

# 长期深窄沟排水对冷浸田土壤脱潜特性及水稻产量的影响<sup>①</sup>

林 诚<sup>1</sup>, 李清华<sup>1</sup>, 王 飞<sup>1\*</sup>, 刘后鹏<sup>2</sup>, 林丽红<sup>2</sup>, 何春梅<sup>1</sup>, 钟少杰<sup>1</sup>

(1 福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福州 350013; 2 福建省顺昌县土壤肥料技术站, 福建顺昌 353200)

**摘 要:**冷浸田为江南稻区广泛分布的一种中低产田。以福建省顺昌县持续运行约 30 年的石砌深窄沟为监测平台,通过田间土壤速测与室内检验,研究长期深窄沟排水对离沟不同距离冷浸田土壤脱潜特性及水稻产量的影响。结果表明:冷浸田经过长期深窄沟排水,在离沟 25 m 范围内,与典型冷浸田(离沟 75 m 位点)土壤相比,土壤 Eh 提高幅度为 288.2%~323.4%,土壤水分下降幅度为 7.5%~36.2%,土壤还原性物质总量、Fe<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup>等含量均有不同降低,并表现为离沟越近,提高或降幅越大的趋势。开沟后 0~25 m 范围内,土壤 pH 降低 0.13~0.69 个单位,土壤微生物生物量碳、氮分别提高 66.0%~99.0%、77.0%~275.1%,土壤有效养分含量提高,土壤耕性得到明显改善,离沟 15 m 以内位点可以实现机耕。开沟后,25 m 范围内作物产量可提高 6.6%~20.7%,且离沟越近增幅越大。在冷浸田特殊的环境下,土壤还原强度大小是制约作物产量的主要因素。长期开沟排水促进了土壤有机质矿化,增强了土壤微生物活性,产量提升明显。从综合改造效果看,距沟 15~20 m 以内对土壤理化性质改良与产量提升效果较为明显。

**关键词:**深沟排水;冷浸田;还原性物质;脱潜育化;水稻产量

**中图分类号:**S156;S278

冷浸田是指常年冷泉水淹灌或终年积水,土体存在“冷、渍、烂、锈”等为主要障碍特征的一类水田,是我国低产水稻土的一个主要类型。福建地处亚热带季风区,雨水充沛、山地丘陵多,为冷浸田形成创造了自然条件,加之浸冬及串灌串排等不良管理,因而在闽北山区形成了分布广泛的冷浸田。经统计,全省冷浸田面积约 16.7 万 hm<sup>2</sup>,占全省耕地总面积的 12.0%<sup>[1]</sup>。冷浸田障碍因子多,但增产潜力大,若采取有效的改良措施,对提高土壤肥力、促进福建粮食增产具有重要意义。长期渍水是冷浸田土壤形成的重要条件,因而开沟排渍是冷浸田改良的一个重要工程措施。研究表明,冷浸田起垄或通过明沟排水能有效地改善冷浸田土壤特性,并显著提高水稻产量<sup>[2-4]</sup>。王飞等<sup>[5]</sup>通过开沟排渍与优化施肥研究对比发现,在冷浸田上开沟排渍增产效应明显高于优化施肥。但目前工程措施改造对冷浸田的影响研究多集中在田间的简易排水工程上,且多为短期效应研究,对石砌深窄沟和埋暗管等长期性工程措施对冷浸田改良研究甚少。

