

土壤改良剂对冷浸田土壤特性和水稻群体质量的影响^{*}

董稳军^{1,2} 徐培智^{1,2**} 张仁陟¹ 黄旭² 郑华平^{1,3} 解开治²

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院 兰州 730070; 2. 广东省农业科学院农业资源与环境研究所 广州 510640;
3. 甘肃省科学技术厅 兰州 730030)

摘 要 以南方典型冷浸田为研究对象,在明沟排水的基础上,通过田间定位试验,以不施土壤改良剂为对照,研究了施用不同土壤改良剂(自研的脱硫灰改良剂、生物活性炭,市售的土壤改良剂石灰、硅钙肥、腐植酸)对冷浸田氧化还原电位、土壤呼吸强度、土壤微生物数量、水稻群体构建及产量构成因素的影响。结果表明,施用改良剂能够改善土壤理化性状,提升土壤速效养分和 pH,但除脱硫灰处理外,其他改良剂处理对土壤 Eh 未产生显著影响。施用不同土壤改良剂在水稻各生育期均能有效增强土壤微生物呼吸强度和放线菌数量,并且放线菌数量达到差异性显著水平($P < 0.05$),生物活性炭处理下土壤呼吸强度和放线菌数量分别较对照增加 67.6%和 127.6%。各土壤改良剂处理与 CK 相比较均有助于提高叶片 SPAD、茎蘖数、水稻干物质积累量、成穗数、穗粒数、产量结实率和根系伤流速率。其中以脱硫灰和生物活性炭处理改良效果最佳,抽穗后 29 d 时,根系伤流速率较 CK 分别提高 45.4%和 39.1%,叶片 SPAD 分别增加 27.4%和 22.5%;成熟期水稻成穗数较对照提高 12.1%和 10.7%,干物质积累量增加 68.8%和 50.5%,产量分别增加 12.8%和 10.3%。综上所述,土壤改良剂可有效改善冷浸田土壤特性及水稻群体质量,脱硫灰和生物活性炭处理的改良效果最明显,增产幅度最大。

关键词 土壤改良剂 冷浸田 水稻群体构建 土壤肥力 土壤呼吸强度 土壤微生物 水稻产量

中图分类号: S156.8 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2013)07-0810-07

Effects of soil amendments on soil properties and population quality of rice in cold waterlogged paddy field

DONG Wen-Jun^{1,2}, XU Pei-Zhi^{1,2}, ZHANG Ren-Zhi¹, HUANG Xu², ZHENG Hua-Ping^{1,3}, XIE Kai-Zhi²

(1. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. Department of Science and Technology of Gansu Province, Lanzhou 730030, China)

Abstract Long-term waterlogging with large amounts of reducing toxic substances of cold waterlogged soils and nutrient unavailability has often resulted in deteriorated rice growth, reduced rice resistance to adversities, inhibited root growth/activity and reduced rice yield. To explore feasible means of suppressing the negative effects of cold waterlogged paddy soils, a location experiment consisting an open-ditch drainage was conducted to study the effects of different soil amendments (self-developed desulphurization ash, biomass charcoal; and marketed lime, silicon-calcium fertilizer and humic acid) on soil Eh and respiration intensity, microbial quantity and population structure, and rice yield and yield components. The results showed that different soil amendments enhanced soil available nutrients contents and pH, while they did not significantly affected Eh except desulphurization ash treatment. All soil amendments increased respiration intensity and soil microbes at different growth stages of rice, with a significant ($P < 0.05$) increase in actinomycete population over CK. The respiration intensity and actinomycete population under biomass charcoal treatment were increased by 67.6% and 127.6% respectively. All soil amendments increased rice leaf SPAD, tiller number, dry matter accumulation, panicle number, grain number per panicle, yield, and root bleeding rate. Desulfurization ash and biomass charcoal treatments presented most obvious effects. At 29 days after heading, the rate of root bleeding under desulfurization

* 公益性行业(农业)科研专项(201003059)和广东省现代农业产业技术体系专项资助

** 通讯作者: 徐培智(1963—), 男, 研究员, 主要从事植物营养与新型肥料研究。E-mail: pzxu007@163.com

董稳军(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事农业生态方面的研究。E-mail: dongwenjun706@163.com

收稿日期: 2012-12-25 接受日期: 2013-03-04

ash and biomass charcoal treatments increased by 45.4% and 39.1%, respectively. Also leaf SPAD at 29 days after heading was 27.4% and 22.5% higher under desulfurization ash and biomass charcoal treatments over that under CK respectively. Dry matter accumulation increased by 68.5% and 50.5%, panicle number by 12.1% and 10.7%, and yield by 12.8% and 10.3% at maturity stage under desulfurization ash and biomass charcoal treatments over those under CK, respectively. In conclusion, different soil amendments differently improved soil properties and rice quality. Desulfurization ash and biomass charcoal amendments had the best effects.

