

不同施肥对退化稻田土壤肥力恢复的影响*

周卫军¹ 陈建国¹ 谭周进¹ 张杨珠^{1*} 曾希柏²

(¹ 湖南农业大学资源环境学院,长沙 410128 ;² 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081)

摘要 为了探明不同施肥修复措施对退化水稻土壤肥力的修复作用,自 2005 年起采用盆栽试验连续 3 年对长期缺肥退化水稻土进行了土壤肥力培肥试验研究。结果表明 6 种施肥修复措施均可以显著地改善退化水稻土的肥力特征,土壤有机质含量最多提高了 14.0%,土壤有效磷显著增加,最高增加量达到 $39.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤速效钾均恢复到中等水平($80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)以上,但土壤碱解氮除水稻专用复合肥(ZY)处理基本维持试验前水平外,其他施肥措施均有所下降,不同施肥修复措施均可明显地提高土壤微生物数量、微生物活性以及微生物生物量 C、N、P 含量,但以有机无机肥配合效果最佳,有机无机肥配合还可以促进稻谷产量和显著提高肥料农学效率,对于长期不施肥导致的退化稻田土壤肥力的修复以在施用水稻专用复合肥的基础上配施有机肥的效果最佳。

关键词 退化;施肥措施;土壤肥力

中图分类号 S156.5 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2010)1-0029-07

Effects of different fertilization on the improvement of degraded paddy soil fertility in red earth region. ZHOU Wei-jun¹, CHEN Jian-guo¹, TAN Zhou-jin¹, ZHANG Yang-zhu¹, ZENG Xi-bai²(¹College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; ²Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China). *Chinese Journal of Ecology* 2010 29(1) 29-35.

Abstract: A 3-year pot experiment was conducted at the experimental base of College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University to study the improvement effect of different fertilization on degraded paddy soil fertility in red earth region Since 2005. All the test six fertilization measures improved the soil fertility significantly. The soil organic matter content increased up to 14.0%, soil available P increased up to $39.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, soil available K recovered to medium level ($80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), but soil available N decreased except that it was maintained at the level before experiment in rice-specific fertilizer treatment. All fertilization treatments increased the soil microbes' amount, soil microbial activity, and soil microbial biomass C, N and P, with the best effect in treatment inorganic fertilizers incorporating with organic manure. The combined application of chemical fertilizers and organic manure also increased the rice grain yield and fertilizer agricultural use efficiency. It was suggested that applying rice-specific fertilizer in combining with organic manure could have the best improvement effect for the degraded paddy soil fertility resulted by long term non-fertilization.

Key words: degradation; fertilization measure; soil fertility.

土壤退化是指在各种自然特别是人为因素影响下所发生的导致土壤的生物生产能力或土地利用和环境调控潜力,也即土壤质量及其可持续性下降,甚至完全丧失其物理的、化学的和生物学特征的过程,

包括过去的、现在的和将来的退化过程,是土地退化的核心部分(张桃林等,2000)。可以因为侵蚀、肥力下降、空气和水分含量的变化、盐化作用、土壤植物或动物的改变等而发生(Barrow,1991)。土壤质量的核心是土壤生产力,基础是土壤肥力。因此,退化土壤肥力的提高和恢复是人们关注的焦点,施肥是提高土壤肥力的重要措施之一(孔宏敏等,

* 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAD05B01)。

** 通讯作者 E-mail: zhangyangzhu2006@163.com

收稿日期:2009-05-25 接受日期:2009-08-12

2004),但不同的施肥与治理措施对土壤肥力的影响各异(杨玉盛等,1998),平衡施肥可以促进土壤肥力均衡发展,改善土壤的供肥性能,有机无机肥配合施用有利于土壤生物特性的改善和植物群落结构的改良(李本银等,2004;张彦东等,2005)。可见,针对不同的土壤退化类型采取相应的施肥措施进行恢复重建是非常重要的。

长期不施肥会导致土壤物理性状变劣,土壤有机质、土壤养分供应能力降低,土壤质量严重退化,系统生产力明显下降(周卫军等,2002;王凯荣等,2004;吴春艳等,2008)。施肥能促进土壤肥力的恢复,改善土壤微生物种群结构,提高土壤微生物生物量C、N、P(孙瑞莲等,2004;徐玲等,2006;周卫军等,2007),提高系统生产力(周卫军等,2002;陈安磊等,2004;吴春艳等,2008)。本文选择湖南省1986年在临澧县设立的红黄泥稻田土壤肥力与肥料效益定位试验中长期不施肥的水稻土壤进行盆栽试验,研究了儿种不同施肥修复措施对长期不施肥导致的退化稻田土壤肥力的修复效应,以期为退化土壤的培肥和中低产土壤的改良提供依据。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤

