植物营养与肥料学报 2015,21(1): 138 - 146
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2015.0115

过氧化钙及硅钙肥改良潜育化稻田土壤的效果研究

余喜初, 李大明*, 黄庆海, 柳开楼, 叶会财, 徐小林, 胡惠文
(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 331717)

摘要:【目的】潜育化水稻土是我国最主要的低产水稻土类型,长期渍水导致的土壤缺氧及活性还原物质过度积累是其最主要特征,这严重影响了水稻的根系发育和产量提高。本研究以鄱阳湖区潜育化稻田土壤为对象,通过田间试验研究过氧化钙和硅钙肥单施或配施对潜育化稻田土壤的改良效果,旨在为探索潜育化稻田的轻简化改良方法提供理论依据。**【方法】**田间试验于 2012 ~ 2013 年在鄱阳湖区潜育化双季稻田进行,试验设单施化肥(T1)、化肥 + 硅钙肥(T2)、化肥 + 过氧化钙(T3)和化肥 + 硅钙肥 + 过氧化钙(T4)4 个处理。通过 2 年 4 季的田间试验研究了过氧化钙和硅钙肥单施或配施对鄱阳湖区潜育化稻田水稻产量、土壤还原物质总量及土壤物理化学性质的影响,分析了过氧化钙和硅钙肥改良潜育化稻田土壤的效果和应用前景。**【结果】**过氧化钙和硅钙肥单施或配施均可以提高潜育化稻田的水稻产量,二者配施每季可以提高水稻产量 1.06 t/hm^2 ~ 2.06 t/hm^2,并可促进磷、钾养分向籽粒转移。施硅钙肥对土壤还原物质总量没有明显影响,而施过氧化钙可以显著降低土壤还原物质总量,二者配施可以减少耕层土壤还原物质总量 1 cmol/kg 以上。随着土层的加深,土壤还原物质总量呈增加的趋势。硅钙肥与过氧化钙配施可以明显提高小于 10 mm 的中小团聚体的含量。施硅钙肥或过氧化钙对土壤养分含量没有明显影响,但二者配施可以明显提高土壤有机碳、速效磷的含量,但对腐殖质碳、速效钾和全氮含量影响不明显。**【结论】**施用硅钙肥可以提高潜育化稻田的水稻产量,但对土壤还原物质总量没有明显影响。施用过氧化钙既可以提高水稻产量,又可以降低潜育化稻田的潜育化程度。而硅钙肥和过氧化钙配施不仅可以明显提高水稻产量、降低潜育化稻田的潜育化程度,还可以改善土壤养分供应状况和土壤结构。因此,施用过氧化钙和硅钙肥可以作为改良鄱阳湖区潜育化稻田土壤的一种参考方法。

关键词: 潜育化稻田; 过氧化钙; 水稻产量; 还原物质总量; 土壤养分
中图分类号: S156.6; S143.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)01-0138-09

Amelioration effects of the application of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer in gleyed paddy fields

YU Xi-chu, LI Da-ming*, HUANG Qing-hai, LIU Kai-lou, YE Hui-cai, XU Xiao-lin, HU Hui-wen
(*Jiangxi Institute of Red Soil/National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 331717, China*)

Abstract:【Objectives】 Gleyed paddy soil is a main kind of low yield paddy soil in south China, its total area is above 2.5 million hectare in south China. Key characteristics of gleyed paddy fields are oxygen deficit and excessive accumulation of reducing substances due to long time waterlogging, which limit the rice root growth and yield advance. The objective of the present study is to study the meliorating effect of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer in gleyed paddy fields by conducting a field experiment in Poyang Lake region. **【Methods】** A field experiment was carried out to study the effects of the application styles of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer on the rice yield, soil total reducing substances and soil physical and chemical properties in double rice gleyed paddy fields in Poyang Lake region from 2012 to 2013. The treatments contained no calcium peroxide and silicon calcium fertilizer (T1), silicon calcium fertilizer only (T2), calcium peroxide only (T3), combination of

收稿日期: 2013-12-30 **接受日期:** 2014-03-10
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201003016); 国家自然科学基金项目(41301269)资助。
作者简介: 余喜初(1973—), 男, 江西都昌人, 硕士, 副研究员,主要从事植物营养方面的研究。E-mail: yxchu@163.com
* 通信作者 E-mail: lid_2005@126.com

calcium peroxide and silicon calcium fertilizer (T4). The rice yield and soil total reducing substances of 4 rice growing seasons from 2012 to 2013 were analyzed and as well as the soil physical and chemical properties, rice straw and seed nutrient contents after rice harvest in typical rice growing season during 2012 to 2013. 【**Results**】The single or combined application of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer could increase rice yield in gleyed paddy fields, and the combination application of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer could increase rice yield by 1.06-2.06 t/ha in single rice cropping, meanwhile the combination application of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer could promote the transfer of K and P to rice seeds. The single application of silicon calcium fertilizer has no significant effect on soil total reducing substances in this study, but the single or combination application of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer reduce the soil total reducing substances significantly, and the combination application of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer could reduce soil total reducing substances by more than 1 cmol/kg compared to the treatments of T1 and T2. The soil total amounts of reducing substances increase with the increase of soil depth. The combination application of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer could increase the content of < 10 mm small aggregates significantly. The application of calcium peroxide or silicon calcium fertilizer only has no significant effect on soil nutrient contents, but the combination application of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer could increase the soil organic carbon and available P significantly, and has no significant effect on the humus carbon, available K and total N in this study. 【**Conclusions**】The application of silicon calcium fertilizer could increase rice yield, but it has no significant effect on soil total reducing substances in gleyed paddy fields. The application of calcium peroxide could increase rice yield and meanwhile reduce soil total reducing substances. The combination application of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer has stable effects on increasing rice yield, reducing soil total reducing substances and improving soil physical and chemical properties, so the combination application of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer could be used to improve gleyed paddy fields in Poyang Lake region.