Key words Soil amendment, Cold waterlogged paddy field, Rice population, Soil fertility, Soil respiration intensity, Soil microbe, Rice yield

(Received Dec. 25, 2012; accepted Mar. 4, 2013)

低产水稻田是指具有不良土壤物理性状或含有害化学物质以及其他障碍的水稻田。冷浸田是主要的低产稻田类型之一, 主要分布在我国南方各省山区谷地、丘陵低洼地段。据初步统计, 我国约有冷浸田 346 万 hm^2 , 占稻田面积的 15.07%, 占低产稻田面积的 44.2%, 已成为粮食平衡增产的主要障碍^[1-2]。据广东省第 2 次土壤普查的统计表明^[3], 广东省冷浸田(潜育型水稻土)总面积 18 万 hm^2 。该土类的主要特征是土壤发生层内长期遭到地下水浸渍, 土壤长期处于还原性条件, 致使存在大量还原态铁和硫, 养分有效性低且比例失衡, 速效磷、钾极缺; 微生物数量少, 有机质积累慢; 胁迫作物根系生长, 易造成水稻僵苗、根系变黑、腐烂等问题, 导致作物产量降低^[4-6]。据报道^[7], 冷浸田的水稻产量只有 3 000~4 500 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 而正常水稻田产量已经达到 8 250 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上, 这意味着冷浸田蕴藏着巨大的增产潜力。因此, 一直以来改良冷浸田、提升生产力倍受关注。排除水渍是冷浸田改良的基础措施, 且效果显著^[8-10]。但对于后续冷浸田养分活化、提升土壤肥力, 进一步发挥冷浸田生产潜力的措施则少见报道。因此若有后续配套的针对性改良措施, 把冷浸田改造成中、高产田, 提升其生产力, 不仅能大幅提高广东省水稻产量, 同时对全国水稻产量也会产生巨大影响。

据报道, 土壤改良剂能有效改善土壤理化性状和土壤养分状况, 改善作物生长环境, 利于作物生长, 提高粮食产量^[11-13]。为此, 在采取明沟排水措施的基础上, 针对冷浸田土壤偏酸性, 土壤矿质元素及速效磷、钾缺乏, 以及微生物活性弱的问题, 本研

究以石灰、脱硫灰、硅钙肥、腐植酸和微生物活性炭作为土壤改良剂, 充分发挥石灰和脱硫灰呈碱性, 硅钙肥、腐植酸富含钙、镁、磷和钾, 生物活性炭富含有机质和有益微生物, 具有综合改土的作用, 配合缓释肥, 探讨不同改良剂组合对水稻根际微生物数量、土壤基础呼吸、水稻群体发展和土壤理化性质的影响, 旨在为筛选适合冷浸田的土壤改良剂, 改良和培肥冷浸田土壤, 提高水稻的产量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

于 2011 年在广东省惠州市惠阳区良井镇前锋村 (22°50'09.30"N, 114°36'03.55"E) 进行定位试验, 试验地点属冷浸田(湖洋田)。供试土壤的基本理化性质为有机质 30.4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 132.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷 10.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 34.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、pH 5.1, 质地为黏土。供试水稻品种“黄华占”, 具有抗病、抗倒伏、穗大粒重等特点。处理中所用肥料为新农科牌缓释肥(N : P_2O_5 : K_2O =23 : 7 : 20); 市售改良剂为石灰、硅钙肥、腐植酸, 自研改良剂为脱硫灰(应用工业废弃物脱硫煤粉灰与钾长石制成的碱性物质)改良剂和生物活性炭(应用水稻稻壳加入有益生物菌剂高温堆置而成)。各改良剂的理化性质如表 1。

试验设 6 个处理, 每处理设 3 次重复: CK (对照, 不施改良剂)、T1(改良剂为石灰)、T2(改良剂为脱硫灰)、T3(改良剂为硅钙肥)、T4(改良剂为腐植酸)、T5(改良剂为生物活性炭), 不同土壤改良剂用量均为 450 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 所有试验处理均基施缓释肥 652.5 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

表 1 供试土壤改良剂的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil amendments used in the experiment

改良剂 Amendment	处理代码 Treatment code	pH	N ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	P ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	K ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	CaO ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	MgO ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
石灰 Lime	T1	7.8	0	0	0	436.5	11.05
脱硫灰 Desulphurization ash amendment	T2	8.5	1.08	1.43	1.10	432.7	14.04
硅钙肥 Silico-calcium fertilizer	T3	7.2	0	0	40.10	184.1	8.84
腐植酸 Humic acid	T4	6.7	6.75	0.12	1.00	20.4	1.41
生物活性炭 Biomass charcoal	T5	7.6	3.25	2.09	3.69	20.9	5.84

小区面积 $6\text{ m}\times 5.5\text{ m}$, 随机区组排列。试验前先整地, 按试验设计划分各小区, 每个小区四周起垄, 并覆以塑料膜, 防止肥水窜流, 同时四周留出排水沟和保护行。所有处理缓释肥和改良剂均在移栽前 1 d 一次性施入, 移栽行株距 $20.0\text{ cm}\times 18.0\text{ cm}$, 每公顷 27.75 万穴, 田间管理按当地习惯。按南方双季稻种植制度耕作, 进行了 2011 年早稻、晚稻和 2012 年早稻共 3 季试验。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 群体生长动态和测产

