓效钾 Slowly available K

图 3 长期常规施肥条件下广西水稻土肥力变化趋势

Fig. 3 Variation of soil fertility in the paddy soils under the long-term fertilization in Guangxi

表3 长期不同施肥条件下广西水稻土肥力变化的直线回归分析

Table 3 Linear regressing analysis of the variation of soil fertility in the paddy soils under the long-term fertilization in Guangxi

肥力指标 Soil fertility	桂林 Guilin		玉林 Yulin		钦州 Qinzhous	
	b	r	b	r	b	r
土壤有机质 Soil organic matter ($\text{g kg}^{-1} \text{a}^{-1}$)	0.149	0.248	-0.296	-0.24	-0.133	-0.08
全氮 Total N ($\text{g kg}^{-1} \text{a}^{-1}$)	-0.001	-0.032	-0.017	-0.312	0.021	0.327
速效氮 Readily available N ($\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$)	2.371	0.258	2.175	0.208	-7.01	-0.339
有效磷 Available P ($\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$)	0.649	0.716 **	-0.183	-0.097	0.583	0.561 *
速效钾 Available K ($\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$)	0.639	0.142	-0.681	-0.215	1.334	0.488
缓效钾 Slowly available K ($\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$)	0.817	0.135	1.555	0.482 *	-3.069	-0.234
pH	-0.027	-0.357	-0.054	-0.632 **	0.026	0.188

注:b为趋势线的斜率表达年变化率,单位为 $\text{g kg}^{-1} \text{a}^{-1}$ 或 $\text{mg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$;r为拟合该趋势线的相关系数。*表示达5%显著水平,**表示达1%极显著水平 Note: b stands for slope of the trend of rice yield; r for correlation coefficient fitting the trend; * for significant difference at 5% level, and ** for significant difference at 1% level

钦州点早稻产量与各肥力因素: $y = 104.22x_1 - 8.98x_5 + 1996.55$ ($R^2 = 0.68$), y 为施肥籽粒产量, x_1 为土壤有机质(SOM)含量。 x_5 为速效钾(AK)含量, x_1 和 x_5 标准化系数(或直接通径系数)分别为0.85($p = 0.03$)和-0.498($p = 0.12$),依据通径系数分析表明其产量主要受 x_1 有机质影响, x_5 未达到10%的显著水平;钦州晚稻产量与各肥力因素: $y = 1682.36x_2 + 2947.79$ ($R^2 = 0.31$), y 为施肥籽粒产量, x_2 为土壤全氮(TN)含量。 x_2 标准化系数(通径系数)为0.56($p = 0.07$),依据通径系数分析表明其产量主要受 x_2 土壤全氮影响。(注:钦州点无速效氮(AN)的历史数据)。

综上可知,各地驱动水稻产量的肥力因素存在差异,各点主要驱动因素不完全相同,主要以第一肥力因素土壤有机质为主要因素(玉林晚稻、钦州早稻),其次为土壤有效磷(桂林早稻)、速效氮(玉林早稻)和土壤全氮(钦州晚稻),而钾在各点均未达到显著影响水平。

3 讨论

3.1 产量变化趋势

长期不施肥下,低肥力条件下(桂林)水稻产量最低且随时间呈显著下降趋势,而长期不施肥下我国总体水稻产量较稳定,尤其是单季稻无显著的下降趋势^[2],而不同母质类型水稻土对双季稻养分吸收特性的影响不同。于天一等^[12]研究表明第四纪红土、板页岩及河流沉积岩为母质的土壤,双季稻对氮素总吸收量较高,石灰岩不利于水稻对磷素的

吸收,玉林和钦州为砂页岩且基础地力较高(表1),汤勇华和黄耀^[3]研究认为基础贡献率高(即基础能力高)作物产量相对稳定。部分高肥力的水田作物产量能维持较长时间,如本研究中除玉林点晚稻产量变化呈显著上升外,玉林和钦州试验点水稻产量随时间变化较稳定(20年),但这是在低水平下的稳产,是生产上不可取施肥模式。桂林点土壤母质为石灰岩故产量低(表1),同时低肥力且不施肥下桂林双季稻栽培地力得不到恢复而呈显著下降趋势。