Key words: gleyed paddy field; calcium peroxide; rice yield; soil total reducing substances; soil nutrient

我国南方湖泊水体密布,在带来大量水资源储备的同时,也导致湖区周边的稻田产生严重的潜育化现象。据不完全统计,我国南方的潜育化稻田达252.4 万公顷[1],其中代表性的省份有江西、湖南和江苏等。长期渍水导致的土壤缺氧及活性还原物质过度积累是土壤潜育化的主要特征[2-4]。很多研究表明,潜育化水稻土有机质及全量养分贮量丰富,但土壤矿化度低,有效养分偏少。而且由于长期积水,水土温度低,生物活性较差,加之还原性有害物质的积累,对水稻生长极为不利[1,5],有研究指出,强潜育化稻田的水稻产量仅为非潜育化的 56%[6],严重影响水稻产量。然而,潜育化水稻土主要分布在肥水条件较好的地势低洼区域,因其富含有机质和潜在肥力高而被认为是具有较强增产潜力的低产土壤类型。目前,潜育化稻田土壤的改良技术主要集中在开挖排水沟或埋设暗沟、暗管等工程措施上,这些措施虽然对减轻土壤潜育化有明显作用,但是成本投入较大,维护难度高[7-8]。而针对潜育化稻田自身的障碍因素,采用消除土壤的还原物质及提高水稻前期根系生长发育能力的方法也有可能实现潜育化水稻土的改良和水稻产量的提高。过氧化钙等增氧剂在水稻直播和冷浸田改良上应用的结果显示,过氧化钙、过氧化尿素等增氧剂可以明显提高土壤氧化还原电位,减少还原物质总量,提高水稻根系活力和产量[9-12]。潜育化稻田前期低温、还原性毒害引起的水稻根系发育受限、坐蔸等问题也是限制潜育化稻田水稻产量提高的重要因素,硅、钙等养分可以促进水稻根系发育,提高水稻根系的氧化能力,改善秧苗质量,促进水稻的根系发育生长,因而施用含有硅、钙的肥料将有可能缓解潜育化稻田水稻坐蔸问题[13-16]。然而,有关过氧化钙等富氧改良剂和硅钙肥在改良潜育化稻田土作用的研究很少。因此,本研究以鄱阳湖区潜育化稻田为对象,通过田间试验研究过氧化钙、硅钙肥单施或配施对潜育化稻田水稻产量、土壤还原物质总量及土壤物理化学性质的影响,旨在明确过氧化钙和硅钙肥在改良鄱阳湖区潜育化水稻土,提高水稻产量上的作用,为探索潜育化稻田土壤的改良方法提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江西省南昌市南昌县南新乡丰洲村(东经116°02′91′′,北纬29°05′57′′),位于江西省中部偏北,赣江、抚河下游,鄱阳湖之滨。属亚热带季风气候,年均降水量为1624.4 mm,其中近一半雨量集中在夏季;年平均气温17.6 ℃左右,海拔16～17 m。全境水系发达。耕层潜育化明显,试验开始前的土壤还原物质总量为2.69 cmol/kg,pH为4.86,土壤有机质含量24.56 g/kg,全氮、速效磷和速效钾含量分别为1.32 g/kg、5.87 mg/kg和69.17 mg/kg。

1.2 试验设计

试验共设4个处理:单施化肥(T1)、化肥+硅钙肥(T2)、化肥+过氧化钙(T3)和化肥+硅钙肥+过氧化钙(T4)。每个处理重复3次,随机区组排列,小区面积30 m^2(5 m×6 m),每个小区周围围成宽30 cm、高50 cm的堤坝(农膜包裹堤坝防止水肥流失)。每处理化肥用量相同,均为N 180 kg/hm^2、P_2O_5 90 kg/hm^2、K_2O 120 kg/hm^2。硅钙肥用量为225 kg/hm^2(有效含量SiO_2 28%、CaO 22%),过氧化钙用量为30 kg/hm^2(有效成分75%,有效氧含量11%)。其中硅钙肥,过氧化钙,磷、钾肥作基肥一次施入,氮肥分基、蘖、穗肥3次施入,比例为4∶3∶3。氮肥为尿素,磷肥为钙镁磷肥,钾肥为氯化钾,试验采用双季稻栽培模式,从2012年早稻开始,2013年晚稻结束,共进行两年试验。早稻品种为金优458,晚稻品种为淦鑫688。农药防治稻田病虫害,杂草人工拔除。

