

# 长期施肥下我国南方不同轮作制度水稻的高产稳产性分析<sup>①</sup>

李忠芳<sup>1,2</sup>, 姜翼来<sup>3</sup>, 李 慧<sup>4</sup>, 张旭博<sup>1</sup>, 唐 政<sup>2</sup>, 徐明岗<sup>1\*</sup>

(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系, 广西贺州 542899; 3 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 4 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002)

**摘 要:** 采用产量可持续性指数(SYI)法, 研究了我国稻作系统下 8 个长期试验点各 8 个不同肥料处理下水稻产量的稳产高产性特征, 其中施肥模式包括氮磷钾化肥(NPK)的不同组合(N、NP、NK、PK、NPK)、全施用有机肥(M)、化肥配施有机肥(NPKM)及不施肥(CK)共 8 个处理。结果表明: 不同施肥下水稻的 SYI 值不同, 不施肥和化肥偏施(N、NK 和 PK)水稻 SYI 值较低(0.33~0.49), 而 NP、NPK、M 及 NPKM 处理水稻 SYI 值较高(0.51~0.64)。不同区域间水稻 SYI 值(CK 或 NPK)差异不显著, 但不同轮作间差异显著, 其中单季稻(0.49)显著高于早稻(0.44)和晚稻(0.47)。水稻各处理的 SYI 值与其平均产量间呈极显著的正相关关系, 而与产量变异系数为显著负相关, 表明可以通过提高水稻产量及其稳定性来提高水稻产量的可持续性。因此, 施肥是影响水稻 SYI 值的重要因素, 化肥配施及有机无机配施均能获得较高 SYI 值, 维持较高的水稻可持续性, 是可推荐的稻田施肥模式。

**关键词:** 长期施肥; 水稻; 产量可持续性指数

**中图分类号:** S158.3

水稻在我国的粮食生产中占有十分重要的地位<sup>[1]</sup>, 为了获得高产, 需投入适当数量的化肥, 然而长期施用肥料及随着使用量的增加, 作物产量并不持续增加<sup>[2]</sup>。保证水稻长期的高产稳产则依赖于基于长期观测下提出的科学合理的施肥模式<sup>[3-4]</sup>。所以, 当前的研究从追求高产转变到既强调土壤生产力又强调其生态功能, 以确保土壤资源的可持续利用<sup>[5]</sup>, 尤其是促进现代农业向低碳模式转型, 实现农业的可持续发展<sup>[6]</sup>, 对粮食作物长期生产而言则需考察其生产的可持续性<sup>[7-8]</sup>。

为了追求高产, 不合理地大量施用化学肥料, 会引起一系列生产及环境生态问题<sup>[9]</sup>。为此, 许多国内外学者对水稻施肥模式进行了大量的研究, 但早期的研究多局限于施肥的增产效应<sup>[10]</sup>。未来 50 年全球对粮食的需要将是当前的两倍, 这意味着要进行可持续粮食生产对于水陆生态系统和社会服务体系都面临巨大挑战<sup>[11-12]</sup>。从 20 世纪 90 年代开始, 研究者不满足于针对产量的施肥效应上的研究, 而是从长远利益出发关注其长期的发展趋势<sup>[11]</sup>, 研究可接受的高产下土壤肥力的可持续性问题, 以及地下水污染威胁到农

业的持续健康发展问题<sup>[13]</sup>, 进而通过研究不同施肥模式对土壤有机碳、土壤质量的影响来评价其可持续性<sup>[9]</sup>。农田耕作系统的可持续性依赖于土壤肥力和土壤养分间的平衡所体现出产量的可持续性<sup>[14]</sup>。目前研究表明, 用来评价和预测多年作物产量的可持续程度可选择产量可持续性指数, 即 sustainable yield index (SYI), 其大小与耕作系统的可持续性呈正比<sup>[14-15]</sup>。长期定位试验的建立和持续进行为研究作物在长期生产下, 产量的可持续性问题提供有利条件和宝贵材料<sup>[16]</sup>。前期研究表明, 同一施肥模式下三大粮食作物中水稻的产量可持续性最佳<sup>[16]</sup>, 但在多种不同施肥处理及不同的轮作方式下的水稻产量的可持续性差异方面的研究较少, 其特征和差异尚不清楚, 而这对于研究可持续农业生产有重要意义。

