

石灰与秸秆配施对冷浸田水稻产量与土壤特性的影响

侯文峰¹ 李小坤¹ 王思潮² 汪金平² 徐祥玉³ 熊又升³ 丛日环¹

1. 华中农业大学资源与环境学院/农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070;

2. 华中农业大学植物科学技术学院, 武汉 430070; 3. 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 武汉 430064

摘要 以湖北省典型冷浸田为研究对象, 研究石灰与秸秆配施对水稻产量与土壤特性的影响。结果表明, 与对照处理(L₀+S₀)相比, 石灰与秸秆的配施能显著提高水稻的产量、穗粒数、结实率和千粒重, 增幅分别为46.0%、9.4%、6.7%和2.6%, N、P₂O₅、K₂O的吸收量分别提高47.9%、50.3%和48.2%。与对照处理相比, 石灰与秸秆配施显著降低土壤活性还原性物质总量和Fe²⁺含量, 降幅分别为48.3%和38.1%, 土壤氧化还原电位(Eh)显著提高48.7%。石灰用量1 500~2 250 kg/hm²、秸秆用量4 500 kg/hm²是较理想的配施模式。

关键词 冷浸田; 石灰; 秸秆; 产量; 还原性物质; 氧化还原电位

中图分类号 S 156.8 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2015)05-0058-05

水稻作为重要的谷类作物, 是人们主要的粮食来源之一^[1]。冷浸田作为长期渍水的强潜育型低产水稻田, 是我国低产水稻田的一个重要类型。由于终年积水, 冷浸田土壤结构遭到破坏, 土粒较分散, 通透性差, 毒害还原性物质不断累积, 且水冷土温低, 微生物活性较弱, 有效养分释放缓慢, 从而形成了冷浸田“毒、烂、冷、瘦”的特点^[2]。据统计, 我国约有冷浸田346万hm², 占全国稻田总面积的15.1%, 占低产稻田总面积的44.2%^[3]。我国冷浸田水稻产量大约为3 000~4 500 kg/hm²^[4], 而正常水稻田的产量已达到8 250 kg/hm²^[5], 冷浸田已经成为制约我国水稻单产提高的重要因子。

渍害是造成冷浸田低产的主要因素, 在冷浸田改良过程中研究人员对此进行了大量研究。徐培智等^[6]研究表明, 开沟排水在消除冷浸田渍害方面效果显著。陈士平等^[7]研究表明, 暗管排水也能显著改善冷浸田的渍害问题。徐祥玉等^[8]研究表明, 起垄栽培能很好地降低冷浸田土壤还原性物质总量。尽管这些方法达到了改良冷浸田的目的, 但增加了人力物力, 经济效益低。近年来, 各种土壤改良剂的出现和应用为冷浸田的改良提供了新的思路。研究表明, 施用石灰改良酸性土壤效果显著^[9-11]。秸秆

还田能够很好地改善土壤物理性状, 提高土壤肥力水平^[12-13]。有关石灰和秸秆配合施用对改良冷浸田效果的研究相对较少。笔者采用田间试验研究石灰和秸秆配施对冷浸田水稻产量及土壤理化性质的影响, 以期对石灰和秸秆的合理施用及冷浸田的改良提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

试验于2013年5至10月在湖北省黄石市阳新县白沙镇土库村(29°93'41"N, 115°07'33"E)进行。该地区属低山丘陵区, 海拔60 m, 年平均气温16.8℃, 无霜期263 d, 年均日照时数1 897 h, 年均降雨量1 389.6 mm, 属亚热带东亚大陆性气候。土壤为酸性结晶岩发育而成的潜育型水稻土, 质地为粘壤土, 土粒分散, 泥深糊烂, 水温土温低, 还原性物质较多, 属于冷泉烂泥型冷浸田。土壤的基本理化性质为: 容重1.25 g/cm³, pH 6.0, 有机质17.6 g/kg, 全氮1.7 g/kg, 有效磷14.9 mg/kg, 速效钾35.0 mg/kg。供试水稻品种为当地主推品种“扬两优6号”。

收稿日期: 2014-10-24

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201003059-09); 中央高校基本科研业务费专项(2011PY150); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1247)