20 世纪 70 年代末,福建省顺昌县冷浸田采用石

砌深窄沟的工程改造后,短期内地下水位明显降低,土壤理化性质得到改善,并明显提高了水稻产量<sup>[6]</sup>。“石砌深窄沟”作为工程排水中的一种类型,其影响范围以距沟 25 m 范围较为显著,距沟 45 m 仍有一定改土增产效益<sup>[7]</sup>。目前这些排渍工程距今已有约 30 年历史,冷浸田在长期深窄沟改造下土壤性质会如何变化?不同离沟距离的土壤养分含量特别是作物产量的变化趋势又是如何?为此,本研究以福建省顺昌县郑坊乡兴元垅 1980 年建立的 64 hm<sup>2</sup> 水改试验区为研究对象,针对离沟不同距离处的土壤特性及作物产量开展研究,旨在为冷浸田工程改造技术和效果评估提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验点位于福建省顺昌县郑坊乡兴元垅 1980 年建立的 64 hm<sup>2</sup> 水改试验区(26°42' N, 117°42' E),海拔高度 262 m,地形为山地丘陵间长垅,纵坡降在 3°以下,冲沟呈 U 形,中部垅宽 200 m 左右。地表水与浅位地下水混合,串排串灌,常年涝渍,土壤表层

①基金项目:公益性(农业)行业专项(201003059-08)和福建公益类科研院所基本科研专项(2015R1022-5;2016R1021-2)资助。

\* 通讯作者(tjwangfei@163.com)

作者简介:林诚(1981—),男,福建永泰人,硕士,助理研究员,主要从事植物营养与肥料研究。E-mail:linchengox@163.com

或整个土体潜育化。原主要土壤类型为深脚烂泥田与浅脚烂泥田。试验区年平均温度  $18.5^{\circ}\text{C}$ ，年均降雨量  $1\,691.3\text{ mm}$ ，年日照时数  $2\,292\text{ h}$ 。该试验区修建了深  $1\text{ m}$ ，底宽  $30\text{ cm}$  的“石砌深窄沟”3 条共  $600\text{ m}$  (图 1)。本研究从 2013 年将试验地以每隔“石砌深窄沟” $5\text{ m}$  为一个处理，共有距离  $5$ 、 $10$ 、 $15$ 、 $20$ 、 $25$ 、 $75\text{ m}$  (代表典型深脚烂泥田，未受开沟影响，CK)(图 1)，6 个位点作为 6 个处理，每个处理在同一水平上共 3 次重复，每小区面积  $25\text{ m}^2$ 。每个处理施肥管理、田间管理方式均一致。

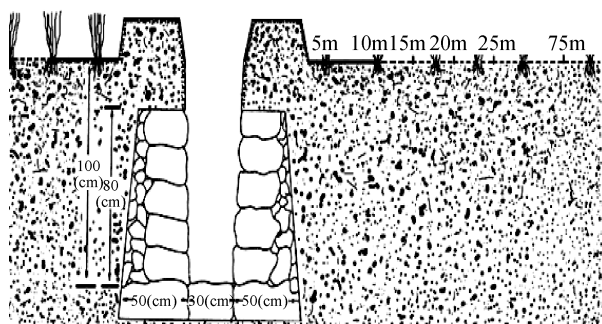


图 1 冷浸田石砌深窄沟结构及采样点分布图

Fig. 1 Structure of stony open-deep-narrow drainage ditch and sampling sites in cold-waterlogged paddy field

## 1.2 样品采集与分析

于 2014 年 10 月水稻收获后采集每个处理  $0\sim 20\text{ cm}$  耕层土样，每个重复取 3 个点混匀作为一个样品，土壤样品装入自封袋，带回实验室，一份鲜样用于测定土壤水分、土壤浸水体积质量(容重)、还原性物质总量、亚铁( $\text{Fe}^{2+}$ )、亚锰( $\text{Mn}^{2+}$ )含量、微生物生物量碳、氮，一份土样经自然风干后研磨过筛用于测定 pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾。土壤氧化还原电位采用田间速测仪(Spectrum, IQ150)测定。其中土壤