因此, 本研究通过结合 SYI 和产量变异系数分析 8 个水稻连作或轮作的农田生态系统的长期施肥试验, 及不同施肥模式下的水稻产量可持续性差异, 以为建立可持续性最佳的施肥模式提供参考和方法支持, 同时为探索一种最佳的综合评价某一模式下农业生产系统的可持续程度的方法提供参考。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41361068, 41201288)、“十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAD14B04)和广西高校科学技术研究重点项目(2013ZD067)资助。

\* 通讯作者(mgxu@caas.ac.cn)

作者简介: 李忠芳(1976—), 男, 广西贺州人, 博士, 副教授, 研究方向为土壤肥力培育。E-mail: lizhongfang08@126.com

# 1 材料与amp;方法

## 1.1 试验材料

本研究利用我国 8 个建立在南方典型水稻土上的长期施肥试验点(表 1), 进行长期施肥下我国南方双季稻产量的可持续性的研究。这些施肥试验旨在研究不同种植制度下, 化肥或有机肥配合化肥下在水稻产量与土壤肥力上的长期效应。本研究选取了 8 种处理, 包括不施肥(CK)、氮(N)、氮钾(NK)、氮磷(NP)、磷钾(PK)、氮磷钾(NPK)、有机肥(M)和化肥氮磷钾配施有机肥(NPKM), 研究了水稻产量序列随着时间的变化特征。这些长期试验的小区面积为 12 ~ 66 m<sup>2</sup>, 开始的时间为 1981—1984 年, 其数据长度为 23 ~ 26 年(表 1)。

长期定位试验的施肥参考当地农民常规的施肥种类及数量, 如所使用肥料以尿素、过磷酸钙和硫酸

钾或氯化钾为主。一般季施纯氮肥(N)120 ~ 180 kg/hm<sup>2</sup>, 平均 150 kg/hm<sup>2</sup>, 纯磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)60 ~ 150 kg/hm<sup>2</sup>, 平均 80 kg/hm<sup>2</sup>, 纯钾肥(K<sub>2</sub>O)75 ~ 160 kg/hm<sup>2</sup>, 平均 116 kg/hm<sup>2</sup>。有机肥主要为猪厩肥, 每年施 15 ~ 22.5 t/hm<sup>2</sup>, 分两次施入, 以基肥方式施用。8 个试验点的种植制度为早晚稻连作或稻麦轮作, 代表我国南方水稻土上实行的主要耕作制度之一。品种为适合当地生态条件农民常用品种, 具有当地气候、土壤及环境特征的代表性和典型性。

## 1.2 试验方法

水稻产量的可持续程度以产量可持续性指数(SYI)<sup>[17]</sup>表示:

$$SYI = (\bar{Y} - \sigma_{n-1}) / Y_{max}$$

式中:  $\bar{Y}$  为某处理的平均产量;  $\sigma_{n-1}$  为标准差;  $Y_{max}$  为试验点的最高产量。

表 1 长期肥料试验站概况  
Table 1 The survey of long-term fertilization experiments

地点	东经	北纬	轮作制度	年熟制	起止年份
福建白沙	119.26°	26.02°	双季稻	2	1983—2006
江西进贤水田	116.20°	28.40°	双季稻	2	1981—2007
江西南昌	115.90°	28.50°	双季稻	2	1984—2006
湖南望城	112.0°	28.50°	双季稻	2	1981—2007
浙江杭州	120.40°	30.40°	大麦-水稻-水稻	3	1991—2000
湖北武昌	114.20°	30.40°	水稻-小麦	2	1982—2004
四川重庆	106.40°	30.40°	水稻-小麦	2	1982—2005
成都遂宁	104.10°	30.70°	水稻-小麦	2	1982—2006