供试土壤于2005年3月采自湖南省临澧县1986年在红黄泥稻田上布置的土壤肥力与肥料效益定位试验中的长期不施肥(CK)的耕层土壤(0~20 cm)。2005年4月盆栽试验前将所有土壤混匀,过2 cm筛,取分析土壤样品,土壤基本理化性质为:pH(水提)5.72,土壤有机质为28.5 g·kg⁻¹,全氮为1.89 g·kg⁻¹,全磷为0.17 g·kg⁻¹,全钾为13.5 g·kg⁻¹,碱解氮为162.5 mg·kg⁻¹,有效磷为1.07 mg·kg⁻¹,速效钾为56.3 mg·kg⁻¹,有效硅为107.2 mg·kg⁻¹。定位试验前(1986年)土壤基本理化性质为:pH(水提)5.33,土壤有机质为30.3 g·kg⁻¹,全氮为2.01 g·kg⁻¹,全磷为0.25 g·kg⁻¹,全钾为15.02 g·kg⁻¹,碱解氮为166.8 mg·kg⁻¹,有效磷为7.14 mg·kg⁻¹,速效钾为57.4 mg·kg⁻¹,详情见参考文献(徐玲等,2006)。

1.2 试验设计

盆栽试验自2005年起,在湖南农大资源环境学院实验基地的玻璃房进行。盆钵为直径18.5 cm×高28 cm的白瓷钵,每盆装风干土5.5 kg。共设6个处理:1)CK,对照不施肥;2)NPK,施NPK化肥;

3)NPKM,在处理2)基础上配施有机肥;4)NPKSi,在处理2)基础上配施硅肥;5)ZY,施水稻专用复合肥,NPK量与处理2)相同;6)ZYM,在处理5)基础上配施有机肥,NPK量与处理5)相同。每个处理重复6次,每盆插3蔸,水稻供试品种早稻为常规稻,晚稻为杂交稻。

1.3 供试肥料

氮肥用含氮46%的尿素,钾肥用含K₂O 60%的氯化钾,磷肥用含有效磷(P₂O₅)12%的钙镁磷肥;水稻专用复合肥为株洲湘珠化工有限公司生产的湘珠牌水稻专用肥(N:P₂O₅:K₂O为18:5:8),以N为基础计算用量,不够的P、K肥用磷酸二氢钾和氯化钾补充,硅肥用化学纯偏硅酸钠;有机肥早稻用紫云英,N、P₂O₅、K₂O含量分别为(风干)29.3、6.6和23.6 g·kg⁻¹,晚稻用鲜稻草,N、P₂O₅、K₂O含量分别为(风干)8.7、2.9和21.6 g·kg⁻¹,猪粪的N、P₂O₅、K₂O含量分别为(风干)19.1、17.8和12.4 g·kg⁻¹。具体施用量见表1。

1.4 样品的采集与测定

1.4.1 土壤样品的采集 每季水稻收获时采集盆土约250 g,部分风干,磨碎,过10目和60目筛;其余新鲜土壤于4℃冰箱保存备用。

1.4.2 植物样品的采集 于水稻分蘖盛期和齐穗期每处理用1盆测定水稻生物量。

水稻成熟期平泥收获地上部分,考种,分开籽粒与茎叶,95℃杀青30 min,80℃烘干,称量,测定水稻地上部分生物量,分别粉碎,过40目筛,装入玻璃瓶中,备用。

1.4.3 分析测定方法 土壤碱解氮:碱解扩散法;土壤速效磷:0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃浸提钼锑抗比色法;土壤速效钾:乙酸铵提取-火焰光度法;土壤有机质:外加热氧化-容量法(鲁如坤,2004)。

表1 试验设计

Tab.1 Design of experiments

处理	化肥用量 (g·kg ⁻¹)				有机肥用量 (g·kg ⁻¹)
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ SiO ₃	紫云英/ 鲜稻草 猪廐肥
CK	0	0	0	0	0
NPK	0.2/0.3	0.1/0.15	0.2/0.3	0	0
NPKM	0.12/0.18	0.06/0.09	0.12/0.18	0	10
NPKSi	0.2/0.3	0.1/0.15	0.2/0.3	0.2	0
ZY	0.2/0.3	0.1/0.15	0.2/0.3	0	0
ZYM	0.12/0.18	0.06/0.09	0.12/0.18	0	10

