

红壤性水稻土施肥的产量效应及与气候、地力的关系*

黄欠如^{1,2} 胡 锋¹ 李辉信^{1†} 赖 涛^{1,2} 袁颖红¹

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 江西省红壤研究所, 江西进贤 331717)

摘 要 以 23 a 红壤性水稻土化肥定位试验为对象,探讨了不同施肥措施下水稻产量变化及其与气候、地力的关系。结果表明:不同施肥措施的产量效应均显著受气候的年成变化及其交互作用的影响,气候的季相变化因不同施肥措施而异,对 CK、NK、NPKM 处理影响不大,而对 N、NP、NPK 处理有强烈的影响;红壤性水稻土基础地力贡献率较稳定,为 46.3%~72.0%。随着施肥结构完善,对地力贡献的依赖性表现出 NPKM < NPK < NK、NP < N 的趋势;各施肥管理水稻平均增产效果表现为 NPKM > NPK > NK > NP > N。连续施用氮(N)肥,增产效果达持续显著水平的年限为 17 a,钾(K)肥的为 9 a,而磷(P)肥不明显。N 肥单施或与 P 肥、K 肥配施,生产稳定性显著下降,且随时间的延长,增产效率均呈线性下降,其下降速率表现出 NP > N > NK 的趋势,至 18~21 a 后,产量水平相当或者低于无肥区(CK)。N 肥与 PK 肥配施,可显著提高水稻生产的稳定性和产量,再配施有机肥,水稻增产效果更为明显。

关键词 气候效应;地力贡献;施肥管理;红壤性水稻土

中图分类号 S147.5 **文献标识码** A

氮是影响农业生态系统生产力最重要的营养元素之一,氮肥的效益可达到增产的 76%^[1]。研究表明,施用氮肥与否,水稻对土壤氮素的依存率都在 50%以上^[2~4],而目前我国氮肥的当季利用率约为 30%~35%^[5]。因而,围绕提高氮肥利用率、增加作物产量等进行了大量的研究^[6~8]。但由于部分地区氮肥施用量过大,给农业生态环境带来了负面影响,特别是由于氮肥施用不当等带来的农业面源污染和农产品质量下降等问题,开始受到广泛重视^[9~11],因此,通过合理施肥等措施,减少或防止氮肥施用对生态环境可能带来的污染,就显得尤为重要。

红壤性水稻土是我国主要水稻土类型之一^[12]。以江西为例,红壤性水稻土约 2.2 × 10⁶ hm², 占全省水稻土总面积的 66.9%, 全省国土面积的 27.1%^[13]。基于其在粮食生产中的重要地位,长期施肥对水稻产量和土壤肥力的影响一直是土壤学、生态学的研究热点^[14~16],但气候、基础地力等对施肥的影响鲜见报道。本文以红壤性水稻土长期化肥定位试验为依托^[17]、以历年水稻产量数据为基础,重点探讨不同施肥管理的产量效应及其与气候、基

础地力的关系,为合理施肥、促进稻田生态系统持续稳定发展及生态环境的保护等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点设在江西省进贤县省红壤研究所(116°20'24"N, 28°15'30"E),为典型低丘红壤地区(海拔高度 25~30 m,坡度 5°)。气候条件优越,年均降雨量 1 549 mm,年蒸发量 1 100~1 200 mm;干湿季节明显,3~6 月为雨季,降雨量占全年雨量 61%~69%;7~9 月为旱季,蒸发量占全年蒸发量的 40%~50%;无霜期 289 d,年积温 6 480 °C;年均气温 17.3 °C,最冷月(1 月)气温为 4.6 °C,极端最低温可达 -10 °C 左右,并常伴有雨雪或冰冻;夏季晴旱酷热,最热月(7 月)平均气温一般在 28.0~29.8 °C,极端最高温达 40 °C 以上;日照时数 1 600~1 900 h。供试土壤为第四纪红粘土发育的水稻土,1981 年试验开始时耕层土壤 pH 6.9,有机碳 16.3 g kg⁻¹,全氮 1.49 g kg⁻¹,全磷 0.48 g kg⁻¹,全钾 10.39 g kg⁻¹,有

* 国家科技攻关计划(2001BA508B)资助

† 通讯作者, E-mail: huixinli@njau.edu.cn; Tel: 025-84395374

作者简介:黄欠如(1966~),男,副研究员,在职博士研究生,主要从事土壤生态学研究

收稿日期:2005-07-28;收到修改稿日期:2006-01-10

效磷($\text{NaHCO}_3\text{-P}$) 4.15 mg kg^{-1} ,速效钾($\text{NH}_4\text{OAc-K}$) 80.52 mg kg^{-1} ,粘粒($<0.001 \text{ mm}$) 24.1% 。

