植物营养与肥料学报 2015,21(3): 773 - 781 doi: 10.11674/zwyf.2015.0325
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

不同肥料/改良剂对冷泥田水稻生长、养分吸收及土壤性质的影响

陈 琨[1], 秦鱼生[1], 喻 华[1], 康思文[1,2], 樊红柱[1], 曾祥忠[1], 涂仕华[1]*
(1 四川省农业科学院土壤肥料研究所,四川成都 610066;2 四川农业大学资源环境学院,四川温江 611130)

摘要:【目的】西南地区冷泥田的水稻生长不良可归因于多种障碍因子,包括土壤物理、化学和生物因子。本文针对冷泥田影响水稻生长的土壤化学障碍因子,研究了不同肥料或改良剂对冷泥田水稻生长、养分吸收和土壤性质的影响,旨在为这类土壤的培肥、改良利用和水稻高产提供科学依据和实用技术。**【方法】**试验地点选在四川省东南地区冷泥田集中的泸县,试验历时 2 年。试验设无肥对照(CK)、全量化肥(NPK)、NPK + 泥炭(NPK + Pe)、NPK + 商品有机肥(NPK + COF)、NPK + 鸡粪(NPK + CM)、NPK + 硅肥(NPK + Si)、NPK + 石灰(NPK + L)、NPK + 硅钙肥(NPK + SiCa),NPK + 锌肥(NPK + Zn)9 个处理。在水稻收获前采集代表性植株样,调查水稻农艺性状,分析水稻对氮、磷和钾的吸收量;水稻收获后采集土壤样品,测定不同处理的土壤 pH、全氮、有效磷、速效钾、有机质、还原性物质总量、活性还原物质以及亚铁和亚锰含量。**【结果】**结果表明,在所有处理中,NPK + L 和 NPK + SiCa 处理可改善水稻的产量构成因子,稻谷产量比 NPK 处理显著提高 15.40% 和 10.64%;而其他处理的增产效果则均不显著。NPK + L 和 NPK + SiCa 处理的土壤 pH 明显高于其他处理,土壤还原性物质总量和活性还原物质(含 Fe^{2+} 和 Mn^{2+})含量显著降低;NPK + L 和 NPK + SiCa 处理可增加土壤养分的有效性,促进水稻对氮、磷、钾养分的吸收,改善土壤的化学性质。同时,土壤分析结果表明,该试验土壤的有效钙和有效硅均缺乏,而 NPK + L 和 NPK + SiCa 处理增加了土壤的有效钙和有效硅,对提高水稻产量有重要贡献。有机肥对土壤相关性质的影响与石灰和硅钙肥相反,特别是鸡粪。施用锌肥对水稻有一定的增产效果,但差异不显著。水稻收获后土壤中氮、磷、钾养分残留量与施肥量和水稻吸收携出量密切相关。**【结论】**对长期淹水地势低洼的酸性冷泥田来说,石灰和硅钙肥是比较理想的土壤改良剂,能同时起到改善土壤性质和提高作物产量的效果;而有机肥,特别是未腐熟的有机肥或有机物料,则不宜在冷泥田中施用或大量施用。

关键词: 肥料; 水稻产量; 养分吸收; 土壤性质
中图分类号: S511.062.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)03-0773-09

Impacts of different fertilizers/amendments on rice yield and nutrient uptake and soil properties in the waterlogged paddy field

CHEN Kun[1], QIN Yu-sheng[1], YU Hua[1], KANG Si-wen[1,2], FAN Hong-zhu[1], ZENG Xiang-zhong[1], TU Shi-hua[1]*
(*1 Soil and Fertilizer Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China;*
2 College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Wenjiang, Sichuan 611130, China)

Abstract:【Objectives】 Poor rice growth in waterlogged paddy fields of the southwest China is usually attributed to a number of adverse soil factors, including physical, chemical and biological factors. Aiming at the adverse soil factors limiting rice growth in waterlogged paddy fields, a field experiment was carried out to study impacts of different fertilizers/amendments on grain yield and nutrient uptake by rice and soil properties and to offer scientific and practical techniques to improve soil fertility, better land use and enhance rice yield in this type of soils.

收稿日期: 2014-03-18 **接受日期:** 2014-09-23 **网络出版日期:** 2015-01-29
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201003016); 国家自然基金(41201295); 四川省杰出青年基金(13QNJJ0019); 四川省农业科学院青年基金(2013QNJJ-016); 四川省农业科学院重点实验室运行专项(2013JCYJ-008)
作者简介: 陈琨(1983—), 男, 四川资中人, 硕士研究生, 从事土壤肥料与资源环境可持续利用研究。E-mail: chenkun410@163.com
* 通信作者 E-mail: stu@ipni.net