1.3 测定项目和方法

1)水稻产量 在水稻成熟期每个小区单独收获,晒干后称重,并换算成标准产量。

2)秸秆及籽粒养分含量 在2013年晚稻成熟期,每个小区分别采集5株有代表性的水稻植株,将秸秆和籽粒分开后放入信封,于105℃杀青后,85℃烘至恒重,粉碎、过筛,经$H_2SO_4-H_2O_2$消煮后定容过滤,采用常规方法测定氮、磷、钾养分[17]。

3)土壤还原物质总量 在2012年、2013年早、晚稻收获后采集0—15 cm的耕层土壤样品,其中2012年晚稻收获后分别采集0—5 cm、5—10 cm和10—15 cm土层土样,采用硫酸铝浸提—重铬酸钾滴定法测定土壤还原物质[18]。

4)土壤阳离子交换量 在2012年和2013年的晚稻收获后,每个小区用土钻采集耕层(0—15 cm)土壤样品,采用EDTA—铵盐快速法,具体步骤参见《土壤理化分析》[19]。

5)土壤团聚体组分、腐殖质组成和理化性质 在2013年晚稻收获后,每个小区用土钻采集耕层(0—15 cm)土壤样品,风干后采用人工筛法测定土壤团聚体组分[19]。采用焦磷酸钠浸提—重铬酸钾氧化法测定土壤腐殖质组成及含量[20]。土壤pH值采用电位法测定;土壤有机质采用$K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$氧化法测定;土壤全氮用半微量开氏法测定;速效磷采用HCl-NH_4F法测定;速效钾采用1 mol/L NH_4OAc浸提—火焰光度计法测定[17]。

1.4 数据处理

所有数据均采用Excel 2003进行处理,统计分析采用SPSS 11.0软件进行,差异显著性检验采用最小显著差法(Fisher's LSD),显著性水平$P<0.05$,图用Origin 7.5作图软件完成。

2 结果与分析

2.1 过氧化钙及硅钙肥对水稻产量的影响

施硅钙肥和过氧化钙明显提高了潜育化稻田的水稻产量(表1)。单施硅钙肥(T2)可以提高水稻产量0.45 t/hm^2以上,其中2012年早、晚稻分别增产0.89 t/hm^2和1.29 t/hm^2,明显高于2013年的0.45 t/hm^2和0.44 t/hm^2。单施过氧化钙(T3)水稻产量均大于单施化肥处理(T1),其中2012年早、晚稻产量增幅达到显著性($P<0.05$);T2和T3处理的水稻产量没有明显差异。过氧化钙与硅钙肥配施(T4)水稻产量显著高T1、T2和T3,与T1相比水稻最多增产2.06 t/hm^2。因此,过氧化钙和硅钙肥单施或配施均可以提高潜育化稻田的水稻产量,其中二者配施的效果尤为明显。

2.2 过氧化钙及硅钙肥对水稻秸秆及籽粒养分含量的影响

从表2可以看出,施过氧化钙及硅钙肥的水稻籽粒氮含量明显下降,而磷、钾含量则呈增加趋势;其中施过氧化钙的处理(T3)水稻籽粒氮含量显著小于单施化肥(T1)和单施硅钙肥(T2)处理,T3处理水稻籽粒的磷含量显著大于T1,籽粒钾含量没有明显的变化。与水稻籽粒养分含量不同,施过氧化钙及硅钙肥处理的水稻秸秆的氮、磷含量表现为下降趋势,而钾含量则呈增加趋势。总体上,施过氧化钙及硅钙肥可以促进磷、钾养分向籽粒转移,不施过氧化钙及硅钙肥处理的水稻秸秆和籽粒的氮累积

表 1　过氧化钙和硅钙肥对水稻产量的影响(t/hm²)

Table 1　The effect of the application styles of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer on rice yield

处理 Treatment	2012 年籽粒产量 Grain yield in 2012		2013 年籽粒产量 Grain yield in 2013	
	早稻 Early rice	晚稻 Later rice	早稻 Early rice	晚稻 Later rice
T1	4.64 ±0.34 c	4.94 ±0.28 c	5.51 ±0.30 b	7.31 ±0.45 b
T2	5.53 ±0.25 b	6.23 ±0.40 b	5.97 ±0.55 b	7.75 ±0.39 b
T3	5.87 ±0.19 b	5.96 ±0.21 b	6.09 ±0.13 b	8.15 ±0.54 ab
T4	6.49 ±0.15 a	7.00 ±0.37 a	6.52 ±0.05 a	8.52 ±0.33 a

注(Note): T1—不施硅钙肥或过氧化钙 No calcium peroxide or silicon calcium fertilizer; T2—单施硅钙肥 Silicon calcium fertilizer; T3—单施过氧化钙 Calcium peroxide;T4—过氧化钙和硅钙肥配施 Combination of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer. 表中数值为平均值 + 标准差 The value = mean + SD. 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.