注: 各试验点经纬度从低到高顺序排列, 方便直观了解水稻的南北区域上各参数差异; 下同。

# 2 结果与分析

## 2.1 水稻产量及其可持续性特征

综合分析 8 个长期施肥试验点不同处理产量差异(图 1)可知, 长期不同施肥下产量差异显著, 其中以不施肥处理产量最低, 为 3 255 kg/hm<sup>2</sup>, 化肥偏施处理(N、NK 和 PK)水稻产量较低(3 925 ~ 4 559 kg/hm<sup>2</sup>), 单施有机肥及施氮磷肥处理(M 和 NP)居中, 而 NPK 和 NPKM 处理产量最高, 均大于 5 000 kg/hm<sup>2</sup>。

表 2 为各产量序列的 SYI 值。不同处理下, 不施肥(CK)和化肥偏施处理(N、NK 和 PK)水稻 SYI 值较低(0.33 ~ 0.49), 而其他处理水稻 SYI 值较高(0.51 ~ 0.64), CK 处理 SYI 值最低为 0.33, 与最高的 NPKM 处理(0.64)相差 0.31, 但总体上不同试验点差异不显著。表明在水稻生产中化肥配施、单施有机肥或化肥配施有机肥处理产量可持续性均较高, 且各点的平均值也较高, 这可能是由于水稻生产中具有相对稳定的

水热条件有关<sup>[16]</sup>。总体上不同地点间水稻 SYI 值差异不明显, 仅福建晚稻和江西晚稻的 SYI 值最小, 均小于 0.4, 分别为 0.31、0.36, 其他点均大于 0.4。但不同轮作制度间差异显著, 单季稻(0.49)显著高于早稻(0.44)和晚稻(0.47)。

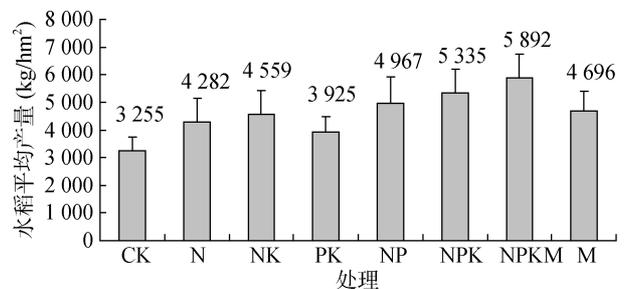


图 1 长期施肥下 8 个试验点不同处理水稻的平均产量  
Fig. 1 The average rice yields of 8 sites in different treatments

## 2.2 水稻产量年际变异性特征

合理的施肥制度应该既要保证作物的高产, 又要

表 2 长期不同施肥下水稻 SYI 值  
Table 2 The rice SYI values during the experimental period for different treatments at all sites

样品	CK	N	NK	PK	NP	NPK	NPKM	M	平均 (CK 和 NPK)
白沙早稻	0.25					0.63	0.75		0.44
白沙晚稻	0.22					0.40	0.44		0.31
进贤化肥早稻	0.33	0.37	0.40	0.34	0.51	0.57	0.68		0.45
进贤化肥晚稻	0.30	0.35	0.37	0.32	0.40	0.43	0.51		0.36
进贤有机肥早稻	0.34					0.63		0.65	0.48
进贤有机肥晚稻	0.39					0.53		0.60	0.46
南昌早稻	0.33		0.57	0.38	0.55	0.71	0.73		0.52
南昌晚稻	0.43		0.64	0.50	0.52	0.65	0.70		0.54
望城早稻	0.25		0.24	0.39	0.48	0.56			0.40
望城晚稻	0.41		0.54	0.51	0.59	0.69			0.55
杭州早稻	0.47	0.60	0.61		0.62	0.63	0.66	0.52	0.55
杭州晚稻	0.35	0.46	0.47		0.49	0.50	0.53	0.41	0.42
重庆水稻	0.36	0.53	0.61	0.49	0.62	0.70	0.69	0.43	0.53
武昌水稻	0.35	0.49			0.57	0.58	0.64	0.56	0.47
遂宁水稻	0.23	0.30			0.68	0.69	0.74	0.39	0.46
平均	0.33 ± 0.07	0.44 ± 0.11	0.49 ± 0.14	0.42 ± 0.08	0.55 ± 0.08	0.59 ± 0.10	0.64 ± 0.10	0.51 ± 0.10	0.46 ± 0.07