侯文峰, 硕士研究生. 研究方向: 现代施肥技术. E-mail: wenfenghou@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 李小坤, 博士, 副教授. 研究方向: 作物养分管理和土壤肥力. E-mail: lixiaokun@mail.hzau.edu.cn

1.2 试验设计

试验设7个处理,分别为:(1)不施石灰,不加秸秆($L_0 + S_0$);(2) $L_{750} + S_{2250}$;(3) $L_{1500} + S_{2250}$;(4) $L_{2250} + S_{2250}$;(5) $L_{750} + S_{4500}$;(6) $L_{1500} + S_{4500}$;(7) $L_{2250} + S_{4500}$ 。处理中下角数字表示石灰(L)和秸秆(S)的用量,单位 kg/hm^2 。各处理3次重复,随机区组排列,小区面积 20 m^2 。

各处理水稻全生育期氮肥(N)、磷肥(P_2O_5)和钾肥(K_2O)用量分别为180、90和120 kg/hm^2 。其中,氮肥的50%作基肥,25%为分蘖肥,25%为穗肥;磷肥全部作基肥;钾肥70%作基肥,30%作穗肥。分别以尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)和氯化钾(含 K_2O 60%)为肥源。

2013年5月15日育秧,5月26日划小区,将石灰和秸秆施入各小区,6月13日撒施基肥,耙匀后移栽(2苗/穴),密度为22.5万蔸/ hm^2 。7月13日撒施分蘖肥,8月29日撒施穗肥,9月23日收获测产。

1.3 测定项目及方法

1)取样。收获前在各小区随机齐地割6蔸长势相近植株,洗净基部泥土后装入网袋带回。样品经风干后分样考种,后随机取各部分70℃烘干至恒质量,用磨样机粉碎后分别编号装入自封袋备用。

2)考种。取风干样考种,调查有效穗数、每穗粒数,脱粒后测定千粒重并计算结实率。

3)测产。收获时各小区单打单收,籽粒风干后分别称质量、计产。

4)样品测定。植物样品及基础土壤样品的理化性质采用常规方法测定^[14]。土壤还原性物质用0.1

$\text{mol}/\text{L Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 溶液浸提,还原性物质总量采用重铬酸钾氧化法测定,活性还原性物质含量采用高锰酸钾滴定法测定; Fe^{2+} 含量采用邻菲罗啉比色法测定^[15],收获前采用FJA-5型氧化还原电位去极化法自动测定仪原位测定土壤氧化还原电位。

1.4 数据处理

试验数据处理采用Origin 8.0和Microsoft Excel 2003完成,最小显著法(LSD)检验试验数据的差异显著性水平($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 石灰与秸秆配施对水稻产量及产量构成因子的影响

由表1可知,石灰和秸秆的不同配施处理均显著提高了水稻的产量,与不施石灰和秸秆处理($L_0 + S_0$)相比,增产量为1724~2179 kg/hm^2 ,增产率为40.4%~51.1%。低秸秆还田量(2250 kg/hm^2)条件下,随着石灰用量的增加,各处理水稻产量有增加的趋势,但无显著差异。高秸秆还田量条件下(4500 kg/hm^2),随着石灰用量的增加,水稻产量显著增加, L_{2250} 与 L_{750} 处理相比显著增产2.7%。随着石灰用量的增加,高秸秆还田量处理与低秸秆还田量处理相比均显著增产,增产量分别为286、215和273 kg/hm^2 ,增产率分别为4.8%、3.5%和4.4%。

产量构成因子结果显示,石灰和秸秆的不同配施处理均显著提高了水稻的穗粒数和结实率,与 $L_0 + S_0$ 处理相比平均提高了13个/穗和5.6个百分点,增幅分别为9.4%和6.7%,且高秸秆还田量处理

表1 石灰与秸秆配施对水稻产量及产量构成因子的影响¹⁾

Table 1 Effect of combined application of lime and straw on yield and yield component