浸水体积质量：称取一定量鲜样放入量筒中浸泡分散，通过干土质量/沉淀体积求得<sup>[8]</sup>；土壤理化性状测定参照《土壤农业化学分析方法》<sup>[9]</sup>：土壤含水量采用烘干法；还原性物质总量采用硫酸铝溶液浸提-重铬酸钾溶液容量法测定； $\text{Fe}^{2+}$  含量采用邻菲罗啉法； $\text{Mn}^{2+}$  含量采用高碘酸钾比色法；土壤 pH 采用 pH 酸度计法(水浸提)；有机碳含量用高温外热重铬酸钾氧化-容量法；碱解氮含量用碱解扩散法；有效磷含量用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法；速效钾含量用醋酸铵浸提-火焰光度计法。微生物生物量碳和氮：采用氯仿熏蒸- $\text{K}_2\text{SO}_4$  浸提法，振荡提取的过滤液用日本岛津 TOC/TN 自动分析仪测定碳、氮含量，微生物生物量碳和氮的换算系数分别为  $0.45$ 、 $0.38$ 。

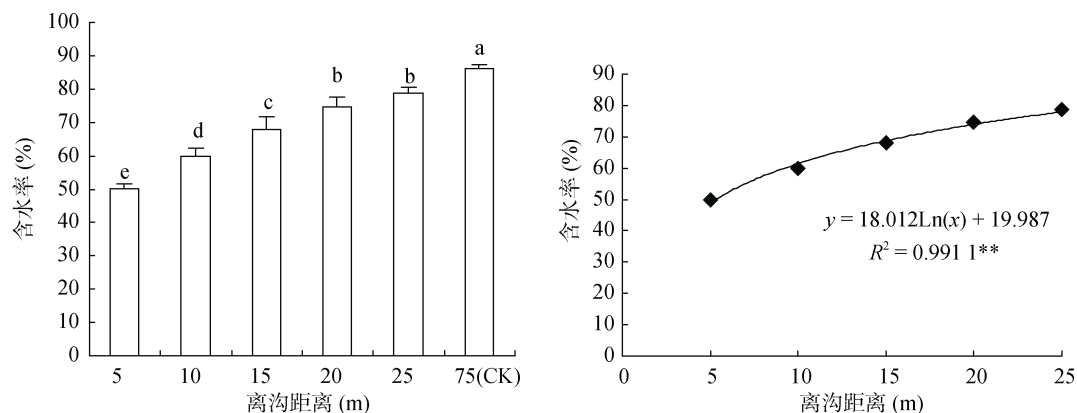
## 1.3 数据分析与处理

采用 DPS 7.05 软件和 Excel 2003 软件进行数据分析，不同处理采用 LSD 法进行显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 石砌深窄沟改造对冷浸田土壤物理特性的影响

**2.1.1 对冷浸田土壤水分的影响** 从图 2 可以看出，冷浸田经过长期深窄沟排水后距沟  $25\text{ m}$  内土壤水分含量均下降。与 CK 相比， $0\sim 25\text{ m}$  位点土壤水分含量下降幅度达  $7.5\%\sim 36.2\%$ ，均达到显著差异，且离沟越近，下降幅度越大，表现出脱潜干化特性越明显，离沟  $15\text{ m}$  以内位点基本可以实现机耕。将  $0\sim 25\text{ m}$  位点土壤质量含水量与离沟距离拟合方程后发现，二者间呈对数关系，且达到极显著水平。表明石砌深窄沟对冷浸田土壤干化效果明显，但随着离沟距离的增加，对土壤水分的影响效果在减弱。



(柱图上方不同小写字母表示处理间差异在  $P<0.05$  水平显著，下同)

图 2 不同离沟距离冷浸田土壤水分含量

Fig. 2 Soil moisture contents of cold-waterlogged paddy fields with different distances from stony open deep-narrow drainage ditches

**2.1.2 对冷浸田土壤浸水体积质量及 pH 的影响** 土壤浸水体积质量的大小在一定程度上能反映出水稻土在泡水时的淀浆、板结和肥沃程度。一般认为南方水田土壤浸水体积质量为  $0.5 \sim 0.6 \text{ g/cm}^3$  土壤耕性最好,  $0.5 \text{ g/cm}^3$  以下的易起浆<sup>[10]</sup>。冷浸田由于土体腐烂发浆而具有较低的土壤浸水体积质量。从本研究结果来看(图 3), 冷浸田经过石砌深窄沟改

