

# 四川盆地水稻产量对基础地力与施肥的响应

梁 涛<sup>1,2</sup>, 陈轩敬<sup>1</sup>, 赵亚南<sup>1</sup>, 黄兴成<sup>1</sup>, 李 鸿<sup>1</sup>, 石孝均<sup>1,3</sup>, 张跃强<sup>1,3</sup>

**【摘要】：**【目的】四川盆地是中国主要的单季稻种植区之一。研究四川盆地稻田土壤基础地力、养分供应能力和施肥效果，评价土壤基础地力和施肥对水稻产量的影响，为四川盆地稻田地力的保育培肥和区域合理施肥提供依据。【方法】依托2005年以来在四川盆地布置的474个水稻田长期定位试验点，选取对照（不施肥CK）、磷钾（PK）、氮钾（NK）、氮磷（NP）和氮磷钾（NPK）5个处理，测定水稻产量和养分吸收量，分析四川盆地稻田土壤基础地力现状、土壤养分供应能力和施肥效果及其之间的关系，基于水稻产量评价不同基础地力稻田的施肥效果及产量稳定性和可持续性。同时通过调研四川盆地水稻研究结果，分析30多年来稻田基础地力的变化趋势。【结果】文献调研表明，四川盆地田基础地力稳定提升，2000年以来稻田基础地力产量在5.6—6.4 t hm<sup>-2</sup>，比二十世纪八九十年代提高了1.5 t hm<sup>-2</sup>，地力贡献率也上升6.7%。田间试验表明，基础地力和肥料对产量的贡献率分别为67.4%—75.9%和24.1%—32.6%。四川盆地稻田土壤氮、磷、钾养分供应量分别为103—120、23.2—27.5和139—185 kg hm<sup>-2</sup>，土壤养分对产量的平均贡献率达到78.2%、88.8%、90.8%，而施肥对产量的贡献率低于30%，且氮肥的增产效果高于磷肥和钾肥。四川盆地不同生态区土壤基础地力和养分供应能力均表现为成都平原>盆地中部浅丘区>盆地周边丘陵区>盆地东部丘陵区；土壤基础地力越高越容易实现水稻高产，土壤基础地力与土壤贡献率呈显著正相关，而与肥料贡献率呈显著负相关；土壤基础地力越高，产量可持续性和稳定性越高。【结论】提高稻田土壤基础地力可促进水稻高产稳产，降低高产对肥料的依赖性，有利于水稻的可持续生产。

**【关键词】：**稻田；基础地力；产量；施肥；四川盆地

## 0 引言

**【研究意义】**中国经过“绿色革命”和农田集约化，水稻单产在过去50年里翻了3倍左右<sup>[1]</sup>，其主要原因是土壤基础地力的提升，养分管理技术的提高和作物品种的改良等。提升基础地力是提高水稻产量的重要措施<sup>[2]</sup>。施肥对水稻单产的提高也具有重要贡献，但由于肥料不合理使用，造成了水体富营养化、温室气体排放、生物多样性减少和土壤质量退化等一系列环境问题<sup>[3]</sup>。研究稻田土壤基础地力、养分供应能力和施肥效果，对实现化肥零增长，确保粮食安全和降低施肥环境风险有重要意义。【前人研究进展】大量田间试验表明，水稻施用氮磷钾肥具有显著增产效果。王伟妮等<sup>[4]</sup>在湖北省的研究表明，水稻施用氮磷钾肥可增产42.3%—57.4%。张福锁等<sup>[5]</sup>研究发现中国水稻氮磷钾肥的农学效率平均为10.4、9.0和6.3 kg·kg<sup>-1</sup>，利用率为28.3%、13.1%和32.4%，远低于国际水平，并认为过量施肥和忽视土壤养分供应是导致中国肥料利用偏低的重要原因。近年来，中国农田土壤肥力发生了很多变化，55%的农田有机质呈现增加趋势，30%的农田土壤有机质降低<sup>[6]</sup>。李忠芳等<sup>[7]</sup>研究表明，中国长期施肥下红壤水稻土基础地力易呈下降趋势，而紫色水稻土较稳定。土壤基础地力的变化可能对中国粮食产量和施肥效果有重要影响，汤勇华等<sup>[8]</sup>研究表明中国小麦、玉米和水稻产量的地力贡献率分别为43.06%、51.06%和61.93%，且不同地区地力贡献率不同。曾祥明等<sup>[9]</sup>发现土壤基础地力会影响肥料利用率，土壤基础地力提高，肥料利用率下降。在粮食生产和环境保护的双重压力下，如何在保证粮食安全的同时，减轻肥料对环境造成的巨大压力<sup>[10]</sup>，提高基础地力显得尤为重要。【本研究切入点】水稻是四川盆地

收稿日期：2015-09-17；接受日期：2015-10-28

基金项目：国家科技支撑计划（2015BAD06B04）、国家自然科学基金（31471944）、中央高校学科团队资助项目（2362015xk06）

联系方式：梁涛，E-mail: [swuliangtao@163.com](mailto:swuliangtao@163.com)。

通信作者：张跃强，Tel: 023-68250146；E-mail: [levinsky@swu.edu.cn](mailto:levinsky@swu.edu.cn)

1 西南大学资源环境学院，重庆 400716；

2 重庆市北碚区种子管理站，重庆 400700；

3 国家紫色土肥力与肥料效益监测基地，重庆 400716

的主要粮食作物之一，常年种植面积在220 万hm<sup>2</sup> 左右，分布区域广，稻作环境差异较大。目前针对四川盆地稻田基础地力、产量和肥料之间关系研究未见报道。【拟解决的关键问题】选取2005—2010 年四川盆地474 个试验点，对不同区域稻田基础地力，养分供应能力，肥料贡献率，产量及其稳定性进行了评价，揭示了稻田土壤基础地力和施肥与水稻产量之间的相互关系，为四川盆地不同区域提高水稻产量实现区域合理施肥提供理论依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验材料