1.2 田间试验设计

红壤性稻田化肥定位试验自 1981 年开始^[17],耕作制为“稻-稻-冬闲”,代表了红壤丘陵单、双季稻作带。供试早、晚稻品种每 5 年更换 1 次,分别为“红梅早”、“73-07”、“2106”、“华联 2 号”、“金优 64”、“754”、“溪-28”、“威优 64”、“晚油 3 号”和“晚粳 923”。共设 10 个处理,3 次重复,小区面积 46.67 m^2 ,随机排列。小区间用水泥埂隔开,其地下填深 30 cm,地上 20 cm。本研究择其与氮肥有关的 6 个处理:(1) CK(不施肥);(2) N;(3) NP;(4) NK;(5) NPK;(6) NPKM。供试肥料有尿素($\text{N } 90 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)、钙镁磷($\text{P}_2\text{O}_5 45 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)、氯化钾($\text{K}_2\text{O } 75 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)和有机肥(早稻为紫云英、晚稻为猪粪 $22500 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。紫云英平均含有机碳 233.5 g kg^{-1} ,N 3.1 g kg^{-1} ,P 2.3 g kg^{-1} ,K 10.1 g kg^{-1} ,猪粪平均含有机碳 69.3 g kg^{-1} ,N 5.6 g kg^{-1} ,P 3.2 g kg^{-1} ,K 7.2 g kg^{-1} 。有机肥和磷肥作基肥一次性施用,氮肥和钾肥在水稻返青期和分蘖盛期按 6:4 比例分 2 次追施。水稻收获时分小区单打、单收。

1.3 数据分析

所有试验数据用 EXCEL 2000 和 SPSS 11.5 进行计算和统计分析,并采用 LSD 进行不同处理间差异的显著性检验。

2 结果与讨论

2.1 施肥处理对水稻产量的影响

2.1.1 不同处理对水稻年产量的影响 从表 1(稻谷年产量)可以看出,试验 23 a NPKM 处理稻谷产量历年均极显著($p < 0.01$)地高于 NK、NP、N、CK 处理,年平均增产 $36.9\% \sim 82.7\%$ 。NPK 处理稻谷产量历年显著($p < 0.05$)高于 NK 处理、极显著地高于 NP、N、CK 处理,年平均增产 $13.0\% \sim 50.8\%$,表明合理配施化肥、实现化肥有机肥结合是维持红壤性稻田持续高产的有效途径^[18]。同时,由于有机肥的叠加效应^[19],NPKM 处理历年水稻总产量显著或极显著高于 NPK 处理,年均增产 21.2% 。这一结果与其他研究是一致的^[20]。

从 N 肥或 N 肥与 P、K 肥配施来看(表 1),NK 配施 1~9 a(1981~1989 年)稻谷产量持续显著高于 N 处理。10~17 a(1990~1997 年)稻谷产量达显著和不显著高于 N 处理年份呈相间分布。随后,其产量

又持续 6 a 显著高于 N 处理。这可能是由于红壤中的粘土矿物以不含钾的高岭类为主,云母类只占 $6\% \sim 17\%$,因此,决定了该类土壤的全钾含量和供钾潜力都较低。再加之,扩种吸钾量高的矮秆水稻新品种,作物从土壤中吸收钾增加,导致作物对钾的依赖性越来越大^[21,22]。值得一提的是,由于磷素养分的过渡耗竭,近两年(2002~2003 年),NK 处理稻谷年产量仅较 CK 高 $2.8\% \sim 4.5\%$,无显著性差异;NP 处理定位试验前 7 a(1981~1987 年)稻谷年产量仅略高于 N 处理($p > 0.05$)。随施肥时间的延长,NP 处理开始显效(与 N 处理相比),并保持 4 a 增产优势($p < 0.05$)。进入 12~17 a(1992~1997 年),NP 处理与 N 处理相比,稻谷增产达显著和不显著的年份各占 1/2。此后,NP 配施区稻谷产量出现激烈的波动,与 N 和 CK 处理相比,其稻谷产量出现连续骤降骤升现象(即增产幅度和减产幅度均达到显著水平);N 肥单施与 CK 相比,水稻年产量持续保持 17 a 增产优势($p < 0.05$)。而后,两者稻谷产量呈隔年弱交错升降($p > 0.05$)。以上结果表明,连续施用 N 肥,增产效果达持续显著水平的年限为 17 a,K 肥为 9 a,但后劲较足;而 P 肥不明显,这可能是由于试验地土壤 P 素起始水平较高的缘故,随着试验年限延续,不施 P(NK、N 处理)处理土壤有效磷水平下降,P 肥逐渐显示较好的增产效果,但持续期仅有 4 a,只有在 N、K 肥配施基础上,才能取得显著的增产效果。由于红壤的巨大固磷能力以及磷在土壤中的微弱移动性,长期施磷已使土壤有效磷库变得丰富,土壤供磷能力增强,施磷对当季水稻增产效应不明显^[23]。

2.1.2 不同施肥处理的产量变化趋势 为了消除气候的年成、季相变化及其交互作用(见表 2)以及品种更替对试验造成的影响,与 CK 相比,采用三年滑动平均法^[24]绘制出各施肥处理的水稻年产量的变化趋势(图 1)。从图中可看出,长期化肥单施(N)、偏施(NP、NK)对水稻的增产率呈直线下降,其相关系数(r)都达到了极显著水平($p < 0.01$),其水稻产量年下降速率呈现出 $\text{NP}(\text{年下降 } 2.00\%) > \text{N}(\text{年下降 } 1.99\%) > \text{NK}(\text{年下降 } 1.55\%)$ 趋势;化肥配施(NPK)和化肥有机肥配施(NPKM)区水稻增产曲线均呈抛物线($p < 0.01$),在试验的第 1~7 年随施肥时间的延长,其增产率显著递增。在保持 8a 左右的稳定高增产期后,增产效率呈下降趋势。其原因可能为:一是随着水稻品种的不断更新,现有的施肥量和施肥结构难以满足水稻再增产的需要^[19];二是由于大量的中、微量元素被带出土体,而又没有得出

有效的补充。自 20 世纪 80 年代以来,我国的施肥科学取得了长足发展,但大多限于 N、P、K 上,中、微量元素的施用较少。随着生产水平的进一步提高,通过施肥解除 N、P、K 限制后,单靠“三要素”,以及

