

## 基于 Meta 分析中国水稻产量对施肥的响应特征

韩天富<sup>1</sup>, 马常宝<sup>2</sup>, 黄晶<sup>1,3</sup>, 柳开楼<sup>1,4</sup>, 薛彦东<sup>2</sup>, 李冬初<sup>1,3</sup>, 刘立生<sup>1,3</sup>,  
张璐<sup>1,3</sup>, 刘淑军<sup>1,3</sup>, 张会民<sup>1,3</sup>

(<sup>1</sup> 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; <sup>2</sup> 农业农村部耕地质量监测保护中心, 北京 100125;

<sup>3</sup> 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, 湖南祁阳 426182; <sup>4</sup> 江西省红壤研究所/国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 330046)

**摘要:**【目的】定量分析近 30 年施肥对中国水稻产量的综合效应和影响机制, 为水稻种植区域肥料的科学施用提供依据。【方法】以全国水稻土长期监测点为平台, 将相应的监测数据按照种植区域、试验时间、种植制度、作物类型、施肥类型、土壤质地、土壤 pH、土壤有机质含量、土壤全氮含量、土壤有效磷含量、土壤速效钾含量、土壤缓效钾含量进行分组, 以不施肥处理作为对照, 利用 Meta-analysis 方法探究施肥对水稻产量的综合效应及其影响因素。【结果】近 10 年 (2008—2017) 以来, 无论施肥与否, 水稻产量均显著高于 1988—1997 和 1998—2007 年对应的水稻产量。与不施肥相比, 施肥显著提高水稻产量, 其提高幅度平均为 80.8%。在西南地区施肥对水稻产量的提高幅度最高 (98.5%), 显著高于华北地区 (70.3%)。不同试验时间下, 施肥比不施肥处理在 1988—1997 年对水稻产量提高的幅度 (99.1%) 高于 1998—2007 年 (84.2%) 和 2008—2017 年 (78.1%)。不同种植制度下, 施肥较不施肥处理能显著提高一年三熟水稻产量 (92.0%), 且提高幅度均高于一年一熟 (76.2%) 和一年两熟 (81.9%)。与不施肥相比, 双季稻施肥对水稻产量的提高幅度 (85.9%) 高于单季稻区 (75.9%) 和水稻-其他作物 (79.5%)。与不施肥相比, 有机肥与无机肥配合施用对水稻产量提高幅度 (88.3%) 高于化肥单施处理 (76.6%)。施肥较不施肥处理能显著提高黏质土壤水稻产量 (92.0%), 提高幅度显著高于砂质土壤 (58.0%) 和壤质土壤 (77.5%)。随着土壤有机质和有效磷含量的增加, 施肥较不施肥处理水稻产量提高的幅度呈降低趋势。在较高的土壤 pH (>7.5)、较低土壤全氮 (<1.5 g·kg<sup>-1</sup>) 和缓效钾 (<150 mg·kg<sup>-1</sup>) 情况下, 施肥较不施肥处理水稻产量提高的幅度较高。随机森林分析结果表明: 施肥对水稻产量提高幅度主要受水稻种植区域、土壤全氮和种植制度的影响。此外, 肥料的农学效率与施肥对水稻产量增产幅度呈极显著正相关。【结论】虽然当前施肥对水稻产量增加的趋势在降低, 但是适量的肥料投入 (尤其是西南地区) 是提高和维持水稻高产的重要措施, 尤其是有机肥与无机肥配合施用增产效果更加显著。同时, 在种植制度的基础上, 各水稻种植区域应结合土壤质地、土壤氮素和钾素等方面作为肥料投入的主要依据。

**关键词:** 施肥; 水稻产量; Meta-analysis; 响应比; 农学效率

## Variation in Rice Yield Response to Fertilization in China: Meta-analysis

HAN TianFu<sup>1</sup>, MA ChangBao<sup>2</sup>, HUANG Jing<sup>1,3</sup>, LIU KaiLou<sup>1,4</sup>, XUE YanDong<sup>2</sup>, LI DongChu<sup>1,3</sup>,  
LIU LiSheng<sup>1,3</sup>, ZHANG Lu<sup>1,3</sup>, LIU ShuJun<sup>1,3</sup>, ZHANG HuiMin<sup>1,3</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081; <sup>2</sup> Center of Arable Land Quality Monitoring and Protection, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125; <sup>3</sup> Red Soil Experimental Station of CAAS in Hengyang/National Observation and Research Station of Farmland Ecosystem in Qiyang, Qiyang 426182, Hunan; <sup>4</sup> Jiangxi Institute of Red Soil/National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330046)

收稿日期: 2018-12-04; 接受日期: 2019-01-18

基金项目: 国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”重点专项 (2016YFD0300901)、国家自然科学基金 (41671301, 41371293)

联系方式: 韩天富, E-mail: hantianfu123@126.com. 通信作者张会民, E-mail: zhanghuimin@caas.cn

**Abstract:** 【Objective】 A meta study was conducted to investigate the comprehensive effect of fertilization on rice yield in Chinese paddy soils during the past 30 years, and to provide a theoretical basis for the scientific correct application of fertilizers in rice cultivation areas. 【Method】 Based on the long-term paddy soil monitoring sites from Ministry of Agriculture and Rural Affairs, we conducted meta-analysis to investigate the rice yield response to no fertilization versus fertilization in different agro-climatic regions. 【Result】 Rice yield in the past 10 years (2008-2017) was significantly higher than the corresponding rice yield in 1988-1997 and 1998-2007, regardless of fertilization. The increase of rice yield with fertilization in southwest of China was by 98.5%, which was significantly higher than that of in north of China (70.3%). Fertilization increased rice yield by 99.1%, 84.2% and 78.1% during 1988-1997, 1998-2007 and 2008-2017, respectively. For the cropping system, the increase of rice yield under triple cropping system (92.0%) was significantly higher than that under single cropping system (76.2%) and double cropping system (81.9%). Fertilization increased rice yield by 85.9% under double rice cropping system, by 75.9% under single cropping system, and by 79.5% under other cropping system. Compared with no fertilizer, chemical plus organic fertilizer application increased rice yield by 88.3%, which was higher than that of single chemical fertilizer application (76.6%). Fertilization significantly increased rice yield in clay soil by 92.0%, compared with no fertilization, which significantly higher than that in sandy soil (58.0%) and loam soil (77.5%). With the increase of soil organic matter and available phosphorus, the increasing trend of fertilization on rice yield was decreased compared with no fertilization. Under higher soil pH ( $>7.5$ ) and lower soil total nitrogen ( $<1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) and slow available potassium ( $<150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), the rice yield increasing was more than that of corresponding the rest of level. Random forest analysis showed that the region, soil total nitrogen and cropping system had greater impact on the response ratio (*RR*) of rice yield. In addition, the agronomic efficiency of fertilizer was positively correlated with rice yield *RR*. 【Conclusion】 Although the trend of increasing rice yield by fertilization was decreasing at present, but combined appropriate chemical plus organic fertilizer, especially in southwest of China, were important measures to improve and maintain high rice yield. Base on the cropping system, combining soil texture, soil nitrogen and potassium content should be the main basis for fertilizer input in different rice cultivation areas.