表 2　过氧化钙和硅钙肥对水稻植株养分含量的影响(g/kg, 2013 年晚稻)

Table 2　The effect of the application of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer on rice nutrient content (later rice in 2013)

处理 Treatment	籽粒 Seed			秸秆 Straw		
	N	P	K	N	P	K
T1	9.69 ±0.23 a	6.81 ±0.46 b	4.96 ±0.48 b	6.89 ±0.57 a	2.18 ±0.06 a	21.11 ±1.47 b
T2	8.65 ±0.46 b	7.38 ±0.42 a	5.98 ±0.35 a	6.58 ±0.47 a	2.09 ±0.18 a	22.27 ±0.71 b
T3	7.84 ±0.22 c	7.39 ±0.53 a	5.25 ±0.42 ab	5.93 ±0.34 ab	2.06 ±0.13 a	23.19 ±1.26 ab
T4	7.93 ±0.10 c	7.33 ±0.32 a	5.80 ±0.33 a	5.68 ±0.35 b	1.79 ±0.20 b	24.75 ±1.10 a

注(Note): T1—不施硅钙肥或过氧化钙 No calcium peroxide or silicon calcium fertilizer; T2—单施硅钙肥 Silicon calcium fertilizer; T3—单施过氧化钙 Calcium peroxide;T4—过氧化钙和硅钙肥配施 Combination of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer. 表中值为平均值 + 标准差 The value = mean + SD. 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.

量明显增加。

2.3　过氧化钙及硅钙肥对稻田土壤还原物质总量的影响

过氧化钙和硅钙肥单施或配施均可以在一定程度上降低耕层土壤还原物质总量,其中单施硅钙肥的效果不显著,而单施过氧化钙或其与硅钙肥配施处理的耕层土壤还原物质总量显著减少(表 3)。两年试验间,单施化肥处理(T1)的还原物质总量最高为 3.96 cmol/kg,最低为 2.63 cmol/kg,而对应的施过氧化钙(T3)和硅钙肥(T2)耕层土壤还原物质总量分别为 2.48 cmol/kg 和 1.56 cmol/kg,均减少 1 cmol/kg以上,作用明显。随着土层的加深,土壤还原物质总量呈逐步增加的趋势。T1 处理 0—5 cm 和 5—10 cm 土壤还原物质总量表现出与 0—15 cm 耕层混合样一致的趋势,而施过氧化钙及硅钙肥对 10—15 cm 土壤还原物质总量没有明显影响。

2.4　过氧化钙及硅钙肥对稻田土壤阳离子交换量的影响

图 1 显示,施硅钙肥对土壤阳离子交换量没有明显影响,而施过氧化钙土壤阳离子交换量有增加的趋势。2012 年,过氧化钙和硅钙肥配施处理(T4)的土壤阳离子交换量显著高于不施过氧化钙的处理(T1 和 T2),施过氧化钙处理(T3 和 T4)之间的阳离子交换量没有差异。2013 年,施过氧化钙处理(T3 和 T4)的土壤阳离子交换量均显著大于不施过氧化钙的处理(T1 和 T2),而施过氧化钙处理(T3 和 T4)之间也没有明显差异。

表3 过氧化钙和硅钙肥对土壤还原物质总量的影响(cmol/kg)

Table 3 The effect of the application of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer on soil total reducing substances

处理 Treatment	2012 早稻收获期 HSER in 2012	2012 晚稻收获期 HSLR in 2012			2013 早稻收获期 HSER in 2013	2013 晚稻收获期 HSLR in 2013
	0—15 cm	0—5 cm	5—10 cm	10—15 cm	0—15 cm	0—15 cm
T1	3.96 ±0.36 a	1.92 ±0.22 a	2.82 ±0.29 a	3.21 ±0.31 a	3.54 ±0.24 a	2.63 ±0.20 a
T2	3.71 ±0.40 ab	1.52 ±0.14 b	2.10 ±0.22 b	2.41 ±0.15 b	2.87 ±0.26 b	2.35 ±0.18 a
T3	3.30 ±0.22 b	0.97 ±0.10 d	1.55 ±0.16 c	3.17 ±0.26 a	2.28 ±0.15 c	1.89 ±0.11 b
T4	2.63 ±0.43 c	1.21 ±0.11 c	1.41 ±0.25 c	3.26 ±0.29 a	1.50 ±0.22 d	1.48 ±0.09 c

注(Note):T1—不施硅钙肥或过氧化钙 No calcium peroxide or silicon calcium fertilizer; T2—单施硅钙肥 Silicon calcium fertilizer; T3—单施过氧化钙 Calcium peroxide;T4—过氧化钙和硅钙肥配施 Combination of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer. HSER—Harvest stage of early rice; HSLR—Harvest stage of later rice. 表中值为平均值+标准差 The value = mean + SD. 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.

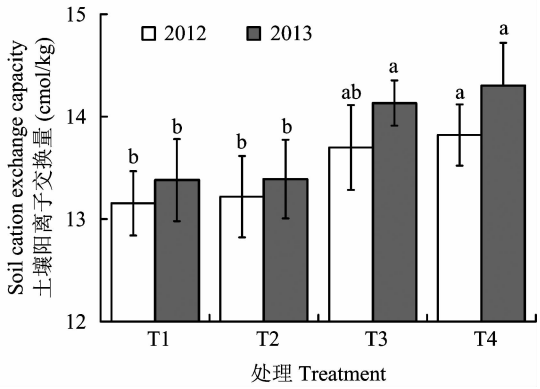

图1 过氧化钙和硅钙肥对土壤阳离子交换量的影响

Fig. 1 The effect of the application of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer on soil cation exchange capacity

[注(Note):T1—不施硅钙肥或过氧化钙 No calcium peroxide or silicon calcium fertilizer; T2—单施硅钙肥 Silicon calcium fertilizer; T3—单施过氧化钙 Calcium peroxide;T4—过氧化钙和硅钙肥配施 Combination of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer. 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% levels.]

