

长期施肥对双季稻产量变化趋势、稳定性和可持续性的影响^{*}

冀建华^{1, 2, 3} 侯红乾^{1, 2, 3} 刘益仁^{1, 2, 3} 刘秀梅^{1, 2, 3†} 冯兆滨^{1, 2, 3}
刘光荣^{1, 2, 3} 杨 涛⁴ 李文娟⁵

(1 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 南昌 330200)

(2 国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 330200)

(3 农业部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室, 南昌 330200)

(4 山东省安丘市汶河生态林场管委会, 山东安丘 262100)

(5 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要 研究长期施肥对双季稻产量变化趋势、稳定性和可持续性的影响。采用线性回归、稳定性方差和可持续性指数等方法对长期施肥定位试验获取的双季稻产量数据进行分析。结果表明：(1) 与偏施化肥处理相比，均衡施NPK化肥处理提高了双季稻产量、产量稳定性和可持续性，在等氮量条件下配施30%、50%和70%有机肥较NPK处理进一步提高产量6.15%、3.88%和7.75%，稳定性25.91%、59.78%和29.31%，配施30%有机肥较NPK处理提高可持续指数8.57%；(2) 处理间整体表现出初始产量越高，产量的年变化量越小。施NK处理产量随时间呈下降趋势，其他处理均为上升趋势，其中不施肥和施PK处理变化显著，年变化量最大，分别为108.0和142.3 kg hm⁻² a⁻¹，NPK处理最小，为23.74 kg hm⁻² a⁻¹，有机无机肥配施处理间表现为随有机肥配施比例增加而产量年变化量显著增大的变化趋势。综上所述，有机无机肥配施有利于双季稻高产稳产，可有效维持系统可持续性，以70%化肥配施30%有机肥效果最佳。

关键词 双季稻；有机肥；长期施肥；产量稳定性；产量变化趋势

中图分类号 S158.3 **文献标识码** A

稻-稻-闲（油）是长江中下游地区主要种植模式之一，为我国粮食安全做出了重要贡献。然而，目前耕地资源不断减少和质量逐渐退化与粮食需求持续增加之间的矛盾日益突出，因此，研究田块尺度水稻单产提高和大面积均衡增产尤为重要。研究表明，施肥是水稻持续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%^[1-3]。然而，数据显示，一些农作物产

量随时间开始下降或趋于停滞，亚洲地区部分长期定位试验结果表明：稻麦轮作系统下水稻产量随时间呈下降或不显著增加的变化趋势^[4-5]；研究发现美国的大豆产量在21世纪初开始趋于停滞^[6]；李忠芳等^[7]总结了我国小麦、玉米和水稻产量随时间变化情况表明在不施肥或施化肥条件下呈下降趋势，有机无机肥配施条件下无显著变化。目前，我国长江中下游地区不均衡施肥或有机无机肥配施条

^{*}国家自然科学基金项目（31101603）、国家科技支撑计划项目（2011BAD41B01，2012BAD05B05-4）和国家“973”计划项目（2010CB951500）资助

[†]通讯作者：刘秀梅（1974—），女，博士，研究员，主要从事植物营养与施肥、新型肥料研发方面研究。E-mail: lxm3392@163.com

作者简介：冀建华（1982—），男，硕士，助理研究员，主要从事植物营养与施肥、工农业有机废弃物资源化利用研究。
E-mail: 2000jijianhua@gmail.com

收稿日期：2014-07-18；收到修改稿日期：2014-09-20

件下双季稻产量随时间变化趋势如何？值得深入探讨和研究。

近些年来，随着气候反常和灾变天气的增加，关于粮食生产系统稳定性的研究相对增多。目前，国内外研究者通过采用回归模型^[8-10]、变异系数^[1, 11-15]、方差分析^[16]等方法对各种作物在施肥条件下产量和产量构成因素的年度稳定性进行了评价和分析。然而，通过时间序列得到的产量波动特征不仅受气候年际变化的影响，更大程度上是施肥制度与气候因子交互作用的结果^[15-17]，Dobermann 等^[18]认为气候是影响施肥效应的主要因素之一。在品种和其他管理措施相对稳定的情况下，施肥处理的稳定性主要决定于施肥处理本身与环境互作（F×E）效应^[16-17]。有效的F×E分析方法对正确评价长期施肥下水稻产量的稳定性有至关重要，冀建华等^[19]研究表明稳定性方差可以较好地分离出F×E互作效应，是评价水稻产量稳定性有效方法之一。基于此，本研究采用稳定性方差对长期施肥条件下双季稻产量稳定性进行研究和分

析，同时利用产量可持续性指数（SYI）对稻-稻-闲系统的可持续性进行探讨。通过本研究的开展，旨在回答以下两方面的问题：（1）单施化肥和有机无机肥配施处理中那种施肥模式下双季稻产量最高？（2）长期化肥偏施和有机无机肥配施条件下双季稻产量变化趋势是否相同？产量稳定性和可持续性如何？

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于江西省南昌县江西省农业科学院试验农场内，28°57' N，115°94' E，海拔高度为25 m。该区域地处中亚热带，年平均气温17.5℃，≥10℃积温5 400℃，年降雨量1 600 mm，年蒸发量1 800 mm，无霜期约280 d。温、光、热资源丰富，适宜大多数农作物生长，主要气象因子见图1。试验基地土壤为第四纪亚红黏土母质发育的简育水耕人为土，其试验前基本性质见表1。