维持其稳定性。不同施肥下水稻产量变异系数差异不大,处于 15.8% ~ 23.3%(表 3)。化肥配施(NP 或 NPK)及化肥配施有机肥处理(NPKM)的产量变异系数都小于 20%,分别为 16.5%、15.9% 和 15.8%,其他施肥处理下产量的变异大于 20%,表明化肥配施(NP 或 NPK)及化肥配施有机肥处理(NPKM)的下水

稻产量比较稳定。不同的轮作制度和种植季节上水稻产量变异系数也有差异,施用 NPK 处理下晚稻的变异系数(15.9%)大于早稻(12.4%)和单季稻(13.6%),施用 NPKM 处理同样晚稻(16.4%)大于早稻(10.5%)和单季稻(13.1%)。由此可知,施肥条件下晚稻的变异系数大于早稻和单季稻。

表 3 长期不同施肥下水稻的产量变异系数(%)  
Table 3 The CV of rice yield during the experimental period for different treatments at all sites

样品	CK	N	NK	PK	NP	NPK	NPKM	M	平均 (CK 和 NPK)
白沙早稻	28.2					14.2	11.2		21.2 ± 9.9
白沙晚稻	28.9					22.5	22.7		25.7 ± 4.5
进贤化肥早稻	23.5	23.2	24.8	31.1	15.8	14.5	14.5		19 ± 6.3
进贤化肥晚稻	16.6	17.1	19.0	21.3	14.4	16.7	19.6		16.6 ± 0.1
进贤有机肥早稻	18.8					13.6		14.9	16.2 ± 3.7
进贤有机肥晚稻	16.7					15.6		16.7	16.1 ± 0.7
南昌早稻	27.1		20.8	27.2	17.1	12.5	11.7		19.8 ± 10.3
南昌晚稻	20.0		14.7	18.5	18.1	15.5	13.8		17.7 ± 3.2
望城早稻	31.0		47.6	20.1	20.2	17.7			24.3 ± 9.4
望城晚稻	14.8		20.8	13.5	12.9	13.4			14.1 ± 1.0
杭州早稻	15.2	15.9	13.8		14.6	14.2	15.3	14.3	14.7 ± 0.8
杭州晚稻	35.9	27.4	29.5		26.2	27.3	25.8	34.9	31.6 ± 6.0
重庆水稻	18.2	18.5	15.8	12.9	16.6	13.6	15.2	20.1	15.9 ± 3.3
武昌水稻	26.7	19.9			15.4	15.4	13.2	17.9	21.1 ± 8.0
遂宁水稻	28.2	28.6			10.3	11.8	10.8	20.4	20 ± 11.6
平均	23.3 ± 6.6	21.5 ± 5.0	23.0 ± 10.5	20.7 ± 6.7	16.5 ± 4.2	15.9 ± 4.1	15.8 ± 4.9	19.9 ± 7.0	

不同区域间水稻产量的变异系数存在差异,但与所处经纬度无显著相关,这可能与土壤肥力等其他条件有关(表 3)。3 种轮作方式上水稻的变异系数差异显著,变异系数大于 20% 的点有福建早晚稻、望城早稻、杭州晚稻、武昌和成都单季稻,其中又以杭州晚稻变异系数最大(31.6%),最小的为望城晚稻和杭州早稻分别为 14.1% 和 14.7%,这与各地的气候及各年的水热季节分布有关。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 水稻产量的可持续性分析

本研究中不同施肥下水稻的 SYI 值差异显著,其中化肥配施、单施有机肥或化肥配施有机肥处理水稻产量可持续性都较高,而不施肥(CK)或化肥偏施(N、NK 和 PK)处理水稻 SYI 值较低,CK 处理 SYI 值最低为 0.33,与最高的 NPKM 处理(0.64)相差 0.31(表 2)。表明在水稻生产中化肥配施、单施有机肥或化肥配施有机肥产量可持续性都较高,而且各点的平均值也较高。这与 Wang 等<sup>[18]</sup>的研究一致,其研究结果表明平衡施肥(NPK 或 NPKM)可显著提高产量 SYI 值,显著降低水稻年际间变异系数。