每小区定点 25 穴, 自水稻移栽至抽穗期每隔 10 d 观察分蘖数; 于有效分蘖临界叶龄期(11 叶期)、拔节期、抽穗期和成熟期, 取 4 穴(每穴的茎蘖数为当时各小区每穴平均茎蘖数), 测定干物重; 成熟期考察穗粒数、结实率和千粒重, 各小区去边行实收计产。

1.2.2 叶绿素含量

水稻拔节后 13 d 和 29 d 用日本产 SPAD 502 叶绿素仪测定剑叶叶绿素含量, 以 SPAD 读数表示。各小区测 30 片叶, 每片叶分别测定上部、中部和下部, 取平均值。

1.2.3 根系伤流量

水稻抽穗后 13 d 和 29 d 各小区选取 5 穴, 于 18:00 在离地面 5 cm 处剪去地上部分植株, 剪口套上预先称重带有脱脂棉的自封塑料袋, 套袋后用绳扎紧袋口, 于第 2 d 8:00 取回自封袋称重, 前后自封袋重量之差即为根系伤流量。

1.2.4 土壤肥力

于水稻有效分蘖临界叶龄期、拔节期、抽穗期和成熟期分别取耕层(0~10 cm)土壤(每个小区取 3 个点, 自然风干后混匀测定), 测定依据鲍士旦^[14]土壤农化分析。

1.2.5 土壤 pH 和氧化还原电位

于水稻移栽后 9 d(返青期)、18 d(分蘖初期)、25 d(分蘖中期)、37 d(分蘖盛期)测定各小区耕层土壤 pH 和

氧化还原电位(Eh)。pH 用上海仪达有限公司的 PHS 3 型酸度计测定, Eh 使用北京中西远大仪器仪表公司的 CN61M/FJA3 全自动氧化还原电位去极化法测定仪测定。

1.2.6 土壤微生物数量

于水稻返青期、有效分蘖临界叶龄期(11 叶期)、拔节期、抽穗期和成熟期分别取各小区土壤耕层(0~10 cm)土壤鲜样, 每小区取 3 个点, 装入保鲜袋, 置于冰盒中带回实验室, 混匀后立刻测定。土壤可培养微生物采用梯度稀释法制备土壤悬液, 采用涂抹平板计数法^[15]测定细菌、真菌、放线菌的数量, 其中培养基分别为牛肉膏蛋白胨培养基、马丁氏培养基和高氏一号培养基。

1.2.7 土壤基础呼吸

于水稻返青期、有效分蘖临界叶龄期(11 叶期)、拔节期、抽穗期和成熟期各小区 3 点法取水稻耕层(0~10 cm)土壤于冰盒带回, 鲜土混匀后采用室内密闭培养法^[14]测定。

1.3 数据分析

用 Excel 和 SPSS 16.0 进行数据分析, 用 Duncan 法进行多重比较。3 季试验数据趋势相同, 故本文只列出 2012 年早稻试验数据。

2 结果与分析

2.1 土壤改良剂对水稻产量及土壤肥力的影响

从表 2 可以看出, 各土壤改良剂处理与 CK 相比较均有助于提高水稻成穗数、穗粒数和结实率。穗粒数和结实率各土壤改良剂处理间差异不显著, 其中脱硫灰处理成穗数和产量最高, 较 CK 增加 11.7% 和 12.4%; 其次为生物活性炭和硅钙肥处理, 成穗数分别较 CK 增加 10.7% 和 8.4%, 产量分别提高 10.0% 和 6.6%。相关分析表明: 产量与成穗数、结实率和千粒重的相关系数(r)分别为 0.965^{**}、0.868^{*}和 0.531。说明土壤改良剂能够通过影响水稻成穗数和

表 2 土壤改良剂对水稻产量和产量构成因素的影响

Table 2 Effects of different soil amendments treatments on yield and yield components of rice

处理 Treatment	成穗数 Panicule number ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	每穗粒数 Grain number per spike	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Grain yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
CK	251.1 \pm 12.6c	132.3 \pm 17.6b	82.1 \pm 2.3b	21.6 \pm 0.9a	6 564.9 \pm 152.1d
T1	259.1 \pm 12.3c	139.6 \pm 15.3a	82.2 \pm 3.6b	21.4 \pm 1.2a	6 678.0 \pm 130.0cd
T2	280.5 \pm 14.6a	143.0 \pm 16.9a	84.3 \pm 3.5a	21.7 \pm 0.6a	7 378.5 \pm 169.8a
T3	272.1 \pm 10.3a	140.0 \pm 14.1a	84.1 \pm 2.8a	21.3 \pm 1.1a	6 999.0 \pm 203.1b
T4	265.7 \pm 14.5b	139.8 \pm 16.8a	83.0 \pm 3.6a	21.6 \pm 0.9a	6 801.0 \pm 145.7bc
T5	277.9 \pm 13.7a	140.3 \pm 15.9a	85.4 \pm 1.9a	21.5 \pm 1.3a	7 221.0 \pm 153.5a

同列数据后不同小写字母表示 Duncan 检验在 $P=0.05$ 水平上差异显著, 下同。Different small letters in the same column show significant difference at 0.05 level according to Duncan test. The same below.

