



有机替代对长江流域水稻产量和籽粒含氮量的影响

任科宇, 陆东明, 邹洪琴, 王慧颖, 许发辉, 卢昌艾, 段英华

引用本文:

任科宇, 陆东明, 邹洪琴, 王慧颖, 许发辉, 卢昌艾, 段英华. 有机替代对长江流域水稻产量和籽粒含氮量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(4): 716–725.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0380>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 吕真真, 冀建华, 冯兆滨, 刘秀梅

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 810–819 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0584>

我国不同区域粮食作物产量对有机肥施用的响应差异

任科宇, 徐明岗, 张露, 段英华, 王伯仁

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 143–150 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0150>

华北平原不同施氮量与施肥模式对作物产量与氮肥利用率的影响

蔡媛媛, 王瑞琪, 王丽丽, 刘惠芬, 杨殿林, 谭炳昌

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 503–510 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0254>

粪肥增施对水稻产量和氮素利用效率的影响

刘泰, 王洪媛, 杨波, 魏静, 贺鹏程, 王玉龙, 刘宏斌

农业资源与环境学报. 2022, 39(3): 545–555 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0096>

聚天门冬氨酸尿素对水稻产量及田面水氮素变化的综合影响

王娜, 徐嘉翼, 张鑫, 隋世江, 叶鑫, 牛世伟

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 96–103 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0072>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

任科宇, 陆东明, 邹洪琴, 等. 有机替代对长江流域水稻产量和籽粒含氮量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(4): 716-725.
REN K Y, LU D M, ZOU H Q, et al. Effects of substituting manure for fertilizer on yield and nitrogen content of rice grain in the Yangtze River basin[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(4): 716-725.



开放科学 OSID

有机替代对长江流域水稻产量和籽粒含氮量的影响

任科宇¹, 陆东明², 邹洪琴¹, 王慧颖³, 许发辉^{3*}, 卢昌艾¹, 段英华^{1*}

(1. 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; 2. 苏州环优检测有限公司, 江苏苏州 215101; 3. 农业农村部耕地质量监测保护中心, 北京 100125)

摘要:为探明有机替代对我国长江流域水稻产量和籽粒含氮量的影响,本研究通过搜集已发表的文献,建立了207组包含不施肥(CK)、单施化肥(NPK)和有机肥替代部分化学氮肥(NPKM)处理下水稻产量和籽粒含氮量的数据库。采用整合分析的方法,定量计算了有机替代在不同施肥措施、土壤性质和气候因素下对长江流域水稻产量和籽粒含氮量的影响;采用随机森林模型明确了影响有机替代效果的主控因素。结果表明,施肥能够显著提高水稻的产量和籽粒含氮量,NPK处理下产量和籽粒含氮量较CK处理分别提高了 $2.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与NPK相比,NPKM处理下水稻的产量和籽粒含氮量分别显著提升了3.7%和1.9%。NPKM处理对产量和籽粒含氮量的影响存在区域差异。NPKM处理在总施氮量低于 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、替代比例30%~60%时能够显著提高水稻的产量和籽粒含氮量。NPKM处理在土壤养分含量较高的条件下有利于水稻产量的提升,在土壤养分含量较低的条件下有利于籽粒含氮量的提升。在年均降雨量 $\leq 1200 \text{ mm}$ 、年日照时数 $> 1800 \text{ h}$ 、年均温 $> 15 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,NPKM处理能够显著提高水稻的产量和籽粒含氮量。影响NPKM处理水稻产量的主要因素是替代比例、土壤pH和年均降雨量,而影响籽粒含氮量的主要因素是土壤有效磷、全氮含量以及土壤pH。综上所述,有机肥替代部分化学氮肥能够显著提高我国长江流域水稻的产量和籽粒含氮量,在中游地区提升效果更佳,有机替代总氮施用量应低于 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,替代比例以30%~60%为宜。

关键词:有机肥;籽粒品质;土壤性质;气候因素;整合分析;随机森林

中图分类号:S511

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)04-0716-10

doi: 10.13254/j.jare.2021.0380

Effects of substituting manure for fertilizer on yield and nitrogen content of rice grain in the Yangtze River basin

REN Keyu¹, LU Dongming², ZOU Hongqin¹, WANG Huiying³, XU Fahui^{3*}, LU Chang'ai¹, DUAN Yinghua^{1*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 2. Suzhou Huanyou Testing Co., Ltd., Suzhou 215101, China; 3. Cultivated Land Quality Monitoring and Protection Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

Abstract: It is essential to clarify the effects of substituting manure for chemical fertilizer on the yield and nitrogen (N) content of rice grains in the Yangtze River basin for high-quality grain production and fertilizer application reduction. This study was conducted based on a grain yield and N content of rice database, including 207 sets on no fertilization (CK); chemical N, P, and K fertilization (NPK); and substituting manure for fertilizer (NPKM), as collected from 42 published articles. The effect of substituting manure for fertilizer on yield and N content of rice grain was quantified in different fertilization measures, soil properties, and climatic factors by meta-analysis. The importance of various environmental factors on this effect was identified by random forest analysis. Compared with the CK, the yield and

收稿日期:2021-06-18 录用日期:2021-08-16

作者简介:任科宇(1993—),男,河南商丘人,博士研究生,从事氮素高效利用研究。E-mail:1173557108@qq.com

*通信作者:许发辉 E-mail:xfhui@gri.gov.cn; 段英华 E-mail:duanyinghua@caas.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(42077098);国家重点研发计划项目(2016YFD0200301);中央级公益性科研院所基本科研业务费(1610132021023)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (42077098); The National Key Research and Development Project of China (2016YFD0200301); Basal Research Fund of Central Public Welfare Scientific Institution (1610132021023)

grain N content under NPK treatment increased by $2.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $1.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, suggesting that fertilization significantly increased the yield and N content of rice grain. Compared with NPK, the NPKM treatment increased the yield and grain N content by 3.7% and 1.9%, respectively. The effect of NPKM treatment on yield and grain N content varied across regions. The NPKM treatment significantly increased the yield and grain N content of rice under the conditions of a $<250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ N application rate and 30%~60% substitution ratio. Manure substitution was more conducive to improving yield in soil with higher nutrient content while increasing grain N content in soil with low nutrient content. The yield and N content of rice grains could be significantly increased under the condition of average annual rainfall $\leq 1200 \text{ mm}$, annual sunshine duration $>1800 \text{ h}$, and annual average temperature $>15 \text{ }^\circ\text{C}$ by substituting manure for fertilizer. The main factors affecting yield increase in NPKM were the rate of manure substitution, soil pH, and average annual rainfall, while the affected grain N content increase was soil properties (available phosphorus, total nitrogen, and pH). Substituting manure for fertilizer could significantly increase the yield and N content of rice grains in the Yangtze River basin, especially in the middle Yangtze River region. The N application rate should be less than $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ when substituting manure for fertilizer and the substitution ratio 30%~60%.