**Key words:** fertilization; rice yield; Meta-analysis; response ratio; agronomic efficiency

## 0 引言

【研究意义】全球超过 60%的人口以水稻 (*Oryza sativa* L.) 为主食<sup>[1]</sup>, 预计到 2035 年大米需求量将从 2010 年的 6.76 亿吨增加到 8.52 亿吨<sup>[2]</sup>。中国的水稻种植面积和单位产量均位居世界各国之首, 对世界的粮食安全做出了重要贡献<sup>[3]</sup>。肥料的投入是保证作物高产稳产的重要手段之一<sup>[4]</sup>, 不合理的肥料投入不仅抑制作物正常的生长发育<sup>[5]</sup>, 同时还可能造成土壤板结、土壤酸化、肥料利用率下降、土壤酶活性降低等一系列负面效应, 最终影响作物产量的提高<sup>[6]</sup>。因此, 研究施肥对水稻产量的影响及其关键作用因子对于水稻高产稳产、土壤培肥等具有重要意义。【前人研究进展】尽管国内外在稻田培肥方面进行了大量的研究, 但大部分主要集中在施肥对水稻产量或肥料利用率等方面的影响<sup>[7-9]</sup>。比如, 苑俊丽等<sup>[10]</sup>运用整合分析方法研究了高效氮肥较常规化肥施用对中国水稻产量和氮素吸收量的影响, 很少从不同种植区域、管理措施、土壤理化性质等方面探讨水稻产量对施肥响应的差异特征及影响因素。首先, 土壤基础肥力水平是决定作物能否高效利用肥料的关键因子<sup>[11]</sup>。其次, 在品种和其他管理措施相对稳定的情况下, 施肥处理的产量高

低主要决定于施肥处理本身与环境互作效应<sup>[12]</sup>。然而, 由于我国水稻种植区域辽阔, 土壤肥力差异较大, 导致水稻产量对施肥的响应特征各不相同<sup>[13-14]</sup>。方畅宇等<sup>[15]</sup>研究表明, 基础地力较低的土壤上优先施用化肥, 辅助施用有机肥; 肥力较高的土壤上轻施化肥, 多施有机肥以达到水稻高产稳产的目的。因此, 探明不同稻田土壤肥力水平下长期施肥对水稻产量的影响, 进而为各水稻种植区域不同水稻种植制度下合理施肥提供依据显得尤为重要。【本研究切入点】首先, 独立田间试验研究难以准确回答较大区域上施肥对产量的影响, 且在全国尺度上探究施肥对水稻产量的影响及其关键因素的研究到目前为止还鲜见报道。农业农村部在 1988—2017 年期间先后设置了一批田间施肥试验 (常规施肥和不施肥处理), 涵盖了中国水稻主要的种植区域, 主要记录水稻产量、土壤肥力、管理措施等数据, 结合 Meta 分析方法——对同一主题下多个研究结果进行综合定量分析的方法<sup>[16]</sup>, 可从全国尺度回答近 30 年不同水稻种植区域、管理措施、土壤理化性质等条件下施肥对水稻产量的影响。其次, 基于随机森林算法——一种高效的组合分类方法, 根据变量重要性程度进而提取特征变量<sup>[17]</sup>, 进而探究施肥对水稻产量影响的关键因素。【拟解决的关键问题】

本研究运用 Meta 分析方法,以农业农村部设置的不施肥处理为对照,从全国尺度上分析近 30 年水稻主产区的水稻产量对施肥的响应特征及其关键的影响因素,旨在为肥料的合理施用并实现水稻的高产稳产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本研究所用的数据均来源于 1988—2017 年“农业农村部耕地土壤质量监测”工作开展期间所收集的水稻田间试验数据。水稻土监测点的布局主要分为以下几个部分:东北地区(黑龙江、吉林和辽宁)、华北地区(河南、山东和陕西)、西南地区(云南、四川、重庆和贵州)、长江中游(湖北、湖南和江西)、长江下游(安徽、江苏、上海和浙江)、华南地区(福建、广东、广西和海南)。监测地块的地理位置、耕作制度、土壤类型、作物类型、分布面积、管理水平等在各区域均有较好的代表性。各监测点试验设置不施肥区(空白区)和常规施肥区(农民习惯施肥管理)两个处理,进而探究与不施肥相比,常规施肥处理对水稻产量差异的影响。不施肥处理中,小区面积为 32—67 m<sup>2</sup>,用水泥板或者其他材料做挡板,防止水肥横向的转移;施肥处理按照当地农田常年肥料用量均匀撒施,小区面积不低于 334 m<sup>2</sup>,鉴于小区面积较大能够基本反映施肥和不施肥的差异,再加上经费等方面的限制,因此,所有处理均为 1 次重复。不施肥处理和施肥处理除了施肥用量不一致以外,其他措施均相同。监测内容主要包括:作物产量、施肥用量和土壤理化性状等。作物产量包括每一季作物的实际产量,采用去边行后实打、实收的方法测定;施肥情况主要包括每一季作物有机肥和化肥的施用日期、肥料品种、施肥次数和施肥用量等,秸秆还田按照实际用量以有机肥形式记录;土壤理化性状主要包括土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾和缓效钾、pH、质地等,在每年最后一季作物收获以后,按照“随机”“等量”“多点混合”的原则,立即采集耕层土壤样品进行上述指标的测定,按照《土壤分析技术规范》<sup>[18]</sup>进行样品的测定。但是由于部分点位管理不是特别完善,导致某些年份水稻产量数据出现缺失,为了弥补某些年份产量数据的缺失和各位点试验设置缺少重复,且综合考虑监测时间的跨度后将所有数据分为:1988—1997、1998—2007 和 2008—2017 年 3 个时间段,将各时间段内的产量数据作为

重复进行下一步的数据分析。通过对所有数据的筛选计算,最终得到 462 组数据。

### 1.2 研究方法

本研究中的数据均来自农业农村部设置的定位监测数据。统计学指标采用权重响应比(response ratios,  $RR$ )表示,并计算其 95% 的置信区间(95%  $CI$ )。其计算公式为:

$$RR = (\bar{x}_t / \bar{x}_c) \quad (1)$$

式(1)中,  $\bar{x}_t$  为施肥处理水稻的平均产量(t·hm<sup>-2</sup>);  $\bar{x}_c$  为不施任何肥料处理的水稻平均产量(t·hm<sup>-2</sup>),本研究的平均产量为某一时间段内(1988—1997、1998—2007、2008—2017 年 3 个时间段)多年平均产量。

整合分析通过对每个独立研究的响应比进行加权,得出加权平均响应(weighted response ratio,  $RR_{++}$ )。另外,平均值变异系数(variance,  $V$ )、权重系数(weighted factor,  $W_{ij}$ )、 $RR_{++}$ 、 $RR_{++}$ 的标准差( $S$ )和 95% 的置信区间( $CI$ )通过公式(2)—(6)计算获得<sup>[19-20]</sup>。

$$V = \frac{SD_t^2}{n_t \bar{x}_t^2} + \frac{SD_c^2}{n_c \bar{x}_c^2} \quad (2)$$

$$W_{ij} = \frac{1}{V} \quad (3)$$

$$RR_{++} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij} RR_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij}} \quad (4)$$

$$S(RR_{++}) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} W_{ij}}} \quad (5)$$

$$95\%CI = RR_{++} \pm 1.96S(RR_{++}) \quad (6)$$

式(2)中,  $SD_t^2$  和  $SD_c^2$  分别代表施肥处理组和无肥处理组的标准差,本研究的  $SD$  是通过某一时间段内的多年平均产量计算而来,若某一时间段内只有一个产量数据,则通过产量平均数的 1/10 作为相应处理的  $SD$ <sup>[21]</sup>;  $n_t$  和  $n_c$  分别代表施肥处理组和无肥处理组样本数,本研究的样本数是指某一时间段内有产量数据的个数。式(4)中  $m$  是分组数(例如,不同的种植区域或土地利用类型等),  $k_i$  是第  $i$  分组的总比较对数。95%  $CI$  通过  $(e^{RR_{++}} - 1) \times 100\%$  来转化,若 95%  $CI$  全部大于 0,说明施肥对水稻产量具有显著的正效应;若全部小于 0,说明施肥对水稻产量具有显著的负效应;若包含 0,则说明施肥对水稻产量无显著影响<sup>[22]</sup>。