本研究选取2005—2010 年国家测土配方施肥项目在四川盆地设置的474 个水稻试验。四川盆地地理位置为东经97° 21′ —108° 33′，北纬26° 03′ —34° 19′，属于亚热带季风性湿润气候，年均温度在16—18℃，年降雨量1 000—1 300 mm，年无霜期长达280—350 d。四川盆地分布区域较大，种植习惯差异较大，根据气候、地形、生态条件、土壤以及种植方法，将其划分为4 个亚生态水稻种植区域<sup>[11]</sup>，分别为成都平原区、盆地东部丘陵区、盆地中部浅丘区和盆地周边丘陵区。各区域水稻试验样本数分别为成都平原区49 个，盆地东部丘陵区147 个，盆地中部浅丘区206 个，盆地周边丘陵区72 个（图1）。

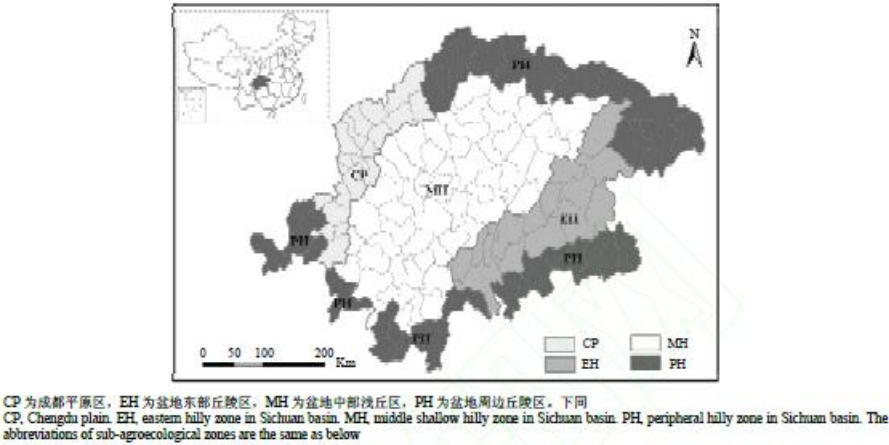


图1 中国四川盆地及其子生态分区  
Fig. 1 Geographical location of Sichuan basin in China and its sub-agroecological zone

## 1.2 试验设计

利用 2005—2010 年国家测土配方施肥项目在四川盆地稻田布置的 474 个水稻试验，试验地选择具有代表性的农户地块进行，每个试验在同一地块仅开展一季试验，试验开始前均为农民正常管理。每个试验选择 5 个处理：不施肥（CK）、单施磷钾肥（PK）、单施氮钾肥（NK）、单施氮磷肥（NP）、施用氮磷钾肥（NPK）进行研究。氮磷钾肥料施用量根据当地测土配方施肥结果推荐使用，各区域的氮磷钾肥施用量见表 1。施用的氮肥为尿素（N 46.4%），磷肥为过磷酸钙（P2O5 12%），钾肥为氯化钾（K2O 60%），其中磷肥和钾肥全部基施；氮肥分两次施用，基肥施用 50%，另外 50%氮肥作为分蘖肥或穗肥施用。试验小区面积多为 20—30 m<sup>2</sup>。各区域供试土壤的基本性质见表 2。种植方式均为一季中稻，水稻品种见表 1。

表 1 四川盆地不同区域田间试验样本数、施肥量及主要供试水稻品种

Table 1 The fertilization rate and major cultivars of different regions in Sichuan basin

| 区域<br>Region | 样本数<br>Number | 施肥量 Fertilization rate (kg·hm <sup>-2</sup> ) |                               |                  | 主要品种<br>Major cultivar                                                                                     |
|--------------|---------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              |               | N                                             | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O |                                                                                                            |
| CP           | 49            | 148±27.2                                      | 72±19.7                       | 106±59.2         | B 优 B you, 川香 Chuanxiang, 辐优 Fuyou, 冈优 Gangyou                                                             |
| EH           | 147           | 152±13.1                                      | 88±15.9                       | 95±25.6          | Q 优 Q you, 万优 Wanyou, 冈优 Gangyou, 宜香 Yixiang, 渝优 Yuyou                                                     |
| MH           | 206           | 145±31.3                                      | 74±22.2                       | 72±28.2          | II 优 II you, D 优 D you, Q 优 Q you, 川香 Chuanxiang, 辐优 Fuyou, 冈优 Gangyou, 泰优 Taiyou, 宜香 Yixiang, 中优 Zhongyou |
| PH           | 72            | 159±25.0                                      | 73±14.2                       | 76±17.2          | D 优 D you, 辐优 Fuyou, 岗优 Gangyou, 合系 Heli, 宜香 Yixiang, 中优 Zhongyou, 金优 Jinyou                               |
| Mean         | 474           | 149±27.6                                      | 76±23.3                       | 81±34.4          |                                                                                                            |

表 2 四川盆地不同区域供试土壤基础理化性质

Table 2 The physical-chemical properties of rice growing regions soils in Sichuan basin

| 区域<br>Region | 样本数量<br>Site number | 有机质<br>SOM (g·kg <sup>-1</sup> ) | 全氮<br>Soil total N (g·kg <sup>-1</sup> ) | 碱解氮<br>Alkalotic N (mg·kg <sup>-1</sup> ) | 有效磷<br>Available P (mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾<br>Available K (mg·kg <sup>-1</sup> ) | pH      |
|--------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|---------|
| CP           | 49                  | 32.5±10.7                        | 2.9±5.0                                  | 167±48                                    | 25.3±14.2                                 | 85±40                                     | 6.5±0.8 |
| EH           | 147                 | 21.3±9.3                         | 1.4±0.3                                  | 128±34                                    | 9.6±9.9                                   | 75±29                                     | 5.7±0.9 |
| MH           | 206                 | 23.0±10.5                        | 1.5±1.4                                  | 130±43                                    | 11.8±11.7                                 | 100±136                                   | 6.4±1.5 |
| PH           | 72                  | 26.9±12.3                        | 1.5±1.3                                  | 141±59                                    | 18.3±22.1                                 | 88±40                                     | 6.3±1.0 |
| Mean         | 474                 | 24.6±11.2                        | 1.6±2.1                                  | 135±48                                    | 14.2±15.5                                 | 92±102                                    | 6.3±1.3 |