化肥N、P、K施用量中“/”前者为早稻用量,“/”后者为晚稻用量。

土壤微生物区系:新鲜土壤进行培养测定。好气和厌气性细菌培养用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基;土壤放线菌培养用高泽氏1号琼脂培养基;土壤真菌培养用马丁-孟加拉红链霉素琼脂培养基。好气性细菌在30℃下培养30h,厌气性细菌在30℃下培养48h,放线菌和真菌在28℃~30℃下培养5d。土壤好气性细菌、放线菌和真菌的计数采用稀释平板计数法,厌气性细菌的计数采用液体石蜡油法(喻子牛和何绍江,1996)。

土壤微生物活度:新鲜土壤,改进的FDA法测定(Schnurer & Rosswall,1982)。

土壤微生物生物量C(MB-C):氯仿熏蒸—K₂SO₄提取容量分析法;土壤微生物生物量N(MB-N):氯仿熏蒸—K₂SO₄提取全氮测定法;土壤微生物生物量P(MB-P):氯仿熏蒸—0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃提取法(吴金水等,2006)。土壤微生物生物量C、N和P的测定均采用风干土壤预培养7d后进行测定。

水稻植物N、P和K:浓H₂SO₄和H₂O₂消煮,蒸馏法测氮,钒钼黄比色法测磷,火焰光度计法测钾(鲁如坤,2004)。

1.5 数据处理

试验数据采用统计软件SPSS 12及Microsoft Excel 2003进行,差异显著性采用SSR法。

养分内部利用率IE(internal nutrient use efficiency)和肥料农学效率的计算公式如下:

$$\text{养分内部利用效率(IE kg/kg)} = \frac{\text{产量}}{\text{地上部分养分吸收量}}$$

$$\text{肥料农学效率(kg/kg)} = \frac{\text{施肥区产量} - \text{无肥区产量}}{\text{施肥量}}$$

2 结果与分析

2.1 不同施肥措施对土壤有机质的提升效应

从表2可以看出,经过不同施肥措施3年的修复,土壤有机质含量有显著差异($P < 0.05$),其中以有机无机配合施用措施(NPKM和ZYM处理)效果最好,与试验前比较,土壤有机质含量分别提高了13.3%和14.0%,施用水稻专用复合肥(ZY处理)效果次之,与试验前比较,土壤有机质含量增加了7.0%;单施化肥(NPK和NPKSi处理)效果较差,与试验前比较,土壤有机质含量仅分别增加了3.9%和4.6%,且二者之间没有显著差异;不施肥(CK)土壤有机质基本维持在试验前水平。可见,在退化土壤的修复过程中适当补充有机肥是非常必要,对

表2 不同施肥处理土壤有机质和速效养分含量(2005—2007年平均值)

Tab.2 Content of soil organic matter and available nutrients in different fertilization treatments

处理	有机质 (g·kg ⁻¹)	碱解氮 (mg·kg ⁻¹)	有效磷 (mg·kg ⁻¹)	速效钾 (mg·kg ⁻¹)
CK	28.8 d	85 d	9.9 e	39 f
NPK	29.6 c	131 bc	14.9 d	140 b
NPKM	32.3 a	135 b	28.4 b	111 d
NPKSi	29.8 c	131 bc	19.0 c	131 c
ZY	30.5 b	161 a	29.5 b	241 a
ZYM	32.5 a	122 c	40.1 a	98 e

不同字母代表差异显著($P < 0.05$)。下同。

提高土壤有机质具有明显的效果。单施化肥虽然没有从外部补充有机肥,但是系统内部由于落叶落花、根系的脱落死亡等自然归还的有机物量较大,且有随着系统生物量增大的趋势(周卫军等,2005),对于维持和提高土壤有机质有十分重要的作用和意义。

2.2 不同施肥措施对土壤速效养分的影响

2.2.1 土壤碱解氮 从表2可以看出,不同修复处理间土壤碱解氮含量差异显著,其中以ZY处理最高,为161 mg·kg⁻¹,基本与试验前持平,显著高于其他处理;以对照处理(CK)最低,仅85 mg·kg⁻¹,显著低于各施肥处理,比试验前下降了47.5%。可见,为维持水稻土速效氮的平衡,施用化肥是非常重要的,且应以能够满足水稻的吸收为目标,最好是施用水稻专用复合肥,以满足水稻生长的需求。