【Methods】A two-year field experiment was carried out in Luxian County of the southwest Sichuan, where waterlogged paddy fields prevail. The experiment was set up in a randomized design consisting of nine treatments, including CK(no fertilizers), NPK(nitrogen, phosphorus, potassium chemical fertilizer), NPK + Pe(NPK plus peat), NPK + COF(NPK plus commodity organic fertilizer), NPK + CM(NPK plus chicken manure), NPK + Si (NPK plus silicon fertilizer), NPK + L(NPK plus lime), NPK + SiCa(NPK plus silicon-calcium fertilizer) and NPK + Zn(NPK plus zinc fertilizer). Rice plants were sampled from each treatment two days before the harvest to analyze agronomic traits, uptake of total nitrogen, phosphorus and potassium by rice as affected by different treatments. Soil samples were collected from each plot right after the harvest to determine effects of different treatments on soil pH, total nitrogen, available phosphorus, available potassium, organic matter, total reductants, active reductants, total iron and manganese. 【Results】The lime and the silicon-calcium fertilizer treatments are capable of improving the yield forming factors and thus, significantly increase rice yields by 15.40% and 10.64% compared to the NPK chemical fertilizer treatment, while other treatments insignificantly increased the rice yield. The application of lime and silicon-calcium fertilizers increase soil pH, significantly decrease soil total reductants and active reductants including Fe^{2+} and Mn^{2+} and improve soil nutrient availabilities, so stimulate the N, P and K uptakes of rice, which is an indirect contribution of the two treatments to rice yield increase via the improved soil chemical properties. Besides, the two treatments also directly contribute to the rice yield increase via the improved nutritional status of the rice since the soil is both calcium and silicon deficient. The effects of the organic fertilizers, chicken manure in particular, on the measured soil properties are just opposite to the lime and the silicon-calcium fertilizers. Addition of the zinc fertilizer insignificantly increases rice yield. The post-harvest soil residual nutrient status is closely related to quantity of nutrient input and removal by rice plants. 【Conclusions】In the long-term waterlogged acidic paddy fields with low depression landscape, lime and silicon-calcium fertilizers are recommonded soil amendments, which can improve not only the soil properties but also the rice yield. Organic manure, the not fully decomposed manures or organic materials in particular, should be avoided to use in this kind of paddy fields.

Key words: fertilizer; rice yield; nutrient uptake; soil property

冷泥田是西南稻区广泛分布的一类常年淹水、春夏季种稻、冬季闲置蓄水的低产稻田,习惯上称为“冬水田”。四川省是西南地区冬水田分布最为广泛的省份,现有冬水田面积约38万公顷,其中大部分集中在川东南丘陵区[1]。由于长期淹水,这类稻田的土壤障碍因子较多,如土壤结构分散、水土温度低、土壤酸化、营养元素有效性较低、还原性有毒有害物质多等[2-4],导致水稻秧苗返青缓慢,稻苗返青迟[5],分蘖少,甚至坐兜[6],影响有效分蘖的形成,成为冷泥田低产的主要原因[7]。因此,研究探讨冷泥田改良技术,对提高水稻产量具有重要意义和实用价值。

针对这些问题,在有灌溉水源保障的地区,冬水田已通过水旱轮作[8]等技术进行了改造,彻底解决了原来土壤中存在的问题;而在无灌溉水源保障的地区,水旱轮作技术难以推广和应用,冬水田多还处于终年淹水状态,因此其障碍因子消除的技术有待突破。从上世纪80年代起,候光炯教授致力于冬水田的改良利用研究,采用以免耕、湿润为核心的小麦或油菜半旱式耕作,该技术不但能改冬水田为一年两熟,而且能解决或减轻稻田土壤因终年淹水存在的土壤物理和化学障碍因子,提高土壤氧化还原电位和改善土壤养分供应状况,有利于水稻的生长从而促进了产量的提高[9]。该技术曾一度在我国西南乃至其他地区大面积推广应用,但因劳动力投入大,又随着农村劳动力向城市转移的加快,使农业劳动力缺乏,特别是进入本世纪后,该技术已逐渐从冷泥田地区淡出,那里的耕作方式又回到了从前。

为了寻找其它技术的突破,一些学者对土壤改良剂和施肥技术对冷泥/浸田肥力和水稻生长影响效果方面进行了研究,结果发现土壤改良剂能有效改善土壤理化性状[10],降低南方稻田酸害[11],有效减缓东北地区冷浸田水稻根系的衰退速度[12];在养分管理上,通过增施磷肥[13]、钾肥[14-15]、锌肥[16]以及平衡施肥[17]也可以促进冷泥/浸田水稻的生长,防止坐蔸,提高产量。在此基础上,本研究进一步探

讨了不同肥料或改良剂对四川地区酸性冷泥田水稻生长、养分吸收和土壤性质的影响,旨在为这类土壤的培肥、改良利用和水稻高产提供科学依据和实用技术。

1　材料与方法

1.1　试验设计

定位试验自 2012 年起在四川省农业科学院水稻高粱研究所泸州基地进行。试验所在地年均温度 18.5℃左右,≥10℃的活动积温 6000℃左右,年日照时数 1200～1400 h,年降水量 1000～1200 mm。试验田为终年淹水的深脚烂泥田,地形部位属沟槽田,土壤为紫色母岩发育经多年水耕熟化而成的暗紫泥水稻土,土壤质地中壤,有机质含量 33.28 g/kg,全氮 1.82 g/kg,碱解氮 158.30 mg/kg,全磷 0.62 g/kg,有效磷 7.51 mg/kg,全钾 21.30 g/kg,速效钾 100.31 mg/kg,有效钙 2.44 g/kg,有效锌 2.76 mg/kg,有效硅 40.69 mg/kg。pH 4.6(水土比 1∶2.5)。根据测定结果,该土壤有效磷、有效钙和硅缺乏,速效钾处于临界值水平,属中等肥力水平。