处理 Treatment	产量/ (kg/hm^2) Yield	有效穗数/ $(\times 10^4 \text{ hm}^2)$ Effective spike	穗粒数 Grain number of per spike	结实率/% Seed setting rate	千粒重/g 1000-grain weight
$L_0 + S_0$	4268±117 e	197.5±5.5 a	139±2 d	83.6±1.8 b	27.0±0.4 b
$L_{750} + S_{2250}$	5992±17 d	185.0±5.4 ab	146±2 c	89.1±0.5 a	27.5±0.3 ab
$L_{1500} + S_{2250}$	6136±67 cd	187.5±3.7 ab	146±3 c	87.5±2.1 a	27.3±0.4 ab
$L_{2250} + S_{2250}$	6174±15 c	183.8±3.8 ab	152±2 b	89.2±1.2 a	27.5±0.4 ab
$L_{750} + S_{4500}$	6278±121 bc	178.8±2.5 b	153±1 b	89.3±2.4 a	28.0±0.3 a
$L_{1500} + S_{4500}$	6351±75 ab	180.0±6.5 b	156±2 b	90.8±2.1 a	27.9±0.4 a
$L_{2250} + S_{4500}$	6447±72 a	175.4±10.9 b	161±4 a	89.5±1.9 a	27.8±0.5 a
L	*	ns	**	ns	ns
S	**	ns	**	ns	*
L×S	ns	ns	ns	ns	ns

1)同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平,*和**分别表示5%和1%水平下的显著性,ns表示未达到显著水平,下同。Different letters in the table indicate significant difference at 5%,* and ** indicate significance at 5% and 1%,ns indicates non-significance,the same below.

与低秸秆还田量处理相比,穗粒数平均提高了 6.1%。与 L_0+S_0 处理相比,高秸秆还田量处理下水稻的千粒重平均显著提高了 0.9 g,增幅为 3.3%,而有效穗数却降低了 $19.4 \times 10^4/\text{hm}^2$,降幅达 9.8%。

方差分析表明,石灰对水稻产量和穗粒数的增加影响显著,秸秆对产量、穗粒数及千粒重的增加均有显著影响,其中石灰和秸秆对穗粒数的影响以及秸秆对产量的影响均达到极显著水平,但石灰与秸秆的交互作用并不显著(表 1)。

2.2 石灰与秸秆配施对水稻养分吸收的影响

由图 1 可看出,石灰和秸秆配施均显著提高了水稻氮、磷、钾养分的吸收量,与 L_0+S_0 处理相比, N、 P_2O_5 、 K_2O 的吸收量分别增加 30.5、7.3 和 44.8 kg/hm^2 ,增幅分别为 47.9%、50.3%和 48.2%。石灰和秸秆配施处理间在 N、 P_2O_5 、 K_2O 吸收量方面均无显著性差异。

表 2 石灰与秸秆配施对土壤还原性物质的影响

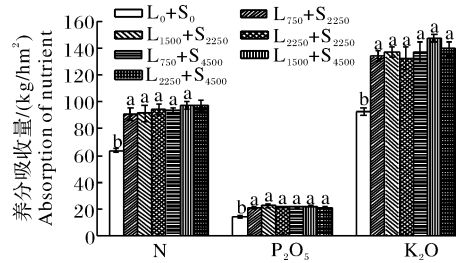
Table 2 Effect of combined application of lime and straw on soil reducing substances

处理 Treatment	土壤还原性物质总量/(cmol/kg) Total soil reducing substances	土壤活性还原性物质总量/(cmol/kg) Total soil active reducing substances	土壤 Fe^{2+} 含量/(mg/kg) Soil Fe^{2+} content
L_0+S_0	14.0 ± 0.6 a	8.7 ± 0.4 a	$2\ 651 \pm 104$ a
$L_{750}+S_{2250}$	14.3 ± 0.8 a	4.3 ± 0.1 b	$1\ 587 \pm 81$ b
$L_{1500}+S_{2250}$	14.1 ± 0.5 a	5.0 ± 0.2 b	$1\ 531 \pm 67$ b
$L_{2250}+S_{2250}$	14.1 ± 0.2 a	4.4 ± 0.3 b	$1\ 512 \pm 202$ b
$L_{750}+S_{4500}$	14.4 ± 0.4 a	4.3 ± 0.2 b	$1\ 680 \pm 162$ b
$L_{1500}+S_{4500}$	14.5 ± 0.4 a	4.6 ± 0.2 b	$1\ 755 \pm 290$ b
$L_{2250}+S_{4500}$	14.5 ± 0.5 a	4.3 ± 0.2 b	$1\ 792 \pm 253$ b
L	ns	ns	ns
S	ns	ns	ns
L×S	ns	ns	ns