造后,  $0 \sim 25 \text{ m}$  位点土壤浸水体积质量均提高, 提高幅度为  $3.2\% \sim 45.5\%$ , 且离沟越近, 提高幅度越大, 特别是离沟  $5 \text{ m}$  位点较 CK 达显著差异。土壤 pH 趋势与浸水体积质量相反, 离沟越近, 土壤 pH 越低。与 CK 相比,  $0 \sim 25 \text{ m}$  位点土壤 pH 分别降低  $0.13 \sim 0.69$  个单位, 除  $25 \text{ m}$  位点外, 其余位点 pH 均显著下降。

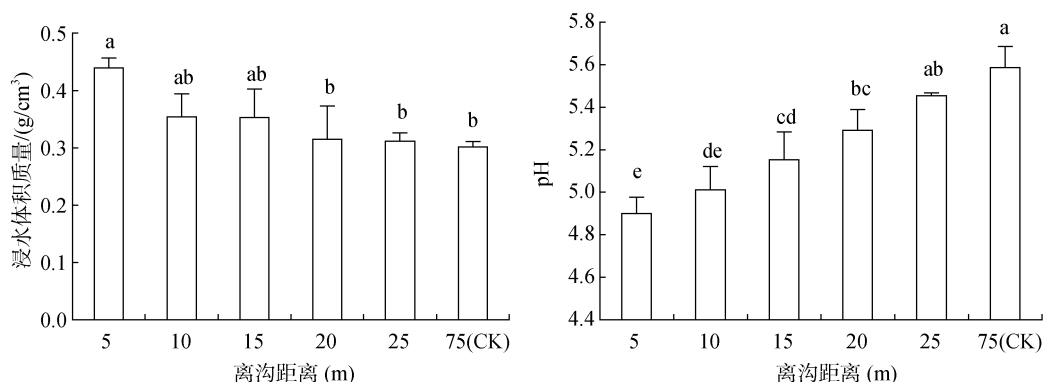


图 3 不同离沟距离冷浸田土壤浸水体积质量及 pH

Fig. 3 pH and water immersed bulk densities of cold-waterlogged paddy fields with different distances from stony open deep-narrow drainage ditches

## 2.2 石砌深窄沟改造对冷浸田土壤化学特性的影响

**2.2.1 对冷浸田土壤还原性指标的影响** 冷浸田经过石砌深窄沟改造后, 对土壤还原性物质总量等指标均有显著影响(图 4)。氧化还原电位(Eh)是反映土壤中氧化还原状况的强度指标。与 CK 相比, 石砌深窄沟改造后  $0 \sim 25 \text{ m}$  位点土壤 Eh 均显著提高, 提高

幅度为  $288.2\% \sim 323.4\%$ 。与 CK 相比, 不同离沟距离的土壤还原性物质总量均显著降低, 且离沟越近下降幅度越大。离沟距离  $10 \text{ m}$  内土壤  $\text{Fe}^{2+}$  含量显著低于 CK,  $5 \text{ m}$  位点  $\text{Fe}^{2+}$  含量显著低于  $10 \text{ m}$  位点, 离沟距离  $5 \text{ m}$  内土壤  $\text{Mn}^{2+}$  含量显著低于 CK, 其余位点  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  含量差异不显著。

