

不同县域水稻产量变化的关键土壤肥力因素分析

张楚¹, 黄晶¹, 申哲¹, 李继文¹, 韩天富³, 艾栋¹, 颜俊¹,
孙耿⁴, 陈金⁵, 柳开楼^{2*}, 张会民^{1*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2. 江西省红壤及种质资源研究所, 南昌 331717; 3. 郑州大学农学院, 郑州 450000; 4. 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; 5. 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所/农业部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室/国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 330200)

摘要: 土壤肥力是影响水稻产量的重要因素, 研究土壤理化性质和水稻产量的关系有助于优化不同区域水稻生产和科学培肥。该研究基于县域研究尺度, 选取了中国东北的方正县、长江中游的宁乡市和长江中下游的进贤县, 分析水稻绝对产量、相对产量和可持续产量指数, 并探讨不同区域影响水稻产量的关键肥力因素。结果表明: 由于稻作模式不同, 宁乡市的两季水稻产量(9 414.89 kg/hm²)显著($P<0.05$)高于方正县的一季稻产量(8 224.31 kg/hm²)和进贤县的晚稻季产量(5 691.38 kg/hm²), 但方正县的水稻相对产量均值(89.88%)显著($P<0.05$)高于宁乡市(73.84%)和进贤县(65.67%), 且方正县的可持续产量指数也相对较高(0.86), 显示出该县在产量和稳定性方面的优势; 依据相对产量划分的低、中、高产水平的分析表明, 高产水平下方正县、宁乡市、进贤县的土壤肥力指标和综合肥力指数较高。不同县域影响相对产量的主要肥力因子不同, 方正县、宁乡市、进贤县水稻可持续产量指数变化的关键肥力因素分别是土壤有效磷(贡献度为8.68%)、碱解氮(贡献度为12.92%)、有机质(贡献度为15.37%)。在后续的水稻生产中, 建议方正县重点关注土壤有效磷的管理, 宁乡市和进贤县则应注重提升土壤碱解氮和有机质含量。

关键词: 土壤; 肥力; 水稻; 产量; 典型县域; 可持续产量指数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404035

中图分类号: S158.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-18-0090-10

张楚, 黄晶, 申哲, 等. 不同县域水稻产量变化的关键土壤肥力因素分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(18): 90-99. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404035 <http://www.tcsae.org>
ZHANG Chu, HUANG Jing, SHEN Zhe, et al. Analysis of the key soil fertility factors of rice yield variation in different counties[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(18): 90-99. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404035 <http://www.tcsae.org>

0 引言

水稻是世界上最重要的粮食作物之一, 是全球一半以上人口的主食^[1]。中国作为世界上最大的稻米生产国和消费国, 水稻种植面积每年稳定在 3×10^7 hm²左右, 占全国粮食作物播种面积的29.8%, 产量占粮食总产量的33.6%^[2]。水稻生产事关粮食安全, 影响中国农业和经济政策以及世界粮食市场^[3]。

水稻在中国种植广泛, 但不同区域的稻作模式存在明显差异: 东北以一季稻为主, 长江中下游以双季稻模式为主。20世纪90年代以来, 全球变暖、农业技术进步、市场需求加大和农业政策变化等因素导致了东北地区水稻种植面积的扩张^[4-6]。东北黑土区生产粮食约占全

国粮食总量的1/4, 商品粮数量占全国总量高达1/3, 但近些年的研究表明, 东北区的高标准农田建设需要特别注重土壤质地改良、板结土壤治理以及盐碱土壤改良等方面^[7]。长江中下游地区是水稻的传统产区之一, 其中湖南和江西作为主要的双季稻模式种植区^[8], 由于不合理的农业管理措施, 导致该地区氮磷养分损失率较大^[9]、持续增产难度加大。尽管近年来学者对东北和长江中下游地区的水稻种植和农田养分管理问题进行了大量研究^[10-11], 但依然缺乏在县域尺度上对典型稻作区关键肥力因素与水稻产量关系的相关研究。

土壤理化性质是影响水稻生产的重要因素之一, 但由于土壤发育、人为管理措施等因素的影响, 不同县域水稻土的理化性质存在明显分异。LI等^[12]分析了中国湖南省8个县水稻施肥试验的长期数据集, 发现红壤双季稻地区相对生产力与土壤化学特性(pH值、有机碳、土壤全氮、土壤全磷和土壤有效氮等)呈显著正相关。任科宇等^[13]对全国主要粮食作物产量的影响及其区域差异的研究发现, 土壤性状中的有机质和全氮含量是影响有机肥增产效果的关键因素, 东北地区施有机肥后作物增产效果较好。LIU等^[14]选择位于湖南和江西由第四纪红粘土或河流沉积物发育而成的水田开展研究, 研究结果

收稿日期: 2024-04-07 修订日期: 2024-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(42367051); 江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目(20223BBF61020); 中国农业科学院科技创新工程项目(CAASZDRW202408)

作者简介: 张楚, 博士生, 研究方向为土壤培肥与改良。

E-mail: 18513128233@163.com

*通信作者: 柳开楼, 博士, 研究员, 研究方向为土壤培肥与改良。Email: liukailou@163.com; 张会民, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为土壤培肥与改良。Email: zhanghuimin@caas.cn

显示，湖南和江西的潜育性水稻土，耕作层土壤碳磷比与水稻产量呈显著负相关，且土壤总氮和速效钾含量是限制水稻产量的主要制约因素。柳开楼等^[15]基于鄱阳湖流域的红壤性水稻土长期施肥定位试验的研究发现，在各项土壤养分指标中，土壤有机碳是影响该地区双季稻田土壤基础地力变化的重要因素。然而，前述研究主要聚焦于某一特定地域，但稻作区域范围广泛，各区域之间的差异尚未充分阐明。因此，为指导各区域针对性的开展水稻生产可持续管理，进而制定科学的培肥建议，本研究选取中国稻作区的典型县域（东北的正方县、长江中游的宁乡市和长江中下游的进贤县），根据水稻低、中、高产水平分析计算水稻绝对产量、相对产量和可持续产量指数，探讨不同区域影响水稻产量的关键肥力因素，以期优化不同区域的水稻生产和制定更精确的土壤改良策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取黑龙江省方正县、湖南省宁乡市（湖南

省辖县级市，由长沙市代管）以及江西省进贤县为研究对象，方正县、宁乡市和进贤县的基本情况见表 1。方正县属黑龙江省哈尔滨市辖县，位于松花江中游南岸，长白山支脉张广才岭北段西麓，该县总面积 $3.0 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，耕地面积 $8.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，其中稻田面积 $6.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，水稻年产量 $3 \times 10^5 \text{ t}$ ，是黑龙江省水稻主产区之一。宁乡市地处湘东偏北的洞庭湖南缘地区，是湖南省水稻生产的典型，面积总计 2906 km^2 ，是全国闻名的“鱼米之乡”，据统计，2017 年全年粮食种植面积 $1.3 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，其中水稻播种面积 $1.2 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，占粮食种植面积的 92.6%，优质稻种植面积所占比例为 81%，粮食总产量 $8 \times 10^5 \text{ t}$ ，是洞庭湖流域具有代表性的水稻种植区域。进贤县属南昌市辖县，地处江西省中部，鄱阳湖南岸，位于抚州河与信江下游之间，全县山地、水域和耕地面积各占总面积的 30% 左右，在江西省粮食主产区“三区一片”（环鄱阳湖、赣抚平原、吉泰盆地和赣西）中占据着重要的地位，水稻种植面积达 763 km^2 ，占该县粮食种植总面积的 89%，是鄱阳湖流域具有代表性的水稻种植区域。

