

# 长期不同施肥对双季稻产量及土壤基础地力的影响

廖育林 鲁艳红 聂军\* 周兴 谢坚 杨曾平 吴浩杰

(湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125)



**摘要:** 利用长期定位施肥试验并结合盆栽试验, 研究长期不同施肥模式对双季稻产量和土壤基础地力的影响, 并分析水稻产量和肥料贡献率对土壤不同基础地力的响应。结果表明: 长期施用氮磷钾肥 (NPK) 或氮磷钾肥配施稻草 (NPKS) 有利于双季稻产量的增加。NPK 处理的早稻产量、晚稻产量和年总产量分别较对照 (CK) 处理增产 100.7%、67.0% 和 81.9%, NPKS 处理分别增产 113.8%、77.7% 和 93.7%。CK 处理早稻基础地力产量随试验年限的增加呈极显著下降趋势 ( $p < 0.01$ ), 晚稻基础地力产量在试验的前 9 年随年限增加呈极显著下降 ( $p < 0.01$ ), 之后基本维持稳定。长期施用氮磷钾肥或氮磷钾肥配施稻草有利于土壤基础地力的提升。土壤基础地力产量和基础地力贡献率均表现为 NPKS > NPK > CK。NPK 和 NPKS 处理早稻基础地力产量分别较 CK 提高 38.5% 和 68.1%, 晚稻分别提高 25.8% 和 49.0%。NPK 和 NPKS 处理早稻基础地力贡献率分别较 CK 提高 21.4% 和 54.9%, 晚稻分别提高 12.8% 和 22.8%。无论施肥或不施肥, 早晚稻产量均随土壤基础地力产量提高而增加; 肥料对早晚稻产量贡献率随基础地力产量提高而极显著降低。土壤有机质、全氮、速效钾是影响土壤基础地力的主要养分因子, 土壤全磷、全钾、碱解氮、有效磷对土壤基础地力也产生重要影响。

**关键词:** 长期施肥; 红壤性水稻土; 水稻产量; 土壤基础地力

中国是世界上最大的水稻生产国和消费国, 保证稻谷产量对国家粮食安全具有重大意义<sup>[1]</sup>。然而, 近年来由于城市化的快速发展和人口数量的急剧增加, 总耕地面积和人均耕地面积均呈“刚性”减少的趋势, 且在有限的耕地资源中, 中低产田比例大, 约占 70%, 严重制约我国粮食持续增产<sup>[2]</sup>。因此, 加强农田基础地力培育和挖掘农田生产潜力成为农业生产中急需探索和解决的科学问题。

基础地力是指在特定立地条件、土壤剖面理化性状、农田基础设施建设水平下, 经过多年水肥培育后, 当季旱地无水肥投入、水田无养分投入时的土壤生产能力<sup>[3]</sup>。目前关于农田基础地力研究大多基于长期定位试验的不施肥处理<sup>[4-5]</sup>, 然而长期不施肥处理土壤处于一种长期养分消耗状态, 其产量只能反映长期不施肥条件下的土壤基础地力状况, 而不能反映其他施肥措施下农田的实际基础地力状况。利用长期施肥的土壤, 采用盆栽试验, 以当季不施肥产量表示基础地力产量, 以当季不施肥产量与施肥产量的比值表示基础地力贡献率, 才能更加准确地表征长期不

同施肥模式下的基础地力状况。因此, 通过采集长期不同施肥措施下的土壤进行施肥与不施肥的对比盆栽试验, 研究长期不同施肥措施下土壤基础地力。

本文以红壤性水稻土长期定位施肥试验为基础, 研究不施肥 (CK)、施用氮磷钾肥 (NPK) 和氮磷钾肥与稻草配施 (NPKS) 三种长期施肥模式下双季稻产量和土壤基础地力产量的演变规律; 并采集三种施肥模式下长期定位施肥试验的土壤进行盆栽试验, 研究长期不同施肥模式下当季不施肥基础地力产量和基础地力贡献率的差异; 并进一步探讨不同基础地力对水稻产量效应和肥料贡献率的影响, 以及影响土壤基础地力的关键养分因子, 以期为红壤性水稻土的地力提升与培育提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 长期定位试验区概况

长期定位施肥试验位于湖南省望城县黄金乡 (北纬

基金项目: 国际植物营养研究所 (IPNI) 资助项目 (Hunan-19)。

作者简介: 廖育林 (1975—), 男, 湖南新化人, 博士, 副研究员, 主要从事植物营养与施肥原理研究。E-mail: ylliao2006@126.com