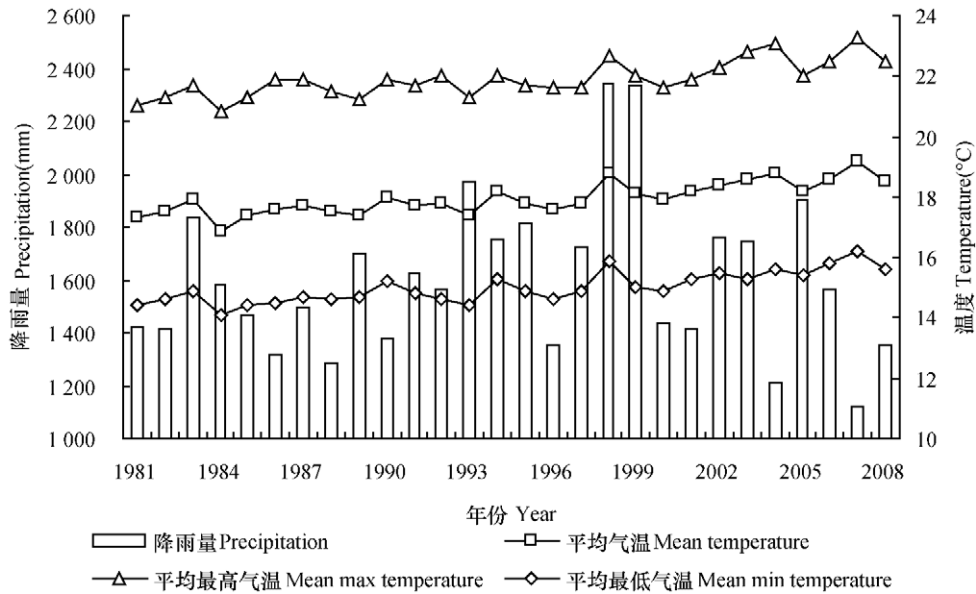


图1 主要气象因子

Fig.1 Data of meteorological factors (Nanchang station)

1.2 试验设计

试验始于1983年冬，1984年开始种植，采用稻-稻-闲的种植方式。试验共设8个处理：（1）不施肥（CK）；（2）PK；（3）NP；（4）NK；（5）NPK；（6）70F+30M，即处理（5）中30%的化肥养分以有机肥养分替代；（7）

50F+50M，即处理（5）中50%的化肥养分以有机肥养分替代；（8）30F+70M，即处理（5）中70%的化肥养分以有机肥养分替代。三次重复，随机区组排列，共24个小区，每小区面积33.3 m²，小区间以0.45 m深和0.5 m宽的水泥田埂隔开，独立排灌。早稻施纯氮 150 kg hm⁻²，

表1 试验前土壤基本性质（0～20 cm）

Table 1 Basic properties of the soil before the experiment in the 0～20 cm soil layer									
土壤类型 Soil type	有机质 SOM (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	缓效钾 Slowly released K (mg kg ⁻¹)	碱解氮 Alkalyzable N (mg kg ⁻¹)	速效磷 Readily available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Readily available K (mg kg ⁻¹)	阳离子交换量 CEC (cmol kg ⁻¹)	pH
简育水耕人为土 Gleyi-stagnic anthrosols	25.6	1.36	0.49	240	81.6	20.8	35.0	7.54	6.50

晚稻施纯氮 180 kg hm⁻²，早稻和晚稻施纯磷（P₂O₅）和纯钾（K₂O）一致，分别为纯磷P₂O₅ 60 kg hm⁻²，纯钾K₂O 150 kg hm⁻²。氮肥为尿素，磷肥为过磷酸钙（含P₂O₅ 12%），钾肥为氯化钾，有机肥早稻为紫云英，其鲜草养分含量按含N 0.303%、P₂O₅ 0.08%、K₂O 0.23%计，晚稻为鲜猪粪，其养分含量按含N 0.45%、P₂O₅ 0.19%、K₂O 0.60%计。为了保证有机肥养分含量年际间相对一致，于每年晚稻收获后在试验田保护行种植紫

云英，在江西省良种场取鲜猪粪，并测定其养分含量，取养分含量与前几年养分含量相近的批次。磷肥和有机肥全作基肥，氮肥50%作基肥，25%作分蘖肥，25%作幼穗分化肥，钾肥全作追肥，50%作分蘖肥，50%作幼穗分化肥。各处理肥料实物施用量见表2。试验供试品种：1984—1990年间早稻主要为芦红早一号，晚稻主要为威优64；1990—1997年间早稻为9003，晚稻为262；1998—2008年间早稻主要为嘉育948，晚稻为923。

表2 不同施肥处理的肥料纯养分施用量

Table 2 Mean annual application rates of net nutrients in treatments in the experiment (kg hm ⁻²)													
处理 Treatments	早稻 Early rice						晚稻 Late rice						
	紫云英 Milk vetch (N : P ₂ O ₅ : K ₂ O)			过磷	尿素	氯化钾	猪粪 Pig manure (N : P ₂ O ₅ : K ₂ O)			过磷	尿素	氯化钾	
				酸钙						酸钙			
				SSP (P ₂ O ₅)	Urea (N)	KCl (K ₂ O)				SSP (P ₂ O ₅)	(N)	(K ₂ O)	
CK	0.00			0.00	0.00	0.00	0.00			0.00	0.00	0.00	
PK				60.00		150.0				60.00		150.0	
NP	60.00				150.0					60.00	180.0		
NK					150.0	150.0					180.0	150.0	
NPK				60.00	150.0	150.0				60.00	180.0	150.0	
70F+30M	44.34	11.71	33.66	48.00	105.8	116.4	54.00	22.80	72.00	37.18	126.3	78.12	
50F+50M	74.92	19.78	56.87	40.20	74.84	93.60	90.11	38.05	120.2	21.96	89.84	30.06	
30F+70M	103.9	27.44	78.89	33.00	46.00	71.40	126.0	53.20	168.0	6.84	54.33	0.00	

1.3 分析方法

土壤基本理化性状测定^[20]：pH用pH计法（土水质量比为1 2.5）；有机质用重铬酸钾容量法；全氮用凯氏定氮法；全磷用高氯酸和硫酸混合消解—钼锑抗比色法；碱解氮用1.0 mol L⁻¹ NaOH碱解扩散法；速效钾用1.0 mol L⁻¹ NH₄OAc浸提—火焰

光度计法；速效磷用0.5mol/L NaHCO₃浸提—钼锑抗比色法；缓效钾用1.0 mol L⁻¹ 热HNO₃浸提—火焰光度计法；阳离子交换量用乙酸铵交换法。

1.4 数据处理

稳定性方差（Shukla方差）^[21]=

$$\sigma_i^2 = \frac{f(f-1) \sum_i^e (Y_{ij} - \bar{Y}_i - \bar{Y}_j + \bar{Y})^2 - \sum_j^f \sum_i^e (Y_{ij} - \bar{Y}_i - \bar{Y}_j + \bar{Y})^2}{(f-1)(f-2)(e-1)}$$

