

湖南双季稻种植区不同生产力水稻土肥力特征的研究

郑圣先^{1,2}, 廖育林^{1,2,3}, 杨曾平^{1,3}, 谢坚^{1,2}, 聂军^{1,2}, 吴小丹¹, 向艳文¹

(1 湖南省土壤肥料研究所, 湖南长沙 410125; 2 农业部望城红壤水稻土生态环境重点野外科学观测实验站, 湖南长沙 410125; 3 湖南农业大学资源环境学院, 湖南长沙 410128)

摘要: 通过对湖南省 8 个双季稻种植区田间采样并结合水稻产量测产, 研究了不同生产力水稻土的有机质(全有机质和腐殖质组成)和养分含量状况(全量和有效养分), 分析其环境意义。结果表明, 湖南省双季稻种植区高产水稻土的有机质、全氮和速效磷含量分别为 47.74 ± 11.59 g/kg、 2.70 ± 0.72 g/kg 和 39.8 ± 14.21 mg/kg, 均达到非常丰富的水平; 中产水稻土的有机质、全氮和速效磷含量也处于丰富水平, 与高产水稻土比较, 其差异不显著; 低产水稻土的上述养分显著低于高产和中产水稻土。高产水稻土的速效钾含量处于中等水平 (105.83 ± 22.73 mg/kg), 中产和低产水稻土速效钾含量处于缺乏和严重缺乏水平。经过长期的培肥, 高产水稻土的有机质、全氮和速效磷含量均达到非常丰富的水平, 有机质库和磷库均处于丰富水平和盈余状态。高产水稻田土壤的质地一般为壤土和粘壤, 固持钾的能力弱, 速效钾含量不丰富, 应该重视施用化学钾肥、有机肥和稻草还田, 保持土壤钾库的平衡和提高。多数中产水稻土的有机质和养分均比较丰富, 只要采用最佳的田间管理, 可以实现高产水稻土的产量目标。低产水稻土的结构一般都比较差, 养分缺乏, 应加强改良和培肥管理, 提升其土壤肥力。

关键词: 湖南省; 双季稻种植区; 水稻土; 肥力特征

中图分类号: S158.3 文献标识码: A 文章编号: 1008-505X(2011)05-1108-14

Studies on fertility characteristics of different productive paddy soils in double-rice cropping regions of Hunan province

ZHENG Sheng-xian^{1,2}, LIAO Yu-lin^{1,2,3}, YANG Zeng-ping^{1,3}, XIE Jian^{1,2}, NIE Jun^{1,2},
WU Xiao-dan¹, XIANG Yan-wen¹

(1 Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China; 2 Key Field Monitoring Experimental Station for Reddish Paddy Soil Eco-environment in Wangcheng, Ministry of Agriculture of China, Changsha 410125, China; 3 College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Fertility characteristics of different productive paddy soils were studied to provide scientific basis for the management and sustainable utilization of paddy soils. Fraction of organic matter (total organic matter and humus composition) and nutrient contents (total and available nutrients) and their relationships with rice yield were investigated by soil sampling and recorded rice yield from double-rice cropping areas of eight important rice production counties in Hunan province. The results show that the contents of organic matter (47.74 ± 11.59 g/kg), total N (2.70 ± 0.72 g/kg) and available P (39.8 ± 14.21 mg/kg) of the high productive paddy soils are at their very rich levels, respectively, the contents of organic matter, total N and available P in the middle productive paddy soils are at their rich levels, and the contents are not significant differences between the high productive paddy soils and the middle productive paddy soils. The contents of the low productive paddy soils are significantly lower than

收稿日期: 2010-04-06 接受日期: 2011-05-19

基金项目: 国际植物营养研究所(IPNI)资助项目(Hunan-14); 农业公益性行业科研专项(201003013-07); 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD05B09)资助。

作者简介: 郑圣先(1950—), 男, 湖南常德人, 研究员, 主要从事植物营养与施肥的研究。

Tel: 0731-84691576, E-mail: shengxianzheng@foxmail.com

those of the high and middle productive paddy soils. Available K contents are at the middle level (105.83 ± 22.73 mg/kg) in high productive paddy soils, and are at deficient and very deficient levels for the middle and low productive paddy soils, respectively. The contents of organic matter, total N and available P are at the very rich levels in high productive paddy soils because of the long-term rice cultivation and fertilization, and both organic matter and P pool are at very rich and surplus states. Textures of the high productive paddy soils are generally loamy soils and sandy clay loam soils with a weak K retention capacities, and the available K contents are not rich in high productive paddy soils, it should be pay attention to rational application of potassium fertilizer, organic matter and rice straw returning to soil for maintaining the balance and increase of soil K pool. For most of the middle productive paddy soils, due to relative rich with contents of organic matter, total N and available P, could achieve rice yield target of high productive paddy soils only under good field management practices. Soil physical properties and nutrients of the low productive paddy soils are all poor, it should be pay attention to rational combing application of organic manure and inorganic fertilizer for improving the soil physical quality and soil fertility.

Key words: Hunan province; double-rice cropping region; paddy soil; fertility characteristics

长江中下游是我国最重要的水稻生产区域。湖南省地处长江中游,为典型的双季稻种植区,是我国水稻生产的重要基地,也是我国粮食调出的主要省份。近年来,随着社会经济的发展,城镇化的快速推进,部分耕地非农业利用的趋势不可逆转,湖南省耕地面积逐年减少,很大程度上影响了粮食安全的保障。在目前有限耕地面积的情况下,如何进一步提升水稻土的肥力和土壤生产力的可持续性、保证人口增长对粮食不断增长的需要,保障国家粮食安全,越来越引起人们的关注。土壤肥力是土壤的基本属性和质量的特征,是土壤从营养条件和环境条件两个方面供应和协调植物生长的能力,是有关农业生产的土壤物理、化学和生物特性的综合反应。因此,研究不同生产力水稻土的肥力变化特征,对于制定高产水稻土的定向培育和中低产水稻土肥力提升的管理措施具有重要的指导意义。关于水稻土肥力变化特征与水稻产量的关系,我国在二十世纪九十年代后开展了一些研究。范业成和叶厚专^[1]通过对江西红壤性水稻土的肥力特征比较研究,证明高产水稻土的熟化程度高,耕层土壤厚度一般达到 15 cm,土壤有机质比较丰富,中、低产水稻土的耕层浅薄,氮、磷、钾养分不平衡,障碍因素较多。胡建利等^[2]采用 GPS 定位采样获得的水稻土肥力属性数据,经综合指数法评价土壤肥力指数的结果表明,高产水稻土的综合肥力指数大于 0.6,中产水稻土为 0.3~0.6,低产水稻土为 0.15~0.45。李忠佩等^[3]通过测定不同利用年限水稻土的物理、化学和生物特性的变化,研究水稻土形成过程中土壤肥力演变规律,证明土壤有机质碳、氮、磷、钾养分库经 30 年利用达

到平衡后,土壤肥力水平的改善主要表现在养分有效性 and 物质循环速率的提高,养分供应能力增强,80 年利用红壤稻田的年均作物产量比 30 年利用稻田的平均作物产量增加了 16%。水稻土是我国最重要的耕作土壤,其 93% 分布在长江以南的热带、亚热带地区,它是在种植水稻或以植稻为主的耕作制度下,土壤经常处于淹水还原,排水氧化,水耕粘闭以及大量施用有机肥等频繁的人为管理措施影响下形成的。基于其在粮食生产中的重要地位,相关研究受到长期重视^[4],但在县域尺度上进行高、中、低产水稻土对应采样,针对不同生产力水稻土肥力变化特征的研究报道尚少见。本文通过比较湖南省双季稻种植区高产、中产和低产水稻土的肥力特征变化,探讨不同生产力水稻土形成过程中肥力的变化规律,以期为高产水稻土的定向培育和提升中、低产水稻土的肥力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况及水稻土生产潜力的确定

试验区位于湖南省东部、中部和西北部的双季稻种植区。地理位置为东经 $112^{\circ}24'99'' \sim 113^{\circ}40'52''$,北纬 $27^{\circ}03'15'' \sim 29^{\circ}01'22''$ 。海拔高度为 33~70 m。试验区属于亚热带季风气候。年均降水量为 1322~1719 mm,年平均气温 $16.8^{\circ}\text{C} \sim 17.6^{\circ}\text{C}$,年平均无霜期大约为 272~300 d。地貌以平缓起伏的丘陵山地和洞庭湖平原为主,母质分别为第四纪红色黏土、河流冲积物和湖积物,采样田块处于较高的地形部位,灌排水状况良好,历史背景相近,轮作制度为双季稻。稻田以潜育性水稻土为主。供试土壤的基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤的理化性质
Table 1 Selected physical and chemical properties of the soils used in the experiment