2.5 过氧化钙及硅钙肥对稻田土壤团聚体组成的影响

硅钙肥与过氧化钙配施降低了干筛法分离的大于10 mm的团聚体含量,但明显提高了小于10 mm的中小团聚体的含量(表4)。施用硅钙肥或过氧化钙增加了湿筛法大于5 mm粒级土壤团聚体含量,但二者配施降低了大于5 mm粒级的土壤团聚体含量,其他粒级团聚体含量没有明显的规律性(表5)。

2.6 过氧化钙及硅钙肥对稻田土壤腐殖质组成及含量的影响

从表6可以看出,施硅钙肥对潜育化稻田土壤有机碳、腐殖质碳及胡敏素碳含量没有明显影响。而施过氧化钙以及过氧化钙与硅钙肥配施可以明显提高潜育化稻田表层土壤有机碳含量,但是对腐殖质碳没有明显影响,有机碳含量增加的主要组分为胡敏素碳。因此,施过氧化钙虽然在短期内提高了土壤有机碳含量,但是对于胡敏酸碳和富里酸碳等腐殖质碳的影响尚不明显。

表4 过氧化钙和硅钙肥对土壤不同粒级团聚体含量的影响(干筛法,2013年晚稻后)

Table 4 The effect of the application of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer on soil aggregate content (dry sieving, after later rice in 2013)

处理 Treat.	不同粒级团聚体含量 Content of different particle size aggregates(%)								
	>10 mm	10～7mm	7～5 mm	5～3 mm	3～2 mm	2～1 mm	1～0.5 mm	0.5～0.25 mm	<0.25 mm
T1	79.37	8.79	2.49	0.60	2.33	1.94	1.30	0.87	2.26
T2	72.64	12.44	3.00	0.94	3.15	2.53	1.67	1.07	2.52
T3	70.21	13.01	3.47	1.00	3.63	2.88	1.87	1.15	2.63
T4	63.16	17.28	4.46	1.08	4.14	3.37	2.06	1.25	2.93

注(Note):T1—不施硅钙肥或过氧化钙 No calcium peroxide or silicon calcium fertilizer; T2—单施硅钙肥 Silicon calcium fertilizer; T3—单施过氧化钙 Calcium peroxide;T4—过氧化钙和硅钙肥配施 Combination of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer.

表 5　过氧化钙和硅钙肥对土壤不同粒级团聚体含量的影响(湿筛法, 2013 年晚稻后)

Table 5　The effect of the application of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer on soil aggregate content (wet sieving, after later rice in 2013)

处理 Treatment	不同粒级团聚体含量 Content of different particle size aggregates(%)						
	> 5 mm	5～3 mm	3～2 mm	2～1 mm	1～0.5 mm	0.5～0.25 mm	< 0.25 mm
T1	35.91	2.03	0.69	3.24	14.38	10.15	33.60
T2	40.29	1.45	0.48	2.29	11.03	8.58	35.88
T3	40.62	2.51	0.85	3.20	13.65	7.55	31.62
T4	27.96	1.61	0.85	2.71	15.11	10.62	41.15

注(Note): T1—不施硅钙肥或过氧化钙 No calcium peroxide or silicon calcium fertilizer; T2—单施硅钙肥 Silicon calcium fertilizer; T3—单施过氧化钙 Calcium peroxide; T4—过氧化钙和硅钙肥配施 Combination of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer.

表 6　过氧化钙和硅钙肥对土壤腐殖质组成及含量的影响(g/kg, 2013 年晚稻后)

Table 6　The effect of the application of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer on the composition and content of soil humus (after later rice in 2013)

处理 Treatment	有机碳 Organic carbon	腐殖质碳 Humus organic	胡敏酸碳 Humic acid carbon	富里酸碳 Fulvic acid carbon	胡敏素碳 Humin carbon
T1	14.29 ± 0.80 ab	4.34 ± 0.30 a	1.95 ± 0.27 a	2.39 ± 0.30 b	9.95 ± 1.06 b
T2	13.95 ± 0.68 b	4.54 ± 0.37 a	1.73 ± 0.32 ab	2.80 ± 0.22 a	9.41 ± 0.94 b
T3	15.38 ± 0.51 a	4.29 ± 0.13 a	1.99 ± 0.13 a	2.30 ± 0.19 b	11.09 ± 0.84 a
T4	15.79 ± 0.50 a	4.43 ± 0.06 a	1.55 ± 0.31 b	2.88 ± 0.25 a	11.36 ± 0.44 a

注(Note): T1—不施硅钙肥或过氧化钙 No calcium peroxide or silicon calcium fertilizer; T2—单施硅钙肥 Silicon calcium fertilizer; T3—单施过氧化钙 Calcium peroxide; T4—过氧化钙和硅钙肥配施 Combination of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer. 表中值为平均值 + 标准差 The value = mean + SD. 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.