交互方差变异系数 (Shukla方差变异系数) ^[21]

$$= SCV_i = \frac{\sqrt{\sigma_i^2}}{Y_i} \times 100\%$$

上述式中各参数,是以施肥处理为行,时间(年)为列形成的产量矩阵,其中 Y_{ij} 为产量矩阵 i 行 j 列的数据产量, S_i 为产量矩阵 i 行标准差, $\bar{Y}_i$ 为产量矩阵 i 行的平均值, $\bar{Y}_j$ 为产量矩阵 j 列的平均值, $\bar{Y}$ 为产量矩阵的总体平均值。 f 为施肥处理数, e 为环境因子数,本研究中主要指施肥处理和年际环境变化数,分别取8和25。

产量可持续性指数^[22] = SYI (Sustainable yield index) = $(Y - \delta_{n-1}) / Y_{\max}$, 式中 Y 为平均产量, δ_{n-1} 为标准差, $Y_{\max}$ 为最高产量。

采用Excel 2003进行数据整理和绘图,SPSS 16.0统计软件进行统计分析,其中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。

2 结 果

2.1 双季稻产量

由表3可以看出,长期施肥对早稻和晚稻产量影响基本相似,对25 a双季稻(早稻和晚稻)总产量平均值进行方差分析表明,除30F+70M和70F+30M处理间差异不显著外,其他处理之间均达到显著性差异水平,这说明不同处理对双季稻总产量均有显著影响。30F+70M、70F+30M、50F+50M、NPK、NK、NP和PK处理的25年总产量平均值较不施肥处理(CK)分别提高了71.92%、69.37%、65.75%、59.55%、47.70%、32.61%和15.16%。由此可见,与不均衡施肥处理相比,均衡施NPK化肥处理显著提高了双季稻产量,在等氮量条件下配施一定量有机肥可以进一步提高,其中以配施30%和70%有机肥处理提高幅度最大,较NPK处理分别提高6.15%和7.75%。

2.2 双季稻产量变化趋势

各处理产量变化趋势见表4和图2,CK和PK处

理的产量随时间显著变化,其他处理变化不显著。除NK处理随时间呈下降趋势外,其他处理均表现出升高的变化趋势。其中NK处理从第1个五年均值11 080 kg hm⁻²降低至了第5个五年均值10 429 kg hm⁻²,降低了651 kg hm⁻²,降幅为6%,平均每年降低50.1 kg hm⁻² a⁻¹,说明在环境中磷素来源较少的情况下长期不施磷肥严重制约了产量的提高。CK和PK处理的产量年增加幅度最大,分别从第1个五年均值6 337 kg hm⁻²和6 996 kg hm⁻²增加至第5个五年均值8 323 kg hm⁻²和9 719 kg hm⁻²,增加了1 986 kg hm⁻²和2 723 kg hm⁻²,增幅为31%和38%,年增幅为107.95 kg hm⁻² a⁻¹和142.3 kg hm⁻² a⁻¹;NPK处理的产量年增加幅度相对最小,从第1个五年均值11 520 kg hm⁻²增加至第5个五年均值12 032 kg hm⁻²,增加了512 kg hm⁻²,增幅为4.4%,年增幅仅为23.74 kg hm⁻² a⁻¹。由此说明,环境因素(如大气沉降、灌溉水质和气候变化等)对CK和PK处理产量的影响较大,在没有化学氮肥投入的条件,产量年增幅最大。

在4个均衡施肥处理中,以30F+70M处理的产量年增幅最高,50F+50M处理次之,NPK处理相对最低,表现出随有机肥配施比例增加产量年增加幅度显著增大的变化趋势(见图3)。

由初始产量与产量年变化量之间的关系可见(见图4),初始产量越高,产量的年变化量越小。换言之,初始产量越高,产量年变化量的边际效应相对越小,反之,其边际效应相对越大。具体到均衡施肥处理中NPK和70F+30M处理初始产量最高,其产量年变化量相对于50F+50M和30F+70M处理最低。

2.3 双季稻产量稳定性和可持续性

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、气候和其两者的交互作用,而处理间施肥和气候变化引起的变异基本上是稳定的,变异来源主要为交互作用,交互作用的大小是决定产量稳定的主要因素,稳定性方差变异系数(SCV_i)法是基于施肥与环境(F×E)交互效应进行评价,分辨力较高,相对

表3 长期施肥下双季稻产量

Table 3 Yields of double cropping rice under long-term fertilization (kg hm⁻²)

