

鄱阳湖流域长期施肥下双季稻田的土壤基础地力

柳开楼^{1,2} 韩天富¹ 黄庆海² 余喜初² 李大明² 马常宝³ 薛彦东³ 张会民^{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; ³农业农村部耕地质量监测保护中心,北京 100125)

摘要 为探讨鄱阳湖流域不同施肥措施的土壤基础地力变化规律,基于长期施肥定位试验(始于1981年)采集定位30年时的不施肥(CK)、施用氮磷钾肥(NPK)和氮磷钾肥与有机肥配施(NPKM)土壤,于2012—2014年进行连续3年的施肥和不施肥试验,分析水稻产量和土壤基础地力贡献率的差异及关键影响因子。结果表明:不论施肥与否,3年的水稻产量均表现出NPKM处理显著高于NPK和CK处理,尤其是在不施肥条件下,NPKM处理的年产量分别比CK和NPK处理增加37.7%~143.9%和20.8%~66.7%。3年间,CK、NPK和NPKM处理的土壤基础地力贡献率分别为41.8%~53.1%、45.2%~62.6%和59.1%~88.1%,且NPKM处理的土壤基础地力贡献率均显著高于NPK和CK处理。进一步分析发现,土壤有机质和有机碳平衡量与土壤基础地力贡献率呈显著正相关。总之,在鄱阳湖流域的双季稻田,长期有机无机肥配施有利于该地区土壤基础地力的提升,且土壤有机质和有机碳平衡是土壤基础地力变化的关键因子。

关键词 鄱阳湖流域; 双季稻; 长期施肥; 土壤基础地力; 土壤有机质

Basic soil productivity in the double rice cropping system under long-term fertilization regimes in the Poyang Lake region, China. LIU Kai-lou^{1,2}, HAN Tian-fu¹, HUANG Qing-hai², YU Xi-chu², LI Da-ming², MA Chang-bao³, XUE Yan-dong³, ZHANG Hui-min^{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*Jiangxi Institute of Red Soil/National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330046, China*; ³*Center of Cultivated Land Quality Monitoring and Protection, Ministry of Agricultural and Rural Affairs, Beijing 100125, China*).

Abstract: We aimed to explore changes in basic soil productivity (BSP) under different fertilization regimes in the Poyang Lake region, Jiangxi Province, China. Soil samples were collected from a long-term fertilization experiment (since 1981) that included treatments of no fertilization (CK), chemical fertilization (NPK), and combined chemical and organic fertilization (NPKM). Then, a three-year pot experiment (from 2012 to 2014) with double rice cropping was conducted with two different fertilization regimes (no fertilization, F₀; fertilization, F₁) using CK, NPK and NPKM soils. Grain yield and BSP were analyzed among soils with different fertilization regimes to identify the key factors driving changes in BSP. Results showed that grain yields in NPKM soil were higher than in NPK and CK soils regardless of fertilization in the pot experiment. Under the F₀ condition, annual grain yields of NPKM soil were 37.7%–143.9% and 20.8%–66.7% higher than CK and NPK soils, respectively. The BSP values of CK, NPK and NPKM soils in three years were 41.8%–53.1%, 45.2%–62.6% and 59.1%–88.1%, respectively. NPKM soil had significantly higher BSP

本文由国家重点研发计划项目(2016YFD0300901, 2016YFD0200101)、江西省水稻产业技术体系项目(JXARS-02-06)和公益性行业(农业)科研专项(201503122)资助。This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300901, 2016YFD0200101), the Innovation Plan of Scientific and Research in Modern Agriculture, Jiangxi Province, China (JXARS-02-06), and the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201503122).

2018-05-31 Received, 2018-12-06 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanghuimin@caas.cn

than NPK and CK soils. Furthermore, there were significant positive correlations between soil organic matter and BSP as well as between organic carbon balance and BSP. These results suggested that long-term application of chemical and organic fertilizers could improve BSP in the double rice cropping system of the Poyang Lake region. In addition, soil organic matter and organic carbon balance are important factors for improving BSP in this region.

Key words: Poyang Lake region; double rice cropping; long-term fertilization; basic soil productivity; soil organic matter.

不同于土壤肥力的概念,土壤基础地力是指在特定的立地条件、土壤剖面理化性状和农田基础设施建设水平下,经过多年水肥培育后,当季旱地无水肥投入、水田无养分投入时的土壤生产能力^[1]。在化肥施用量相同的情况下,提高土壤基础地力可以明显促进作物增产^[2]。因此,作为农田生态系统生产力的重要指标之一,土壤基础地力可以显著影响作物产量的提升潜力^[3]。

目前,土壤基础地力的表征指标主要有:基础地力产量(土壤在不施肥情况下的作物产量)^[4]、基础地力贡献率(土壤在不施肥情况下的作物产量占施肥情况下作物产量的百分比)^[5]和土壤生产力指数(土壤 pH、有机质、氮磷钾养分、黏粒含量等理化性质的加权平均)^[6]。而有关基础地力的研究方法主要有 DSSAT 模型法^[7]、生产力指数法^[8]和田间试验研究法(在普通大田或盆栽试验中设置施肥与不施肥处理)^[9]等。然而,通过 DSSAT 模型分析土壤基础地力贡献率需要庞大的气象数据支撑,且需要对品种的遗传属性进行调试,过程比较复杂^[7]。生产力指数则需要对土壤理化性质数据进行加权分析,且在不同土壤类型上应用之前还需进行相关的参数修订和调试^[8]。而通过采集长期定位试验的土壤进行盆栽则可以较为简便地获得各处理的基础地力^[9]。但是,由于前季肥料产生的养分后效和年际间气候变异对水稻产量的影响较大^[10],进行 1 年 2 季的短期试验研究可能不能准确表征各处理的土壤基础地力,因此,有关长期施肥处理的土壤基础地力变化还需要深入研究。