1.3 数据分析

首先，通过卡方检验（Chi-square test）明确试验处理之间及各试验结果是否存在异质性（处理间或不同研究结果间的变异是否由随机误差引起）。若纳入的各研究结果无异质性（ $P>0.05$ ），采用固定效应模

型进行分析（fixed effect model, FEM），相反，则采用随机效应模型（random effect model, REM）<sup>[23]</sup>。表 1 为本研究数据的异质性检验结果，故采用 REM 进行数据分析。其次，采用 Meta Win 2.1 软件进行分析合并计数资料的响应比得出加权平均响应。

表 1 样本量描述性统计  
Table 1 Descriptive statistics for sample size

| 样本量<br>Number | 均值<br>Mean (t·hm <sup>-2</sup> ) | 标准差<br>SD | 极小值<br>Min (t·hm <sup>-2</sup> ) | 极大值<br>Max (t·hm <sup>-2</sup> ) | 偏度<br>Skewness | 峰度<br>Kurtosis | Q     | P <sub>Q</sub> |
|---------------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------|-------|----------------|
| 924           | 7.6                              | 3.1       | 0.9                              | 17.3                             | 0.61           | 0.104          | 2.029 | 0.001          |

Q 为异质性检验的统计量；P<sub>Q</sub> 为 Q 统计量显著性  
Q is the statistic of heterogeneity; P<sub>Q</sub> is the significant value of Q

本研究综合考虑了水稻种植区域（东北地区、华北地区、西南地区、长江中游、长江下游、华南地区）、试验时间（1988—1997、1998—2007、2008—2017 年）、种植制度（一年一熟、一年两熟、一年三熟）、作物类型（单季稻、双季稻、水稻-其他作物）、施肥类型（化肥单施、化肥+有机肥）、土壤质地（黏土、壤土、砂土）、土壤 pH（<6.5、6.5—7.5、>7.5）、土壤有机质含量（<20、20—30、>30 g·kg<sup>-1</sup>）、土壤全氮含量（<1.5、1.5—2、>2 g·kg<sup>-1</sup>）、土壤有效磷含量（<10、10—20、>20 mg·kg<sup>-1</sup>）、土壤速效钾含量（<50、50—100、>100 mg·kg<sup>-1</sup>）、土壤缓效钾含量（<150、150—300、>300 mg·kg<sup>-1</sup>）对水稻产量响应施肥的影响，其中，种植区域、种植制度、作物类型、施肥类型没有时间上的差异，而土壤理化性质是指 3 个时间阶段相对应的初始年份土壤理化性质，根据已发表的文献<sup>[24]</sup>和全国第二次土壤普查得到的土壤养分含量分级标准，并结合本研究数据整体分布范围进行相应的等级划分。采用单因素方差分析和最小显著性差（LSD）评价不同区域、土地利用类型和土壤理化性质下水稻产量数据异质性和差异性<sup>[25]</sup>。

肥料农学效率<sup>[26]</sup>的计算公式如下：

肥料农学效率=（施肥处理水稻产量-不施肥处理水稻产量）/肥料总施用量

(7)

数据处理和部分图形制作采用 Excel 2003；利用 R 语言（3.4.4）进行数据的随机森林重要性分析；采用 SPSS 软件 11.0（SPSS Inc., Chicago, IL, USA）进行数据统计分析和显著性检验；利用 Sigmaplot 10.0 软件进行图形的制作。

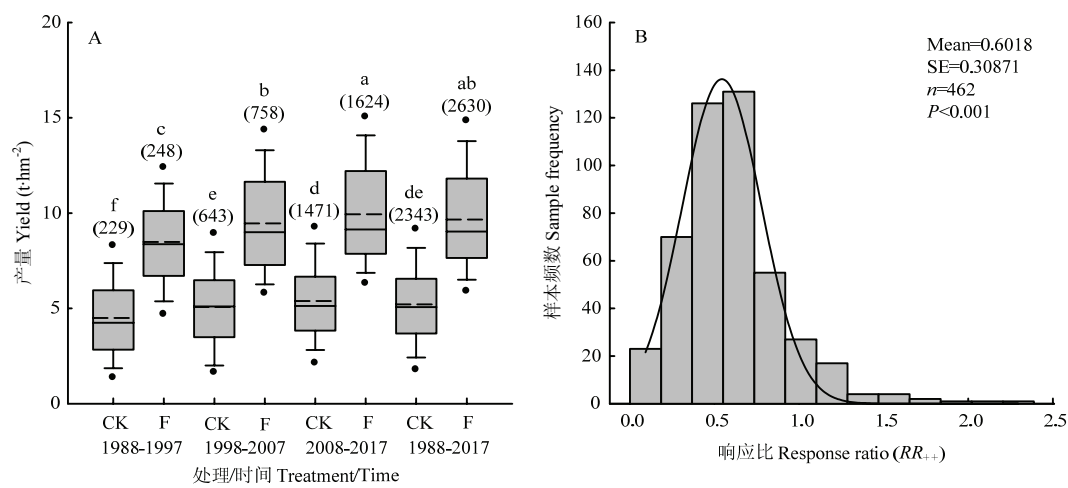
2 结果

2.1 不同施肥处理下水稻产量的差异及其响应比的分布

近 30 年以来，施肥处理较不施肥处理能显著增加水稻产量（图 1-A），两者的平均产量分别为 9.7 和 5.2 t·hm<sup>-2</sup>。近 10 年（2008—2017）以来，无论施肥与否，水稻产量（9.9、5.4 t·hm<sup>-2</sup>）均显著高于 1988—1997 和 1998—2007 年对应的水稻产量（8.5、4.5 t·hm<sup>-2</sup> 和 9.5、5.1 t·hm<sup>-2</sup>）。利用 Meta 软件分析了 462 组水稻产量对施肥的响应比（本研究水稻的响应比是指施肥对产量增加的幅度），且分布检验表明全部响应比符合正态分布（ $P<0.001$ ），平均值为 0.60±0.31（图 1-B），因此不用进行数据转化而直接进行因素分析。

2.2 水稻产量对施肥的响应及因素分析

Meta 分析结果表明，与不施肥相比，施肥能显著提高水稻产量，其提高幅度为 80.8%（置信区间为 76.4%—83.4%）（图 2）。不同种植区域下，施肥较不施肥处理对水稻产量的提高幅度各不相同，各区域增加幅度分别为：西南区为 98.5%（置信区间为 85.7%—112.1%）、华南区为 80.0%（置信区间为 69.6%—90.9%）、长江下游为 78.1%（置信区间为 69.4%—87.3%）、东北区为 78.0%（置信区间为 59.1%—99.1%）、长江中游为 77.8%（置信区间为 70.6%—85.3%）、华北区为 70.3%（置信区间为 45.0%—100.1%）。不同试验时间下，施肥较不施肥处理对水稻产量的提高幅度具体表现为：1988—1997 年为 99.1%（置信区间为 79.4%—121.0%）、1998—2007 年为 84.2%（置信区间为 75.4%—93.6%）和 2008—2017 年为 78.1%（置信区间为 72.9%—83.5%）。不同