处理 Treatments	1984—1988	1989—1993	1994—1998	1999—2003	2004—2008	年均值 Mean
早稻 Early rice						
CK	3 056 ± 54f ¹⁾	2 371 ± 32e	3 083 ± 107f	3 167 ± 119d	4 009 ± 74f	3 137 ± 21f
PK	3 258 ± 63e	2 962 ± 71d	3 821 ± 173e	3 644 ± 232c	4 585 ± 54e	3 654 ± 95e
NP	4 820 ± 128d	4 118 ± 131c	4 775 ± 83d	4 237 ± 167b	5 432 ± 204c	4 676 ± 23d
NK	5 632 ± 71c	5 099 ± 260b	5 239 ± 357c	4 036 ± 172b	5 020 ± 483d	5 005 ± 237c
NPK	5 876 ± 139b	5 348 ± 320b	5 584 ± 293b	5 308 ± 46a	6 414 ± 244b	5 706 ± 202b
70F+30M	5 974 ± 34ab	5 778 ± 79a	6 055 ± 158a	5 482 ± 168a	6 506 ± 126b	5 959 ± 83a
50F+50M	5 888 ± 152b	5 299 ± 220b	5 785 ± 469ab	5 324 ± 24a	6 487 ± 127b	5 757 ± 178b
30F+70M	6 088 ± 81a	5 667 ± 62a	6 009 ± 79a	5 404 ± 70a	6 933 ± 317a	6 020 ± 87a
晚稻 Late rice						
CK	3 281 ± 222f	3 842 ± 350e	4 224 ± 97d	4 563 ± 82d	4 314 ± 140e	4 045 ± 142f
PK	3 738 ± 279e	4 264 ± 356d	4 718 ± 184c	5 230 ± 62c	5 134 ± 191d	4 617 ± 203e
NP	4 632 ± 43d	4 830 ± 209c	4 914 ± 172c	4 727 ± 176d	5 136 ± 156d	4 848 ± 57d
NK	5 448 ± 62c	5 786 ± 295b	5 986 ± 104b	5 387 ± 183bc	5 408 ± 300cd	5 603 ± 174c
NPK	5 644 ± 121b	5 834 ± 151b	6 065 ± 124b	5 607 ± 135b	5 618 ± 207c	5 754 ± 78c
70F+30M	6 022 ± 169a	6 111 ± 291ab	6 481 ± 142a	6 191 ± 166a	6 221 ± 128b	6 205 ± 87ab
50F+50M	5 706 ± 192b	6 100 ± 193ab	6 392 ± 147a	6 161 ± 53a	6 377 ± 290ab	6 147 ± 112b
30F+70M	5 744 ± 141b	6 352 ± 158a	6 603 ± 100a	6 320 ± 92a	6 615 ± 241a	6 327 ± 143a
早晚稻 Double cropping rice						
CK	6 337 ± 262g	6 213 ± 351f	7 307 ± 94g	7 730 ± 190e	8 323 ± 171f	7 182 ± 138g
PK	6 996 ± 293f	7 226 ± 425e	8 539 ± 353f	8 874 ± 260d	9 719 ± 176e	8 271 ± 297f
NP	9 452 ± 118e	8 948 ± 311d	9 689 ± 112e	8 964 ± 320d	10 568 ± 333d	9 524 ± 35e
NK	11 080 ± 114d	10 885 ± 529c	11 225 ± 460d	9 423 ± 355c	10 429 ± 767d	10 608 ± 412d
NPK	11 520 ± 248c	11 182 ± 448bc	11 649 ± 316c	10 915 ± 161b	12 032 ± 398c	11 459 ± 280c
70F+30M	11 996 ± 160a	11 889 ± 370a	12 536 ± 139ab	11 673 ± 243a	12 727 ± 253b	12 164 ± 170a
50F+50M	11 594 ± 338bc	11 399 ± 409b	12 177 ± 586b	11 485 ± 64a	12 864 ± 299b	11 904 ± 289b
30F+70M	11 832 ± 204ab	12 019 ± 144a	12 612 ± 92a	11 724 ± 140a	13 548 ± 230a	12 347 ± 130a

1) 平均值 ± 标准差, 同行相同字母表示差异不显著 ($p < 0.05$)。下同 1) : Average ± standard difference, The same letters in the same column mean no significant difference ($p < 0.05$) . The same below

表4 长期不同施肥处理下双季稻总产量变化趋势

Table 4 Yield trends of double cropping rice in the long-term fertilization experiment										
处理 Treatments	早稻 Early rice			晚稻 Late rice			早晚稻 Double cropping rice			
	产量年变化量		<i>p</i> 值	产量年变化量		<i>p</i> 值	产量年变化量		<i>p</i> 值	初始产量
	Annual yield	<i>R</i> ²	<i>p</i> -value	Annual yield	<i>R</i> ²	<i>p</i> -value	Annual yield	<i>R</i> ²	<i>p</i> -value	Initial yield
	change (kg hm ⁻² a ⁻¹)			change (kg hm ⁻² a ⁻¹)			change (kg hm ⁻² a ⁻¹)			(kg hm ⁻²)
CK	52.89	0.22	0.02	55.05	0.24	0.01	107.95	0.41	0.001	6 485
PK	67.42	0.26	0.01	74.88	0.39	0.00	142.30	0.58	0.000	6 750
NP	27.91	0.07	0.22	19.11	0.02	0.46	47.02	0.08	0.186	9 700
NK	-42.6	0.09	0.13	-7.54	0.00	0.75	-50.10	0.07	0.193	12 450
NPK	24.18	0.05	0.29	-0.44	0.00	0.99	23.74	0.03	0.539	13 100
70F+30M	19.95	0.05	0.31	13.35	0.01	0.60	33.30	0.04	0.326	13 540
50F+50M	28.84	0.07	0.2	31.62	0.07	0.20	60.46	0.12	0.084	12 510
30F+70M	33.62	0.08	0.18	39.94	0.10	0.13	73.55	0.14	0.067	12 260

注：初始产量为试验开始前三年产量平均值 Notes : Initial grain yield is the mean of the yields of the first three years of the experiment

较为精确^[19]。本文采用稳定性方差变异系数对各处理的产量稳定性进行评价。结果由表5可见，晚稻的SCV_i值均低于早稻，早晚稻总产量的SCV_i值大小排序为：PK>NK>CK>NP>NPK>70F+30M>30F+70M>50F+50M。SCV_i值越小，表示处理的产量稳定性越高。由此可见，晚稻的产量稳定性优于早稻。均衡施化肥处理明显提高了双季稻产量稳定性，在等氮量条件下配施无机肥有助于进一步提高产量稳定性，其中以等比例配施处理提高幅度最大，较均NPK处理提高了59.78%；配施70%和30%有机肥处理相对最小，较均NPK处理分别提高了25.91%和29.31%。

产量可持续性指数是测定系统是否能持续的一个可靠参数，SYI值越大表示系统的可持续性越好，由表5可见，早稻产量的SYI值低于晚稻，但均以70F+30M处理的SYI值最大，综合早晚稻总产量可见，产量可持续性大小顺序为70F+30M>NPK>50F+50M=NK>30F+70M=NP>PK>CK。由此可见，晚稻产量的可持续性强于早稻，在早晚稻中均以70%化肥配施30%有机肥处理在高生产力条件下系统可持续性相对最好。

