

红壤丘陵区稻田土壤剖面肥力特征及其与产量的关系

李秀秀^{1,2}, 涂田华^{3,†}, 柳开楼⁴, 陈先茂^{1,2}, 谢江^{1,2}, 邓国强^{1,2}, 梁喜欢^{1,2}, 黄晶⁵,
关贤交^{1,2}, 邱才飞^{1,2}, 钱银飞^{1,2}, 彭春瑞^{1,2}, 陈金^{1,2*}

(1 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所 / 农业农村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 / 国家农业环境宜春试验站, 江西南昌 330200; 2 井冈山红壤研究所 / 江西省农业科学院井冈山分院, 江西吉安 343016; 3 江西省农业科学院农产品质量安全与标准研究所, 江西南昌 330200; 4 江西省红壤研究所 / 国家红壤改良工程技术研究中心, 江西南昌 330200; 5 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)

摘要:【目的】探究不同产量稻田土壤肥力的剖面特征, 明确调控作物产量的关键环境因子, 以提高低产田、稳定高产田的粮食产量, 实现“藏粮于地”的国家战略目标。【方法】试验在江西进行, 稻田年产量>15000 kg/hm²、12000~15000 kg/hm²和<10000 kg/hm²的地块分别代表高产、中产和低产土壤, 选取高、中、低产量稻田样点各3个, 采集耕作层、犁底层和潜育层土壤样品, 测定耕作层厚度、容重、土壤紧实度、pH、阳离子交换量(CEC)、有机质含量、全量和有效氮磷钾含量、微生物生物量碳(MBC)和氮(MBN)等, 并对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。【结果】1) 高产田耕作层最厚, 在16 cm左右, 而低产田在13 cm左右, 高产田耕作层土壤容重最小, 为1.09 g/cm³, 而低产田为1.21 g/cm³, 高产田犁底层厚度和紧实度均最高, 低产田最低。2) 高、中、低产田土壤pH、碳氮磷养分含量和微生物生物量均表现为高产田>中产田>低产田, 在土壤剖面上具有明显的“表聚”特征。高产田耕作层土壤有机质、全氮、有效氮、全磷和有效磷含量分别为38.82 g/kg、2.33 g/kg、198.54 mg/kg、0.81 g/kg和33.04 mg/kg, 而低产田耕作层分别为29.75 g/kg、1.89 g/kg、158.71 mg/kg、0.62 g/kg和23.51 mg/kg。高产田耕作层土壤MBC和MBN含量分别为929.2、42.5 mg/kg, 而低产田分别为533.6、30.8 mg/kg。3) 在3个产量水平稻田土壤中钾素含量均随土层深度增加而增加, 在低产田表现尤其明显, 低产田耕作层全钾含量为8.12 g/kg, 但母质层为10.77 g/kg。4) 相关性分析和随机森林分析结果表明, 水稻产量与耕作层土壤pH、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%, 其中, 微生物生物量碳、微生物生物量碳氮比和耕作层厚度是影响作物产量最重要的环境因素, 其解释能力分别为9.2%、8.7%和7.9%。【结论】耕作层厚度和耕作层微生物生物量是调控水稻产量的关键环境因素。相比低产田, 高中产田耕作层厚, 耕作层土壤容重低、有机质含量高, 供肥保肥能力强。因此, 增加耕作层厚度和提高微生物生物量是改良中、低产田的关键。

关键词: 红壤区; 水稻土; 产量水平; 土壤剖面; 肥力

The profile fertility characteristics of paddy fields and their relationship with yields in red soil hilly region

LI Xiu-xiu^{1,2}, TU Tian-hua^{3,†}, LIU Kai-lou⁴, CHEN Xian-mao^{1,2}, XIE Jiang^{1,2}, DENG Guo-qiang^{1,2}, LIANG Xi-huan^{1,2}, HUANG Jing⁵, GUAN Xian-jiao^{1,2}, QIU Cai-fei^{1,2}, QIAN Yin-fei^{1,2}, PENG Chun-rui^{1,2}, CHEN Jin^{1,2*}

(1 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/National Agricultural Experimental Station

收稿日期: 2022-12-23 接受日期: 2023-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(32060431, 32260545); 国家重点研发计划项目(2016YFD0300901); 江西省农业科学院基础研究与人才培养项目(JXSNKYJCRC202323)。

联系方式: 李秀秀 E-mail: lixiuxiu_tfs@foxmail.com; †共同第一作者 涂田华 E-mail: tutianhua@yeah.net

* 通信作者 陈金 E-mail: chenjin2004777@163.com。

for Agricultural Environment of Yichun, Nanchang, Jiangxi 330200, China; 2 Jinggangshan Institute of Red Soil/Jinggangshan Branch of Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Ji'an, Jiangxi 343016, China; 3 Institute for Quality & Safety and Standards of Agricultural Products Research, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang, Jiangxi 330200, China; 4 Jiangxi Institute of Red Soil / National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang, Jiangxi 330046, China; 5 National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: [Objectives] Red paddy soils are important cultivated land resources for the food safety of China, however, the large proportion of middle and low yield fields need improvement to take the responsibility. We compared the fertility variation characteristics across soil profiles in different yield levels, to propose the key points of low yield field improvement and serve the national strategic goal of “storing grain in the ground”.

