

# 水稻产量对长期不同施肥和环境的响应\*

黄 晶<sup>1,2,3</sup> 张杨珠<sup>3</sup> 刘淑军<sup>1,2</sup> 高菊生<sup>1,2\*\*</sup>

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室 北京 100081; 2. 中国农业科学院衡阳红壤实验站/祁阳农田生态系统国家野外试验站 祁阳 426182; 3. 湖南农业大学资源环境学院 长沙 410128)

**摘 要** 以开始于1982年的不同施肥长期定位试验为平台,选择氮磷钾肥(NPK)、有机肥(牛粪, M)、氮磷钾肥+有机肥(NPKM)、氮磷肥+有机肥(NPM)、氮钾肥+有机肥(NKM)和磷钾肥+有机肥(PKM)共6个处理,采用产量年际变化、变异系数(CV)、产量可持续指数(SYI)、肥料增产贡献率及AMMI模型对影响双季稻稻谷总产量稳定性的施肥处理、环境和二者互作进行综合分析,研究历年稻谷产量(1982—2012年)对长期不同施肥和环境的响应特征。结果表明:NPKM处理稻谷产量最高;在养分投入量相同的情况下,单施有机肥和单施化肥对于早稻产量的影响效果一致,但单施有机肥较单施化肥有利于提高晚稻稻谷产量。不同施肥处理稻谷产量CV随试验时间延长逐渐降低,有机无机配施相比较单施化肥能够减小产量CV,各处理晚稻产量的CV大于早稻,但其SYI值小于早稻。NPKM处理的SYI值最高,为0.51;M和NPK处理的SYI值分别为0.44和0.42。肥料对于产量的贡献率表现为:有机肥>化肥氮>化肥磷>化肥钾。AMMI模型交互效应主成分(IPCA)表明,不同施肥处理在不同试验年份对环境的响应不一样。综合以上分析结果,氮磷钾完全肥基础上配施有机肥(NPKM)是该区域双季稻高产和稳产的最佳施肥措施。

**关键词** 稻谷产量 长期施肥 产量变异系数 产量可持续性指数 肥料增产贡献率

中图分类号: S158.3 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2015)11-1367-10

## Response of rice yield to different long-term fertilization regimes and the environment\*

HUANG Jing<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Yangzhu<sup>3</sup>, LIU Shujun<sup>1,2</sup>, GAO Jusheng<sup>1,2\*\*</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences / National Engineering Laboratory for Improving Arable Land Quality, Beijing 100081, China; 2. HengYang Red Soil Experimental Station of Chinese Academy of Agricultural Sciences / National Observation and Research Station of Farmland Ecosystems in Qiyang, Qiyang 426182, China; 3. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

**Abstract** This study was based on a long-term fertilization experiment on rice-rice rotation started in 1982 at the HengYang Red Soil Experiment Station of Chinese Academy of Agricultural Sciences. Six fertilization treatments of the experiment were chosen — chemical nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) fertilizer (NPK), cattle manure (M), NPK plus M (NPKM), NP plus M (NPM), NK plus M (NKM) and PK plus M (PKM) in this study. The effects of fertilization, environment and their interaction on rice yield stability were determined according to inter-annual variability and coefficient of variation (CV) of rice yield, sustainable yield index (SYI), contribution of fertilizer to rice productivity, as well as the additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) model. Results showed that among various treatments, NPKM treatment had the highest grain yield. Rice yield increased with increasing N fertilizer. The yield-increasing effect of combined application of chemical P

\* 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2014-9)、公益性行业(农业)科研专项(201203030, 201103005)和国家科技支撑计划项目(2012BAD05B05)资助

\*\* 通讯作者: 高菊生, 主要从事水稻、旱地长期定位试验及作物栽培与土壤培肥研究。E-mail: gjusheng@163.com  
黄晶, 主要从事施肥与土壤肥力演变的研究。E-mail: huangjing@caas.cn

收稿日期: 2015-04-10 接受日期: 2015-08-09

\* This study was supported by the Fundamental Research Funds in Central Public Welfare Research Institutes (No.2014-9), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201203030, 201103005), the National Key Technology Support Program (2012BAD05B05).

\*\* Corresponding author, E-mail: gjusheng@163.com

Received Apr. 10, 2015; accepted Aug. 9, 2015

and K fertilizers was better than that of sole application of P or K fertilizer at the same N application rate. Chemical K fertilizer presented better yield-increasing effect than chemical P fertilizer. Under long-term application, organic fertilizer was more favored rice yield increase than chemical fertilizer. There was no significant difference in early rice yield between M and NPK treatments under the same nutrient input. However, yield of late rice under M treatment was significantly higher than that under NPK treatment. For all the treatments, the CV of rice yield decreased with time. However, the application of M plus chemical fertilizers had smaller yield CV than the application of chemical fertilizers alone. For all the treatments, the CV of late rice yield was higher than that of early rice yield. However, the SYI of late rice yield was lower than that of early rice. Also for all the treatments, SYI was highest for NPKM treatment (0.51). SYI for M and NPK treatments were 0.44 and 0.42, respectively. The order of contribution rate of fertilizers to rice yield was: organic fertilizer > chemical N > chemical P > chemical K. The results of AMMI model showed that different fertilizer treatments had different response to the environment for different experimental years. Thus based on the results, the use of chemical fertilizers in combination with organic fertilizers (NPKM) was the optimal fertilization regime of maintaining high crop productivity and yield stability of double cropping rice in the study area.