3 讨 论

关于长期施肥对作物产量的影响，国外进行了大量研究，Rothamsted试验站的Broadbalk小麦连作试验和日本Konosu水稻试验等均表明^[23]：在等养分投入的条件下，有机肥料和无机肥料增产效果十分接近。Dawe等^[4]和Ladha等^[5]总结亚洲25个稻田长期定位试验结果，也发现推荐量的化肥施用对水稻和小麦产量的影响与有机无机肥配施之间无显著差异。本研究结果显示，在等氮量条件下，3个有机无机肥配施处理较无机肥处理均有显著提高，其中配施70%和30%有机肥处理提高幅度最大，二者之间无显著差异；等比例配施化肥和有机肥处理较二者显著降低，但仍显著高于单施化肥处理。国内大部分长期定位试验结果表明^[12, 16, 24-25]，有机无机肥配施在水稻上的增产效果显著高于单施化肥，其中王传雷等^[24]研究表明，40%有机肥配施60%化肥在水稻上的增产效果优于70%的有机肥配施30%的化肥处理，并且二者均显著高于单施有机肥和化肥；郑兰君等^[25]研究认为30%有机肥配施70%化肥处理的水稻产量高于

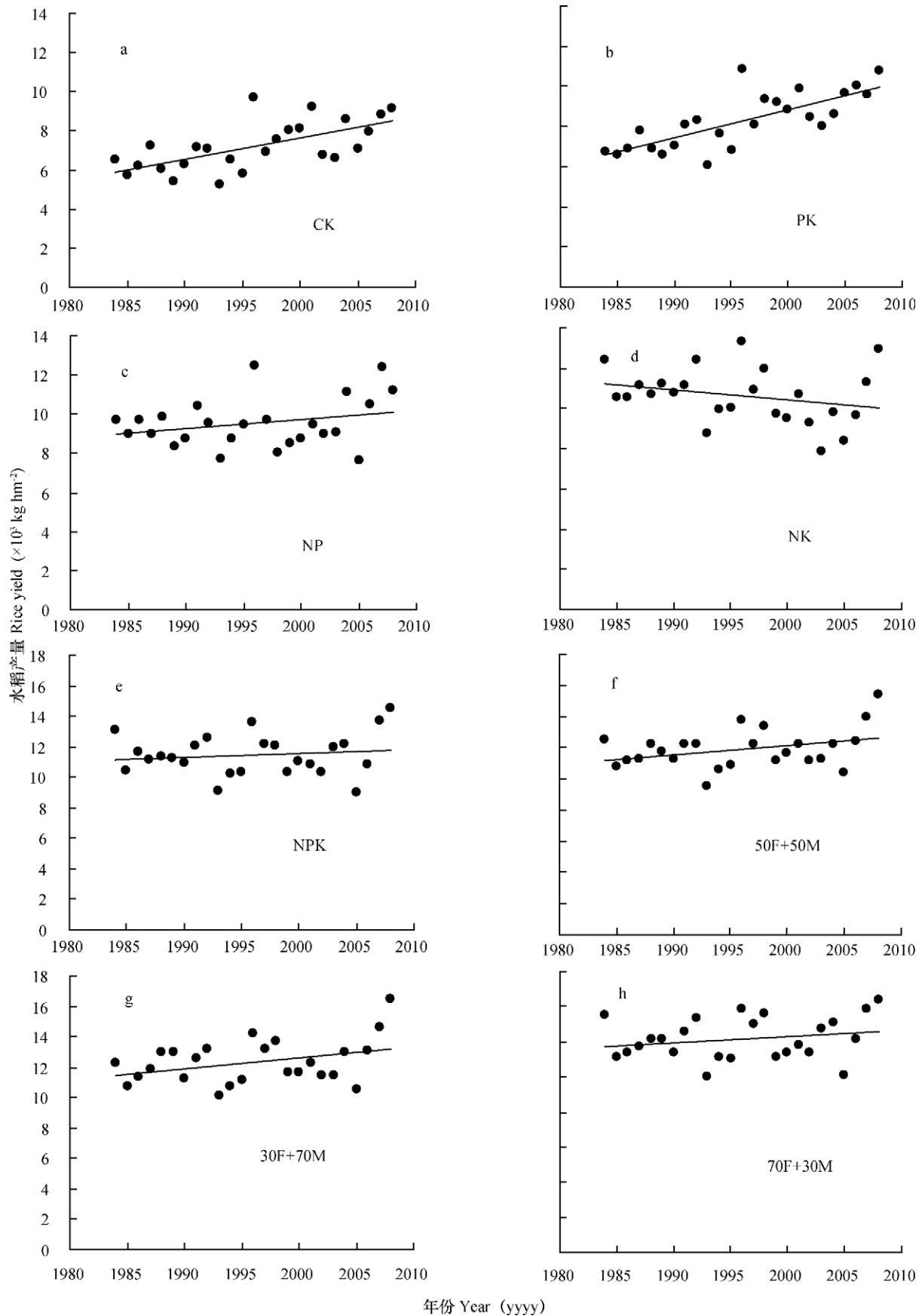


Fig.2 Yield trends of double cropping rice under long-term fertilization

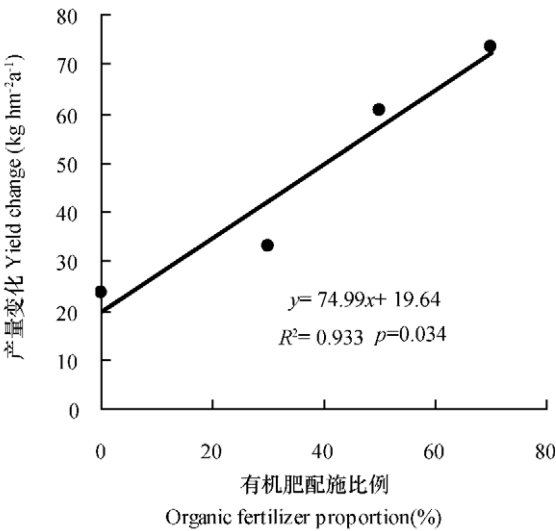


图3 有机肥配施比例与产量年变化之间的关系

Fig.3 Relationship between F/M ratio and annual yield fluctuation

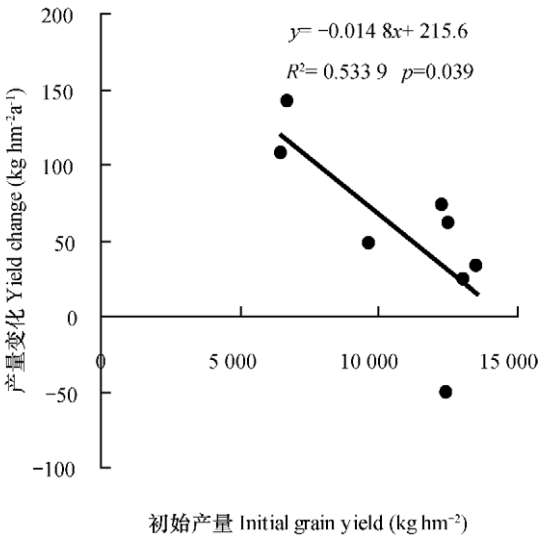


图4 初始产量与产量年变化之间的关系

Fig.4 Relationship between initial grain yield and annual yield fluctuation

表5 双季稻产量稳定性和可持续性

Table 5 Yield stability and sustainability of the double rice cropping system in the long-term fertilization experiment