\* 通讯作者: 聂军 (1972—), 男, 湖南沅江人, 博士, 研究员, 主要从事土壤与施肥原理方面的工作。

28° 16' 24"，东经 112° 49' 24"）。试验区年均降雨量为 1385 毫米，年平均气温 17℃，年均无霜期约 300 天。供试土壤为第四纪红土发育的水稻土（粉质轻黏土，土壤系统分类名称为普通筒育水耕人为土）。

## 1.2 长期定位施肥试验设计

本研究选择长期定位施肥试验中的 3 种处理：不施任何肥料（CK）、施氮磷钾化肥（NPK）和氮磷钾化肥 + 稻草（NPKS）。各处理设 3 次重复，随机区组排列。小区面积为 66.7 平方米，小区间用 30 厘米宽水泥埂隔开，区组间的排水沟宽度为 50 厘米，区组间用水泥埂隔开，以避免灌溉水串灌和处理之间的交叉污染。N、P、K 化肥品种分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾。在 1981—2013 年期间，氮肥按早稻 10 公斤 N / 亩和晚稻 12 公斤 N / 亩施入；磷肥按早稻、晚稻各 2.58 公斤 P / 亩施入；钾肥按早稻、晚稻各 6.64 公斤 P / 亩施入；稻草按每年 280 公斤 / 亩（折合养分 N 2.85 公斤 / 亩，P 0.37 公斤 / 亩和 K 7.28 公斤 / 亩）施入。稻草在耕田时撒施，并混入土壤。磷肥、钾肥全部

做基肥于插秧前一天施入。70% 的氮肥于插秧前一天做基肥施入，余下 30% 在分蘖期做追肥施入。

供试水稻品种：早稻为常规水稻品种，晚稻为常规水稻品种或杂交水稻组合。早稻于 4 月底移栽，7 月中旬收获；晚稻于 7 月中下旬移栽，10 月下旬收获。移栽前秧苗生长期为 30—35 天，常规稻每穴栽 4—5 株秧苗，杂交稻每穴栽 1—2 株秧苗，株行距 20 厘米 × 20 厘米。晚稻收获后冬闲。其他田间管理措施与当地农民的大田管理相同。1981—2013 年每年早稻和晚稻成熟期对长期定位施肥试验每个小区进行测产，小区单打单晒，分别称重测产。

## 1.3 盆栽试验设计

盆栽试验在湖南省农业科学研究院盆栽试验场进行。2011 年晚稻收获后采集长期定位试验 CK、NPK 和 NPKS 三种处理的耕层土壤（0—15 厘米）用于基本理化性状的测定。土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾含量采用常规分析法测定<sup>[6]</sup>。盆栽试验的土壤基本理化性状见表 1。



表 1 不同长期施肥处理土壤的基本理化性状

| 长期施肥处理 <sup>1)</sup> | 有机质    | 全氮   | 碱解氮   | 全磷      | 有效磷   | 全钾   | 速效钾   |
|----------------------|--------|------|-------|---------|-------|------|-------|
|                      | (克/公斤) |      |       | (毫克/公斤) |       |      |       |
| CK                   | 33.14  | 2.29 | 115.5 | 0.51    | 3.80  | 13.7 | 86.5  |
| NPK                  | 36.02  | 2.46 | 119.7 | 1.08    | 23.65 | 14.0 | 105.0 |
| NPKS                 | 38.55  | 3.02 | 136.6 | 1.16    | 24.35 | 14.1 | 136.5 |

1) CK: 不施任何肥料; NPK: 施氮磷钾化肥; NPKS: 氮磷钾化肥配施稻草。下同

盆栽试验是在长期施肥处理土壤基础上设置施肥 (NPK 化肥) 和不施肥处理, 3 次重复。试验采用的陶瓷钵钵高 32.0 厘米, 直径 20.0 厘米, 每钵装土 10.0 公斤。盆栽土壤均过 5 毫米筛, 混合均匀装钵后, 浸水两天使土壤完全湿润后再施基肥。插秧时每钵 3 穴, 水稻品种、农事操作方式和时间与长期定位施肥试验一致。试验采用早稻-晚稻-冬闲模式。2012 年早稻和晚稻成熟后每钵钵水稻分别测产。