2.7　过氧化钙及硅钙肥对稻田土壤 pH 值及养分含量的影响

从表 7 中可以看出,施用硅钙肥或过氧化钙对土壤 pH 值、速效钾和全氮含量没有明显影响。施用硅钙肥或过氧化钙对土壤有机质和速效磷含量也没有显著影响,而过氧化钙和硅钙肥配施显著提高了潜育化稻田表层土壤有机质和速效磷含量。

表 7　过氧化钙和硅钙肥对土壤 pH 值及养分含量的影响(2013 年晚稻后)

Table 7　The effect of the application of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer on the soil pH and nutrient contents (after later rice in 2013)

处理 Treatment	pH	有机质(g/kg) Organic matter	速效磷(mg/kg) Available P	速效钾(mg/kg) Available K	全氮(g/kg) Total N
T1	4.95 ± 0.11 a	25.16 ± 0.74 b	6.65 ± 0.45 b	66.67 ± 3.20 a	1.39 ± 0.05 a
T2	4.94 ± 0.14 a	26.49 ± 1.05 ab	6.65 ± 0.28 b	68.33 ± 1.44 a	1.41 ± 0.07 a
T3	5.02 ± 0.08 a	26.44 ± 0.86 b	7.01 ± 0.56 ab	69.17 ± 2.64 a	1.42 ± 0.02 a
T4	4.90 ± 0.12 a	27.73 ± 0.68 a	7.31 ± 0.25 a	70.83 ± 2.29 a	1.44 ± 0.01 a

注(Note): T1—不施硅钙肥或过氧化钙 No calcium peroxide or silicon calcium fertilizer; T2—单施硅钙肥 Silicon calcium fertilizer; T3—单施过氧化钙 Calcium peroxide; T4—过氧化钙和硅钙肥配施 Combination of calcium peroxide and silicon calcium fertilizer. 表中值为平均值 + 标准差 The value = mean + SD. 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 讨论

潜育化水稻土是我国面积最大的低产水稻土类型,存在渍、冷、烂、闭(气)、毒及缺素等障碍因素,其中对水稻生长和产量影响最大的因素是土壤还原物质的过量累积[1-3]。还原物质含量过高严重影响水稻移栽后的根系发育,如果再遇到长时间的低温,水稻的生长发育将受到更大的限制,容易产生坐蔸现象,最终导致产量明显降低[5]。

过氧化钙是一种碱性化合物,与水反应可以生成氧气和碱性无机物,并释放热量,缓慢释放的氧气可以氧化土壤中还原态离子,减少还原物质累积,提高土壤氧化还原电位,释放的热量还可以提高土壤的温度,有效消除水稻生育期水稻土还原物质总量多、毒害强及土温低的影响,对促进水稻根系的生长有明显的作用。正基于此,过氧化钙已被用于直播水稻种子的包衣和冷浸田改良中。研究发现,采用以过氧化钙为主要成分的粉衣剂可以有效缓解浸水土壤中供氧不足状况,使水稻种子的发芽率提高到95%以上[21]。杨利等人的研究指出,冷浸田基施过氧化钙 30 kg/hm^{2}可以提高土壤氧化还原电位 113.9～184.2 mV,减少土壤还原物质总量0.86～0.96 cmol/kg,提高根系活力31.2～50.2 μg/(g·h),提高水稻产量 3.3%～12.4%[11]。本研究的结果与以往的研究结果一致,施用过氧化钙明显降低了耕层土壤的还原物质总量,减少幅度为0.66～1.26 cmol/kg;同时提高了水稻产量0.59～1.23 t/hm^2,改良潜育化稻田的作用明显。施用过氧化钙增加潜育化稻田水稻产量的原因除了提高土壤氧化还原电位、有效消除还原物质总量等直接作用以外,其对土壤氧含量的提升作用还可以促进水稻硝酸还原酶(NR)和谷酰胺合成酶(GS)等氮代谢酶的产生,促进水稻对氮素的吸收、转化和累积,有利于潜育化稻田水稻快速生根,避免水稻坐蔸现象的发生;同时其缓慢释放氧的过程也使得水稻在整个生育期可以持续高效地利用氮等营养元素,增加干物质的积累,进而提高潜育化稻田的水稻产量[22-25]。

本研究的结果显示,虽然施硅钙肥对土壤还原物质总量没有显著影响,但是也提高水稻产量0.44～1.29 t/hm^2。主要原因可能是硅钙肥作为一种肥料既可以向土壤提供养分,又可以起到改良土壤的作用,同时还具有防病、防虫和减毒的作用;其与土壤中水反应,产生的有效硅可以提高根系的氧化能力,抑制铁、锰的过量吸收,减轻铁、锰毒害[26-28],而潜育化水稻土在长期还原条件下累积的大量还原态铁、锰是影响水稻移栽后根系发育的主要因素,硅钙肥中释放的有效硅可以在一定程度上缓解还原态铁、锰的影响,改善水稻生长状况、提高水稻自身抵抗不利生长条件的能力,从而实现提高水稻产量的目的。董稳军等人在冷浸田的研究也发现,施用硅钙肥对土壤还原物质总量没有明显影响,但是明显改善了水稻的生长状况,水稻增产近 0.45 t/hm^2[29]。这也表明,施用硅钙肥提高潜育化稻田水稻产量主要是通过提高水稻自身抵抗力、减轻潜育化水稻土毒害而实现的。