对于早晚稻产量变化不同,高肥力区对施肥响应小,如钦州点,低肥力区对施肥响应大,如桂林点(图1)。研究认为,早稻对施肥的敏感程度大于晚稻^[19]。而本研究认为在低肥力下(桂林点),晚稻对施肥的响应较早稻大,而高肥力的玉米和钦州点早、晚稻间对施肥响应较一致。这是因为土壤磷的有效性与温度密切相关^[16],桂林点早稻季幼苗期温度低易受低磷胁迫,在施磷量较低甚至不施磷下直接影响产量。

长期施肥条件下,双季稻产量均呈上升趋势,尤其是中低肥力的玉林(早、晚稻)和桂林(晚稻)这3个系列产量变化趋势达显著或极显著水平,这与其产量初始值低有关^[2]。

3.2 土壤肥力变化趋势及对产量的驱动差异

在土壤的各大肥力因素中,土壤有机质是最受关注也是最重要的因素,且其作用过程较复杂,在不同时空其效果差异大^[20]。本研究的通径分析表明,南方双季稻中的玉林晚稻、钦州早稻产量其土壤有机质为第一肥力驱动因素,而玉林早稻和钦州晚稻的主要驱动因素则是与有机质密切相关的土壤速效氮和土壤全氮,这与有机质组成及矿化速率

有关,研究表明耕作和配施化肥下土壤利于有机质矿化释放及作物增产,但不利于土壤有机质的积累^[21]。桂林点施用有机肥高于玉林和钦州点,桂林点的有机质呈上升趋势而玉林和钦州点的土壤有机质呈下降趋势,可知桂林点的有机肥投入量较大利于土壤有机质增加,同时与桂林点的年均温较低导致有机质矿化量相对小而促进其积累作用有关^[22]。本研究中有机质及与之密切相关的土壤速效氮和土壤全氮成为玉林和钦州产量主要驱动因素的原因,从土壤全氮含量的变化趋势可以得到解释,全氮含量与有机质较一致,桂林点较高,最低为钦州点,表明更多的氮从有机质中释放出来被作物吸收利用,所以钦州的施氮量相对较低(低 24.4 kg hm⁻² a⁻¹)仍能保持较高的产量。因土壤有机质与氮含量有自相关性,故要区分这两者驱动大小差异还需进一步深入研究。当然,有机质的变化及空间差异还与其他因素有关,研究认为土壤的结构性因素(由土壤母质、地形、气候等非人为区域因素)对区域 SOM 空间变异起主导作用^[20]。

本研究通径分析表明土壤有效磷是桂林早稻产量的主要肥力驱动因素。结果显示土壤有效磷含量低(施磷量不足导致)为水稻产量下降的重要原因^[8],尤其是早稻^[13],而桂林点的土壤有效磷初始值低,施肥条件下磷含量及产量趋势呈显著上升,这与 Lan 等^[8]的研究一致。所以,桂林点在初始阶段土壤磷素的不足,加上其母质为石灰岩不利于水稻对磷素的吸收^[12],使之为该点水稻产量增长的限制性因素,鲁艳红等^[23]研究也表明磷素是制约长江中下游地区早稻生长的主要因素之一。与晚稻相比,早稻栽培的苗期(4月)气温较低(桂林点的平均气温 12℃ 低于另两点 4~6℃,表 1),土壤中磷的有效性低,而晚稻苗期温度(7月,28℃)较高,磷的有效性高,这可能是通过影响微生物活动及根系活力所致^[24~25]。

在本研究中,产量变化较大、尤其是显著下降现象均出现在不施肥处理,但篇幅所限及因历史数据中不提供不施肥处理的土壤肥力因素的数据,在此不能进一步深入分析影响产量变化的更多肥力及非肥力因素的影响,有待更多的材料和方法展开相关研究。

4 结 论

合理施肥是广西潴育性水稻土早晚稻产量和

土壤肥力长期维持并呈上升趋势的保证,土壤有机质及氮磷含量作为影响水稻产量的主要肥力驱动因子在各地有差异,主要以土壤有机质为主要驱动因素(玉林晚稻、钦州早稻),其次为土壤有效磷(桂林早稻)、速效氮(玉林早稻)和土壤全氮(钦州晚稻),而钾在各点均未达到显著影响水平。因此,本试验条件下,南方潴育性水稻土中有机质仍是作物高产稳产的保证,其次为土壤中磷和氮养分。