地点 Location	母质 Parent material	土壤生产力水平 Productivity level	亚类 Subgroup	容重 Bulk density (g/cm ³)	土粒密度 SPD (g/cm ³)	孔隙度 Porosity (%)	PH	阳离子代换量 CEC [cmol(x)/kg]	电导率 EC (mS/cm)	黏粒 Clay (g/kg)
醴陵 Liling	河流冲积物 Rive deposit	高产水稻土 HPPS	普通筒育水耕人为土 THSA	1.02	1.93	50.91	5.40	9.90	0.20	237
醴陵 Liling	河流冲积物 Rive deposit	中产水稻土 MPSPS	普通筒育水耕人为土 THSA	1.07	2.04	47.59	5.27	9.25	0.19	226
醴陵 Liling	河流冲积物 Rive deposit	低产水稻土 LPPS	普通筒育水耕人为土 THSA	1.10	2.08	42.75	5.28	9.90	0.16	227
衡东 Hengdong	第四纪红色黏土 Quaternary red clay	高产水稻土 HPPS	普通铁聚水耕人为土 TFASA	0.93	2.13	56.31	5.09	9.60	0.18	293
衡东 Hengdong	第四纪红色黏土 Quaternary red clay	中产水稻土 MPSPS	普通铁聚水耕人为土 TFASA	0.96	2.17	57.12	5.04	8.35	0.17	290
衡东 Hengdong	第四纪红色黏土 Quaternary red clay	低产水稻土 LPPS	普通铁聚水耕人为土 TFASA	1.15	2.23	47.00	4.85	7.70	0.16	274
长沙 Changsha	第四纪红色黏土 Quaternary red clay	高产水稻土 HPPS	普通铁聚水耕人为土 TFASA	1.11	2.07	49.73	5.10	9.90	0.17	272
长沙 Changsha	第四纪红色黏土 Quaternary red clay	中产水稻土 MPSPS	普通铁聚水耕人为土 TFASA	1.16	2.20	47.64	5.21	8.90	0.15	255
长沙 Changsha	第四纪红色黏土 Quaternary red clay	低产水稻土 LPPS	普通铁聚水耕人为土 TFASA	1.29	2.22	37.75	5.00	6.90	0.14	235
浏阳 Liuyang	河流冲积物 Rive deposit	高产水稻土 HPPS	普通筒育水耕人为土 THSA	1.26	2.02	40.07	4.79	7.80	0.20	319
浏阳 Liuyang	河流冲积物 Rive deposit	中产水稻土 MPSPS	普通筒育水耕人为土 THSA	1.30	2.10	35.75	4.84	8.00	0.20	222
浏阳 Liuyang	河流冲积物 Rive deposit	低产水稻土 LPPS	普通筒育水耕人为土 THSA	1.28	2.15	37.56	4.96	7.50	0.19	211
湘乡 Xianxiang	河流冲积物 Rive deposit	高产水稻土 HPPS	普通筒育水耕人为土 THSA	1.09	2.10	52.29	6.25	13.90	0.30	247
湘乡 Xianxiang	河流冲积物 Rive deposit	中产水稻土 MPSPS	普通筒育水耕人为土 THSA	1.04	2.18	48.21	7.35	13.30	0.17	229
湘乡 Xianxiang	河流冲积物 Rive deposit	低产水稻土 LPPS	普通筒育水耕人为土 THSA	1.11	2.22	45.05	6.24	12.70	0.12	199
赫山 Heshan	第四纪红色黏土 Quaternary red clay	高产水稻土 HPPS	漂白铁聚水耕人为土 AFASA	1.15	1.87	41.67	5.12	11.80	0.21	352
赫山 Heshan	第四纪红色黏土 Quaternary red clay	中产水稻土 MPSPS	漂白铁聚水耕人为土 AFASA	1.26	1.95	38.46	4.88	11.15	0.20	348
赫山 Heshan	第四纪红色黏土 Quaternary red clay	低产水稻土 LPPS	漂白铁聚水耕人为土 AFASA	1.18	2.02	35.43	5.09	11.75	0.19	333
宁乡 Ningxiang	河流冲积物 Rive deposit	高产水稻土 HPPS	普通筒育水耕人为土 THSA	0.83	1.93	65.50	6.87	17.95	0.21	228
宁乡 Ningxiang	河流冲积物 Rive deposit	中产水稻土 MPSPS	普通筒育水耕人为土 THSA	0.92	1.96	62.68	7.24	17.00	0.20	195
宁乡 Ningxiang	河流冲积物 Rive deposit	低产水稻土 LPPS	普通筒育水耕人为土 THSA	1.08	2.00	55.00	7.68	14.20	0.18	170
沅江 Yuanjiang	湖积物 Lake deposit	高产水稻土 HPPS	底潜筒育水耕人为土 AFASA	0.92	1.93	54.51	7.63	16.45	0.30	417
沅江 Yuanjiang	湖积物 Lake deposit	中产水稻土 MPSPS	底潜筒育水耕人为土 AFASA	1.06	1.97	54.54	7.72	15.75	0.28	393
沅江 Yuanjiang	湖积物 Lake deposit	低产水稻土 LPPS	底潜筒育水耕人为土 AFASA	1.28	2.03	46.32	7.61	15.55	0.28	321

注 (Note): HPPS—High productive paddy soil; MPSPS—Middle productive paddy soil; LPPS—Low productive paddy soil; THSA—Typic hapli-stagnic anthrosols; TFASA—Typic Fe-accumuli-stagnic anthrosols; AFASA—Albic Fe-accumuli-stagnic anthrosols; SPD—Soil particle density; CEC—Cation exchange capacity; EC—Electrical conductivity.

在试验区的典型双季稻种植区,选择水稻产量差异比较大并存在地形变化的地段作为研究样田。以高产田中心为地点顺其坡度方向设置样带,样带终止于明显低产水稻土的农田中部。样带内共设6组样方,每组样方间距500~800 m,每个样方组不同生产力水稻土包括3块稻田(即3个重复)。2006~2007年取土样分析土壤的化学性质。所有样方均在采取土样的前一年建立,8个试验样方所有水稻土均经过1年的过度期,再根据湖南省目前水稻土的生产水平,将每年早、晚两季水稻产量稳定在14000 kg/hm²以上的定为高产水稻土,10000~13500 kg/hm²为中产水稻土,10000 kg/hm²以下为低产水稻土。在过度期间,按照当地前两年的肥料施用量和田间管理措施,确定农家肥、化肥的种类和施用量以及杂交水稻组合。农家肥以各种粗有机肥和堆沤有机肥为主,化肥以尿素、过磷酸钙和氯化钾为主,必要时施用适量的微量元素。

1.2 土壤取样与制备

土壤样品分别在2008~2009年晚稻收获期后采取。取样之前,移走各水稻田内的杂草和稻草残留物,然后每块采样田内设置3个小区,小区面积为20 m²,用不锈钢铲在小区内随机采取10个点,剥除土块外面直接与不锈钢铲接触而变形的土壤。田间采集的原状土壤样品装入硬质塑料盒内,确保在运输过程中不受到挤压,以保持原来结构。土样运回室内后,在室温下风干,当土壤含水量达到土壤塑性时(含水量25%左右),用手轻轻地把土块沿自然结构面掰成直径约1 cm的小块,以免受到机械压力而变碎。除去粗根和小石块,风干后用于测定土壤物理和化学性质。同时分别测定耕作层(0—15 cm)土壤容重、土粒密度、孔隙度和田间持水量。

1.3 水稻植物样品的采取和分析

为了估计留在土壤中的根系量,2008~2009年晚稻收获期时,从试验区3块不同生产力稻田中的每块稻田选择3个点挖出0.3 m×0.3 m×0.3 m的土壤,用窄平铲和手锯采集。小心用自来水冲洗,把来自土壤的所有根系收集起来,烘干、称重、磨细,过0.5 mm筛,分别贮存于密封塑料瓶中,用于测定碳、氮、磷和钾。记录相同田块的水稻子粒产量和稻草产量,并计算子粒产量/根系比。子粒、秸秆和根系碳(C)用碳—自动分析仪(Vario, MAX, CN, Elemental analyzer, 德国)分析;子粒、秸秆和根系全氮(TN)用凯氏法,全磷(TP)用钼蓝比色法,全钾(TK)用火焰光度计法测定。

1.4 土壤物理与化学性质分析

土壤容重(BD)用环刀法;土粒密度(SPD)用比重瓶法;孔隙度用环刀法测定^[5];pH用电位法,电导率(EC)用PD-501型测量仪测定,其土:水比为1:2.5。阳离子交换量(CEC)用乙酸铵-EDTA(pH=7)交换法;土壤有机质用外加热重铬酸钾氧化—容量法;全氮用浓硫酸消煮—蒸馏滴定法;全磷用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法;全钾用氢氧化钠熔融—火焰光度法测定。碱解氮用碱解扩散法;有效磷用NaHCO₃浸提—钼锑抗比色法;缓效钾用热HNO₃浸提—火焰光度法;有效钾用NH₄OAc浸提—火焰光度法测定。交换性钙(Ca)用乙酸铵交换—EDTA络合滴定法;交换性镁(Mg)用乙酸铵交换—EDTA络合滴定法;有效硫(S)用磷酸盐—乙酸浸提—硫酸钡比浊法;有效锌(Zn)用DTPA浸提—原子吸收分光光度法;有效锰(Mn)用乙酸铵浸提—原子吸收分光光度法;有效硼(B)用沸水浸提—甲亚胺比色法测定。土壤腐殖质组成成分的分选和测定采用科诺诺娃法^[6],胡敏酸光密度以碳浓度为0.136 g/kg的胡敏酸溶液,比色皿光程1 cm, E4和E6分别为波长465 μm和665 μm的光密度。土壤固定态铵用Silva-Bremner法测定^[7]。土壤可矿化氮按照Waring等描述的方法测定^[8]:称取每个风干土样3份,每份10 g,放入50 mL玻璃试管中,加双蒸水10 mL,密闭后置于30℃培养箱中培养。培养前取出各土样2份,直接加入100 mL 2 mol/L KCl溶液,振荡1 h后过滤,用靛酚蓝比色法测定溶液中的铵态氮含量,比色仪器为TU-1901双光束紫外可见分光光度计。加入土样的试管在培养2周后取出,加入2.2 mol/L KCl溶液90 mL,振荡1 h后过滤,用靛酚蓝比色法测定溶液中铵态氮含量,计算出土壤氮释放量。土壤有机氮组分按照Stevenson描述的方法测定^[9]。无机磷组分按照Chang-Jackson描述的方法测定^[10]。