1.3 田间试验样品采集与测定

水稻移栽前，各试验点取耕层（0—20 cm）土壤样品测定基本养分指标。利用S 法取土，室内风干，过筛（1 mm 和0.25 mm ）后测定各个土壤基本指标。有机质：重铬酸钾容量法；全氮：半微量凯氏法；碱解氮：碱解扩散法；有效磷：Olsen 法；速效钾：醋酸铵浸提-火焰光度法；pH（2.5：1）：酸度计电位法。

在水稻成熟期，分小区收获计产，并且采集籽粒和秸秆进行养分含量测定。对籽粒和秸秆分别烘干、磨碎、过筛测定氮磷钾养分；采用H2SO4-H2O2 消煮后，凯氏定氮法测定全氮，Olsen 法测定全磷，火焰光度计法测定全钾<sup>[12]</sup>。

1.4 历史数据收集

为了分析四川盆地稻田基础地力近30 年来的变化，本文收集整理了四川盆地两个时期（1980—2000年和2000—2015 年）发表的水稻相关文献。文献来源于中国知网，对四川盆地已发表的一季水稻试验中不施肥（CK）小区产量和推荐施肥（NPK）产量数据进行统计分析。1980—2000 年发表文献较少，CK 产量数据21 组，NPK 产量数据22 组。2000—2015 年发表的文献CK 产量数据43 组，NPK 产量214 组。

1.5 数据处理与分析

土壤基础地力（inherent soil productivity）用不施任何肥料时的作物产量来评价<sup>[2]</sup>，本研究用无肥区（CK）水稻产量表示；同时，为了评价作物产量对土壤和肥料的依赖性，计算土壤贡献率和肥料贡献率。

$$RC_{\text{soil}}(\%) = \frac{Y_{\text{CK}}}{Y_{\text{NPK}}} \times 100$$

$$RC_{\text{fertilizer}}(\%) = \frac{Y_{\text{NPK}} - Y_{\text{CK}}}{Y_{\text{NPK}}} \times 100$$

式中，YCK 为CK 处理的平均产量，YNPK 为NPK 处理的平均产量。

土壤养分供应能力是影响土壤基础地力的重要因素，土壤养分供应能力越高，越容易获得较高的基础地力产量；土壤养分供应能力用不施某种养分时地上部对该养分的吸收量表示，如土壤供氮能力用PK 处理地上部植株吸氮量表示，土壤供磷能力可用NK 处理地上部植株吸磷量表示，土壤供钾能力可用NP 处理地上部植株吸钾量表示；同时，土壤养分对产量的效果用土壤养分贡献率Ci（contribution of nutrientsupply to yield）表示，计算方法为土壤某养分的贡献率为缺乏该养分时的作物产量与平衡施肥时作物产量的百分比<sup>[13]</sup>。不同肥料的增产效果用肥料增产率Ii（increment rate by fertilizer）表示，计算方法为不施某种养分处理产量与平衡施肥产量差值占其百分比。计算公式如下：

土壤氮贡献率：

$$C_{iN}(\%) = \frac{Y_{\text{PK}}}{Y_{\text{NPK}}} \times 100$$

氮肥增产率：

$$I_{iN}(\%) = \frac{Y_{\text{NPK}} - Y_{\text{PK}}}{Y_{\text{PK}}} \times 100$$

土壤磷贡献率：

$$C_{iP}(\%) = \frac{Y_{\text{NK}}}{Y_{\text{NPK}}} \times 100$$

磷肥增产率：

$$I_{iP}(\%) = \frac{Y_{\text{NPK}} - Y_{\text{NK}}}{Y_{\text{NK}}} \times 100$$

土壤钾贡献率：

$$C_{iK}(\%) = \frac{Y_{\text{NP}}}{Y_{\text{NPK}}} \times 100$$

钾肥增产率：

$$I_{iK}(\%) = \frac{Y_{\text{NPK}} - Y_{\text{NP}}}{Y_{\text{NP}}} \times 100$$

作物产量的可持续性指数 SYI（sustainable yieldindex）是衡量系统是否能持续生产的一个参数，SYI 值越大，产量的可持续性越好。作物产量的稳定性用产量稳定性指数 SI（stability index）衡量，SI 值越低表明产量越稳定<sup>[14]</sup>。计算方法如下：

可持续性指数：

$$SYI = \frac{\bar{Y}_{\text{NPK}} - \sigma}{Y_{\text{NPK-max}}}$$

稳定性指数：

$$SI = \frac{STD(Y_{\text{NPK}})}{Y_{\text{NPK}}} \times 100$$

式中， $\bar{Y}_{\text{NPK}}$  为平均产量， $\sigma$  为标准差， $Y_{\text{NPK-max}}$  为试验中的最高产量，STD（YNPK）为NPK 处理产量的标准差。

为评价水稻产量和肥料对土壤基础地力的响应,本文使用平均单产法<sup>[9]</sup>将474个试验按不施肥对照产量的高低将土壤地力产量分为<4、4—5、5—6、6—7和>7 t·hm<sup>-2</sup>共5个等级,每个等级的样本量分别为51、113、134、116和60个。通过土壤地力分级比较不同肥力水平下田块的肥料效应、产量可持续性和稳定性。