Keywords: organic fertilizer; grain quality; soil properties; climate; meta-analysis; random forest

水稻作为我国三大主要粮食作物之一,其产量约占全国谷物总产量的34%,我国50%以上的人口以稻米为主食^[1],因此,提高水稻的产量和蛋白质含量对于保障我国的粮食安全至关重要。氮肥的施用是水稻持续高产和稳产的主要措施之一^[2-3]。然而,过量的化学氮肥施用往往会使水稻发生倒伏和病虫害,从而导致产量下降,同时也会降低水稻的蛋白质含量^[4]。有机肥富含多种养分,是一种缓效性肥料,有机肥替代部分化学氮肥施用,不仅能够维持作物产量,提高作物的氮肥利用率,而且能够改善土壤肥力,减少环境污染^[5-7]。但是,有机肥的施用效果会受到施肥管理措施、土壤和气候等因素的影响^[8]。长江流域是我国主要的水稻生产区,播种面积约占全国水稻总种植面积的67%,生产了全国68%的水稻^[9],但该区域跨度大,土壤类型及光热条件不同,导致水稻的产量和品质也存在显著差异^[10]。此外,水稻的籽粒含氮量决定了稻米的蛋白质含量^[11]。因此明确有机替代措施在长江流域对水稻产量和籽粒含氮量的影响对于该区域水稻的增产和籽粒蛋白质含量的提升以及有机肥的高效利用具有重要意义。XIA等^[12]通过对全球141项研究整合分析发现,相对于单施化肥,粪肥替代部分化肥(等量氮)能够使作物增产5.2%,氮肥利用率提升10.4%,但粪肥的增效作用在不同作物类型和替代比例下存在差异。对于我国的三大主要粮食作物,有机替代能够使产量增加4.7%,氮肥利用率提升13.4%,且在不同的土壤和气候条件下提升幅度不同^[6-7]。因此,有机肥替代的增产增效作用会存在较大的区域差异。对我国江苏省水稻田的研究表明,有机肥替代50%化学氮肥能够在保证水稻高产的同时,显著增加氮素的积累量和籽粒含氮量^[13]。

但是,有研究对亚洲25个稻田长期定位试验总结发现,相对于单施化肥,添加有机肥并未显著增加水稻的产量^[14]。利用江西省30年的定位试验研究发现,与等养分量的单施化肥处理相比,有机无机配施处理下水稻的氮素吸收量无显著变化,而籽粒的含氮量低于单施化肥^[15]。也有研究表明,在江西省进行不同比例的猪粪有机肥替代,水稻的产量显著提高,而籽粒含氮量则显著下降^[16]。在浙江地区,有机肥替代20%~40%能够获得较高的水稻产量和品质,比例过高则会降低籽粒的蛋白质含量^[17]。

目前,有机替代对我国长江流域水稻产量和品质的影响仍不清晰,气候和土壤环境因素在不同的区域对有机肥的响应差异尚不明确,而且大多数研究只关注有机替代对水稻产量的影响而忽视籽粒的蛋白质含量(籽粒含氮量)。因此,需进一步系统量化有机替代对我国长江流域水稻生产的影响。本研究采用整合分析(Meta-analysis)的方法,通过搜集已发表的有关施肥对长江流域水稻产量和籽粒含氮量影响的文献,综合量化有机替代对长江流域水稻产量和籽粒含氮量影响的区域差异,明确不同因素水平下有机替代的效果,并通过随机森林模型阐明不同因素的贡献率,旨在为我国水稻的高质量生产、有机肥的高效施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究通过搜集、整合已发表的文献数据进行分析。首先在Web of Science、Science Direct、中国知网和万方数据等文献数据库设置“有机替代”“有机无机肥配施”“粪肥”和“籽粒含氮量”4个关键词进行文献

检索,然后通过以下条件进行文献筛选:①以水稻为研究对象的大田试验,且试验点位于中国长江流域;②同一试验须同时包含不施肥(CK)、单施化肥(NPK)和等氮量的有机替代(NPKM)处理,且能够获得相应的产量和籽粒含氮量的数据;③每个试验处理的重复不少于3次;④含有试验前表层土壤(0~20 cm)基础理化性质数据。此外,还需获取每个试验点的地理位置(经纬度)以及气候指标(年均降雨量、年日照时数和年均温),若文献中缺少气候指标,在中国气候数据网根据试验点的地理位置获取。文献中以图呈现的数据通过软件GetData Graph Digitizer 2.24提取。本研究中NPKM处理所施用的有机肥主要是腐熟的畜禽粪便或商品有机肥,在播种前一次性施用。经过筛选,共获取42篇文献、207组有效数据,根据地理位置和种植制度将长江流域分为上游、中游和下游3个亚区^[3]。表1为数据的分布情况,对NPKM和NPK处理产量和籽粒含氮量的响应比分别进行正态分布检验(图1),满足整合分析的要求。

氮肥施用量(N rate)和有机肥替代比例(Rs)是影响作物产量和吸氮量的重要因素^[18]。本研究参考ZHANG等^[18]的研究将施氮量划分为高(>250 kg·hm⁻²)、中(150~250 kg·hm⁻²)、低(≤150 kg·hm⁻²)3个水平;有机肥的替代比例综合参考XIA等^[12]和ZHANG等^[18]的研究划分为高(>60%)、中(30%~60%)、低(≤30%)3个水平。为了进一步分析不同气候和土壤养分条件下NPKM处理对水稻产量和籽粒含氮量的影响,将年均降雨量(AAR)^[19]、年日照时数(ASD)^[20]和年均温(MAT)^[21]分为高、低2个水平(如年均降雨量:≤1 200 mm、>1 200 mm);土壤养分指标基于第二次土壤普查^[22]时土壤养分分级标准分为高、中、低3个水平(如土壤有机质含量:≤15 g·kg⁻¹、15~25 g·kg⁻¹、>25 g·kg⁻¹)。

表1 各个地区的数据量分布

Table 1 Date volume distribution in regions

区域Region	省份Province	数量Number
长江上游	四川	3
	重庆	6
长江中游	湖北	11
	湖南	87
	江西	20
	安徽	2
长江下游	江苏	62
	浙江	16