处理 Treatments	早稻Early rice		晚稻Late rice		早晚稻Double cropping rice	
	SCV _i (%)	SYI	SCV _i (%)	SYI	SCV _i (%)	SYI
CK	18.91	0.50	11.15	0.61	11.84	0.61
PK	18.88	0.43	11.56	0.64	13.47	0.64
NP	11.25	0.61	10.30	0.61	8.42	0.65
NK	14.50	0.59	6.34	0.66	9.61	0.69
NPK	7.03	0.66	6.23	0.67	5.24	0.70
70F+30M	5.30	0.72	4.28	0.71	3.99	0.76
50F+50M	3.77	0.63	2.67	0.70	1.64	0.69
30F+70M	5.31	0.61	5.13	0.67	4.40	0.66

注：SCV_i为Shukla方差变异系数，即稳定性方差变异系数；SYI为产量可持续指数 Notes：SCV_i stands for Shukla coefficient of variation；and SYI for sustainable yield index

其他有机无机配施方式和单施化肥处理，是西南地区水稻高产的最佳施肥措施。可见，本研究与目前国内研究的结果基本一致，而与国外的研究结果差异较大。刘守龙等^[26]认为，等氮投入条件下不同施肥方式对产量影响的差异可能只是试验时间较短情况下出现的暂时现象，随着培肥时间的延长和基础地力的提高，当土壤本身可以提供较多的矿质养分时，施肥方式之间的差异将降低。但是本研究表明^[27]，30%有机肥配施70%化肥处理与单施

NPK化肥之间的差异随种植时间的延长逐渐减小，而等比例有机无机肥配施和70%有机肥配施30%化肥处理与单施NPK化肥之间的差异随种植时间的延长逐渐增大。可见，到目前为止，本研究并未出现前人所述的施肥方式之间差异变小的可能。究其原因，作者认为在等氮量投入的情况下，有机无机肥配施，尤其是高量有机肥配施处理随着土壤有机质大量累积，土壤理化性质发生了明显变化，而单施化肥处理的土壤理化性质变化相对较缓慢（见表

6)。累积的大量有机质可以持续矿化出养分供水稻所需要，单施化肥处理由于有机质矿化出的养分较少，在持续高产方面相对受限。

大量长期定位试验表明^[28-32]，施肥条件下产量随时间变化趋势差异与施肥、作物品种和气候环境等因素有关。本研究结果表明，除NK处理产量

表6 2008年土壤容重和养分含量(0~20 cm)

Table 6 Soil nutrient content and bulk density of the tested soil in the 0~20cm soil layer in 2008						
处理 Treatments	容重 Bulk density (g cm ⁻³)	有机质 OM (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	碱解氮 Alkalyzable N (mg kg ⁻¹)	速效磷 Readily available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Readily available K (mg kg ⁻¹)
CK	1.25d	20.93e	1.32d	96.20d	6.85d	34.58f
PK	1.19c	21.79e	1.33d	106.4d	57.13c	148.4a
NP	1.21c	24.32d	1.60bc	145.5b	57.20c	33.27f
NK	1.19c	23.20d	1.42cd	125.2c	8.55d	113.7b
NPK	1.18c	24.22d	1.43cd	156.3b	52.43c	68.54d
70F+30M	1.08b	32.07c	1.68ab	174.3a	83.19b	54.11ed
50F+50M	0.99a	34.50b	1.58bc	181.7a	94.52b	40.99ef
30F+70M	0.97a	37.68a	1.84a	187.4a	101.1a	86.24c

随时间呈下降趋势，其他处理均表现出升高趋势，其中CK和PK处理变化显著，并且产量年增幅量最大，NPK处理年增幅相对最小。究其原因，由于CK和PK处理土壤养分常年亏缺或供应不足，其边际效应相对最大，在大气沉降和灌溉水等周边环境氮素养分含量相对以前不断增加的情况下，产量增加幅度相对最大；NK处理由于外源磷素补充较少，所以其产量随时间表现出下降趋势；对于平衡施化肥处理而言，由于养分能均衡供应，其边际效应相对最小，通过环境因素增加产量的幅度相对最小，在外源有机肥补充相对不足的前提下，进一步提高产量相对困难。

本研究表明，4个均衡施肥处理表现出随有机肥配施比例增加而年产量变化量显著增加的变化趋势。这是因为均衡施化肥(NPK)或低量配施有机肥(配施30%有机肥)处理在试验初期能迅速供应作物所需要的养分，使产量在试验初期高于中量或高量配施有机肥处理，但是由于其持续供肥能力和对土壤物理性状改善能力较差，所以增产幅度每年相对较小，而50F+50M和30F+70M处理恰好与之相反。