试验设 9 个处理:1)无肥对照(CK),2)氮、磷、钾化肥(NPK),3)NPK + 泥炭(NPK + Peat)、4)NPK + 商品有机肥(NPK + COF,商品有机肥含有机质≥30%,氮≥2%,磷≥1%,钾≥1%),5)NPK + 鸡粪(NPK + CM,鸡粪含全氮 0.99%,全磷 0.35%,全钾 0.95%),6)NPK + 硅肥(NPK + Si),7)NPK + 石灰(NPK + L),8)NPK + 硅钙肥(NPK + SiCa),9)NPK + 锌肥(NPK + Zn)。每个处理 3 次重复,小区面积 20 m^2(4 m × 5 m),田间随机排列。氮、磷、钾肥用量分别为 N 150 kg/hm^2、P_2O_5 75 kg/hm^2 和 K_2O 90 kg/hm^2。氮肥用尿素(含 N 46%)、磷肥用磷酸一铵(含 N 12.17%,P_2O_5 52%),钾肥用氯化钾(含 K_2O 60%)。肥料/改良剂分别为泥炭,用量为 3000 kg/hm^2;商品有机肥用量 7500 kg/hm^2(由四川正圆有限公司提供);鸡粪(干重)为养殖场发酵处理后的产品,用量 4500 kg/hm^2;硅肥用偏硅酸钠,用量 225 kg/hm^2;石灰为熟石灰,用量 750 kg/hm^2;硅钙肥用量 750 kg/hm^2;锌肥为硫酸锌($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$,含 Zn 22.38%),用量 15 kg/hm^2。氮肥按 60∶40(基肥∶分蘖肥)比例施入,其它肥料均作基肥一次施用。供试水稻品种为川谷优 7329,2013 年 4 月 26 日移栽,栽插规格为 20 × 30 cm,灌溉、病虫害防治等田间管理措施与大田生产相同。

1.2　测定项目与方法

在水稻生长期间的不同发育阶段分别调查水稻基本苗、分蘖动态、有效穗、最高苗、产量等指标。收获前两天每个小区采集 3 窝代表性水稻植株样,装入尼龙网袋带回室内考察株高、有效穗、穗长、穗粒重、千粒重、结实率、秸秆重等农艺性状。植株样品经风干、研磨后测定氮、磷、钾含量。收获后在每个试验小区内按“梅花法”采集 0—25 cm 耕作层混合土样 1 kg,再分为两份,一份作为鲜样测定土壤还原性物质总量、活性还原物质、土壤亚铁和亚锰;另一份作为风干样测定土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾。有机质含量用重铬酸钾容量法;全氮用半微量凯氏法;有效磷用氟化铵 - 稀盐酸浸提—分光光度法;速效钾用乙酸铵浸提—火焰光度法;还原性物质总量用硫酸铝浸提—重铬酸钾氧化法;活性还原物质用硫酸铝浸提—高锰酸钾滴定法;土壤亚铁和亚锰用原子吸收分光光度计测定[18]。

1.3　数据处理

试验数据用 DPS 数据处理系统和 Microsoft Excel 软件进行处理;植株氮(磷、钾)吸收量(kg/hm^2) = 地上部干物重 × 植株氮(磷、钾)含量(%)。

2　结果与讨论

2.1　不同处理对冷泥田水稻生长的影响

表 1 结果表明,所有施肥处理的水稻株高、有效穗数均明显高于无肥处理(CK)。硅肥处理(NPK + Si)的有效穗数最多,达 238.12 × 10^4 ear/hm^2,其次为石灰处理(NPK + L),为 234.62 × 10^4 ear/hm^2。水稻的千粒重变化幅度相对较小,但施硅钙肥(NPK + SiCa)和锌肥(NPK + Zn)处理的千粒重在所有处理中最高,分别为 30.72 g 和 30.71 g,其次为石灰处理(NPK + L)为 30.59 g。各处理对水稻株高和每穗实粒数的影响无显著差异。不同处理对水稻结实率的影响差异明显,其中以 NPK + SiCa 处理最高,为 93.78%,其次为 NPK + L 处理(93.46%)。

2.2　不同改良剂对冷泥田水稻产量的影响

2012～2013 年不同处理的水稻产量见表 2。总体来看,水稻产量受年度间气候的影响很大,2013 年所有处理的水稻产量均明显或显著高于 2012 年,增长幅度在 2.5%～13.6%之间。增长幅度最大的为石灰处理 NPK + L,增幅为 13.6%,增幅最小的是鸡粪处理 NPK + CM,为 2.5%。2012 年由于该试验田遭受暴雨袭击,在水稻灌浆期遭洪水淹没两次,

第一次淹水时间长达 36 h,因此导致水稻结实率下降和产量偏低。

在 2012 年水稻遭受洪水淹没的情况下,除鸡粪、石灰、硅钙肥和锌肥处理比单施化肥处理(NPK)增产外,其余处理均减产,也就是说在氮、磷、钾化肥的基础上增加泥炭、商品有机肥或硅肥均没有增产效果,反而出现小幅减产,说明影响水稻增产的限制因子也不再是氮、磷、钾养分。在 4 个有增产的处理中,以 NPK + L 和 NPK + SiCa 处理的水稻产量最高,其次为 NPK + CM 和 NPK + Zn 处理,这与土壤的测定结果相吻合,由于该土壤的有效钙和有效硅缺乏,补充钙和硅后增加了水稻产量。

表 1 不同改良剂对冷泥田水稻产量性状的影响(2013)

Table 1 Impacts of different amendments on agronomic traits of rice in waterlogged paddy fields