1.2 数据计算与分析

整合分析方法可以整合多个有共同研究目的且具有相互独立结果的研究,并能够对研究结果进行定量综合评价^[23]。本研究采用MetaWin 2.1软件进行整合分析^[24],每组数据需包含NPK(对照组)和NPKM(处理组)的产量(或籽粒含氮量)、重复数(*n*)以及标准差(*SD*),对于只提供标准误(*SE*)的研究通过公式(1)进行转换:

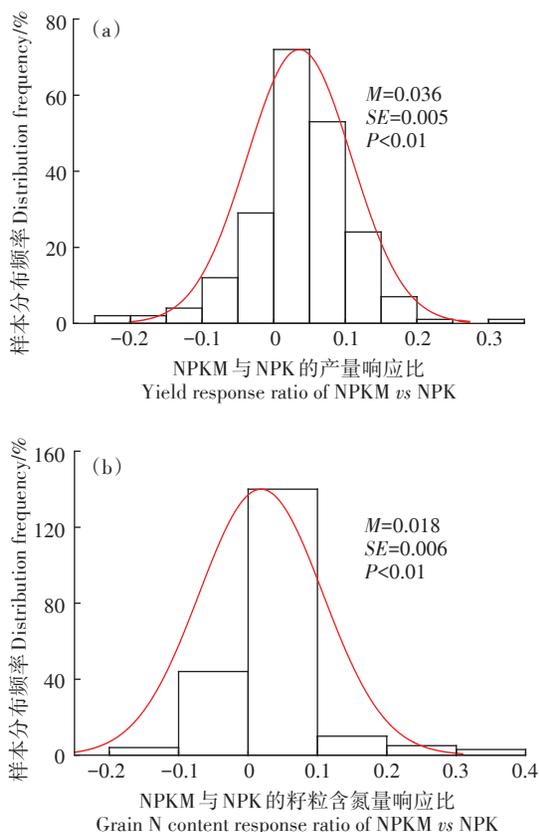
$$SD = SE \times \sqrt{n} \quad (1)$$

分析过程中用响应比(Response ratio, *RR*)的自然对数来反映有机替代对水稻产量和籽粒含氮量的影响程度,并由公式(2)计算^[25]:

$$\ln RR = \ln \frac{\bar{x}_1}{\bar{x}_c} \quad (2)$$

式(2)中: \bar{x}_1 和 \bar{x}_c 分别是处理组和对照组变量(水稻的产量和籽粒含氮量)的平均值。

本研究中相对于NPK,NPKM处理下水稻产量和



曲线代表数据呈极显著的正态分布($P<0.01$);*M*和*SE*分别代表数据的平均值和标准误

Curve represents a highly significant normal distribution ($P<0.01$); *M* and *SE* represent the mean value and standard error, respectively

图1 水稻产量(a)及籽粒含氮量(b)的样本分布频率

Figure 1 Distribution of rice yield(a) and grain N content(b)

籽粒含氮量增加的百分数(提升幅度, I_m)通过 $(e^{RR_{++}} - 1) \times 100\%$ 计算^[26],其中 RR_{++} 为加权响应比,是对每个独立试验响应比的加权,由公式(3)计算^[23]:

$$RR_{++} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} w_{ij} \times RR_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} w_{ij}} \quad (3)$$

式(3)中: m 是变量根据不同条件(如施氮量或替代比例)的分组数; k_i 是第*i*分组的总比较对数; j 表示第*i*分组的第*j*对; w_{ij} 表示权重系数,用平均值的变异系数(V)的倒数表示:

$$w_{ij} = \frac{1}{V} \quad (4)$$

$$V = \frac{SD_i^2}{n_i \bar{x}_i^2} + \frac{SD_c^2}{n_c \bar{x}_c^2} \quad (5)$$

式(5)中: SD_i 和 SD_c 分别表示处理组和对照组变量的标准差; n_i 和 n_c 分别表示处理组和对照组变量的样本数。

相对于NPK,NPKM处理对水稻产量和籽粒含氮量的影响是否显著则根据 RR_{++} 的95%置信区间(95%CI)是否包含零点来判断,若不包含零点,表示影响显著,反之则影响不显著^[27],通过公式(6)和(7)计算:

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

$$S(RR_{++}) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} w_{ij}}} \quad (7)$$

式(7)中: $S(RR_{++})$ 表示 RR_{++} 的标准差。

此外,为了选择合适的效应模型进行Meta分析,

需要在计算加权响应比前检验各试验处理及结果间异质性。通过卡方检验(Chi-square test)进行异质性检验,若检验结果 $P>0.05$,表示无异质性,选择固定效应模型,否则选择随机效应模型^[28],本研究选用随机效应模型。

数据分析过程中,不同施肥处理间水稻产量和籽粒含氮量的差异比较应用SPSS 11.0采用配对*t*检验进行显著性分析,实质是先分析处理间对应组数据的差值,然后检验差值序列的均值是否与0有显著差异。若双侧检验 $P<0.05$,说明处理间差异显著;若双侧检验 $P<0.01$,说明处理间差异极显著。利用随机森林模型计算各因素对有机替代效果的贡献率,采用R语言中的软件包“Random Forest”进行分析^[29]。

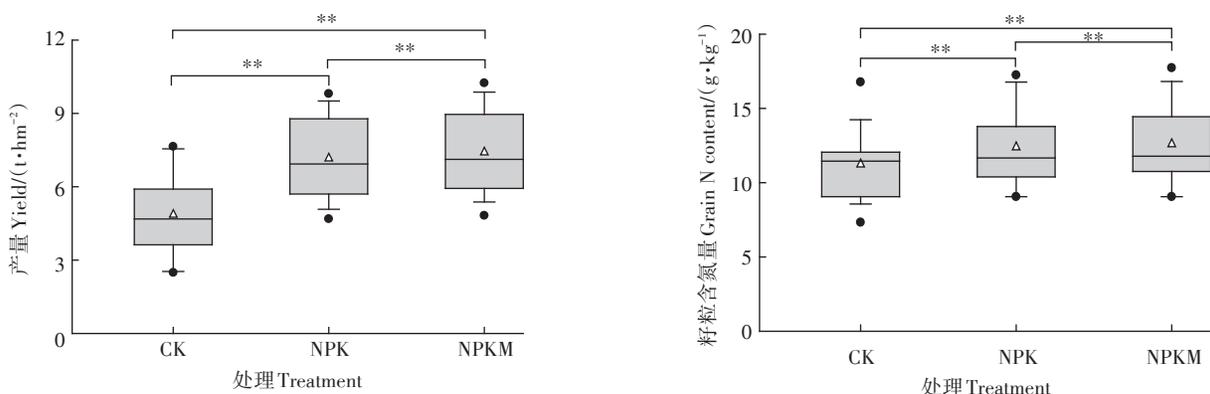
2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对水稻产量和籽粒含氮量的影响