4.5 cmol/kg ,降幅达 48.3%。石灰与秸秆配施也显著降低了土壤 Fe^{2+} 含量,与 L_0+S_0 处理相比平均显著降低 1 010 mg/kg ,降幅达 38.1%。石灰和秸秆配施处理间对土壤活性还原性物质总量和土壤 Fe^{2+} 含量均无显著性影响。

2.4 石灰与秸秆配施对土壤氧化还原电位的影响

由图 2 可看出,石灰与秸秆配施显著提高了土壤的氧化还原电位(Eh)。与 L_0+S_0 处理相比,石灰与秸秆配施将土壤 Eh 平均提高了 64.9 mV,增幅达 48.7%。与 L_0+S_0 处理相比,2 个秸秆用量水平(S_{2250} 和 S_{4500})分别将土壤 Eh 平均提高了 51.0、78.7 mV,增幅分别为 38.3%和 59.0%。3 个石灰用量水平(L_{750} 、 L_{1500} 和 L_{2250})分别将土壤 Eh 提高了 64.2、63.7 和 66.7 mV,增幅分别为 48.2%、47.8%和 50.0%。比较发现,与增加石灰用量相比,增加秸



图中不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平,下同。Different letters in the figure indicate significant difference at 5%, the same below.

图 1 石灰与秸秆配施对水稻养分吸收量的影响

Fig.1 Effect of combined application of lime and straw on absorption of nutrient

2.3 石灰与秸秆配施对土壤还原性物质的影响

由表 2 可看出,石灰和秸秆配施对土壤还原性物质总量没有显著性影响,但显著降低了土壤活性还原性物质总量,与 L_0+S_0 处理相比平均显著降低

1 010 mg/kg ,降幅达 38.1%。石灰和秸秆配施处理间对土壤活性还原性物质总量和土壤 Fe^{2+} 含量均无显著性影响。

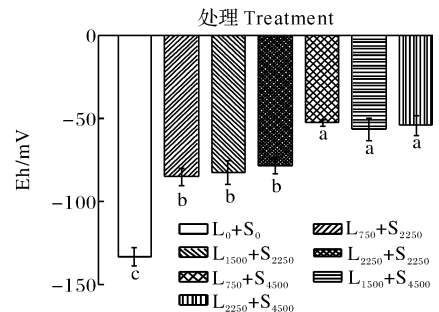


图 2 石灰与秸秆配施对土壤氧化还原电位的影响

Fig.2 Effect of combined application of lime and straw on soil Eh

3 讨论

氧化还原状况是水稻土的重要物理化学性状之一。由于长期处于淹水状态,冷浸田土壤中水多气少,气体交换性差,Fe³⁺等氧化态物质作为电子受体被还原,有毒物质和还原性物质大量积累。水稻极易受到Fe²⁺等还原性物质的毒害。蔡妙珍等^[16]研究认为,Fe²⁺是限制水稻正常生长的重要因子。陈正刚等^[17]研究发现,土壤Fe²⁺浓度过高会降低水稻根系的活力,加速水稻根系的老化,导致水稻出现早衰现象。试验中测定的土壤Fe²⁺含量均高于全国冷浸田Fe²⁺平均值(1 400 mg/kg),远高于水稻的临界浓度,是影响冷浸田水稻生长,造成冷浸田低产的重要因素。本研究表明,石灰和秸秆配施对冷浸田土壤还原性物质总量没有显著性影响,但显著降低了土壤活性还原性物质总量和土壤Fe²⁺含量,而石灰与秸秆配施各处理间并无显著性差异。分析认为,冷浸田长期处于淹水还原状态,还原性物质一直在积累,土壤中还原性物质总量处于较高水平,加入石灰和秸秆在短时间内不能对土壤中还原性物质总量产生显著的影响。Eh是反应土壤中氧化还原强度的指标,但目前关于冷浸田土壤氧化还原电位的研究报道相对较少^[3]。土壤Eh一般处于-450~720 mV之间^[18],本试验原位测定的冷浸田土壤氧化还原电位介于-133.3~-52.8 mV之间,属于强还原状态。本研究表明,石灰和秸秆配施能显著提高冷浸田土壤的Eh,且秸秆用量的增加显著提高了土壤Eh,而在同一秸秆用量条件下,增施石灰对土壤Eh并无显著性影响。