表 1 方正县、宁乡市和进贤县的基本情况

Table 1 Basic information of Fangzheng County, Ningxiang City and Jinxian County

县域 County	经度 Longitude	纬度 Latitude	气候类型 Climate type	年均气温 Mean annual temperature/°C	年均降水量 Mean annual precipitation/mm	稻作模式 Rice cropping pattern
方正 Fangzheng	128°13'~129°33'E	45°32'~46°09'N	寒温带大陆性季风气候	2.6	580	单季稻一年一熟制
宁乡 Ningxiang	111°53'~112°46'E	27°55'~28°29'N	亚热带大陆性季风气候	16.8	1358	双季稻一年两熟制
进贤 Jinxian	116°01'~116°33'E	28°09'~28°46'N	亚热带季风湿润气候	17.5	1587	双季稻稻—稻—冬闲

1.2 样品的采集与测定

以方正县、宁乡市、进贤县第二次土壤普查的点为基础，兼顾低、中、高产稻田，以相对均匀空间分布原则，2017 年在方正县选择 114 个点位、宁乡市选择 132 个点位、进贤县选择 58 个点位。考虑到水田分布的零碎化特点，为了更好的表征该地区的水稻产地肥力特性，我们选取了一个临近县域的土壤样点，此样点取在宁乡县外 3 km 范围内，气候、管理措施、作物品种等因素与县域内土壤大致相同，具体点位分布见图 1。方正县测定一季中稻产量，宁乡市测定早稻及

晚稻产量，进贤县由于客观原因仅测定晚稻产量。其中水稻产量采用 1 m^2 样方测产，每个点位选择 3 个 1 m^2 的样方，人工脱粒晾晒和称质量，并换算成标准产量，即为水稻绝对产量（rice absolute yield, RAY, kg/hm^2 ）。同时，11 月中旬于水稻收获后按照 5 点法随机采集了耕层土壤（0~20 cm）样品，所有土壤样品经风干、剔除杂质、研磨，分别过 20 目（孔径 $841 \mu\text{m}$ ）和 100 目（孔径 $147 \mu\text{m}$ ）筛后，测定土壤 pH 值、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾，所有测定指标均采用常规方法进行分析测定^[16]。

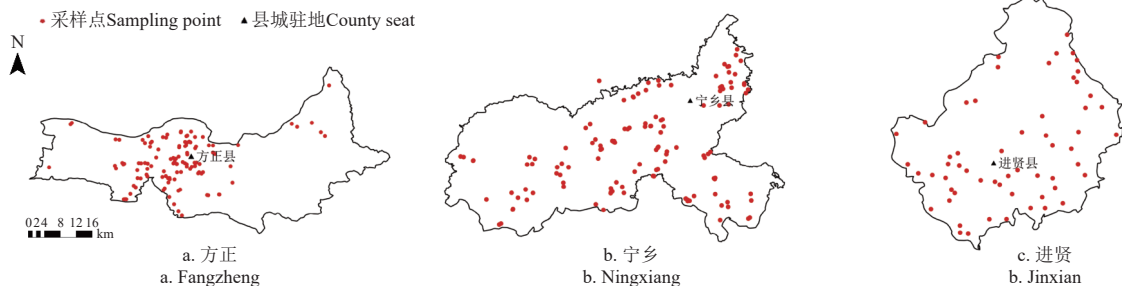


图 1 方正县、宁乡市和进贤县的采样点分布

Fig.1 Distribution map of sampling points in Fangzheng County, Ningxiang City and Jinxian County

1.3 数据统计分析

水稻相对产量（rice relative yield, RRY, %）为各点位水稻产量占每个典型县域所有点位中最高产量的百分比^[17]。

可持续产量指数（sustainable yield index, SYI）是评估农业实践可持续性的定量指标^[18]，可持续产量指数（式中以 I_{SYI} 表示）采用式（1）计算^[19]：

$$I_{SYI} = \frac{Y - \sigma}{Y_{\max}} \quad (1)$$

式中 Y 、 Y_{\max} 分别表示各点位水稻产量实际值和最大值 (kg/hm^2)， σ 表示标准差 (kg/hm^2)。

土壤综合肥力指数 (integrated fertility index, IFI)，参考前人研究的基础^[20]，本研究选用土壤 pH 值、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾共 5 项指标作为土壤肥力综合评价的参考指标。首先，对上述各项土壤肥力质量指标建立与之对应的隶属度函数，计算其隶属度值，以此来表示各肥力指标的状态值。根据土壤肥力指标与作物生长效应曲线将隶属度函数分为两种类型，其中有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量属于 S 型隶属度函数，如式 (2)，pH 值属于抛物线型隶属度函数，如式 (3)^[21]。

$$f(x) = \begin{cases} 1.0, & x \geq x_2 \\ 0.9(x - x_1)/(x_2 - x_1) + 0.1, & x_1 < x < x_2 \\ 0.1, & x \leq x_1 \end{cases} \quad (2)$$

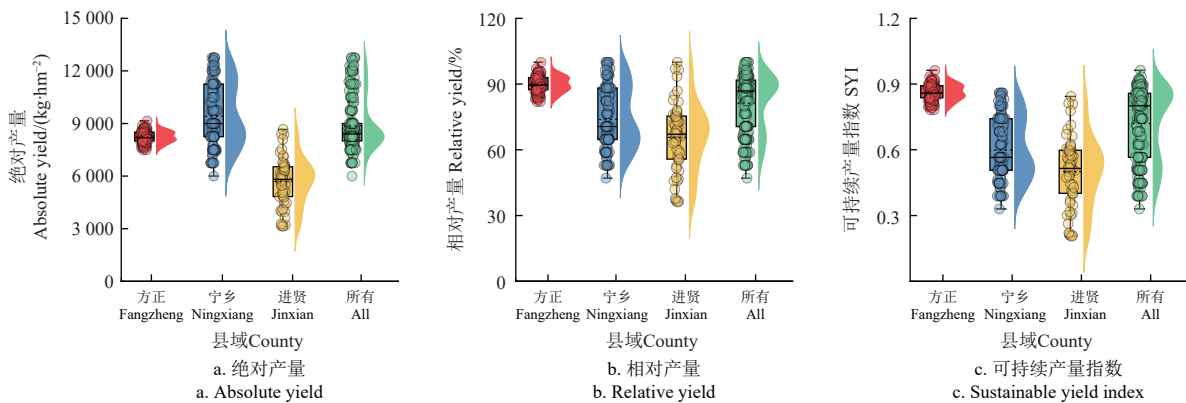
$$f(x) = \begin{cases} 1.0 - 0.9(x - x_3)/(x_4 - x_3), & x_3 < x < x_4 \\ 1.0, & x_2 < x < x_3 \\ 0.9(x - x_1)/(x_2 - x_1) + 0.1, & x_1 < x < x_2 \\ 0.1, & x \leq x_1 \text{ 或 } x \geq x_4 \end{cases} \quad (3)$$