[Methods] The research was carried out in Jinxian County, Jiangxi Province. The paddy soils were divided into high-, middle- and low-yield fields according to annual rice yield of >15000 kg/hm², 12000–15000 kg/hm² and <10000 kg/hm². At the three yield level fields, soil samples were collected on the arable layer, plough pan and waterlogged layer for measurement of layer depth, bulk density, penetration resistance, pH, cation exchange capacity (CEC), organic matter, total and available NPK, and microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN). The relationship between soil profile properties and rice yield was analyzed using the linear correlation analysis and random forest analysis. **[Results]** In high and low yield fields, the plough layer depth is around 16 cm and 13 cm, soil bulk density was 1.09 g/cm³ and 1.21 g/cm³, respectively. The plough pan thickness and density were in descent order of high-, middle- and low-yield fields. The chemical properties of plough layer in high-yield fields are organic matter 38.82 g/kg, total N 2.33 g/kg, available N 198.54 mg/kg, total P 0.81 g/kg, available P 33.04 mg/kg, while those in low yield fields were 29.75 g/kg, 1.89 g/kg, 158.71 mg/kg, 0.62 g/kg, 23.51 mg/kg, respectively. The MBC and MBN of plough layer were 929.2 mg/kg and 42.5 mg/kg in high-yield fields, while those were 533.6 mg/kg and 30.8 mg/kg in low yield fields, respectively. The soil pH and the organic C, N, P, and microbial biomass showed obvious “surface aggregation” characteristics along soil profile, and declined with the yield from high to low level. However, the K content in all the tested fields increased with the soil profile down to deep, especially in low yield fields. The total K content was 8.12 g/kg in the plough layer, and increased to 10.77 g/kg in the parent material horizon. The results of correlation analysis and random forest analysis showed that rice yield was positively ($P<0.05$) correlated with the tested soil properties in plough layer, and these properties explained 53.7% of rice yield differences. Among them, MBC, MBC/MBN and plough layer depth were the most important factors affecting rice yield, with the explanatory power of 9.2%, 8.7% and 7.9%, respectively. **[Conclusions]** The thickness and the microbial biomass of the plough layer are the key environmental factors regulating rice yield. Compared with low-yield fields, high-yield fields have thicker plough layer with lighter bulk density and higher organic matter in it. So the key measurements for low-yield field improvement are the construction of thick and fertile plough layer.

Key words: red soil region; paddy soil; yield level; soil profile; fertility

红壤性水稻土是保障我国粮食安全重要的土壤资源^[1], 以江西省为例, 红壤性水稻土约占全省水稻土的 67%。但是, 红壤性水稻土存在大量稻田产量不稳, 中低产田比例高 (约占 70%) 的问题, 给粮食生产带来巨大挑战^[2-4]。稻田土壤肥力与水稻产量密切相关, 以往研究多关注耕作层土壤, 忽略了土壤剖面不同, 即土层肥力的作用。因此, 深入探究不

同产量土壤肥力的剖面分布特征, 明确调控作物产量的关键环境因子, 对于提高低产田、稳定高产田粮食产量, 实现“藏粮于地”的国家战略目标具有重要意义。

水稻土耕作层土壤性质与作物产量密切相关。李圆宾等^[5]通过 Meta 分析发现, 土壤容重与稻麦周年产量呈显著负相关。Liu 等^[6]研究表明, 土壤团聚

体稳定性与水稻产量有显著正相关性。相比土壤物理性质,前人对化学性质的重要性研究更多。Liu 等^[7]对江西水稻土长期定位施肥试验点耕作层土壤的研究结果表明,全氮和碳氮比与水稻产量呈显著性正相关。对浙江省 6 个典型水稻土耕作层土壤采样调查结果显示,水稻产量与 pH、土壤有机质和有效氮含量显著正相关,与全氮、有效磷和有效钾含量的相关性不显著^[8]。Li 等^[9]发现在湖南省 11 年定位施肥的水稻土中,耕作层土壤微生物生物量与水稻产量存在显著正相关,且比土壤化学性质更为重要。而 Liu 等^[9]却报道,耕作层土壤微生物生物量碳氮比值及碳磷比值与湖南、江西 84 个潜育水稻土水稻产量显著负相关。综上所述,耕作层土壤性质显著影响着作物产量,但目前研究大多集中于稻田耕作层土壤。

土壤剖面肥力特征对作物生长也具有重要影响。Merrill 等^[10]将美国两种壤质土小麦和玉米产量出现差异的原因归于亚表层土壤导水率、浅层土壤水分耗竭及根系生长,强调了关注土壤剖面性质的重要性。Liu 等^[11]对华北平原 3 个不同产量水平土壤 0—120 cm 剖面的研究结果表明,土壤剖面有效水分、养分指标以及粉粘粒含量是影响玉米和小麦产量的关键因子。但目前研究主要关注旱地剖面,对红壤性稻田土壤剖面的肥力分布与作物产量关系的研究仍然不足。

因此,本研究选取南方红壤丘陵区不同产量水平的红壤性水稻土,通过分析土壤剖面性质以及作物产量,系统探究土壤剖面物理、化学、生物肥力特征及其与水稻产量的关系,明确不同层次肥力特征对水稻产量的影响,以期对南方红壤丘陵区红壤性稻田土壤肥力和水稻产量提升提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究地点及样品采集

基于全县近 100 个样点土壤肥力指数和产量调查的结果,分别于 2018 和 2019 年 10 月下旬,在典型红壤丘陵区江西省进贤县,按照高产稻田年产量 >15000 kg/hm²、中产稻田年产量 12000~15000 kg/hm²、低产稻田年产量 <10000 kg/hm² 的标准,选取高、中、低 3 个产量水平样点各 3 个,其中,中、高产田耕作时间 >50 年,低产田耕作时间为 10~20 年,高、中、低产田肥料管理措施均为日常施用化肥、不施有机肥,秸秆全部直接还田。高肥力产田采样点在温圳镇东岗村 (116.15°E, 28.33°N, 潜育

型水稻土,中潜灰黄泥田)、前坊镇大池村 (116.25°E, 28.47°N, 潜育型水稻土,中潜灰黄泥田)、三阳集乡石山村 (116.25°E, 28.59°N, 潜育型水稻土,中潜灰黄泥田),中肥力采样点在前坊镇和平村 (116.20°E, 28.51°N, 潜育型水稻土,中潜灰黄泥田)、张公镇邵窝村 (116.16°E, 28.30°N, 潜育型水稻土,中潜灰黄泥田)、泉岭乡义垄村 (116.11°E, 28.41°N, 潜育型水稻土,中潜灰黄泥田),低肥力采样点在三阳集乡藕塘村 (116.27°E, 28.52°N, 淹育型水稻土,弱烟灰黄泥田)、三阳集乡荆陵村 (116.27°E, 28.59°N, 淹育型水稻土,弱烟灰黄泥田) 和梅庄镇新庄村 (116.43°E, 28.57°N, 淹育型水稻土,弱烟灰黄泥田)。高中低肥力田晚稻平均产量分别为 7766.7、6238.9 和 4938.9 kg/hm²。在采样点随机选择 3 个取样点,用土钻分别采集 3 个土层的土壤剖面样品,按土层分别混合成 3 个土样。所得土样一部分保存于 4℃ 用于微生物指标的测定,另一部分风干后过 2 mm 筛用于化学性质测定。