本研究中,过氧化钙和硅钙肥配施的效果好于单施处理,水稻产量增加更为明显,还原物质总量下降幅度更大,土壤的养分状况和结构也发生了较为明显的变化。这表明,二者配合使用可以更为充分地发挥过氧化钙的消除还原物质能力以及硅钙肥促进水稻生长的作用,形成良好的互补优势,在改良潜育化稻田上的作用尤为明显。

本研究中,不同年份和水稻生长季水稻的产量和土壤还原物质总量变化幅度较大,过氧化钙和硅钙肥的改良效果也波动较大,总体上表现出早稻生长季改良效果好于晚稻,而晚稻产量高于早稻的现象。这主要与鄱阳湖区潜育化稻田土壤的自身特点有关,鄱阳湖区潜育化稻田土壤的潜在养分丰富、光热条件良好,造成低产障碍因子形成的主要因素是田间水分的过度累积,而一旦田间的积水排除、地下水位下降,潜育化稻田的障碍因子将得到明显缓解或直接消除。一般早稻生长季低温多雨,潜育化加剧,相应的潜育化强度增强,改良措施的作用明显;而晚稻生长季气温较高且降雨减少,潜育化程度明显减轻,产量随之增加,改良措施的作用效果相应减弱。这一现象也与杨利等人的研究结果一致[11]。此外,近年来试验区极端天气的出现频率增加(2012 年的寒露风,2013 年的持续干旱),也是导致年际间产量和还原物质总量波动较大的重要原因。

4 结论

施用硅钙肥可以提高鄱阳湖区潜育化稻田的水稻产量,但对土壤还原物质总量没有明显影响。施用过氧化钙既可以提高水稻产量,又可以降低潜育化程度。硅钙肥和过氧化钙配施不仅可以明显提高水稻产量、降低水稻土潜育化程度,还可以改善土壤养分供应状况和土壤物理结构。因此,施用过氧

化钙和硅钙肥可以作为改良鄱阳湖区潜育化稻田的一种参考方法。

参 考 文 献:

[1] 龚子同, 张效朴, 韦启璠. 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. The formation, traits and potential productivity of Chinese gleization paddy soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1990, 23(1): 45-53.

[2] Pan S Z. Characterization of gleyzation of paddy soils in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Pedosphere, 1996, 6(2): 111-119.

[3] 潘淑贞. 不同潜育化土壤中还原物质的变化[J]. 土壤通报, 1996, 27(4): 158-161.
Pan S Z. The changes of soil reducing substances in different gleyed paddy field soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1996, 27(4): 158-161.

[4] 陈防, 鲁剑巍, 陈行春, 等. 不同水型水稻土施氮磷肥效果及施用技术的研究[J]. 热带亚热带土壤科学, 1997, 6(1): 32-41.
Chen F, Lu J W, Chen X C *et al*. The effects and application technique of N, P fertilizer in different styles of paddy field[J]. Tropical and Subtropical Soil Science, 1997, 6(1): 32-41.

[5] 赖庆旺, 刘勋, 黄庆海. 鄱阳湖地区水稻土潜育化发生及其改良对策[J]. 中国农业科学, 1989, 22(4): 65-74.
Lai Q W, Liu X, Huang Q H. The produce and improvement countermeasures of gleyed paddy field in Poyang Lake region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1989, 22(4): 65-74.

[6] 王昌燎, 何电源. 潜育化水稻土的肥力特性及施肥效应的研究[J]. 农业现代化研究, 1983, (1): 31-37.
Wang C L, He D Y. The nutrient characters and fertilization effect of gleyed paddy field[J]. Research of Agricultural Modernization, 1983, (1): 31-37.

[7] 古汉虎. 潜育化水稻土田间开沟治渍研究[J]. 土壤通报, 1993, 24(3): 108-110.
Gu H H. The study on the effect of ditching in gleyed paddy field[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1993, 24(3): 108-110.

[8] 张振南. 潜育化水稻土中还原物质状况、危害指标及其有效调节途径[J]. 湖南农业科学, 1981, (2): 35-39.
Zhang Z N. The status of reducing substances, damaging indexes and improving styles of gleyed paddy field[J]. Hunan Agriculture Science, 1981, 2: 35-39.

[9] Frankenberger W T Jr. Affecting the fate of urea peroxide added to soil[J]. Bulletin Environment Contaminate Toxicology, 1997, 59(1): 50-57.

[10] Motoyuki H., Mitsuo I. Promotion of seedling emergence of paddy rice from flooded soil by coating seed with potassium nitrate[J]. Japanese Journal of Crop Science, 1991, 60(3): 441-446.

[11] 杨利, 姚其华, 范先鹏, 等. 鄂东南棕红壤丘陵区冷浸田施用过氧化钙效果[J]. 湖北农业科学, 1997, (4): 37-39.
Yang L, Yao Q H, Fan X P *et al*. Effect of applying CaO_2 to cold-water paddy field in hilly area in brown-red soil of southeast Hubei[J]. Hubei Agriculture Science, 1997, (4): 37-39.