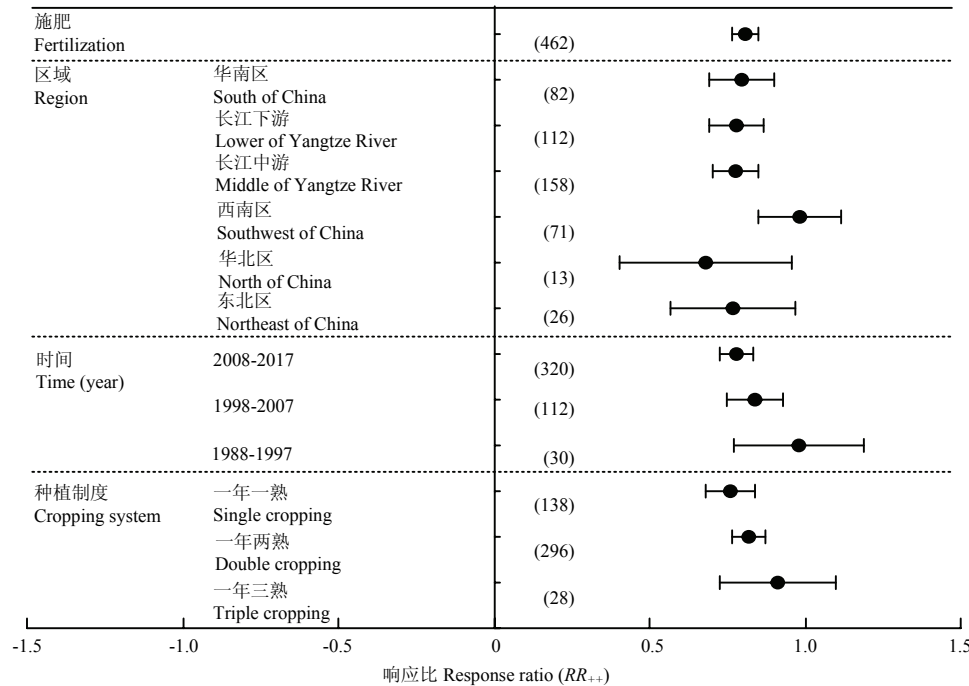


CK: 无肥处理, F: 常规施肥处理。不同的小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ) ; 箱形框中间的实线代表中位数, 虚线代表平均值。箱形框上下边缘分别代表全部数据的 75%和 25%。箱形框上下两条线的边缘分别代表全部数据的 95%和 5%, 上下两个实心点为异常值。括号里的数字表示该处理有水稻产量数据的个数

CK means no fertilizer treatment, F means conventional fertilizer treatment. Different lowercases indicate significantly different ( $P<0.05$ ); The solid line in the box represents the median value, and dash line represents the average value. The upper and lower of the box represent 75% and 25% of total data, respectively. The upper and lower of the lines represent 95% and 5% of total data, respectively. The upper and lower of the solid points represent the vertical outliers. The values in parentheses represent the number of rice yield data of each treatment

图 1 不同施肥处理水稻的产量

Fig. 1 The yield of rice under different treatments



点和误差线分别代表响应比及其 95%的置信区间, 如果误差线没有跨越零线表示处理与对照存在显著差异; 括号内的数值代表样本数。下同

Dots with error bars denote the overall mean response ratio and 95% CI, respectively. The 95% CI that do not go across the zero line mean significant difference between treatment and control. The values in parentheses represent independent sample size. The same as below

图 2 不同区域、时间和种植制度下水稻产量对施肥的权重响应比

Fig. 2 Response ratio (RR<sub>++</sub>) of rice yield in response to fertilization practices in different regions, times, and cropping systems

种植制度下，施肥较不施肥能显著提高一年三熟水稻产量（92.0%，置信区间为 74.2%—111.7%），且提高幅度高于一年一熟（76.2%，置信区间为 68.5%—84.2%）和一年两熟（81.9%，置信区间为 76.5%—87.4%）。

由图 3 可知，施肥对水稻产量的提高与作物类型、施肥措施和土壤质地密切相关。与不施肥相比，施肥在双季稻对水稻产量的提高幅度（85.9%，置信区间为 78.5%—93.5%）高于单季稻区（75.9%，置信区间为 67.9%—84.2%）和水稻—其他作物（79.5%，置信区间为 71.9%—87.5%）与不施肥相比，化肥与有机肥配施对水稻产量提高的幅度（88.3%，置信区间为 81.1%—95.8%）略高于化肥单施（76.6%，置信区间为 71.6%—81.7%）。不同土壤质地条件下，施肥较不施肥处理在黏土上对水稻产量的提高幅度（96.6%，置信区间为 86.1%—107.7%）显著高于砂土（57.9%，置信区间为 25.8%—98.5%），但是与在壤土上的增幅（77.5%，置信区间为 72.7%—82.4%）相比无显著差异。

施肥对产量的提高程度与土壤的理化性质也密切相关（图 4 和 5）。就土壤 pH 而言，在偏中性（pH 为 6.5—7.5）的土壤上，施肥较不施肥处理对水稻产

量的提高幅度为 77.2%（置信区间为 67.7%—88.4%），在  $\text{pH}>7.5$  和  $\text{pH}<6.5$  的土壤上提高幅度较高，分别为 87.1%（置信区间为 72.3%—103.0%）和 80.7%（置信区间为 75.8%—85.8%）。随着土壤有机质（SOM）含量的增加，施肥较不施肥处理对水稻产量提高的幅度呈降低趋势，具体为： $\text{SOM}<20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时提高的幅度为 83.1%（置信区间为 70.8%—96.3%）、 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}<\text{SOM}<30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时提高的幅度为 81.6%（置信区间为 74.4%—89.1%）、 $\text{SOM}>30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时提高的幅度为 79.7%（置信区间为 73.7%—85.8%）。就土壤有效磷（AP）含量而言，在 AP 较低（ $<10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）情况下，施肥较不施肥处理对水稻产量提高幅度（87.4%，置信区间为 79.7%—95.4%）显著高于 AP 较高（ $>20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）情况下的提高幅度（74.1%，置信区间为 67.1%—81.5%）。随着土壤全氮含量（STN）的增加，施肥较不施肥处理对水稻产量提高的幅度呈先降低后增加趋势，具体表现为：当  $\text{STN}<1.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时提高的幅度为 86.8%（置信区间为 78.4%—95.5%）、 $1.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}<\text{STN}<2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时提高的幅度为 76.2%（置信区间为 69.4%—83.3%）、 $\text{STN}>2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时提高的幅度为 81.2%（置信区间为 73.4%—89.4%）。施肥对水稻产量提高的幅度随土壤速效钾含量的增加呈先升高后降低趋势。就土