**Keywords** Rice yield; Long-term fertilization; Coefficient of variation (CV) of rice yield; Sustainable yield index; Fertilizer contribution to yield

不论从种植面积, 还是稻米需求量, 水稻对于我国粮食安全的意义重大<sup>[1]</sup>。产量是进行作物生产的直接目的, 在注重可持续发展的今天人们不仅关心当季产量, 还通过长期试验研究产量变化的趋势特征, 发展可持续性农业。施肥是水稻高产和稳产的最主要措施之一, 据统计, 肥料对提高水稻产量的贡献率为30%~50%<sup>[2-3]</sup>。然而随着化学肥料的长期施用以及肥料用量的增加, 水稻产量并不是呈持续增加趋势。Ladha等<sup>[4]</sup>分析了亚洲部分稻麦轮作长期试验中作物产量的变化趋势, 认为产量下降问题比较严重, 而且存在土壤退化等问题。有研究表明肥料单独施用均表现出产量降低的趋势, 而化肥配合有机肥施用作物产量表现为增长趋势<sup>[5]</sup>。有机物还田能够改变作物增产趋势, 可能是由于有机物料还田对维持稻田生态系统的土壤健康和可持续性起着重要的作用, 主要表现在提高土壤有机质的含量与质量以及提供许多重要的微量营养元素。但水稻的高产和稳产不仅与施肥有关, 还受环境以及二者交互作用的影响。采用长期定位试验可以连续观测土壤生产力对施肥响应的演变, 从而可对土壤生产力的稳定性进行预测<sup>[6]</sup>。有关长期不同施肥下水稻产量变化、产量可持续性指数(sustainable yield index, SYI)变化特征以及采用AMMI模型(additive main effects and multiplicative interaction)对影响双季稻总产量稳定性的施肥处理、环境和二者互作响应等已进行了大量研究<sup>[7-10]</sup>。研究结果均表明有机无机肥配施是水稻高产和稳产的理想施肥措施。但这些研究结果中, 有认为施肥模式对水稻稳产性影响的实质主要表现在养分的均衡供应方面, 适量和平衡地提供水稻所需的营养元素是水稻稳产的物质基础,

至于这些养分是来自化肥或有机肥源并不重要; 也有研究结果表明双季稻产量稳定性的提高不仅与养分均衡有关, 还与有机肥和化肥之间配施比例密切相关; 且相关研究大多采用一种方法对产量的稳定性进行评价, 如果采用不同的评价方法对于双季稻产量稳定性分析的结果不完全相同, 例如在高生产水平下, SYI不太适合评估产量的可持续性。同时, 由于不同施肥模式及地力水平下, 水稻产量长期变化趋势及原因较为复杂。不同种植条件水稻产量变化趋势对不同施肥的响应特点及原因尚未明确<sup>[11]</sup>。因此本研究在湖南省红壤丘陵区基于水稻长期不同施肥定位试验(1982—2012年), 分析长期不同施肥后水稻产量的变化趋势、可持续性指数变化、肥料贡献率以及施肥与环境交互作用的特征, 综合多种评价方法, 研究水稻产量对不同施肥的响应特征及原因, 以期对红壤丘陵区双季稻产量的稳定性评价提供相关理论基础, 为双季稻高产稳产施肥方法的优化和筛选提供技术支撑和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

于1982年开始进行有机肥、无机肥配施长期定位试验, 地点设在湖南省祁阳县官山坪中国农业科学院红壤实验站内稻田(E 111°52'32", N 26°45'42"), 主要气象因子见表1。土壤为第四纪红土母质发育的红壤性水稻土, 试验开始前种植水稻。试验开始时0~20 cm土壤基本理化性状为: pH 5.97, 有机质19.8 g·kg<sup>-1</sup>, 全氮1.5 g·kg<sup>-1</sup>, 碱解氮158.0 mg·kg<sup>-1</sup>, 全磷0.48 g·kg<sup>-1</sup>, 有效磷9.6 mg·kg<sup>-1</sup>, 全钾14.2 g·kg<sup>-1</sup>, 速效钾65.9 mg·kg<sup>-1</sup>, 属中低肥力水平。

表 1 试验期间试验区主要气象因子数据(1982—2011 年)

Table 1 Main meteorological factors in the study area during the study period from 1982 to 2011

项目 Item	1982—1986	1987—1991	1992—1996	1997—2001	2002—2006	2007—2011
年均气温 Annual mean temperature (°C)	18.0	18.0	18.2	18.6	18.6	18.7
年均降雨量 Annual mean precipitation (mm)	1 258.4	1 287.5	1 359.0	1 404.0	1 469.4	1 003.5
年均日照时数 Annual sunshine duration (h)	1 369.0	1 429.5	1 388.4	1 403.3	1 588.7	1 542.2

## 1.2 试验方法

1982年试验开始时设6个处理,即:1)化学磷钾肥+有机肥(PKM);2)化学氮钾肥+有机肥(NKM);3)化学氮磷肥+有机肥(NPM);4)有机肥(M);5)化学氮磷钾肥(NPK);6)化学氮磷钾肥+有机肥(NPKM)。小区面积 $1.8\text{ m}\times 15\text{ m}=27\text{ m}^2$ ,重复3次,随机排列,各小区内均用水泥埂分隔。有机肥为腐熟牛粪(养分含量为多年测定平均值,含N 0.32%,含 $\text{P}_2\text{O}_5$  0.25%,含 $\text{K}_2\text{O}$  0.15%),化肥为尿素(含N46%)、过磷酸钙(含 $\text{P}_2\text{O}_5$  12%)、氯化钾(含 $\text{K}_2\text{O}$  60%)。种植模式为早稻—晚稻—冬闲,早稻、晚稻施肥量一致,所有肥料均作底肥一次性施入。各处理肥料用量见表2。水稻收获时,各小区单打单晒,测定稻谷产量。

表 2 各处理每季水稻肥料施用量

Table 2 Fertilizer application rates of different treatments for every rice season  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 

处理 Treatment	牛粪 Cattle manure	化肥 Chemical fertilizer		
		N	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{K}_2\text{O}$
PKM	22 500	0	56.3	33.8
NKM	22 500	72.5	0	33.8
NPM	22 500	72.5	56.3	0
M	22 500	0	0	0
NPK	0	72.5	56.3	33.8
NPKM	22 500	72.5	56.3	33.8

## 1.3 数据处理

选择以上6个不同处理历年(1982—2012年)水稻产量数据,采用Excel 2003进行数据整理、稳定性方差和相关变异系数计算以及绘图;DPS  $V_{6.5}$ 统计软件进行AMMI模型分析和方差分析,其中产量方差分析为单因素方差(One Way-ANOVA)分析,不同处理之间多重比较采用LSD方法。作物产量的可持续性程度用SYI表示<sup>[12]</sup>:

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

式中:  $Y$ 为平均产量,  $\sigma_{n-1}$ 为标准差,  $Y_{\max}$ 为最高产量。

氮肥(磷肥、钾肥和有机肥)增产贡献率表示施氮(磷、钾和有机肥)区作物籽粒产量与无氮(磷、钾和有机肥)区作物籽粒产量之差占无氮(磷、钾和有机肥)区作物籽粒产量的百分数<sup>[13]</sup>。如氮肥增产贡献率表达式为:

$$i_N = (Y_{\text{NPKM}} - Y_{\text{PKM}}) / Y_{\text{PKM}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $i_N$ 是氮肥增产贡献率(%),  $Y_{\text{NPKM}}$ 为NPKM处理的作物籽粒产量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),  $Y_{\text{PKM}}$ 为PKM处理的作物籽粒产量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。依次类推计算磷肥、钾肥和有机肥增产贡献率。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥处理水稻产量及其变化

由图 1a 可见,各处理早稻产量年际变化较大,不同处理早稻产量随试验时间所呈现的变化趋势一致。试验开始前 5 年,不同施肥处理间的早稻产量差异较小,从 1987 年开始,不同施肥措施对早稻产量的影响逐渐增大。除个别年份外,NPKM 处理的早稻产量一直保持最高水平,其他施肥处理的早稻产量随施肥年份呈现的规律不明显。同时由表 3 可知,NPKM、NPM、NKM、PKM、M 和 NPK 处理的历年早稻平均产量分别为  $6\ 185\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $5\ 910\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $5\ 560\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $5\ 346\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $5\ 283\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $5\ 172\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。等氮投入的 NPKM、NPM 和 NKM 3 个处理历年早稻平均产量变化趋势为  $\text{NPKM} > \text{NPM} > \text{NKM}$  ( $P < 0.05$ ),说明早稻增施化学磷肥增产效果要好于增施化学钾肥;PKM、M 和 NPK 3 个处理的历年早稻产量显著低于其他施肥处理,该 3 个处理间的差异不显著,说明即使在施用有机肥的基础上增施化学磷钾肥,不能明显增加早稻稻谷产量,在养分投入量相同的情况下,有机肥和化肥对于早稻产量的影响效果一致。

各处理晚稻产量随施肥年份的起伏波动较大(图 1b),不同处理同一年份的晚稻产量低于早稻,各处理晚稻产量随施肥时间所呈现的变化趋势和早稻有所区别。NPKM 处理的晚稻产量始终保持最高水平;NPK 处理随着施肥时间的延长呈下降趋势,连续单施化肥 7 年后,即从 1989 年开始,除个别年份外,其晚稻产量逐渐低于其他施肥处理;其他各施肥处理晚稻产量在一定范围内起伏变化,未见明显规律。不同施肥处理间历年晚稻平均产量的高低和早稻有所不同(表 3),NPKM、NPM、NKM、M、PKM 和 NPK 处理的历年晚稻平均产量分别为  $5\ 225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $4\ 880\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $4\ 729\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $4\ 571\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、

4 474 kg·hm<sup>-2</sup> 和 4 296 kg·hm<sup>-2</sup>。等氮投入的 NPKM、NPM 和 NKM 3 个处理历年晚稻平均产量变化趋势为 NPKM>NPM、NKM( $P<0.05$ ), NPM 和 NKM 处理间未见显著差异, 晚稻增施磷肥或增施钾肥对产量的影响效果一致; PKM、M 和 NPK 3 个处理的历年晚稻平均产量变化趋势为 M、PKM>NPK( $P<0.05$ ), M 和 PKM 处理间差异不显著, 在养分投入量相同的情况下, 单施有机肥较单施化肥有利于提高晚稻稻谷产量。

不同施肥处理年产量的变化趋势和晚稻相似(图 1c)。随着施肥时间的延长, 不同施肥处理稻谷年产量的差异逐渐呈现。NPKM 处理的水稻产量一直保

持最高水平; NPK 处理水稻产量随着施肥时间的延长呈下降趋势, 逐渐低于其他施肥处理。NPKM、NPM、NKM、M、PKM 和 NPK 处理的历年平均产量分别为 11 241 kg·hm<sup>-2</sup>、10 633 kg·hm<sup>-2</sup>、10 137 kg·hm<sup>-2</sup>、9 707 kg·hm<sup>-2</sup>、9 676 kg·hm<sup>-2</sup> 和 9 329 kg·hm<sup>-2</sup>(表 3)。不同处理历年平均产量变化趋势为: NPKM>NPM>NKM>M、PKM>NPK( $P<0.05$ )。水稻历年平均产量随施氮量的增加而增加; 等氮条件下, 同时增施化学磷钾肥的增产效果要优于单独增施化学磷肥或钾肥; 增施化学磷肥较增施化学钾肥更有利于水稻产量提高; 长期单施有机肥较单施化肥增产效果更好。