有机肥进一步提高作物产量难度越来越大,其他养分上升为限制因子的可能性逐渐增大^[25~27]。因此,针对性地适时补施中、微量元素,是促进水稻持续增产不可或缺的重要途径。

表 1 不同施肥处理历年水稻产量

Table 1 Annual yield of rice in different treatments in red paddy soil

| 年份 Year | 水稻产量 ¹⁾ Rice yield (kg hm ⁻²) | | | | | |
|------------|--|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| | CK | N | NP | NK | NPK | NPKM |
| 1981 | 7 193dD ²⁾ | 8 892cC | 8 906cC | 9 378bBC | 9 528bAB | 10 000aA |
| 1982 | 6 343dE | 8 756cD | 8 992cCD | 9 636bBC | 9 794bB | 11 393aA |
| 1983 | 6 465eD | 7 508dC | 7 714dC | 8 429cB | 8 728bB | 10 229aA |
| 1984 | 4 450eE | 7 236dD | 8 128cC | 8 200cBC | 8 322bB | 9 536aA |
| 1985 | 5 886dD | 7 792cC | 8 464bcBC | 8 414bcBC | 8 900bB | 10 729aA |
| 1986 | 6 736eE | 8 692dD | 9 021dCD | 9 993cBC | 10 759bB | 12 614aA |
| 1987 | 5 564dD | 7 122cC | 7 500cC | 7 942cBC | 9 107bB | 11 586aA |
| 1988 | 5 392eE | 6 328dB | 7 036cCD | 7 357cC | 8 614bB | 10 578aA |
| 1989 | 5 735eD | 6 671dCD | 7 542cC | 7 757cC | 9 078bB | 11 036aA |
| 1990 | 5 312eD | 6 686dCD | 7 900bcBC | 6 864cdCD | 8 736bB | 11 515aA |
| 1991 | 5 421fE | 6 543eD | 7 328dCD | 8 229cBC | 8 886bB | 10 178aA |
| 1992 | 5 697dD | 7 029cC | 7 435cBC | 7 550cBC | 8 421bB | 9 850aA |
| 1993 | 5 628eE | 7 500dD | 8 050cdCD | 8 758bcBC | 9 160bB | 10 768aA |
| 1994 | 4 427dD | 5 919cC | 6 747bcBC | 6 083cC | 7 468bB | 9 211aA |
| 1995 | 4 777deC | 5 048dC | 6 340cB | 4 720eC | 6 719bB | 8 261aA |
| 1996 | 5 437eD | 6 372dC | 8 589cB | 6 683dC | 9 082bB | 11 513aA |
| 1997 | 6 719eE | 6 583eE | 9 746cC | 7 633dD | 11 181bB | 14 794aA |
| 1998 | 4 152dCD | 4 345dC | 3 852eD | 6 540cB | 6 858bB | 8 764aA |
| 1999 | 6 276cC | 5 741cC | 5 919cC | 8 025bB | 8 240bB | 10 203aA |
| 2000 | 7 090cC | 7 283cC | 6 248dD | 9 075bB | 9 396bB | 10 746aA |
| 2001 | 6 426cC | 6 512cC | 5 234dC | 8 061bB | 8 946bAB | 10 303aA |
| 2002 | 5 486deC | 5 100eC | 6 750cB | 5 736dC | 7 350bB | 9 671aA |
| 平均 Average | 5 806fE | 6 781eD | 7 451dC | 7 747cC | 8 756bB | 10 609aA |

1) 产量数据为早、晚稻之和 Yield here is the sum of the yields of early rice and late rice. 2) 用 LSD 法进行显著性检验,表中显著性检验是在同一行中进行比较,不同小、大写字母分别表示 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 水平的差异 Different lowercase and uppercase letters affixed to the values in the same row stand for significance of difference at 0.05 and 0.01 level, respectively, according to LSD test

2.2 气候变化对不同施肥条件下产量的影响

用水稻产量年变异系数表征气候年成对各处理的影响(表 2)。从表 2 可看出,NPKM、NPK 两处理由于养分供应较均衡,其变异系数(分别为 12.6、12.2)极显著低于化肥单、偏施区(N、NP、NK)。无肥区(CK)则由于养分耗竭较均匀,其变异系数(14.8)显著地低于 NP、N 处理,极显著地低于 NK 处理,但极显著地高于肥料配施区(NPKM、

NPK)。NK(18.1)、NP(16.4)、N(17.0)处理间变异系数无显著性差异,表明化肥单、偏施可加速土壤缺施养分的耗竭,导致产量稳定性下降,而保持养分的均衡供应则有助于提高稻田生态系统的生产稳定性。这一结果与张璐等、刘鸿翔等分别在辽西褐土和黑龙江黑土上进行的 8~12 a 定位结果不尽一致^[24,29]。原因可能与试验点的气候及试验时间长短等有关。