数据处理和统计分析在Microsoft Excel 2013软件和SigmaPlot 2.0软件中进行。

## 2 结果

### 2.1 四川盆地稻田基础地力变化

不施肥料时的水稻产量代表了稻田的基础地力,是土壤肥力的客观体现。从历史资料看,四川盆地稻田基础地力近年来显著提升(图2),地力产量由1980—2000年的4.48 t·hm<sup>-2</sup>提高到2000—2015年的5.94 t·hm<sup>-2</sup>,基础地力产量提高了1.46 t·hm<sup>-2</sup>,增长32.6%。推荐施肥条件下水稻产量也提高了1.66 t·hm<sup>-2</sup>,但是地力提升对水稻产量的贡献超过了施肥,地力提升对增产的贡献率由1980—2000年的60%提高到2000—2015年的65%,肥料增产贡献率则由40%下降到35%。由此看出,四川盆地稻田肥力近10年来得到了显著提升,这对高产稳产和控制肥料使用奠定了坚实基础。

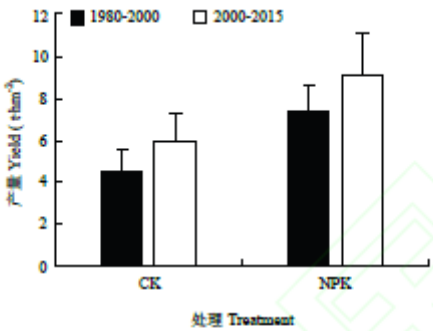


图2 1980—2015年四川盆地基础地力产量(不施肥CK)和推荐施肥(NPK)水稻产量的变化

Fig. 2 Changes of rice yield in control plots without fertilizer addition and with balanced fertilization in Sichuan basin during 1980 to 2015

### 2.2 四川盆地稻田基础地力现状及其对产量的贡献

通过474个水稻田间试验结果表明(表3),四川盆地稻田土壤基础地力产量平均为5.8 t·hm<sup>-2</sup>,不同区域间相差0.8 t·hm<sup>-2</sup>,其中以成都平原基础地力产量最高,为6.4 t·hm<sup>-2</sup>,其他3个区域相差较小,在5.6—5.7 t·hm<sup>-2</sup>。施肥可以显著提高水稻产量,在现有的基础地力条件下,推荐施肥(NPK)获得了8.2—8.5 t·hm<sup>-2</sup>水稻产量,施肥增产量为2.5 t·hm<sup>-2</sup>,增产率为38.3%(表3);四川盆地稻田土壤地力贡献率和肥料贡献率平均分别为70.4%和29.6%。四川盆地不同生态区域地力贡献率和肥料贡献率也表现出差异,成都平原区、盆地东部丘陵区、盆地中部浅丘区和盆地周边丘陵区4个区域基础地力对产量的贡献率分别为75.9%、67.4%、69.5%、68.7%,肥料对产量的贡献率分别为24.1%、32.6%、30.5%、31.3%。成都平原基础地力明显高于其他区域,其土壤基础地力对水稻产量贡献率也明显高于其他区域,而产量对肥料依赖性小于其他区域。

表3 四川盆地稻田基础地力产量及其贡献率  
Table 3 Inherent soil productivity and contribution rate of soil productivity and fertilizer to yield in Sichuan basin

| 区域<br>Region | 产量 (t·hm <sup>-2</sup> ) |                       |                          | 贡献率(%)                                     |                                     |
|--------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|
|              | 地力产量-CK<br>Yield-CK      | 施肥产量-NPK<br>Yield-NPK | 施肥增产量<br>Increased yield | 地力贡献率<br>Contribution of soil productivity | 肥料贡献率<br>Contribution of fertilizer |
| CP           | 6.4±1.1                  | 8.5±1.0               | 2.1                      | 75.9                                       | 24.1                                |
| EH           | 5.7±1.3                  | 8.5±1.4               | 2.8                      | 67.4                                       | 32.6                                |
| MH           | 5.7±1.2                  | 8.2±1.0               | 2.5                      | 69.5                                       | 30.5                                |
| PH           | 5.6±1.2                  | 8.2±1.3               | 2.6                      | 68.7                                       | 31.3                                |
| Mean         | 5.8±1.2                  | 8.3±1.1               | 2.5                      | 70.4                                       | 29.6                                |

2.3 四川盆地稻田土壤养分供应能力及肥料增产量

四川盆地氮肥、磷肥、钾肥增产量分别为1.9、1.0和0.8 t·hm<sup>-2</sup>，增产率为26.6%、14.4%和10.3%（表4）。四川盆地稻田土壤氮磷钾供应量分别为111、24.6 和167 kg·hm<sup>-2</sup>，土壤氮磷钾养分贡献率分别为78.2%，88.8%，90.8%，表明稻田土壤养分供应能力为氮<磷<钾（图3），肥料增产效果为氮肥>磷肥>钾肥。不同区域内土壤养分供应能力不同，如成都平原区土壤氮磷钾供应量均高于其他地区（表4），氮磷钾养分贡献率也均高于其他区域（图3）。