处理 Treatment	株高(cm) Plant height	穗数($\times10^4$/hm^2) Ear No.	实粒数(No./ear) Grain per ear	千粒重(g) 1000-grain wt.	结实率(%) Setting rate
CK	98.19 a	175.09 c	228.24 a	29.64 ab	88.16
NPK	100.30 a	189.09 c	214.28 a	30.13 ab	86.66
NPK + Pe	102.14 a	232.87 a	220.15 a	29.53 b	88.28
NPK + COF	101.85 a	210.11 b	238.30 a	29.99 ab	90.69
NPK + CM	100.23 a	231.12 a	222.30 a	29.96 ab	90.69
NPK + Si	102.37 a	238.12 a	246.03 a	30.25 ab	92.42
NPK + L	102.57 a	234.62 a	234.68 a	30.59 ab	93.46
NPK + SiCa	102.46 a	229.36 a	231.89 a	30.72 a	93.78
NPK + Zn	101.92 a	210.11 b	230.49 a	30.71 a	91.01

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among the treatments at the 5% level.

表 2 不同处理对 2012～2013 年冷泥田水稻产量的影响

Table 2 Impacts of different amendments on rice yield in waterlogged paddy fields in 2012–2013

处理 Treatment	2012 产量 Yield in 2012 (kg/hm^2)	比 NPK 增产 Vs. NPK (kg/hm^2)	比 NPK 增产 Vs. NPK (%)	2013 产量 Yield in 2013 (kg/hm^2)	比 NPK 增产 Vs. NPK (kg/hm^2)	比 NPK 增产 Vs. NPK (%)
CK	7401.0 c	−345.0	−4.45	8165.4 c	−122.1	−1.47
NPK	7746.0 b			8287.5 bc		
NPK + Pe	7565.7 c	−180.3	−2.33	8353.2 bc	65.7	0.79
NPK + COF	7573.4 c	−172.7	−2.23	8487.6 b	200.1	2.41
NPK + CM	8096.4 ab	350.4	4.52	8297.9 b	10.4	0.12
NPK + Si	7650.5 b	−95.6	−1.23	8496.0 b	208.5	2.52
NPK + L	8418.9 a	672.9	8.69	9564.2 a	1276.7	15.40
NPK + SiCa	8364.6 a	618.6	7.99	9169.1 a	881.6	10.64
NPK + Zn	7956.3 ab	210.3	2.71	8387.1 bc	99.6	1.20

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

2013 年水稻生长期间的气候条件相对适宜,水稻产量能更真实地反映出各处理的施肥效应。水稻产量的高低通常取决于产量构成因子。由表 1 中的水稻产量构成因子看出,石灰和硅钙肥处理的产量构成因子优于其它处理,因而产量也最高;相反,对照处理的产量构成因子较差,水稻产量也最低。在本试验中,在施氮、磷、钾化肥的基础上增施锌肥、商品有机肥或硅肥虽能增加水稻产量,但差异不显著。连续施用锌肥的水稻增产量下降。说明在本试验条件下,水稻产量的主要限制因子可能不是氮、磷、钾、锌等,而是钙或石灰和硅钙对水稻的营养作用和这些物料自身的碱性对土壤 pH、还原性物质含量的影响以及对水稻吸收养分的影响。

2.3　不同处理对冷泥田水稻养分吸收的影响

从表 3 可以看出,不同处理对水稻植株吸收氮、磷、钾养分的影响差异显著。水稻籽粒中的氮、磷含量远远高于秸秆,氮比秸秆高 35%～90%,而磷则高 42%～128%。钾在籽粒和秸秆中的分配与氮、磷相反,即钾主要集中在秸秆中,秸秆中的钾大约为籽粒钾的 8～10 倍。

不同处理水稻籽粒的氮含量变化没有明显的规律性,各处理间的差异也不显著;秸秆中的氮含量以 NPK + CM 处理最低,NPK、NPK + Pe、NPK + L、NPK + Si 和 NPK + Zn 处理最高,但与其余处理之间差异不显著。不同处理秸秆和籽粒中的磷含量差异均不显著,表明这些处理对水稻吸收磷肥没有影响。与氮的情况类似,各处理水稻籽粒钾含量没有显著差异,而秸秆中的钾含量差异显著。秸秆钾含量最高的为硅钙肥(NPK + SiCa)处理,最低的是 NPK 处理。产生这一现象的原因目前尚不清楚,有待进一步研究。

表 3　不同改良剂对冷泥田水稻养分吸收量的影响(2013)

Table 3　Impacts of different amendments on NPK uptake by rice in the waterlogged paddy fields

处理 Treatment	氮含量(%) N content		磷含量(%) P content		钾含量(%) K content		吸氮量 N uptake (kg/hm^2)	吸磷量 P uptake (kg/hm^2)	吸钾量 K uptake (kg/hm^2)
	籽粒 Grain	秸秆 Straw	籽粒 Grain	秸秆 Straw	籽粒 Grain	秸秆 Straw			
CK	1.40 a	0.89 ab	0.25 a	0.15 a	0.29 a	2.36 ab	153.50 bc	27.65 a	127.25 c
NPK	1.52 a	1.01 a	0.24 a	0.16 a	0.24 a	2.19 b	179.05 abc	28.60 a	135.40 c
NPK + Pe	1.50 a	1.02 a	0.30 a	0.17 a	0.30 a	2.28 ab	177.40 abc	34.10 a	142.75 bc
NPK + COF	1.49 a	0.92 ab	0.32 a	0.14 a	0.28 a	2.41 ab	167.65 abc	33.35 a	130.05 c
NPK + CM	1.37 a	0.72 b	0.27 a	0.18 a	0.28 a	2.46 ab	148.90 c	31.05 a	143.25 bc
NPK + Si	1.54 a	1.00 a	0.29 a	0.19 a	0.25 a	2.56 ab	186.00 a	35.35 a	165.10 ab
NPK + L	1.37 a	1.01 a	0.28 a	0.17 a	0.29 a	2.42 ab	192.05 a	37.10 a	172.50 a
NPK + SiCa	1.35 a	0.95 ab	0.29 a	0.14 a	0.27 a	2.69 a	182.55 ab	34.95 a	189.55 a
NPK + Zn	1.48 a	1.00 a	0.27 a	0.19 a	0.26 a	2.53 ab	182.15 ab	33.95 a	166.60 ab