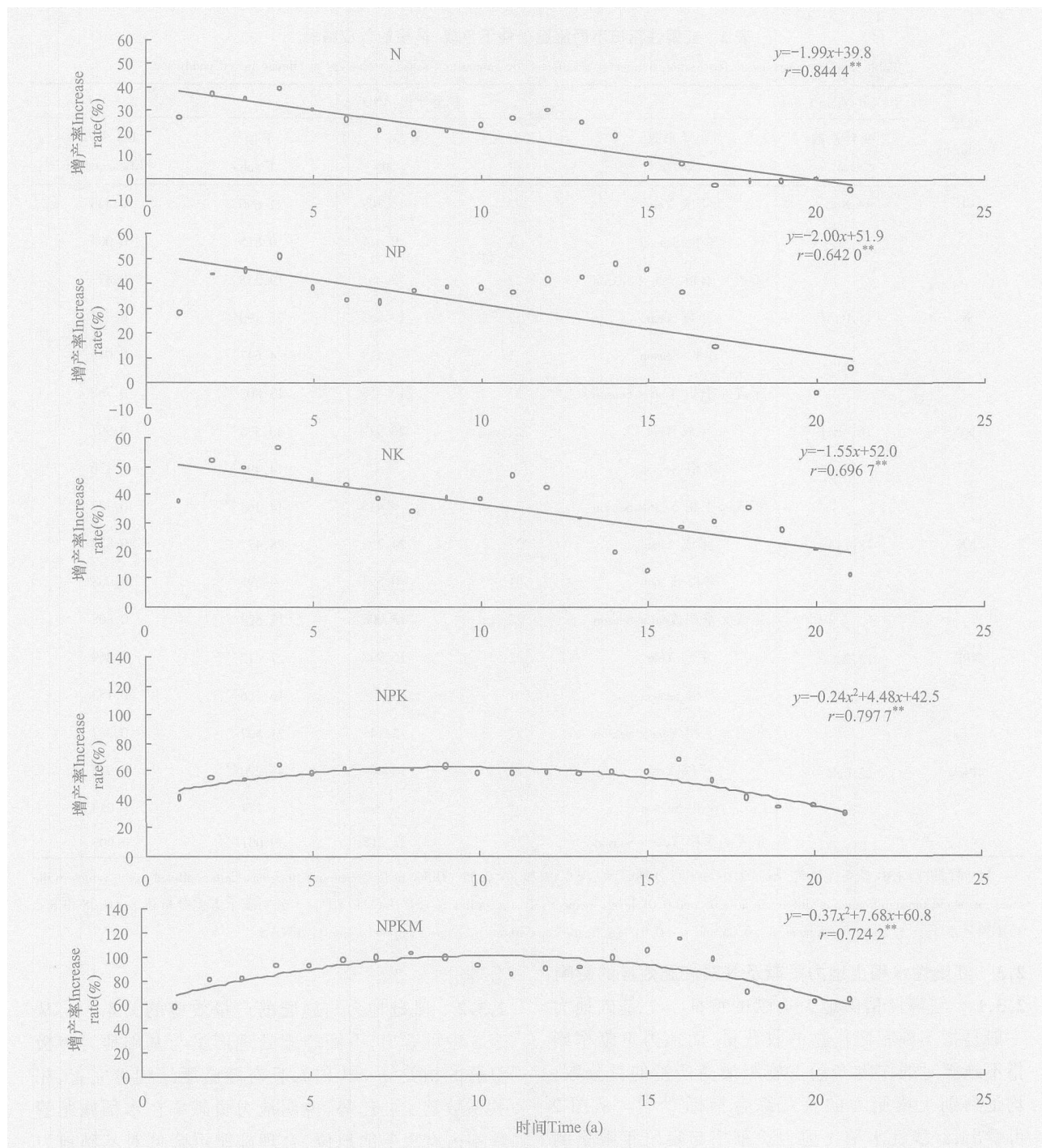


图1 红壤性水稻土不同施肥处理水稻增产趋势

Fig. 1 Yield rising trend of different treatments in red paddy soil

气候是影响施肥效应的主要因素之一^[28]。从表2可看出,气候的成年变化(年际间气候变化)与气候的季相变化(年内的气候变化)对各处理稻谷产量影响相差较大,各处理的 F_{α} 平方值均表现出年成(0.838 ~ 0.915) > 年成 \times 季相(0.768 ~ 0.903) > 季相(0.008 ~ 0.153)的趋势,表明气候的成年变化对水稻生产影响最大,其次是年成与季相的交互作

用,而季相的影响最小。显著性检验结果表明,各处理的成年变化及其交互作用都达到了极显著水平($p < 0.01$)。气候的季相变化的影响因不同处理而异,对CK、NK、NPKM处理的影响不明显,而对N、NP、NPK处理的影响较强($p < 0.05$)。至于季相变化及其交互作用对不同处理的影响强弱,以及气候的成年、季相及其交互作用关系,则有待进一步研究。

表 2 红壤性稻田不同施肥条件下年成、季相的效应检验

Table 2 Crop response to fertilization treatments as affected by annual and seasonal changes in climate in red paddy soil