1.5 统计分析

数据经Excel 2003整理后,采用SPSS13.0软件进行方差分析,不同生产力之间的多种比较采用Duncan新复极差方法,其结果进行 t 检验($P < 0.05$)。用Excel软件作图。

2 结果与分析

2.1 水稻子粒、秸秆、根系的生物量及其氮、磷、钾含量

子粒和秸秆产量是评价土壤生产力的2个最为

常用的直观指标。从表 2 可以看出,随着土壤生产力水平的提高,水稻子粒、秸秆和根系的生物量升高。最值得注意的是,水稻子粒随土壤生产力水平

的提高而增加,说明水稻土在经人为长期耕作下而导致肥力质量演变的差异,为不同生产力水稻土的肥力特征评价提供了最直接有力的依据。

表 2 不同生产力水稻土上水稻子粒、秸秆和根系的生物量

Table 2 Biomasses of grain, straw and root of rice cultivated in paddy soils of different productivity levels

地点 Location	土壤生产力 水平 Productivity level	子粒产量(t/hm^2) Grain yield		秸秆产量(t/hm^2) Straw yield		根系量(t/hm^2) Root yield		全年生物量(t/hm^2) Annual biomass	
		早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻	地上部	地下部
		Early rice	Later rice	Early rice	Later rice	Early rice	Later rice	Shoot	Root
醴陵 Liling	高产水稻土 HPPS	8.78 aA	9.26 aA	7.72 aA	8.14 aA	2.63 aA	2.78 aA	33.90 aA	5.41 aA
醴陵 Liling	中产水稻土 MPPS	6.99 bB	7.38 bB	6.97 bB	7.35 bB	2.10 bB	2.21 bB	28.69 bB	4.31 bB
醴陵 Liling	低产水稻土 LPPS	4.99 cC	5.11 cC	4.31 cC	4.41 cC	1.50 cC	1.53 cC	19.81 cC	3.03 cC
衡东 Hengdong	高产水稻土 HPPS	8.43 aA	8.89 aA	7.28 bA	8.68 aA	2.53 aA	2.67 aA	32.28 aA	5.19 aA
衡东 Hengdong	中产水稻土 MPPS	7.96 bA	8.40 bB	7.75 aA	7.18 bB	2.39 bA	2.52 bB	30.30 bB	4.91 bB
衡东 Hengdong	低产水稻土 LPPS	4.58 cB	5.58 cC	3.84 cB	4.68 cC	1.37 cB	1.67 cC	19.69 cC	3.05 cC
长沙 Changsha	高产水稻土 HPPS	7.84 aA	8.28 aA	8.79 aA	9.28 aA	2.35 aA	2.48 aA	34.19 aA	4.84 aA
长沙 Changsha	中产水稻土 MPPS	6.40 bB	6.75 bB	6.64 bB	7.01 bB	1.92 bB	2.03 bB	26.81 bB	3.95 bB
长沙 Changsha	低产水稻土 LPPS	4.75 cC	5.44 cC	4.59 cC	4.12 cC	1.42 cC	1.63 cC	18.90 cC	3.06 cC
浏阳 Liuyang	高产水稻土 HPPS	8.64 aA	9.12 aA	7.94 aA	8.38 aA	2.59 aA	2.74 aA	34.08 aA	5.33 aA
浏阳 Liuyang	中产水稻土 MPPS	7.32 bB	8.78 bB	6.26 bB	7.51 bB	2.20 bB	2.63 aA	29.85 bB	4.83 bB
浏阳 Liuyang	低产水稻土 LPPS	4.82 cC	4.96 cC	4.56 cC	4.69 cC	1.45 cC	1.49 bB	19.04 cC	2.93 cC
湘乡 Xianxiang	高产水稻土 HPPS	8.04 aA	8.48 aA	8.14 aA	8.59 aA	2.41 aA	2.54 aA	33.25 aA	4.95 aA
湘乡 Xianxiang	中产水稻土 MPPS	7.00 bB	7.39 bB	8.15 bB	8.60 aA	2.10 bB	2.22 bB	30.14 bB	4.32 bB
湘乡 Xianxiang	低产水稻土 LPPS	4.90 cC	5.23 cC	4.64 cC	4.95 bB	1.47 cC	1.57 cC	19.72 cC	3.04 cC
赫山 Heshan	高产水稻土 HPPS	8.82 aA	9.31 aA	7.72 aA	8.15 aA	2.65 aA	2.79 aA	34.00 aA	5.44 aA
赫山 Heshan	中产水稻土 MPPS	7.34 bB	7.75 bB	7.30 bB	7.70 bB	2.20 bB	2.32 bB	30.07 bB	4.53 bB
赫山 Heshan	低产水稻土 LPPS	5.04 cC	5.38 cC	5.79 cC	6.18 cC	1.51 cC	1.61 cC	20.39 cC	3.12 cC
宁乡 Ningxiang	高产水稻土 HPPS	7.74 aA	6.60 aA	8.38 aA	7.14 bB	2.32 aA	1.98 aA	29.86 aA	4.30 aA
宁乡 Ningxiang	中产水稻土 MPPS	6.07 bB	6.15 bB	8.04 aA	8.14 aA	1.82 bB	1.85 bA	22.40 bB	3.67 bB
宁乡 Ningxiang	低产水稻土 LPPS	4.83 cC	5.15 cC	5.44 bB	5.81 cC	1.45 cC	1.55 cB	19.23 cC	2.99 cC
沅江 Yuanjiang	高产水稻土 HPPS	7.81 aA	7.50 aA	7.60 aA	7.30 aA	2.34 aA	2.25 aA	30.21 aA	4.59 aA
沅江 Yuanjiang	中产水稻土 MPPS	6.05 bB	7.04 bB	5.01 bB	5.83 bB	1.82 bB	2.11 aA	25.93 bB	3.93 bB
沅江 Yuanjiang	低产水稻土 LPPS	4.70 cC	5.33 cC	4.33 cC	4.91 cC	1.41 cC	1.60 bB	19.28 cC	3.01 cC

注(Notes): HPPS—High productive paddy soil; MPPS—Middle productive paddy soil; LPPS—Low productive paddy soil; 表中同列数据后面不同大、小写字母分别表示差异显著性达到 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平 Data in same column followed by different capital and small letters mean significant at the $P < 0.01$ and $P < 0.05$ levels, respectively.

氮、磷、钾是植物营养的三大要素,在评价土壤生产力水平时往往要测定植株某些敏感部位或器官中的氮、磷、钾含量^[11]。不同生产力水稻土水稻各部位的全氮、全磷和全钾含量存在差异,且在水稻秸秆、根系及子粒中的分布状况也不一致。全氮(图 1)和全磷均是子粒高于根系,秸秆最低;全钾则是子粒与根

系接近,秸秆最高。从各平均值的回归曲线看,随着土壤生产力水平的提高,水稻子粒中全氮含量趋于升高($t = 5.1218, P = 0.0003$),而秸秆的全磷和全钾含量均明显升高($P: t = 3.2539, P = 0.0035$; $K: t = 2.4691, P = 0.021$),后两者与土壤生产力水平之间存在明显的线性回归关系。

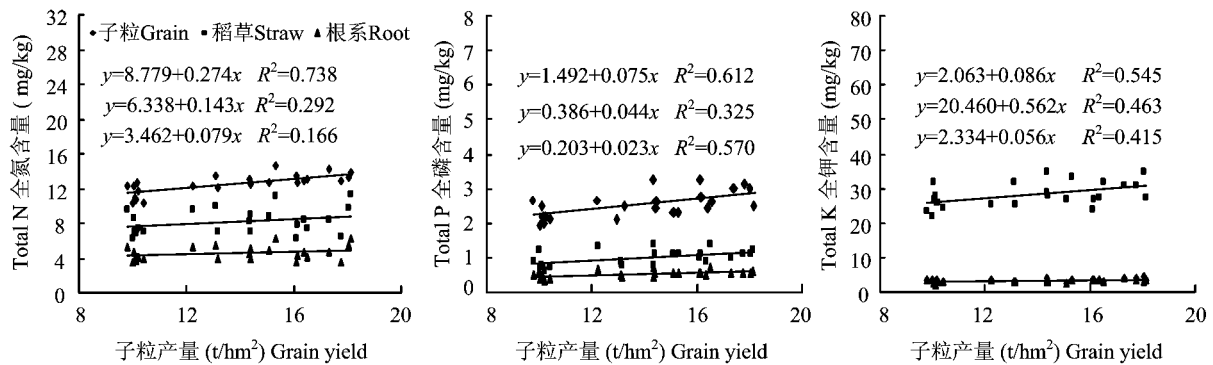


图1 不同水稻产量(早稻+晚稻)水平下水稻子粒、秸秆和根系的氮、磷、钾含量

Fig. 1 Total N, P, K contents of grain, straw, root in different rice yield levels

2.2 土壤有机质与腐殖质组

土壤有机质是评价土壤肥力的重要指标。不同生产力水稻土之间表现出明显差异(表3)。高产水稻土的有机质含量最高,按平均计,8个试验区高产水稻土耕层土壤(0—15 cm)平均含量为 47.74 ± 11.59 g/kg,而低产水稻土最低,平均为 39.13 ± 8.00 g/kg。中产水稻土由于能灌能排,土壤通气性良好,离村庄较近,有机质可以获得补充,因此土壤有机质含量也处于较高水平,平均含量为 43.57 ± 10.17 g/kg。Dunett 对照法检验显示,高产水稻土与低产水稻土之间土壤有机质含量差异达到显著水平($p < 0.05$),而与中产水稻土之间的差异不显著($p > 0.05$)。