由于冷浸田长期淹水,土壤处于强还原状态且温度较低,土壤微生物活性较低,速效养分释放缓慢,前期秧苗返青较迟,分蘖少且小,生长缓慢甚至坐蔸不长,更有严重者出现植株根系变黑、腐烂等现象^[19],而生育后期易赤枯早衰,从而导致冷浸田水稻产量较低。结合本试验点土壤基本理化性质可知,该地土壤有效磷处于较低水平,速效钾更是处于极度缺乏水平。蔡东等^[20]研究表明,施用石灰可有效地抵抗土壤酸化,促进有机质的矿化,从而增加土壤中速效养分的含量。张效朴等^[21]研究发现,在较低石灰用量或连续施用石灰的初期,由于Ca²⁺对土壤的亲合力比K⁺强,会提高土壤溶液中的K⁺浓度。余延丰等^[22]研究表明,秸秆还田能明显改善土壤理化性状,提高土壤有机质、有效磷和速效钾含

量,具有较好的增产作用。张庚^[23]研究表明,施用石灰后Ca²⁺能与Fe²⁺竞争根系上的结合位点,从而减少水稻对Fe²⁺的吸收,起到避免毒害的目的。本研究也表明,石灰与秸秆配施,显著促进了水稻对氮磷钾养分的吸收,增产效果显著,并且随着石灰和秸秆用量的增加,产量有递增的趋势。在产量构成因子方面,石灰与秸秆配施均明显提高了穗粒数、结实率和千粒重,而降低了有效穗数。李新举等^[24]研究认为,秸秆还田前期分解速率较快,后期较慢,秸秆腐解需要消耗土壤中大量的氮素。如果在水稻插秧时进行秸秆还田,微生物与水稻竞争土壤中原来的有效氮,造成土壤氮素缺乏,进而导致水稻分蘖减少,这可能是冷浸田水稻有效穗数随着秸秆用量的增加呈明显下降趋势的原因,也是随着秸秆用量的增加,产量增加不显著的原因。

石灰和秸秆配施显著提高了冷浸田水稻的产量,促进了水稻对氮磷钾养分的吸收,显著降低了土壤活性还原性物质总量和土壤Fe²⁺含量,提高了土壤Eh。该试验条件下,石灰和秸秆的适用量分别为1 500~2 250 kg/hm²和4 500 kg/hm²。本研究中虽然石灰和秸秆配施在改良冷浸田方面取得了较好的效果,但生产应用中仍需注意许多问题。首先,要因地制宜,确定适宜的石灰和秸秆用量。其次,要尽量提高石灰和秸秆配施的效果,秸秆尽量切碎,与石灰撒施均匀后进行翻耕。最后要加强病虫害的预防,秸秆还田后会加剧土壤病虫害的发生,虽然施用石灰会起到一定的抑制作用,但仍需注意。

参 考 文 献

- [1] 赵佳,姚家玲.水稻生殖发育进程与小穗外部形态的对应关系[J].华中农业大学学报,2014,33(3):1-6.
- [2] 焦加国,张惠娟,贺大连.我国冷浸田的特性及改良措施[J].安徽农业科学,2012,40(7):4247-4248.
- [3] 柴娟娟,廖敏,徐培智,等.我国主要低产水稻冷浸田养分障碍因子特征分析[J].水土保持学报,2012,26(2):284-288.
- [4] 李庆奎.中国水稻土[M].北京:科学出版社,1992.
- [5] 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.
- [6] 徐培智,解开治,刘光荣,等.冷浸田开沟排水技术规程[J].广东农业科学,2013,39(21):91-92.
- [7] 陈士平,戴红霞.暗管排水改造山区冷浸田的效果[J].浙江农业科学,2000(2):11-12.
- [8] 徐祥玉,张志毅,王娟,等.起垄和施肥对冷浸田土壤氧化还原