参 考 文 献

- [1] 徐明岗,文石林,李菊梅. 红壤特性与高效利用. 北京:中国农业出版社, 2005. Xu M G, Wen S L, Li J M. The characteristics and high effective utilization of red soil (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2005
- [2] 李忠芳,徐明岗,张会民,等. 长期施肥下中国主要粮食作物产量的变化. 中国农业科学, 2009, 42(7): 2407—2414. Li Z F, Xu M G, Zhang H M, et al. Grain yield trends of different food crops under long-term fertilization in China (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(7): 2407—2414
- [3] 汤勇华,黄耀. 中国大陆主要粮食作物地力贡献率及其影响因素的统计分析. 农业环境科学学报, 2009, 28(5): 1070—1078. Tang Y H, Huang Y. Statistical analysis of the percentage of soil fertility contribution to grain crop yield and driving factors in mainland China (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(5): 1070—1078
- [4] 曹志洪,周健民,等. 中国土壤质量. 北京:科学出版社, 2008: 66—67. Cao Z H, Zhou J M, et al. Soil quality of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 2008: 66—67
- [5] 全国农业技术推广服务中心,中国农业科学院农业资源与规划所. 耕地质量演变趋势研究. 北京:中国农业科学技术出版社, 2008. Development Center of Science and Technology, Ministry of Agriculture, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences. Soil quality changes of cultivated land in China (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2008
- [6] 黄昌勇. 土壤学. 北京:中国农业出版社, 2000. Huang C Y. Soil science (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [7] 高菊生,徐明岗,董春华,等. 长期稻-稻-绿肥轮作对水稻产量及土壤肥力的影响. 作物学报, 2013, 39(2): 343—349. Gao J S, Xu M G, Dong C H, et al. Effects of long-term rice-rice-green manure cropping rotation on rice yield and soil fertility (In Chinese). Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(2): 343—349
- [8] Lan Z M, Lin X J, Wang F, et al. Phosphorus availability and rice grain yield in a paddy soil in response to long-term fertilization. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(5): 579—588
- [9] Zhang H M, Xu M G, Shi X J, et al. Rice yield, potassium uptake and apparent balance under long-term fertilization in rice-based cropping systems in southern China. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 88(3): 341—349

- [10] Inthavong T, Fukai S, Tsubo M. Spatial variations in water availability, soil fertility and grain yield in rainfed lowland rice: A case study from Savannakhet Province, Lao PDR. *Plant Production Science*, 2011, 14(2): 184—195
- [11] 王莉莎, 李勇, 沈健林, 等. 应用回归树分析双季稻区水稻土地力特征. *生态学杂志*, 2013, 32(1): 232—240. Wang L S, Li Y, Shen J L, et al. Using regression tree to analyze the fertility characteristics of paddy soil in double-rice cropping region (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32 (1): 232—240
- [12] 于天一, 逢焕成, 唐海明, 等. 不同母质发育的土壤对双季稻产量及养分吸收特性的影响. *作物学报*, 2013, 39(5): 896—904. Yu T Y, Pang H C, Tang H M, et al. Effects of paddy soils from different parent materials on yield and nutrient uptake characteristics of double-cropping rice (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(5): 896—904
- [13] 李忠芳, 徐明岗, 张会民, 等. 长期施肥条件下我国南方双季稻产量的变化趋势. *作物学报*, 2013, 39(5): 943—949. Li Z F, Xu M G, Zhang H M, et al. Yield trends of double-cropping rice under long-term fertilizations in Southern China (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(5): 943—949
- [14] Ladha J K, Regmi A P, Pathak H, et al. Yield and soil fertility trends in a 20-year rice-rice-wheat experiment in Nepal. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(3): 857—867
- [15] Wang X, Wang L, Zhao F, et al. Effects of different long-term fertilization regimes on crop productivity and stress resistance of the double rice cropping system in the hilly area south to the Yangtze River. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27 (4): 62—68
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 108—109. Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 108—109
- [17] 任红松, 吕新, 曹连甫, 等. 通径分析的 SAS 实现方法. 计算机与农业, 2003(4): 17—19. Ren H S, Lü X, Cao L P, et al. The implemented method of SAS in Path Analysis (In Chinese). *Computer and Agriculture*, 2003(4): 17—19
- [18] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327 (5968): 1008—1010
- [19] 侯红乾, 刘秀梅, 刘光荣, 等. 有机无机肥配施比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响. *中国农业科学*, 2011, 44 (3): 516—523. Hou H Q, Liu X M, Liu G R, et al. Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on rice yield and soil fertility in red soil area of China (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(3): 516—523
- [20] 赵明松, 张甘霖, 王德彩, 等. 徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析. *土壤学报*, 2013, 50(1): 1—11. Zhao M S, Zhang G L, Wang D C, et al. Spatial variability of soil organic matter and its dominating factors in Xu-Huai alluvial plain (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1): 1—11
- [21] Ji X H, Wu J M, Peng H, et al. The effect of rice straw incorporation into paddy soil on carbon sequestration and emissions in the double cropping rice system. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2012, 92(5): 1038—1045
- [22] Linsler D, Geisseler D, Loges R, et al. Temporal dynamics of soil organic matter composition and aggregate distribution in permanent grassland after a single tillage event in a temperate climate. *Soil & Tillage Research*, 2013, 126: 90—99
- [23] 鲁艳红, 曾庆利, 廖育林, 等. 双季稻-油菜三熟制下长期施肥对早稻产量、养分吸收及土壤肥力的影响. *中国农业科技导报*, 2011, 13(2): 76—81. Lu Y H, Zeng Q L, Liao Y L, et al. Effects of long-term fertilizer structure on early rice yield, nutrient uptake and soil fertility under double rice-rapeseed rotation system (In Chinese). *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 13(2): 76—81
- [24] Rose T J, Impa S M, Rose M T, et al. Enhancing phosphorus and zinc acquisition efficiency in rice: A critical review of root traits and their potential utility in rice breeding. *Annals of Botany*, 2013, 112(2): 331—345
- [25] Guan G, Tu S X, Li H L, et al. Phosphorus fertilization modes affect crop yield, nutrient uptake, and soil biological properties in the rice-wheat cropping system. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(1): 166—172