表4 四川盆地土壤养分供应能力及肥料增产率  
Table 4 Nutrient supply capacity of paddy soils and yield increment rate by fertilizer in Sichuan basin

| 区域<br>Region | 土壤养分供应能力 Nutrient supply capacity (kg·hm <sup>-2</sup> ) |           |        | 肥料增产率 Yield increment rate by fertilizer (%) |      |      |
|--------------|----------------------------------------------------------|-----------|--------|----------------------------------------------|------|------|
|              | 氮 N                                                      | 磷 P       | 钾 K    | 氮肥 N                                         | 磷肥 P | 钾肥 K |
| CP           | 120±25                                                   | 27.5±6.1  | 185±61 | 22.7                                         | 6.6  | 7.1  |
| EH           | 103±30                                                   | 27.5±14.2 | 139±60 | 30.0                                         | 15.7 | 13.8 |
| MH           | 111±27                                                   | 23.2±6.2  | 169±54 | 22.8                                         | 18.8 | 9.4  |
| PH           | 112±32                                                   | 23.9±5.5  | 175±59 | 30.9                                         | 16.5 | 10.9 |
| Mean         | 111±28                                                   | 24.6±8.4  | 167±58 | 26.6                                         | 14.4 | 10.3 |

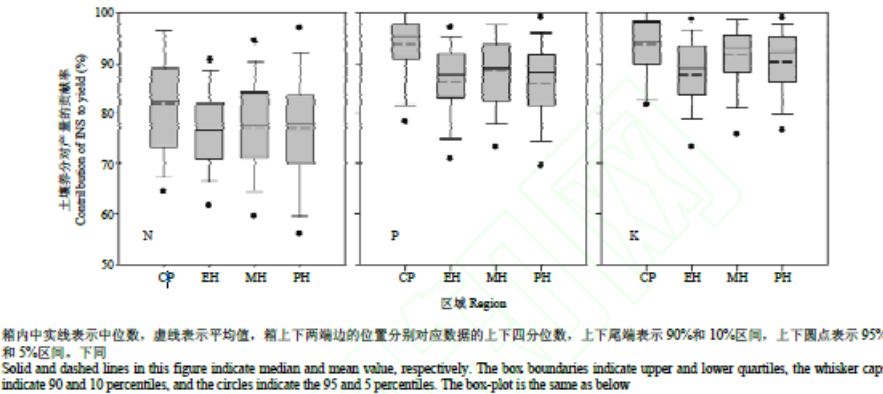


图3 土壤基础养分供应对水稻产量的贡献率  
Fig. 3 Contribution of inherent soil nutrient supply (INS) to grain yield (NPK treatment)

2.4 施肥效应和土壤基础地力对水稻产量和的影响

氮磷钾推荐施肥处理（NPK）水稻产量与基础地力产量（CK）呈极显著正相关（ $P<0.01$ ），表明随着土壤基础地力的提高，推荐施肥水稻产量也随之提高（图4-A）。但是，随着基础地力产量的升高，肥料的增产效应逐渐降低；当基础地力产量由 $<4$  t·hm<sup>-2</sup>上升到 $>7$  t·hm<sup>-2</sup>时，肥料增产效应从 $3.7$  t·hm<sup>-2</sup>下降至 $1.9$  t·hm<sup>-2</sup>（图4-B）。同时，土壤基础地力对产量的相对贡献率与基础地力呈显著正相关，而肥料相对贡献率与其呈显著负相关（图5）。说明随着基础地力的提升，土壤对产量的贡献

越来越大，肥料发挥的作用会越来越小。

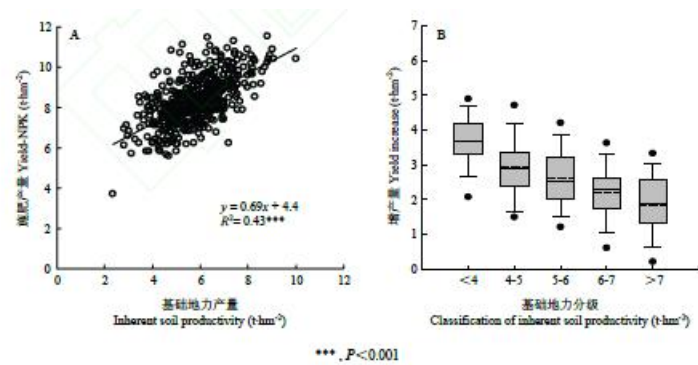


图4 土壤基础地力与优化施肥产量关系 (A) 以及不同等级基础地力下肥料的增产效应 (B)  
Fig. 4 The relationship between inherent soil productivity (yield-CK) and optimal yield(yield-NPK) (A), and between classification of ISP and increment of grain yield by fertilization (B)

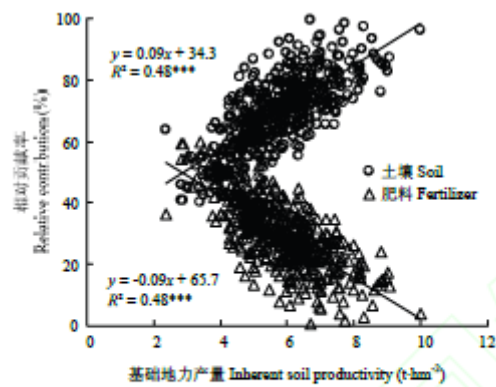


图5 土壤基础地力和 NPK 肥料对作物产量的相对贡献率  
Fig. 5 The relative contribution of inherent soil productivity and NPK fertilization to grain yield of rice grown

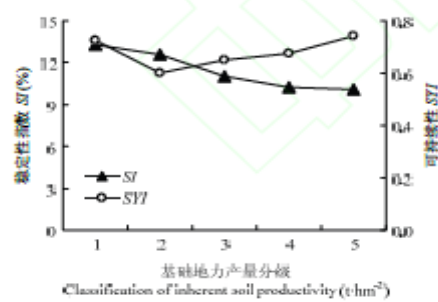


图6 稻田土壤基础地力对作物产量稳定性 (SI) 和可持续性 (SYI) 的影响  
Fig. 6 Effect of inherent soil productivity (yield-CK) on stability index (SI) and sustainable yield index (SYI) of rice yield (yield-NPK)