结实率，最终提高水稻产量。

不同土壤改良剂处理下，水稻抽穗期土壤肥力得到一定程度的提升，且土壤速效养分受到的影响最为明显(表 3)。脱硫灰和生物活性炭处理能显著提高土壤速效磷含量，分别较对照提高 68.6%和 65.5%。说明施用改良剂能够改善土壤理化性状，培肥土壤。

表 3 土壤改良剂对水稻抽穗期土壤肥力的影响
Table 3 Effects of different soil amendments treatments on soil fertility at rice heading stage

处理 Treatment	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available N (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)
CK	35.70±1.2c	157±9.5d	22.3±1.7e	96.6±4.1d
T1	35.75±1.1c	166±8.6c	33.2±1.2d	103.5±3.4c
T2	37.53±0.9a	191±14.2a	37.6±1.3a	112.6±3.7a
T3	36.71±0.8b	177±8.6b	35.1±0.9b	107.9±4.5b
T4	36.63±1.3b	168±4.3bc	34.5±0.8c	107.4±2.6b
T5	37.88±0.9a	175±6.5b	36.9±1.3a	109.3±3.9b

2.2 土壤改良剂对水稻群体发展的影响

茎蘖数是水稻群体发展状况的直接指标。图 1 表明，土壤改良剂处理在水稻生育前期茎蘖数均较 CK 有所提高，在移栽后 30 d 茎蘖数达到最高值，从 30 d 开始，茎蘖数逐渐降低，至 50 d 左右基本趋于稳定。与 CK 相比较，生育后期各土壤改良剂处理的茎蘖数明显提高，其中脱硫灰和生物活性炭处理下茎蘖数提升效果强于其他改良剂处理。

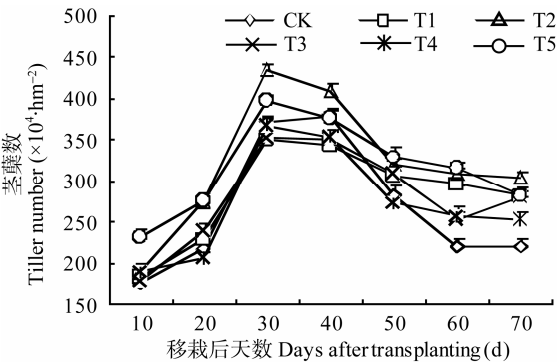


图 1 不同土壤改良剂处理的水稻茎蘖消长动态
Fig. 1 Change of tiller number of rice under different soil amendments treatments

水稻干物质积累是形成产量的基础。如表 4 所示，随着生育期推进，干物质积累量迅速增加。不同生育期干物质积累均以 CK 最低。在有效分蘖临界期各土壤改良剂处理间差异不明显；拔节期和抽穗期除 T1 外所有处理及成熟期各土壤改良剂处理的干物质积累量显著高于 CK，其中脱硫灰和生物活性炭处理分别较 CK 处理提高 28.6%、78.6%、68.8%和 22.9%、45.7%、50.5%。硅钙肥处理成熟期积累量较 CK 提高 37.6%。相关分析表明，抽穗期干物质积累量与土壤碱解氮、有效磷、速效钾呈显著正相关(r 分别为 0.819*、0.883*和 0.921**)。说明施用土壤改良剂可通过促进土壤养分向有效态转化，有利

于水稻群体发展，对生育后期水稻干物质积累量影响较大。

表 4 土壤改良剂对水稻不同生育期干物质积累量的影响
Table 4 Effects of different soil amendments treatments on dry matter accumulation at different growth stages of rice

处理 Treatment	t·hm ⁻²			
	有效分蘖临界 叶龄期 Pt	拔节期 J	抽穗期 H	成熟期 M
CK	1.2±0.16b	3.5±0.98c	7.0±1.12d	9.3±1.63d
T1	1.3±0.12a	3.8±0.85bc	8.1±1.32cd	10.8±1.87c
T2	1.5±0.09a	4.5±0.78a	12.5±1.97a	15.7±2.36a
T3	1.4±0.15a	4.0±0.92ab	9.4±1.26b	12.8±2.03b
T4	1.3±0.23a	4.0±1.03ab	9.3±1.46b	12.4±1.98b
T5	1.5±0.18a	4.3±0.67a	10.2±1.03b	14.0±2.45a

Pt: 有效分蘖临界叶龄期 Critical productive tillering stage; J: 拔节期 Jointing stage; H: 抽穗期 Heading stage; M: 成熟期 Maturing stage. 图 4 和表 5 同 The same as Fig. 4 and Table 5.