- 状况的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(6):666-673.
- [9] 胡德春,李贤胜,尚健,等.不同改良剂对棕红壤酸性的改良效果[J].土壤,2006,38(2):206-209.
- [10] CAIRES E F, CORREA J C L, CHURKA S, et al. Surface application of lime ameliorates subsoil acidity and improves root growth and yield of wheat in an acid soil under no-till system [J]. *Scientia Agricola*, 2006, 63(5): 502-509.
- [11] BROWN T T, KOENIG R T, HUGGINS D R, et al. Lime effects on soil acidity, crop yield, and aluminum chemistry in direct-seeded cropping systems [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(3): 634-640.
- [12] 余冬立,王凯荣,谢小立,等.稻草还田的土壤肥力与产量效应研究[J].中国生态农业学报,2008,16(1):100-104.
- [13] 曾洪玉,唐宝国,蔡建华,等.秸秆还田对耕地质量及稻麦产量的影响[J].江苏农业科学,2011,39(4):499-501.
- [14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [15] 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.
- [16] 蔡妙珍,林咸永,罗安程,等.过量 Fe^{2+} 对水稻生长和某些生理性状的影响[J].植物营养与肥料学报,2002,8(1):96-99.
- [17] 陈正刚,徐昌旭,朱青,等.不同类型冷浸田 Fe^{2+} 对水稻生理酶活性的影响[J].中国农学通报,2014,30(12):63-70.
- [18] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000:187.
- [19] DICKOPP J, KAZDA M, CIZKOVA H. Differences in rhizome aeration of *Phragmites australis* in a constructed wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(11): 1647-1653.
- [20] 蔡东,肖文芳,李国怀.施用石灰改良酸性土壤的研究进展[J].中国农学通报,2010,26(9):206-213.
- [21] 张效朴,郑根宝.连续施石灰对作物生长及其养分吸收的影响[J].土壤学报,1987,24(4):243-251.
- [22] 余延丰,熊桂云,张继铭,等.秸秆还田对作物产量和土壤肥力的影响[J].湖北农业科学,2008,47(2):169-171.
- [23] 张庚.还原性铁、锰对水稻生长影响及其在冷浸田中毒害的消减措施研究[D].武汉:华中农业大学图书馆,2013.
- [24] 李新举,张志国,李贻学.土壤深度对还田秸秆腐解速度的影响[J].土壤学报,2001,38(1):135-138.

Effects of combined application of lime and straw on rice yield and soil properties in cold waterlogged paddy field

HOU Wen-feng¹ LI Xiao-kun¹ WANG Si-chao² WANG Jin-ping²
XU Xiang-yu³ XIONG You-sheng³ CONG Ri-huan¹

1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University / Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China;

2. College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

3. Institute of Soil and Fertilizer and Plant Protection, Hubei Academy of Agricultural Science, Wuhan 430064, China

Abstract The effects of combined application of lime and straw on rice yield and soil properties in the typical cold waterlogged paddy field in Hubei Province were studied to provide reference for decreasing the reducing substances in cold waterlogged paddy field. The results showed that compared with the no lime and straw treatment ($L_0 + S_0$), combined application of lime and straw significantly increased the yield, grain number of per spike, seed setting rate and 1 000-grain weight, with the increase rates of 46.6%, 9.4%, 6.7% and 2.6%. The increase rates of the absorption of N, P_2O_5 and K_2O were 47.9%, 50.3%, and 48.2%. Combined application of lime and straw decreased the amount of soil active reducing substances and ferrous ion content, with the decreased rate of 48.3% and 38.1%. The soil Eh was increased by 48.7%. Combined application of lime and straw had a good effect on decreasing the reducing substances and improving cold waterlogged paddy field. The combined application of lime 1 500-2 250 kg/hm^2 and straw 4 500 kg/hm^2 was ideal.

Key words cold waterlogged paddy field; lime; straw; yield; reducing substances; soil Eh

(责任编辑:陆文昌)