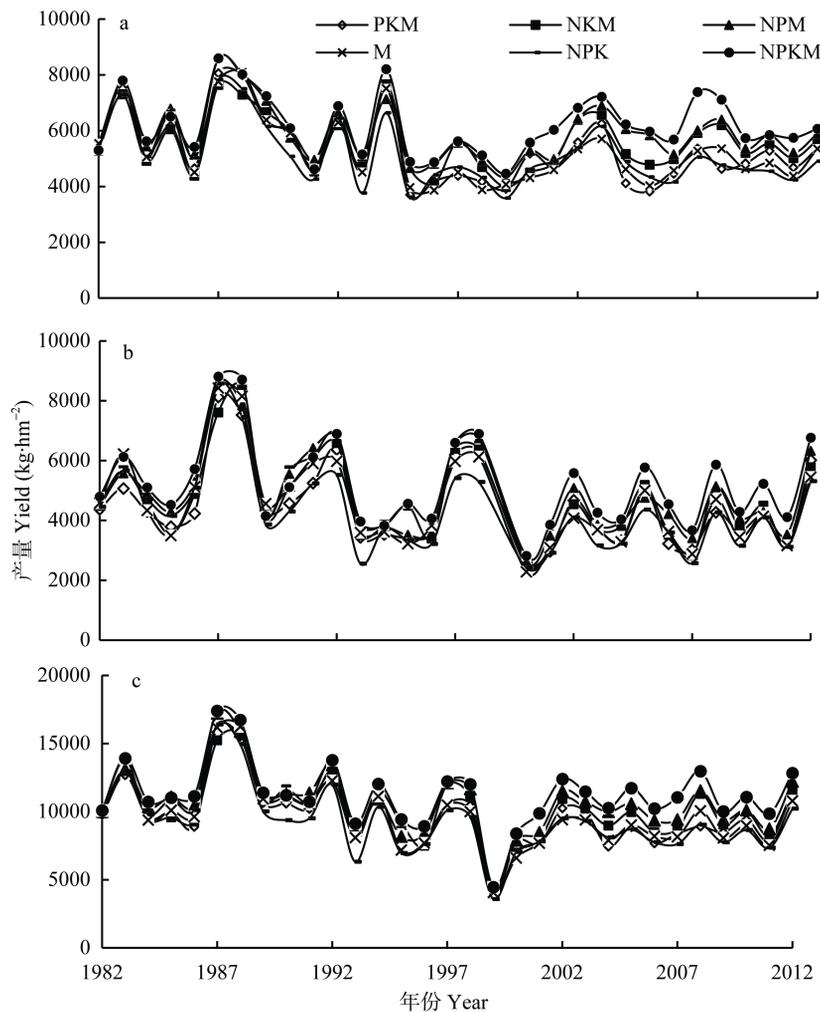


图 1 不同施肥处理早稻(a)、晚稻(b)和全年(c)稻谷产量

Fig. 1 Changes in early rice yield (a), later rice yield (b) and annual output of rice (c) relative to fertilization treatment

从产量的年变化量(表 3)可知, 不同施肥处理的早稻、晚稻及年稻谷产量 1982—2012 年均随着试验时间的延长呈下降趋势, 以 NPKM 处理的下降量最小, 除 M 外, 各施肥处理晚稻产量下降量高于早稻; M 处理的早稻、晚稻及年稻谷产量均随着试验年份

呈显著降低趋势, PKM 处理的早稻和年稻谷产量、NPK 处理的晚稻、年稻谷产量分别随着试验年份呈显著降低趋势。

对长期不同施肥处理稻谷产量的变异系数(表 3)分析表明, 各施肥处理的早稻、晚稻和年稻谷产量

表 3 不同施肥处理的稻谷产量变化和变异系数  
Table 3 Rice yield changes and coefficient of variation of yield of different fertilization treatments

处理 Treatment	生长季 Growing season	平均产量(1982—2012 年) Average annual yield from 1982 to 2012 (kg·hm <sup>-2</sup> )	产量年变化量(1982—2012 年) Annual variation rate of yield from 1982 to 2012 (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	变异系数 Yield coefficient of variation (%)			
				1982—1990	1991—2000	2001—2012	1982—2012
PKM	早稻 Early rice	5 346±220c	-57*	19.5	27.0	13.7	22.9
NKM		5 560±185bc	-23	18.6	23.0	11.2	18.6
NPM		5 910±185ab	-30**	18.8	17.3	9.9	17.4
M		5 283±218c	-58**	19.7	26.7	10.3	22.9
NPK		5 172±203c	-59	18.3	24.3	11.4	21.9
NPKM		6 185±196a	-14	18.2	21.0	10.0	17.6
PKM	晚稻 Late rice	4 474±246b	-37	30.4	35.5	23.7	30.6
NKM		4 729±257ab	-43	29.4	33.5	22.7	30.2
NPM		4 880±259ab	-39	27.9	37.5	19.7	29.6
M		4 571±264ab	-58*	30.8	34.2	21.0	32.2
NPK		4 296±251b	-57*	30.2	32.8	21.4	32.5
NPKM		5 225±258a	-29	29.3	32.4	20.3	27.5
PKM	全年 One year	9 676±436bc	-112*	23.2	28.6	13.7	25.1
NKM		10 137±416abc	-85	21.4	28.9	12.6	22.8
NPM		10 633±428ab	-88	21.1	27.8	11.5	22.4
M		9 707±455bc	-135**	23.0	28.4	11.6	26.1
NPK		9 329±441c	-134**	22.1	29.5	10.5	26.3
NPKM		11 241±424a	-59	21.6	26.2	10.3	21.0

\*为 5%显著水平, \*\*为 1%极显著水平。数据后不同小写字母表示 5%显著性差异。\* indicates significant difference at 5% level. \*\* indicates significant difference at 1% level. Different small letters indicate significant difference at 5% level.

变异系数随着施肥时间的延长呈先升高后下降趋势。不同施肥处理年稻谷产量变异系数由试验开始前期(1982—2000 年)的 21.1%~29.5%，下降到 10.3%~13.7%(2001—2012 年)。各施肥处理在试验开始后不同阶段晚稻稻谷产量的变异系数均大于早稻, PKM、NKM、NPM、M、NPK 和 NPKM 处理的晚稻稻谷产量变异系数(1982—2012 年)比早稻稻谷产量变异系数分别高 33.6%、62.8%、70.1%、40.4%、48.4%和 55.9%; 早稻稻谷产量的变异系数以 PKM 和 M 处理最大、NPM 处理最小, 晚稻稻谷产量的变异系数以 NPK 处理最大、NPKM 处理最小; 各处理年稻谷产量变异系数的变化趋势与晚稻相似。

长期不同施肥处理的产量可持续指数(SYI)呈现差异(图 2), 各处理早稻的 SYI 值比晚稻高 25.3%~34.5%, 且各处理晚稻 SYI 的波动幅度大于早稻。不同施肥处理间, 年稻谷产量 SYI 值的大小顺序为 NPKM>NKM>NPM>PKM>M>NPK。NPKM 处理的 SYI 值最高, 为 0.51, 其平均产量也最高(11 241 kg·hm<sup>-2</sup>)。从高产性和产量可持续性方面分析, NPKM 为最好的施肥模式; NKM 和 NPM 处理的 SYI 值(0.50 和 0.48)和平均产量(10 137 kg·hm<sup>-2</sup>和 10 633 kg·hm<sup>-2</sup>)均较高, 此为在氮素供应充足的情况下, 可以采用但有待改进的施肥模式; PKM、M 和 NPK 处理的 SYI

值(0.45、0.44 和 0.42)和平均产量(9 676 kg·hm<sup>-2</sup>、9 707 kg·hm<sup>-2</sup>和 9 329 kg·hm<sup>-2</sup>)均较低, 建议为有待改进的施肥模式。