2.3 土壤改良剂对水稻群体衰老的影响

水稻抽穗后随时间的增加根系伤流速率整体明显有所下降，但土壤改良剂处理的根系伤流速率较 CK 有明显提高，抽穗后 13 d 脱硫灰处理较 CK 处理提高 70.9%；抽穗后 29 d 脱硫灰和生物活性炭处理较 CK 提高 45.4%和 39.1%，其他改良剂处理间差异不显著(图 2A)。叶片 SPAD 值变化趋势和伤流速率表现一致，抽穗后 13 d 和 29 d 时以脱硫灰和生物活性炭处理的值最高，较 CK 分别提高 15.0%、7.1%和 27.4%、22.5%(图 2B)。这表明改良剂的施用在一定程度上延缓了水稻生育后期群体的衰老，有利于水稻有效穗的形成。

2.4 土壤改良剂对土壤 pH 和氧化还原电位的影响

土壤酸碱度对土壤中养分存在的形态和有效性、理化性质以及微生物活动均有重要影响^[16]。冷浸田土壤偏强酸性，微生物活性低，不利于有效养分的转化和利用。图 3A 所示，脱硫灰和石灰处理能

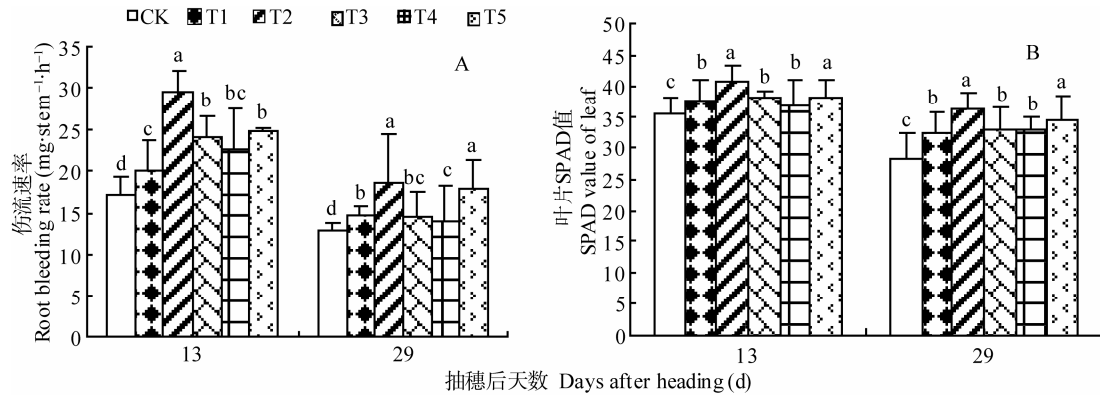


图 2 土壤改良剂对水稻抽穗后根系伤流速率(A)和叶片 SPAD 值(B)的影响

Fig. 2 Effects of different soil amendments treatments on root bleeding rate (A) and SPAD value (B) of rice leaves after heading

够中和土壤酸性, 明显提升土壤 pH, 移栽后 9 d 较 CK 分别提高 0.13 和 0.12 个单位, 并且随水稻移栽后时间的增加波动较小。而 CK 处理下土壤 pH 波动较大, 不利于土壤环境的稳定构建。同时腐植酸和生物活性炭处理在移栽后 9 d 土壤 pH 低于 CK, 可能与施用刚开始大量分解产生有机酸有关, 但随时间推移 pH 逐渐升高并且均高于 CK。

冷浸田由于长期渍水, 土壤通透性差, 氧化还原电位强。由图 3B 可以看出, 水稻移栽后 18 d 内各

处理土壤均处于强还原状态, 一方面是由于移栽期水稻处在淹水状态下, 土壤透气性差; 另一方面此时土壤改良剂和肥料大量分解, 微生物活动强烈, 耗氧较多, 还原态物质浓度相对增加, 使得 Eh 值降低; 腐植酸和生物活性炭自身含有一定量的有机物质, 微生物分解时耗氧更多, 所以移栽后 9 d 时, 两个处理的 Eh 值较 CK 降低 6.8%和 31.0%。脱硫灰处理 Eh 提高 20.8%。但从总体来看, 除脱硫灰外, 其他改良剂处理对土壤 Eh 未产生显著影响。