注(Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

在水稻植株吸收的氮、磷、钾总量中,石灰和硅肥处理的氮吸收量最高,其次为硅钙肥和锌肥,而鸡粪处理的氮吸收量最低;各处理间磷的吸收量没有显著差异;硅钙肥和石灰处理的水稻钾吸收量最高,对照、单施化肥、商品有机肥处理的钾吸收量最低。通过对植株氮、磷、钾养分吸收量的比较分析看出,植株氮、钾的吸收量与水稻籽粒产量的关系更为密切,石灰和硅钙肥处理促进水稻吸收氮、磷、钾养分的作用显著优于其它处理,因而产量也最高。施用石灰和硅钙肥促进水稻吸收氮、磷、钾养分的机理在于: 1)能有效置换出土壤胶体上吸附的 NH_4^+ 和 K^+[19-20]; 2)给作物补充钙素营养; 3)提高土壤 pH,消除酸害,增加酸性土中 NH_4^+ 和 K^+ 的有效性,活化 Fe-P 和 Al-P[21],促进水稻对养分的吸收,增加

水稻产量[22]。

2.4 不同处理对冷泥田土壤性质的影响

2.4.1 土壤还原性物质总量与活性还原物质 不同处理对土壤pH(强酸性)的影响相对较小,而对土壤还原性物质总量和活性还原物质影响的差异显著(表4)。比NPK处理增加土壤pH 0.2及以上的处理只有NPK+L和NPK+SiCa处理。与NPK处理相比,能显著降低土壤还原性物质总量和活性还原物质的处理为NPK+Si(分别为-28.21%和-28.59%)和NPK+SiCa(分别为-16.99%和-17.38%);石灰处理(NPK+L)对土壤还原性物质总量的增加量最小,但能减少土壤活性还原物质的含量1.64%;其它处理均不同程度地增加了土壤还原性物质总量和活性还原物质,其中以鸡粪(NPK+CM)和商品有机肥(NPK+COF)处理的增加值最大,NPK+CM处理分别增加了25.09%和7.05%,NPK+COF处理分别增加了10.06%和6.93%。

一些研究[23-24]认为,施硅可提高水稻根系的氧化能力,降低土壤还原性物质的含量,特别是可溶性的二价铁或锰在根表面或附近氧化沉积,增加水稻对氮、磷的吸收,从而提水稻产量。本研究结果也证实了硅对土壤还原性物质的抑制效果,但对水稻产量的增加效果却并不显著。结合2012-2013年的水稻产量,提高土壤pH和降低土壤还原性物质可能是该试验条件下水稻增产的主要原因,因此石灰和硅钙肥处理的水稻产量最高;相反,鸡粪和商品有机肥处理的还原性物质含量最高,水稻产量相对最低。施用鸡粪和商品有机肥后导致土壤还原性物质含量最高,可能的原因是这两种有机肥中存在很多易被分解的成分,其厌氧分解形成了很多还原性物质,降低了土壤的氧化还原电位(数据未列出),使土壤条件向不利于水稻生长的方向发展,这可能也是鸡粪和商品有机肥处理水稻产量不高的原因之一。关于稻田施用有机肥的效果,丁昌璞[25]认为有机质可提供本身分解的还原性物质,对还原性物质的数量有直接影响,一般情况为有机质含量愈多,分解的还原性物质量愈大。另一方面,有机还原性物质作为土壤中的电子供体,可促进Fe和Mn氧化物的还原,从而影响还原性物质的数量[26-27]。因此,在生产实践中冷泥田不宜大量施用未腐熟的有机物质,包括秸秆、绿肥和未发酵的畜禽粪便等。

表4 不同改良剂对土壤还原性物质总量和活性还原物质的影响(2013)

Table 4 Impacts of different amendments on total reducing substances and active reducing substances in soil

处理 Treatment	pH	还原性物质总量 Total reducing substance (coml/kg)	与NPK比较 Vs. NPK (±%)	活性还原物质 Active reducing substance (coml/kg)	与NPK比较 Vs. NPK (±%)
CK	4.55	8.92±0.53 c	3.12	8.06±0.73 a	1.51
NPK	4.56	8.65±0.67 c	—	7.94±0.43 a	—
NPK+Pe	4.68	9.07±0.14 c	4.86	8.17±0.81 a	2.90
NPK+COF	4.62	9.52±0.49 b	10.06	8.49±0.45 a	6.93
NPK+CM	4.64	10.82±0.21 a	25.09	8.50±1.10 a	7.05
NPK+Si	4.52	6.21±0.41 d	-28.21	5.67±1.02 b	-28.59
NPK+L	4.82	8.77±0.32 c	1.39	7.81±0.93 a	-1.64
NPK+SiCa	4.76	7.18±1.07 d	-16.99	6.56±1.54 b	-17.38
NPK+Zn	4.53	9.05±0.38 c	4.62	8.32±0.35 a	4.79