式中 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 是隶属度函数的拐点，结合《土壤质量指标与评价》^[20] 和 3 个典型县域土壤的具体实际，确定各肥力指标隶属度函数曲线转折点的值 (即拐点值) 见表 2，将各项肥力指标值分别代入隶属度函数进而得出其隶属度值。

权重的计算步骤为：1) 建立各肥力质量指标的相关系数；2) 采用因子分析得到各肥力指标的公因子方差，并计算各肥力指标公因子方差占公因子方差总和的比值，得到各肥力指标的权重系数。

将各肥力指标的隶属度值和权重系数相乘后再进行累加，即可得到基于模糊综合评价的土壤综合肥力指数，其计算公式如下^[21]：

$$I_{IFI} = \sum_{i=1}^n F_i \cdot W_i \quad (4)$$



注：中间实线代表中位数，虚线代表平均值；箱体上下两边分别代表 75% 和 25% 顺序的数值；箱体外上下两个短线分别代表 95% 和 5% 的置信区间；半小提琴形区域显示数据分布。

Note: The middle solid lines represent the median value and the dashed lines represent the average value; the upper and lower edges of the box represent the 75% and 25% sequence of values, respectively; the upper and lower short lines outside the box represent 95% and 5% confidence intervals, respectively; the half violin shaped area reveals the data distribution.

图 2 典型县域水稻绝对产量、相对产量、可持续产量指数

Fig.2 Absolute yield, relative yield and sustainable yield index (SYI) of rice in typical counties

式中 I_{IFI} 为土壤综合肥力指数值； F_i 为第 i 项肥力指标的隶属度值， W_i 为第 i 项肥力指标的权重系数。

利用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理。采用 IBS SPSS Statistics 26 软件进行统计分析，利用单因素分析法 (One-Way ANOVA) 进行方差分析，并选用 LSD 法进行多重比较，采用 Pearson 分析法进行相关性分析，显著性水平设为 $P < 0.05$ ，极显著性水平设为 $P < 0.001$ 。利用 R 语言 (4.3.2) 中 “randomForest” 包对影响水稻可持续产量指数的不同土壤因素进行排序。利用 Origin 2023 以及 ArcMap 10.8 进行绘图。

表 2 隶属度函数曲线转折点取值

Table 2 The turning point value of membership function						
县域 County	拐点 Turning point	pH 值 pH value	OM/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	AN/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	AP/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	AK/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
方正 Fangzheng	x_1	5.5	20	100	20	130
	x_2	6.5	50	200	40	200
	x_3	7.0				
	x_4	7.5				
宁乡 Ningxiang	x_1	4.5	10	100	5	50
	x_2	5.5	40	200	20	150
	x_3	6.0				
	x_4	7.0				
进贤 Jinxian	x_1	4.5	20	100	5	50
	x_2	6.0	40	200	40	150
	x_3	7.0				
	x_4	8.5				

注：OM 为有机质，AN 为碱解氮，AP 为有效磷，AK 为速效钾。下同。
Note: OM is organic matter, AN is available nitrogen, AP is available phosphorus, AK is available potassium. The same as below.

2 结果与分析

2.1 水稻产量指标变化

分析方正、宁乡、进贤 3 个县域的水稻绝对产量、相对产量、可持续产量指数可知 (图 2)，从平均绝对产量来看，由于稻作模式不同，宁乡市的两季水稻产量最高为 $9414.89 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ，相较于进贤县的晚稻季产量 ($5691.38 \text{ kg}/\text{hm}^2$) 显著 ($P < 0.05$) 高出了 65.42%。其次是方正县的一季稻产量 ($8224.31 \text{ kg}/\text{hm}^2$)，相对于进贤县高出了 44.50%。

结合相对产量 (RRY) 发现, 方正县的 RRY 均值 (89.88%) 显著高于 ($P<0.05$) 宁乡市 (73.84%) 和进贤县 (65.67%), 且方正县的可持续产量指数 (SYI) 也相对较高 (0.86), 而宁乡市和进贤县的 SYI 则相对较低, 分别为 0.60 和 0.50。进一步利用标准差衡量数据的分散程度发现, 其中方正县的水稻绝对产量标准差最低 (339.62 kg/hm^2), 进贤县次之 (1353.90 kg/hm^2), 而宁乡市最高 (1789.15 kg/hm^2)。这表明方正县的产量波动性较小, 而宁乡市和进贤县的产量波动较大。

2.2 土壤肥力指标和综合肥力指数变化

按照水稻相对产量 (RRY) 水平的置信区间分布 $<25\%$ 、 $25\% \sim 75\%$ 和 $>75\%$ 将方正县、宁乡市和进贤县划分为低、中、高产水平, 分析典型县域低、中、高产水平的土壤肥力指标和综合肥力指数变化 (表 3) 发现。在方正县, 低、中、高产水平的土壤 pH 值、土壤

有效磷 (AP)、土壤速效钾 (AK) 均无显著差异, 但高产水平的土壤有机质 (OM) 比低产水平显著高 25.50%, 而高产水平的土壤碱解氮 (AN) 分别比低、中产水平显著高 31.17%、20.59%; 在宁乡市, 低、中、高产水平的土壤 pH 值、AN、AK 均无显著差异, 但高产水平的土壤 OM 比中产水平显著高 10.59%, 高产水平下 AP 比中产水平显著高 68.74%; 在进贤县, 除了土壤 pH 值无显著差异之外, 土壤 OM、AN、AP、AK 均呈现出高产水平显著高于中、低产水平的规律 (分别高了 13.28%~27.28%、21.45%~34.82%、62.42%~111.90%、29.51%~59.51%)。通过综合肥力指数发现, 方正县的 IFI 表现出高产水平比低产水平显著高 25.45%, 而宁乡市低、中、高水平的 IFI 无显著差异, 进贤县的 IFI 则呈现出高产 ($0.51 \pm 0.10a$) $>$ 中产 ($0.38 \pm 0.08b$) $>$ 低产 ($0.29 \pm 0.05c$)。