鄱阳湖流域是我国南方地区重要的水源地和水稻生产基地^[11],在该地区的农田生态系统中,由于高产水稻(*Oryza sativa*)品种的大力推广,以及不合理施肥和粗放管理措施的影响,导致该地区农田生态系统中的土壤基础地力不断下降,已经严重影响了作物增产^[12]。同时,在高产目标的驱动下,土壤基础地力的下降将大幅增加化肥投入量,而提升基础地力可以有效降低水稻生产系统对外源肥料的依

率^[2]。因此,面对农业部提出的在 2020 年实现化肥“零增长”目标,系统研究土壤基础地力变化特征对该流域的化肥减施增效和农田面源污染风险评估意义重大,但目前有关施肥措施对该区域土壤基础地力的影响还不明确。

在长期定位试验中,不同的施肥处理可以较好地代表一个地区不同施肥管理下的土壤肥力水平^[13]。因此,研究各施肥处理的土壤基础地力变化规律可以有效指导当地稻农科学施肥。本研究基于鄱阳湖流域典型的双季稻长期定位试验,于试验 30 年时采集不同施肥处理的土壤,通过设置施肥与不施肥处理的盆栽试验^[9],连续进行 3 年 6 季早晚稻的水稻种植;分析长期不同施肥模式下水稻产量和土壤基础地力贡献率,并结合土壤肥力指标和养分盈余特征进一步探讨影响基础地力提升的关键因子,以期为该地区双季稻田的地力培育提供理论基础和技术支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

双季稻田长期定位试验始于 1981 年,位于江西省进贤县张公镇江西省红壤研究所内(28°35′24″N, 116°17′60″E),该区域位于鄱阳湖流域,属于中亚热带气候,年均气温 18.1 °C,≥10 °C 积温 6480 °C,年降雨量 1537 mm,年蒸发量 1150 mm,无霜期约为 289 d,年日照时数 1950 h。试验地土壤为红壤性水稻土,试验前耕层土壤性质为:pH 5.4,有机碳 16.3 g·kg⁻¹,全氮 1.49 g·kg⁻¹,全磷 0.48 g·kg⁻¹,全钾 10.4 g·kg⁻¹,碱解氮 144 mg·kg⁻¹,有效磷(NaHCO₃-P) 4.15 mg·kg⁻¹,速效钾(NH₄OAc-K) 80.52 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

本研究选取 3 个处理,分别为:CK,不施肥处理;NPK,施用氮、磷、钾化肥,早晚稻季的 N、P₂O₅和 K₂O 分别为 90、45 和 75 kg·hm⁻²;NPKM,施用氮、磷、钾化肥和有机肥,早晚稻季的 N、P₂O₅和 K₂O 分

别为 90、45 和 75 kg · hm⁻², 其中早稻配施紫云英, 晚稻配施鲜猪粪, 用量均为 22500 kg · hm⁻², 其中紫云英和鲜猪粪的含水量分别为 70% 和 60%; 每个处理 3 次重复, 小区面积为 46.67 m². 烘干后紫云英有机碳、氮、磷、钾含量分别为 46.7%、0.8%、0.2%、0.7%; 烘干后猪粪有机碳、氮、磷、钾含量分别为 34.0%、1.2%、0.9%、1.0%. 具体的试验设计和试验描述见余喜初等^[14] 的研究.

于 2011 年的冬季采集 CK、NPK、NPKM 处理的耕层(0~20 cm) 土壤, 风干, 分别在 3 个处理上再设置不施肥(F₀) 和施肥(F₁) 的盆栽试验. 每个处理 3 次重复, 共 18 盆, 每盆装土 15 kg, 每盆 3 穴水稻秧苗. 盆栽试验在露天进行, 试验时间为 2012 年至 2014 年, 共进行 3 年 6 季水稻种植. 为防止鸟类等野生动物干扰, 试验区四周及离地面 2.5 m 上方用铁丝网覆盖. 盆规格: 上口直径 30 cm, 下底直径 25 cm, 盆高 35 cm. 水稻品种与长期定位试验相同, 早稻为‘优 I 156’, 晚稻为‘湘丰优 9 号’. 盆栽试验开始时各处理的土壤肥力情况见表 1.