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

2.4.2 对土壤Fe^{2+}与Mn^{2+}的影响 土壤中的Fe^{2+}与Mn^{2+}也属于还原性物质,因此不同处理对土壤中Fe^{2+}与Mn^{2+}含量的影响也应与对土壤还原性物质总量和活性还原物质的影响趋势大体一致。本试验

结果(图 1)基本与之吻合。硅肥(NPK + Si)和硅钙肥(NPK + SiCa)处理对土壤 Fe^{2+} 含量的降幅最大,其次为石灰(NPK + L)处理,而锌肥(NPK + Zn)、商品有机肥(NPK + COF)和鸡粪(NPK + CM)处理对土壤 Fe^{2+} 含量的增加幅度相对较大(图 1)。除商品有机肥处理外,其他不同处理对土壤 Mn^{2+} 含量的影响与对 Fe^{2+} 含量的影响趋势基本一致,数值大小存在差异(图 1)。

如前所述,硅肥和硅钙肥能显著降低土壤中的 Fe^{2+} 与 Mn^{2+} 含量,归因于二者可提高水稻根系的氧化能力[23];相反,鸡粪和商品有机肥能增加土壤中 Fe^{2+} 与 Mn^{2+} 的含量,因为这两种肥料可为土壤中铁锰氧化物的还原提供电子[26-27]。石灰处理降低土壤中的 Fe^{2+} 与 Mn^{2+} 含量的原因则主要是它对土壤酸性的中和作用,从而降低了 Fe^{2+} 与 Mn^{2+} 的溶解度。易琼等[28]在反酸田上的研究也表明,富含有效钙或磷的无机矿物质改良效果显著优于有机物料改良剂,其改良效果主要体现在降低土壤酸化上。本文各处理风干土样的 pH 值为强酸性,不属于淹水条件下的真实 pH 值,因为无论是酸性土壤还是碱性土壤,淹水后土壤 pH 总是趋近中性(7.0)[29]。虽然石灰处理的风干土 pH 仅比全化肥处理提高了 0.26 个 pH 单位,但田间土壤 pH 值的实时监测值(本文未列出数据)为 6.4 ～ 6.8,施入石灰后开始的土壤 pH 与对照处理的差值为 2.0,但 5d 后迅速缩小为 0.3,反映了石灰与土壤的反应速度与土壤对碱性物质的缓冲能力。

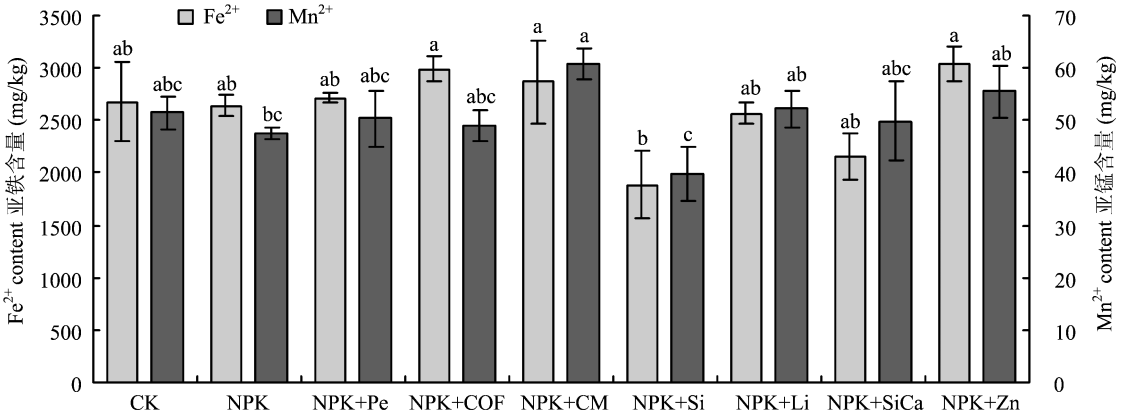

图 1　不同处理土壤亚铁和亚锰的变化

Fig. 1　Soil Fe^{2+} and Mn^{2+} contents in different treatments

[注(Note): 柱上不同字母表示处理间差异达 5% Different letters above the bars mean significant among treatments at the 5% level.]

2.4.3 对土壤养分状况的影响　经过两年的试验后,不同处理对土壤有机质、有效磷和速效钾含量的影响差异显著,而对土壤全氮含量的影响差异不显著(表 5)。土壤有机质含量均处于含量丰富的范围(36.14 ～ 43.59 mg/kg),其最高值为鸡粪处理(NPK + CM),其次为商品有机肥(NPK + COF)、泥炭(NPK + Pe)和锌肥(NPK + Zn)处理,CK 处理最低。参考表 2 的数据,各处理有机质含量的高低与稻谷产量没有明显的相关性。不同处理间土壤全氮含量没有显著差异,可能是土壤有机质含量丰富的直接反映,因为土壤有机质具有相对稳定的 C/N 比例,一般为 8∶1 ～ 15∶1,中值为 10∶1 ～ 12∶1[30]。水稻收获后土壤中有效磷和速效钾含量的大小在一定程度上反映了施入量与吸收量之间的差值。因此,肥料带入土壤的磷越多和水稻吸收带走的磷越少,土壤残留就越多。本试验中,CK、NPK + COF 和 NPK + CM 处理外,其它处理均带入了等量的氮、磷、钾养分。鸡粪和商品有机肥带入了额外的氮、磷和钾,而水稻植株携出的磷、钾量又相对较低(表 3),因此土壤中残留的有效磷、速效钾量最高。对照处理没有施入磷、钾肥,土壤中残留的有效磷、速效钾量也最低。石灰处理(NPK + L)没有带入额外的磷、钾养分,但水稻产量最高,携出的磷、钾量最大,因而土壤中残留的有效磷、速效钾量在所有施肥处理中也最低。其它处理的土壤有效磷、速效钾含量的高低基本上与水稻植株的携出量相对应。