腐殖质的组成是判断土壤有机质品质的重要依据。本研究结果表明,不同生产力水稻土之间,土壤腐殖质组成互不相同。8个试验区高产水稻土不仅有有机质含量高,且腐殖质碳中的胡敏酸碳含量也高,胡敏酸碳/富里酸碳的比值在 0.21 ~ 0.75 范围之内,平均为 0.45。随着水稻土生产力的降低,胡敏酸碳含量呈下降趋势,胡敏酸碳/富里酸碳的比值变小。

土壤胡敏酸的 E_4 值在一定程度上反映了腐殖质的芳化程度和胡敏酸的复杂程度^[12-13]。表3可见,不同生产力水稻土胡敏酸的 E_4 值处在 0.50 ~ 1.52 之间。 E_4 值随水稻土生产力的提高呈现增大趋势。而反映土壤腐殖质中芳香物质缩度高低的土壤胡敏酸 E_4/E_6 值在不同生产力水稻土中也存在一定的差异(表3)。耕层土壤胡敏酸 E_4/E_6 值从低产水稻土到高产水稻土呈降低趋势。可见,在长期水耕的条件下,高产水稻土腐殖质的芳化程度和胡敏酸的复杂程度均较高,土壤肥力持久而稳定。在生

产实践中,低产水稻土胶体性能变差,土壤物理性状不良,甚至导致水稻迟发早衰,出现黄叶黑根,水稻产量低。因此,在低产水稻土的改良和培肥过程中,应增加有机肥的投入和养分平衡供应的管理。

2.3 土壤全氮、固定态铵和有机氮组分

土壤氮素养分含量水平与人为施肥活动有关。不同生产力水稻土之间的土壤全氮含量差异明显(表4)。高产、中产和低产水稻土的全氮含量分别为 2.70 ± 0.72 g/kg、 2.47 ± 0.67 g/kg 和 2.31 ± 0.64 g/kg。按在水稻土上建立的全氮养分分级标准^[14],湖南省双季稻种植区高产和中产水稻土的全氮含量处于丰富水平,这是长期保持高量氮肥和有机物料施用的结果。结果还表明,不同试验区高产水稻土田块之间的全氮含量变幅较大,变异系数 26.8%。统计分析显示,不同生产力水稻土全氮与有机质含量呈显著相关($p < 0.05$),说明土壤有机质含量越高,土壤全氮含量就越高。

不同生产力水稻土的固定态铵含量差异很大。按平均计,8个试验区高产水稻土的固定态铵含量最高,平均为 568.2 ± 95.8 mg/kg,低产水稻土最低,为 437.5 ± 99.1 mg/kg,中产水稻土固定态铵的含量介于上述两者之间(494.7 ± 85.2 mg/kg)。8个试验区不同生产力水稻土的固定态铵含量占土壤全氮含量的 14.6% ~ 35.1%,平均为 21%。就不同生产力水稻土而言,其大小顺序为高产水稻土 > 中产水稻土 > 低产水稻土。从表4还可以看出,有 90% 的土壤固定态铵占全氮含量的 15% 以上,特别是有有机质含量和固定态铵含量高的高产水稻土,固定态铵对土壤全氮的贡献率更高。由此充分说明,土壤固定态铵是稻田土壤的一种非常重要的氮素形态。

表3 不同生产力水稻土的有机质含量和腐殖质组成
Table 3 Organic matter content and humus composition in paddy soils of different productivity levels

地点 Location	土壤生产力水平 Productivity level	有机质 OM (g/kg)	有机碳 Organ. C (g/kg)	胡敏酸碳 HA-C (g/kg)	富里酸碳 FA-C (g/kg)	HA-C/ FA-C	胡敏素碳 Humin-C (g/kg)	E ₄	E ₄ /E ₆
醴陵 Liling	高产水稻土 HPPS	35.49 aA	20.59 aA	3.52 aA	6.52 aA	0.54	12.32 aA	1.52	5.03
醴陵 Liling	中产水稻土 MPPS	32.54 aB	18.87 bB	1.90 bB	5.18 bB	0.37	11.87 aA	1.10	6.35
醴陵 Liling	低产水稻土 LPPS	30.16 cC	17.50 cC	1.65 bB	4.61 cC	0.37	10.49 bB	0.87	7.13
衡东 Hengdong	高产水稻土 HPPS	62.41 aA	36.20 aA	5.34 aA	8.65 aA	0.62	22.56 aA	1.37	4.52
衡东 Hengdong	中产水稻土 MPPS	57.30 bB	33.24 bB	4.75 bA	6.61 bB	0.72	21.30 bA	0.88	5.08
衡东 Hengdong	低产水稻土 LPPS	45.23 cC	26.24 cC	2.57 cB	3.68 cC	0.70	15.67 cB	0.62	6.11
长沙 Changsha	高产水稻土 HPPS	35.75 aA	20.74 aA	3.82 aA	6.03 aA	0.63	13.36 aA	1.24	4.12
长沙 Changsha	中产水稻土 MPPS	31.51 bB	18.28 bB	3.13 bA	4.43 bB	0.71	10.89 bA	1.05	6.03
长沙 Changsha	低产水稻土 LPPS	30.14 cC	17.48 cC	1.72 bB	2.33 cC	0.75	9.60 cB	0.50	4.87
浏阳 Liuyang	高产水稻土 HPPS	37.40 aA	21.70 aA	3.22 aA	6.67 aA	0.48	15.57 aA	1.17	3.88
浏阳 Liuyang	中产水稻土 MPPS	37.72 bB	21.88 aA	2.06 bB	5.02 bB	0.42	14.45 aA	0.79	4.54
浏阳 Liuyang	低产水稻土 LPPS	36.11 cC	20.95 bB	1.40 cC	3.55 cC	0.39	12.72 bB	0.51	5.02
湘乡 Xianxiang	高产水稻土 HPPS	41.18 aA	23.89 aA	3.23 aA	6.81 aA	0.48	15.38 aA	1.37	4.54
湘乡 Xianxiang	中产水稻土 MPPS	36.61 bB	21.23 bB	1.77 bB	4.72 bB	0.37	14.34 bA	1.05	6.03
湘乡 Xianxiang	低产水稻土 LPPS	34.02 cC	19.73 cC	1.47 cC	4.40 cC	0.34	10.34 cB	0.62	6.07
赫山 Heshan	高产水稻土 HPPS	54.65 aA	31.70 aA	3.17 aA	7.10 aA	0.45	23.84 aA	1.40	4.64
赫山 Heshan	中产水稻土 MPPS	51.89 bB	30.10 bB	1.92 bB	5.41 bB	0.36	22.49 bA	0.96	5.52
赫山 Heshan	低产水稻土 LPPS	46.66 cC	27.06 cC	1.38 cC	3.94 cC	0.36	20.26 cB	0.56	5.50
宁乡 Ningxiang	高产水稻土 HPPS	62.14 aA	36.04 aA	2.54 aA	8.75 aA	0.29	25.39 aA	1.54	5.11
宁乡 Ningxiang	中产水稻土 MPPS	53.39 bB	30.97 bB	2.06 bB	7.13 bB	0.29	21.74 bB	0.84	4.87
宁乡 Ningxiang	低产水稻土 LPPS	51.69 cC	29.98 cC	1.39 cC	6.49 cC	0.21	18.78 cC	0.53	5.17
沅江 Yuanjiang	高产水稻土 HPPS	52.89 aA	30.68 aA	3.04 aA	7.49 aA	0.41	20.68 aA	1.46	4.82
沅江 Yuanjiang	中产水稻土 MPPS	47.56 bB	27.59 bB	1.81 bB	6.08 bB	0.30	19.33 bA	0.78	4.52
沅江 Yuanjiang	低产水稻土 LPPS	39.03 cC	22.64 cC	1.19 cC	4.19 cC	0.28	17.33 cB	0.57	5.59

注(Note): HPPS—High productive paddy soil; MPPS—Middle productive paddy soil; LPPS—Low productive paddy soil; HA—Humic acid; FA—Fuli acid; E₄—波长 465um 的光密度 The absorbance at 465um; E₆—波长 665um 的光密度 The absorbance at 665um. 表中同列数据后面不同大、小写字母分别表示差异显著性达到 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平 Data in same column followed by different capital and small letters mean significant at the $P < 0.01$ and $P < 0.05$ levels, respectively.