2.2.2 土壤有效磷 水稻收获时施肥修复处理间土壤有效磷含量相差显著,各处理有效磷大小顺序为ZYM(40.1 mg·kg⁻¹) > ZY(29.5 mg·kg⁻¹) > NPKM(28.4 mg·kg⁻¹) > NPKSi(19.0 mg·kg⁻¹) > NPK(14.9 mg·kg⁻¹) > CK(9.9 mg·kg⁻¹) (表2)。显然,相对于对照各修复处理都能显著提高土壤有效磷含量,施用有机肥、水稻专用肥有助于土壤有效磷的提高。

2.2.3 土壤速效钾 从表2可见,不同施肥修复处理间土壤速效钾含量差异显著。不同修复处理间水稻土速效钾含量大小顺序为ZY(241 mg·kg⁻¹) > NPK(140 mg·kg⁻¹) > NPKSi(131 mg·kg⁻¹) > NPKM(111 mg·kg⁻¹) > ZYM(98 mg·kg⁻¹) > CK(39 mg·kg⁻¹)。且施肥修复处理最低的也比试验前增加了41.7 mg·kg⁻¹,可见,施用含钾化肥均能显著提高土壤速效钾含量,但也可以看到,有机无机肥配施处理土壤速效钾的增幅小于单施化肥处理,对照处理土壤速效钾含量低于缺钾临界水平50

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 仍属缺钾土壤, 其他修复处理土壤速效钾含量都超过了中等水平 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (谢卫国, 2006), 土壤速效钾基本恢复正常。

2.3 施肥修复处理土壤微生物特性的差异

2.3.1 土壤微生物区系及活度 从表3可以看到, 与对照相比, 各施肥修复处理细菌数量显著提高。各施肥修复处理间, 细菌数量差异极显著。配施有机肥、硅肥的处理显著高于单施化肥的处理, 同时施用水稻专用肥的处理比施用氮磷钾肥的处理细菌数量略高, 但不显著。因施用有机肥、硅肥能促进植株新陈代谢, 增加根系的分泌量, 故细菌繁殖快, 细菌数量大。除了相应含量的氮磷钾养分外, 水稻专用肥还含钙镁硅等中量元素和其他微量元素, 因而水稻根系活力更旺盛, 根际分泌物多, 相应的细菌数量较多。硅是水稻生长的有益元素, 增施硅肥能促进水稻生理活动, 增强根系活力, 因而 NPKSi 处理细菌数量比 NPK 处理高。

真菌是好气性微生物, 宜生活于微酸性环境。在本试验中, 真菌的数量都较小, 但各处理间真菌数量差异显著(表3)。施用水稻专用肥的处理(ZYM、ZY)真菌数量显著高于其他处理, 说明施用专用肥能产生比较适合于真菌生长的环境, 而单施施用氮磷钾肥则相反。增施硅肥促进水稻生理活动, 增加根系分泌物数量, 一定程度上也增加了真菌数量(Frank *et al.*, 2003)。

放线菌属好气性微生物, 宜生活于微碱性环境, 主要以大分子有机物为营养源。在本研究中, 各处理放线菌数量差别显著, 其中 CK、ZYM 处理较高, 其他处理则较低(表3)。因配施有机肥, 土壤中大分子有机物含量较多, 故 NPKM、ZYM 处理放线菌数量分别比类似处理(NPK、NPKSi 和 ZY)显著提高。对照(CK)处理因细菌、真菌数量都很小, 放线

表3 施肥修复处理土壤微生物区系及活度(2006—2007年平均值)

Tab.3 Soil bacterial flora and activity in paddy soil with different fertilization treatments

施肥处理	细菌 ($\times 10^6 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$)	真菌 ($\times 10^3 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$)	放线菌 ($\times 10^3 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$)	微生物活度
CK	3.8 e	3.5 c	60.0 b	0.385 ab
NPK	12.7 d	2.7 d	25.6 c	0.306 c
NPKM	16.9 c	2.5 d	29.7 c	0.404 ab
NPKSi	22.3 b	3.5 c	16.4 d	0.373 b
ZY	12.9 d	4.2 b	28.6 c	0.405 ab
ZYM	24.9 a	6.0 a	81.3 a	0.443 a

菌生存空间大, 故其数量较大; 同理, NPKSi 处理细菌、真菌数量较大, 放线菌生存空间较小, 其放线菌数量较低(Frank *et al.*, 2003)。