如图2所示,不同施肥处理下水稻产量和籽粒含氮量均存在较大差异,总体上表现为NPKM>NPK>CK。CK处理下水稻的产量为 $4.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,NPK、NPKM处理下水稻的产量分别显著提高了 2.3 、 $2.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;NPKM、NPK处理的水稻产量也存在显著差异。与CK处理下水稻的籽粒含氮量($11.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)相比,NPK、NPKM处理均显著提高了水稻的籽粒含氮量,分别达到 12.4 、 $12.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;NPKM处理下水稻的籽粒含氮量显著高于NPK处理。

2.2 有机替代对水稻产量和籽粒含氮量影响的区域差异

与NPK相比,NPKM处理对长江流域水稻产量和籽粒含氮量的影响存在地域差异(图3)。在长江上

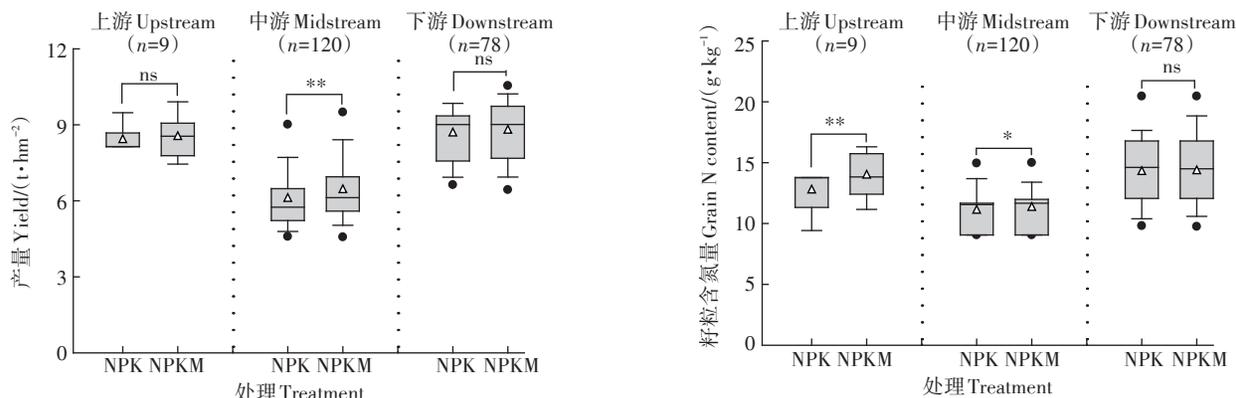


**表示极显著差异($P<0.01$)。下同

** stands for extremely significant differences ($P<0.01$). The same below

图2 不同施肥处理两两比较下长江流域水稻产量和籽粒含氮量

Figure 2 The yield and N content of rice grain compared in pairs under different fertilization treatments in the Yangtze River basin



*表示显著差异($P<0.05$), ns表示无显著差异; n代表样本数
* indicates significant differences ($P<0.05$), ns indicates no significant differences among treatments, and n represents the sample number

图3 长江流域不同区域有机替代对水稻产量和籽粒含氮量的影响

Figure 3 Effects of manure substitution on yield and grain N content of rice in different regions of the Yangtze River basin

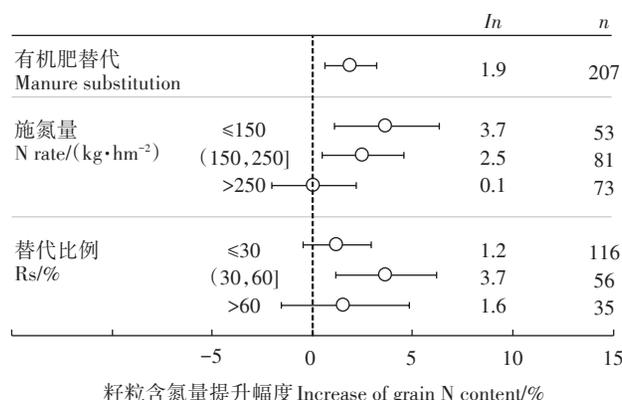
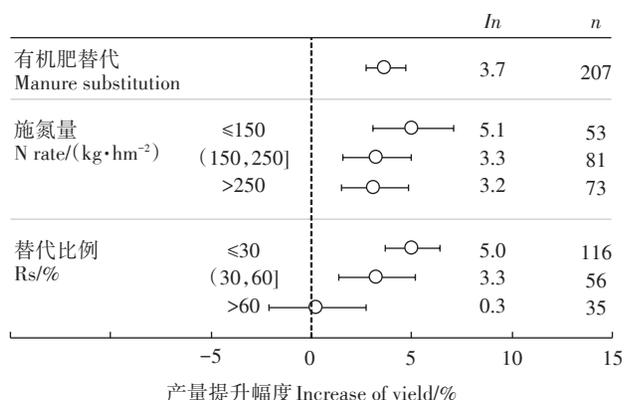
游地区, NPK处理下水稻产量和籽粒含氮量分别为 $8.4 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $12.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与之相比, NPKM处理下水稻产量无显著变化, 籽粒含氮量显著提高了 $1.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在长江中游地区, 与 NPK处理下水稻产量 ($6.1 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) 和籽粒含氮量 ($11.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 相比, NPKM处理分别显著提高了 $0.3 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在长江下游地区, NPK处理下水稻产量和籽粒含氮量相对较高, 分别为 $8.7 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $14.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, NPKM处理下水稻产量和籽粒含氮量与 NPK处理均无显著差异。

2.3 不同管理措施、土壤和气候条件下有机替代对水稻产量和籽粒含氮量的影响

总体来说, 与 NPK相比, NPKM处理下水稻产量和籽粒含氮量分别显著提升 3.7% 和 1.9% (图4)。NPKM处理下水稻产量和籽粒含氮量的提升幅度随

施氮量的增加呈下降趋势, 在不同施氮量下 NPKM处理均能显著提高水稻产量增幅 (3.2%~5.1%), 籽粒含氮量在施氮量 $\leq 250 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时显著提高 2.5%~3.7%, 而施氮量 $> 250 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时籽粒含氮量无显著提升。随着有机肥替代比例的增加, 水稻产量的提升幅度下降, 当替代比例 $> 60\%$ 时, NPKM处理的增产效果不显著, 而籽粒含氮量在有机肥替代比例为 30%~60% 时能够显著提升 3.7%, 替代比例过高或过低均不能显著提高籽粒含氮量。