表 5 不同改良剂对土壤养分的影响

Table 5 Impacts of different amendments on soil nutrients

处理 Treatment	有机质(g/kg) Organic matter	全氮(g/kg) Total N	有效磷(mg/kg) Available P	速效钾(mg/kg) Available K
CK	36.14 ± 0.50 c	2.07 ± 0.18 a	15.88 ± 1.73 f	71.25 ± 15.46 b
NPK	38.31 ± 2.41 bc	2.13 ± 0.11 a	23.19 ± 1.95 e	86.05 ± 14.29 ab
NPK + Pe	42.24 ± 1.61 ab	2.13 ± 0.17 a	32.00 ± 1.71 c	96.84 ± 22.17 a
NPK + COF	43.15 ± 5.98 ab	2.34 ± 0.15 a	41.82 ± 2.18 b	101.33 ± 15.34 a
NPK + CM	43.59 ± 2.03 a	2.33 ± 0.21 a	56.70 ± 2.85 a	102.36 ± 14.47 a
NPK + Si	39.37 ± 3.34 abc	2.14 ± 0.21 a	29.67 ± 4.76 cd	104.57 ± 12.60 a
NPK + L	40.75 ± 1.61 abc	2.28 ± 0.21 a	24.48 ± 0.50 e	92.21 ± 8.96 ab
NPK + SiCa	41.03 ± 1.93 abc	2.21 ± 0.14 a	31.10 ± 3.48 c	89.39 ± 11.69 ab
NPK + Zn	41.56 ± 2.69 ab	2.21 ± 0.13 a	26.12 ± 2.25 de	84.90 ± 10.71 ab

注(Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatments at the 5% level.

3 结论

在所有处理中,石灰和硅钙肥处理具有较好的产量构成因子,产量也最高。在氮、磷、钾化肥的基础上增施锌肥、商品有机肥或硅肥虽能增加水稻产量,但差异不显著。增施鸡粪和商品有机肥显著增加了包括 Fe^{2+}、Mn^{2+} 在内的土壤还原性物质含量,造成不利的水稻生长环境,因而降低了水稻产量。年度间气候的差异显著影响了水稻产量,也影响了不同处理的施肥效应。水稻收获后土壤养分含量的高低主要取决于施肥量与植株携出量之差。对照处理的土壤有机质和氮、磷、钾养分含量最低;鸡粪和商品有机肥处理较其它处理带入了额外的磷和钾,土壤磷、钾残留量最高;而石灰和硅钙肥处理的水稻产量和磷、钾携出量最高,所以土壤磷、钾残留量也低。本试验结果表明,石灰和硅钙肥是比较理想的土壤改良剂,施用后有利于提高土壤 pH,降低土壤中有害还原性物质含量,促进水稻对养分的吸收,从而增加水稻产量。

参 考 文 献:

[1] 熊洪. 适度恢复四川冬水田面积,提高稻田抗旱能力的建议[J]. 农业科技动态, 2011,(15): 2.
Xiong H. Moderately restore the winter paddy field area in Sichuan, and improve drought resistance of paddy field [J]. Agricultural Science and Technology Trends, 2011,(15): 2.

[2] 胡骏文. 冷浸田改良[J]. 土壤, 1985,(3): 129-131, 134.
Hu J W. The cold water paddy fields improvements[J]. Soils, 1985,(3): 129-131, 134.

[3] 吴炳龙. 山区冷浸田类型及其改良[J]. 土壤通报, 1983,14(1): 16-19, 26.
Wu B L. Types and improvement of waterlogged paddy field in mountains[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1983, 14(1): 16-19, 26.

[4] 李庆逵. 中国水稻土[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
Li Q K. Chinese paddy soil[M]. Beijing: Science Press, 1992.

[5] 林增泉, 徐朋, 彭加桂, 等. 冷浸田类型与改良研究[J]. 土壤学报, 1986, 23(2): 157-162.
Lin Z Q, Xu P, Peng J G *et al*. Study on the types and amelioration of cold spring paddy soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 1986, 23(2): 157-162.

[6] 唐先来. 冷浸田的低产原因及改良措施[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(3): 78.
Tang X L. The low yield reasons and improvement measures of cold waterlogged field[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2007, 13(3): 78.

[7] 黄为民. 冷浸型水稻土障碍因素及石砌工程改造[J]. 福建农业, 1998,(2): 10-11.
Huang W M. The obstacles of cold spring paddy soils and stone works reform[J]. Fujian Agriculture, 1998,(2): 10-11.

[8] 张修焕, 吴灿琮. 冬水田改为水旱两作田的农业技术探讨[J]. 土壤通报, 1965,(5): 18-19.
Zhang X H, Wu C Z. Technology of agriculture for the winter paddy fields change to dry land [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1965,(5): 18-19.