微生物活度代表微生物活动过程中生化代谢强度, 能反映土壤养分代谢状况, 由植物代谢总量和可利用碳决定(Heal & Madean, 1975)。由表3可知, 与对照相比, NPKM、ZY、ZYM、NPKSi 处理微生物活度与之相差不显著, 只有 NPK 显著降低, 说明化肥配施有机肥、硅肥通过加强植株新陈代谢, 丰富微生物营养源, 能保持或提高微生物活度; NPK 处理由于放线菌数量较低, 大分子有机物分解减弱, 其微生物活度显著低于对照。

2.3.2 土壤微生物生物量碳、氮、磷 土壤微生物量碳(MBC)的变化反映了微生物利用土壤碳源进行自身细胞建成而大量繁殖和微生物细胞解体使有机碳矿化的过程, 与输入土壤中有机碳的质和量有关(庞欣等, 2000), 且土壤微生物生物量碳和潜在的土壤可利用态氮磷之间存在显著正相关(刘恩科等, 2007), 又与土壤肥力和土壤健康密切相关。从表4可以看出, 施肥修复处理间土壤 MBC 含量差异显著($P < 0.05$), 均显著的高于对照处理; 以有机无机配合处理的 ZYM 和 NPKM 为高, 二者之间没有显著差异, 可能是配施有机肥使系统中输入的有机碳量加大的缘故。NPKSi 处理的土壤 MBC 含量较低, 显著低于其他各施肥修复处理, 这其中的原因有待进一步研究。

微生物生物量氮(MBN)的大小不仅与土壤中微生物可利用的氮多少有关, 还与 MBC 的大小有关, MBC 大, 则微生物吸收利用的氮多, MBN 相应就高; 反之, 则低(Garland, 1995)。表4表明, 有机无机配合施用(NPKM和ZYM处理)可以显著提高土

表4 土壤微生物生物量 C、N、P 及 MBC/MBN、MBC/MBP 比值(2006—2007年平均值)

Tab.4 Content of MBC, MBN, MBP, and the ratio of MBC/MBN, and MBC/MBP in paddy soil with different fertilization treatments

处理	MBC ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	MBN ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	MBP ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	MBC/MBN	MBC/MBP
CK	174 d	32 d	5.6 e	5	31
NPKSi	319 c	72 c	8.4 d	4	38
NPK	465 b	40 d	8.0 d	12	58
ZY	510 b	42 d	30.4 c	12	17
NPKM	571 ab	95 b	36.7 b	6	16
ZYM	664 a	125 a	42.5 a	5	16

壤 MBN 含量,且与施用的化肥形态有密切的关系; NPK、ZY 和 CK 处理间土壤 MBN 含量没有显著差异,可见单施化肥对促进土壤 MBN 的作用是较弱的,但是当在 NPK 化肥的基础上配施 Si 肥时,则可以显著提高土壤 MBN 含量,这可能与 Si 增强水稻的生理作用有关。

从表 4 可以看出,施肥可以显著提高土壤微生物生物量磷(MBP)含量,促进土壤有效磷的活化,统计分析显示,土壤 MBP 与土壤有效磷含量呈显著正相关($r=0.94$),可见,在长期缺肥水稻土施肥修复中采用 NPK 配合施用是非常必要的。同时,施用有机肥对提高土壤 MBP 含量效果更显著,因此,在退化水稻土肥力修复过程中采用有机无机配合施用效果更加。施用水稻专用复合肥处理(ZY)土壤 MBP 含量较高,显著的高于其他单施化肥处理(NPK 和 NPKSi),表明水稻专用复合肥在退化水稻土的肥力修复中是具有明显效果的。

土壤 MBC/MBN 和 MBC/MBP 比不但能反映微生物种群结构,还能表现土壤微生物对土壤氮磷有效性的调节作用。土壤 MBC/MBN 和 MBC/MBP 比值小,说明土壤微生物具有较大的释放氮磷的潜力;如果 MBC/MBN 和 MBC/MBP 比值大,则微生物具有同化土壤有效态氮磷的趋势(He *et al.*, 1997; Grønflaten *et al.*, 2005)。在本试验中,ZYM、NPKM、NPKSi 与 CK 处理土壤 MBC/MBN 比值较小(表 4),说明以上处理土壤微生物释放有效氮的潜力大,施肥修复措施较好,而单施化肥的 NPK 和 ZY 处理土壤 MBC/MBN 比值较大,土壤微生物可能会固定土壤有效氮,存在与水稻争氮肥的趋势。在 ZYM、NPKM、ZY 处理中,土壤 MBC/MBP 比值 < 30 ,土壤微生物能为作物提供有效磷;而 NPK、NPKSi、CK 处理土壤 MBC/MBP 比值 > 30 ,土壤微生物正常生命活动需要从土壤中固定有效磷,从而与作物争磷(谭周进等 2006)。