1.2 测定方法

土壤 pH (土水比 1 : 5) 采用 pH 计测定;土壤容重 (BD) 采用环刀法测定;土壤紧实度使用土壤紧实度测量仪 (澳大利亚, Rimik CP40 II) 测试;阳离子交换量 (CEC) 采用醋酸铵法测定;土壤有机质 (SOM) 采用 K₂Cr₂O₇ 和浓 H₂SO₄ 加热法测定;全氮 (TN) 含量采用 H₂SO₄—H₂O₂ 联合消煮,凯氏定氮法测定;碱解氮 (AN) 采用碱解扩散法测定;全磷 (TP) 采用 H₂SO₄—H₂O₂ 联合消煮后钼锑抗比色法测定;有效磷 (AP) 采用 0.5 mol/L NaHCO₃ (pH 8.5) 浸提—钼锑抗比色法测定;全钾 (TK) 采用 NaOH 熔解—火焰光度法测定;速效钾 (AK) 采用 1 mol/L NH₄OAc (pH 7.0) 浸提—火焰光度法进行测定;微生物生物量碳 (MBC) 和氮 (MBN) 采用氯仿熏蒸—K₂SO₄ 浸提法测定^[12]。在每个样点随机选取 3 个 1 m×1 m 的样方收割水稻,晾干、脱粒后测定水稻产量。

1.3 统计分析

采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 25.0 对数据进行整理并绘图,所有数据均为 2018 和 2019 两年的数据均值。利用单因素方差检验不同产量水平和不同土层间变量的显著性差异,使用 R 4.0.1 中的 “psych” 包评估土壤变量与水稻产量间的相关性,利用 “randomForest” 包进行随机森林分析,“rfPermute” 包检验变量的显著性。

2 结果与分析

2.1 不同产量水平稻田土壤物理性质分析

高产田和中产田为潴育型, 发生层段完整, 剖面层次分为耕作层 (A)、犁底层 (P)、潴育层 (W) 和母质层 (C), 耕作层厚度 16 cm 左右, 犁底层较厚。低产田为淹育型, 处于水稻土发育的初步阶段, 剖面初步分化, 分为耕作层 (A)、犁底层 (P) 和母质层 (C), 耕作层 13 cm 左右, 犁底层较薄 (图 1a, b)。不同产量水平稻田土壤容重在耕作层表现为低产田最高, 为 1.21 g/cm^3 , 高产田最低, 为 1.09 g/cm^3 (图 1c)。土壤紧实度随土层深度呈现出先增加后降低的趋势, 在 20 cm 左右达到峰值; 不同产量水平土壤紧实度在耕作层和潴育层没有显著差异, 在犁底层表现为高产田最高, 说明高产田可有效阻止养分和水分下渗, 具有较强的保水保肥能力 (图 1d)。

2.2 不同产量水平稻田土壤化学性质分析

不同产量水平稻田土壤化学指标在不同土层存在差异 (图 2)。红壤性稻田土壤 pH 随土层深度增加而增大, 同一土层 pH 均为高产田、中产田大于低产田。高产田 CEC 在土层深度上的变化趋势与 pH 一致, 但是中、低产田 CEC 随土层加深先降低后增加; 耕作层土壤 CEC 在低产田最高, 犁底层土壤 CEC 在高产田最大, 潴育层 CEC 在不同产量水平稻田土壤间无显著差异。土壤有机质、全氮、有效氮、全磷和有效磷含量均随土层深度逐渐降低, 呈现出明显的“表聚”特征, 在耕作层土壤中均表现为高产田显著高于中低产田, 但在犁底层和潴育层差异不显著; 其中, 高产田耕作层土壤有机质、全氮、有效氮、全磷和有效磷含量分别为 38.82 g/kg 、 2.33 g/kg 、 198.54 mg/kg 、 0.81 g/kg 和 33.04 mg/kg , 而低产田耕作层分别为 29.75 g/kg 、 1.89 g/kg 、