[12] 王丹英, 韩勃, 章秀福, 等. 水稻根际含氧量对根系生长的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(5): 803-808.
Wang D Y, Han B, Zhang X F *et al*. Influence of rhizosphere oxygen concentration on rice root growth[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(5): 803-808.

[13] 兰雨锋. 水稻施用硅钙肥效果试验[J]. 垦殖与稻作, 2006(增): 99-99.
Lan Y F. The effect of the application of silicon calcium fertilizer on rice [J]. Reclaiming and Rice Cultivation, 2006 (supplement): 99-99.

[14] 孙庆峰, 李玉章, 于秉祥. 水稻施用硅、钾肥的对比试验[J]. 内蒙古农业科技, 2007, (7): 183-184.
Sun Q F, Li Y Z, Yu B X. The comparison experiment of the application of Si, K on rice[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2007, (7): 183-184.

[15] 王厚胜, 王吉春, 李才库, 等. 硅钙肥对水稻生育性状及产量的影响[J]. 吉林农业科学, 2007, 32(3): 35-36, 47.
Wang H S, Wang J C, Li C K *et al*. Effect of silicon- calcium fertilizer on growing characters and yield of rice[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2007, 32(3): 35-36, 47.

[16] 齐鑫, 韩成, 盛学斌, 等. 钾硅钙微孔矿物肥对褐潮土水稻生长及土壤性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 258-264.
Qi X, Han C, Sheng X B *et al*. Effect of micropore potassium-silicon-calcium (PSC) mineral fertilizer on rice growth and the characteristics of brown-humid soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(2): 258-264.

[17] 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. Analysis method of soil and agro-chemistry [M]. Beijing: Chinese Agricultural Scien-tech Press, 2000.

[18] 马毅杰, 陆彦椿, 赵美芝, 等. 长江中游平原湖区土壤潜育化沼泽化的发展趋势与改良利用[J]. 土壤, 1997, (1): 1-5.
Ma Y J, Lu Y C, Zhao M Z *et al*. The development trends and improvement of gleyed soil in region in middle reaches of the Yangtze River[J]. Soil, 1997, (1): 1-5.

[19] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science. Soil physical and chemical analysis[M]. Shanghai: Shanghai Science Technology Press, 1978.

[20] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
Liu G S. Soil physical and chemical analysis and soil profile descriptions [M]. Beijing: China Standard Press, 1996.

[21] 翟永青, 丁士文, 姚子华, 等. 过氧化钙在水稻直播中的应用试验研究[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2002, 22(4): 360-362.

Zhai Y Q, Ding S W, Yao Z H *et al*. Experimental study of CaO_2 in the application of rice seeds direct sowing in water saturated soil[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2002, 22(4): 360-362.

[22] 赵锋, 徐春梅, 张卫建, 等. 根际溶氧量与氮素形态对水稻根系特征及氮素积累的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(2): 195-200.
Zhao F, Xu C M, Zhang W J *et al*. Effects of rhizosphere dissolved oxygen and nitrogen form on root characteristics and nitrogen accumulation of rice [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2011, 25(2): 195-200.

[23] 赵锋, 张卫建, 章秀福, 等. 稻田增氧模式对水稻籽粒灌浆的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(6): 605-612.
Zhao F, Zhang W J, Zhang X F *et al*. Effects of oxygen-increasing patterns in paddy field on rice grain-filling [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2011, 25(6): 605-612.

[24] 赵锋, 张卫建, 章秀福, 等. 连续增氧对不同基因型水稻分蘖期生长和氮代谢酶活性的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(2): 344-351.
Zhao F, Zhang W J, Zhang X F *et al*. Effect of continuous aeration on growth and activity of enzymes related to nitrogen metabolism of different rice genotypes at tillering stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(2): 344-351.

[25] 徐春梅, 王丹英, 陈松, 等. 增氧对水稻根系生长与氮代谢的影响[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(3): 320-324.
Xu C M, Wang D Y, Chen S *et al*. Effect of aeration on root growth and nitrogen metabolism in rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2012, 26(3): 320-324.

[26] Horiguchi T. Mechanism of manganese toxicity and tolerance of Plants IV: Effect of silicon on alleviation of manganese toxicity of rice plants[J]. Soil Science and Plant Nutrient, 1988, 34(1): 65-73.

[27] Liang Y C, Sun W C, Zhu Y G *et al*. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review [J]. Environment Pollution, 2007, 147(2): 422-428.

[28] 李萍, 宋阿琳, 李兆君, 等. 硅对过量锰胁迫下水稻根系抗氧化系统和膜脂质过氧化作用的调控机理[J]. 环境科学学报, 2011, 31(7): 1542-1549.
Li P, Song A L, Li Z J *et al*. Silicon-mediated antioxidant reactions and membrane lipid peroxidation in roots of rice (*Oryza sativa* L.) exposed to excess manganese [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(7): 1542-1549.

[29] 董稳军, 徐培智, 张仁陟, 等. 土壤改良剂对冷浸田土壤特性和水稻群体质量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 810-816.
Dong W J, Xu P Z, Zhang R Z *et al*. Effects of soil amendments on soil properties and population quality of rice in cold waterlogged paddy field[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(7): 810-816.