与 NPK相比, 在不同土壤养分 (有机质、全氮和有效氮) 条件下 NPKM处理均能显著提高作物的产量 (图5)。但不同养分水平下的提高幅度存在差异, 养分含量越高, 产量的提升幅度越大。土壤有效磷含量 $\leq 10 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 时, NPKM处理对水稻的增产效果不



点和误差线分别代表平均提升幅度(I_n)及其95%置信区间; n为样本数。下同
Dots with error bars denote the overall mean increment (I_n) and 95% CI, respectively; n represents the sample number. The same below

图4 有机替代在不同管理措施下对水稻产量和籽粒含氮量的影响

Figure 4 Effect of manure substitution on yield and grain N content of rice under different management measures

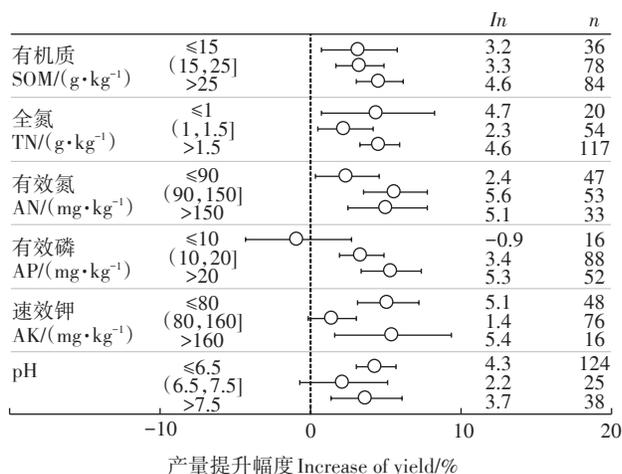


图5 有机替代在不同土壤养分水平下对水稻产量和籽粒含氮量的影响

Figure 5 Effect of manure substitution on yield and grain N content of rice under different nutrient levels

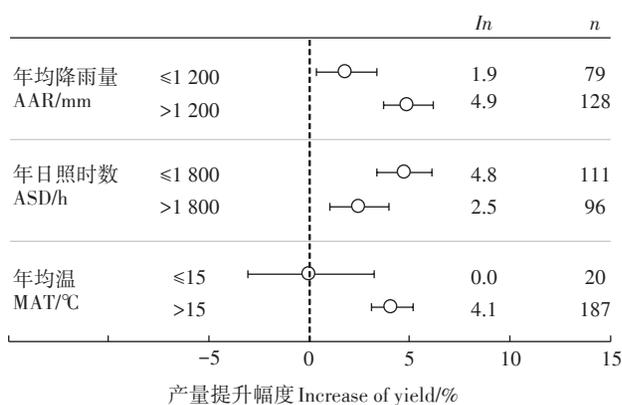
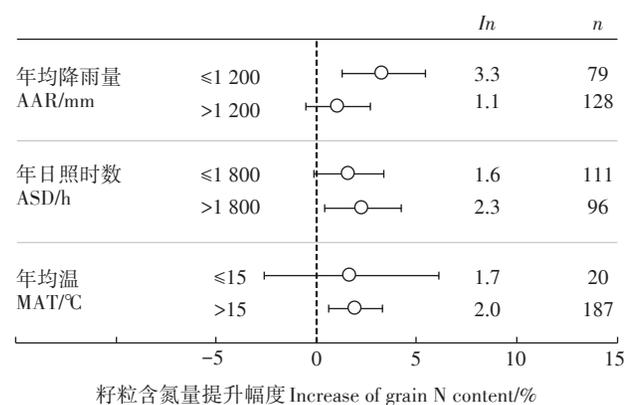
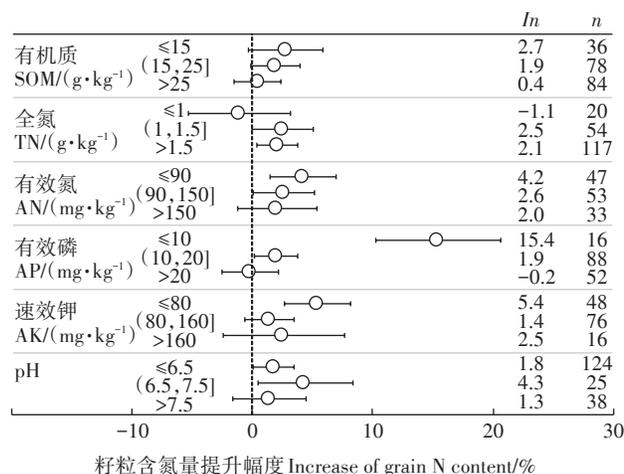


图6 有机替代在不同气候条件下对水稻产量和籽粒含氮量的影响

Figure 6 Effect of manure substitution on yield and grain N content of rice under different climatic factors

显著,有效磷含量 $>10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,水稻的产量显著增加3.4%~5.3%。土壤速效钾含量在 $80 \sim 160 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 或者土壤pH介于 $6.5 \sim 7.5$ 时,NPKM处理均未显著提高水稻产量。NPKM处理在不同土壤养分条件下对水稻籽粒含氮量的影响与产量不同,籽粒含氮量的提升幅度随养分(有机质、有效氮、有效磷和速效钾)水平的提高而下降,且在有效氮含量 $\leq 90 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (有效磷含量 $\leq 10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、速效钾含量 $\leq 80 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)时,籽粒含氮量显著提高4.2%(15.4%、5.4%)。土壤全氮含量 $\leq 1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,NPKM处理未显著提高籽粒含氮量。在土壤pH ≤ 7.5 时,NPKM处理下籽粒含氮量显著增加1.8%~4.3%。