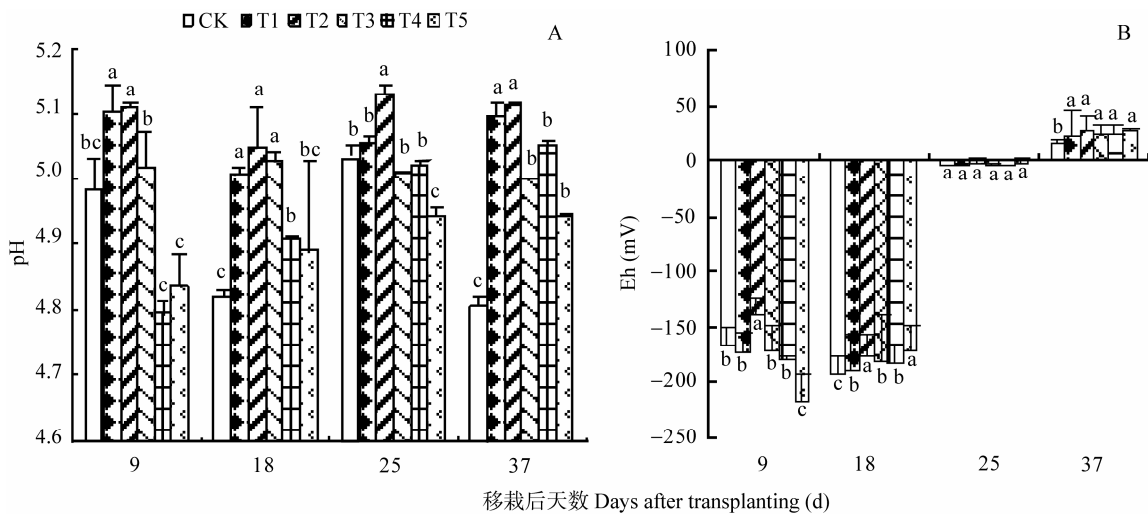


图 3 土壤改良剂对土壤 pH(A)和氧化还原电位(Eh,B)的影响

Fig. 3 Effects of different soil amendments treatments on pH (A) and Eh (B) of soil

2.5 土壤改良剂对土壤呼吸强度及微生物数量的影响

由图 4 可知, 土壤呼吸强度随着水稻生育期的推进逐渐降低, 除石灰处理外, 不同生育期各土壤改良剂处理下土壤呼吸强度均高于对照, 其中生物活性炭处理在各生育期表现最为显著, 移栽期和拔节期较 CK 增加 67.6%和 68.2%。拔节期出现峰值可能与排水晒田有关。

土壤微生物数量整体的变化趋势与土壤呼吸强

度相似(表 5), 从水稻移栽期后明显下降, 分蘖期至拔节期有所升高, 之后又逐渐降低。总体来看, 除石灰处理外, 其他各土壤改良剂处理在拔节后期有助于增加土壤微生物数量。在水稻移栽期, 生物活性炭和腐植酸处理下土壤细菌和放线菌量显著高于其他各处理, 其中放线菌较 CK 分别增加 127.6%和 58.6%。其原因可能是: 一方面由于生物活性炭的施入能够增加土壤孔隙度, 同时自身携带大量有益微生物; 另一方面腐植酸和生物活性炭自身含有一定

量有机物质, 作为碳源刺激厌气性微生物的增加量大大抵消了好气性微生物的减少。由于石灰和脱硫灰处理在水稻生育前期对微生物有一定杀灭作用, 因此生育前期细菌和真菌数量分别较 CK 降低 96.4%、22.2%和 55.1%、17.5%。拔节后, 微生物数量又逐渐高于 CK。就放线菌而言, 整个生育期各改良剂处理基本多于 CK, 成熟期表现不明显。相关分析表明: 土壤细菌数量与有机质含量呈极显著正相关(r 为 0.863^{*}), 土壤真菌和放线菌数量与有机质含量之间存在一定相关性, 但并不显著。其他指标与土壤微生物数量间无显著相关关系。土壤 pH 与土壤微生物主要类群的数量无显著相关性, 说明尽管土

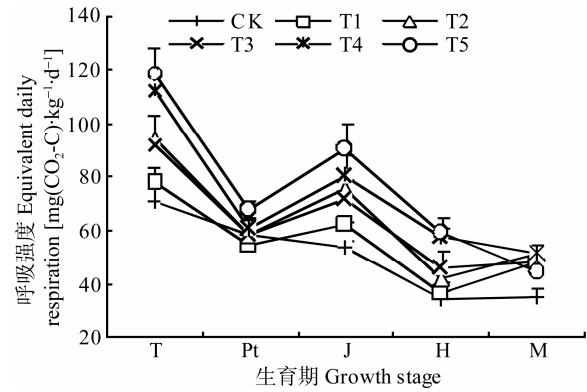


图 4 土壤改良剂对冷浸田土壤呼吸强度的影响
Fig. 4 Effects of different soil amendments treatments on equivalent daily respiration of soil

表 5 土壤改良剂对水稻不同生育期土壤微生物数量的影响
Table 5 Effects of different soil amendments treatments on number of soil microbe