农业土壤中 95% 以上的氮素为有机化合物^[15]。土壤有机氮不但对维持氮素肥力方面有重要意义,而且直接决定土壤氮的供应能力。本研究结果表明,不同生产力水稻土之间的有机氮各组分存在明显的差异。8 个试验区水稻土有机氮组分含量在耕层土壤中的分布规律相同,均以酸解性氮为主体,且酸解性氮占全氮的比例随土壤生产力的提高呈升高的趋势,非酸解氮则呈相反的趋势。在长期水耕和施肥的影响下,不同生产力水稻土有机氮各组分的相对含量也明显不同。土壤有机氮各组分的含量随水稻土生产力的提高而提高,总体趋势与土壤有机质含量的变化一致,但有机氮各组分的增幅不同。8 个试验区高产水稻土的酸解氨态氮含量分别比中产水稻土和低产

水稻土提高 44.0% 和 61.8%; 氨基酸氮提高 9.9% 和 22.7%; 氨基糖氮提高 8.3% 和 18.2%; 未知氮提高 14.4% 和 17.2%。相关分析表明,微生物生物量氮与酸解性氮之间呈极显著相关($r = 0.749, p < 0.01$),而非酸解性氮呈弱相关。进一步对微生物生物量氮与酸解性氮组分之间的相关分析证明,氨基酸氮与微生物生物量氮之间的相关性最显著,相关系数为 0.721; 其次是酸解性氨态氮,为 0.712; 与氨基糖态氮和未知氮之间的相关性不显著。由此可以推断,土壤易矿化氮组分与土壤可矿化氮密切相关。这一推断可以从本试验中高产水稻土的可矿化氮量大于中产水稻土和低产水稻土的结果(表 4)中进一步得到证明。

表 4 不同生产力水稻土的全氮、固定态铵、有机态铵、有机氮和可矿化氮
 Table 4 Contents of total N, fixed ammonium, organic N component and mineralizable N in paddy soils of different productivity levels

地点 Location	土壤生产力水平 Productivity level	全氮 Total N (g/kg)	固定态铵 Fixed ammonium (g/kg)	有机氮组分 Organic N component (mg/kg)							可矿化氮 Mineralizable N (mg/kg)
				氨态氮 Ammonia N	氨基糖氮 Aminosugar N	氨基酸氮 Amino acid N	未知氮 Unknown N	非酸解 N Nonhydrolysable N	微生物 生物量氮 MBN		
醴陵 Liling	高产水稻土 HPSS	2.86 aA	573.2 aA	675.0 aA	300.3 aA	446.2 aA	749.3 aA	689.3 bB	66.43 aA	24.9 aA	
醴陵 Liling	中产水稻土 MPSS	2.74 aA	513.0 bB	490.5 bB	290.4 bA	424.7 aAB	654.9 bB	879.5 aA	44.67 bB	19.0 bB	
醴陵 Liling	低产水稻土 LPSS	2.63 bB	489.7 bB	449.7 cC	273.5 cB	391.9 bB	639.2 bB	875.6 aA	31.04 cC	18.9 bB	
衡东 Hengdong	高产水稻土 HPSS	1.88 aA	659.2 aA	443.7 aA	197.4 aA	293.3 aA	471.9 bA	473.8 bA	73.4 aA	23.4 aA	
衡东 Hengdong	中产水稻土 MPSS	1.85 aA	645.7 aA	331.2 bB	196.1 aA	286.8 bA	486.6 aA	549.5 aA	29.06 bB	18.3 bB	
衡东 Hengdong	低产水稻土 LPSS	1.76 bB	614.9 bB	301.0 cC	183.0 bB	262.2 bB	473.4 bB	540.3 aA	27.78 bB	17.1 cC	
长沙 Changsha	高产水稻土 HPSS	1.94 aA	427.6 aA	457.8 aA	203.7 aA	302.6 aA	455.9 aA	519.9 bB	55.18 aA	25.4 aA	
长沙 Changsha	中产水稻土 MPSS	1.76 bB	382.4 bB	315.0 bB	186.6 bAB	272.8 bB	455.8 aA	529.8 bAB	30.78 bB	22.3 bB	
长沙 Changsha	低产水稻土 LPSS	1.69 bB	342.9 cC	289.0 cC	175.8 bB	251.8 cB	407.3 bB	566.2 aA	14.35 cC	19.8 cC	
浏阳 Liuyang	高产水稻土 HPSS	2.17 aA	500.3 aA	512.1 aA	227.9 aA	338.5 aA	481.7 aA	609.8 aA	34.01 aA	24.0 aA	
浏阳 Liuyang	中产水稻土 MPSS	1.90 bB	402.3 bB	340.1 bB	201.4 bB	294.5 bB	512.8 aA	551.2 bB	30.86 aA	21.5 bA	
浏阳 Liuyang	低产水稻土 LPSS	1.66 cC	343.1 cC	283.9 cC	172.6 cC	247.3 cC	403.4 bB	552.8 bB	34.76 aA	19.3 cB	
湘乡 Xianxiang	高产水稻土 HPSS	3.41 aA	669.1 aA	804.8 aA	358.1 aA	532.0 aA	855.9 aA	859.3 aA	84.64 aA	26.2 aA	
湘乡 Xianxiang	中产水稻土 MPSS	2.84 bB	547.7 bB	508.4 bB	301.0 bB	440.2 bB	704.3 bB	886.1 aA	77.59 bB	22.5 bB	
湘乡 Xianxiang	低产水稻土 LPSS	2.79 bB	468.8 cC	477.1 cC	290.2 bB	415.7 cC	705.9 bB	901.2 aA	62.77 cC	22.4 bB	
赫山 Heshan	高产水稻土 HPSS	2.33 aA	507.6 aA	549.9 aA	244.7 aA	363.5 aA	552.2 aA	619.8 aA	48.71 aA	26.6 aA	
赫山 Heshan	中产水稻土 MPSS	2.07 bB	439.7 bB	370.5 bB	219.4 bB	320.9 bB	515.4 bB	643.8 aA	47.88 aA	21.9 bB	
赫山 Heshan	低产水稻土 LPSS	1.96 bB	352.8 cC	335.2 cC	203.8 cC	292.0 cC	495.9 bB	633.1 aA	43.97 bB	19.4 bB	
宁乡 Ningxiang	高产水稻土 HPSS	3.76 aA	691.3 aA	887.4 aA	394.8 aA	586.6 aA	955.0 aA	936.2 cB	92.1 aA	29.7 aA	
宁乡 Ningxiang	中产水稻土 MPSS	3.56 bA	517.9 bB	637.2 bB	377.4 abA	551.8 bAB	943.4 aA	1050.2 bA	80.78 bA	25.5 bB	
宁乡 Ningxiang	低产水稻土 LPSS	3.45 bB	508.9 cC	590.0 bB	358.8 bB	514.1 cB	872.9 bB	1114.4 aA	30.62 cB	24.5 bB	
沅江 Yuanjiang	高产水稻土 HPSS	3.23 aA	518.4 aA	762.3 aA	339.2 aA	503.9 aA	759.1 bA	865.6 aAB	81.84 aA	23.6 aA	
沅江 Yuanjiang	中产水稻土 MPSS	3.04 bB	508.7 aA	544.2 bB	322.2 bA	471.2 bB	826.9 aA	875.5 aA	58.7 bB	20.6 bB	
沅江 Yuanjiang	低产水稻土 LPSS	2.47 cC	378.8 bB	422.4 cC	256.9 cB	368.0 cC	639.7 cB	783.0 bB	41.5 cC	15.8 cC	

注 (Note): HPSS—High productive paddy soil; MPSS—Middle productive paddy soil; LPSS—Low productive paddy soil; MBN—Microbiomass nitrogen. 表中同列数据后面不同大、小写字母分别表示差异显著性达到 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平。Data in same column followed by different capital and small letters mean significant at the $P < 0.01$ and $P < 0.05$ levels, respectively.

2.4 土壤全磷、有效磷和无机磷组分

对 8 个试验区耕层土壤的分析结果表明(表 5),湖南省双季稻种植区水稻土全磷变化在 0.33 ~ 1.18 g/kg 之间,平均为 0.66 g/kg,速效磷变化在 0.62 ~ 61.89 mg/kg 之间,平均为 26.48 mg/kg。统计结果显示,耕层土壤全磷含量与水稻土生产力水平关系极为密切,随着水稻生产力的下降,土壤全磷呈明显降低趋势。土壤全磷和速效磷与水稻生产力、水稻产量之间的相关性均达到显著水平($p < 0.05$)和极显著水平($p < 0.01$),相关系数(r)分别达到 0.425 和 0.595。按照在水稻土上建立的速度磷养分分级标准^[16],水稻土以有效磷含量 < 5 mg/kg 为低供磷水平,6 ~ 10 mg/kg 为中供磷水平,

> 10 mg/kg 为高供磷水平,湖南省主要双季稻种植区高产水稻土多属于高供磷水平,中低产水稻土也多属于高供磷水平,仅有少数土壤为中供磷水平。同时说明,湖南省双季稻种植区水稻土由于巨大的固磷能力以及磷在土壤中的微弱移动性,进入的磷很容易被保持在土壤中,而致使土壤全磷含量能够快速升高,特别是在高产施肥条件下,这种增加的趋势更为明显。由于磷肥施用是提高水稻土生产力上的显著作用,近二三十年来,磷肥的施用受到广泛的重视。已有的研究表明^[17],长江中游双季稻种植区稻田磷素输入量远大于输出量,所施磷肥量比水稻植株实际吸收量甚至高出 2 ~ 3 倍以上,这必然导致土壤磷素的快速积累^[11]。

表 5 不同生产力水稻土的全磷、有效磷含量和无机磷组分
Table 5 Contents of total phosphorus, available phosphorus and inorganic phosphorus fractions in paddy soils of different productivity levels