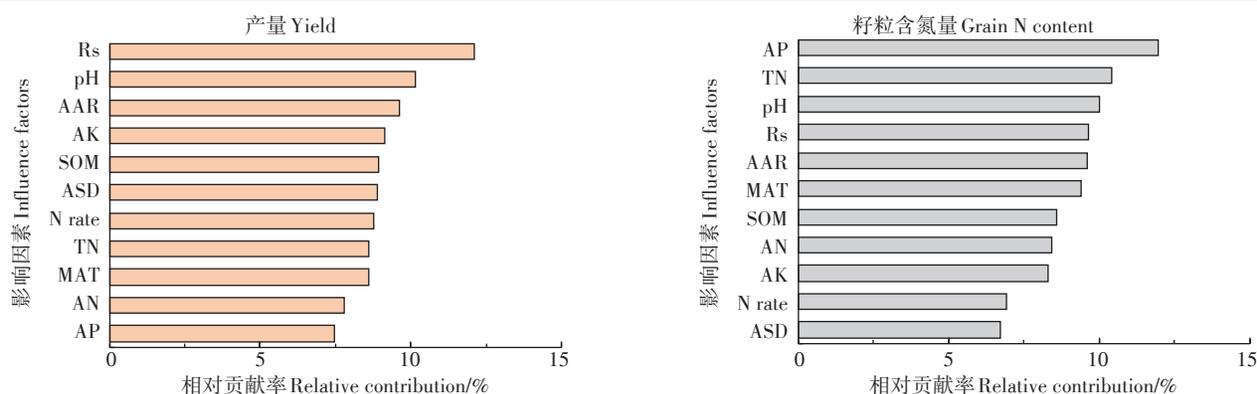
在不同年均降雨量和年日照时数条件下,NPKM处理均能显著提高水稻的产量(图6),且在年均降雨量 $>1 200 \text{ mm}$ 时提升幅度是年均降雨量 $\leq 1 200 \text{ mm}$ 时



的2.6倍,在年均日照时数 $\leq 1 800 \text{ h}$ 时提升幅度是年均日照时数 $>1 800 \text{ h}$ 时的1.9倍。在年均温 $>15 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,NPKM处理下水稻的产量显著提升4.1%。NPKM处理下籽粒含氮量在年均降雨量 $\leq 1 200 \text{ mm}$ 时显著提高3.3%,是年均降雨量 $>1 200 \text{ mm}$ 时的3倍。年均日照时数越长($>1 800 \text{ h}$)、年均温越高($>15 \text{ }^\circ\text{C}$),NPKM处理下籽粒含氮量的提升幅度越大。

2.4 影响有机替代效果的主控因素

从图7可知,影响NPKM处理提高水稻产量和籽粒含氮量的主控因素存在差异。NPKM处理对水稻产量的提升作用主要受有机肥替代比例(R_s)、pH和年均降雨量(AAR)的影响,三者总的贡献率达到31.9%。而NPKM处理对水稻籽粒含氮量的提升作用主要受土壤因素中的有效磷(AP)、全氮(TN)和pH的影响,且贡献率均在10%以上;管理措施中的替代比



Rs: 有机肥替代比例; pH: 土壤酸碱度; AAR: 年均降雨量; AK: 速效钾; SOM: 土壤有机质; ASD: 年日照时数; N rate: 施氮量; TN: 全氮; MAT: 年均温; AN: 有效氮; AP: 有效磷
 Rs: rate of manure substitution; pH: soil pH; AAR: average annual rainfall; AK: soil available potassium; SOM: soil organic matter; ASD: annual sunshine duration; N rate: nitrogen application rate; TN: soil total nitrogen; MAT: annual average temperature; AN: soil available nitrogen; AP: soil available phosphorus

图7 各因素影响有机替代提高水稻产量和籽粒含氮量的贡献率

Figure 7 The contribution of factors affecting manure substitution to increase yield and grain N content of rice

例(9.7%)和气候因素中的年均降雨量(9.6%)、年均温(9.4%)贡献率次之。

3 讨论

总体来看,有机肥替代部分化学氮肥(等量氮)能够显著提高长江流域水稻的产量和籽粒含氮量(图2和图4)。有机肥是一种富含多种营养元素、腐植酸和微生物活体的有机物质,与单施化肥相比,有机肥替代部分化肥不仅能够快速提供作物所需的氮磷钾养分,而且可以补充作物所需的微量元素^[5,30];同时,有机肥中大量的微生物有利于土壤团聚体的形成,改善土壤的理化性状,促进土壤中有机质的形成和分解,加速养分的循环,为作物生长提供充足的养分和良好的环境,有利于作物的增产^[15,31]。水稻籽粒形成于分蘖期之后,对养分的需求量较大,但是化肥养分释放快速,后期供应不足,而有机肥属于缓效肥料,养分释放缓慢,能够持续不断地提供水稻籽粒发育成熟过程中所需要的养分,提高籽粒的含氮量和蛋白质含量^[32-33];有机肥分解的过程中会释放多种氨基酸和多肽类物质,这些有机态小分子也会对作物的品质产生重要影响^[17,34]。然而,随着施氮量的增加,有机替代对提高水稻产量和籽粒含氮量的效果均会下降(图4)。张福锁等^[35]指出在我国目前的栽培技术和产量水平下,粮食作物的推荐施氮总量为150~200 kg·hm⁻²,即使在高产条件下也不应超过250 kg·hm⁻²。过量的氮肥投入会导致土壤的理化状况恶化,养分含量

失衡,同时,作物抵御自然灾害及病虫害的能力也会下降^[5,36],本研究中施氮量大于250 kg·hm⁻²后,有机替代对水稻籽粒含氮量的提升效果不显著,说明过量施氮的条件下即使通过有机替代也无法进一步提升水稻的蛋白质含量。

有机肥的替代比例对作物产量和籽粒含氮量的影响较大(图4),少量的有机肥替代(≤30%)虽然能够提高水稻的产量,却并未显著提高籽粒的含氮量。而有机替代也并非越多越好,过量的有机肥替代对水稻产量和籽粒含氮量的提升效果不显著,因为有机肥的分解和养分的释放需要一定的条件和时间,过量替代化学氮肥会导致水稻生长前期的养分供应不足,生长发育缓慢,不利于水稻的高产、稳产^[17,37-38];过高的碳氮比投入会引起水稻生长早期土壤微生物与水稻争氮,也会影响氮素的早期供应^[39]。有机肥替代比例在30%~60%时能够同时显著提高水稻的产量和籽粒含氮量,因此,本研究综合考虑水稻产量和籽粒含氮量的提升认为,有机替代比例在30%~60%时能够实现水稻增产提质的目的。但是,由于搜集到的数据限制,30%~60%的替代比例范围还相对较大,更加精确的指导建议还需要通过田间试验进一步明确。

从区域上看,相对于单施化肥,有机替代对我国长江流域水稻产量和籽粒含氮量的影响存在地域差异(图3)。在长江下游地区,有机替代处理未显著提高水稻的产量和籽粒含氮量,其原因可能是下游地区地势平坦、土壤肥沃、光热条件适宜,且管理水平较