| 处理 Treatments | 年产量 Yield (%) | | 方差分析 ANOVA | | | |
|------------------|----------------------|-------------------------------------|------------|----------------------------|------------------------------|----------------------|
| | 变异系数 C. V. | 变异来源 Source | 自由度 df | 均方 ($\times 10^5$) MS | F 值 ²⁾ F value | Eta 平方 Eta square |
| CK | 14.8bB ¹⁾ | 年成 Year | 22 | 11.109 | 21.690 ** | 0.838 |
| | | 季相 Season | 1 | 0.417 | 0.815 | 0.009 |
| | | 年成 \times 季相 Year \times Season | 22 | 9.861 | 19.255 ** | 0.822 |
| N | 17.0aAB | 年成 Year | 22 | 19.837 | 26.190 ** | 0.862 |
| | | 季相 Season | 1 | 3.519 | 4.647 * | 0.048 |
| | | 年成 \times 季相 Year \times Season | 22 | 10.458 | 13.808 ** | 0.768 |
| NP | 16.4aAB | 年成 Year | 22 | 26.979 | 40.575 ** | 0.907 |
| | | 季相 Season | 1 | 9.639 | 14.497 ** | 0.136 |
| | | 年成 \times 季相 Year \times Season | 22 | 9.418 | 14.165 ** | 0.772 |
| NK | 18.1aA | 年成 Year | 22 | 24.252 | 28.477 ** | 0.872 |
| | | 季相 Season | 1 | 0.593 | 0.697 | 0.008 |
| | | 年成 \times 季相 Year \times Season | 22 | 15.008 | 17.622 ** | 0.808 |
| NPK | 12.2cC | 年成 Year | 22 | 16.998 | 27.812 ** | 0.869 |
| | | 季相 Season | 1 | 10.125 | 16.566 ** | 0.153 |
| | | 年成 \times 季相 Year \times Season | 22 | 13.145 | 21.507 ** | 0.837 |
| NPKM | 12.6cC | 年成 Year | 22 | 26.884 | 45.270 ** | 0.915 |
| | | 季相 Season | 1 | 0.698 | 1.177 | 0.013 |
| | | 年成 \times 季相 Year \times Season | 22 | 23.215 | 39.091 ** | 0.903 |

1) 同列进行LSD显著性检验,不同大小写字母分别表示 $p < 0.01$ 和 $p < 0.05$ Different lowercase and uppercase letters affixed to the values in the same row stand for significance of difference at 0.05 and 0.01 level, respectively, according to LSD test. 2) *和**分别表示方差分析达 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 差异水平 * and ** denotes $p < 0.05$ and $p < 0.01$ significance of difference, respectively according to ANOVA

2.3 红壤性水稻土地力贡献及其对施肥效应的影响

2.3.1 红壤性稻田地力贡献的特征

基础地力一般是指不施肥区作物的收获量,而地力贡献率则指不施肥时的作物产量占施肥最高产量的百分数,均是判别土壤肥力的直观综合指标^[30,31]。从图2可看出,红壤性水稻土地力贡献率与定位年限呈倒抛物线($p < 0.01$)。定位试验头10a,地力贡献率由72.0%(1981年),下降到46.3%(1990年),10a间平均每年减少2.6%;随后出现升高之势。试验第1年与第23年相比,地力贡献率只下降了9.4%,反映了红壤性水稻土地力贡献具有持续性、稳定性的特点。红壤性水稻土由于粘粒含量高,当土壤肥力下降到一定程度后,对土壤有机物质有较强保护能力^[32]。再加之水耕条件下,由于非共生固氮作用、降水、灌水等因素的影响,水稻能获得生长需要的部

分养分^[33~36]。

2.3.2 基础地力与施肥的产量效应的关系

从表3中可看出,不同施肥处理产量与基础地力有极显著的相关($p < 0.01$),且有随施肥结构越完善,相关系数越小的趋势,说明地力贡献率在水稻施肥管理中占有重要的地位,合理施肥可降低对基础地力的依赖性,从而相应地提高肥料的贡献率。可见,水稻高产必须建立在培肥土壤的基础上,做到合理施肥,才能减少化肥投资,提高肥料施用的经济效益^[30]。从表3还可看出,同一施肥处理的水稻产量与基础地力的相关系数表现出晚稻 > 早稻的总体趋势,这可能与晚稻生长期间,气温较高,土壤供应养分能力较强有关。莫建林等^[37]研究,“麦-稻-稻”三熟制红壤性水稻土地力贡献率为:晚稻 > 早稻 > 大麦。

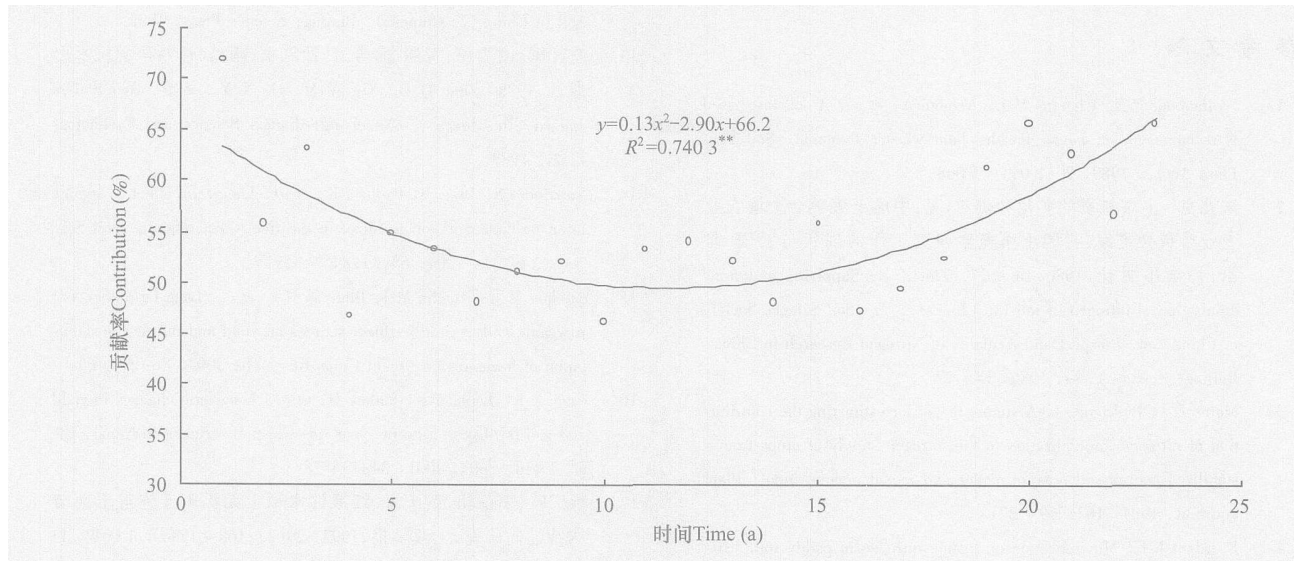


图 2 红壤性水稻土基础地力贡献率

Fig. 2 Contribution of basic soil fertility to rice yield in red paddy soil

表 3 红壤性稻田基础地力与各施肥处理的产量相关关系 ($n = 69$)