THE RICE YIELD TRENDS IN THREE HYDRAGRIC PADDY SOILS IN SOUTH CHINA AND ITS FERTILITY FACTORS

Li Zhongfang^{1,2} Xu Minggang¹ Pang Huancheng^{1†} Zhang Huimin¹ Sun Nan¹ Lou Yilai¹ Li Hui¹

(1 Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Ministry of Agriculture, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

(2 Chemistry and Bioengineering College, Hezhou University, Hezhou, Guangxi 542899, China)

Abstract A long-term (over 10 year) fertilization experiment on the double rice cropping system was conducted in three types of hydramorphic paddy soils in Guilin, Qinzhou and Yulin of Guangxi, South China to investigate variation of crop grain yield and soil fertility with time and differences between the three experimental sites in contribution of the major fer-

tility factors to crop yield and relationship between the two using path analysis, The experiment was designed to have two treatments , CK (no fertilizer) and F (conventional fertilization). Results show that under Treatment CK , grain yield varied in the range of $666 \sim 846 \text{ kg hm}^{-2}$, showing a significant decreasing trend with time at the site of Guilin where the basic soil fertility is rather low , but it was relatively stable , varying in the range of $3\,500 \sim 4\,577 \text{ kg hm}^{-2}$, at the sites of Yulin and Qinzhou where the basic soil fertility is relatively high. However , under Treatment F it increased by 522% over that in Treatment CK , showing a significant rising trend at the site of Guilin , but at the sites of Yulin and Qinzhou , it did only by 20%~67%. Soil fertility in Treatments F remained almost unchanged or increased to a varying extent. For instance , soil available P increased sharply to a significant extent at the sites of Guilin and Qinzhou where its initial value was lower than 10 mg kg^{-1} , but it did not change much at the site of Yulin where its initial value was 50 mg kg^{-1} . Soil organic matter and total nitrogen content also varied from site to site. Soil organic matter displayed a rising trend and TN content was high ($> 3 \text{ g kg}^{-1}$) at the site of Guilin where the temperature is lower , while at the sites of Yulin and Qinzhou where the temperature is higher , the former displayed a declining trend and the latter was relatively low ($1 \sim 2.5 \text{ g kg}^{-1}$) , showing differences between the sites in accumulation and release of soil organic matter. Differences between the sites in major fertility factor contributing rice yield were also observed. Soil available phosphorus is the primary factor at the site of Guilin while at the sites of Yulin and Qinzhou , soil organic matter and total nitrogen are. Therefore , taking proper measures in light of the soil properties of a region is a guarantee of sustainable effective soil building.

Key words Long-term fertilization ; Double Rice ; Yield trend ; Soil fertility factor

(责任编辑：卢萍)