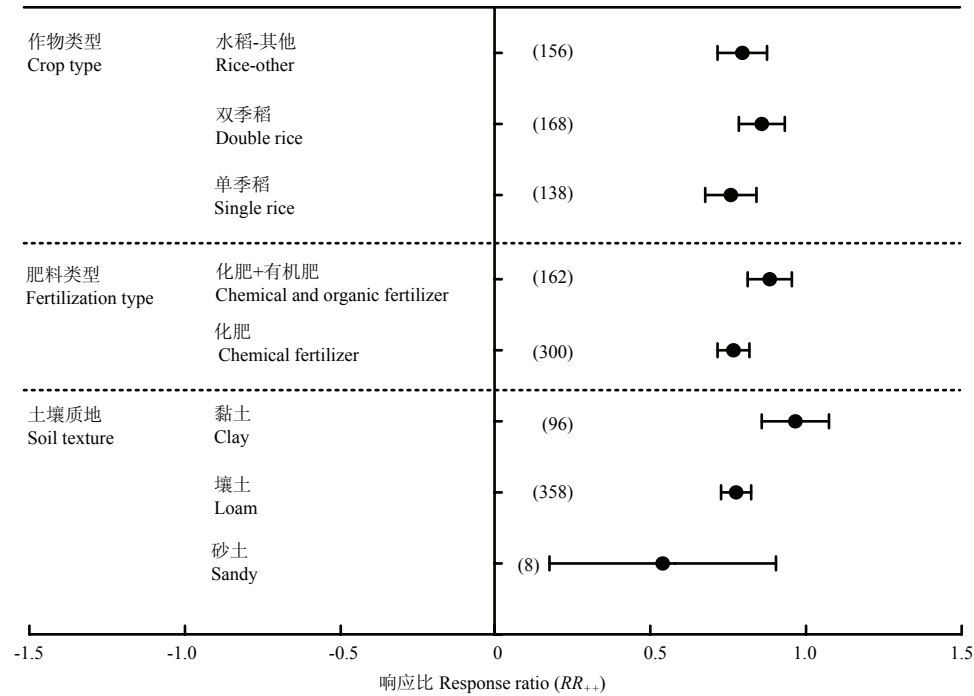


图 3 不同作物、肥料类型和土壤质地下水稻产量对施肥的权重响应比

Fig. 3 Response ratio ( $RR_{++}$ ) of rice yield in response to fertilization practices in different crops, fertilizers, and soil textures

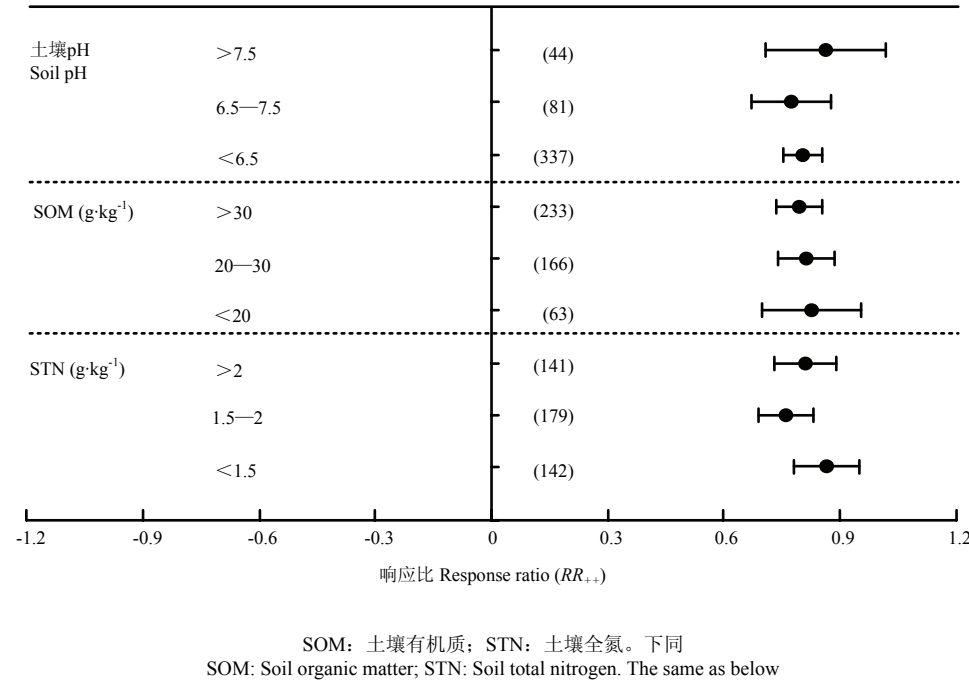


图 4 不同土壤 pH、有机质、全氮水平下水稻产量对施肥的权重响应比

Fig. 4 Response ratio ( $RR_{++}$ ) of rice yield in response to fertilization practices in different the soil pH, organic matter, and total nitrogen levels

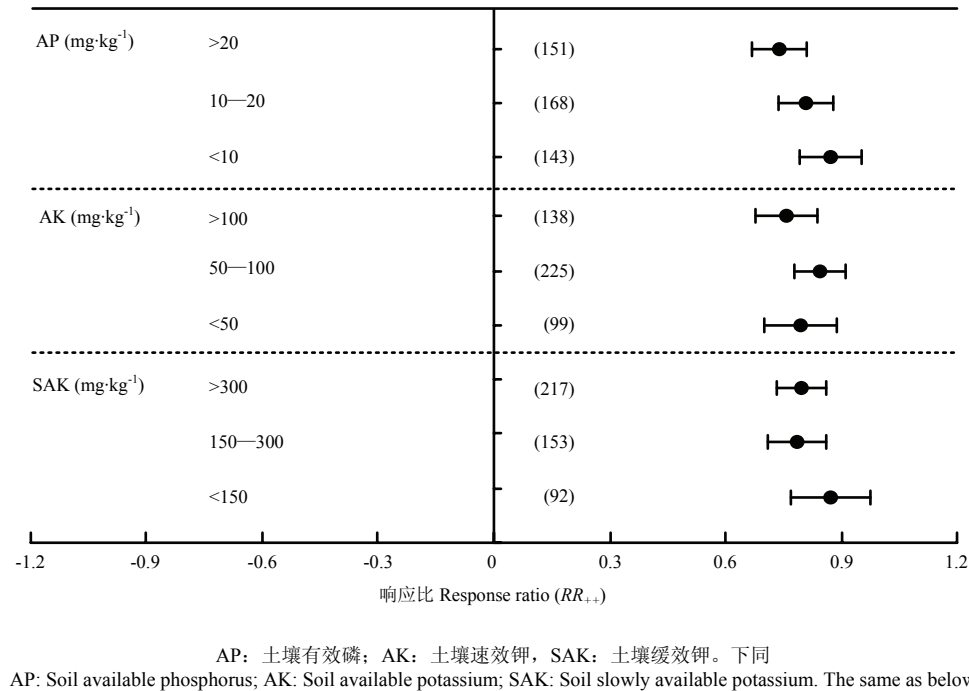


图 5 不同土壤有效磷、速效钾、缓效钾水平下水稻产量对施肥的权重响应比

Fig. 5 Response ratio ( $RR_{++}$ ) of rice yield in response to fertilization practices in different the soil available phosphorus, available potassium and slowly available potassium levels



壤缓效钾 (SAK) 含量而言, 在  $\text{SAK} < 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  情况下, 施肥较不施肥处理对水稻产量提高幅度 (87.5%, 置信区间为 77.5%—98.1%) 高于  $\text{SAK} \geq 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (79.0%, 置信区间为 71.1%—86.1%) 水平下的提高幅度。

### 2.3 不同因素对水稻产量响应比的重要性

利用随机森林对水稻产量的影响因素进行重要性分析, 结果如图 6 所示。Mean decrease accuracy 是指预测误差准确性降低的程度, 该值越大表示该变量的重要性越大<sup>[27]</sup>。各指标对水稻产量响应比均有一定的影响, 通过比较各变量因素的重要性可知, 其中种植区域 (Region)、土壤全氮 (STN)、种植制度 (Cropping system)、土壤质地 (Soil texture) 和缓效钾 (SAK) 5 个因素的重要程度较大, 速效钾 (AK)、土壤有机质 (SOM)、pH、施肥类型 (Fertilization type)、时间 (Time) 和土壤有效磷 (AP) 影响较小。