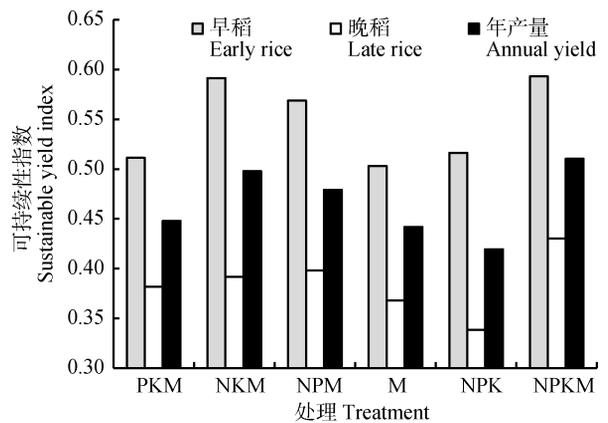


图 2 不同施肥处理的稻谷产量的可持续性指数(SYI)  
Fig. 2 Sustainable yield indexes (SYI) of rice yields under different fertilization treatments

### 2.2 肥料对产量的贡献率

从年际变化来看, 肥料对于产量的贡献率是波动的(图 3)。化肥氮、化肥磷、化肥钾和有机肥对早稻的增产贡献率平均分别为 17.7%、11.6%、4.7%和 21.1%, 对晚稻的增产贡献率平均分别为 18.0%、11.8%、7.9%和 23.7%。不同种类肥料对早稻或晚稻

的增产贡献率均以有机肥最大, 化肥钾最小, 化肥氮的增产贡献率大于化肥磷和化肥钾; 不同种类肥料对晚稻的增产贡献率大于早稻。

长期施肥下, 不同种类肥料的增产贡献率呈逐年升高趋势。1982—2012 年, 化肥氮、化肥磷、化肥钾和有机肥的早稻增产贡献率年增加率分别为 1.1%、0.2%、0.3%和 1.1%, 晚稻增产贡献率年增加

率分别为 0.4%、0.5%、0.3%和 1.0%。随着施肥年限的增加, 早稻施用化肥氮的增产贡献年增加率大于晚稻, 晚稻施用化肥磷的增产贡献年增加率大于早稻。试验后 3 年化肥氮、化肥磷、化肥钾、有机肥对早稻和晚稻增产贡献率比试验开始的前 3 年分别增加 12.8%、1.9%、3.6%、23.8%和 6.1%、12.6%、8.2%、21.1%, 有机肥的增产贡献率增幅最大。

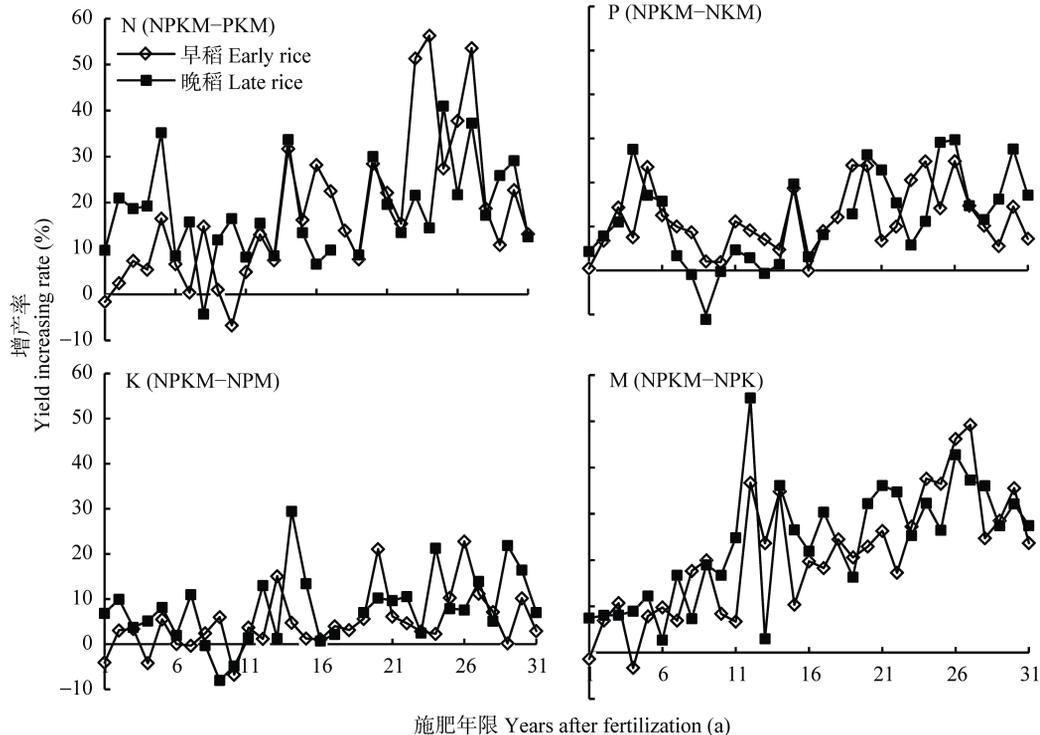


图 3 施肥后不同年限不同肥料的增产效应

Fig. 3 Yield-increasing effects of different fertilizers after different years of fertilization  
X 轴中施肥第 1 年为 1982 年。The first year after fertilization is 1982 (X axis).

### 2.3 产量对施肥和环境的响应

长期不同施肥处理导致不同的土壤肥力水平, 将施肥处理与其相对应的土壤肥力水平作为一个维度, 即“施肥处理”, 每年的气候、品种和其他环境条件作为一个维度即“环境”, 基于此, 对 31 年定位施肥试验的双季稻总产量进行联合方差及 AMMI 分析。结果表明(表 4), 施肥处理、年际间环境和施肥处理与环境互作(F×E)的平方和分别占方差分析总平方和的 89.6%、6.9%和 3.4%, 三者均达到了显著差异( $P < 0.05$ )。由此说明有必要利用 AMMI 模型对双季稻总产量进行稳定性分析, 尽管施肥处理间的变异占了主要部分, 交互作用所占的比例相对较小。对互作的主成分分析结果表明, IPCA1 和 IPCA2 均达到显著水平( $P < 0.05$ ), 其平方和分别占互作平方和的 48.8%和 26.2%, 残差占 25.0%, 2 项累计解释了 75.0%的互