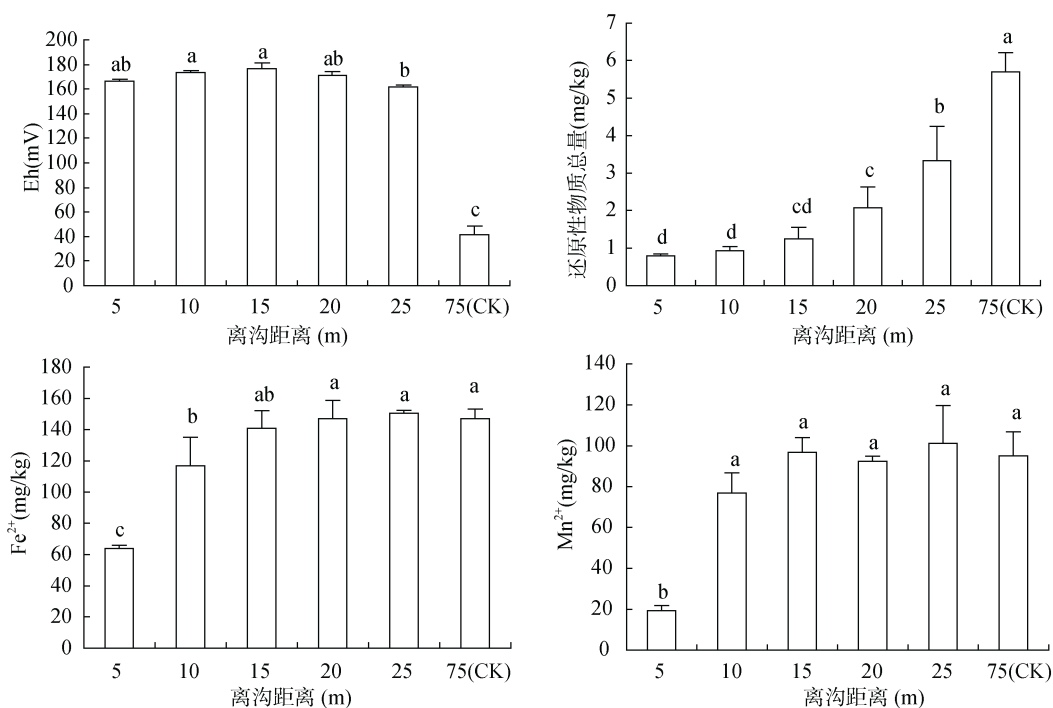


图 4 不同离沟距离冷浸田土壤 Eh 与还原性物质含量

Fig. 4 Redox potentials and soil reducing substances contents of cold-waterlogged paddy fields with different distances from stony open deep-narrow drainage ditches

**2.2.2 对冷浸田土壤有机质及速效养分含量的影响** 冷浸田由于长期渍水, 有机质矿化缓慢, 因此造成土壤有机质的积累。从图 5 来看, 冷浸田经过石砌深窄沟改造后, 与 CK 相比, 0 ~ 25 m 位点土壤有机质含量呈总体下降趋势, 下降幅度为 10.8% ~ 22.5%。但 0 ~ 25 m 位点土壤有机质含量差异不明显。

冷浸田改造可显著提高土壤碱解氮、速效钾的含量(图 5)。0 ~ 25 m 位点土壤碱解氮、速效钾含量分别较 CK 提高 39.7% ~ 53.9%、16.1% ~ 83.7%, 其中碱解氮与 CK 有显著差异, 速效钾除 25 m 位点外, 与

CK 差异显著。从有效磷含量来看, 开沟排水有提高有效磷含量的趋势, 但与 CK 差异不显著。

**2.2.3 对冷浸田土壤微生物生物量碳氮含量的影响** 冷浸田经石砌深窄沟改造后土壤微生物生物量碳、氮含量显著提高(图 6)。与 CK 相比, 0 ~ 25 m 位点土壤微生物生物量碳、氮分别提高 66.0% ~ 99.0%、77.0% ~ 275.1%, 其中均以 15 m 位点含量最高。由于土壤微生物生物量碳、氮均是土壤活性有机碳的重要组成, 二者增加反映了冷浸田长期开沟排水有利于增强微生物活性, 从而促进了有机质矿化, 农田生产力正向高产方向演化。