### 1.4 数据计算与处理

基础地力产量和基础地力贡献率是反映农田基础地力的综合性指标<sup>[7]</sup>。

基础地力产量 = 当季不施肥处理产量;

基础地力贡献率 (%) = 当季不施肥处理产量 / 当季施肥处理产量 × 100%;

肥料贡献率 (%) = (当季施肥处理产量 - 当季不施肥处理产量) / 当季施肥处理产量 × 100%。

数据处理及分析采用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 7.5 等数据处理软件进行。

## 2 结果

### 2.1 长期不同施肥处理对水稻产量的影响

长期定位施肥试验各处理早稻、晚稻产量及年总产量年间变化较大 (图 1)。从各处理产量随年份变化趋势来看, 33 年间早稻 CK 处理产量随试验年限增加呈极显著下降趋势 (回归方程为:  $y = -0.0317x + 3.2705$ ,  $R^2 = 0.240^{**}$ ), NPK 处理和 NPKS 处理早稻产量随试验年份增加变化不显著。33 年间晚稻 CK 处理产量随试验年份增加变化不显著, 而 NPK 和 NPKS 处理晚稻产量随试验年限增加呈极显著增加趋势 (回归方程分别为:  $y = 0.0418x + 5.0417$ ,  $R^2 = 0.2562^{**}$ ;  $y = 0.0454x + 5.3483$ ,

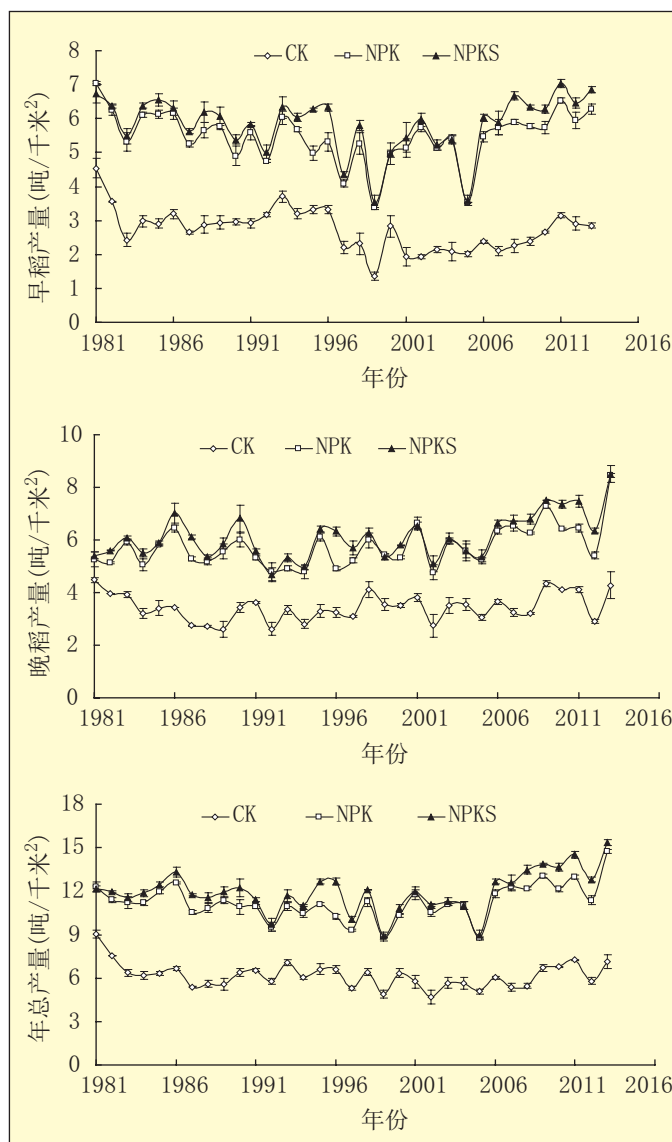


图 1 不同施肥处理水稻产量随试验年限的变化

$R^2 = 0.2729^{**}$ )。33 年 CK、NPK 和 NPKS 处理稻谷年总产量总体上随试验年份增加变化均不显著。

33 年间所有年份 NPK 和 NPKS 处理的早稻、晚稻及年总产量均极显著高于 CK 处理 ( $p < 0.01$ )。NPK 和 NPKS 处理 33 年平均产量也极显著高于 CK 处理 ( $p < 0.01$ ), 其中, NPK 处理早稻、晚稻和年总产量分别较