作平方和, 主成分分析比较透彻地分析了交互作用的信息。

以上述第 1 主成分交互作用(IPCA1)与产量和第 2 主成分交互作用(IPCA2)绘制了双标图(图 4), 图 4 中 F1、F2、F3、F4、F5 和 F6 分别代表 PKM、NKM、NPM、M、NPK 和 NPKM 施肥处理, E1、E2、E3、……、E31 分别代表 1982、1983、1984、……、2012 年的环境。施肥处理(F)与环境(E)在同侧, 表示该施肥处理在该环境中的交互作用为正, 相反即表示交互作用为负。如果以  $IPCA1=0$  作一条水平线, 可见, 产量较高的 F2(NKM)、F3(NPM)和 F6(NPKM)3 个处理和产量较低的 F1(PKM)、F4(M)、F5(NPK)3 个处理分别位于水平线两侧。F1(PKM)、F4(M)和 F5(NPK)与 1982—1996 年之间的环境互作为正, 即表示 1982—1996 年之间的环境对双季稻总产量的提高有

表 4 长期施肥下双季稻产量的方差分析、线性回归模型和 AMMI 模型分析

Table 4 ANOVA, linear regression and AMMI model analysis of the double cropping rice yields under long-term fertilization

	变异来源 Source of variation	df	SS	F	P
方差分析 Analysis of variance	总的 Total	185	1 125 600 367.46		
	施肥 Fertilization	30	1 009 099 267.55	130.86	0.000 1
	环境 Environment	5	77 944 799.45	60.65	0.000 1
	误差 Error	150	38 556 300.46		
线性回归分析 Linear regression analysis	总的 Total	185	1 125 600 367.46		
	施肥 Fertilization	30	1 009 099 267.55	179.62	0.000 1
	环境 Environment	5	77 944 799.45	83.24	0.000 1
	交互作用 F×E	150	38 556 300.46	1.37	0.037 2
	联合回归 Joint- regression	1	325 273.96	1.74	0.190 1
	施肥回归 F-regression	29	15 858 120.53	2.92	0.000 1
	环境回归 E-regression	4	649 568.94	0.87	0.486 0
	误差 Error	116	21 723 337.02		
AMMI 分析 Analysis of AMMI model	总的 Total	185	1 125 600 367.46		
	施肥 Fertilization	30	1 009 099 267.55	188.46	0.000 1
	环境 Environment	5	77 944 799.45	87.34	0.000 1
	交互作用 F×E	150	38 556 300.46	1.44	0.062 1
	IPCA1	34	18 805 526.03	3.10	0.000 1
	IPCA2	32	10 112 953.85	1.77	0.031 5
	残差 Residual	54	9 637 820.58		

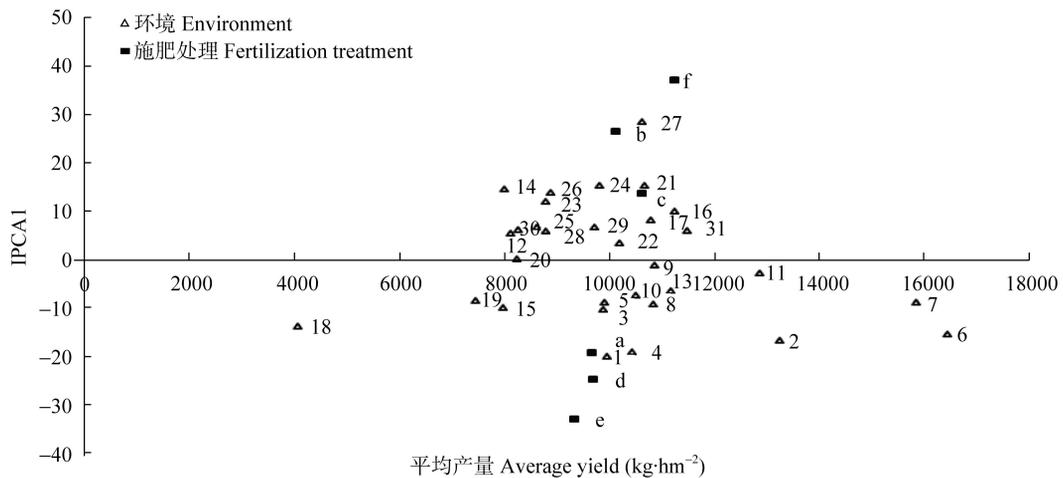


图 4 AMMI1 主成分交互作用与产量双标图  
Fig. 4 Biplot of AMMI1 between yields and IPCA1

积极作用, 与其他年份的环境互作为负; F2(NKM)、F3(NPM)和 F6(NPKM)与 1982—1996 年之间的环境互作为负, 表示这段时间的环境对双季稻产量的提高有消弱作用, 与其他年份的环境互作为正。

### 3 讨论和结论

本研究表明, 各施肥处理的稻谷产量变异系数随着施肥时间的延长呈下降趋势。不同施肥处理产量变异系数随着试验时间的延长而变小。产量与试验年份的负效应是一个复杂的现象, 长期试验中作物产量的降低受到土壤类型、土壤肥力、气候及植

物病虫害等诸多因素的影响<sup>[5]</sup>。郭胜利等<sup>[14]</sup>对世界各地长期试验资料的研究表明, 不同粮食作物产量及其施肥效应各具特点。连作条件下水稻的自然生产力难以维持, 施肥可以使小麦和玉米产量维持一定的高水平, 但在水稻上, 即使进行施肥其产量显著提高但长期维持较困难, 只是随着新品种的更替, 产量的波动性降低<sup>[14]</sup>。也有研究认为可能是由于气候变化, 光合作用、呼吸作用增加, 营养和灌浆期缩短可能会导致产量下降趋势<sup>[15]</sup>。同时, 由于本试验的设计施肥量为 20 世纪 80 年代的常规施肥量, 远低于湖南地区现在的常规施肥量, 早、晚稻两季共

计施用纯 N 352.5 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 135 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 352.5 kg·hm<sup>-2</sup>[16]，导致各处理的水稻产量均呈降低趋势。晚稻的生育期一般较早稻的要长，但其施肥量和早稻一致，这可能是导致晚稻产量低于早稻的原因之一。由于晚稻拥有更长的生育期，其受气候的影响更大，产量变异系数较早稻大。