由于土培作物根系养分吸收区域小, 本研究盆栽试验 CK、NPK、NPKM 在施肥(F₁) 处理下的施肥量为常规大田施肥量(为准确反映和指导当前的水稻生产, 早晚稻季的 N、P₂O₅ 和 K₂O 用量均为 150、90 和 135 kg · hm⁻²) 的 3 倍, 每季每盆施 N 3.38 g (含 N 46% 的尿素 7.35 g)、P₂O₅ 2.03 g (含 P₂O₅ 12% 的钙镁磷肥 16.92 g)、K₂O 3.04 g (含 K₂O 60% 的氯化钾 5.07 g). 其中, 氮肥 30% 作基肥, 30% 在返青期施用, 40% 在分蘖盛期施用; 钾肥 50% 在返青期施用, 50% 在分蘖盛期施用; 磷肥全部作基肥. 施肥方法: 钙镁磷肥在盆钵装土前混入土壤, 拌匀, 以后则是在每季水稻移栽前将土壤松动, 均匀施入钙镁磷肥, 然后拌匀; 尿素和氯化钾则是将肥料溶解成液体后均匀施入土壤中. 水分管理采取人工灌溉, 在分蘖末期及时搁田, 后期干湿交替. 注意防治病虫害和杂草.

表 1 双季稻田盆栽试验供试土壤化学性质(长期定位 30 年时)

Table 1 Soil fertility of double rice field under different fertilizations in the pot experiment (at the 30th year of long-term experiment, mean±SD, n=3)

处理 Treatment	pH	OM (g · kg ⁻¹)	TN (g · kg ⁻¹)	TP (g · kg ⁻¹)	TK (g · kg ⁻¹)	AN (mg · kg ⁻¹)	AP (mg · kg ⁻¹)	AK (mg · kg ⁻¹)
CK	5.15±0.06b	31.84±6.11b	1.95±0.28b	0.55±0.33c	12.38±1.33a	119.41±25.05b	6.55±3.90c	60.67±11.39b
NPK	5.17±0.17b	34.18±6.07b	2.12±0.65b	0.64±0.18b	12.40±1.70a	132.21±10.35b	13.43±3.32b	72.33±10.83a
NPKM	5.30±0.06a	40.44±0.60a	2.60±0.82a	1.28±0.36a	12.36±2.61a	153.20±21.33a	67.72±21.33a	73.33±15.16a

OM: 有机质 Organic matter; TN: 全氮 Total N; TP: 全磷 Total P; TK: 全钾 Total K; AN: 速效氮 Available N; AP: 有效磷 Available P; AK: 速效钾 Available K. 不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05) Different lowercase letters meant significant difference among different treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 籽粒产量 在盆栽试验中, 每季水稻成熟时, 将植株齐地收割然后脱粒、晾晒和称量. 年产量为早稻与晚稻产量的总和.

1.3.2 基础地力贡献率 土壤基础地力贡献率 = 不施肥的水稻产量/施肥的水稻产量×100%.

1.3.3 长期试验各处理的土壤肥力 在 2011 年采集土壤后, 每个小区同时采集 1 个混合土壤样品, 风干过筛后测定土壤肥力指标, 土壤肥力指标的测定采用常规方法分析^[15]: 其中土壤 pH 为 1:2.5 土水比浸提, 用 Mettler-toledo320 pH 计测定. 土壤有机质采用 H₂SO₄-K₂Cr₂O₇ 外加热法; 土壤全氮采用硫酸消煮-半微量凯氏定氮仪(SKD-2000, 中国)测定; 速效氮采用碱解扩散法测定; 土壤全磷采用 NaOH 碱融-钼锑抗比色法; 有效磷采用 NaHCO₃ 提取-钼锑抗比色法, 并采用紫外分光光度计(UV-2450, 日本)测定; 土壤全钾采用 NaOH 碱融, 速效钾采用 NH₄OAc 浸提, 采用火焰光度计(FP6410, 中国)测定.

1.3.4 氮磷钾养分的表观平衡 采用表观平衡法计算氮磷钾的养分平衡, 即养分投入量与养分支出量的差值, 正值表示盈余, 负值表示亏缺. 养分和有机碳投入仅包括化肥、有机肥和上季根茬等带入的养分和有机碳, 未考虑因降水或灌溉、大气沉降以及种子等带入的养分; 养分和有机碳支出仅包括水稻籽粒和秸秆收获而带出的养分和有机碳, 未包括因淋洗、挥发和反硝化等过程导致的养分和有机碳损失^[16].

有机碳平衡量的计算公式^[17]:

$$C_b = Y_R \times (1 - W_R) \times C_R + AM \times (1 - W_M) \times C_M - C_S \times 0.045$$

式中: C_b 为有机碳平衡量(kg · hm⁻²); Y_R 为根茬生物量(kg · hm⁻²); W_R 和 W_M 分别为根茬和有机肥的含水量(%); AM 为有机肥用量(kg · hm⁻²); C_R 和 C_M 分别为根茬和有机肥的有机碳含量(g · kg⁻¹); C_S 为土壤有机碳储量(kg · hm⁻²); 0.045 为有机碳矿化系数.

1.4 数据处理

所有数据采用 SPSS 软件进行分析.采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 比较不同数据组间的差异 ($\alpha=0.05$) 相关分析采用 SAS 9.1 软件进行,并采用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相关关系,土壤肥力指标和养分盈余与土壤基础地力贡献率的相互关系采用冗余分析 (RDA) 方法进行分析,用 SigmaPlot 12.0 作图.其余图件采用 Origin 8.1 软件作图.图表中数值为平均值 \pm 标准差 ($n=3$).