处理 Treatment	细菌 Bacteria ($\times 10^5 \text{cfu} \cdot \text{g}^{-1}$)					放线菌 Actinomycetes ($\times 10^4 \text{cfu} \cdot \text{g}^{-1}$)					真菌 Fungi ($\times 10^3 \text{cfu} \cdot \text{g}^{-1}$)				
	T	Pt	J	H	M	T	Pt	J	H	M	T	Pt	J	H	M
CK	5.5 \pm 1.2c	1.0 \pm 0.1a	1.8 \pm 0.9c	1.5 \pm 0.4b	1.0 \pm 0.1d	11.6 \pm 0.8d	2.5 \pm 1.2c	0.8 \pm 0.1d	0.5 \pm 0.02d	0.4 \pm 0.06c	12.1 \pm 3.2a	2.7 \pm 0.9bc	4.3 \pm 1.7a	1.9 \pm 0.7e	0.3 \pm 0.06e
T1	2.8 \pm 0.9d	0.8 \pm 0.1b	0.9 \pm 0.1d	2.5 \pm 1.2a	1.6 \pm 0.5c	14.0 \pm 3.1c	2.1 \pm 0.5d	2.3 \pm 0.5ab	1.6 \pm 0.7a	0.7 \pm 0.01a	7.8 \pm 1.3e	2.3 \pm 0.5c	1.9 \pm 1.2c	5.8 \pm 1.6b	1.2 \pm 0.3d
T2	4.5 \pm 2.3c	1.5 \pm 0.2a	2.1 \pm 0.7bc	1.1 \pm 0.9c	1.0 \pm 0.1d	20.6 \pm 5.2b	2.7 \pm 0.9c	1.9 \pm 0.6b	1.8 \pm 0.5a	0.1 \pm 0.02d	10.3 \pm 0.9cd	1.0 \pm 0.1e	1.8 \pm 0.9c	7.9 \pm 1.2a	3.3 \pm 0.9a
T3	9.4 \pm 1.9b	1.1 \pm 0.1a	2.4 \pm 1.1b	1.4 \pm 0.3b	1.0 \pm 0.2d	15.7 \pm 1.6c	2.3 \pm 2.1cd	1.3 \pm 0.1c	0.8 \pm 0.1c	0.5 \pm 0.06b	9.4 \pm 1.5d	3.1 \pm 0.4a	4.7 \pm 1.2a	4.4 \pm 0.6c	2.1 \pm 0.7b
T4	28.2 \pm 6.4a	0.8 \pm 0.1b	3.5 \pm 1.6a	1.1 \pm 0.1c	2.9 \pm 0.9a	18.4 \pm 3.4b	3.6 \pm 1.9b	1.2 \pm 0.3c	1.4 \pm 0.3b	0.9 \pm 0.08a	13.4 \pm 2.1a	1.5 \pm 0.8d	3.4 \pm 0.8b	2.4 \pm 0.7e	1.8 \pm 1.0bc
T5	36.6 \pm 4.6a	0.7 \pm 0.1b	4.5 \pm 2.1a	2.1 \pm 1.2a	2.0 \pm 0.8bc	26.4 \pm 4.2a	4.2 \pm 1.8a	2.7 \pm 1.6a	1.2 \pm 0.1b	0.5 \pm 0.10b	11.0 \pm 3.2b	2.8 \pm 0.9ab	4.2 \pm 0.7a	3.1 \pm 0.8d	1.5 \pm 0.6c

T: 移栽期 transplanting stage.

壤酸碱度可以影响土壤微生态环境, 但不是土壤物质循环的决定性因素。而微生物群落结构和数量的变化与土壤有机质含量则紧密相关。

3 讨论与结论

土壤理化性状是土壤环境健康程度的直接评价指标, 直接影响水稻群体的生长发育和产量高低。本试验结果表明: 在经过 3 季施用 5 种土壤改良剂后, 冷浸田土壤速效养分缺乏, 微生物活性低, 土壤还原性和酸性强的问题得到明显改善, 尤其对土壤速效养分的提升更为明显。脱硫灰处理在土壤 pH、氧化还原电位、有效磷和速效钾方面改善效果明显, 其中土壤 pH 较 CK 增加 0.1 个单位、Eh 增加 20.8%、速效磷含量增加 68.6%; 石灰处理主要通过提高 pH 对土壤环境产生影响, 这一结果与解开治等^[17]在南方酸性高粱地改良试验中的结果相一致。陈进红等^[18]认为施用硅肥具有增加水稻干物质积累与籽粒产量的作用, 同时能促进水稻植株对氮、磷、钾养分的吸收与积累。本试验结果表明, 硅钙肥通过补充土壤所缺乏的硅和钙元素, 能够协调土壤养分供应, 延缓后期水稻衰老, 成熟期干物质累积量较 CK 增加 37.6%; 这一结果与全成哲等^[19]的研究结果相似。腐植酸通过影响土壤细菌及放线菌的数量, 对土壤环境产生影

响; 这与张宏伟等^[20]的研究结果有所不同, 其原因可能与所研究土壤自身的特征不同有关。在水稻抽穗期生物活性炭处理对土壤有机质、速效养分及微生物活性方面改善效果明显, 有机质较 CK 增加 6.1%、速效磷增加 65.5%、放线菌数量增加 140.0%; 土壤呼吸强度在移栽期和拔节期分别增加 67.6%和 68.2%。主要原因是施用生物活性炭增加了土壤通透性, 同时补充有机质, 从而可增加微生物活性并培肥土壤, 这一结果与张文玲等^[21]的研究结果相似。

施用土壤改良剂通过对土壤理化性状的改善, 有利于冷浸田水稻根系生长和养分吸收, 从而促进水稻群体发展, 同时延缓水稻生育后期群体的衰老, 最终通过提高水稻产量主要的构成因子成穗数和结实率, 使水稻产量有了一定程度的提高。综合来看, 脱硫灰和生物活性炭较其他 3 种改良剂更适合运用于冷浸田土壤改良, 但对于其改良效果的稳定性, 还需要长期定位试验的验证。同时由于冷浸田水稻田长期处于淹水的特殊状态, 土壤改良剂施入土壤以后, 土壤中离子与养分之间存在着相互作用, 但对其间究竟存在什么样的相互作用, 还需进一步分析研究。通过对离子间的相互作用研究, 可以更好地为冷浸田合理施用土壤改良剂及配套改良措施的选择提供依据。