2.4 各施肥修复处理的产量效益及养分吸收利用特征

2.4.1 水稻各生育期生物量与水稻产量

从表 5 可知,与对照(CK)相比,各施肥修复处理在水稻分蘖盛期和齐穗期的水稻生物量没有显著差异,但收获时,各施肥修复处理水稻生物量具有显著差异,以 NPKSi 处理最高,单施 NPK 处理最低,水稻专用复

表 5 不同施肥处理水稻不同生育期生物量与稻谷产量(2006—2007 年平均值 $g \cdot \text{盆}^{-1}$)

Tab. 5 Biomass in various stage of rice growth and the grain yield with different fertilization treatments

处理	生物量			稻谷产量
	分蘖盛期	齐穗期	收获期	
CK	10.5 ± 1.2	34.4 ± 5.2	47.9 ± 8.7 d	28.3 d
NPK	6.6 ± 2.3	47.5 ± 6.1	73.1 ± 13.9 c	31.4 cd
NPKM	11.1 ± 3.3	49.3 ± 10.2	82.1 ± 14.0 b	40.6 a
NPKSi	9.1 ± 2.6	45.4 ± 8.7	91.4 ± 17.3 a	38.2 ab
ZY	11.3 ± 1.8	45.1 ± 8.9	83.2 ± 9.3 b	32.6 bc
ZYM	9.0 ± 1.9	47.8 ± 6.3	85.1 ± 8.6 b	42.0 a

合肥和有机无机肥配合施用次之。可见,在退化水稻土的肥力修复过程中补施硅肥对促进水稻生长和提高水稻的生物量是有明显效果的,且最好是在施肥过程中还配施有机肥,这样可以保证土壤平稳供肥,促进水稻生长,以提高水稻生物量。

水稻经济产量的高低反映了水稻土生产力的大小,因此各施肥修复处理的水稻产量也能说明施肥修复的效果。本试验中各施肥修复处理间水稻产量差异显著($P < 0.05$),各处理水稻产量高低顺序为: ZYM($42.0 g \cdot \text{盆}^{-1}$) $>$ NPKM($40.6 g \cdot \text{盆}^{-1}$) $>$ NPKSi($38.2 g \cdot \text{盆}^{-1}$) $>$ ZY($32.6 g \cdot \text{盆}^{-1}$) $>$ NPK($31.4 g \cdot \text{盆}^{-1}$) $>$ CK($28.3 g \cdot \text{盆}^{-1}$),表明在退化水稻土的修复时,在平衡施肥的基础上配施硅肥、有机肥能显著提高水稻产量,若仅单施氮磷钾化肥增产作用有限。

2.4.2 各施肥修复处理的养分利用特征

从图 1 可以看出,各施肥修复处理的 NPK 养分的内部利用率(IE)有显著的差异。不施肥(CK)对照从产量来看不是最高的,但是其养分内部利用率是最高的。水稻专用复合肥(ZY)由于其在水稻生产上的优势,稻谷产量较高,但养分的内部利用率很低,显著低于其他处理,可能是由于其供肥平稳,水稻吸收养分较多的缘故。有机无机肥配施能促进 NPK 的转化,提高养分的内部利用率,NPKM 处理的养分内部利用显著的高于 NPK 处理,ZYM 处理的养分内部利用显著的高于 ZY 处理,配施硅肥可以提高 NPK 养分的内部利用率,有利于养分的转化。

从图 2 可以看出,氮磷钾肥的农学效率顺序都是 ZYM \approx NPKM $>$ NPKSi $>$ ZY $>$ NPK。有机无机肥配合施用能显著提高氮磷钾肥的利用率,促进水稻对 NPK 养分的吸收,配施硅肥亦可显著提高 NPK

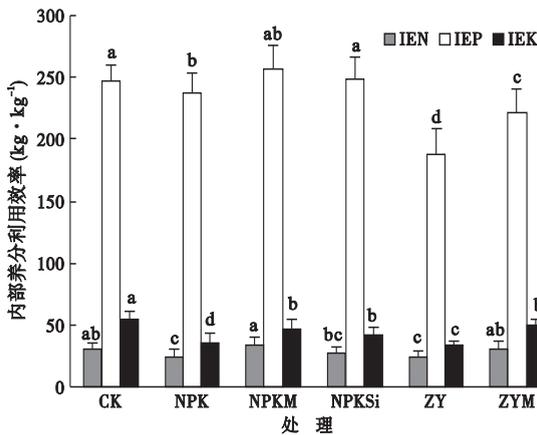


图1 不同施肥处理的 NPK 养分内部利用效率(2005—2007 年平均值)