地点 Location	土壤生产力水平 Productivity level	全磷 Total P (g/kg)	有效磷 Avail. P (mg/kg)	无机磷组分 Inorganic phosphorus fractions(mg/kg)			
				Fe-P	Al-P	Ca-P	O-P
醴陵 Liling	高产水稻 HPPS	1.08 aA	58.33 aA	85.13 aA	160.61 aA	158.08 aA	126.57 aA
醴陵 Liling	中产水稻 MPPS	0.84 bB	44.47 bB	68.32 bB	128.90 bB	155.12 aA	111.14 aA
醴陵 Liling	低产水稻 LPPS	0.70 cC	16.61 cC	41.67 cC	78.63 cC	121.29 bB	77.16 bB
衡 Hengdong	高产水稻 HPPS	0.65 aA	30.72 aA	15.96 aA	30.02 aA	44.86 aA	184.63 aA
衡 Hengdong	中产水稻 MPPS	0.42 bB	6.70 bB	5.99 bB	10.69 bB	29.44 bB	148.49 bB
衡 Hengdong	低产水稻 LPPS	0.33 cC	6.02 bB	4.89 bB	9.23 cB	30.86 bB	88.85 cC
长 Changsha	高产水稻 HPPS	0.73 aA	32.43 aA	29.38 aA	55.43 aA	187.99 aA	312.40 aA
长 Changsha	中产水稻 MPPS	0.67 bB	28.56 bB	22.76 bB	42.32 bB	108.33 bB	249.10 bB
长 Changsha	低产水稻 LPPS	0.59 cC	13.87 cC	22.00 cC	41.50 cC	94.21 cC	231.32 bB
浏阳 Liuyang	高产水稻 HPPS	0.63 aA	42.14 aA	55.62 aA	104.95 aA	77.76 aA	89.76 aA
浏阳 Liuyang	中产水稻 MPPS	0.48 bB	18.49 bB	21.09 bB	39.79 bB	59.02 bB	87.77 aA
浏阳 Liuyang	低产水稻 LPPS	0.42 cB	13.04 cC	17.57 cC	34.41 cC	52.70 bB	83.88 aA
湘 Xianxiang	高产水稻 HPPS	1.00 aA	61.89 aA	32.54 aA	61.39 aA	126.19 aA	203.48 aA
湘 Xianxiang	中产水稻 MPPS	0.90 aA	46.98 bB	31.00 aA	51.73 bB	103.45 abA	164.20 bB
湘 Xianxiang	低产水稻 LPPS	0.60 bB	15.90 cC	22.28 bB	46.67 cC	93.34 bB	137.17 cC
赫山 Heshan	高产水稻 HPPS	0.61 aA	20.22 aA	20.72 aA	39.09 aA	73.81 aA	104.86 aA
赫山 Heshan	中产水稻 MPPS	0.46 bB	15.53 bB	14.05 bB	26.51 bB	51.96 bB	94.77 bB
赫山 Heshan	低产水稻 LPPS	0.38 cC	9.83 cC	12.17 cC	24.85 cC	37.01 cC	90.10 bB
宁 Ningxiang	高产水稻 HPPS	0.68 aA	32.50 aA	27.63 aA	52.14 aA	99.57 aA	161.46 aA
宁 Ningxiang	中产水稻 MPPS	0.57 bB	23.40 bB	24.99 bB	47.16 bB	85.26 bAB	149.85 bB
宁 Ningxiang	低产水稻 LPPS	0.47 cC	18.12 cC	20.99 cC	39.60 cC	76.18 bB	146.52 bB
沅 Yuanjiang	高产水稻 HPPS	1.02 aA	40.44 aA	29.66 aA	55.96 aA	234.42 aA	209.28 aA
沅 Yuanjiang	中产水稻 MPPS	0.86 bB	23.54 bB	27.54 bB	51.96 bB	203.35 abA	184.60 bB
沅 Yuanjiang	低产水稻 LPPS	0.68 cC	15.87 cC	17.13 cC	32.33 cC	174.85 bB	176.37 bB

注 (Note): HPPS—High productive paddy soil; MPPS—Middle productive paddy soil; LPPS—Low productive paddy soil; 表中同列数据后面不同大、小写字母分别表示差异显著性达到 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平 Data in same column followed by different capital and small letters mean significant at the $P < 0.01$ and $P < 0.05$ levels, respectively.

对土壤无机磷形态的分级结果(表5)表明,不同生产力水稻土的无机磷总量和组成差异较大,随着水稻土生产力的提高,土壤无机磷总量呈上升趋势,高产水稻土的增加趋势十分明显,比中产和低产水稻土,无机磷总量分别增加了1.26倍和1.51倍。不同生产力水稻土,除无机磷的总量有明显变化外,其无机磷组分上也表现出显著差异。8个试验区水稻土无机磷各组分在耕层土壤中的分布规律相同,均以闭蓄态的O-P为主,占无机磷总量的46.7%,其次为Ca-P,占无机磷总量的29.9%,Fe-P和Al-P分别只占无机磷总量的8.1%和15.3%。土壤无机磷各组分的含量随水稻土生产力的提高而提高,总体趋势与土壤有效磷含量的变化一致,但无机磷各组分的提高幅度有不同。8个试验区高产水稻土的Fe-P含量分别比中产水稻土和低产水稻土提高37.5%和86.9%,Al-P提高40.2%和82.2%,Ca-P提高26.0%和47.4%;O-P提高18.8%和39.9%。对土

壤不同形态无机磷含量与有效磷的相关分析表明,Fe-P和Al-P分别与有效磷含量呈高度正相关,相关系数均达到 $P < 0.01$ 的极显著水平(r 分别为0.7361**和0.7207**),土壤Ca-P与有效磷的相关性达到 $P < 0.05$ 的显著水平($r = 0.5023^*$),而O-P与有效磷相关性不显著($r = 0.3236$),这说明Fe-P和Al-P对我省双季稻种植区水稻土有效磷的影响很大,Ca-P和O-P的影响相对较小。

2.5 全钾、缓效钾和速效钾

与全氮和全磷含量不同,不同生产力水稻土之间的全钾含量差异较小(表6)。8个试验区的水稻土的含钾矿物,除沅江底潜筒育水耕人为土含伊利石矿物为主以外,其他土壤含高岭石为主,固持钾的能力较弱,钾的保持和供应主要靠土壤有机质^[11,18]。高产、中产和低产水稻土的平均缓效钾含量分别为 210.61 ± 55.27 mg/kg、 193.09 ± 49.92 mg/kg和 190.31 ± 49.18 mg/kg,差异未达到显著水平($p > 0.05$)。

表6 不同生产力水稻土的全钾、缓效钾和速效钾含量

Table 6 Contents of total K, slowly available K and available K contents in paddy soils of different productivity levels

地点 Location	土壤生产力水平 Productivity level	全钾(g/kg) Total K	缓效钾(mg/kg) Slowly available K	速效钾(mg/kg) Available K
醴陵 Liling	高产水稻土 HPPS	18.82 aA	200.40 aA	95.01 aA
醴陵 Liling	中产水稻土 MPPS	19.80 aA	143.00 bB	93.35 aA
醴陵 Liling	低产水稻土 LPPS	19.21 aA	137.01 bB	69.03 bB
衡东 Hengdong	高产水稻土 HPPS	13.32 aA	207.33 aA	151.07 aA
衡东 Hengdong	中产水稻土 MPPS	12.50 bA	170.01 bB	63.9 bB
衡东 Hengdong	低产水稻土 LPPS	11.09 cB	172.97 bB	47.93 cC
长沙 Changsha	高产水稻土 HPPS	11.43 aA	189.95 aA	86.07 aA
长沙 Changsha	中产水稻土 MPPS	11.75 aA	184.93 aA	76.10 bB
长沙 Changsha	低产水稻土 LPPS	10.23 aA	189.92 aA	49.03 cC
浏阳 Liuyang	高产水稻土 HPPS	20.88 aA	223.01 aA	104.10 aA
浏阳 Liuyang	中产水稻土 MPPS	20.03 aA	213.97 aA	84.03 bB
浏阳 Liuyang	低产水稻土 LPPS	18.91 bB	186.99 bB	70.97 cC
湘乡 Xianxiang	高产水稻土 HPPS	18.82 aA	213.9 aA	124.02 aA
湘乡 Xianxiang	中产水稻土 MPPS	17.27 bB	207.97 aA	120.03 aA
湘乡 Xianxiang	低产水稻土 LPPS	17.70 bB	207.87 aA	88.87 bB
赫山 Heshan	高产水稻土 HPPS	15.81 aA	156.97 aA	106.03 aA
赫山 Heshan	中产水稻土 MPPS	15.32 aA	151.93 aA	85.97 bB
赫山 Heshan	低产水稻土 LPPS	14.90 aA	150.90 aA	73.04 cC
宁乡 Ningxiang	高产水稻土 HPPS	19.31 aA	154.33 aA	79.23 aA
宁乡 Ningxiang	中产水稻土 MPPS	16.11 bB	144.93 aA	70.90 bB
宁乡 Ningxiang	低产水稻土 LPPS	15.71 bB	140.93 aA	67.07 bB
沅江 Yuanjiang	高产水稻土 HPPS	27.90 aA	331.97 aA	101.10 aA
沅江 Yuanjiang	中产水稻土 MPPS	27.11 aA	300.97 bB	83.7 bB
沅江 Yuanjiang	低产水稻土 LPPS	25.28 bB	299.93 bB	76.97 cC

注(Notes): HPPS—High productive paddy soil; MPPS—Middle productive paddy soil; LPPS—Low productive paddy soil; 表中同列数据后面不同大、小写字母分别表示差异显著性达到 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平 Data in same column followed by different capital and small letters mean significant at $P < 0.01$ and $P < 0.05$ levels, respectively.