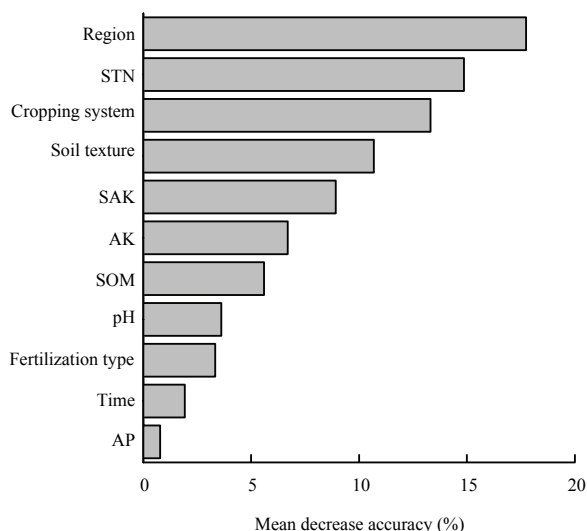
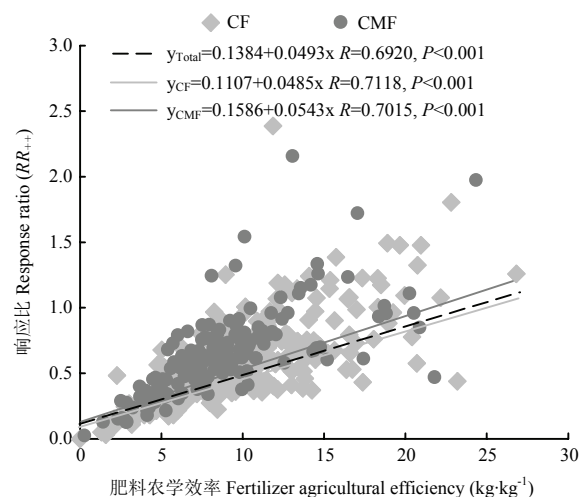


图 6 变量的重要性

Fig. 6 Variable importance

### 2.4 水稻产量响应比与肥料农学效率的关系

进一步分析了水稻产量响应比与肥料农学效率之间的关系 (图 7), 发现两者呈极显著正相关关系 ( $P < 0.001$ ), 通过线性拟合可得, 每增加 1 个单位的肥料农学效率, 水稻产量的响应比相应地提高 0.05 个单位。就目前较为普遍的两种施肥类型而言 (化肥单施、化肥与有机肥配施), 在增加相同单位的肥料农学效率情况下, 化肥与有机肥配施处理对水稻产量响应比的增加速率高于化肥单施处理。



CF: 化肥单施; CMF: 化肥+有机肥

CF: Chemical fertilizer; CMF: Chemical and organic fertilizer

图 7 水稻产量的权重响应比与肥料农学效率的关系

Fig. 7 Relationship between the response ratio ( $RR_{++}$ ) of rice yield and fertilizer agricultural efficiency

## 3 讨论

通过施肥为作物提供足够的养分是维持作物高产稳产、保障世界粮食安全的重要途径之一<sup>[28-29]</sup>。本研究通过整合农业农村部耕地质量监测的水稻产量数据发现, 与不施肥相比, 近 30 年以来常规施肥条件下水稻产量平均提高 80.8% (置信区间为 76.4%—83.4%)。这与 CHIANU 等<sup>[30]</sup>研究得到施肥能够增加作物产量 50%—100% 的结果相符。作物生长过程中需要大量的营养物质, 而化肥中含有高浓度的养分物质, 施用以后不仅能够供给植物吸收, 还能补充因作物吸收而带走或随水分流失的养分<sup>[31]</sup>。不施肥处理由于土壤养分常年被消耗且供应不足导致作物产量显著低于常规施肥处理 (图 1), 也间接反映施肥的重要性。研究表明, 通过合理的水肥养管理, 不仅能消除由于营养过剩造成的负面环境效应, 同时可实现近 30% 的增产潜力<sup>[32]</sup>。近 10 年 (2008—2017 年) 水稻产量显著高于其他年间施肥处理, 与张福锁等<sup>[11]</sup>研究结果类似, 这主要与近年来高产品种的大力推广<sup>[33]</sup>和土壤肥力总体普遍提高<sup>[34]</sup>密切相关。据联合国粮农组织 (FAO) 的数据统计, 化肥的增产作用占到农作物产量的 50%<sup>[35]</sup>, 这主要是因为本研究是在除了施肥, 其他因素均保持一致的情况下开展的田间试验, 相对提高了施肥的作用, 弱化了品种、管理措施等因素对产量的影响。



不同区域因气候特征、自然环境和耕作习惯等因素不同导致施肥对产量的影响差异较大。本研究发现相比其他水稻种植区域,施肥在西南地区增产效果较好。研究表明,在四川省施用氮肥最高可增产 90%,且相对贫瘠的山区施肥增产效果更加显著<sup>[36]</sup>。本研究的西南区域包括云南、四川、重庆和贵州,属于云贵高原区域,土壤肥力相对较低<sup>[37]</sup>,因此施肥增产效果高于其他地区。近 30 年间,施肥对产量的增加趋势在下降,这主要与土壤质量的改善和土壤肥力普遍提高有关<sup>[11]</sup>;其次是长期连续种植同一作物容易产生“连作障碍”,如土壤养分异常累积,微生物种群结构失衡等,最终影响作物产量的提高<sup>[38]</sup>。一年一熟(单季稻)水稻种植区域主要分布在东北地区,受气候条件的影响,导致该地区水稻产量均较低<sup>[39]</sup>,另外就是该地区土壤肥力较高,相对弱化了施肥增产的效应,施肥较不施肥处理对单季稻产量提高的幅度较低也印证这一结果。一年三熟地区主要分布在南方高温多雨的红壤地区,土壤养分贫瘠,酸化严重<sup>[40]</sup>,施肥能够快速供应大量的氮磷钾养分,满足作物的生长需求,相比不施肥能显著增加作物产量。本研究结果表明:有机无机肥配施在水稻上的增产效果高于单施化肥,这与国内外大部分长期定位试验结果相似<sup>[41-42]</sup>。有机无机肥配施有利于水稻中后期干物质累积和养分吸收,提高了单位面积总穗数和穗粒数<sup>[43]</sup>。随机森林结果表明:水稻种植区域和种植制度对水稻产量响应比的影响较大,因此,针对不同的种植区域和种植制度,需要指定相应的施肥方案,与前人提出的“大配方、小调整”区域施肥方案相符<sup>[14]</sup>。

土壤是作物生长的主要载体,也是我们当前培肥管理的主要对象。土壤理化性质的优劣不仅决定作物根系生长是否良好,同时与施入土壤中的养分能否高效利用密切相关。本研究结果表明,在砂质土壤上,施肥对水稻增产的效果较差,主要是因为砂土颗粒较大,养分的固定位点较少,导致施入的养分易随水分淋失<sup>[44]</sup>,其次是砂质土壤中养分含量少,且保水保肥能力较差<sup>[45]</sup>。土壤有机质含量是衡量土壤综合肥力的一个重要指标<sup>[46]</sup>,在低有机质含量下土壤肥力较低,施肥增产的效应较高(图 4),这与曾明祥等<sup>[3]</sup>研究结果一致。本研究结果表明:随着土壤全氮含量的增加,施肥较不施肥处理对水稻产量提高的幅度呈先降低后增加趋势。原因主要为:(1)氮素对水稻生产的影响仅次于水分,增施氮肥能够显著的提高水稻产量<sup>[47]</sup>,且在土壤低氮水平下,增施氮肥的增产效果较明显<sup>[48]</sup>;