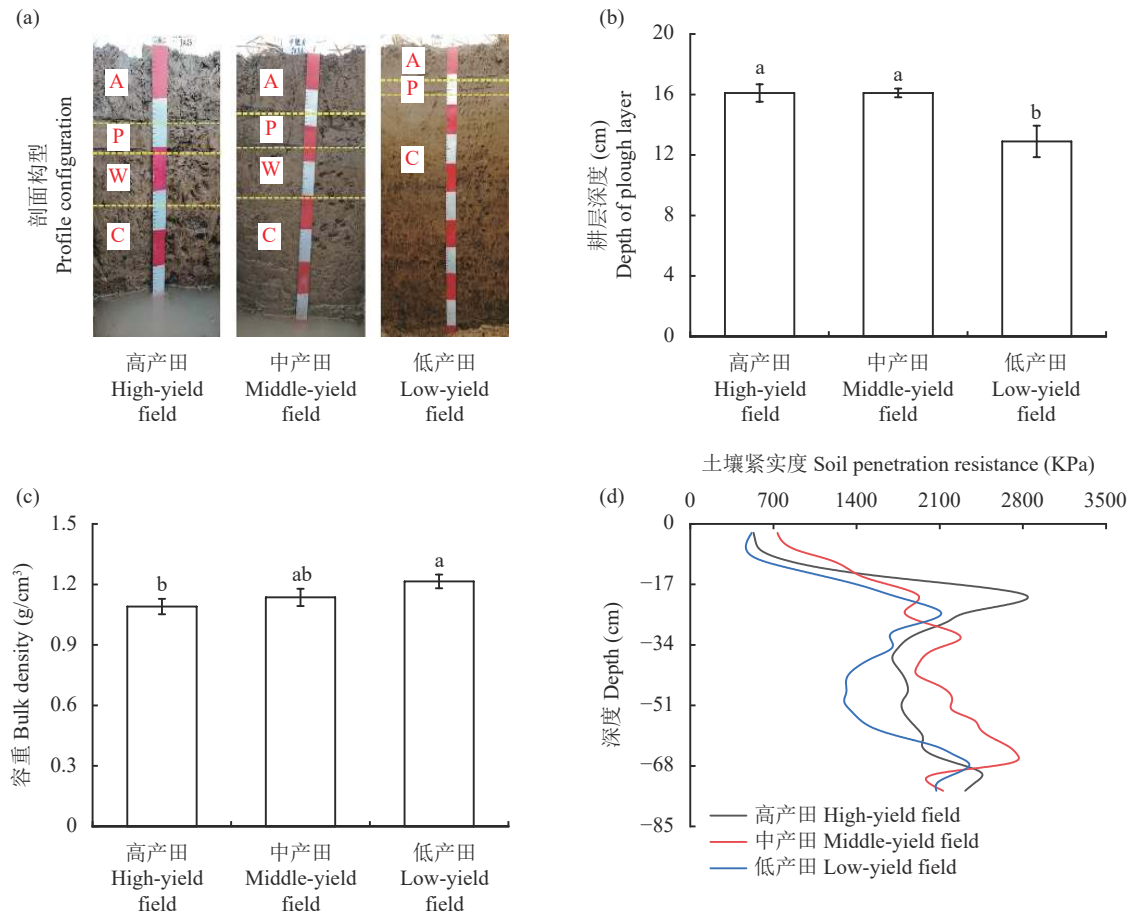


图 1 不同产量水平稻田剖面构型 (a)、耕作层深度 (b)、耕作层容重 (c) 及土壤紧实度 (d)

Fig. 1 Soil profile configuration (a), depth of plough layer (b), bulk density of plough layer (c) and penetration resistance (d) of paddy fields with different yield levels

注: 柱上不同小写字母表示不同产量水平稻田土壤间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters above the bars represent significant difference among paddy soils with different yield levels ($P < 0.05$).