土壤缓效钾含量高低与土壤含钾矿物组成有关,含伊利石矿物为主的水稻土的缓效钾含量较高,含高岭石矿物为主的水稻土缓效钾含量低^[18]。不同生产力水稻土之间的速效钾含量差异明显(表6)。结果表明,8个试验区的高产、中产和低产水稻土的平均速效钾含量分别为 105.83 ± 22.73 mg/kg、 84.58 ± 16.97 mg/kg 和 67.86 ± 13.70 mg/kg,按照在水稻土上建立的速效钾养分分级标准^[19],湖南省双季稻种植区高产水稻土的速效钾含量只达到中等水平,中产水稻土处于缺钾水平,而低产土壤处于极

缺钾水平。研究表明,通过稻草还田等增加土壤有机质提高速效钾含量的效果明显,但化学钾肥对土壤钾库的提高非常有限。不同生产力水稻土之间速效钾含量的高低与有机质含量密切相关($y = 44.274 + 0.995x$, $r = 0.478^*$, $n = 24$)。总体来看,高产水稻土的速效钾含量并不丰富,应当重视土壤钾库的平衡保持和提高。

2.6 土壤中量元素和微量元素

2.6.1 中量元素 表7结果表明,8个试验区不同生产力水稻土之间的交换性钙含量差异较大,最高含

表7 不同生产力水稻土的中量元素和微量元素含量

Table 7 Contents of secondary and trace elements in paddy soils of different productivity levels

地点 Location	土壤生产力 水平 Productivity level	交换性钙 Exchangeable Ca ($1/2 \text{ Ca}^{2+}$) (cmol/kg)	交换性镁 Exchangeable Mg ($1/2 \text{ Mg}^{2+}$) (cmol/kg)	有效硫 Avail S (mg/kg)	有效锌 Avail Zn (mg/kg)	有效锰 Avail. Mn (mg/kg)	有效硼 Avail. B (mg/kg)
醴陵 Liling	高产水稻 HPPS	6.82 aA	0.90 aA	57.02 aA	3.83 aA	5.16 aA	0.46 aA
醴陵 Liling	中产水稻 MPPS	5.55 bB	0.87 bA	44.32 bB	3.15 bB	4.95 bB	0.40 aA
醴陵 Liling	低产水稻 LPPS	5.77 bB	0.69 cB	25.00 cC	2.78 cC	3.46 cC	0.26 bB
衡 Hengdong	高产水稻 HPPS	7.73 aA	0.81 aA	85.39 aA	4.63 aA	49.15 aA	0.39 aA
衡 Hengdong	中产水稻 MPPS	6.36 bB	0.63 bB	48.90 bB	2.31 bB	40.38 bB	0.31 bB
衡 Hengdong	低产水稻 LPPS	4.68 cC	0.43 cC	37.41 cC	2.13 cB	8.47 cC	0.26 cC
长沙 Changsha	高产水稻 HPPS	6.87 aA	1.27 aA	38.25 aA	4.46 aA	37.94 aA	0.35 aA
长沙 Changsha	中产水稻 MPPS	6.39 aA	1.24 aA	33.68 bB	4.13 aA	32.33 bB	0.34 aA
长沙 Changsha	低产水稻 LPPS	4.25 bB	0.69 bB	30.97 cC	2.45 bB	9.36 cC	0.28 bB
浏阳 Liuyang	高产水稻 HPPS	5.03 aA	0.62 aA	42.64 aA	4.37 aA	33.26 aA	0.38 aA
浏阳 Liuyang	中产水稻 MPPS	4.32 bB	0.58 aA	36.95 bB	3.57 bB	13.36 bB	0.34 aA
浏阳 Liuyang	低产水稻 LPPS	4.29 bB	0.63 aA	23.51 cC	2.67 cC	7.75 cC	0.31 bB
湘乡 Xianxiang	高产水稻 HPPS	42.69 aA	1.54 aA	171.13 aA	3.16 aA	49.23 aA	0.46 aA
湘乡 Xianxiang	中产水稻 MPPS	18.78 bB	1.31 bB	157.15 bB	2.96 bA	45.52 bB	0.40 bB
湘乡 Xianxiang	低产水稻 LPPS	17.78 bB	1.30 bB	110.50 cC	2.72 bB	14.95 cC	0.32 cC
赫山 Heshan	高产水稻 HPPS	8.54 aA	1.24 aA	89.78 aA	2.69 aA	47.98 aA	0.43 aA
赫山 Heshan	中产水稻 MPPS	8.24 bB	1.17 aA	82.50 bB	2.46 bB	32.33 bB	0.32 bB
赫山 Heshan	低产水稻 LPPS	6.51 cC	1.20 aA	65.04 cC	1.61 cC	28.25 cC	0.29 cC
宁乡 Ningxiang	高产水稻 HPPS	56.37 aA	1.35 aA	116.38 aA	4.19 aA	21.08 aA	0.45 aA
宁乡 Ningxiang	中产水稻 MPPS	30.75 bB	1.28 bB	103.22 bB	2.48 bB	4.29 bB	0.35 bB
宁乡 Ningxiang	低产水稻 LPPS	29.27 bB	1.20 bB	82.96 cC	1.98 cC	4.51 bB	0.30 cC
沅江 Yuanjiang	高产水稻 HPPS	63.52 aA	3.55 aA	84.27 aA	0.96 aA	20.49 aA	0.41 aA
沅江 Yuanjiang	中产水稻 MPPS	55.92 bB	3.05 bB	78.50 bB	0.97 aA	19.83 aA	0.31 bB
沅江 Yuanjiang	低产水稻 LPPS	45.98 cC	2.94 cC	62.24 cC	0.78 bB	16.89 bB	0.26 cC

注 (Note): HPPS—High productive paddy soil; MPPS—Middle productive paddy soil; LPPS—Low productive paddy soil; 表中同列数据后面不同大、小写字母分别表示差异显著性达到 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平 Data in same column followed by different capital and small letters mean significant at $P < 0.01$ and $P < 0.05$ levels, respectively.

量为 63.52 cmol/kg, 最低为 4.25 cmol/kg。按平均计, 高产、中产和低产水稻土的交换性钙含量分别为 24.69 cmol/kg, 17.03 cmol/kg 和 14.82 cmol/kg。按照水稻土建立的养分分级标准^[20], 高产水稻土有 6% 的田块缺钙, 中产水稻土有 12% 的田块缺钙, 低产水稻土有 50% 的田块缺钙。交换性镁含量在不同生产力水稻土上的变化较小, 高产、中产和低产水稻土的平均交换性镁含量分别为 1.42 ± 0.92 cmol/kg, 1.27 ± 0.78 cmol/kg 和 1.14 ± 0.80 cmol/kg。总体来看, 同一试验区不同生产力水稻土的交换性镁含量变化幅度较小, 但不同试验区土壤之间的变化幅度较大。值得注意的是, 一部分中低产水稻土的田块可能存在潜在性缺镁。双季稻种植区有效硫含量处于非常丰富的水平, 且不同生产力水稻土之间的有效硫含量差异较小。但不同试验区水稻土之间的含量差异较大, 高产、中产和低产水稻土的有效硫含量变异系数分别为 50.7%、61.7% 和 56.9%, 这可能与不同试验区长期施用磷肥品种(过磷酸钙, 钙镁磷肥)不同有关。

2.6.2 微量元素 8 个试验区水稻土的有效锌含量总体上较丰富(表 7)。高产、中产和低产水稻土的平均有效锌含量分别为 3.56 ± 1.24 mg/kg, 2.75 ± 0.95 mg/kg 和 2.14 ± 0.68 mg/kg。洞庭湖平原区湖积物发育的底潜筒育水耕人为土的有效锌含量较低, 平均含量仅为 0.90 mg/kg, 低于 1 mg/kg 的缺乏值。8 个试验区高产、中产水稻土的有效锰含量处于丰富水平, 平均有效锰含量分别为 33.04 ± 16.24 mg/kg 和 25.62 ± 15.8 mg/kg; 而低产水稻土的平均有效锰含量仅为 11.7 ± 8.13 mg/kg。高产、中产和低产水稻土的硼含量处于中等水平, 平均分别为 0.42 ± 0.04 mg/kg、 0.35 ± 0.03 mg/kg 和 0.28 ± 0.02 mg/kg。多数低产水稻土的有效硼的供应不足, 平均有效硼含量仅为 0.28 ± 0.02 mg/kg。因此, 低产水稻土尤其 pH 值较高的低产水稻土缺硼应当引起足够的重视。

3 讨论

水稻生产以获得高产为目标, 而有机质和无机养分的投入是基本保证, 高产水稻土也正是在这样的条件下, 一些地势较好的潜育性水稻土上经过长期耕作培肥而逐渐形成的。湖南省双季稻种植区高产水稻土, 通过长期培育, 在保持较高的耕作施肥水平条件下, 土壤有机质基本处于平衡状态, 不同生产力水稻土有机质含量的变化进一步证明了这一点。

在一定土壤-作物-气候条件下, 有机质含量是评价土壤肥力高低和可持续性的重要指标^[21-22]。本研究中, 高产水稻土的有机质含量在 35.49~62.04 g/kg 范围, 平均 47.74 g/kg, 中产水稻土在 31.51~51.89 g/kg 之间, 平均 43.57 g/kg, 低产水稻土在 30.16~51.69 g/kg 范围, 平均 39.13 g/kg, 与李忠佩报道的江西高产水稻土有机质储量的结果基本一致^[3], 但高于丁玉治等^[23]报道的结果, 这可能是湖南省双季稻种植区近 10 多年来机械化收割后大量稻草归还土壤, 加之高产水稻土的良好管理, 根系残存量大的原因。高产水稻土的有机质含量丰富表明土壤生产力的可持续性, 说明稻草还田在维持高产土壤的重要性。李忠佩等^[24]的研究证明, 在土壤有机质含量丰富的条件下, 由于黏粒对土壤有机质的保护能力日趋饱和, 高产水稻土的矿化速率明显提高, 必须保持较高量的有机质输入才能维持高产水稻土有机质的平衡。我们推测, 即使目前保持较高生产力, 未来其有机质含量不会有大的变化。因此, 只有每年保持适量有机质的输入, 才能阻止土壤有机质的快速下降。

本研究表明, 高产水稻土的有机质和全氮含量处于非常丰富水平, C/N 比低于中产和低产水稻土。这就意味着相比中产和低产水稻土, 高产水稻土的氮库大, 有机质的矿化将会释放更多的无机氮造成氮的淋溶损失。高产水稻土的 pH 一般趋于微酸性, 硝化细菌数量高^[25], 硝化作用产生的硝酸盐易于淋溶或径流损失导致水体^[26]和大气污染^[27]。因此, 水稻土尤其是高产水稻土的硝化作用应当引起足够的重视。