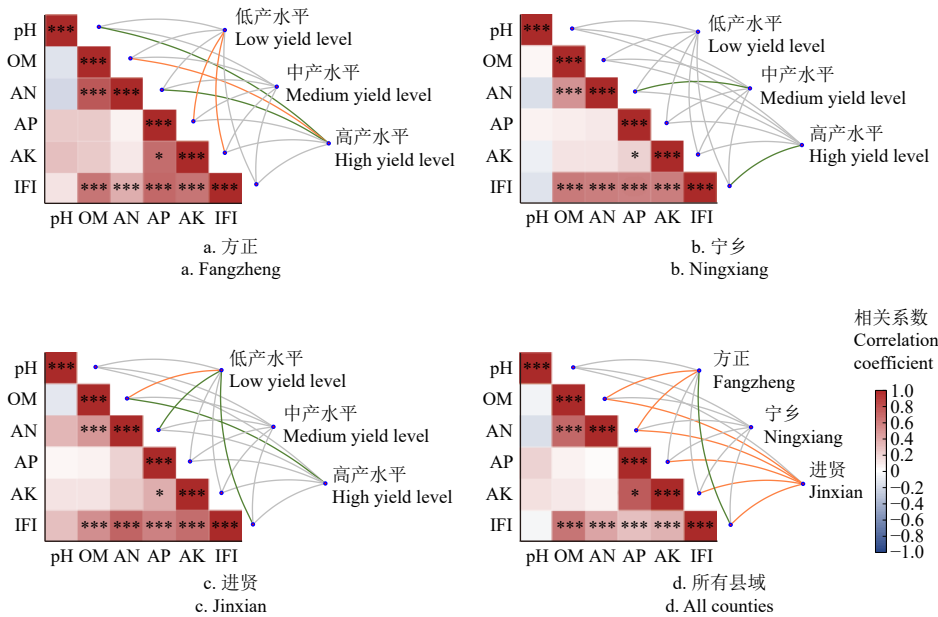
表 3 典型县域土壤肥力指标和综合肥力指数变化
Table 3 Changes of soil fertility indicators and integrated fertility index in typical counties

县域 County	相对产量水平 Relative production level	pH 值 pH value	OM/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	AN/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	AP/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	AK/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	综合肥力指数 Integrated fertility index (IFI)
方正 Fangzheng	低	$5.88 \pm 0.29a$	$33.45 \pm 9.38b$	$163.17 \pm 39.37b$	$36.55 \pm 23.50a$	$178.13 \pm 62.12a$	$0.55 \pm 0.24b$
	中	$5.82 \pm 0.37a$	$36.81 \pm 8.82ab$	$177.48 \pm 45.67b$	$39.65 \pm 14.17a$	$174.03 \pm 41.29a$	$0.64 \pm 0.21ab$
	高	$5.82 \pm 0.33a$	$41.98 \pm 17.14a$	$214.03 \pm 91.33a$	$39.22 \pm 9.38a$	$171.45 \pm 32.10a$	$0.69 \pm 0.15a$
宁乡 Ningxiang	低	$5.69 \pm 0.52a$	$38.40 \pm 8.28ab$	$188.06 \pm 25.27a$	$8.81 \pm 6.34ab$	$90.75 \pm 36.24a$	$0.70 \pm 0.10a$
	中	$5.67 \pm 0.52a$	$36.75 \pm 7.89b$	$180.89 \pm 32.55a$	$7.07 \pm 3.82b$	$100.23 \pm 46.58a$	$0.66 \pm 0.15a$
	高	$5.69 \pm 0.57a$	$40.64 \pm 7.10a$	$185.02 \pm 32.21a$	$11.93 \pm 7.11a$	$93.19 \pm 51.86a$	$0.69 \pm 0.14a$
进贤 Jinxian	低	$4.72 \pm 0.21a$	$30.50 \pm 6.94b$	$88.62 \pm 11.84b$	$27.31 \pm 13.62b$	$48.78 \pm 13.41b$	$0.29 \pm 0.05c$
	中	$4.76 \pm 0.18a$	$34.27 \pm 6.26b$	$98.38 \pm 15.72b$	$35.63 \pm 19.49b$	$60.08 \pm 26.30b$	$0.38 \pm 0.08b$
	高	$4.76 \pm 0.24a$	$38.82 \pm 5.18a$	$119.48 \pm 22.80a$	$57.87 \pm 30.55a$	$77.81 \pm 27.91a$	$0.51 \pm 0.10a$

注: 不同小写字母表示同一县域不同水稻相对产量水平之间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different rice relative yield levels in the same county ($P<0.05$).

2.3 土壤肥力指标及综合肥力指数与水稻相对产量的关系
相关性分析表明 (图 3), 3 个县域间调控水稻相对

产量的肥力因子在低、中、高产水平上存在差异。



注: *, **, ***表示在 0.05、0.01、0.001 水平影响显著。绿色和橙色实线表示相对产量与土壤肥力指标在 0.05 和 0.01 水平相关, 灰色实线表示不相关。
Note: *, **, *** indicate significant effect at 0.05, 0.01, 0.001 levels, respectively. Solid green and orange lines means correlation significant between rice relative yield and soil fertility indicators at 0.05 and 0.01 level, respectively, and solid gray lines mean insignificance.

图 3 土壤肥力指标与水稻相对产量的相关性关系
Fig.3 Correlation between soil fertility indicators and rice relative yield

在低产水平上, 方正县的水稻相对产量主要受土壤有效磷和速效钾的显著影响 ($P < 0.001$), 宁乡市的水稻相对产量与肥力因子相关性不显著, 进贤县的水稻相对产量受土壤有机质 ($P < 0.01$)、碱解氮 ($P < 0.05$) 和土壤肥力指数 ($P < 0.05$) 的显著影响; 在中产水平上, 方正县的水稻相对产量与肥力因子相关性不显著, 宁乡市的水稻相对产量主要受土壤碱解氮的显著影响 ($P < 0.05$), 进贤县的水稻相对产量与肥力因子相关性不显著; 在高产水平上, 方正县的水稻相对产量则受土壤 pH 值 ($P < 0.05$)、有机质 ($P < 0.01$) 和碱解氮 ($P < 0.05$) 的显著影响, 宁乡市的水稻相对产量主要受土壤肥力指数 ($P < 0.05$) 的显著影响, 进贤县的水稻相对产量则主要受土壤有机质 ($P < 0.05$) 的显著影响。综合低、中、高产水平来看, 土壤有机质 ($P < 0.001$)、碱解氮 ($P < 0.01$) 和土壤肥力指数 ($P < 0.05$) 是影响方正县水稻产量的主要肥力因素, 土壤有机质 ($P < 0.001$)、碱解氮 ($P < 0.001$)、有效磷 ($P < 0.001$)、速效钾 ($P < 0.01$) 和土壤肥力指数 ($P < 0.001$) 均是影响进贤县水稻产量的主要肥力因子, 但在宁乡市, 土壤肥力因素对水稻产量影响不显著。

2.4 水稻可持续产量指数变化的关键肥力因素分析

不同县域影响水稻可持续产量指数变化的关键肥力因素存在明显分异 (表 4)。

表 4 基于随机森林分析的不同土壤因素在解释水稻可持续产量指数的相对重要性

Table 4 Relative importance of different soil factors based on random forest analysis in explaining the sustainable yield index of rice

县域 County	土壤因素 Soil factor	相对重要性 IncMSE/%	P 值 P value
方正 Fangzheng	AP	8.68	0.02*
	AN	6.90	0.06
	OM	4.91	0.17
	AK	-0.62	0.54
	pH	-0.65	0.66
宁乡 Ningxiang	AN	12.92	0.02*
	pH	10.77	<0.01**
	AK	7.38	0.07
	OM	3.03	0.18
	AP	0.80	0.41
进贤 Jinxian	OM	15.37	<0.01**
	AN	12.25	<0.01**
	AP	9.26	<0.01**
	AK	5.91	0.06
	pH	-0.55	0.59
所有 All	AP	37.66	<0.01**
	AK	27.12	<0.01**
	AN	22.06	<0.01**
	pH	14.66	<0.01**
	OM	11.71	0.02*

注: 不同土壤因素按其对于水稻可持续产量指数的相对重要性排序。采用“精度平均减少值”即均方差增加值 (Increase in Mean Square Error, IncMSE) 作为不同土壤因素的相对重要性的评价指标, IncMSE 值越大, 说明该变量越重要, 反之则相对不重要。

Note: Different soil factors were ranked according to their relative importance to the rice sustainable yield index. The "precision mean reduction value", namely increase in mean square error (IncMSE), is used as an evaluation index for the relative importance of different soil factors. The larger the value of IncMSE, the more important the variable is; otherwise, it is relatively unimportant.