## 2.5 土壤基础地力提升对水稻产量稳定性和可持续性的影响

水稻产量的稳定性和可持续性随土壤基础地力变化而变化(图6),从低地力( $4\text{--}5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )到较高土壤地力( $>7\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),产量的可持续性指数从0.6 上升至0.74,而产量稳定性指数从12.6 下降至10.1。因此,基础地力较低的稻田不仅产量可持续性和稳定性较低,作物产量波动较大,易受气候和环境的影响;基础地力比较高的稻田会获得更高的产量,且稳定性和可持续性相对较好。所以提高土壤基础地力可同时促进作物高产稳产,实现产量的可持续性增长。

## 3 讨论

### 3.1 稻田土壤基础地力的变化

统计表明,目前四川盆地水稻单产为 $9.08\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,与本研究2005—2010 年试验产量相似,相比1980—2000 年单产提高了21.7%,土壤基础地力提高是四川盆地水稻产量提高的重要原因,四川盆地基础地力相比之前增加了 $1.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,占施肥时产量增加量的92.6%。目前,四川盆地基础地力对水稻产量贡献率最低67.4%,最高达到75.9%,在全国属于地力贡献率高值区,这可能与气候环境条件有关,但西南部分丘陵区,基础产量相对较低<sup>[8]</sup>,通过合理措施培肥土壤,改善土壤基础地力对于提高低产区粮食产量有重要作用。

土壤基础地力是农田土壤化学性质、物理性质以及生物特性的综合反映,基础地力的高低主要与土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾等土壤养分因子关系密切<sup>[15]</sup>。有机质在土壤中不仅可以周转养分,稳定土壤结构,还有益于根系环境的发展,提高土壤持水能力,增强土壤中氮、磷、钾、硫、锌等养分的供应能力<sup>[16–18]</sup>。包耀贤等<sup>[19]</sup>通过长期定位试验表明,有机质、速效养分、物理性黏粒、团聚度和团聚体稳定率是土壤肥力的主要影响因素。随土壤基础地力的逐渐提升,有机质胶结物质含量增加有利于形成水稳性大团聚体,同时土壤容重和土粒密度降低,改善了土壤的结构<sup>[20]</sup>。土壤微生物特性对土壤性质的变化十分敏感,在一定时间尺度上也可以总体反映土壤基础地力的演变<sup>[21–22]</sup>。

### 3.2 土壤基础地力、产量与施肥之间的关系

近5 年474 个试验表明,推荐施肥的水稻产量与稻田基础地力产量呈极显著相关(图4-A),表明稻田基础地力在提高水稻产量中占有重要地位,施肥可以显著增加产量。黄欠如等<sup>[23]</sup>研究也表明施肥产量与基础地力呈现极显著相关,这与本文研究结果相一致。同时也发现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。施用化肥仍是目前主要的水稻增产途径,本研究中推荐施肥水稻增产38.4%,氮肥、磷肥和钾肥分别增产26.6%、14.4%和10.3%,宇万太等<sup>[24]</sup>通过长期定位试验也发现氮、磷和钾肥均能明显提高作物产量,其增产率分别为32.1%、15%和10.9%,跟本文研究结果相似;王伟妮等<sup>[25]</sup>也发现湖北水稻平衡施肥可增产46.7%,所以肥料的施用在水稻产量的提高和维持上具有一定的作用。本研究中土壤氮磷钾养分贡献率分别为78.2%、88.8%、90.8%,氮、磷、钾养分存在正交互作用,施肥促进水稻对养分的协同吸收<sup>[26]</sup>,陈新红等<sup>[27]</sup>研究表明氮肥能促进水稻对土壤磷、钾的吸收,同时适当的养管理措施可以促进水稻各器官对氮、磷、钾的有效积累,促进水稻结实期各养分的运转比例,提高对籽粒的转运贡献率,从而提高产量<sup>[28]</sup>。

土壤对产量贡献率与基础地力呈显著正相关,而肥料相对贡献率与其呈显著负相关( $P<0.01$ )。鲁艳红等<sup>[15]</sup>利用长期定位试验也表明肥料对水稻产量贡献率随土壤基础地力的提高而极显著降低,即表示提高土壤基础地力可以降低水稻产量对肥料的依赖,从而可以适当降低肥料施用量。张祥明等<sup>[29]</sup>研究发现基础地力越高的稻田越容易获得高产,但施肥增产幅度越来越低。所以通过提高稻田基础地力,不仅可以挖掘农田生产潜力、增加水稻产量,还可将肥料用量控制在适宜范围,降低农业环境污染<sup>[30]</sup>。

### 3.3 提高土壤基础地力,保证粮食安全

Fan 等<sup>[2]</sup>研究发现2000年后中国主要作物单产相比20世纪80、90年代提高了0.73—1.76 t·hm<sup>-2</sup>，稻田基础地力提高16%—37%。作物产量的提高除选育品种，施肥技术，灌溉和病虫害控制外，土壤基础地力的提升至关重要<sup>[31]</sup>。土壤基础地力的提升其主要原因是土壤中有有机质含量的增加<sup>[2]</sup>。近20年中国耕地有机质的提升主要归功于秸秆还田、有机肥的推广使用、合成肥料应用以及免耕和减少耕作措施等<sup>[6]</sup>。长期秸秆还田可以提高有机质和全氮含量10%以上<sup>[32]</sup>。有机无机结合肥施用不仅可以提高有机质，增加产量，还可以提高微生物活性，提高氮效率，从而减少氮肥的使用，增加土壤的碳储量，提高基础地力<sup>[33]</sup>。近年来，四川盆地稻草还田技术得到了广泛的应用，因此四川盆地稻田土壤地力提升与实施的稻草还田技术密不可分。除了通过农艺管理措施改善土壤质量，提高土壤有机质外，还可以采用一些工程措施来持续提高土壤质量和生产力，如水利工程建设的加固利用以及农田排涝，平整土地，坡改梯，修复盐渍化土壤等，这些都改善了土壤理化性状，增强了土壤供给养分的能力，逐步提高基础地力<sup>[34]</sup>。