2 结果与分析

2.1 盆栽试验中长期施肥处理的水稻产量变化

不论施肥与否 (图 1),各处理在 3 年盆栽试验中的产量均表现出 NPKM > NPK > CK,且各处理之间差异显著.在不施肥条件下,2012、2013 和 2014 年 NPKM 处理的年产量分别比 NPK 处理提高了 66.7%、20.8% 和 56.0%,比 CK 增加了 143.9%、37.7% 和 83.3%;且 NPK 处理的年产量也显著高于 CK.而在施肥条件下,除了 2013 年 NPKM 和 NPK 处理不存在显著差异外,2012 和 2014 年中 NPKM 处理的年产量均显著高于 NPK 处理,增幅分别为 18.8% 和 28.6%;但是,与 CK 相比,NPK 处理的年产量

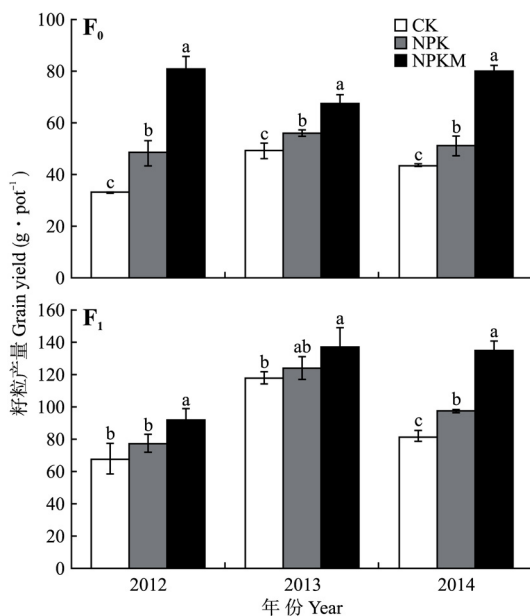


图 1 盆栽试验中不同施肥处理的水稻产量变化

Fig.1 Changes of rice grain yield under different fertilization treatments in the pot experiment.

F₀: 不施肥 No fertilizer application; F₁: 施肥 Fertilizer application. 不同小写字母表示同一年不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different lower-case letters meant significant difference among different treatments in the same year at 0.05 level. 下同 The same below.

量仅表现出 2014 年显著增加.

2.2 盆栽试验中长期施肥处理的土壤基础地力贡献率变化

在盆栽试验中,各年份的土壤基础地力贡献率波动较大,2012 年为 49.5%~88.1%,2013 年为 41.8%~49.4%,2014 年为 52.5%~59.1%.与 2012 年相比,2013 和 2014 年的基础地力贡献率明显下降.但各处理的土壤基础地力贡献率均表现出 NPKM 处理显著高于 NPK 和 CK 的趋势 (图 2),与 CK 相比,2012、2013 和 2014 年 NPKM 处理的土壤基础地力贡献率分别增加了 77.7%、18.2% 和 11.3%,与 NPK 处理相比,NPKM 处理的土壤基础地力贡献率分别增加了 40.7%、9.2% 和 12.7%.但 NPK 处理除了 2012 年的土壤基础地力贡献率显著高于 CK 外,2013 和 2014 年均与 CK 无显著差异.

2.3 长期施肥处理的土壤基础地力贡献率与土壤肥力因子的相互关系

由表 2 可知,在 2012 年,土壤基础地力贡献率与有机质和全磷呈显著正相关,在 2013 年,土壤基础地力贡献率与土壤有机质呈显著正相关,在 2014 年,土壤有机质和 pH 是影响土壤基础地力贡献率的主要因子.虽然不同年份存在差异,但 3 年中土壤有机质均是影响土壤基础地力贡献率的关键因子.

2.4 长期施肥处理的土壤基础地力贡献率与养分及有机碳平衡的相互关系

由表 3 可知,所有处理的钾素养分和 CK 的氮磷养分均为亏缺,而 NPK 和 NPKM 处理的氮磷养分均为盈余状态.由于 NPKM 处理的氮磷养分投入较高,其氮磷养分的平衡量分别比 NPK 处理增加了 10.7、15.8 和 596.0 kg · hm⁻².同时,NPKM 处理的有机碳平衡量显著高于 CK 和 NPK 处理 (图 3).

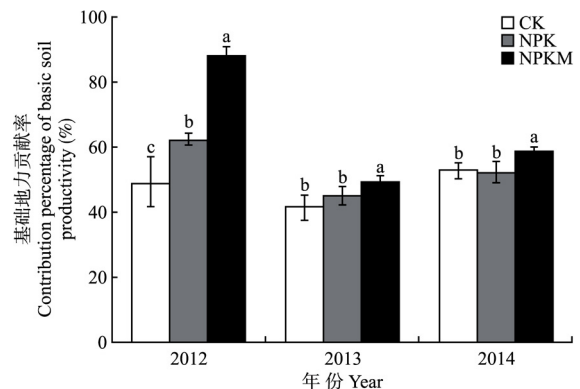


图 2 盆栽试验中不同施肥处理土壤基础地力贡献率

Fig.2 Contribution percentage of basic soil productivity under different fertilization treatments in the pot experiment.