在方正县, 土壤有效磷对水稻可持续产量指数变化的相对贡献最大 (相对重要性为 8.68%), 其次为有机

质和速效钾; 在宁乡市, 土壤碱解氮对水稻可持续产量指数变化的相对重要性为 12.92%, 其次为 pH 值; 在进贤县, 土壤有机质对水稻可持续产量指数变化影响最大 (相对重要性为 15.37%), 其次为碱解氮、有效磷。综合 3 个县域的结果表明, 土壤有效磷对水稻可持续产量指数变化的影响程度最高, 其次为速效钾和碱解氮。

3 讨论

3.1 典型县域水稻产量变化的差异分析

受气候、土壤和作物品种等因素综合影响, 不同区域的作物产量存在显著差异。基于全国耕地质量监测平台的数据发现, 中国北部和东部地区的水稻潜在产量上限下降幅度大于其他地区, 中国西南地区表现出良好的增产空间, 产量差距最大 (30.6%), 而 58.4% 的县产量停滞不前^[22]。CHEN 等^[23]对中国水稻种植区域的产量进行了评估, 结果表明 1981—2008 年由于气温升高, 东北地区的产量潜力每年增加了 20~40 kg/hm², 而其他地区的产量潜力则因气温升高和太阳辐射减少每年减少了 10~30 kg/hm²。在本研究中, 方正县、宁乡市和进贤县的水稻产量平均值分别为 8 224.31、9 414.89、5 691.38 kg/hm², 但是, 由于稻作模式不同, 水稻产量尚不能客观表征县域之间的差异。为最大程度降低水稻绝对产量的误导, 本研究进一步按照水稻相对产量的置信区间分布 (<25%、25%~75% 和 >75%) 划分方正县、宁乡市和进贤县的低、中、高产水平, 结果发现, 方正县的相对产量 (89.88%) 和可持续产量指数 (0.86) 在 3 个典型县域中也相对较高。有学者对 1988—2016 年东北黑土区的研究发现, 农民传统施肥方式总体上改善了该区域土壤肥力状况, 作物产量连年增长, 主要是由于黑土基础生产力稳定输出和外源肥料的增产效应^[24]。东北地区水稻种植面积相较于南方地区不占优势, 但优越的自然条件、良好的田间管理、合理的施肥和灌溉措施能有效改善水稻生长环境, 且黑土区土壤肥力较高为水稻提供了丰富的营养物质, 水稻单位产量较高。有研究表明, 东北典型县域稻田土壤肥力因子与水稻产量密切相关, 耕作层土壤有机碳和全磷对产量的影响最大^[25]。在 2000 年中国实行粮食补贴政策后使得水稻生产迅速发展, 管理水平得到了提高, 整体产量较高且更加稳定。而宁乡市和进贤县则属于南方丘陵地区, 稻田土壤主要是由红壤发育的水稻土, 受成土母质等因素的影响, 红壤稻田普遍存在粘粒比例较高、团聚体稳定性差等问题^[26], 且田块零碎化程度较大, 产量差较大。不同种植管理方式对水稻的产量的影响不同, 其作物产量表现具有不确定性。

3.2 典型县域土壤肥力指标及综合肥力指数变化的差异分析

20 世纪 80 年代到 21 世纪初, 中国耕地土壤酸化加剧^[27], 本研究也发现, 方正县、宁乡市和进贤县的水稻土 pH 均值分别为 5.84、5.68 和 4.75, 与全国稻田土壤 pH 值 (1988—2016 年: 5.96~6.42, 均值为 6.12)^[28] 相比, 方正县、宁乡市和进贤县的土壤 pH 值分别下降

0.28、0.44、1.37。说明这 3 个典型县域的土壤酸化趋势比全国更为严重，相较于方正县和宁乡市，进贤县的土壤 pH 值下降幅度最大，这一现象部分原因在于该县的水稻土由红壤发育而来，对酸的缓冲能力低，同时，过量施用氮肥导致土壤酸化加剧。王远鹏等^[29]的调研发现进贤县稻田土壤氮肥（N）年均施入量由 1982 年的 90 kg/hm² 增加到 2017 年的 360 kg/hm²，大量氮肥的施用可能导致土壤发生明显酸化。不同产量水平的 pH 值差异不显著，原因可能是不同的田块采取了一定的施肥和耕作措施，使得土壤的缓冲能力增强，在不同产量水平下土壤 pH 值保持相对稳定。

由于秸秆还田和冬季种植绿肥等技术的大力推广，全国耕地的土壤有机质均呈显著增加趋势^[30]。本研究表明，2017 年方正县、宁乡市和进贤县的稻田土壤有机质含量（37.41、38.60 和 34.53 g/kg）均高于全国稻田土壤有机质含量均值（31.75 g/kg）^[28]。进一步分析得出，3 个典型县域的土壤有机质含量均呈现出高产水平显著高于低产和中产水平，这与前人^[31]的研究结果相同，但由于研究尺度、土壤初始有机质水平和管理水平的差异，本研究高产水平的土壤有机质含量与其他研究结果存在明显差异，谢坚等^[32]对湖南双季稻不同种植区水稻土的研究结果显示，衡东地区高产水稻土的有机质高达 62.40 g/kg。

碱解氮、有效磷和速效钾是表征土壤氮磷钾养分供应的重要指标。本研究结果表明，方正县的土壤碱解氮含量（184.89 mg/kg）、速效钾含量（174.53 mg/kg）显著高于宁乡市和进贤县，而进贤县的土壤有效磷含量（40.27 mg/kg）则显著高于方正县和宁乡市，县域之间土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量的差异可能由多种因素导致。土壤类型和质地、长期施肥和土地利用方式以及区域气候条件（如降水量和温度等）都会影响养分的利用效率和植物对养分的吸收量。同时，与以往数据^[33-34,29]相比，本研究中 2017 年方正县、宁乡市和进贤县的碱解氮、有效磷和速效钾均有一定程度的提高。原因一方面是氮磷钾肥料的长期投入，增加了土壤养分含量^[35]，土壤氮磷钾的表现盈余均显著提高。另一方面，随着生产水平的不断提高，水稻单产不断增加，作物根系生物量的增加对提高土壤养分库容具有更为重要的影响^[35-37]。

基于前人^[38]对中国粮食主产区稻田土壤肥力的研究，1988—2012 年间全国稻田的土壤综合肥力指数均呈显著的增加趋势，与中国粮食主产区稻田土壤肥力指数的均值（0.343）相比，2017 年方正县、宁乡市和进贤县的稻田土壤综合肥力指数分别提高了 83.67%、98.25%、13.70%，其中方正县和宁乡市的土壤综合肥力指数增加的幅度比进贤县较大，可能是由于采用了更为合理和高效的土壤管理和耕作制度，例如配施有机肥和化肥，这不仅提升了土壤肥力质量，还促进了水稻产量的提高^[17]，此外，方正县和宁乡市的土壤基础肥力可能较高，施肥策略更科学（尤其是钾肥的施用），进而表现为土壤肥力指数较高。