(2)随着土壤全氮含量的增加,土壤能够供给水稻较多的氮素,进而弱化施肥增产的效应,为氮肥减施提供依据;(3)本研究在高氮情况下,施肥处理水稻产量均较高(平均为  $10.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,未在结果部分展示),此时土壤中的氮素并不能充分满足水稻对氮素的吸收,进而能够凸显肥料的增产效应,也说明高产稻田同样需要培肥。其他各化学指标不同水平下施肥对产量的影响结果各不相同,通过随机森林分析结果可知:土壤质地、全氮、缓效钾和速效钾对水稻产量响应比影响相对较大。这也表明土壤一致的情况下,要注重氮肥的合理施用;其次是钾素,因为钾素以无机形态存在土壤中,易随水迁移,因此也要注重钾肥的投入,尤其是南方缺钾地区,结果显示缓效钾含量较低情况下的增产效果较高也印证这一结果。

水稻产量响应比与肥料农学效率之间呈极显著正相关关系,这说明施肥在增产的同时也能增加肥效。在增加相同单位的肥料农学效率情况下,化肥与有机肥配施处理对水稻产量的响应比提高幅度高于单施化肥处理。这说明在等养分投入条件下,合理配施养分对产量的提高至关重要,该结果不仅与前人的研究结果一致<sup>[49]</sup>,同时也为我们当前提倡的化肥减施的情况下保持增效提供理论依据<sup>[50]</sup>。另外,还应当结合施肥对产量响应比的影响因素,综合考虑水稻种植区域、种植制度和土壤理化性质后进行合理施肥,最终提高肥料的农学效率,达到增产增效的目的。

## 4 结论

4.1 1988—2017 年间,施肥能够显著提高水稻的产量,相比不施肥能增产 80.8%,但是增产的效应呈逐渐减弱趋势。与化肥单施相比,化肥与有机肥配施是提高和维持水稻高产的重要措施。

4.2 施肥对水稻产量的提高效应与水稻种植区域、土壤全氮、种植制度和土壤钾素含量等密切相关。建议在指导农民施肥时应结合上述指标进行合理推荐。

4.3 水稻产量响应比与肥料农学效率之间呈极显著正相关关系,增加相同单位的肥料农学效率情况下,化肥与有机肥配施处理对水稻产量的响应比提高量高于单施化肥处理,为我国当前提倡化肥减施情况下如何实现水稻增产增效提供理论依据。

致谢: Muhammad Qaswar 对本文英文摘要的修改给予了指导,在此致以诚挚的感谢!

## References

- [1] PATEL D P, DAS A, MUNDA G C, GHOSH P K, BORDOLOI J S, KUMAR M. Evaluation of yield and physiological attributes of high-yielding rice varieties under aerobic and flood-irrigated management practices in mid-hills ecosystem. *Agricultural Water Management*, 2010, 97: 1269-1276.
- [2] ZHANG H M, XU M G, SHI X J, LI Z Z, HUANG Q H, WANG X J. Rice yield, potassium uptake and apparent balance under long-term fertilization in rice-based cropping systems in southern China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 88: 341-349.
- [3] 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)
- [4] HAIDER I K. Appraisal of biofertilizers in rice: To supplement inorganic chemical fertilizer. *Rice Science*, 2018, 25(6): 357-362.
- [5] 孙海燕, 李小坤, 任涛, 丛日环, 鲁剑巍. 浅层施肥对水稻苗期根系生长及分布的影响. *中国农业科学*, 2014, 47(12): 2476-2484.  
SUN H Y, LI X K, REN T, CONG R H, LU J W. Effects of fertilizer in shallow soils on growth and distribution of rice roots at seedling stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(12): 2476-2484. (in Chinese)
- [6] 张国荣, 李菊梅, 徐明岗, 高菊生, 谷思玉. 长期不同施肥对水稻产量及土壤肥力的影响. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 543-551.  
ZHANG G R, LI J M, XU M G, GAO J S, GU Si Y. Effects of chemical fertilizer and organic manure on rice yield and soil fertility. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2): 543-551. (in Chinese)
- [7] YADAV R L. Assessing on-farm efficiency and economics of fertilizer N, P and K in rice wheat systems of India. *Field Crops Research*, 2003, 81(1): 39-51.
- [8] HAEFELE S M, WOPEREIS M C S. Spatial variability of indigenous supplies for N, P and K and its impact on fertilizer strategies for irrigated rice in West Africa. *Plant and Soil*, 2005, 270(1): 57-72.
- [9] 吴萍萍, 刘金剑, 周毅, 谢小立, 沈其荣, 郭世伟. 长期不同施肥制度对红壤稻田肥料利用率的影响. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(2): 277-283.  
WU P P, LIU J J, ZHOU Y, XIE X L, SHEN Q R, GUO S W. Effects of different long term fertilizing systems on fertilizer use efficiency in red paddy soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2008, 14(2): 277-283. (in Chinese)
- [10] 苑俊丽, 梁新强, 李亮, 叶玉适, 傅朝栋, 宋清川. 中国水稻产量和氮素吸收量对高效氮肥响应的整合分析. *中国农业科学*, 2014, 47(17): 3414-3423.  
YUAN J L, LIANG X Q, LI L, YE Y S, FU C D, SONG Q C. Response of rice yield and nitrogen uptake to enhanced efficiency nitrogen fertilizer in China: A meta-analysis. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(17): 3414-3423. (in Chinese)
- [11] 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 efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)
- [12] 胡建利, 王德建, 王灿, 孙瑞娟. 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, SUN R J. Effect of different fertilization systems on rice yield components and their stability. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(1): 48-53. (in Chinese)
- [13] 包耀贤, 徐明岗, 吕粉桃, 黄庆海, 聂军, 张会民, 于寒青. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法. *中国农业科学*, 2012, 45(20): 4197-4204.  
BAO Y X, XU M G, LÜ F T, HUANG Q H, NIE J, ZHANG H M, YU H Q. Evaluation method on soil fertility under long-term fertilization. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(20): 4197-4204. (in Chinese)
- [14] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 陈新平, 张福锁. 中国水稻区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究. *中国农业大学学报*, 2016, 21(9): 1-13.  
WU L Q, WU L, CUI Z L, CHEN X P, ZHANG F S. Studies on recommended nitrogen, phosphorus and potassium application rates and special fertilizer formulae for different rice production regions in China. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(9): 1-13. (in Chinese)
- [15] 方畅宇, 屠乃美, 张清壮, 易镇邪. 不同施肥模式对稻田土壤速效养分含量及水稻产量的影响. *土壤*, 2018, 50(3): 462-468.  
FANG C Y, TU N M, ZHANG Q Z, YI Z X. Effects of fertilization modes on available nutrient contents of reddish paddy soils and rice yields. *Soils*, 2018, 50(3): 462-468. (in Chinese)
- [16] 银敏华, 李援农, 陈朋朋, 徐路全, 申胜龙, 王星垚. 基于 Meta-analysis 的中国北方地区免耕玉米产量效应研究. *中国农业科学*, 2018, 51(5): 843-854.  
YIN M H, LI Y N, CHEN P P, XU L Q, SHEN S L, WANG X Y. Effect of no-tillage on maize yield in northern region of China: A