以更低的环境代价获得更高的产量是未来农业发展的主要趋势<sup>[35]</sup>，提升土壤基础地力不仅是稻田获得高产、减少肥料依赖的有效措施，更是所有可持续性农业在未来满足粮食需要的发展趋势。

## 4 结论

(1) 四川盆地稻田基础地力显著提升，2000年以来稻田基础地力产量(5.6—6.4 t·hm<sup>-2</sup>)比1980—2000年单产提高了1.5 t·hm<sup>-2</sup>(提高比例为32.4%)。土壤氮、磷、钾养分对产量的贡献率分别为78.2%、88.8%、90.8%，肥料增产效果为氮肥>磷肥>钾肥。四川盆地不同生态区基础地力和土壤养分供应能力大小均表现为成都平原>盆地中部浅丘区>盆地周边丘陵区>盆地东部丘陵区。

(2) 随着基础地力的提升，土壤对产量的贡献逐渐增大，肥料对产量的贡献则逐渐减小，即对肥料的依赖性越来越小；提高稻田基础地力可以减少肥料的施用，降低环境风险。

(3) 提高稻田土壤基础地力既能提高水稻产量，还能提高水稻产量的稳定性，实现稻田的可持续性生产。

## [References]

[1] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China. *Plant Production Science*, 2009, 12: 3-8.

[2] Fan M S, Lal R, Cao J, Qiao L, Su Y S, Jiang R F, Zhang F S. Plant-based assessment of inherent soil productivity and contributions to China's cere crop yield increase since 1980. *Plos One*, 2013, 09, 8(9): 1-11.

[3] Ma L, Feng S Y, Reidsma P, Qu F T, Heerink N. Identifying entry points to improve fertilizer use efficiency in Taihu basin, China. *Land Use Policy*, 2014, 37: 52-59.

[4] 王伟妮, 鲁剑巍, 陈防, 鲁明星, 李慧, 李小坤. 湖北省水稻施肥效果及肥料利用效率现状研究. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 289-295. Wang W N, Lu J W, Chen F, Lu M X, Li H, Li X K. Study on fertilization effect and fertilizer use efficiency of rice in Hubei province. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 289-295. (in Chinese)

[5] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915-924. Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, Cui Z L, Ma W Q, Chen X P, Jiang R F. Nutrient use efficiency

---

of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):915-924. (in Chinese)

[6] Huang Y, Sun W J. Changes in topsoil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(15): 1785-1803.

[7] 李忠芳, 张水清, 李慧, 张会民, 逢焕成, 姜翼来, 徐明岗. 长期施肥下中国水稻土基础地力变化趋势与分析. 植物营养与肥料学报, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3996.S.20150702.0923.001.html>. Li Z F, Zhang S Q, LI H, Zhang H M, Pang H C, Lou Y L, Xu M G. Trends of basic soil productivity in paddy soil under long-term fertilization in China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science*, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3996.S.20150702.0923.001.html>. (in Chinese)

[8] 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. 农业环境科学学报. 2009, 28(5): 1070-1078. Tang Y H, Huang Y. Spatial distribution characteristics of the percentage of soil fertility contribution and its associated basic crop yield in Mainland China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(5): 1070-1078. (in Chinese)

[9] 曾祥明, 韩宝吉, 徐芳森, 黄见良, 蔡红梅, 石磊. 不同基础地力土壤优化施肥对水稻产量和氮肥利用率的影响. 中国农业科学, 2012, 45(14): 2886-2894. Zeng X M, Han B J, Xu F S, Huang J L, Cai H M, Shi L. Effect of optimized fertilization on grain yield of rice and nitrogen use efficiency in paddy fields with different basic soil fertilities. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(14): 2886-2894. (in Chinese)

[10] 白由路. 植物营养与肥料研究的回顾与展望. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3477-3492. Bai Y L. Review on research in plant nutrition and fertilizers. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17): 3477-3492. (in Chinese)

[11] 孙园园, 孙永健, 秦俭, 杨致远, 陈林, 徐徽, 马均. 四川不同稻作生态区安全播种期变化及其空间分布. 中国农业气象, 2013, 34(1):58-63. Sun Y Y, Sun Y J, Qin J, Yang Z Y, Chen L, Xu H, Ma J. Temporal and spatial variation of safe sowing date in different rice cultivation zones in Sichuan. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(1): 58-63. (in Chinese)

[12] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2007. Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2007. (in Chinese)

[13] 王定勇, 石孝均, 毛知耘. 长期水旱轮作条件下紫色土养分供应能力的研究. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 120-126. Wang D Y, Shi X J, Mao Z Y. Study on nutrient supplying capacity of purple soil under long-term rice-wheat rotation. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(2): 120-126. (in Chinese)

[14] Pan G X, Smith P, Pan W N. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2009, 129: 344-348.

[15] 鲁艳红, 廖育林, 周兴, 聂军, 谢坚, 杨曾平. 长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础地力的影响. 土壤学报, 2015, 52(3):597-605. Lu Y H, Liao Y L, Zhou X, Nie J, Xie J, Yang Z P. Effect of long-term fertilization on rice yield and basic soil productivity in red paddy soil under double-rice system. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3):597-605. (in Chinese)

---

[16] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 黄宇. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系. 生态学报, 2005, 25(3): 513-518. Wang Q K, Wang S L, Feng Z W, Huang Y. Active soil organic matter and its relationship with soil quality. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 513-518. (in Chinese)

[17] Lal R. Food insecurity's dirty secret. Science, 2008, 322: 673-674.