不同地点间水稻 SYI 值差异不明显,但不同轮作制度间差异显著,单季稻(0.49)显著高于早稻(0.44)和晚稻(0.47)。这与目前的研究<sup>[8,16,19-20]</sup>相似, Majumder 等<sup>[20]</sup>研究结果为 CK、N 处理水稻 SYI 值较低,分别为 0.36、0.38,而 NP、NPK、NPKM 水稻 SYI 值较大,分别为 0.43、0.44 和 0.54,不同化肥处理间差异不大。然而,该指数在评价不同作物时其效果不同,更适用于玉米产量可持续性的评价<sup>[21]</sup>,用于水稻的 SYI 还需要进一步改善。对于其原因分

析,前期的研究认为氮磷钾配施有机肥有利于作物高产稳产,是维持系统可持续性的最优施肥模式<sup>[22]</sup>。王莉等<sup>[15]</sup>的研究显示化肥氮磷钾中某一元素单施、偏施(缺少其中一种)则可加快土壤中所缺施养分的耗竭,导致栽培作物产量及其稳定性下降,而通过绿肥还田等方式长期均衡供应养分有利于稻田作物持续高产。

综合分析水稻系列产量 SYI 值及产量变异系数可知,地理位置对水稻产量持续性影响不大,而施肥是主要影响因素,不同施肥处理中以化肥配施及有机无机配施均能获得较高 SYI 值,维持较高的水稻可持续性,是较好的稻田施肥模式。

#### 3.2 水稻产量的可持续性与其稳产高产性的关系

总体上,多年水稻产量 SYI 值与其变异系数(CV)呈极显著的负相关关系(图 2),表明产量变异系数越大水稻可持续性越低,其拟合公式表明 SYI 值每增加 0.1 个单位,产量变异系数就下降 5.8%;而 SYI 值与各处理的产量呈极显著的正相关关系,表明本试验条件下水稻产量越高其可持续性越好,其拟合公式表明 SYI 值每增加 1 个单位,平均产量增加 5 881 kg/hm<sup>2</sup>。因此,借助水稻产量的可持续性指数(SYI 值)可在一定程度上评价长期水稻产量变化的稳产高产性。长期施肥试验结果表明,在南方亚热带双季稻种植区,化肥与有机肥长期配施将促进水稻土有机碳的固定<sup>[23]</sup>,还可以通过单施有机肥等方式提高土壤基础地力和生产力的持续性<sup>[24-25]</sup>。这是由于化肥有机肥配施促进了微生物生长,使水稻固持的氮素增加,可在其生育后期利用<sup>[26-28]</sup>,进而使水稻产量持续高产。本研究晚稻的变异系数大于早稻,这可能与晚稻对施肥响应较大的缘故有关<sup>[3]</sup>。