高,单施化肥处理下水稻的产量和籽粒含氮量相对较高^[11,40],有机肥在当季未能显著发挥对产量和籽粒含氮量的提升作用。在上游地区,有机替代虽未显著提高水稻的产量,但显著提高了水稻的籽粒含氮量,这可能是由于上游地区多丘陵山地,土壤养分含量较低,我国长江流域水稻的产量和籽粒含氮量在不同土壤养分含量下对有机替代的响应存在差异(图5),土壤养分含量越低,有机替代条件下水稻的产量提升幅度越小,而籽粒含氮量提升幅度越高。对于有机替代处理,水稻的整个生长发育期内其养分的供应前期主要来源于化学肥料和土壤本身的养分,后期主要是有机肥分解养分的供应,前期养分充足有利于水稻的分蘖和抽穗,后期有机肥持续的养分供应有利于水稻籽粒的灌浆和成熟,因此有机替代条件下,土壤本身的养分含量越高,水稻成熟期的整体有效穗数和总粒数越多,促进作物高产^[32,37];土壤养分不足则会减少前期水稻的分蘖和抽穗,后期有机肥释放的养分会增加籽粒的含氮量,而土壤养分较高条件下后期有限的有机肥养分无法满足所有穗粒养分的供应,从而导致籽粒含氮量下降^[17]。长江中游地区,有机肥替代显著提高了水稻的产量和籽粒含氮量,因为中游地区光热条件充足^[41],有利于有机肥的分解和养分的释放。此外,近些年我国长江中游地区水田酸化较为严重,目前土壤的pH仅为5.61,较2000年下降了0.81个单位^[41],而有机肥的施用能够有效地控制土壤的酸化,提高作物对养分的吸收^[42],本研究也表明在酸性土壤上进行有机替代后水稻的产量和籽粒含氮量提升幅度较大(图5)。

水稻的产量和籽粒含氮量对有机肥替代的响应在不同土壤养分(图5)和气候条件(图6)下存在差异,且影响有机替代效果的主控因素也有所不同(图7),有机替代的增产效果主要受管理措施(RS)、土壤因素(pH)和气候条件(AAR)共同影响,而提升籽粒含氮量的效果主要受土壤因素(AP、TN和pH)的影响,以上差异的原因可能是有机肥增产的机理主要是提高水稻单位面积的穗粒数和结实率,而籽粒含氮量提升的机理则是提高每颗籽粒的氮素吸收和积累^[16-17,37]。因此,为了实现有机肥的高效利用,使有机替代达到既增产又增加籽粒蛋白质含量的效果,需根据有机替代对水稻产量和籽粒含氮量的不同影响进行合理施用。总体来说,在进行有机替代时,总的氮肥投入量不应超过 $250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,有机肥的替代比例应控制在30%~60%。对于长江下游地区,少量的氮

肥投入和有机替代既能够保障水稻产量和品质、维持土壤的肥力,又可以减少化学肥料的施用,从而减少污染。而长江中上游地区则需在合理的替代比例下增加有机肥的投入,进一步提高水稻的产量和蛋白质含量。此外,对于土壤有效磷含量较低和酸化较为严重的地区,在进行有机替代时还应适当增施磷肥和土壤酸碱度调理剂,改善土壤的理化性状,这样更有利于水稻的增产稳产。

4 结论

(1)总体来说,相对于单施化肥,有机替代能够显著提高长江流域水稻的产量(3.7%)和籽粒含氮量(1.9%),但区域间存在差异,有机替代对水稻产量和籽粒含氮量的提升效果表现为中游地区>上游地区>下游地区。

(2)在进行有机替代时,总的氮肥投入量应低于 $250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,替代比例控制在30%~60%,更有利于实现水稻的增产提质。

(3)有机替代在不同土壤和气候条件下对水稻产量和籽粒含氮量的影响不同,应综合考虑本地区的土壤和气候条件进行有机替代,在养分含量较低、高高温条件的地区,可通过有机替代实现水稻的高质量生产。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020. National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [2] SUI B, FENG X, TIAN G, et al. Optimizing nitrogen supply increases rice yield and nitrogen use efficiency by regulating yield formation factors[J]. *Field Crops Research*, 2013, 150(15):99-107.
- [3] WU L, CHEN X, CUI Z, et al. Improving nitrogen management via a regional management plan for Chinese rice production[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(9):95011.
- [4] ZHANG Q. Strategies for developing green super rice[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(42):16402-16409.
- [5] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(1):175-181. NING C C, WANG J W, CAI K Z. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(1):175-181.
- [6] 任科宇, 段英华, 徐明岗, 等. 施用有机肥对我国作物氮肥利用率影响的整合分析[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(17):2983-2996. REN K Y, DUAN Y H, XU M G, et al. Effect of manure application on nitrogen use efficiency of crops in China: A meta-analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(17):2983-2996.
- [7] 任科宇, 徐明岗, 张露, 等. 我国不同区域粮食作物产量对有机肥施