长期不同施肥后，各处理水稻产量、产量变异系数和 SYI 值均产生了明显差异，产量和 SYI 值均以 NPKM 处理最高，而化肥偏施(不施化肥氮肥)及单施化肥或有机肥处理产量和 SYI 值均较低。这与其他研究结果一致[8,17]。化肥单施或偏施可加速土壤缺养分的耗竭，导致水稻产量稳定性下降，而保持土壤养分的均衡供应则有助于提高稻田生态系统的稳定性[18]。

施肥能够提高水稻产量，化肥氮磷钾的增产效果总体表现为氮>磷>钾。这和前人的研究结果一致[19]。说明氮素是增产的主要因素之一，应在粮食生产上予以充分重视。本研究表明在 PKM 处理中氮素已经成为限制作物增产的主要因子。有研究表明在不施化肥氮条件下，单施有机肥不能获得稳定的腐殖质含量[20]。施用磷肥是水稻获得高产的重要措施。研究表明，缺磷条件下水稻的正常生理功能紊乱，代谢生理失调，植株不能正常生长发育；而适量供磷水稻则正常生长，根系粗壮，根系活力增强，植株总生物量明显增加[21]。晚稻生长期间的土壤磷素有效性高于早稻，原因可能是因为晚稻生长期土壤温度较高，促进了有机磷的矿化，提高了根系活力，从而促进了水稻对土壤磷素的吸收[22]。化肥钾的增产效率最低，其产生的原因在于钾是作物重要的增产因子，化肥钾与有机肥钾在肥效上具有相当程度的营养等效性(来源不同的同种营养元素分别施用增产作用的相近程度)，分别施用这两种来源不同的钾可产生相似的大幅度的增产。而在两者配施条件下，由于受报酬递减率制约，其增产效果不可能机械地叠加，必然会有所下降。降低幅度则取决于元素等效性的高低，等效性越高负效应则越大[23]。有机肥的增产贡献率最大，主要是因为单施化肥的 NPK 处理，产量最低，使得施用有机肥表现的增产幅度大。同时也由于长期施用有机肥料不仅能保持土壤有机质含量，也可在土壤中建立起宏大的养分库，尤其是磷和钾养分库具有持久的供应磷钾能力，这对提高作物产量有重要作用[2]。只有化肥，尤其是氮磷钾完全肥基础上配施有机肥才能在增加产量、保持生产力稳定等多方面兼具其效，为持续农业打下基础。

由于处理与年份的交互作用，施肥处理产量存在年度间稳定性问题[24]，施肥可以明显降低产量变异系数，不同施肥模式对产量的稳定性影响的实质主要表现在养分的均衡供应方面[25]。对于长期定位观测的不同环境条件下作物产量数据而言，其变异主要来源于施肥、环境和其两者的交互作用，不同处理间产量稳定性的差异主要来源于交互作用[26]，交互作用的大小是决定产量稳定的主要因素。对于基于变异系数、可持续性指数评价产量稳定性而言，其仅仅是环境效应和交互作用之和与施肥处理产量平均值的比值，并没有分离出交互作用。AMMI 模型由于其是基于施肥与环境(F×E)互作效应进行评价，分辨力较高，相对较为精确。尤其，AMMI 模型集方差分析和主成分分析于一体，不仅能分析施肥处理与环境交互作用(F×E)的显著性及其特点，还能分析施肥处理相关性状的稳定性，并且利用双标图直观形象的特点，分析 F×E 的互作模式[9]。本研究采用 AMMI 模型对长期施肥下双季稻产量进行方差分析结果表明，施肥处理与年际间环境的互作(F×E)平方和占总平方和的 3.4%，达到显著差异(P<0.05)。AMMI 模型中 IPCA1 和 IPCA2 累计解释了 75.0%的互作平方和。说明利用 AMMI 模型评价长期施肥下双季稻产量稳定性切实可行，具有较高的可靠性和科学性。

产量较高的 NKM、NPM 和 NPKM 3 个处理和产量较低的 PKM、M、NPK 3 个处理与环境互作的响应正好相反。从试验地历年的气象因子来看(表 1)，1997—2011 年的年均降雨量和 1982—1996 年的年均降雨量相差不大，但 1997—2011 年的年均气温和年均日照时数均较 1982—1996 年分别增加 0.6 °C 和 115.8 h。气候变化对水稻生产潜力及产量差的影响具有很强的地域性和复杂性，长期不同施肥处理之间水稻产量对环境变化的响应也表现出差异。NKM、NPM 和 NPKM 3 个处理，随着气温升高、日照时间增加，表现出环境对稻谷产量具有积极的作用。相关研究认为，水稻生育期内温度升高、降雨减少等对水稻生产具有一定的积极作用[27]。

本文通过对长期不同施肥后各处理水稻产量年际变化进行多种方法的分析，结果表明，各处理稻谷产量和产量变异系数均随着施肥时间的延长呈下降趋势，相对其他施肥处理，有机肥和化肥配施能够明显提高稻谷产量、增加稻谷产量的 SYI 值，肥料对于产量的贡献率年际波动较大，以有机肥的增产贡献率最大，化肥的增产贡献率表现为氮>磷>

钾。AMMI 模型较准确地评价了长期施肥下双季稻产量稳定性, 长期不同施肥处理后, 各处理之间水稻产量对环境变化的响应也表现出差异。综合产量年际变化特征、变异系数、SYI、施肥对产量的增产贡献率及采用 AMMI 平价产量稳定性等结果分析, 有机肥和化肥配施, 尤其是氮磷钾完全肥基础上配施有机肥(NPKM)是该区域双季稻高产和稳产的最佳施肥措施。