表 2 不同施肥处理土壤肥力因子与土壤基础地力贡献率的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between soil fertility factors and contribution percentage of basic soil productivity under different fertilization treatments

	pH	OM	TN	TP	TK	AN	AP	AK	BSP ₁	BSP ₂
OM	-0.075									
TN	0.642	-0.114								
TP	0.654	0.195	0.843**							
TK	0.378	-0.513	0.864**	0.564						
AN	0.575	0.006	0.838**	0.893**	0.654					
AP	0.415	0.382	0.833**	0.881**	0.575	0.775*				
AK	0.248	0.27	-0.236	0.175	-0.385	0.055	-0.081			
BSP ₁	0.515	0.704*	0.388	0.674*	-0.098	0.608	0.62	0.335		
BSP ₂	0.501	0.715*	0.562	0.556	0.136	0.566	0.62	-0.159	0.833**	
BSP ₃	0.741*	0.765*	0.486	0.606	0.052	0.516	0.492	-0.01	0.793*	0.817**

BSP₁、BSP₂和BSP₃分别为2012、2013和2014年的土壤基础地力贡献率 BSP₁,BSP₂ and BSP₃ were contribution percentage of basic soil productivity in 2012, 2013 and 2014. * P<0.05; ** P<0.01. 下同 The same below.

表 3 不同施肥处理养分平衡

Table 3 Nutrient balance under different fertilization treatments

指标 Index	处理 Treatment	N	P	K
投入 Input	CK	7.17±0.60c	2.52±0.27c	30.68±1.09c
	NPK	188.09±1.44b	42.73±0.45b	149.22±2.59b
(kg·hm ⁻²)	NPKM	266.02±0.95a	86.09±0.39a	223.42±1.57a
输出 Output	CK	97.85±10.65c	23.25±1.75c	123.37±13.49c
	NPK	136.00±0.74b	34.63±2.31b	172.70±8.99b
(kg·hm ⁻²)	NPKM	203.19±8.16a	62.19±4.06a	253.20±15.11a
平衡 Balance	CK	-90.69±10.75c	-20.72±1.60c	-92.70±12.41b
	NPK	52.09±1.75b	8.10±2.01b	-23.48±6.63a
(kg·hm ⁻²)	NPKM	62.83±7.51a	23.91±4.44a	-29.78±16.44a

相关分析表明(表4),各处理的氮磷钾和有机碳平衡量与土壤基础地力贡献率存在密切相关,但不同年份间存在明显差异.在2012年,与土壤基础地力贡献率显著正相关的平衡量指标为氮磷养分和有机碳;在2013年,则表现出磷养分和有机碳平衡量与土壤基础地力贡献率显著正相关;而在2014

年,则呈现出有机碳平衡量与土壤基础地力贡献率显著正相关.

2.5 影响土壤基础地力贡献率的关键因素

RDA 结果表明,轴1和轴2分别解释了土壤基础地力贡献率变异程度的86.2%和3.0%(图4).由表5可知,有机碳平衡量、氮磷平衡量、土壤有机质

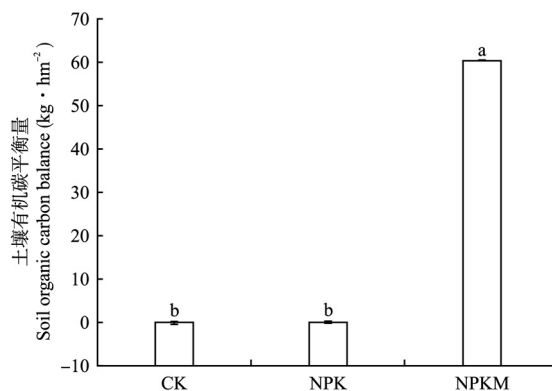


图 3 不同施肥处理土壤有机碳平衡量
Fig.3 Balance of soil organic carbon under different fertilization treatments.

表 4 不同施肥处理养分和有机碳平衡与土壤基础地力贡献率的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between nutrient, organic carbon balance and contribution percentage of basic soil productivity under different fertilization treatments

指标 Index	平衡 Balance	平衡				土壤基础地力贡献率 Contribution percentage of basic soil productivity	
		BN	BP	BK	BOC	2012	2013
平衡	BP	0.943**					
Balance	BK	0.922**	0.880**				
	BOC	0.551	0.764*	0.406			
	2012	0.761*	0.887**	0.639	0.916**		
土壤基础地力贡献率 Contribution percentage of basic soil productivity	2013	0.638	0.773*	0.66	0.698*	0.833**	
	2014	0.378	0.58	0.256	0.827**	0.793*	0.817**

BN、BP、BK、BOC 分别为氮磷钾和有机碳平衡量 BN, BP, BK and BOC were the balance of N, P, K and organic carbon. 下同 The same below.

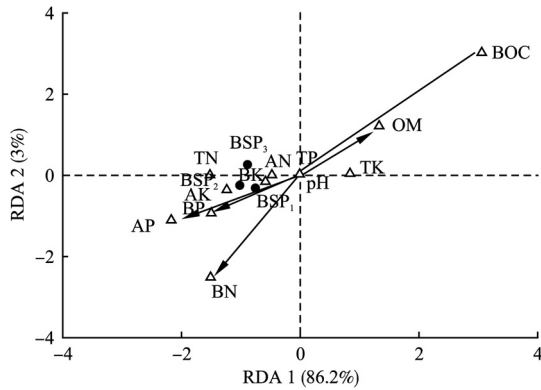


图4 土壤基础地力贡献率与土壤肥力因子和养分及有机碳平衡量之间的 RDA 分析

Fig.4 RDA analysis of relationship between soil fertility factors and nutrient ,organic carbon balance with contribution percentage of basic soil productivity.