Fig.1 Internal nutrient use efficiency of N,P and K in paddy soils with different fertilization treatments

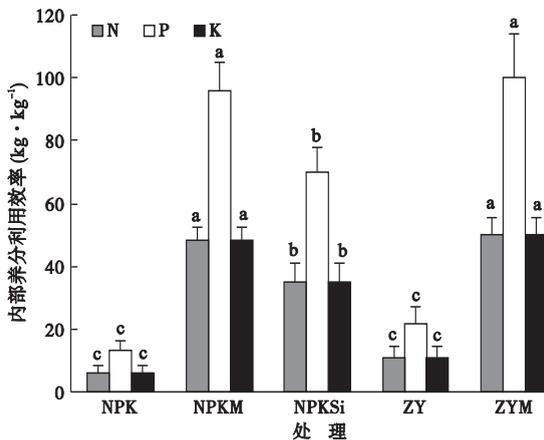


图2 不同施肥处理的 NPK 肥的农学效率(2005—2007 年平均值)

Fig.2 Agronomical use efficiency of N,P and K with different fertilization treatments

养分的利用率,而单施 NPK 化肥,不管是单质化肥配施还是施用水稻专用肥,肥料利用率均较低。

3 结论

长期不施肥、缺施或偏施某一种养分均会导致土壤肥力的退化,使土壤的养分含量降低,土壤生物和理化性质变劣。为改良和恢复土壤肥力质量,最好是根据不同退化土壤的特征,采用平衡施肥或是加大某种养分的施用量,以使土壤肥力质量得到恢复和某些生物及物理性状得到改善。

研究表明,各施肥修复措施均对长期不施肥导致的退化水稻土壤肥力的修复有较好的效果,但在合理配施氮磷钾肥的基础上配施硅肥、有机肥对

退化水稻土质量的修复效果显著,其中尤以配施有机肥效果最好。因此,建议在长期缺肥退化土壤肥力的修复过程中,以在氮磷钾肥配施或施用水稻专用复合肥的基础上适量配施有机肥为佳。

参考文献

- 陈安磊,王凯荣,谢小立. 2005. 施肥制度与养分循环对稻田土壤微生物生物量碳氮磷的影响. 农业环境科学学报, 24(6): 1094-1099.
- 孔宏敏,何圆球,吴大付,等. 2004. 长期施肥对红壤旱地作物产量和土壤肥力的影响. 应用生态学报, 15(5): 782-786.
- 李本银,汪金舫,赵世杰,等. 2004. 施肥对退化草地土壤肥力、牧草群落结构及生物量的影响. 中国草地, 26(1): 14-18.
- 刘恩科,赵秉强,李秀英,等. 2007. 不同施肥制度土壤微生物量碳氮变化及细菌群落 16S rDNA V3 片段 PCR 产物的 DGGE 分析. 生态学报, 27(3): 1079-1085.
- 鲁如坤. 2004. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社.
- 庞欣,张福锁,王敬国. 2000. 不同供氮水平对根际微生物量氮及微生物活度的影响. 植物营养与肥料学报, 6(4): 476-480.
- 孙莲蓬,朱鲁生,赵秉强,等. 2004. 长期施肥对土壤微生物的影响及其在养分调控中的作用. 应用生态学报, 15(10): 1907-1910.
- 谭周进,李倩,陈冬林,等. 2006. 稻草还田对晚稻土壤微生物及酶活性的影响. 生态学报, 26(10): 3385-3392.
- 王凯荣,刘鑫,周卫军,等. 2004. 稻田系统养分循环利用对土壤肥力和可持续生产力的影响. 农业环境科学学报, 23(6): 1041-1045.
- 吴春艳,陈义,杨生茂,等. 2008. 长期肥料定位试验中土壤肥力的演变. 浙江农业学报, 20(5): 353-357.
- 吴金水,林启美,黄巧云,等. 2006. 土壤微生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社.
- 谢卫国. 2006. 测土配方施肥理论与实践. 长沙: 湖南科学技术出版社.
- 徐玲,张杨珠,曾希柏,等. 2006. 不同施肥结构对稻田土壤肥力质量的影响. 湖南农业大学学报(自然科学版), 32(4): 362-367.
- 杨玉盛,何宗明,林光耀,等. 1998. 退化红壤不同治理模式对土壤肥力的影响. 土壤学报, 35(2): 277-284.
- 喻子牛,何绍江. 1996. 农业微生物学实验技术. 北京: 中国农业出版社: 305-308.
- 张桃林,鲁如坤,季国亮,等. 2000. 人为作用对环境质量的影响及对策与防治. 北京: 中国农业出版社.
- 张彦东,孙志虎,沈有信. 2005. 施肥对金沙江干热河谷退化草地土壤微生物的影响. 水土保持学报, 19(2): 88-91.