黄欠如等^[16]在双季稻上发现，NPKM和NPK两处理由于养分供应较均衡，其变异系数极显著低于化肥单、偏施区(N、NP、NK)，这与本研

究中均衡施肥处理的产量稳定性高于不均衡施肥处理的结果基本一致。李秀英等^[13]和杨生茂等^[14]在小麦和玉米上研究表明，均衡施化肥和化肥与有机肥配合施用均使产量稳产性显著提高，有机无机肥配施提高幅度更大。刘鸿翔等^[11]研究表明，均衡施肥可以显著提高作物产量在年际间的稳定性，但保持系统中养分循环再利用有助于进一步提高作物产量的稳定性。本研究表明，有机无机肥配施处理的稳定性明显高于单施化肥处理，这与上述前人研究结果基本一致。此外，本研究还表明，在均衡施肥处理中以等比例有机无机肥配施处理产量稳定性最好，70%有机肥配施30%化肥或30%有机肥配施70%化肥处理次之，均衡施化肥处理稳定性相对最差。究其原因，可能由于等比例有机无机肥配施处理在前期化肥供应的养分相对能满足作物需要(与70%有机肥配施30%化肥处理相比)，所以产量受影响相对较小，随着施肥和种植时间的延长，有机肥矿化的养分不断增加和土壤肥力的提高(见表6)，产量有所增加，但增幅相对较小，所以产量波动整体最小，产量稳定性最好。70%有机肥配施30%化肥处理由于前期化肥养分供应不足，有机肥矿化的养分量较少，导致产量受影响。随着施肥和种植时间的延长，有机肥矿化的养分量不断增加

和土壤肥力的提高,产量开始较大幅度增加(表3),但是由于有机肥矿化的养分在未满足作物所需要的养分量之前,产量受到不同程度的影响和后期产量的大幅度增加,因此产量整体波动相对较大,其稳定性不及等比例配施有机无机肥处理。同理,30%有机肥配施70%化肥处理由于前期化肥养分供应充实,所以产量较高,随着种植时间的延长,有机肥养分虽然不断地被矿化出来,但由于施用量较少,在培肥地力方面相对不足,所以其产量波动仍然相对较大,其稳定性与70%有机肥配施30%化肥处理基本相当。均衡施化肥虽然可以提供水稻所需要的大量营养元素,但是由于长期缺乏有机肥的投入,在提高土壤物理性质方面相对较差,因此长期使用,导致产量年际间波动幅度较大,稳定性相对不及有机无机肥配施处理。

本研究表明,施肥可不同程度地提高双季稻系统可持续性,其中均衡施肥处理相对优于化肥偏施,以70%化肥配施30%有机肥处理在高生产力条件下系统可持续性相对最好。这与李忠芳等^[22]和Manna等^[33]研究结果基本一致。究其原因,可能与长期配施有机肥培肥地力有关。土壤肥沃后可以持续提供水稻所需要的养分,缓解不利环境因素导致的水稻产量大幅波动,长期缓慢提高水稻产量,有效维持系统的可持续性。

4 结 论

不同施肥处理的双季稻产量变化趋势有所差异,施NK处理的产量随时间呈下降趋势,其他处理均为上升趋势,其中以不施肥和施PK处理年变化量最大,NPK处理最小,有机无机肥配施处理间表现为随有机肥配施比例增加而产量年变化量显著增大,处理间整体表现出初始产量越高,产量的年变化量越小。施肥对水稻产量影响显著,与偏施化肥处理相比,均衡施NPK化肥处理显著提高了双季稻产量、产量稳定性和可持续性,在等氮量条件下配施30%、50%和70%有机肥较NPK处理进一步提高产量6.15%、3.88%和7.75%,提高稳定性25.91%、59.78%和29.31%,配施30%有机肥较NPK处理提高可持续指数8.57%。可见,在本试验条件下,有机无机肥配施是双季稻高产稳产和可持续增产的有效施肥模式,尤以70%化肥配施30%有机肥效果最明显。

参 考 文 献

- [1] 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.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 (In Chinese). Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(6):54—58
- [2] 石元亮,王玲莉,刘世彬,等.中国化学肥料发展及其对农业的作用.土壤学报,2008,45(5):852—864. Shi Y L, Wang L L, Liu S B, et al. Development of chemical fertilizer industry and its effect on agriculture of China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5):852—864
- [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.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 (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(19):3997—4007
- [4] Dawe D, Dobermann A, Moya P, et al. How widespread are yield declines in long-term rice experiments in Asia? Field Crops Research, 2000, 66:175—193
- [5] Ladha J K, Dawe D, Pathak H, et al. How extensive are yield declines in long-term rice-wheat experiments in Asia? Field Crops Research, 2003, 81:159—180
- [6] Egli D B. Soybean yield trends from 1972 to 2003 in mid-western USA. Field Crops Research, 2008, 106:53—59
- [7] 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
- [8] Calderini D F, Slafer G A. Changes in yield and yield stability in wheat during the 20th century. Field Crops Research, 1998, 57:335—347
- [9] Ver ó n S R, José M P, Slafer G A. Interannual variability of wheat yield in the Argentine Pampas during the 20th century. Agriculture Ecosystems and Environment, 2004, 103:177—190
- [10] Hao M D, Fan J, Wang Q J, et al. Wheat grain yield and yield stability in a long-term fertilization experiment on the Loess Plateau. Pedosphere, 2007, 17(2):257—264
- [11] 刘鸿翔,王德禄,王守宇,等.黑土长期施肥及养分循环再利用的作物产量及土壤肥力质量变化I.作物产