OM: 有机质 Organic matter; TN: 全氮 Total N; TP: 全磷 Total P; TK: 全钾 Total K; AN: 速效氮 Available N; AP: 有效磷 Available P; AK: 速效钾 Available K. BN、BP、BK、BOC 分别为氮磷钾和有机碳平衡量 BN, BP, BK and BOC were the balance of N, P, K and organic carbon. BSP₁、BSP₂和 BSP₃ 分别为 2012、2013 和 2014 年土壤基础地力贡献率 BSP₁, BSP₂ and BSP₃ were contribution percentage of basic soil productivity in 2012, 2013 and 2014.

表5 土壤基础地力贡献率与土壤肥力因子和养分及有机碳平衡量的显著性分析

Table 5 Significance analysis on the correlation of soil fertility factors and nutrient ,organic carbon balance with contribution percentage of basic soil productivity

	RDA ₁	RDA ₂	R ²	P
BN	-0.869	-0.321	0.975	0.001
BP	-0.854	-0.221	0.998	0.001
BK	-0.570	-0.822	0.947	0.207
BOC	0.999	0.537	0.998	0.001
PH	-0.997	-0.076	0.349	0.268
OM	0.986	0.367	0.436	0.009
TN	-0.951	-0.308	0.257	0.378
TP	-0.993	-0.118	0.651	0.219
TK	-0.086	-0.996	0.012	0.906
AN	-0.948	-0.317	0.437	0.164
AP	-0.789	-0.249	0.523	0.001
AK	-0.825	-0.565	0.189	0.539

和有效磷均可以显著影响土壤基础地力贡献率,其中有机碳平衡量和土壤有机质与土壤基础地力贡献率呈正相关关系(R^2 均大于 0.90),表明有机碳平衡量和土壤有机质的增加是提高土壤基础地力贡献率的关键因子。

3 讨 论

3.1 土壤基础地力贡献率对不同施肥处理的响应 在鄱阳湖流域 3 年 6 季的盆栽试验表明,有机

无机肥配施是提高该区域农田系统中双季稻产量的最佳施肥措施,即使在连续 3 年不施肥的盆栽条件下,NPKM 处理仍表现出明显的高产优势,这主要是由于长期有机无机肥配施显著提升了土壤的养分库容^[18]、改善了物理结构^[19]和微生物特性^[20],从而有效保障了作物的养分需求和生长环境。对于 NPK 处理,虽然连续进行 3 年不施肥的盆栽条件下其产量显著高于 CK,但是在施肥的盆栽条件下,则呈现出前 2 年 NPK 处理的产量与 CK 差异不显著,原因可能与该地区的水热资源丰富^[21],水稻在生长中可以从外界获取较充足的养分,即在相同的化肥施用条件下,NPK 处理和 CK 的水稻均可以达到相同的生产目标,这也间接说明对于中低肥力的土壤,等量化肥对产量的贡献率是基本固定的,但王月福等^[22]在潮土小麦上的试验则表明,在低肥力土壤上,化肥的增产幅度不一,这可能与土壤类型、肥力等级的划分标准和肥料运筹等有关。总之,本研究证实,长期有机无机肥配施是持续提高水稻生产力的主要施肥措施。

本研究中 2012—2014 年 CK、NPK 和 NPKM 处理的土壤基础地力贡献率分别为 41.8%~53.1%、45.2%~62.6%和 59.1%~88.1%,这一结果显著不同于黑土玉米(74.4%~84.7%)^[4]和潮土冬小麦(36.5%~70.9%)^[7]的基础地力贡献率,原因可能与土壤特性、种植作物种类和温光条件有关。在不同施肥措施中,NPKM 处理的土壤基础地力贡献率显著高于 NPK 和 CK 处理,这与其他人通过 DSSAT 模型的研究结果相似^[4,7]。因此,长期有机无机肥配施是土壤基础地力提升的重要途径。在未来,随着秸秆还田、有机肥替代化肥、冬季绿肥技术的大力推广^[23],土壤基础地力贡献率的逐步提升将显著促进鄱阳湖流域的化肥减施增效技术,并有效降低农田生态系统中的面源污染风险。但是,在本研究中第 2 年和第 3 年的土壤基础地力贡献率明显低于第 1 年,原因可能是由于第 1 年试验中上季的肥料施用导致的速效养分残留较多^[24],从而高估了各处理的土壤基础地力贡献率。但如果时间超过 3 年甚至更长时间则又导致土壤养分耗竭^[25],从而低估了土壤基础地力。朱洪勋等^[26]研究也表明,黄潮土的基础地力贡献率从 1981 年的 76.2%下降到 1995 年的 34.4%。同时,本研究也表明,除了第 1 年之外,第 2 年和第 3 年中 NPK 和 CK 处理的基础地力贡献率不存在显著差异,这充分说明在该区域的水稻土上,长期进行氮磷钾化肥施用不能显著提高土壤基础地力贡献