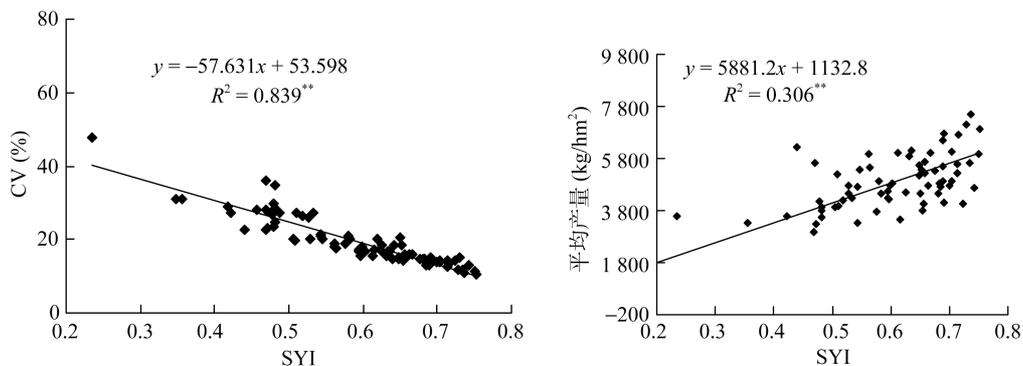


图 2 水稻 SYI 值与产量变异系数及平均产量的关系

Fig. 2 The relationships of rice SYI with CV and average yield

因此,用 SYI 来评价某一栽培模式下产量可持续性具有一定参考价值,与产量的稳定性及高产性呈正比,生产实践中可以通过提高基础地力达到提高

水稻产量可持续性。然而,该指数在评价水稻产量可持续性时不同施肥间差异不大,早晚稻平均值差异不大而产量变异系数早稻显著高于晚稻。为了能将 SYI

更好地用于评价水稻的产量可持续性,其有待进一步优化。

#### 参考文献:

- [1] Zhang TY, Zhu J, Wassmann R. Responses of rice yields to recent climate change in China: An empirical assessment based on long-term observations at different spatial scales (1981-2005)[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(7/8): 1 128-1 137
- [2] 李红莉, 张卫峰, 张福锁, 杜芬, 李亮科. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(05): 1 136-1 143
- [3] 李忠芳, 徐明岗, 逢焕成, 张会民, 孙楠, 娄翼来, 李慧. 中国南方潴育性水稻土产量演变及其肥力驱动因素分析[J]. *土壤学报*, 2014, 51(5): 953-962
- [4] 袁红朝, 秦红灵, 刘守龙, 童成立, 魏文学, 吴金水. 长期施肥对红壤性水稻土细菌群落结构和数量的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(22): 4 610-4 617
- [5] 赵其国, 周健民, 沈仁芳, 滕应. 面向不断变化世界, 创新未来土壤科学——第 19 届世界土壤学大会综合报道[J]. *土壤*, 2010, 42(05): 681-695
- [6] 赵其国, 黄国勤, 钱海燕. 低碳农业[J]. *土壤*, 2011, 43(1): 1-5
- [7] 王鑫. 长期不同施肥下江西双季稻田系统生产力与抗逆性的比较分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2011
- [8] 马力, 杨林章, 沈明星, 夏立忠, 李运东, 刘国华, 殷士学. 基于长期定位试验的典型稻麦轮作区作物产量稳定性研究[J]. *农业工程学报*, 2011(4): 117-124
- [9] 王姗姗. 长期施肥下我国典型红壤性水稻土肥力演变特征与持续利用[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012
- [10] 李成亮, 何园球, 王艳玲. 氮磷钾肥对红壤区水稻增产效应的影响[J]. *中国水稻科学*, 2007, 21(2): 179-184
- [11] 杨学利. 基于可持续发展视角的中国粮食安全评价研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010
- [12] 张燕林. 中国未来粮食安全研究[D]. 成都: 西南财经大学, 2010
- [13] 朱红霞. 太湖地区典型农田土壤氮磷时空变异及对水环境的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011
- [14] 鲁艳红. 长期施肥条件下红壤性水稻土有机质特征及其与土壤质量的关系[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011
- [15] 王莉, 王鑫, 余喜初, 黄欠如, 赵锋, 张卫建. 长期绿肥还田对江南稻田系统生产力及抗逆性的影响[J]. *中国水稻科学*, 2012(1): 92-100
- [16] 李忠芳, 徐明岗, 张会民, 张淑香, 张文菊. 长期施肥和不同生态条件下我国作物产量可持续性特征[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1 264-1 269
- [17] Srinivasarao CH, Deshpande AN, Venkateswarlu B, Lal R, Singh AK, Kundu S, Vittal KPR, Mishra PK, Prasad JVNS, Mandal UK, Sharma KL. Grain yield and carbon sequestration potential of post monsoon sorghum cultivation in Vertisols in the semi arid tropics of central India[J]. *Geoderma*, 2012, 175/176: 90-97
- [18] Wang X, Wang L, Zhao F, Chen WP, Yu XC, Huang QR, Zhang WJ. 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[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(4): 62-68
- [19] 吴焕焕, 徐明岗, 吕家珑. 长期不同施肥条件下红壤水稻产量可持续性特征[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*. 2014, 42(7): 163-168
- [20] Majumder B, Mandal B, Bandyopadhyay P, Chaudhury J. Soil organic carbon pools and productivity relationships for a 34 year old rice-wheat-jute agroecosystem under different fertilizer treatments[J]. *Plant and Soil*, 2007, 297(1): 53-67
- [21] 李忠芳, 徐明岗, 张会民, 张文菊. 长期不同施肥模式对我国玉米产量可持续性的影响. *玉米科学*, 2009, 17(6): 82-87
- [22] Bado B, Aw A, Ndiaye M. Long-term effect of continuous cropping of irrigated rice on soil and yield trends in the Sahel of West Africa[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 88(1): 133-141
- [23] 孙玉桃, 廖育林, 郑圣先, 聂军, 鲁艳红, 谢坚. 长期施肥对双季稻种植下土壤有机碳库和固碳量的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(03): 732-740
- [24] Premi OP, Kandpal BK, Rathore SS, Shekhawat K, Chauhan JS. Green manuring, mustard residue recycling and fertilizer application affects productivity and sustainability of Indian mustard (*Brassica juncea* L.) in Indian semi-arid tropics[J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 41(01): 423-429
- [25] Nayak AK, Gangwar B, Shukla AK, Mazumdar SP, Kumar A, Raja R, Kumar V, Rai PK, Mohan U. Long-term effect of different integrated nutrient management on soil organic carbon and its fractions and sustainability of rice-wheat system in Indo Gangetic Plains of India[J]. *Field Crops Research*, 2012, 127: 129-139
- [26] 靳振江, 潘根兴, 刘晓雨, 李恋卿. 太湖地区长期不同施肥水稻土 N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 固定细菌群落结构的特征与差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(1): 82-92
- [27] 陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 江春玉. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(5): 950-960
- [28] 刘益仁, 李想, 郁洁, 沈其荣, 徐阳春. 有机无机肥配施提高麦-稻轮作系统中水稻氮肥利用率的机制[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 81-86