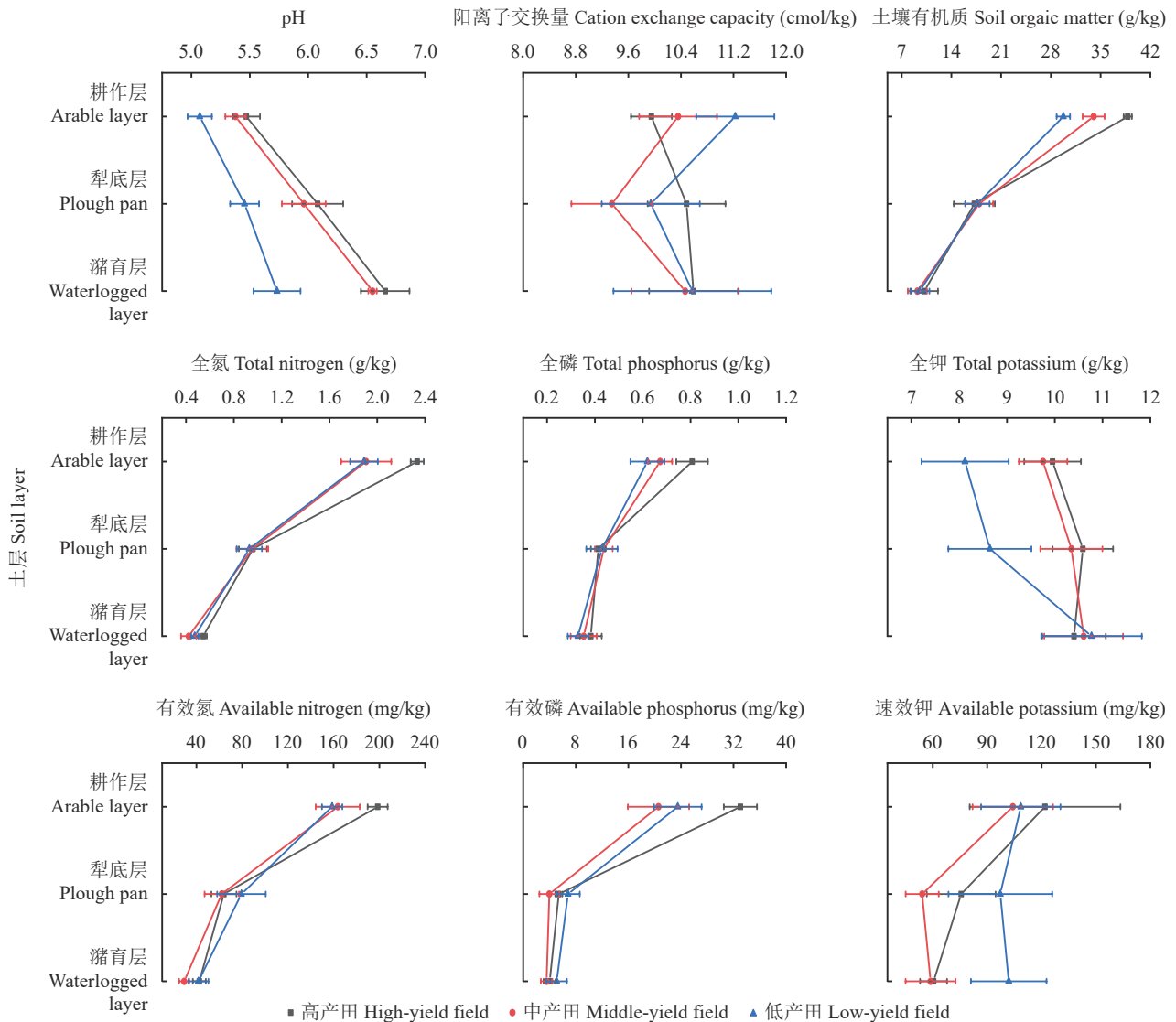


图 2 不同产量水平稻田土壤物理化学性质剖面分布特征

Fig. 2 Soil physical and chemical properties in different layers of paddy fields

158.71 mg/kg、0.62 g/kg 和 23.51 mg/kg。土壤速效钾含量虽呈现出随土层加深而降低的趋势,但不同产量水平土壤速效钾含量在耕作层无显著差异,在犁底层和潴育层则以低产田土壤最高。与其他养分不同,土壤全钾含量随着土层加深而逐渐增加,尤其是低产田,全钾含量在耕作层为 8.12 g/kg,但在母质层为 10.77 g/kg。同时,全钾含量在耕作层和犁底层均表现为低产田显著低于高中产田,而在潴育层各产量水平土壤间没有显著差异。

2.3 不同产量水平稻田土壤微生物生物量碳、氮分析

由图 3 可知,高产田、中产田耕作层土壤 MBC、MBN 和 MBC/MBN 均显著高于低产田。高产田、中产田和低产田土壤 MBC 含量分别为 929.2、767.2

和 533.6 mg/kg, MBN 含量分别为 42.5、37.4 和 30.8 mg/kg。

2.4 土壤剖面肥力指标与水稻产量的关系

相关性分析结果表明,耕作层土壤除 CEC、全钾、速效钾和容重与水稻产量无显著相关性,其余变量均与水稻产量呈显著正相关;在犁底层和潴育层,只有 pH 与水稻产量显著正相关(表 1,只列出有显著相关的数据)。选取与水稻产量显著相关的土壤剖面变量进行随机森林分析,评估各变量对水稻产量的相对重要性,发现所选变量可以解释水稻产量变化的 53.7%,微生物生物量碳、微生物生物量碳氮比、耕作层深度以及潴育层 pH 对水稻产量具有显著影响,解释能力分别为 9.2%、8.7%、7.9% 和 6.4% (图 4)。

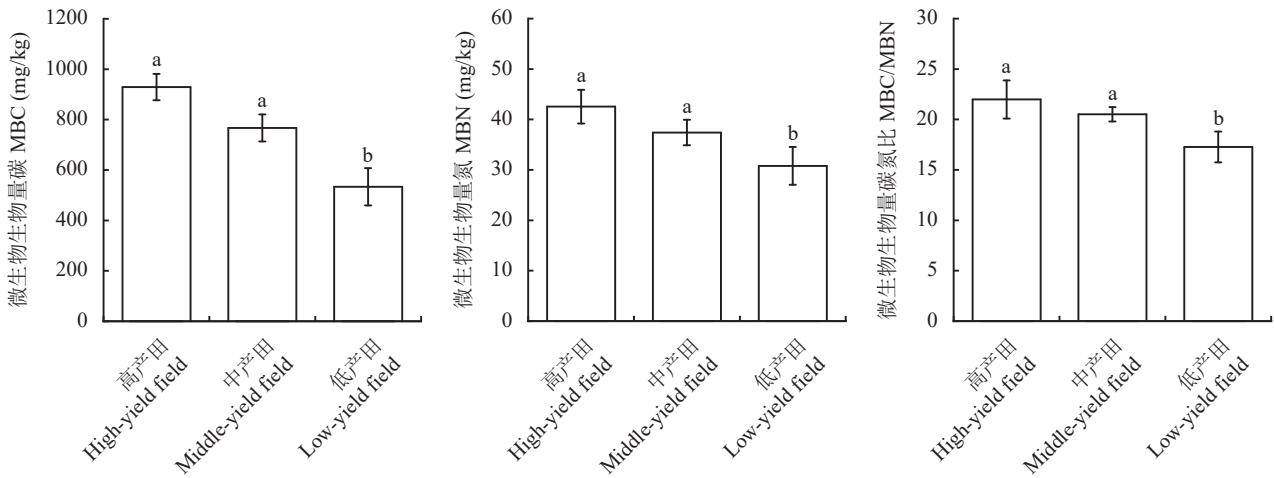


图 3 不同产量水平稻田耕作层土壤微生物生物量碳、氮含量

Fig. 3 Microbial biomass carbon and nitrogen (MBC and MBN) contents in the arable layer of paddy fields

注: 柱上不同小写字母表示不同产量水平稻田土壤间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters above the bars represent significant difference among paddy soils with different yield levels ($P < 0.05$).

表 1 耕作层、犁底层和潜育层土壤指标与水稻产量的相关性分析

Table 1 Correlation analysis of rice yield and soil indexes in arable layer, plough pan and waterlogged layer

指标 Index	Y	pH	SOM	CEC	TN	AN	TP	AP	TK	AK	MBC	MBN	MBC/MBN	BD	Dep
耕作层 Arable layer															
Y	1	0.47*	0.74*		0.49*	0.50*	0.48*	0.47*			0.84*	0.68*	0.76*		0.68*
pH		1	0.50*												
SOM			1		0.64*	0.50*	0.52*	0.49*			0.76*	0.56*	0.80*		0.60*
CEC				1						0.53*					
TN					1	0.86*	0.63*	0.81*	0.56*		0.62*	0.61*			
AN						1		0.82*	0.53*		0.53*	0.54*			
TP							1	0.62*	0.62*		0.58*	0.52*	0.51*		
AP								1							
TK									1		0.51*	0.56*			
AK										1					
MBC											1	0.92*	0.78*	-0.54*	0.63*
MBN												1	0.47*	-0.57*	0.48*
MBC/MBN													1		0.64*
BD														1	-0.56*
Depth															1
犁底层 Plough pan															
Y	1	0.52*													
pH		1	-0.56*		-0.51*			-0.54*	0.50*						
SOM			1		0.48*										
CEC				1			0.56*		0.52*						
TN					1	0.66*		0.61*							
AN						1		0.82*	-0.55*						