- 用的响应差异[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 143-150. REN K Y, XU M G, ZHANG L, et al. Response of grain crop yield to manure application in different regions of China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1): 143-150.
- [8] 闫鸿媛, 段英华, 徐明岗, 等. 长期施肥下中国典型农田小麦氮肥利用率的时空演变[J]. 中国农业科学, 2011, 44(7): 1399-1407. YAN H Y, DUAN Y H, XU M G, et al. Nitrogen use efficiency of wheat as affected by long-term fertilization in the typical soil of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(7): 1399-1407.
- [9] CONG R, ZHANG Z, LU J, et al. Evaluation of nitrogen requirement and efficiency of rice in the region of Yangtze River valley based on large-scale field experiments[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(10): 2090-2098.
- [10] 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 I. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(2): 329-336. YANG X G, LIU Z J, CHEN F. The possible effects of global warming on cropping systems in China I. The possible effects of climate warming on northern limits of cropping systems and crop yields in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(2): 329-336.
- [11] 陆佳岚, 王净, 马成, 等. 长江流域中稻产量和品质性状差异与其生育期气象因子的相关性[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(6): 1361-1372. LU J L, WANG J, MA C, et al. Correlation between the differences in yield and quality traits among various types of middle rice and meteorological factors during growth period in the Yangtze River basin[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 36(6): 1361-1372.
- [12] XIA L, LA S K, YAN X, et al. How does recycling of livestock manure in agroecosystems affect crop productivity, reactive nitrogen losses, and soil carbon balance? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(13): 7450-7457.
- [13] 刘红江, 蒋华伟, 孙国峰, 等. 有机-无机肥不同配施比例对水稻氮素吸收利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(5): 61-66. LIU H J, JIANG H W, SUN G F, et al. Effect of different organic-inorganic fertilizers combination ratio on nitrogen use efficiency of rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(5): 61-66.
- [14] DAWE D, DOBERMANN A, LADHA J K, et al. Do organic amendments improve yield trends and profitability in intensive rice systems? [J]. *Field Crops Research*, 2003, 83(2): 191-213.
- [15] 侯红乾, 冀建华, 刘秀梅, 等. 不同比例有机肥替代化肥对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 土壤, 2020, 52(4): 110-117. HOU H Q, JI J H, LIU X M, et al. Effect of long-term combined application of organic and inorganic fertilizers on rice yield, nitrogen uptake and utilization in red soil area of China[J]. *Soils*, 2020, 52(4): 110-117.
- [16] 唐先干, 秦文婧, 谢金水, 等. 不同比例猪粪有机肥配施对稻穗不同部位氮含量分布的影响[J]. 南方农业学报, 2018, 49(10): 1940-1945. TANG X G, QIN W J, XIE J S, et al. Effects of organic pig manure application with different proportions on grain nitrogen contents at different positions of rice spike[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49(10): 1940-1945.
- [17] 周江明. 有机-无机肥配施对水稻产量、品质及氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 234-240. ZHOU J M. Effect of combined application of organic and mineral fertilizers on yield, quality and nitrogen uptake of rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 234-240.
- [18] ZHANG X, FANG Q, ZHANG T, et al. Benefits and trade-offs of replacing synthetic fertilizers by animal manures in crop production in China: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(2): 888-900.
- [19] 尚宗波, 高琼, 杨莫安. 利用中国气候信息系统研究年降水量空间分布规律[J]. 生态学报, 2001, 21(5): 689-693. SHANG Z B, GAO Q, YANG D A. Spatial pattern analysis of annual precipitation with climate information system of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(5): 689-693.
- [20] 李慧群, 付遵涛, 闻新宇, 等. 中国地区日照时数近 50 年来的变化特征[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(2): 203-209. LI H Q, FU Z T, WEN X Y, et al. Characteristic analysis of sunshine duration change in China during the last 50 years[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2013, 18(2): 203-209.
- [21] 方晓, 蔡冰, 郑石. 我国年平均气温和冬季气温研究进展[J]. 安徽农业科学, 2016, 12(5): 153-154. FANG X, CAI B, ZHENG S. Research progress and prospect of annual mean temperature and winter mean temperature in China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 12(5): 153-154.
- [22] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 356. National Soil Census Office. China soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998: 356.
- [23] 蔡岸冬, 张文菊, 杨品品, 等. 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[J]. 中国农业科学, 2015, 48(15): 2995-3004. CAI A D, ZHANG W J, YANG P P, et al. Effects degree of fertilization practices on soil organic carbon and fraction of croplands in China: Based on meta-analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(15): 2995-3004.
- [24] ROSENBERG M S, ADAMS D C, GUREVITCE J. MetaWin: Statistical software for meta-analysis with resampling tests (Version 1) [M]. Sunderland: MA Sinauer Associates Inc, 1997.
- [25] HEDGES L V, GUREVITCHE J, CURTIS P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. *Ecology*, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [26] LUO Y Q, HUI D F, ZHANG D Q. Elevated CO₂ stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: A meta-analysis [J]. *Ecology*, 2006, 87(1): 53-63.
- [27] PALLMANN P. Applied meta-analysis with R[J]. *Journal of Applied Statistics*, 2015, 42(4): 914-915.
- [28] LIU C, LU M, CUI J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366-1381.
- [29] BREIMAN L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45: 5-32.
- [30] 杨玉爱, 何念祖, 叶正钱. 有机肥对土壤锌、锰有效性的影响[J]. 土壤学报, 1990, 27(2): 196-201. YANG Y A, HE N Z, YE Z Q. Effects of organic manure on the availability of Zn and Mn in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1990, 27(2): 196-201.

- [31] HAN S, BAQUERIZO M D, LUO X, et al. Soil aggregate size-dependent relationships between microbial functional diversity and multifunctionality[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 154:108143.
- [32] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10):3133-3139. XU M G, LI D C, LI J M, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10):3133-3139.
- [33] SUBEDI K D, MA B L. Effects of N-deficiency and timing of N supply on the recovery and distribution of labeled ^{15}N in contrasting maize hybrids[J]. *Plant and Soil*, 2005, 273(1):189-202.
- [34] 李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对氮素利用率和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10):1669-1678. LI Y Q, WEN Y C, LI Z A, et al. Effect of different organic manures combined with chemical fertilizer on nitrogen use efficiency and soil fertility[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2019, 25(10):1669-1678.
- [35] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):915-924. ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):915-924.
- [36] ZHU Z L, JU X T, CUI Z L, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9):3041-3046.
- [37] 欧杨虹, 徐阳春, 沈其荣. 有机氮部分替代无机氮对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 江苏农业学报, 2009, 25(1):106-111. OU Y H, XU Y C, SHEN Q R. Effect of combined use of organic and inorganic nitrogen fertilizer on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 25(1):106-111.
- [38] 石鑫蕊, 任彬彬, 江琳琳, 等. 有机肥替代部分化肥对水稻光合速率、氮素利用率和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1):154-162. SHI X R, REN B B, JIANG L L, et al. Effects of organic manure partial substitution for chemical fertilizer on the photosynthetic rate, nitrogen use efficiency and yield of rice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(1):154-162.
- [39] 韩晓日, 郑国砥, 刘晓燕, 等. 有机肥与化肥配合施用土壤微生物量氮动态、来源和供氮特征[J]. 中国农业科学, 2007, 40(4):765-772. HAN X R, ZHENG G D, LIU X Y, et al. Dynamics, sources and supply characteristic of microbial biomass nitrogen in soil applied with manure and fertilizer[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(4):765-777.
- [40] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 等. 中国水稻区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(9):1-13. WU L Q, WU L, CUI Z L, et al. Studies on recommended nitrogen, phosphorus and potassium application rates and special fertilizer formulae for different rice production regions in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(9):1-13.
- [41] 韩天富, 柳开楼, 黄晶, 等. 近30年中国主要农田土壤pH时空演变及其驱动因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(12):2137-2149. HAN T F, LIU K L, HUANG J, et al. Spatio-temporal evolution of soil pH and its driving factors in the main Chinese farmland during past 30 years[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2020, 26(12):2137-2149.
- [42] 孟红旗, 吕家珑, 徐明岗, 等. 有机肥的碱度及其减缓土壤酸化的机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5):1153-1160. MENG H Q, LÜ J L, XU M G, et al. Alkalinity of organic manure and its mechanism for mitigating soil acidification[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(5):1153-1160.