## 参考文献

- [1] 杨万江, 陈文佳. 中国水稻生产空间布局变迁及影响因素分析[J]. 经济地理, 2012, 31(12): 2086–2093  
Yang W J, Chen W J. Studies on the spatial distribution changing of China's rice production and its influencing factors[J]. Economic Geography, 2012, 31(12): 2086–2093
- [2] 宇万太, 姜子绍, 周桦, 等. 不同施肥制度对作物产量及肥料贡献率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(6): 54–58  
Yu W T, Jiang Z S, Zhou H, et al. Crop yield and fertilizer contribution under different fertilization systems[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(6): 54–58
- [3] 王伟妮, 鲁剑巍, 李银水, 等. 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, et al. Study on fertilization effect and fertilizer contribution rate of different crops at present production conditions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(19): 3997–4007
- [4] Ladha J K, Dawe D, Pathak H, et al. How extensive are yield declines in long-term rice-wheat experiments in Asia?[J]. Field Crops Research, 2003, 81(2/3): 159–180
- [5] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India[J]. Field Crops Research, 2005, 93(2/3): 264–280
- [6] Dawe D, Dobermann A, Moya P, et al. How wide spread are yield declines in long-term rice experiments in Asia?[J]. Field Crops Research, 2000, 66(2): 175–193
- [7] 王开峰, 王凯荣, 彭娜, 等. 长期有机物循环下红壤稻田的产量趋势及其原因初探[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 743–747  
Wang K F, Wang K R, Peng N, et al. Yield trends and reasons for their change in red-soil rice field with long-term organic matter circling[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(2): 743–747
- [8] 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  
Wu H H, Xu M G, Lü J L. Yield sustainability of paddy soil rice with long-term fertilization[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2014, 42(7): 163–168
- [9] 冀建华, 刘光荣, 李祖章, 等. 基于 AMMI 模型评价长期定位施肥对双季稻总产量稳定性的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(4): 685–696  
Ji J H, Liu G R, Li Z Z, et al. Effects of long-term fertilization on stability of double cropping rice yield based on AMMI Model[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(4): 685–696
- [10] Yadav R L, Dwivedi B S, Pandey P S. Rice-wheat cropping system: Assessment of sustainability under green manuring and chemical fertilizer inputs[J]. Field Crops Research, 2000, 65(1): 15–30
- [11] Bi L D, Zhang B, Liu G R, et al. Long-term effects of organic amendments on the rice yields for double rice cropping systems in subtropical China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2009, 129(4): 534–541
- [12] 马力, 杨林章, 沈明星, 等. 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, 27(4): 117–124  
Ma L, Yang L Z, Shen M X, et al. Study on crop yield stability in a typical region of rice-wheat rotation based on long-term fertilization experiment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(4): 117–124
- [13] 唐旭. 小麦-玉米轮作土壤磷素长期演变规律研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009: 18–32  
Tang X. Long-term change of phosphorus in soil under wheat-maize crop rotation in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009: 18–32
- [14] 郭胜利, 周印东, 张文菊, 等. 长期施用化肥对粮食生产和土壤质量性状的影响[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 16–22  
Guo S L, Zhou Y D, Zhang W J, et al. Effects of long-term application of chemical fertilizer on food production and soil quality attributes[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(1): 16–22
- [15] Horie T, Nakagawa H, Ceneno H G S, et al. The rice crop simulation model SIMRIW and its testing[M]//Matthews R B, Bachelet D, Kropff M J, et al. Modeling the Impact of Climate Change on Rice Production in Asia. Philippines: CAB International and International Rice Research Institute, 1995: 51–66
- [16] 侯红乾, 冀建华, 刘光荣, 等. 南方红壤区稻-稻连作体系下氮肥减施模式研究[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(5): 555–562  
Hou H Q, Ji J H, Liu G R, et al. On the model of nitrogen-reduction in double-rice cropping region in red soil area of south China[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2012, 26(5): 555–562
- [17] 李志芳, 徐明岗, 张会民, 等. 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): 1264–1269  
Li Z F, Xu M G, Zhang H M, et al. Sustainability of crop yields in China under long-term fertilization and different ecological conditions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(5): 1264–1269
- [18] 黄欠如, 胡锋, 李辉信, 等. 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, et al. 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
- [19] 宇万太, 赵鑫, 张璐, 等. 长期施肥对作物产量的贡献[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 2040–2044  
Yu W T, Zhao X, Zhang L, et al. Contribution of long-term fertilization to crop yield[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 2040–2044
- [20] Stumpe H, Wittenmayer L, Merbach W. Effects and residual effects of straw, farmyard manuring, and mineral fertilization at Field of the long-term trial in Halle (Saale), Germany[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2000, 163(6): 649–656
- [21] 郭朝晖, 李合松, 张杨珠, 等. 磷素水平对杂交水稻生长发育和磷素运移的影响[J]. *中国水稻科学*, 2002, 16(2): 151–156  
Guo Z H, Li H S, Zhang Y Z, et al. Effects of phosphorus levels on hybrid rice growth and characteristics of phosphorus transportation[J]. *Chinese Journal Rice Sciences*, 2002, 16(2): 151–156
- [22] 谢坚, 郑圣先, 廖育林, 等. 缺磷型稻田土壤施磷增产效应及土壤磷素肥力状况的研究[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(3): 147–154  
Xie J, Zheng S X, Liao Y L, et al. The effects of phosphorus application on rice yield increasing efficiency of phosphorus and soil phosphorus status in different type of paddy soil of phosphorus deficiency[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(3): 147–154
- [23] 刘振兴, 杨振华, 邱孝煊, 等. 肥料增产贡献率及其对土壤有机质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1994, 1(1): 19–26  
Liu Z X, Yang Z H, Qiu X X, et al. Contribution of fertilizers to yield increase and its effect on soil organic matter[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1994, 1(1): 19–26
- [24] 陈明昌, 张强, 杨晋玲, 等. 应用气候资料确定旱地冬小麦氮肥用量的初步研究[J]. *土壤学报*, 1994, 31(2): 224–228  
Chen M C, Zhang Q, Yang J L, et al. Use of meteorological data for determining nitrogen fertilizer requirements of dryland winter wheat[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31(2): 224–228
- [25] 王凯荣, 刘鑫, 周卫军, 等. 稻田系统养分循环利用对土壤肥力和可持续生产力的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(6): 1041–1045  
Wang K R, Liu X, Zhou W J, et al. Effects of nutrient recycling on soil fertility and sustainable rice production[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(6): 1041–1045
- [26] 胡建利, 王德建, 王灿, 等. 不同施肥方式对水稻产量构成及其稳定性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(1): 48–53  
Hu J L, Wang D J, Wang C, et al. Effect of different fertilization systems on rice yield components and their stability[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(1): 48–53
- [27] 王丹. 气候变化对中国粮食安全的影响及对策研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009: 93–105  
Wang D. Impact of climate change on Chinese grain security and countermeasures[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009: 93–105