CK 处理增产 100.7%、67.0% 和 81.9%，NPKS 处理分别较 CK 处理增产 113.8%、77.7% 和 93.7%。NPKS 处理 33 年平均早稻、晚稻和年总产量较 NPK 处理分别增产 6.5%、6.4% 和 6.5%，达到极显著水平 ( $p < 0.01$ )。试验结果表明氮磷钾化肥配合施用及化肥氮磷钾与稻草配合施用是维持红壤性稻田持续高产的有效途径。

## 2.2 长期不施肥土壤基础地力产量的演变

长期不施肥处理 (CK) 产量的变化反映了长期不施肥条件下土壤基础地力的变化。由图 2 可见, 33 年长期不施肥土壤早稻基础地力产量 ( $y$ ) 随试验年限 ( $x$ ) 的

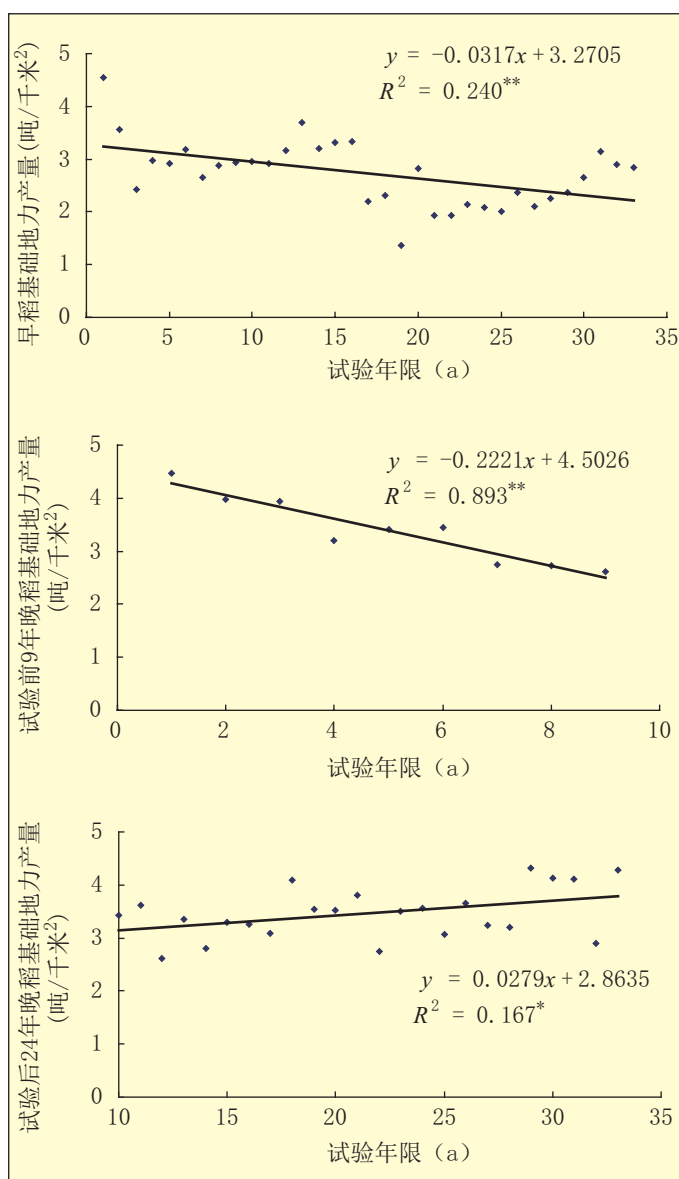


图 2 长期不施肥处理早稻、晚稻土壤基础地力产量变化

变化方程表明长期不施肥导致早稻土壤基础地力产量按 0.0317 吨 / 公顷 · 年的速率下降, 且随试验年限增加达到极显著水平 ( $p < 0.01$ )。

33 年长期不施肥土壤晚稻基础地力产量总体上随试验年限增加无显著变化。但进一步分析发现, 试验的前 9 年不施肥土壤晚稻基础地力产量随试验年限增加呈极显著下降 ( $p < 0.01$ ); 之后的 24 年不施肥土壤晚稻基础地力产量基本维持稳定。长期不施肥处理的晚稻基础地力产量在试验前期 (前 9 年) 随年份急剧下降, 之后晚稻基础地力产量即使在不施肥的条件下也基本维持稳定, 说明长期不施肥导致晚稻土壤基础地力产量下降主要发生在试验的前期。