Table 3 Regression relation between basic fertility and the yields of different fertilization treatments in red soil paddy soil

| 处理 Treatments | 项目 Item | 回归方程 ¹⁾ Regression equation | 相关系数 r^2 ²⁾ Correlation coefficient r |
|------------------|---------------|---|---|
| N | 早稻 Early rice | $Y = 0.63X + 1484.3$ | 0.5534** |
| | 晚稻 Late rice | $Y = 0.95X + 699.3$ | 0.7502** |
| NP | 早稻 Early rice | $Y = 0.51X + 2306.7$ | 0.4179** |
| | 晚稻 Late rice | $Y = 0.89X + 1078.1$ | 0.6351** |
| NK | 早稻 Early rice | $Y = 0.67X + 1900.5$ | 0.5118** |
| | 晚稻 Late rice | $Y = 1.08X + 775.4$ | 0.7412** |
| NPK | 早稻 Early rice | $Y = 0.727X + 6632.1$ | 0.4696** |
| | 晚稻 Late rice | $Y = 0.96X + 1529.1$ | 0.6664** |
| NPKM | 早稻 Early rice | $Y = 0.56X + 3688.1$ | 0.4463** |
| | 晚稻 Late rice | $Y = 0.97X + 2487.0$ | 0.5138** |

1) Y 分别代表 N、NP、NK、NPK、NPKM 的水稻产量, X 为 CK 的产量
respectively, and X grain yield of rice in CK. 2) ** 代表 $p < 0.01$ 显著水平

Y denotes grain yield of rice in Treatments N, NP, NK, NPK and NPKM, re-
** denotes significance of difference at 0.01 level according to Bivaviate

3 结 论

红壤性水稻土各施肥处理对水稻平均增产效果表现为 $NPKM > NPK > NK > NP > N$ 。连续施用 N 肥,增产效果达持续显著水平的年限为 17 a; K 肥的为 9 a, 但后劲较足; 而 P 肥不明显。N 肥单施或与 P 肥、K 肥配施, 随着时间的延长, 增产效率均呈线性下降, 至 18~21 a 后, 产量水平相当或者低于无肥区 (CK)。N 肥与 PK 肥配施, 具有明显的增产优势, 再配施有机肥, 水稻产量可进一步提高。

在本试验条件下, 各施肥管理产量效应受气候的年成变化及其交互作用的影响极为显著; 气候的季相变化因不同施肥措施而异, 对 CK、NK、NPKM 影响不大, 而对 N、NP、NPK 处理有强烈的影响。但化肥或化肥有机肥配施能显著提高稻田生态系统的生产稳定性。

同时, 施肥效应还与水田基础地力密切相关。定位试验 23 a, 红壤性水稻土基础地力贡献率为 46.3%~72.0%, 具有持续性、稳定性特点。随着施肥结构完善, 对地力贡献的依赖性表现出 $NPKM < NPK < NK, NP < N$ 的趋势。