3.3 典型县域驱动水稻产量变化的土壤肥力因子分析

不同地域的水稻产量与土壤肥力因子的关系强调了

土壤肥力管理在提高水稻产量中的重要性，并反映了土壤肥力管理策略需要根据具体地区的土壤条件和作物生长需求进行优化。有研究表明氮肥施用量、土壤有机质和全氮含量是影响水稻产量相关指标的重要因素，适量增施氮肥可显著提高相对产量，缩小产量差^[39]。方正县的结果表明，低产水平下土壤有效磷和速效钾是关键因素，而高产水平主要受土壤 pH 值、有机质和碱解氮影响。这可能与该地区土壤特性和作物需求相关，强调了针对性施肥策略的重要性。在宁乡市，土壤碱解氮在中产水平下显著影响水稻产量，而高产水平主要受土壤肥力指数影响，表明碱解氮和土壤综合肥力是该地区水稻生产的关键限制因素。进贤县的情况则更加复杂，土壤有机质、碱解氮和土壤肥力指数在不同产量水平下均有显著影响，突出了有机质的重要性和土壤肥力综合管理的必要性^[40]。土壤有机质可以提高土壤的缓冲能力减缓 pH 值的波动，且含有丰富的吸附位点，与氮、磷、钾元素存在显著的相关关系。不同土壤肥力因子之间的相关性关系密切，共同影响着土壤养分循环^[41]，对于土壤肥力和作物生长具有重要意义。不同施肥策略对土壤肥力的综合影响不同，谢钧宇等^[42]的研究表明，在现有的农田管理条件下，单施有机肥主要通过增强微生物酶活性进而促进复垦土壤肥力的形成，最终提高了作物产量，是维持该复垦区作物高产稳产和培育耕地质量的有效措施。与其他研究相比，本研究的一个显著特点是使用了相对产量作为衡量标准，避免了绝对产量可能受到的种植条件、气候变化等外部因素的影响，从而能更准确地评估土壤肥力因素对水稻产量的影响，这一方法的应用也可以为其他地区的土壤肥力管理提供参考。

不同区域中影响水稻可持续产量指数变化的关键肥力因素差异较大，前人基于随机森林分析各土壤因素对水稻产量变化的相对重要性。王慧等^[43]在中国豫南稻区的研究发现，水稻与紫云英轮作体系中各生育期土壤有效磷含量对水稻产量有较大的贡献。本研究结果与之相同，方正县的土壤有效磷含量对水稻可持续产量指数变化的贡献最大，其次为有机质含量和速效钾含量。而宁乡市和进贤县则分别呈现出土壤碱解氮含量和有机质是影响水稻可持续产量指数变化的关键因子，这与其他人的研究^[34,29]存在较大差异，原因主要与本研究采用了可持续产量指数代替了水稻实际产量有关。该指标是衡量系统是否能持续生产的一个重要参数，其大小与耕作系统的可持续性呈正比^[44]，能够综合反映土地利用系统长期的生产能力。此外，李秀秀等^[45]对红壤丘陵区稻田土壤剖面性质和水稻产量进行线性相关分析和随机森林分析表明，水稻产量与耕作层土壤 pH 值、有机质、全量和有效氮磷钾含量、微生物生物量碳氮以及微生物生物量碳氮比、耕作层厚度均呈显著正相关，这些变量可以解释水稻产量变化的 53.7%。综上，在后续的水稻生产中，建议方正县重点关注土壤有效磷的管理，而宁乡市和进贤县则应注重提升土壤碱解氮和有机质含量。综合分析土壤因素对水稻可持续产量的相对重要性发现，

施肥和年限的增长使得土壤中的磷素累积量逐渐增多,一些典型稻作区域已明显超过土壤对磷素的容纳量,所以应考虑如何提升磷肥的利用效率^[46]。

4 结 论

在典型稻作区的不同县域中,由于稻作模式不同,宁乡市的两季水稻产量显著高于方正县的一季稻产量和进贤县的晚稻季产量,但方正县的相对产量(89.88%)和可持续产量指数(0.86)显著高于宁乡市和进贤县($P<0.05$)。方正县、宁乡市和进贤县的稻田土壤均呈现显著酸化趋势,3个典型县域的土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾及综合肥力指数整体上呈现高产水平显著高于中产和低产水平的趋势。3个典型县域在低、中、高产水平上调控水稻相对产量的肥力因子存在较大差异,随机森林分析得出土壤有效磷、碱解氮、有机质含量分别为方正县、宁乡市、进贤县的水稻可持续产量指数变化的关键土壤肥力因素。在后续的水稻生产中,建议方正县重点关注土壤有效磷的管理,宁乡市和进贤县则应注重提升土壤碱解氮和有机质含量。

[参 考 文 献]

- [1] TAO Y Y, QU H, LI Q J, et al. Potential to improve N uptake and grain yield in water saving ground cover rice production system[J]. *Field Crops Research*, 2014, 168: 101-108.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴—2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [3] XIN F F, XIAO X M, DONG J W, et al. Large increases of paddy rice area, gross primary production, and grain production in Northeast China during 2000—2017[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 135-183.
- [4] CLAUSS K, YAN H M, KUENZER C. Mapping paddy rice in China in 2002, 2005, 2010 and 2014 with MODIS Time Series[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(5): 434.
- [5] DONG J W, XIAO X M, MENARGUEZ M A, et al. Mapping paddy rice planting area in northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and Google Earth Engine[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 185: 142-154.
- [6] LIU X H, DONG G H, ZHANG Y, et al. Contribution to the global warming mitigation of marshlands conversion to croplands in the Sanjiang Plain, Northeast China[J]. *Clean-Soil Air Water*, 2013, 41: 319-324.
- [7] 苏浩, 吴次芳. 东北黑土区耕地系统变化机理[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(6): 243-251.
SU Hao, WU Cifang. Mechanism of cultivated land system change in black soil areas of Northeast China[J]. *Transaction of the Chinese society of Agriculture Engineering*, 2021, 37(6): 243-251. (in Chinese with English abstract)
- [8] 吴艳, 朱莉英, 王发洪, 等. 菇稻不同轮作年限对水稻产量和土壤肥力特征的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(8): 91-96.
WU Yan, ZHU Liying, WANG Fahong, et al. Effects of rotation years in *Stropharia rugosoannulata* with rice system on rice yield and soil fertility[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2023(8): 91-96. (in Chinese with English abstract)
- [9] 曾木祥, 王蓉芳, 彭世琪, 等. 我国主要农区秸秆还田试验总结[J]. *土壤通报*, 2002(5): 336-339.
ZENG Muxiang, WANG Rongfang, PENG Shiqi, et al. Summary of returning straw into field of main agricultural areas in China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002(5): 336-339. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈正, 刘瀛弢, 贺德俊, 等. 中国高标准农田建设现状与发展趋势[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(18): 234-241.
CHEN Zheng, LIU Yingtao, HE Dejun, et al. Current situation and development trend of well-facilitated farmland construction in China[J]. *Transaction of the Chinese society of Agriculture Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(18): 234-241. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张帆. 紫云英与水稻秸秆联合还田下双季稻田土壤氮磷平衡状况及化肥减施策略[J]. *植物营养与肥科学报*, 2021, 27(8): 1376-1387.
ZHANG Fan. Nitrogen and phosphorus surplus of double-rice cropping system under incorporation of Chinese milk vetch and rice straws[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(8): 1376-1387. (in Chinese with English abstract)
- [12] LI Y, WU J, SHEN J, et al. Soil microbial C: N ratio is a robust indicator of soil productivity for paddy fields[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 35266.
- [13] 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 Keyu, XU Minggang, ZHANG Lu, 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. (in Chinese with English abstract)
- [14] LIU Z, ZHOU W, LI S, et al. Assessing soil quality of gleyed paddy soils with different productivities in subtropical China[J]. *Catena*, 2015, 133: 293-302.
- [15] 柳开楼, 韩天富, 黄庆海, 等. 鄱阳湖流域长期施肥下双季稻田的土壤基础地力[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(1): 209-216.
LIU Kailou, HAN Tianfu, HUANG Qinghai, et al. Basic soil productivity in the double rice cropping system under long-term fertilization regimes in the Poyang Lake region, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* 2019, 30(1): 209-216. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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, 2000.
- [17] 柳开楼, 黄晶, 张会民, 等. 基于红壤稻田肥力与相对产