续表 1 Table 1 continued

指标 Index	Y	pH	SOM	CEC	TN	AN	TP	AP	TK	AK	MBC	MBN	MBC/MBN	BD	Dep
TP							1								
AP								1	-0.53*						
TK									1						
AK										1					
潴育层 Waterlogged layer															
Y	1	0.73*													-0.59*
pH		1													
SOM			1					-0.62*							
CEC				1				-0.74*	0.65*	0.69*					
TN					1	0.47*									
AN						1		0.59*							
TP							1								
AP								1							
TK									1	0.64*					
AK										1					

注: Y—产量; SOM—土壤有机质; CEC—阳离子交换量; TN—全氮; AN—有效氮; TP—全磷; AP—有效磷; TK—全钾; AK—速效钾; MBC—耕作层土壤微生物生物量碳; MBN—耕作层土壤微生物生物量氮; BD—耕作层土壤容重; Dep—耕作层深度。*— $P<0.05$ 。

Note: Y—Yield; SOM—Soil organic matter; CEC—Cation exchange capacity; TN—Total nitrogen; AN—Available nitrogen; TP—Total phosphorus; AP—Available phosphorus; TK—Total potassium; AK—Available potassium; MBC—Microbial biomass carbon in arable layer; MBN—Microbial biomass nitrogen in arable layer; BD—Bulk density in arable layer; Dep—Arable layer depth. *— $P<0.05$.

3 讨论

3.1 不同产量水平稻田土壤剖面肥力特征

土壤的耕作层深度及保水保肥能力是影响水稻产量的重要因素。一般认为, 80% 的水稻根系集中于 20 cm 以上的土层^[8], 水稻土的适宜耕作深度为 15—20 cm^[13-14]。本研究中, 高产田耕作层厚度为 16 cm, 而低产田耕作层厚度仅为 13 cm, 低于水稻根系生长的适宜深度。有研究认为高产田犁底层厚度应为 5—10 cm 且发育良好^[8], 这与本研究中高产田具有较厚犁底层的现象一致。高产田耕作层土壤容重较低, 土壤孔隙度较大, 有利于水分和养分在耕作层间的运移及水稻根系对养分的吸收^[15-16], 而犁底层土壤紧实度最大, 保水保肥性好, 减少了养分和水分向下流失, 从而促进水稻生长。而低产田耕作层土壤容重和犁底层土壤紧实度与高产田相反, 不利于水稻生长。另外, 红壤区土壤酸化是制约其土地生产力的关键因素, 本研究中, 土壤 pH 呈现出高产田>中产田>低产田的规律, 低产田 pH 均值约为 5.1, 接近水稻生长的酸害阈值 4.7^[17], 是限制其水稻产量的又一重要因子。值得一提的是, 不同产量

水平稻田土壤 CEC 均在 10 cmol/kg 左右, 说明红壤性稻田土壤酸性缓冲能力和养分保持能力均较弱^[18]。

碳、氮、磷是植物生长过程中从土壤获取的最基本营养元素, 其含量高低是表征土壤肥力的重要指标^[19-20]。根据全国第二次土壤普查养分分级标准, 3 个产量水平稻田土壤有机质、全氮、全磷和有效磷含量均在第二级, 有效氮含量为第一级, 速效钾含量为第三级, 全钾含量为第五级, 整体表明该地区土壤有机质和养分含量丰富, 在产量提升方面拥有巨大潜力。土壤有机质和养分含量在剖面上表现出耕作层>犁底层>潴育层的变化规律, 在垂直方向上呈现出“表聚”特征, 这与前人^[21-23]报道一致。这种现象主要是由常年种植过程中, 施肥、秸秆覆盖、根茬保留等耕作措施造成的^[24-25]。但是, 全钾和低产田速效钾含量与其他养分变化趋势相反, 随土层深度逐渐增加。这一方面可能是因为我国农业生产中, 钾肥施用量往往不足, 而水稻是需钾量较高的作物, 每季水稻钾 (K_2O) 吸收量一般在 150~300 kg/hm², 大量钾素在水稻收获和秸秆移除过程中损失, 从而造成表层土钾素亏缺^[26]。另一方面, 由于低产田为淹育型水稻土, 土壤 CEC、犁底层厚度及其

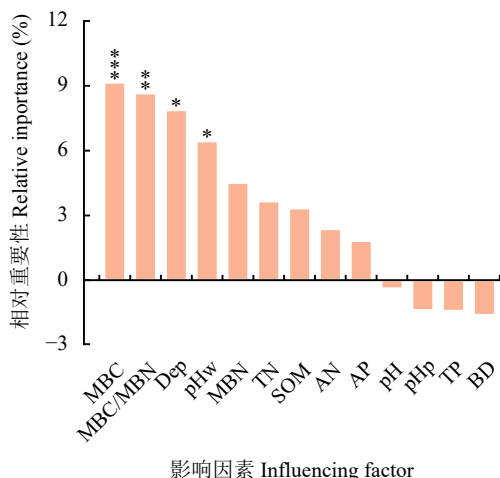


图 4 基于随机森林法分析的各变量对水稻产量变化的相对重要性

Fig. 4 The relative importance of variables to changes in rice yield based on random forest analysis

注: MBC—耕作层土壤微生物生物量碳; Dep—耕作层深度; pHw—潜育层土壤 pH; MBN—耕作层土壤微生物生物量氮; TN—耕作层土壤总氮; SOM—耕作层土壤有机质; AN—耕作层土壤有效氮; AP—耕作层土壤有效磷; pH—耕作层土壤 pH; pHp—犁底层土壤 pH; TP—耕作层土壤全磷; BD—耕作层土壤容重。*— $P<0.05$; **— $P<0.01$; ***— $P<0.001$ 。

Note: MBC—Microbial biomass carbon in arable layer; Dep—Arable layer depth; pHw—pH in waterlogged layer; MBN—Microbial biomass nitrogen in arable layer; TN—Total nitrogen in arable layer; SOM—Soil organic matter in arable layer; AN—Available nitrogen in arable layer; AP—Available phosphorus in arable layer; pH—pH in arable layer; pHp—pH in plough pan; TP—Total phosphorus in arable layer; BD—Bulk density in arable layer. *— $P<0.05$; **— $P<0.01$; ***— $P<0.001$.