参考文献

- [1] So Itanpour P N, Charous M E, Azzouai A, *et al.* A soil test based N recommendation model for dry land wheat. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 1989, 20:1 053 ~ 1 068
- [2] 朱兆良. 土壤氮素的矿化和供应. 见:中国土壤学会土壤农业专业委员会主编. 我国土壤氮素研究工作的现状与展望. 北京:科学出版社, 1986. 14 ~ 27. Zhu Z L. Supplying and mineralization of nitrogen in soil (In Chinese). *In: Soil Science Society of China. ed. Prospect and Actuality of Nitrogen Research in China.* Beijing: Science Press, 1986. 14 ~ 27
- [3] Matus E J, Rodriguez J. A simple model for estimating the contribution of nitrogen mineralization to the nitrogen supply of crops from a stabilized pool of soil organic matter and recent organic input. *Plant and Soil*, 1994, 162:259 ~ 271
- [4] Broadent F E. Mineralization of organic nitrogen in paddy soils. *Nitrogen and Rice.* New York Press, 1987. 105 ~ 115
- [5] 朱兆良. 我国氮肥的施用现状、问题和对策. 见:李庆逵主编. 中国农业持续发展中的问题. 南昌:江西科学技术出版社, 1998. 25 ~ 31. Zhu Z L. Countermeasure, problem and actuality of applied N fertilizer in China (In Chinese). *In: Li Q K. ed. Problem of Agricultural Sustainable Development in China.* Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 1998. 25 ~ 31
- [6] 高亚军, 黄东迈, 朱培立, 等. 稻麦轮作条件下长期不同土壤管理对氮素肥力的影响. *土壤学报*, 2000, 37(4):456 ~ 463. Gao Y J, Huang D M, Zhu P L, *et al.* The long-term impact of different soil management on nitrogen fertility in rice-based cropping system (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(4):456 ~ 463
- [7] 李伟波, 吴留松, 廖海秋, 等. 太湖地区高产稻田的氮肥施用与作物吸收利用研究. *土壤学报*, 1997, 34(1):61 ~ 73. Li W B, Wu L S, Liao H Q, *et al.* Application and crop recovery of N fertilizer in high-yielding paddy fields of Taihu region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34(1):61 ~ 73
- [8] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略. *中国农业科学*, 2002, 35(9):1 095 ~ 1 103. Peng S B, Huang J L, Zhong X H, *et al.* Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9):1 095 ~ 1 103
- [9] 张国梁, 章申. 农田氮素淋失研究进展. *土壤*, 1998, 31(6):291 ~ 296. Zhang G L, Zhang S. Nitrogen leaching from the farmlands-A review (In Chinese). *Soils*, 1998, 31(6):291 ~ 296
- [10] 李庆逵, 朱兆良, 于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题. 南昌:江西科学技术出版社, 1998. Li Q K, Zhu Z L, Yu T R. Fertilizer Problems in Agricultural Sustainable Development in China (In Chinese). Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 1998
- [11] 王德建, 林静慧, 孙瑞娟, 等. 太湖地区稻麦高产的氮肥适宜用量及其对地下水的影响. *土壤学报*, 2003, 40(3):426 ~ 432. Wang D J, Lin J H, Sun R J, *et al.* Optimum nitrogen rate for a high productive and its impact on the ground water in the Taihu Lake area (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(3):426 ~ 432
- [12] 李庆逵. 中国水稻土. 北京:科学出版社, 1992. Li Q K. Paddy Soil in China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1992
- [13] 赵其国, 谢为民, 贺湘逸, 等. 江西红壤. 南昌:江西科学技术出版社, 1988. Zhao Q G, Xie W M, He X Y, *et al.* Red Soil of Jiangxi (In Chinese). Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 1988
- [14] Yadvinder S, Bijay S, Ladha J K, *et al.* Long-term effect of organic input on yield and soil fertilizer in the rice-wheat rotation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, 68(3):845 ~ 853
- [15] Saleque M A, Abedin M J, Bhuiyan N I, *et al.* Long-term effects of inorganic and organic fertilizer sources on yield and nutrient accumulation of lowland rice. *Field Crops Research*, 2004, 86:53 ~ 65
- [16] Kami S K, Ladha J K, Pathak H, *et al.* Long-term changes in yield and soil fertility in a twenty-year rice-wheat experiment in Nepal. *Biol. Fertil. Soils*, 2001, 34:73 ~ 78
- [17] 赖庆旺, 李茶苟, 黄庆海. 红壤性水稻土无机肥连施与土壤结构特性的研究. *土壤学报*, 1992, 29(2):168 ~ 174. Lai Q W, Li C G, Huang Q H. Study on characteristics of soil structure and inorganic fertilizer application in red paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29(2):168 ~ 174
- [18] 周卫军, 王凯荣, 谢小立. 红壤稻田施肥制度与土壤持续生产力关系的研究. *农业现代化研究*, 1998, 19(6):388 ~ 390. Zhou W J, Wang K R, Xie X L. Study on the relationship between system of fertilizer application and sustained soil productivity (In Chinese). *Research of Agricultural Modernization*, 1998, 19(6):388 ~ 390
- [19] 林葆, 林继雄, 李家康. 长期施肥处理作物产量和土壤肥力变化. 北京:中国科学技术出版社, 1996. Lin B, Lin J X, Li J K. Dynamics of soil fertility and crop yield in long-term fertilizer application (In Chinese). Beijing: China Science and Technology Press, 1996
- [20] 柳金来, 赵世龙, 王常湘, 等. 稻田培肥与肥料效应的研究. *土壤肥料*, 1992(3):20 ~ 22. Liu J L, Zhao S L, Wang C X, *et al.* Study on effects of fertilization and betterment of paddy soil (In Chinese). *Soil and Fertilization*, 1992(3):20 ~ 22
- [21] 鲁如坤. 东部红壤区农田养分平衡的时空演变. 见:赵其国主编. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化和机理及调控措施. 北京:科学出版社, 2002. 57 ~ 60. Lu R K. Spatial and temporal changes of nutrient balance in farmland in red soil area of eastern China (In Chinese). *In: Zhao Q G. ed. Spatial-temporal Changes, Mechanism and Regulation of Degraded Soil in Red Soil Area of Eastern China.* Beijing: Science Press, 2002. 57 ~ 60
- [22] 谢建昌. 中国土壤的钾素肥力及农业中的钾管理. 见:沈善敏主编. 中国土壤肥力. 北京:中国农业出版社, 1981. Xie J C. Soil fertility and management of potassium fertilization in China agriculture (In Chinese). *In: Shen S M. ed. Soil Fertility in China.* Beijing: China Agriculture Press, 1981
- [23] 张杨珠, 黄运湘, 周清, 等. 高产土壤条件下双季杂交稻施磷效应研究. *湖南农业大学学报*, 2000, 26(3):209 ~ 213. Zhang Y Z, Huang Y X, Zhou Q, *et al.* Effect of phosphate fertilization on double cropping rice in high yield paddy soil (In Chinese). *Journal of Hunan Agricultural University*, 2000, 26(3):209 ~ 213
- [24] 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. *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 (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1): 43 ~ 46
- [25] 周明铮. 中国测土施肥. *土壤通报*, 1987, 18(1): 7 ~ 13. Zhou M Z. Soil testing and fertilizer recommendations in China (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1987, 18(1): 7 ~ 13
- [26] 霍习良, 张俊梅, 许翀, 等. 河北省冲积平原区潮土的土壤养分限制谱序研究与应用. *河北农业大学学报*, 2001, 24(4): 32 ~ 47. Huo X L, Zhang J M, Xu H, *et al.* Study on the order of soil nutrient limiting factors in the alluvial plain of Hebei Province (In Chinese). *Journal of Hebei Agricultural University*, 2001, 24(4): 32 ~ 47
- [27] 谭雪明, 石庆华, 潘晓华, 等. 江西省 4 种水稻土养分限制因子的初步研究. *江西农业大学学报*, 1998, 20(4): 427 ~ 432. Tan X M, Shi Q H, Pan X H, *et al.* Preliminary study on the limiting nutrient factors in four paddy soils in Jiangxi Province (In Chinese). *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 1998, 20(4): 427 ~ 432
- [28] Dobermann A, Witt C, Abdulrachman S, *et al.* Soil fertility and indigenous nutrient supply in irrigated rice domains of Asia. *Agronomy Journal*, 2003, 95(4): 913 ~ 923
- [29] 张璐, 沈善敏, 廉鸿志, 等. 辽西褐土施肥及养分循环再利用中长期试验. 作物产量. *土壤与环境*, 2000, 9(3): 239 ~ 242. Zhang L, Shen S M, Lian H Z, *et al.* Long-term trial on fertilization and on nutrient recycling in farming systems I. Crop yields (In Chinese). *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(3): 239 ~ 242
- [30] 李实焯. 吨粮田土壤的培育和管理. *土壤肥料*, 1992, 4: 1 ~ 5. Li S H. Management and betterment of soil fertility in torryield field (In Chinese). *Soil and Fertilization*, 1992, 4: 1 ~ 5
- [31] 胡之廉. 配方施肥. 北京: 农业出版社, 1989. 16 ~ 41. Hu Z L. Formula Fertilization (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1989. 16 ~ 41
- [32] 李忠麟, 张桃林, 陈碧云, 等. 红壤性稻田土壤有机质的积累过程特征分析. *土壤学报*, 2003, 40(3): 344 ~ 352. Li Z P, Zhang T L, Chen B Y, *et al.* Soil organic matter dynamics in a cultivation chronosequence of paddy fields in subtropical China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(3): 344 ~ 352
- [33] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992. Zhu Z L, Wen Q X. Nitrogen in Soils of China (In Chinese). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992
- [34] Pink L A, Allison F E. Maintenance of soil organic matter. Influence of green manures on the release of native soil carbon. *Soil Sci.*, 1951, 71: 67 ~ 75
- [35] Hassink J. Preservation of plant residues in soils differing in unsaturated protective capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60: 487 ~ 491
- [36] 范业成, 叶厚专. 江西红壤性水稻土肥力特性及其管理. *江西农业学报*, 1998, 10(3): 70 ~ 74. Fan Y C, Ye H Z. Fertilizer characters and management of red paddy soil in Jiangxi (In Chinese). *Acta Agriculturae Jiangxi*, 1998, 10(3): 70 ~ 74
- [37] 莫建林, 盛利民, 项彩花, 等. 嘉湖平原稻田施肥与土壤肥力关系的研究. *浙江农业学报*, 1995, 7(3): 161 ~ 164. Mo J L, Sheng L M, Xiang C H, *et al.* Study on the relationship between fertilizer application and soil fertility in paddy fields at Jiahu plain (In Chinese). *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 1995, 7(3): 161 ~ 164