参考文献

- [1] 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(4): 284–288
Chai J J, Liao M, Xu P Z, et al. Feature analysis on nutrient's restrictive factors of major low productive waterlogged paddy soil in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4): 284–288
- [2] 曾燕, 黄敏, 蒋鹏, 等. 冷浸田条件下不同类型品种的表现和高产栽培方式研究[J]. 作物研究, 2010, 24(3): 140–144
Zeng Y, Huang M, Jiang P, et al. Studies on yield performance and high yielding cultivation methods of different types of cultivars in cold water paddy field[J]. Crop Research, 2010, 24(3): 140–144
- [3] 广东省土壤普查办公室. 广东土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1993
Soil Census Office in Guangdong. Soil of Guangdong[M]. Beijing: Science Press, 1993
- [4] Dickopp J, Kazda M, Čížková H. Differences in rhizome aeration of *Phragmites australis* in a constructed wetland[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(11): 1647–1653
- [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] 段红平. 水稻冷浸田湿润栽培增产原因的研究[J]. 云南农业大学学报, 1994, 9(2): 105–111
Duan H P. Studies on the cause of increasing yield of rice damp cultivation in cold spring paddy fields[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 1994, 9(2): 105–111
- [7] 李庆奎. 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
- [8] 张平, 郑宏刚, 余建新. 高原地区冷浸田治理技术研究[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(5): 665–669
Zhang P, Zheng H G, Yu J X. Study on the improving technology of cold soak field in the Highland Area[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2005, 20(5): 665–669
- [9] 龙成凤, 姚其华, 范先鹏, 等. 棕红壤地区冲垅冷浸田的改造技术及效果[J]. 中国农业大学学报, 1992, 2(增刊): 108–111
Long C F, Yao Q H, Fan X P, et al. The techniques and application on ameliorating cold-water paddy-rice brownish red soil in northeast Hubei Province[J]. Journal of China Agricultural University, 1992, 2(S1): 108–111
- [10] 李清华, 王飞, 何春梅, 等. 福建省冷浸田形成、障碍特性及治理利用技术研究进展[J]. 福建农业学报, 2011, 26(4): 681–685
Li Q H, Wang F, He C M, et al. Formation, difficulties and utilization of cold water paddy fields in Fujian[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2011, 26(4): 681–685
- [11] 郭和蓉, 陈琼贤, 郑少玲, 等. 营养型酸性土壤改良剂对氮素吸收利用的影响[J]. 华中农业大学学报, 2007, 26(2): 191–194
Guo H R, Chen Q X, Zheng S L, et al. The effect of nutritive soil modifier on nitrogen uptake and utilization in soil[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2007, 26(2): 191–194
- [12] 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): 331–333
Xu X P, Wang Y K, Feng H, et al. Research summary of the soil amendment's effect on improving soil, cultivating fertilizer and increasing yield[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(9): 331–333
- [13] Jala S, Goyal D. Fly ash as a soil ameliorant for improving crop production—a review[J]. Bioresource Technology, 2006, 97(9): 1136–1147
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 263–270
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 263–270
- [15] 李振高, 骆永明, 腾应, 等. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社 2008
Li Z G, Luo Y M, Teng Y, et al. Soil and environmental microbial approach[M]. Beijing: Science Press, 2008
- [16] 陈琼贤, 彭志平. 施用营养型土壤改良剂对水稻产量和土壤肥力的效应[J]. 土壤与环境, 2002, 11(4): 373–375
Chen Q X, Peng Z P. Effects of nutritive soil amendments on rice yield and soil fertility[J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(4): 373–375
- [17] 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
- [18] 陈进红, 毛国娟, 张国平, 等. 硅对杂交粳稻干物质与养分积累及产量的影响[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2002, 28(1): 22–26
Chen J H, Mao G J, Zhang G P, et al. Effects of silicon on dry matter and nutrient accumulation and grain yield in hybrid Japonica rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2002, 28(1): 22–26
- [19] 全成哲, 方秀琴, 金京花, 等. 水稻施用硅钙肥试验效果研究初报[J]. 北方水稻, 2011, 41(5): 39–43
Quan C Z, Fang X Q, Jin J H, et al. Primary study of Si-Ca fertilizer which used on rice[J]. North Rice, 2011, 41(5): 39–43
- [20] 张宏伟, 陈志泉, 宁平, 等. 腐植酸共聚物土壤改良剂对土壤化学性能的影响[J]. 水土保持通报, 2003, 23(6): 36–38
Zhang H W, Chen Z Q, Ning P, et al. Effects of humic acid copolymers on soil chemical properties in amended soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003, 23(6): 36–38
- [21] 张文玲, 李桂花, 高卫东. 生物质炭对土壤性状和作物产量的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(17): 153–157
Zhang W L, Li G H, Gao W D. Effect of biomass charcoal on soil character and crop yield[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(17): 153–157