紧实度较低, 保水保肥能力差, 大量钾素随地下水位降低累积到深层土壤, 造成深层土壤钾素富集。

土壤微生物直接影响着养分的循环转化, 是农业生产力的重要指标。本研究中, 微生物生物量碳氮含量在高产田中明显高于低产田, 这一结果与前人研究^[27]一致。这可能是因为高产田水稻大量根系分泌物为微生物生长提供了丰富养分, 刺激了微生物生长代谢, 加快了有机质的分解和养分的释放, 进而为作物生长提供了充足的有效养分, 增加了作物产量。

3.2 土壤剖面相关指标对水稻产量的影响

相关性分析结果表明, 耕作层有机质 ($r=0.74$)、微生物生物量碳 ($r=0.84$)、微生物生物量氮 ($r=0.68$)、微生物生物量碳氮比 ($r=0.76$)、耕作层深度 ($r=0.68$) 以及土壤剖面不同土层 pH 与水稻产量具有较强的、显著的正相关关系, 而随机森林模型分析显示微生物生物量碳、微生物生物量碳氮比、耕作层深度及潜育层土壤 pH 是影响水稻产量最重要的环

境因子。有机质矿化可以为作物生长提供有效养分, 同时, 有机质也可以作为胶结剂, 促进土壤团聚体的形成, 改良土壤结构, 增强土壤透气保水保肥的能力^[28], 从而提高作物产量, 这一结果与前人研究^[29-30]一致。较高的微生物生物量有利于有机质和养分的循环转化, 进而促进作物养分吸收。Li 等^[9]对湖南 8 个长期定位施肥试验的水稻土采样分析, 发现微生物生物量碳氮与作物产量呈正相关; 而微生物生物量碳氮比与水稻产量呈负相关, 与本研究结果不一致, 可能是因为高微生物生物量碳氮比倾向于大量固定氮, 从而降低水稻土中有效氮含量, 不利于水稻生产。廖育林等^[27]报道, 湖南双季稻区微生物生物量碳氮与水稻产量无关, 而细菌生物量则与水稻产量显著正相关, 说明相比于微生物生物量, 微生物类群对于作物生长可能更加重要, 在以后的研究中应更加关注。耕作层深度对水稻产量的重要影响则可能是因为水稻大部分根系位于耕作层, 耕作层土壤性质直接影响着水稻对养分的吸收和利用, 因此, 较厚的耕作层深度能为水稻生长提供更多的养分, 进而促进水稻的生长。pH 也对水稻产量有重要影响, pH 提高有利于水稻的生长, 这归因于 pH 提高增加了土壤固持养分的能力, 提升了微生物活性, 缓解了铝对水稻根系的毒害作用, 进而促进了作物生长^[31-32]。

4 结论

1) 高产田耕作层深度最大, 土壤容重最小, 犁底层厚度和紧实度均最高, 而低产田则最低。

2) 碳、氮、磷养分含量表现为高产田>中产田>低产田, 在土壤剖面上呈现“表聚”特征。

3) 稻田土壤中钾素含量随土层深度增加而增加, 尤其是低产田, 全钾含量在耕作层为 8.12 g/kg, 但在母质层为 10.77 g/kg。

4) 相关性分析和随机森林分析结果表明, 水稻产量与耕作层土壤 pH、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%, 其中, 微生物生物量碳、微生物生物量碳氮比和耕作层厚度是影响作物产量最重要的环境因素, 其解释能力分别为 9.2%、8.7% 和 7.9%。

参考文献:

[1] 马力, 杨林章, 慈恩, 等. 长期不同施肥处理对水稻土有机碳分布变

- 异及其矿化动态的影响[J]. *土壤学报*, 2009, 46(6): 1050–1058.
- Ma L, Yang L Z, Ci E, *et al.* Effects of long-term fertilization treatments on distribution and mineralization of organic carbon in paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(6): 1050–1058.
- [2] 孙波. 红壤退化阻控与生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- Sun B. Control and ecological rehabilitation of red soil degradation [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [3] 曾希柏, 张佳宝, 魏朝富, 等. 中国低产田状况及改良策略[J]. *土壤学报*, 2014, 51(4): 675–682.
- Zeng X B, Zhang J B, Wei C F, *et al.* The status and reclamation strategy of low-yield fields in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(4): 675–682.
- [4] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7615–7622.
- Zhao Q G, Huang G Q, Ma Y Q. The problems in red soil ecosystem in southern of China and its countermeasures[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7615–7622.
- [5] 李圆宾, 李鹏, 王舒华, 等. 稻麦轮作体系下有机肥施用对作物产量和土壤性质影响的整合分析[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(9): 3231–3239.
- Li Y B, Li P, Wang S H, *et al.* Effects of organic fertilizer application on crop yield and soil properties in rice-wheat rotation system: A meta-analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(9): 3231–3239.
- [6] 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.
- [7] Liu K L, Han T F, Huang J, *et al.* Change of soil productivity in three different soils after long-term field fertilization treatments[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(3): 848–858.
- [8] 郑铭洁, 刘琛, 朱铭, 等. 浙江省高产稻田的土壤肥力特征研究[J]. *浙江农业科学*, 2022, 63(6): 1147–1149.
- Zheng M J, Liu C, Zhu M, *et al.* Study on soil fertility characteristics of high yield paddy fields in Zhejiang Province[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2022, 63(6): 1147–1149.
- [9] 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: 35266.
- [10] Merrill S D, Liebig M A, Tanaka D L, *et al.* Comparison of soil quality and productivity at two sites differing in profile structure and topsoil properties[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 179: 53–61.
- [11] Liu H T, Li B G, Ren T S. Soil profile characteristics of high-productivity alluvial cambisols in the North China Plain[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(4): 765–773.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [13] 范业成, 叶厚专. 江西红壤性水稻土肥力特性及其管理[J]. *江西农业学报*, 1998, 10(3): 71–75.
- Fan Y C, Ye H Z. Fertilizer characters and management of red soil in Jiangxi[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 1998, 10(3): 71–75.
- [14] 蒋端生. 红壤丘陵区耕地肥力质量演变规律及其影响因素研究[D]. 湖南长沙: 湖南农业大学博士学位论文, 2008.
- Jiang D S. Studies on the evolution law of the fertility quality of arable land and its influencing factors in red soil hilly areas[D]. Changsha, Hunan: PhD Dissertation of Hunan Agricultural University, 2008.
- [15] 柴玉坡, 赵贵元, 崔婧婧, 等. 保护性耕作下棉花-春玉米轮作对玉米田土壤性状及水分利用效率的影响[J]. *节水灌溉*, 2022, (11): 34–41.
- Chai Y P, Zhao G Y, Cui J J, *et al.* Effects of cotton-maize rotation on soil characteristics and water use efficiency in maize fields under conservation tillage[J]. *Water Saving Irrigation*, 2022, (11): 34–41.
- [16] 田雪, 孙奥博, 陈春羽, 等. 秸秆还田深度对土壤性状及玉米生长的影响[J]. *西南农业学报*, 2022, 35(11): 2571–2578.
- Tian X, Sun A B, Chen C Y, *et al.* Effects of straw returning depth on soil properties and maize growth[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(11): 2571–2578.
- [17] 曾廷廷. 红壤区作物产量对酸化的响应及pH阈值[D]. 贵州贵阳: 贵州大学硕士学位论文, 2017.
- Zeng T T. Response of crop yield to acidification and pH threshold in red soil region[D]. Guiyang, Guizhou: MS Thesis of Guizhou University, 2017.
- [18] 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 J, Zheng S X, Yang Z P, *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.
- [19] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937–3947.
- Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3937–3947.
- [20] 冯德枫, 包维楷. 土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(2): 400–408.
- Feng D F, Bao W K. Review of the temporal and spatial patterns of soil C: N: P stoichiometry and its driving factors[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2017, 23(2): 400–408.
- [21] 王帅, 赵敬坤, 王洋, 等. 重庆花椒种植区主要类型土壤剖面的肥力特征[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(11): 40–47.
- Wang S, Zhao J K, Wang Y, *et al.* Fertility characteristics of soil profile in the *Zanthoxylum bungeanum*-planting areas of Chongqing[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2021, 43(11): 40–47.
- [22] 王小燕, 薛杨, 宿少锋, 等. 木麻黄纯林及其混交林对土壤剖面理化性质的影响[J]. *广西植物*, 2022, 42(8): 1315–1324.
- Wang X Y, Xue Y, Su S F, *et al.* Effects of pure and mixed plantations of *Casuarina equisetifolia* on soil profile physico-chemical properties[J]. *Guihaia*, 2022, 42(8): 1315–1324.
- [23] 姜海斌, 张克强, 沈仕洲, 等. 洱河流域减氮施肥条件下水稻产量和土壤剖面氮磷变化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(1): 23–32.
- Jiang H B, Zhang K Q, Shen S Z, *et al.* Rice yield and nitrogen and phosphorus changes in soil profile under different fertilization

- strategies in Erhai Lake Basin, Yunnan[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(1): 23–32.
- [24] 李大明, 柳开楼, 叶会财, 等. 长期不同施肥处理红壤旱地剖面养分分布差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(3): 633–640.
Li D M, Liu K L, Ye H C, *et al.* Differences of soil nutrient distribution in profiles under long-term fertilization in upland red soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(3): 633–640.
- [25] 温延臣, 李海燕, 袁亮, 等. 长期定位施肥对潮土剖面养分分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(21): 4460–4469.
Wen Y C, Li H Y, Yuan L, *et al.* Effect of long-term fertilization on nutrient distribution of fluvo-aquic soil profile[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(21): 4460–4469.
- [26] 叶廷红. 钾肥施用量对水稻产量、钾素吸收利用及稻米品质的影响[D]. 湖北武汉: 华中农业大学硕士学位论文, 2021.
Ye T H. Effects of potassium application rate on grain yield, potassium absorption and utilization, and quality of rice[D]. Wuhan, Hubei: MS Thesis of Huazhong Agricultural University, 2021.
- [27] 廖育林, 郑圣先, 杨曾平, 等. 湖南双季稻种植区不同生产力水稻土微生物和生物化学性质的研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 222–228.
Liao Y L, Zheng S X, Yang Z P, *et al.* Studies on microbiological and biochemical properties in different productive paddy soil in double-rice cropping regions of Hunan Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4): 222–228.
- [28] Sarker T C, Incerti G, Spaccini R, *et al.* Linking organic matter chemistry with soil aggregate stability-insight from ^{13}C NMR spectroscopy[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 117: 175–184.
- [29] Choudhary M, Panday S C, Meena V S, *et al.* Long-term effects of organic manure and inorganic fertilization on sustainability and chemical soil quality indicators of soybean-wheat cropping system in the Indian mid-Himalayas[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 257: 38–46.
- [30] Tian K, Zhang B, Zhang H, *et al.* Evaluation of soil quality in major grain-producing region of the North China Plain: Integrating minimum data set and established critical limits[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106613.
- [31] 文星. 几种土壤改良剂对酸性水稻土及红壤旱土的改良效果研究[D]. 湖南长沙: 中南大学硕士学位论文, 2014.
Wen X. Study the effects of several soil amendments on acid paddy soil and red soil[D]. Changsha, Hunan: MS Thesis of Central South University, 2014.
- [32] Shi R, Liu Z, Li Y, *et al.* Mechanisms for increasing soil resistance to acidification by long-term manure application[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 185: 77–84.