- 量关系的水稻生产力评估[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1425-1434.
- LIU Kailou, HUANG Jing, ZHANG Huimin, et al. Assessment of productivity of red paddy soil based on soil fertility and relative yield[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1425-1434. (in Chinese with English abstract)
- [18] MUHAMMAD Q, HUANG J, WAQAS A, et al. Yield sustainability, soil organic carbon sequestration and nutrients balance under long-term combined application of manure and inorganic fertilizers in acidic paddy soil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2020, 198: 104569.
- [19] SINGH P R, RAO D S K, BHASKARRAO U M, et al. Ustainability index under different management[R]. Hyderabad: Annual Report, 1990.
- [20] 徐建明, 张甘霖, 谢正苗, 等. 土壤质量指标与评价[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [21] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价[J]. *土壤学报*, 1995, 32(4): 362-369.
- SUN Bo, ZHANG Taolin, ZHAO Qiguo. Comprehensive evaluation of soil fertility in the hilly and mountainous region of Southeastern China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(4): 362-369. (in Chinese with English abstract)
- [22] ZHANG T, YANG X, WANG H, et al. Climatic and technological ceilings for Chinese rice stagnation based on yield gaps and yield trend pattern analysis[J]. *Global change biology*, 2014, 20(4): 1289-1298.
- [23] CHEN Y, WANG P, ZHANG Z, et al. Rice yield development and the shrinking yield gaps in China, 1981–2008[J]. *Regional Environmental Change*, 2017, 17: 2397-2408.
- [24] 武红亮, 王士超, 槐圣昌, 等. 近 30 年来典型黑土肥力和生产力演变特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1456-1464.
- WU Hongliang, WANG Shichao, HUAI Shengchang, et al. Evolutionary characteristics of fertility and productivity of typical black soil in recent 30 years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1456-1464. (in Chinese with English abstract)
- [25] 周玲红, 刘淑军, 刘立生, 等. 东北典型县域稻田不同肥力土壤剖面肥力变化特征及验证[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(5): 148-157.
- ZHOU Linghong, LIU Shujun, LIU Lisheng, et al. Characteristics and verification of soil fertility changes in different fertility soil profiles of paddy fields in typical counties of northeast China[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2023(5): 148-157. (in Chinese with English abstract)
- [26] 刘晓利, 何园球, 李成亮, 等. 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[J]. *土壤学报*, 2008, 45(3): 459-465.
- LIU Xiaoli, HE Yuanqiu, LI Chengliang, et al. Distribution and physical properties of soil water-stable aggregates in red soils different in land use and soil fertility[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(3): 459-465. (in Chinese with English abstract)
- [27] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [28] 武红亮, 王士超, 闫志浩, 等. 近 30 年我国典型水稻土肥力演变特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1416-1424.
- WU Hongliang, WANG Shichao, YAN Zhihao, et al. Evolution characteristics of fertility of typical paddy soil in China in recent 30 years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1416-1424. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王远鹏, 黄晶, 孙钰翔, 等. 近 35 年红壤稻区土壤肥力时空演变特征——以进贤县为例[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(16): 3294-3306.
- WANG Yuanpeng, HUANG Jing, SUN Yuxiang, et al. Spatiotemporal variability characteristics of soil fertility in red soil paddy region in the past 35 Years——A case study of Jinxian county[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(16): 3294-3306. (in Chinese with English abstract)
- [30] 刘威, 耿明建, 秦自果, 等. 种植绿肥与稻秸协同还田对单季稻田土壤有机碳库和酶活性的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(7): 125-133.
- LIU Wei, GENG Mingjian, QIN Ziguang, et al. Effects of co-incorporation of green manure planting and rice straw on soil organic carbon pool and soil enzyme activity in a mono-rice cropping system[J]. *Transaction of the Chinese society of Agriculture Engineering*, 2020, 36(7): 125-133. (in Chinese with English abstract)
- [31] 邱建军, 王立刚, 李虎, 等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(1): 154-161.
- QIU Jianjun, WANG Ligang, LI Hu, et al. Modeling the impacts of soil organic carbon content of croplands on crop yields in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(1): 154-161. (in Chinese with English abstract)
- [32] 谢坚, 郑圣先, 杨曾平, 等. 湖南双季稻种植区不同生产力水稻土质量综合评价[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(23): 4840-4851.
- XIE Jian, ZHENG Shengxian, YANG Zengping, et al. Comprehensive evaluation of soil quality in different productive paddy soils in typical double-rice cropping regions of Hunan province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(23): 4840-4851. (in Chinese with English abstract)
- [33] 李红莉, 张卫峰, 张福锁, 等. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5): 1136-1143.