## The Analyses of Sustainable Yield Index of Rice Under Long-term Fertilization with Different Rotation Systems in Southern China

LI Zhong-fang<sup>1,2</sup>, LOU Yi-lai<sup>3</sup>, LI Hui<sup>4</sup>, ZHANG Xu-bo<sup>1</sup>, TANG Zheng<sup>2</sup>, XU Ming-gang<sup>1\*</sup>

(1 Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Ministry of Agriculture of China, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2 Chemistry and Bioengineering Department, Hezhou University, Hezhou, Guangxi 542899, China; 3 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 4 College of Resources and Environmental Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** A sustainable yield index (SYI) was used to investigate the effects of fertilization on high and stable rice productivity in eight long-term experiment trails with rice-wheat and rice-rice rotations in southern China. There were eight treatments in each of long-term trails: control (CK), chemical nitrogen (N), chemical N and potassium (NK), chemical N and phosphorous (NP), chemical NPK, application of manure (M) and NPK plus M (NPKM). Results showed that the SYI values of rice varied with different fertilization types and cropping systems. The SYI values of rice in the N, NK and PK treatments (0.33–0.49) were lower than those in the NP, NPK, M and NPKM treatments (0.51–0.64). There were no significant differences among the SYI values in the eight sites across the CK and NPK treatments. For different cropping systems, however, the SYI values were significantly different among the single rice (0.49), early-rice (0.44) and late-rice (0.47). A significantly positive correlation was found between SYI value and average yield and a significant negative correlation was found between SYI value and yield variation indexes, which suggested that sustaining of rice yield could be achieved by promoting of rice productivity and stability. Thus, rice SYI could be significantly improved by fertilizers applied, particularly by applications of NPK and NPK plus manure in the rice dominated regions.

**Key words:** Long-term fertilization; Rice; Sustainable yield index(SYI)