CROP YIELD RESPONSE TO FERTILIZATION AND ITS RELATIONS WITH CLIMATE AND SOIL FERTILITY IN RED PADDY SOIL

Huang Qianru^{1,2} Hu Feng¹ Li Huixin^{1†} Lai Tao^{1,2} Yuan Yinghong¹

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 Institute of Red Earth of Jiangxi Province, Jinxian, Jiangxi 331717, China)

Abstract Based on a 23-year stationary field experiment on fertilization in red paddy soil, crop yield response to fertilization and its relationship with climate and soil fertility was probed. The experiment was designed to have six treatments, i. e. CK, N, NP, NK, NPK, and NKPM. Results show that changes in annual climate and its interaction caused significant variability of crop yield in all the six treatments, while the impact of changes in seasonal climate on crop yield varied between treatments, little in Treatments CK, NK and NPKM, but strong in Treatments N, NP and NPK. Soil fertility contributed stably to crop yield, at a rate ranging from 46.3 % to 72.0 %. With improvement of the fertilization recommendation, the six treatments fell into an increasing order of NPKM < NPK < NK and NP < N in terms of dependence on basic soil fertility, and a decreasing order of NPKM > NPK > NK > NP > N in terms of crop response. Significant crop response to N fertilization lasted 17 years, and to K fertilization 9 years, but no significant crop response to P fertilization was observed. Stability of the production decreased significantly in Treatments N, NP and NK. With the time going on the decline appeared in a linear curve and the three treatments were in the sequence of NP > N > NK in terms of decreasing rate. During the period from the 18th to 21st years, their yields were close to or even lower than that Treatment CK. The production of rice, in both stability and yield, was raised significantly in Treatment NPK, where the crop response was more significant when organic manure was used to replace part of the N fertilizer.

Key words Effect of climate; Contribution of soil fertility; Fertilization; Red paddy soil