- meta-analysis. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(5): 843-854. (in Chinese)
- [17] MELLOR A, HAYWOOD A, STONE C, JONES S. The performance of random forests in an operational setting for large area sclerophyll forest classification. *Remote Sensing*, 2013, 5(6): 2838-2856.
- [18] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范. 2 版. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- National Agricultural Technology Extension and Service Center. *Technical Specification for Soil Analysis*. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2006. (in Chinese)
- [19] CURTIS P S, WANG X. A meta-analysis of elevated CO<sub>2</sub> effects on woody plant mass, form, and physiology. *Oecologia*, 1998, 113(3): 299-313.
- [20] 任凤玲, 张旭博, 孙楠, 徐明岗, 柳开楼. 施用有机肥对中国农田土壤微生物量影响的整合分析. 中国农业科学, 2018, 51(1): 119-128.
- REN F L, ZHANG X B, SUN N, XU M G, LIU K L. A meta-analysis of manure application impact on soil microbial biomass across China's croplands. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(1): 119-128. (in Chinese)
- [21] LUO Y Q, HUI D F, ZHANG D Q. Elevated CO<sub>2</sub> stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: A meta-analysis. *Ecology*, 2006, 87(1): 53-63.
- [22] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecology*, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [23] 蔡岸冬, 张文菊, 杨品品, 韩天富, 徐明岗. 基于 meta-analysis 研究施肥对中国农田土壤有机碳及其组分的影响. 中国农业科学, 2015, 48(15): 2995-3004.
- CAI A D, ZHANG W J, YANG P P, HAN T F, XU M G. Effect degree of fertilization practices on soil organic carbon and fraction of croplands in China-based on meta-analysis. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(15): 2995-3004. (in Chinese)
- [24] CHEN Y, CAMPS-ARBESTAIN M, SHEN Q H, SINGH B, CAYUELA M L. The long-term role of organic amendments in building soil nutrient fertility: A meta-analysis and review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2018, 111(2/3): 103-125.
- [25] 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(3): 371-381.
- [26] 徐霞, 赵亚南, 黄玉芳, 闫军营, 叶优良. 不同地力水平下的小麦施肥效应. 中国农业科学, 2018, 51(21): 4076-4086.
- XU X, ZHAO Y L, HUANG Y F, YAN J Y, YE Y L. Fertilization effect of wheat under different soil fertilities. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(21): 4076-4086. (in Chinese)
- [27] RODRIGUEZ-GALIANO V F, GHIMIRE B, ROGAN J, CHICA-OLMO M, RIGLI-SANCHEZ J P. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2012, 67(1): 93-104.
- [28] LARSON B A, FRISVOLD G B. Fertilizers to support agricultural development in sub-Saharan Africa: What is needed and why. *Food Policy*, 1996, 21(6): 509-525.
- [29] MUELLER N D, GERBER J S, JOHNSTON M, RAY D K, RAMANKUTTY N, FOLEY J A. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 2012, 490(7419): 254-257.
- [30] CHIANU J N, CHIANU J N, MAIRURA F. Mineral fertilizers in the farming systems of sub-Saharan Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, 32(2): 545-566.
- [31] 石元亮, 王玲莉, 刘世彬, 聂鸿光. 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, NIE H G. Development of chemical fertilizer industry and its effect on agriculture of China. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 852-864. (in Chinese)
- [32] ALLEY M M, VANLAUWE B. The role of fertilizers in integrated plant nutrient management. *International Fertilizer Industry Association*, 2009, 15: 1-59.
- [33] ZHANG W F, CAO G X, LI X L, ZHANG H Y, WANG C, LIU Q Q, CHEN X P, CUI Z L, SHEN J B, JIANG R F, MI G H, MIAO Y X, ZHANG F S, DOU Z X. Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers. *Nature*, 2016, 537(7622): 671-674.
- [34] CHEUNG F. Yield: The search for the rice of the future. *Nature*, 2014, 514(7524): S60-S61.
- [35] 黄耀, 孙文娟. 近 20 年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势. 科学通报, 2007, 51: 750-763.
- HUANG Y, SUN W J. Change trend of organic carbon in farmland surface soil of main land China during the past 20 years. *Science Bulletin*, 2007, 51: 750-763. (in Chinese)
- [36] 张智, 王伟妮, 李昆, 马红菊, 荀曦, 鲁剑巍, 李小坤, 丛日环. 四川省不同区域水稻氮肥施用效果研究. 土壤学报, 2015, 52(1): 234-241.
- ZHANG Z, WANG W N, LI K, MA H J, GOU X, LU J W, LI X K, CONG R H. Effects of nitrogen fertilization on rice in different regions of Sichuan Province. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(1): 234-241. (in Chinese)
- [37] 任意, 张淑香, 穆兰, 田有国, 卢昌艾. 我国不同地区土壤养分的差异及变化趋势. 中国土壤与肥料, 2009(6): 13-17.

- REN Y, ZHANG S X, MU L, TIAN Y G, LU C A. Change and difference of soil nutrients for various regions in China. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2009(6): 13-17. (in Chinese)
- [38] YANG X L, GAO W S, ZHANG M, CHEN Y Q, SUI P. Reducing agricultural carbon footprint through diversified crop rotation systems in the north China plain. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 76: 131-139.
- [39] 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)
- [40] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, SHEN J L, HAN W X, ZHANG W F, CHEISTIE P, GOULDING K W T, VITOUSEK P M, ZHANG F S. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327 (5968): 1008-1010.
- [41] YOUSAF M, LI J F, LU J W, REN T, CONG R H, FAHAD S, LI X K. Effects of fertilization on crop production and nutrient-supplying capacity under rice-oilseed rape rotation system. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-9.
- [42] 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): 926-929.
- 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): 926-929. (in Chinese)
- [43] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 秦道珠, 八木一行, 宝川靖和. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3133-3139.
- XU M G, LI D C, LI J M, QIN D Z, KAZUYUKI Y, YASUKAZU H. Effects of organic manure application with chemical fertilizers on nutrient absorption and yield of rice in Hunan of Southern China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10): 3133-3139. (in Chinese)
- [44] LIN Y R, WATTS D B, SANTEN E V, CAO G Q. Influence of poultry litter on crop productivity under different field conditions: A meta-analysis. *Agronomy Journal*, 2018, 110(3): 807-818.
- [45] 吕贻忠. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- LÜ Y Z. *Soil Science*. Beijing: China Agricultural Press, 2006. (in Chinese)
- [46] TIROLPADRE A, LADHA J K, REGMI A P, BHANDARI A L, INUBUSHI K. Organic amendments affect soil parameters in two long-term rice-wheat experiments. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(2): 442-452.
- [47] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 杨建昌, 王光火, 邹应斌, 张福锁, 朱庆森, ROLAND B, CHRISTIAN W. 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): 1095-1103.
- PENG S B, HUANG J L, ZHONG X H, YANG J C, WANG G H, ZHOU Y B, ZHANG F S, ZHU Q S, ROLAND B, CHRISTIAN W. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1095-1103. (in Chinese)
- [48] 冯洋, 陈海飞, 胡孝明, 蔡红梅, 徐芳森. 高、中、低产田水稻适宜施氮量和氮肥利用率的研究. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 7-16.
- FENG Y, CHEN H F, HU X M, CAI H M, XU F S. Optimal nitrogen application rates on rice grain yield and nitrogen use efficiency in high, middle and low-yield paddy fields. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(1): 7-16. (in Chinese)
- [49] 冀建华, 侯红乾, 刘益仁, 刘秀梅, 冯兆滨, 刘光荣, 杨涛, 李文娟. 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. 土壤学报, 2015, 52(3): 607-619.
- Ji J H, HOU H Q, LIU Y R, LIU X M, FENG Z B, LIU G R, YANG T, LI W J. Effects of long-term fertilization on yield variation trend, yield stability and sustainability in the double cropping rice system. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3): 607-619. (in Chinese)
- [50] 白由路. 高效施肥技术研究的现状与展望. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2116-2125.
- BAI Y L. The situation and prospect of research on efficient fertilization. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11): 2116-2125. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)