- LI Hongli, ZHANG Weifeng, ZHANG Fusuo, et al. Chemical fertilizer use and efficiency change of main grain crops in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(5): 1136-1143. (in Chinese with English abstract)
- [34] 孙耿, 孙梅, 周峻宇, 等. 40年来宁乡市稻田土壤肥力时空变异分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(6): 41-49.
- SUN Geng, SUN Mei, ZHOU Junyu, et al. Spatio-temporal variation of paddy soil fertility in Ningxiang city during the past 40 years[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2020(6): 41-49. (in Chinese with English abstract)
- [35] ZHANG B, PANG C, QIN J, et al. Rice straw incorporation in winter with fertilizer-N application improves soil fertility and reduces global warming potential from a double rice paddy field[J]. *Biology and fertility of soils*, 2013, 49: 1039-1052.
- [36] ZHANG P, CHEN X, WEI T, et al. Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 160: 65-72.
- [37] 肖小平, 唐海明, 聂泽民, 等. 冬季覆盖作物残茬还田对双季稻田土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(10): 1202-1208.
- XIAO Xiaoping, TANG Haiming, NIE Zemin, et al. Effects of winter cover crop straw recycling on soil organic carbon and soil carbon pool management index in paddy fields[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(10): 1202-1208. (in Chinese with English abstract)
- [38] 李建军, 徐明岗, 辛景树, 等. 中国稻田土壤基础地力的时空演变特征[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(8): 1510-1519.
- LI Jianjun, XU Minggang, XIN Jingshu, et al. Spatial and temporal characteristics of basic soil productivity in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(8): 1510-1519. (in Chinese with English abstract)
- [39] 申哲, 韩天富, 黄晶, 等. 中国水稻相对产量差时空变异及其对氮肥的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(5): 789-801.
- SHEN Zhe, HAN Tianfu, HUANG Jing, et al. Spatio-temporal variation of relative yield gap of rice and its response to nitrogen fertilizer in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(5): 789-801. (in Chinese with English abstract)
- [40] WANG H, YAO L, HUANG B, et al. An integrated approach to exploring soil fertility from the perspective of rice (*Oryza sativa* L.) yields[J]. *Soil Tillage Research*, 2019, 194: 104322.
- [41] 蔡祖聪. 浅谈“十四五”土壤肥力与土壤养分循环分支学科发展战略[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1128-1136.
- CAI Zucong. Discussion on the strategies for development of the subdiscipline of soil fertility and soil nutrient cycling for the 14th Five-Year Plan[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1128-1136. (in Chinese with English abstract)
- [42] 谢钧宇, 张慧芳, 罗云琪, 等. 连续7年施肥提升复垦土壤肥力提高玉米产量的驱动因子[J]. *农业工程学报*: 2024, 40(1): 142-152.
- XIE Junyu, ZHANG Huifang, LUO Yunqi, et al. Driving factors of improving fertility and maize yields in the reclaimed soils by seven years of applied organic manure and chemical fertilizer[J]. *Transaction of the Chinese society of Agriculture Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(1): 142-152. (in Chinese with English abstract)
- [43] 王慧, 张琳, 常单娜, 等. 豫南紫云英水稻轮作区减施不同比例氮肥对水稻养分吸收和转运的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(7): 1194-1207.
- WANG Hui, ZHANG Lin, CHANG Danna, et al. Nutrient absorption and transport characteristics of rice under different nitrogen reduction ratios in a Chinese milk vetch and rice rotation system in southern Henan Province, China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(7): 1194-1207. (in Chinese with English abstract)
- [44] 李忠芳, 徐明岗, 张会民, 等. 长期施肥和不同生态条件下我国作物产量可持续性特征[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1264-1269.
- LI Zhongfang, XU Minggang, ZHANG Huimin, et al. Sustainability of crop yields in China under long-term fertilization and different ecological conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5): 1264-1269. (in Chinese with English abstract)
- [45] 李秀秀, 涂田华, 柳开楼, 等. 红壤丘陵区稻田土壤剖面肥力特征及其与产量的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(8): 1390-1399.
- LI Xiuxiu, TU Tianhua, LIU Kailou, et al. The profile fertility characteristics of paddy fields and their relationship with yields in red soil hilly region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(8): 1390-1399. (in Chinese with English abstract)
- [46] 都江雪, 柳开楼, 黄晶等. 中国稻田土壤有效磷时空演变特征及其对磷平衡的响应[J]. *土壤学报*, 2021, 58(2): 476-486.
- DU Jiangxue, LIU Kailou, HUANG Jing, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of soil available phosphorus and its response to phosphorus balance in paddy soil in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(2): 476-486. (in Chinese with English abstract)

Analysis of the key soil fertility factors of rice yield variation in different counties

ZHANG Chu¹, HUANG Jing¹, SHEN Zhe¹, LI Jiwen¹, HAN Tianfu³, AI Dong¹, YAN Jun¹, SUN Geng⁴, CHEN Jin⁵, LIU Kailou^{2*}, ZHANG Huimin^{1*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Jiangxi Institute of Red Soil and Germplasm Resources, Nanchang 331717, China; 3. College of Agriculture, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China; 4. Hunan Institute of Soil and Fertilizer, Changsha 410125, China; 5. Soil and Fertilizer & Resources and Environment Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330200, China)

Abstract: Soil fertility is one of the most important influencing factors on the rice yield. Among them, the relationship between soil physical and chemical properties and rice yield can greatly contribute to rice production and fertilizer cultivation in different regions. This study aims to analyze the absolute rice yield, relative yield, and sustainable yield index on the county scale. The research area was also selected as Fangzheng County in northeast China, Ningxiang City in the middle reaches of the Yangtze River, and Jinxian County in the middle and lower reaches of the Yangtze River. The key factors of soil fertility were then determined to affect the rice yield in different regions. The results show that the two-season rice yield (9414.89 kg/hm²) in Ningxiang City was significantly higher than that in Fangzheng County (8224.31 kg/hm²) and Jinxian County (5691.38 kg/hm²) in the late season, due to different cropping patterns. But the average relative yield in Fangzheng County (89.88%) was significantly higher than that in Ningxiang City (73.84%) and Jinxian County (65.67%). The sustainable yield index of Fangzheng County was also higher (0.86), indicating high yield and stability. Furthermore, the low, medium, and high yield levels were calculated using relative yields. Therefore, the soil fertility index and integrated fertility index of Fangzheng County, Ningxiang City, and Jinxian County were higher under the high yield level. Among them, the soil organic matter index, available nitrogen index, and integrated fertility index of Fangzheng County at the high yield level increased by 25.50%, 31.17%, and 25.45%, respectively, compared with the low yield level. The soil available phosphorus increased by 35.41% in Ningxiang City, compared with the low yield level. The soil organic matter, available nitrogen, available phosphorus, available potassium, and integrated fertility index of Jinxian County showed that the high yield level was significantly higher than the middle and low yield levels, which increased 13.28%-27.28%, 21.45%-34.82%, 62.42%-111.90%, 29.51%-59.51%, and 34.21%-75.86%, respectively. There was no significant difference in the soil pH value among different yield levels. There was a variation in the fertility influencing factors on the relative yield in different counties. The soil's available phosphorus, nitrogen, and organic matter content were the key fertility factors for the sustainable yield index of rice in Fangzheng County, Ningxiang City, and Jinxian County, respectively. Some suggestions were provided for soil fertilizer cultivation in the high and stable rice yield at the county scale. In Fangzheng County, the soil available phosphorus shared the largest relative contribution to the rice sustainable yield index (8.68%), followed by organic matter and available potassium. In Ningxiang, the relative contribution of soil available nitrogen to rice sustainable yield index was 12.92%, followed by pH. In Jinxian County, the soil organic matter shared the greatest impact on the rice sustainable yield index (15.37%), followed by available nitrogen and available phosphorus. As such, there was the highest influencing level in the sustainable production of rice available phosphorus in the soil index, followed by available potassium and available nitrogen. Therefore, Fangzheng County should be focused on the soil available phosphorus in future rice production. While Ningxiang and Jinxian County should increase the soil available nitrogen and organic matter contents.

Keywords: soils; fertility; rice; yield; typical counties; sustainable yield index