- 周卫军,王凯荣,刘鑫,等. 2005. 有机物料循环对红壤稻田系统有机质积累的贡献研究. *中国生态农业学报*, **13**(2):106-109.
- 周卫军,王凯荣,张光远,等. 2002. 有机与无机肥配合对红壤稻田系统生产力及其土壤肥力的影响. *中国农业科学*, **35**(9):1109-1113.
- 周卫军,曾希柏,张杨珠,等. 2007. 施肥措施对不同母质发育的稻田生态系统土壤微生物量碳、氮的影响. *应用生态学报*, **18**(5):1043-1048.
- Barrow CJ. 1991. *Land Degradation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Frank DA, Gehring CA, Machut L, et al. 2003. Soil community composition and the regulation of grazed temperate grassland. *Oecologia*, **137**:603-609.
- Garland JI. 1995. Analytical approaches to the characterizations source utilization. *Soil Biology & Biochemistry*, **28**:213-221
- Grønflaten LK, Amundsen L, Frank J, et al. 2005. Influence of liming and vitality fertilization on trace element concen-

trations in Scots pine forest soil and plants. *Forest Ecology and Management*, **213**:261-272.

- He ZL, Wu J, O'Donnel AG, et al. 1997. Seasonal responses in microbial biomass carbon, phosphorus and sulphur in soils under pasture. *Biology and Fertility of Soils*, **24**:421.
- Heal OW, Madean SF. 1975. Comparative productivity in ecosystem-secondary productivity// van Dobben WH, Melonell PHL, eds. *Unifying Concepts in Ecology*. The Hague: Holland:89-108.
- Schnurer J, Rosswall T. 1982. Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. *Applied and Environmental Microbiology*, **46**:1256-1261.

作者简介 周卫军,男,1966年生,博士,教授。主要从事农业生态系统物质循环转化与过程模拟研究。E-mail: wjzh0108@163.com

责任编辑 李凤芹

欢迎订阅 2010 年《生态学杂志》

《生态学杂志》(月刊)是中国科学技术协会主管、中国生态学会主办、中国科学院沈阳应用生态研究所承办的综合性学术期刊,创刊于1982年,由科学出版社出版。主要刊登生态学领域有创造性,立论科学、正确、充分,有较高学术价值的论文,反映中国生态学的学术水平和发展方向,报道生态学的科研成果与科研进展,跟踪学科发展前沿,促进国内外学术交流与合作。内容主要包括:生态系统生态学、种群生态学、群落生态学、景观生态学、生物地球化学、生理生态学、化学生态学、行为生态学、进化生态学等。

本刊读者对象主要是从事生态学、生物学、地学、林农牧渔业、海洋学、气象学、环境保护、经济管理、卫生和城建部门的科技工作者,有关决策部门的科技管理人员及高等院校师生。

《生态学杂志》现被国内外10多家权威检索系统和数据库收录,包括《中国科学引文数据库》(核心期刊)、《中国期刊方阵》(双效期刊)、《中文核心期刊》、《中国科技核心期刊》、《万方数据库》、《中国期刊全文数据库》、《中国学术期刊全文数据库》、《中文科技期刊文摘数据库》,以及美国《生物学文摘》(BA)、《化学文摘》(CA)、英国《生态学文摘》(EA)、日本《科学技术文献速报》(CBST)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)等。曾荣获中国科协优秀学术期刊二等奖、全国优秀科技期刊三等奖、中国科学院优秀期刊三等奖、辽宁省一级期刊等。

热忱欢迎广大作者登录本刊网站在线投稿,网址: <http://www.cje.net.cn>。

《生态学杂志》为A4开本,月刊,192页,每册定价50元,全年600元。国内外公开发行。国内邮发代号:8-161,全国各地邮局均可订阅。如未能在当地邮局订到,可与编辑部直接联系订阅。

地址:沈阳市文化路72号中国科学院沈阳应用生态研究所《生态学杂志》编辑部,邮编:110016

电话:024-83970394

传真:024-83970394

E-mail: cje@iae.ac.cn

网址: <http://www.cje.net.cn>