率,此外,长期化肥施用还会引起土壤酸化^[27]和微生物活性降低^[28],因此,NPK处理的土壤基础地力贡献率可能会继续下降。

3.2 调控土壤基础地力贡献率变化的影响因素

除了化肥的增产措施外,很多研究表明,通过配施有机肥同样可以显著提升水稻产量和稳产性^[29],且配施有机肥还有利于增加化肥的利用率^[30]。本研究表明,配施有机肥也可以显著提高土壤基础地力贡献率。前人研究表明,土壤基础地力贡献率与土壤的理化指标密切相关^[31],因此,研究影响土壤基础地力的关键因子对保障鄱阳湖流域的水稻高产具有重要意义。本研究通过相关分析发现,土壤有机质含量是影响水稻土基础地力贡献率的关键因子。这与潮土、黑土的研究结果基本相似^[4,7]。原因主要与有机质是土壤培肥的核心指标有关。然而,由于有机质在土壤中存在的化学形态和物理组分不同^[32],因此,关于有机质组分调控土壤基础地力贡献率的影响机制还有待进一步研究。

同时,本研究进一步分析了农田系统中氮磷钾养分和有机碳平衡与土壤基础地力贡献率的相互关系。结果表明,连续3年的基础地力贡献率均与有机碳平衡量呈显著正相关。这也充分说明了有机碳投入对土壤基础地力提升具有重要作用。结合RDA分析得出,有机碳平衡量和有机质与土壤基础地力贡献率呈显著正相关。因此,有机碳投入是土壤培肥的关键措施,且较高的土壤有机碳投入量不仅可以改良土壤物理结构^[33],还可以提高土壤微生物活性^[20],促进土壤对水稻的养分供给能力。此外,土壤有机碳的矿化和周转也会促进作物的养分吸收^[34],进而影响土壤基础地力变化。

4 结 论

在鄱阳湖流域,双季稻田的土壤基础地力贡献率为41.8%~88.1%。不同施肥措施可以显著影响土壤基础地力贡献率,且长期有机无机配施处理的土壤基础地力贡献率比化肥处理增加了9.2%~40.7%。在土壤肥力因子和养分盈余指标中,土壤有机质和有机碳平衡量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,由于本研究未涉及土壤物理和微生物指标,因此关于土壤地力变化的关键因素还有待进一步研究。

参考文献

[1] Gong F-F (贡付飞), Zha Y (查燕), Wu X-P (武

雪萍), *et al.* Analysis on basic soil productivity change of winter wheat in fluvo-aquic soil under long-term fertilization. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2013, **29**(12): 120-129 (in Chinese)

- [2] Zeng X-M (曾祥明), Han B-J (韩宝吉), Xu F-S (徐芳森), *et al.* Effect of optimized fertilization on grain yield of rice and nitrogen use efficiency in paddy fields with different basic soil fertilities. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2012, **45**(14): 2886-2894 (in Chinese)
- [3] Zhang J (张军), Zhang H-C (张洪程), Duan X-M (段祥茂), *et al.* Effects of soil fertility and nitrogen application rates on super rice yield, quality, and nitrogen use efficiency. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2011, **37**(11): 2020-2029 (in Chinese)
- [4] Zha Y, Wu XP, He XH, *et al.* Basic soil productivity of spring maize in black soil under long-term fertilization based on DSSAT model. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, **13**: 577-587
- [5] Zha Y (查燕), Wu X-P (武雪萍), Zhang H-M (张会民), *et al.* Effects of long-term organic and inorganic fertilization on enhancing soil organic carbon and basic soil productivity in black soil. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2015, **48**(23): 4649-4659 (in Chinese)
- [6] Duan X-W (段兴武), Xie Y (谢云), Feng Y-J (冯艳杰), *et al.* Study on the method of soil productivity assessment in northeast black soil regions of China. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2009, **42**(5): 1656-1664 (in Chinese)
- [7] Zha Y, Wu XP, Gong FF, *et al.* Long-term organic and inorganic fertilizations enhanced basic soil productivity in a fluvo-aquic soil. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, **14**: 2477-2489
- [8] Sun Z-N (孙振宁), Xie Y (谢云), Duan X-W (段兴武). Applied productivity index model (PI) in soil productivity assessment of northern China. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2009, **24**(4): 708-717 (in Chinese)
- [9] Lu Y-H (鲁艳红), Liao Y-L (廖育林), Zhou X (周兴), *et al.* Effect of long-term fertilization on rice yield and basic soil productivity in red paddy soil under double-rice system. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2015, **52**(3): 597-606 (in Chinese)
- [10] Bu R-Y (卜容燕), Ren T (任涛), Lu J-W (鲁剑巍), *et al.* Study on N fertilizer efficiency and the residual effect under rice-oilseed rape rotation system. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2012, **45**(24): 5049-5056 (in Chinese)
- [11] Song Y-C (宋艳春), Yu D (余敦). Evaluation of comprehensive capacity of resources and environments in Poyang Lake Eco-economic Zone. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(10): 2975-2984 (in Chinese)
- [12] Zeng X-B (曾希柏), Zhang J-B (张佳宝), Wei C-F (魏朝富), *et al.* The status and reclamation strategy of low-yield fields in China. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2014, **51**(4): 675-682 (in Chinese)
- [13] Zhang S-X (张淑香), Zhang W-J (张文菊), Shen R-F (沈仁芳), *et al.* Variation of soil quality in typical farmlands in China under long-term fertilization and research expedition. *Journal of Plant Nutrition and Ferti-*