高产水稻土的速度磷含量极为丰富, 有大量的磷残存于土壤中。这可能是自 20 世纪 60 年代中期以来大量施用磷肥所致。本研究表明, 土壤速效磷提高到一定程度后并没有改变高产水稻土上的水稻产量。数据显示, 高产水稻土包括中产水稻土在内, 目前的磷肥施用量过高。耕作层土壤磷的过度积累不仅造成经济上的损失, 而且会带来环境风险, 因为磷通过径流排水及淋溶被送入江河湖泊的水体^[28-29]。我们从望城县双季稻种植区长期定位试验中发现, 水稻土 0—15 cm 耕层土壤 Olsen-P 为 10~15 mg/kg 时, 施磷肥的水稻产量没有表现出明显差异^[11], 因此我们把 15 mg/kg Olsen-P 水平看作高产水稻土的足量水平, 推荐作为土壤测试的参比值。众所周知, 土壤磷分级方法可能适合解决合理施用磷肥的问题。

与有机质、全氮和速效磷相比较,高产水稻土的全钾、缓效钾和速效钾含量并不丰富。根据 24 块不同生产力水稻土样品分析结果,湖南省双季稻种植区稻田土壤全钾、缓效钾和速效钾含量分别为 17.44 g/kg, 198.00 mg/kg 和 86.09 mg/kg, 目前我省双季稻种植区水稻土全钾、缓效钾含量低于 20 世纪 80 年代中期的水平,速效钾含量接近于 20 世纪 80 年代中期的水平^[18]。总体来讲,湖南省双季稻种植区水稻土的全钾、缓效钾含量呈下降趋势,速效钾含量仍然维持在 20 世纪 80 年代中期的中、下水平。不同生产力水稻土速效钾含量的差异主要是因施肥量的不同尤其是施用钾肥量的不同引起的。调查表明,高产水稻土只占到 35% 左右。由于高产水稻土所处地形部位平坦,离村庄较近,农民投入的有机肥和化学钾肥较多,这使得通过施肥进入土壤中的钾量要相对多一些,但并不丰富,应当重视该类水稻土钾库的平衡保持和提高。特别要高度重视提高中产和低产水稻土的钾库,通过长期施用有机肥、稻草还田和补充化学钾肥的措施,缓解目前水稻土缺钾的现状。

参 考 文 献:

- [1] 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,1998,15(3): 70-74.
Fan Y C, Ye H Z. Fertility characters and management of red soil in Jiangxi [J]. Acta Agric. Jiangxi, 1998, 15(3): 70-74.
- [2] 胡建利,王德建,孙瑞娟,等. 长江下游典型地区农田土壤肥力变化-以常熟市为例[J]. 土壤学报,2008,45(6): 1077-1094.
Hu J L, Wang D J, Sun R J *et al.* Variation of soil fertility of farmlands in typical regions in the lower reaches of the Yangtze river - A case study of Changshu county [J]. Acta Pedol. Sin., 2008, 45(6): 1077-1094.
- [3] 李忠佩,张桃林,陈碧云. 江西余江县高产水稻土有机碳和养分含量变化[J]. 中国农业科学,2006,39(2): 324-330.
Li Z P, Zhang T L, Chen B Y. Changes of organic carbon and nutrient contents in highly productive paddy soils in Yujiang county of Jiangxi province [J]. Sci. Agric. Sin., 2006, 39(2): 324-330.
- [4] 李庆逵. 中国水稻土[M]. 北京: 科学出版社,1992.
Li Q K. Paddy soils of China [M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [5] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社,1978.
Department of Physical Study, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science. Method for soil physical property [M]. Beijing: Science Press, 1978.
- [6] 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.
Lu R K. Analytical methods of soil agricultural chemistry [M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [7] Keeny D R, Bremner J M. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils: 5. Fixed ammonium [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1966, (30): 587-594.
- [8] Waring S A, Bremner J M. Ammonium production in soil under waterlogged condition as and index of nitrogen availability [J]. Nature, 1964, 29: 951-952.
- [9] Stevenson F J. Nitrogen-organic forms [A]. Weaver R W, Angle J S, Bottomley P S. Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties. SSSA Book Series No. 5 [M]. Madison: SSSA and ASA, 1996.
- [10] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus [J]. Soil Sci., 1957, 84: 133-144.
- [11] 廖育林,郑圣先,聂军,等. 长期施用化肥和稻草对红壤水稻土肥力和生产力持续性的影响[J]. 中国农业科学,2009,39(2): 324-330.
Liao Y L, Zheng S X, Nie J *et al.* Long-term effects of fertilizer and rice straw application on soil fertility and productivity sustainability of a reddish paddy soil [J]. Sci. Agric. Sin., 2009, 39(2): 324-330.
- [12] 林明海,赖庆望. 不同熟化程度红壤及红壤水稻土的腐殖质组成及其特性[J]. 土壤学报,1982,19(3): 237-247.
Lin M H, Lai Q W. The composition and properties of humus in the cultivated end earth and paddy soil derived from red earth [J]. Acta Pedol. Sin., 1982, 19(3): 237-247.
- [13] 李庆民,尹达龙. 黑土肥力变化特点及其与土壤复合胶体性质的关系[J]. 土壤学报,1982,19(4): 351-359.
Li Q M, Yin D L. The characteristics of black soil fertility in relation to the properties of soil colloidal complex [J]. Acta Pedol. Sin., 1982, 19(4): 351-359.
- [14] 张桃林,鲁如坤,李忠佩. 红壤丘陵区土壤养分退化与养分库重建[J]. 长江流域资源与环境,1998,7(1): 18-24.
Zhang T L, Lu R K, Li Z P. Nutrient degradation and restoration of red soil in hilly region of China [J]. Resour. Environ. Yangtze Basin, 1998, 7(1): 18-24.
- [15] Stevenson F J. Organic forms of soil nitrogen [A]. Stevenson F J. Nitrogen in agricultural soils [M]. Madison, Wisconsin, USA: American Society of Agronomy Incorporation, 1982.
- [16] 杨峰. 湖南土壤[M]. 北京: 中国农业出版社,1989.
Yang F. Soil in Hunan [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1989.
- [17] 李忠佩,李德成,张桃林,等. 红壤水稻土肥力性状的演变特征[J]. 土壤学报,2003,40(6): 870-878.
Li Z P, Li D C, Zhang T L *et al.* Dynamics of soil properties in red soil region [J]. Acta Pedol. Sin., 2003, 40(6): 870-878.
- [18] 郑圣先,罗成秀,戴平安. 湖南省主要稻田土壤供钾能力的研究[J]. 中国农业科学,1989,22(1): 75-82.
Zheng S X, Luo C X, Dai P A. Potassium supplying capacity of main paddy soil in Hunan province [J]. Sci. Agric. Sin., 1989, 22(1): 75-82.
- [19] 陈防,郑圣先. 我国南方作物高效施钾技术的研究进展[J].

- 土壤肥料, 2004, (1): 28-32.
- Chen F, Zheng S X. The research progress of potassium efficient application technique in South China [J]. *Soil Fert*, 2004, (1): 28-32.
- [20] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国肥料[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1994.
- Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Science. *Chinese fertilizers* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technical Press, 1994.
- [21] Tiessen. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility [J]. *Nature*, 1994, 71: 783-785.
- [22] Reeves. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems [J]. *Soil Tillage Res.*, 1997, (48): 131-167.
- [23] 丁玉治, 黄景, 农光标, 等. 广西高产水稻土的肥力特征及其培育[J]. 广西农业大学学报, 1992, 11(3): 137-143.
- Ding Y Z, Huang J, Nong G B *et al.* The characteristics and culture of fertility of high-yield paddy soil in Guangxi [J]. *J. Guangxi Agric. Univ.*, 1992, 11(3): 137-143.
- [24] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云, 等. 红壤稻田土壤有机质的积累过程特征分析[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 344-352.
- Li Z P, Zhang T L, Chen B Y *et al.* Soil organic matter dynamics in a cultivation chronosequence of paddy fields in subtropical China [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2003, 40(3): 344-352.
- [25] 罗兰芳, 郑圣先, 廖育林, 等. 控释氮肥对稻田土壤微生物的影响及其与土壤氮素肥力的关系[J]. 湖南农业大学学报, 2007, 33(5): 608-613.
- Luo L F, Zheng S X, Liao Y L *et al.* Effect of controlled release nitrogen fertilizer on soil microbe and its relation to soil nitrogen fertility [J]. *J. Hunan Agric. Univ.*, 2007, 33(5): 608-613.
- [26] 纪雄辉, 郑圣先, 鲁艳红, 等. 控释氮肥对洞庭湖区双季稻田表面水氮素动态及其径流损失的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1432-1440.
- Ji X H, Zheng S X, Lu Y H *et al.* Effects of controlled release nitrogen fertilizer on surface water N dynamics and its runoff loss in double cropping paddy soil in Dongting Lake area [J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2007, 18(7): 1432-1440.
- [27] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 143-148.
- Qin X B, Li Y E, Liu K Y *et al.* Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments [J]. *Trans. CSAE*, 2006, 22(7): 143-148.
- [28] Sharpley A N. Soil phosphorus dynamic. Agronomic and environment impacts [J]. *Ecol Eng.*, 1995, (5): 261-279.
- [29] Sharpley A N, Robinson J S, Smich S J. Bioavailable phosphorus dynamics in agricultural soil and effect on water quality [J]. *Geoderma*, 1995, (67): 1-15.