[9] 候光炯, 黄昭贤. 半旱式小麦耕作中的一个重要关键—免耕[J]. 中国农业科学, 1986, 19(1): 18-22.
Hou G J, Huang Z X. The key technique-no-till in half-dry wheat cultivation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1986, 19(1): 18-22.

[10] 许晓平, 汪有科, 冯浩, 等. 土壤改良剂改土培肥增产效应研究综述[J]. 中国农学通报, 2007, 23(9): 331-334.
Xu X P, Wang Y K, Feng H *et al.* Research summary of the soil amendment's effect on improving soil fertility and increasing yield[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(9): 331-334.

[11] 解开治, 徐培智, 严超, 等. 不同土壤改良剂对南方酸性土壤的改良效果研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(20): 160-165.
Xie K Z, Xu P Z, Yan C *et al.* Study the effects of soil improvement on acid soil in the south of China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(20): 160-165.

[12] 董稳军, 郑华平, 黄旭, 等. 土壤改良剂对冷浸田水稻根系活力及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(36): 182-187.
Dong W J, Zheng H P, Huang X *et al.* Effect of different soil amendments on root activity and yield of rice in cold spring paddy soils[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(36): 182-187.

[13] 龚子同, 张效朴, 韦启潘. 我国潜育性水稻土的形成、特性及增产潜力[J]. 中国农业科学, 1990, 23(1): 45-53.
Gong Z T, Zhang X P, Wei Q P. Formation, characteristics and yield potential of gley paddy soil in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1990, 23(1): 45-53.

[14] 孙羲, 马国瑞, 林荣新, 等. 水稻缺钾的生化诊断与土壤肥力[J]. 浙江农业大学学报, 1981, 7(2): 9-14.
Sun X, Ma G R, Lin R X *et al.* Biochemical and nutritional diagnosis of K-deficiency of paddy rice plants with regard to soil fertility[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1981, 7(2): 9-14.

[15] 向万胜, 古汉虎. 低湖区潜育性稻田施用钾肥的效应及对土壤氧化还原性状的影响[J]. 土壤肥料, 1997,(2): 32-34.
Xiang W S, Gu H H. Effect of K fertilizer using on gley paddy soil and soil redox traits in low lakes areas[J]. Soils and Fertilizers, 1997,(2): 32-34.

[16] 胡思农. 用锌肥防治水稻坐蔸[J]. 四川农业科技, 1981,(1): 15-16.
Hu S N. Prevention of root decline on rice by using zinc fertilizer[J]. Sichuan Agricultural Technology, 1981,(1): 15-16.

[17] 黄兆强. 福建冷浸田的低产因素及其改良利用[J]. 土壤肥料, 1996,(3): 13-15.
Huang Z Q. The low yield factors of cold spring paddy soils and its improvement and utilization in Fujian Province[J]. Soils and Fertilizers, 1996,(3): 13-15.

[18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Analysis of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[19] Gerami M, Rameeh V. Study of silicon and nitrogen effects on yield components and shoot ions nutrient composition in rice[J]. Agriculture, 2012, 58(3): 93-98.

[20] Darst B C. Do you really know your fertilizers?[J]. Farm Chemicals, 1982, 145(2): 66.

[21] Havlin J L, Beaton J D, Tisdale S L, Nelson W L. Soil fertility and fertilizers (7th Ed.)[M]. New Jersey, USA: Pearson Prentice Hall, 2005.

[22] Sadiq A A, Babagana U. Influence of lime materials to ameliorate acidity on irrigated paddy fields: A review[J]. Academic Research International, 2012, 3(1): 413-420.

[23] 柯玉诗, 黄小红, 张壮塔, 等. 硅肥对水稻氮磷钾营养的影响及增产原因分析[J]. 广东农业科学, 1997,(5): 24-26.
Ke Y S, Huang X H, Zhang Z T *et al.* Effects of silicon fertilizer on NPK nutrition of rice and the yield analysis[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 1997,(5): 24-26.

[24] 苏以荣. 硅缓解亚铁对水稻根系毒害的研究[J]. 热带亚热带土壤科学, 1993,(2): 171-174.
Su Y R. Effect of Si on alleviation of Fe^{2+} toxicity to rice roots[J]. Tropical & Subtropical Soil Science, 1993,(2): 171-174.

[25] 丁昌璞. 水稻土中的还原性物质[J]. 土壤学进展, 1984, 44(3): 458-466.
Ding C P. The reducing substances in paddy soils[J]. Progress in Soil Science, 1984, 44(3): 458-466.

[26] De Datta S K. Principles and practices of rice production[M]. New York: John Wiley and Sons, 1981.

[27] Ottow J C G, Prdae K, Brentenbreiter W *et al.* Strategies to alleviate iron toxicity of wetland rice in acid sulphate soils[A]. Deturck P, Ponnamperuma F N. Rice production on acid soils of tropics[M]. Kandy, Sri Lanka: Institute of Fundamental Studies, 1991.

[28] 易琼, 杨少海, 黄巧义, 等. 改良剂对反酸田土壤性质与水稻产量的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 176-183.
Yi Q, Yang S H, Huang Q Y *et al.* Effect of soil ameliorants on soil properties and rice yield of acid sulfate paddy field[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(1): 176-183.

[29] Ponnamperuma F N. The chemistry of submerged soils[J]. Advances in Agronomy, 1972, 24: 29-96.

[30] Brady N C. The nature and properties of soils(9th Ed.)[M]. New York, USA: Macmillan Publishing Company, 1984.