- lizer* (植物营养与肥料学报), 2015, **21**(6): 1389–1393 (in Chinese)
- [14] Yu X-C (余喜初), Li D-M (李大明), Liu K-L (柳开楼), *et al.* Evolution and influencing factors of soil organic carbon under long-term fertilization in subtropical paddy field of China. *Soils* (土壤), 2013, **45**(4): 655–660 (in Chinese)
- [15] Lu R-K (鲁如坤). Methods for Soil and Agricultural Chemistry. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [16] Yao W-Q (要文倩), Qin J-T (秦江涛), Zhang J-G (张继光), *et al.* Effects of different patterns of fertilization on rice nutrient use in Jinxian County of Jiangxi Province. *Soils* (土壤), 2010, **42**(3): 467–472 (in Chinese)
- [17] Gao W (高伟), Yang J (杨军), Ren S-R (任顺荣). Balance characteristics of soil organic carbon under different long-term fertilization models in the upland fluvo-aquic soil of North China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2015, **21**(6): 1465–1472 (in Chinese)
- [18] Huang J (黄晶), Gao J-S (高菊生), Zhang Y-Z (张杨珠), *et al.* Change characteristics of rice yield and soil organic matter and nitrogen contents under various long-term fertilization regimes. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(7): 1889–1894 (in Chinese)
- [19] Deng C, Teng XL, Peng XH, *et al.* Effects of simulated puddling intensity and pre-drying on shrinkage capacity of a paddy soil under long-term fertilization. *Soil and Tillage Research*, 2014, **140**: 135–143
- [20] Yuan H-Z (袁红朝), Wu H (吴昊), Ge T-D (葛体达), *et al.* Effects of long-term fertilization on bacterial and archaeal diversity and community structure within subtropical red paddy soils. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(6): 1807–1813 (in Chinese)
- [21] Li Y (李阳), Jing Y-S (景元书), Qin B-B (秦奔奔). Characteristics of water and heat fluxes and its footprint climatology on farmland in low hilly region of red soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(1): 180–190 (in Chinese)
- [22] Wang Y-F (王月福), Yu Z-W (于振文), Li S-X (李尚霞), *et al.* Effects of soil fertility and nitrogen application rate on nitrogen absorption and translocation, grain yield, and grain protein content of wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(11): 1868–1872 (in Chinese)
- [23] Zhao YC, Wang MY, Hu SJ, *et al.* Economics- and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, **115**: 4045–4050
- [24] Zhang QW, Yang ZL, Zhang H, *et al.* Recovery efficiency and loss of ¹⁵N-labelled urea in a rice-soil system in the upper reaches of the Yellow River basin. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, **15**: 118–126
- [25] Wang L (王莉), Wang X (王鑫), Yu X-C (余喜初), *et al.* Effects of long-term green manure application on system productivity and stress resistance of paddy field in the south of the Yangtze River valley. *Chinese Journal of Rice Science* (中国水稻科学), 2012, **26**(1): 92–100 (in Chinese)
- [26] Zhu H-X (朱洪勋), Shen A-L (沈阿林), Zhang X (张翔), *et al.* Nutrients supplying characteristics and evolution regularities of yellow fluvo-aquic soil. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 1997, **34**(2): 138–145 (in Chinese)
- [27] Guo JH, Liu XJ, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, **327**: 1008–1010
- [28] Liu J, Liu M, Wu M, *et al.* Soil pH rather than nutrients drive changes in microbial community following long-term fertilization in acidic Ultisols of southern China. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, **18**: 1853–1864
- [29] Li Z-F (李志芳), Zhang S-Q (张水清), Li H (李慧), *et al.* Trends of basic soil productivity in paddy soil under long-term fertilization in China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2015, **21**(6): 1394–1402 (in Chinese)
- [30] Wang J-H (王建红), Cao K (曹凯), Zhang X (张贤). Effects of incorporation of Chinese milk vetch coupled with application of chemical fertilizer on nutrient use efficiency and yield of single-cropping late rice. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2014, **51**(4): 888–896 (in Chinese)
- [31] Tang Y-H (汤勇华), Huang Y (黄耀). Statistical analysis of the percentage of soil fertility contribution to grain crop yield and driving factors in mainland China. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2008, **27**(4): 1283–1289 (in Chinese)
- [32] Wu T-Y (武天云), Li F-M (李凤民), Qian P-Y (钱佩源), *et al.* Concepts and relative analytical techniques of soil organic matter. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(4): 717–722 (in Chinese)
- [33] Kong AY, Six J, Bryant DC, *et al.* The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, **69**: 1078–1085
- [34] Chen T (陈涛), Hao X-H (郝晓晖), Du L-J (杜丽君), *et al.* Effects of long-term fertilization on paddy soil organic carbon mineralization. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(7): 1494–1500 (in Chinese)

作者简介 柳开楼,男,1984年生,博士研究生,助理研究员.主要从事土壤培肥与改良研究. E-mail: liukailou@163.com

责任编辑 张凤丽

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.应用生态学报,2019,30(1):209–216

Liu K-L, Han T-F, Huang Q-H, *et al.* Basic soil productivity in the double rice cropping system under long-term fertilization regimes in the Poyang Lake region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(1): 209–216 (in Chinese)