## 2.3 长期不同施肥处理对基础地力产量和施肥产量的影响

基于盆栽试验的长期不同施肥处理对基础地力产量 (不施肥产量) 的影响结果如图 3 所示, 早稻、晚稻三种长期不同施肥处理的土壤基础地力产量均表现为:  $NPKS > NPK > CK$ , 说明长期氮磷钾肥配合施用或氮磷钾化肥与稻草配施有利于维持或提高土壤基础地力产量, 长期不施肥则会导致土壤基础地力产量降低。经过 1981-2011 年 31 年 62 季水稻种植后, 长期施氮磷钾肥早稻基础地力产量较长期不施肥提高 38.5%, 长期氮磷钾肥与稻草配施较长期不施肥提高 68.1%; 长期施氮磷钾肥晚稻基础地力产量较长期不施肥提高 25.8%, 长期氮磷钾肥与稻草配施较长期不施肥提高 49.0%。

长期氮磷钾肥与稻草配施 (NPKS)、长期施氮磷钾肥 (NPK) 和长期不施肥 (CK) 三种不同基础地力土壤上, 施肥或不施肥的早晚稻产量均表现为:  $NPKS > NPK > CK$  (图 3)。无论施肥或不施肥, 早晚稻产量均随土壤基础地力的提高而增加, 说明土壤基础地力越高, 作物的产量潜力就越大, 越容易获得高产。施用相同用量肥料对不同基础地力土壤上的早晚稻增产幅度不同。长期定位试验 CK 处理土壤上施用氮磷钾肥较其基础地力产量早晚稻分别提高 265.3% 和 139.5%; NPK 处理土壤上施用氮磷钾肥较其基础地力产量早晚稻分别提高 180.1% 和 110.7%; NPKS 处理土壤上施用氮磷钾肥较其基础地力产量早晚稻分别提高 136.6% 和 89.6%。施肥对基础地力低的土壤的增产幅度大于基础地力高的土壤, 这一现象可能主要与基础地力低的土壤其基础地力产量过低有关。