- 量.应用生态学报, 2001, 12 (1): 43—46. Liu H X, Wang D L, Wang S Y, et al.Changes of crop yields and soil fertility under long-term application of fertilizer and recycled nutrients in manure on a black soil I.Crop yield (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12 (1): 43—46
- [12] 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.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 (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23 (6): 1041—1045
- [13] 李秀英, 李燕婷, 赵秉强, 等.褐潮土长期定位不同施肥制度土壤生产功能演化研究.作物学报, 2006, 32 (5): 683—689. Li X Y, Li Y T, Zhao B Q, et al.The dynamics of crop yields under different fertilization systems in drab fluvoaquic soil (In Chinese). Acta Agronomica Sinica, 2006, 32 (5): 683—689
- [14] 杨生茂, 李凤民, 索东让, 等.长期施肥对绿洲农田土壤生产力及土壤硝态氮积累的影响.中国农业科学, 2005, 38 (10): 2043—2052. Yang S M, Li F M, Suo D R, et al.Effect of long-term fertilization on soil productivity and nitrate accumulation in Gansu Oasis (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38 (10): 2043—2052
- [15] 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.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 (In Chinese). Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17 (1): 48—53
- [16] 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.土壤学报, 2006, 43 (6): 926—929. 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 (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43 (6): 926—929
- [17] 谢云.中国粮食生产对气候资源波动相应的敏感性分析.资源科学, 1999, 21 (6): 13—17. Xie Y. Analysis of sensitivity of crop yields to climate resource function in china (In Chinese). Resources Science, 1999, 21 (6): 13—17
- [18] Dobermann A, Wilt C, Abdulraehman S, et al.Soil fertility and indigenous nutrient supply in irrigated rice domains of Asia. Agronomy Journal, 2003, 95 (4): 913—923
- [19] 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.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 (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45 (4): 685—696
- [20] 鲍士旦.土壤农化分析: 第三版.北京: 中国农业出版社, 2000: 56—271. Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 56—271
- [21] 刘录祥, 赵锁劳.作物品种的稳定性和适应性育种.陕西农业科学, 1992 (2): 45—48. Liu L X, Zhao S L. Breeding for stability and adaptability of crop cultivars (In Chinese). Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 1992 (2): 45—48
- [22] 李忠芳, 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.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 (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21 (5): 1264—1269
- [23] 沈善敏.国外的长期肥料试验.土壤通报, 1984 (2): 85—91. Shen S M. Overseas long-term fertilization experiments (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science. 1984 (2): 85—91
- [24] 王传雷, 瞿和平, 万一花, 等.有机无机肥配合施用长期定位试验.湖北农业科学, 2003 (5): 58—59. Wang C L, Qu H P, Wan Y H, et al. Long-term experiment of combined application of organic and inorganic fertilizer (In Chinese). Hubei Agricultural Sciences, 2003 (5): 58—59
- [25] 郑兰君, 曾广永, 王鹏飞.有机肥、化肥长期配合施用对水稻产量及土壤养分的影响.中国农学通报, 2001, 17 (3): 48—50. Zheng L J, Zeng G Y, Wang P F. Impacts of combined application of organic and inorganic fertilizers on rice yield and soil fertility (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2001, 17 (3): 48—50
- [26] 刘守龙, 童成立, 吴金水, 等.等氮条件下有机无机肥配比对水稻产量的影响探讨.土壤学报, 2007, 44 (1): 107. Liu S L, Tong C L, Wu J S, et al. Effect of ratio of organic manure/chemical fertilizer in fertilization on rice yield under the same N condition (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44 (1): 107
- [27] 侯红乾, 刘秀梅, 冀建华, 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, Ji J H, 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
- [28] Bhandari A L, Ladha J K, Pathak H, et al. Gupta. Yield and soil nutrient changes in a long-term rice-wheat rotation in India. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66 : 162—170
- [29] Kunzová E, Hejzman M. Yield development of winter wheat over 50 years of FYM, N, P and K fertilizer application on black earth soil in the Czech Republic. *Field Crops Research*, 2009, 111 : 226—234
- [30] Pathak H, Ladha J K, Aggarwal P K, et al. Climatic potential of on-farm yield trends of rice and wheat in the Indo-Gangetic Plains. *Field Crops Research*, 2003, 80 : 223—234
- [31] Yadvinder-Singh, Bijay-Singh, Ladha J K, et al. Long-term effects of organic inputs on yield and soil fertility in the rice-wheat rotation. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68 : 845—853
- [32] Regmi A P, Ladha J K, 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 : 857—867
- [33] 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. *Field Crops Research*, 2005, 93 : 264—280

EFFECTS OF LONG-TERM FERTILIZATION ON YIELD VARIATION TREND, YIELD STABILITY AND SUSTAINABILITY IN THE DOUBLE CROPPING RICE SYSTEM

Ji Jianhua^{1, 2, 3} Hou Hongqian^{1, 2, 3} Liu Yiren^{1, 2, 3} Liu Xiumei^{1, 2, 3†} Feng Zhaobin^{1, 2, 3}
Liu Guangrong^{1, 2, 3} Yang Tao⁴ Li Wenjuan⁵

(1 Institute of Soil Fertilizer and Resource Environment, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China)

(2 National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330200, China)

(3 Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture, Nanchang 330200, China)

(4 Dawen River Ecological Forest Management Committee, Anqiu, Shandong 262100, China)

(5 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract Effects of long-term fertilization on yield variation trend, yield stability and sustainability of a double cropping rice system were studied through a 25-year long-term fertilization field experiment in Nanchang, China, of which yield data were analyzed using the linear regression, stability variance and sustainable yield index methods. The field experiment, established in 1984, was designed to have 8 treatments, that is, Treatment CK (a early rice—late rice rotation without fertilizer), Treatment PK (N deficiency), Treatment NP (K deficiency), Treatment NK (P deficiency), Treatment NPK (balanced chemical fertilizer application), Treatment 70F+30M (70% chemical fertilizers plus 30% organic manure), Treatment 50F+50M (50% chemical fertilizers plus 50% organic manure), and Treatment 30F+70M (30% chemical fertilizers plus 70% organic manure), and all the treatments, except CK, were the same in N nutrient supply. Results show that Treatment NPK improved yield, yield stability and sustainability of the double rice cropping system, as compared with Treatments NP, NK and PK. However, Treatments 70F+30M, 50F+50M and 30F+70M further raised the yield by 6.15%, 3.88% and 7.75% and the yield stability by 25.91%, 59.78% and 29.31%, respectively, and Treatment 70F+30M improved the sustainable yield index by 8.57%. Besides in all the treatments as a whole, the higher the initial yield, the lower, the annual variation of the yield, and all showed an increasing trend, except for Treatment NK declining in yield with each passing year. Treatments CK and NK fluctuated the most sharply in yield,

reaching 107.95 and 142.30 kg hm⁻² a⁻¹, respectively, Treatment NPK did the least, reaching 23.74 kg hm⁻² a⁻¹ only. However, In OM-involved treatments, the fluctuation in annual yield grew obviously bigger with the rising ratio of F/M. To sum up, Combined application of chemical fertilizers with manure is helpful to obtaining high and stable yields and keeping the double rice cropping system sustainable, with the combination of 30% organic manure and 70% chemical fertilizers being the most optimal.

Key words Double cropping rice; Organic fertilizer; Long-term fertilization; Stability of yield; Yield variation trend

(责任编辑：汪枞生)