[18] Johnston A E, Poulton P R, Coleman K. Soil organic matter: Its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes. Advances in Agronomy, 2009, 101: 1-57.

[19] 包耀贤, 黄庆海, 徐明岗, 于寒青. 长期不同施肥下红壤性水稻土综合肥力评价及其效应. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 74-81. Bao Y X, Huang Q H, Xu M G, Yu H Q. Assessment and effects of integrated soil fertility in red paddy soil under different long-term fertilization. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(1): 74-81. (in Chinese)

[20] 刘晓利, 何园球, 李成亮, 王艳玲. 不同利用方式和肥力红壤中水稳性团聚体分布及物理性质特征. 土壤学报, 2008, 45(3): 459-465. Liu X L, He Y Q, Li C L, Wang Y L. Distribution and physical properties of soil water-stable aggregates in red soil different in land use and soil fertility. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(3): 459-465. (in Chinese)

[21] Dilly O, Munch J C. Ratios between estimates of microbial biomass content and microbial activity in soils. Biology and Fertility of Soils, 1998, 27: 374-379.

[22] 李娟, 赵秉强, 李秀英. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响. 中国农业科学, 2008, 41(1): 144-152. Li J, Zhao B Q, Li X Y. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(1): 144-152. (in Chinese)

[23] 黄欠如, 胡锋, 李辉信, 赖涛, 袁颖红. 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): 926-933. Huang Q R, Hu F, Li H X, Lai T, Yuan Y H. Crop yield response to fertilization and its relations with climate and soil fertility in red paddy soil. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(6): 926-933. (in Chinese)

[24] 宇万太, 姜子绍, 周桦, 马强, 沈善敏. 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 Y, Ma Q, Shen S M. Crop yield and fertilizer contribution under different fertilization systems. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(6): 54-58. (in Chinese)

[25] 王伟妮, 鲁剑巍, 李银水, 邹娟, 苏伟, 李小坤, 李云春. 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, Zou J, Su W, Li X K, Li Y C. Study on fertilization effect and fertilizer contribution rate of different crops at present production conditions. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(19): 3997-4007. (in Chinese)

[26] 田秀英, 石孝均. 不同施肥对稻麦养分吸收利用的影响. 重庆师范学院学报: 自然科学版, 2003, 20(2): 44-47. Tian X Y, Shi X J. The effects of different fertilizers on the absorption and utilization of rice and wheat. Journal of Chongqing Normal University: Natural Science Edition, 2003, 20(2): 44-47. (in Chinese)

- 
- [27] 陈新红, 徐国伟, 王志琴. 结实期水分与氮素对水稻氮素利用与养分吸收的影响. 干旱地区农业研究, 2004, 22(2): 35-41. Chen X H, Xu G W, Wang Z Q. Effects of water and nitrogen on nitrogen utilization and nutrient uptake of rice at late stage. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(2): 35-41. (in Chinese)
- [28] 孙永健, 孙园园, 李旭毅. 水氮互作对水稻氮磷钾吸收、转运及分配的影响. 作物学报, 2010, 36(4): 655-664. Sun Y J, Sun Y Y, Li X Y. Effects of water-nitrogen interaction on absorption, translocation and distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(4): 655-664. (in Chinese)
- [29] 张祥明, 郭熙盛, 武际, 王允青, 李霞红, 陈景道. 江淮地区稻田基础土壤肥力与水稻合理施用技术研究. 中国农学通报, 2009, 25(15): 131-135. Zhang X M, Guo X S, Wu J, Wang Y Q, Li X H, Chen J D. Research on basic soil fertility and reasonable fertilization technology in paddy fields in the Jianghuai Region. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(15): 131-135. (in Chinese)
- [30] 张军, 张洪程, 段祥茂, 徐宗进, 杨波, 郭保卫, 杜斌, 戴其根, 许轲, 霍中洋, 魏海燕. 地力与施氮量对超级稻产量、品质及氮素利用率的影响. 作物学报, 2011, 37(11): 2020-2029. Zhang J, Zhang H C, Duan X M, Xu Z J, Yang B, Guo B W, Du B, Dai Q G, Xu K, Huo Z Y, Wei H Y. Effects of soil fertility and nitrogen application rates on super rice yield, quality, and nitrogen use efficiency. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(11): 2020-2029. (in Chinese)
- [31] Tilman D, Cassman K G, Matson P A, Naylor R, Polasky S. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 2002, 418: 671-678.
- [32] Wang J Z, Wang X J, Xu M G, Feng G, Zhang W J, Lu C A. Crop yield and soil organic matter after long-term straw return to soil in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015(102): 371-381.
- [33] Pan G X, Zhou P, Li Z P, Pete Smith, Li L Q, Qiu D S, Zhang X H, Xu X B, Shen S Y, Chen X M. Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 131(3/4): 274-280.
- [34] 曾希柏, 张佳宝, 魏朝富, 宇万太, 黄道友, 徐明岗, 徐建明. 中国低产田状况及改良策略. 土壤学报, 2014, 51(4): 675-682. Zeng X B, Zhang J B, Wei C F, Yu W T, Huang D Y, Xu M G, Xu J M. The status and reclamation strategy of low-yield fields in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(4): 675-682. (in Chinese)
- [35] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, Peter Vitousek, Zhao M, Ma W Q, Wang Z L, Zhang W J, Yan X Y, Yang J C, Deng X P, Gao Q, Zhang Q, Guo S W, Ren J, Li S Q, Ye Y L, Wang Z H, Huang J L, Tang Q Y, Sun Y X, Peng X L, Zhang J W, He M R, Zhu Y J, Xue J Q, Wang G L, Wu L, An N, Wu L Q, M L, Zhang W F, Zhang F S. Producing more grain with lower environmental costs. *Nature*, 2014, 514(7523): 486-489.

(责任编辑 杨鑫浩)