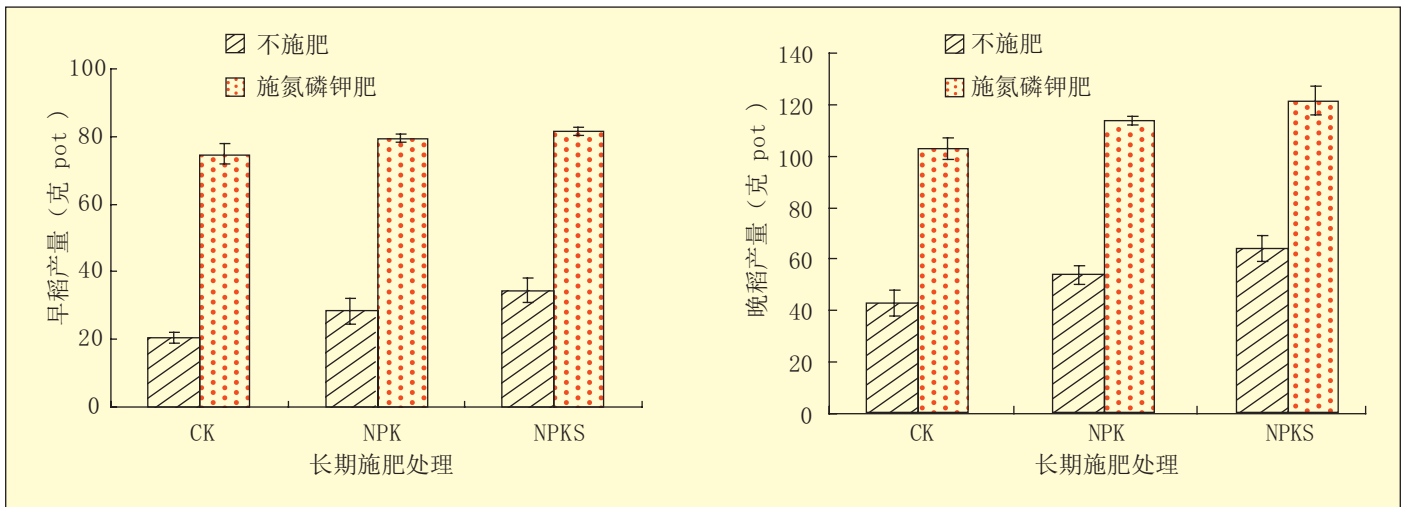


图3 长期不同施肥处理对土壤基础地力产量和施肥产量的影响

#### 2.4 长期不同施肥处理对基础地力贡献率和肥料贡献率的影响

经过31年62季水稻种植后，长期不同施肥处理对红壤性水稻土壤基础地力贡献率的影响有明显差异(图4)。早稻、晚稻土壤基础地力贡献率均表现为：NPKS > NPK > CK。其中，NPK早稻基础地力贡献率较CK提高21.4%，NPKS较CK提高54.9%；NPK晚稻基础地力贡献率较CK提高12.8%，NPKS较CK提高22.8%。说明长期氮磷钾肥配施或长期氮磷钾肥配施稻草有利于土壤基础地力贡献率的维持或提高，而长期不施肥则导致土壤基础地力贡献率降低。

分析不同基础地力土壤的肥料贡献率(图4)可知，基础地力越高，早晚稻肥料对产量的贡献率越低。长期定位试验CK处理、NPK处理和NPKS处理土壤的早稻肥料对产量的贡献率分别为72.6%、64.3%和57.7%，晚稻

肥料贡献率分别为58.3%、52.5%和47.3%，肥料贡献率均表现为：CK > NPK > NPKS。

肥料贡献率(y)随土壤基础地力产量(x)的提高呈极显著( $p < 0.01$ )降低，回归方程 $y = -0.5227x + 80.082$ ， $R^2 = 0.920^{**}$ ，表明提高土壤基础地力可以降低水稻产量对肥料的依赖，从而适当降低肥料施用量。因此，中低产田基础地力的培育和提升不但对保障粮食高产、稳产具有十分重要的意义，同时基础地力的提升还可以适量降低肥料用量，提高肥料利用效率。

#### 2.5 双季稻田基础地力的主要影响因素

盆栽试验前土壤养分含量与早晚稻基础地力贡献率的相关性分析(表2)表明，土壤基础地力贡献率随土壤养分含量的增加而提高。其中，土壤基础地力贡献率与土壤有机质、全氮、速效钾含量的相关性达到极显著水

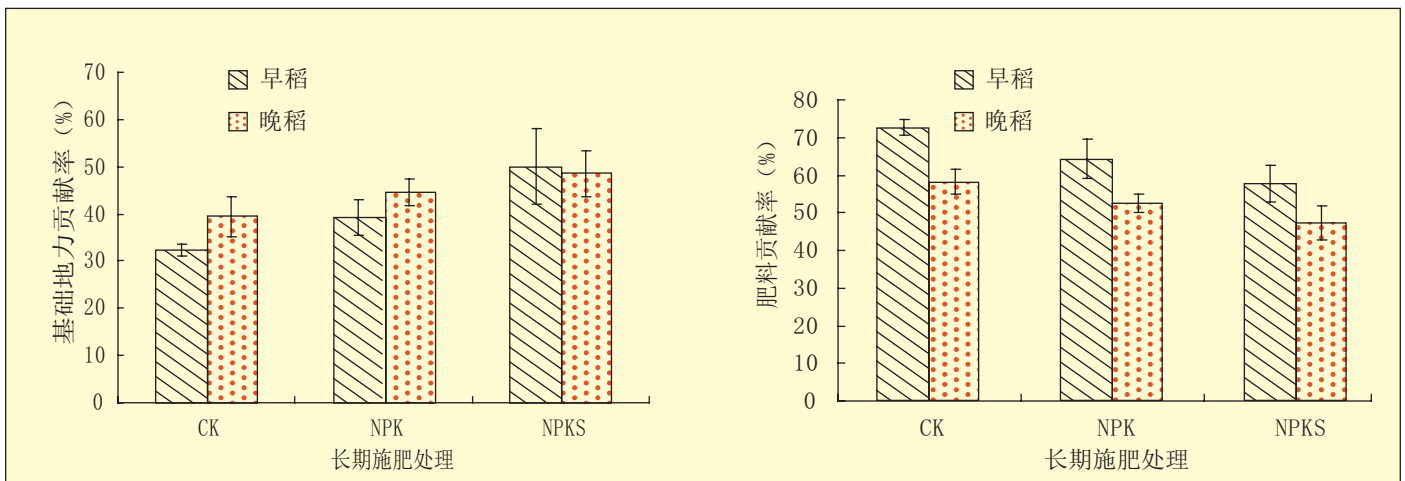


图4 长期不同施肥对土壤基础地力贡献率和肥料贡献率的影响

平 ( $p < 0.01$ ), 与土壤全磷、全钾、碱解氮、有效磷含量的相关性达显著水平 ( $p < 0.05$ )。表明土壤有机质、全氮、速效钾是影响土壤基础地力的主要养分因子, 土壤全磷、全钾、碱解氮、有效磷也是影响土壤基础地力的次要养分因子。

表 2 基础地力贡献率与土壤养分因子关系模型

| 土壤养分因子 | 拟合模型                   | 显著性检验              |
|--------|------------------------|--------------------|
| 有机质    | $y = 0.3267x + 22.066$ | $R^2 = 0.804^{**}$ |
| 全氮     | $y = 0.045x + 0.6831$  | $R^2 = 0.767^{**}$ |
| 碱解氮    | $y = 1.3055x + 68.661$ | $R^2 = 0.753^*$    |
| 全磷     | $y = 0.0383x - 0.7052$ | $R^2 = 0.644^*$    |
| 有效磷    | $y = 1.2028x - 33.677$ | $R^2 = 0.586^*$    |
| 全钾     | $y = 0.0238x + 12.926$ | $R^2 = 0.720^*$    |
| 速效钾    | $y = 3.0544x - 20.031$ | $R^2 = 0.806^{**}$ |

注: \*\*表示在 1% 水平相关性显著, \*表示在 5% 水平相关性显著。

### 3 结论与讨论

长期不同施肥对南方双季水稻产量具有显著影响, 长期施用氮磷钾肥或氮磷钾肥配施稻草有利于双季水稻产量的提高, 尤其是长期氮磷钾肥配施稻草的增产效果更为明显。长期不施肥处理土壤早稻基础地力产量随试验年限推移呈极显著下降趋势, 晚稻基础地力下降主要发生在试验前 9 年, 之后基本维持稳定。长期施用氮磷钾肥或氮磷钾肥配施稻草有利于土壤基础地力的提升, 尤其是长期氮磷钾肥配施稻草。无论施肥或不施肥, 早晚稻产量均随土壤基础地力提高而增加, 且施用相同用量肥料基础地力低的土壤的增产幅度大于基础地力高的土壤。肥料对水稻产量贡献率随基础地力产量提高而极显著降低。在南方双季稻生产实践中, 化肥与稻草配施



不仅有利于水稻产量的稳产高产，还可培育和提升土壤基础地力，是南方水稻种植区一种较好的施肥模式。

本文利用长期定位并采集长期不同施肥处理土壤开展盆栽试验，将长期不同施肥模式土壤作为一个整体研究土壤基础地力，使水稻产量随基础地力“水涨船高”效应现象变得直观和容易理解，规避了土壤基础地力变化的复杂化学行为，探讨了三种施肥模式下土壤基础地力变化特征、土壤基础地力和肥料贡献率与产量和施肥量之间的变

化关系，可以预测肥料施入后土壤基础地力的变化和不同基础地力土壤供给作物养分的本质特征。本文仅就三种施肥模式对水稻产量、土壤基础地力和肥料贡献率等的影响进行了初步探讨，对于促进南方双季稻区科学合理培肥具有一定的现实意义。但对33年三种施肥模式下土壤基础地力的动态变化机制，基础地力定向培育与合理施肥量的关系、土壤基础地力构成的土壤养分有效性时间长短或稳定性等均有待今后进一步研究。

## 参考文献

- [1] Peng S, Tang Q, Zou Y. Current status and challenges of rice production in China [J]. *Plant Production Science*, 2009, 12:3-8.
- [2] 曾希柏, 张佳宝, 魏朝富, 等. 中国低产田状况及改良策略 [J]. *土壤学报*, 2014, 51(4):675-682.
- [3] 贡付飞. 长期施肥条件下潮土区冬小麦-夏玉米农田基础地力的演变规律分析 [M]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- [4] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 长期不同施肥方式对南方黄泥田水稻产量及基础地力贡献率的影响 [J]. *福建农业学报*, 2010, 25(5):631-635.
- [5] 李实焯, 王胜佳. 稻田多熟制中的地力贡献 [J]. *土壤通报*, 1988, 19(4):145-147.
- [6] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [7] 汤勇华, 黄耀. 中国大陆主要粮食作物地力贡献率和基础产量的空间分布特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(5):1070-1078.