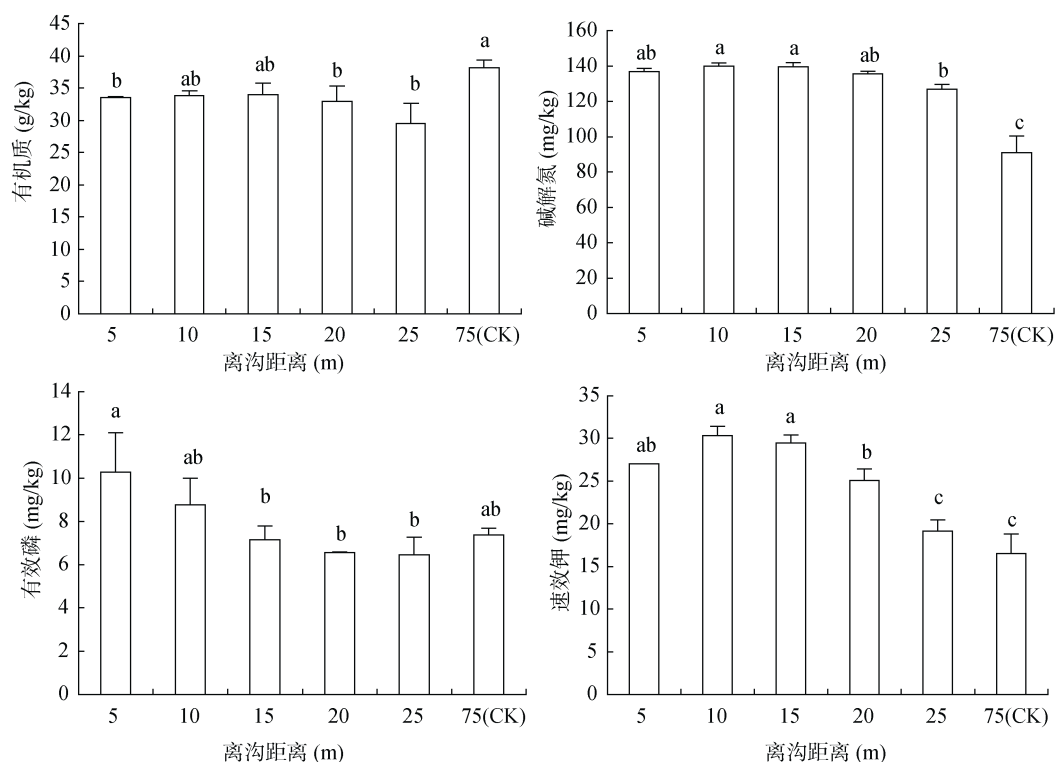


图 5 不同离沟距离冷浸田土壤有机质与速效养分含量

Fig. 5 Organic matter and available soil nutrients contents of cold-waterlogged paddy fields with different distances from stony open deep-narrow drainage ditches

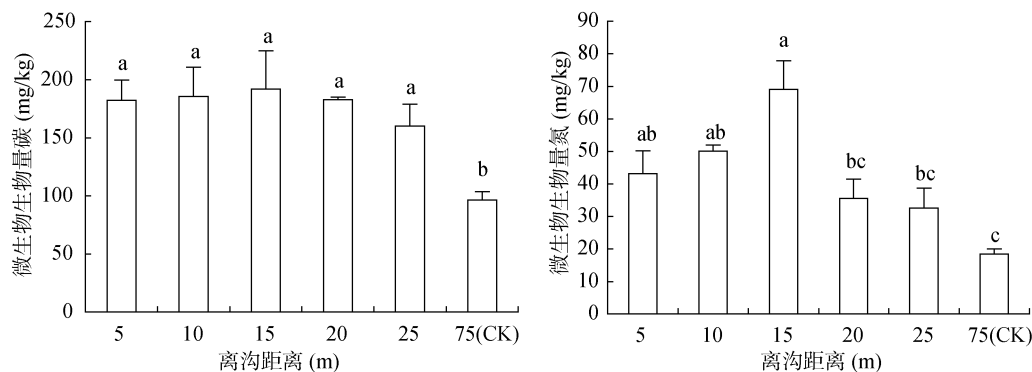


图 6 不同离沟距离冷浸田土壤微生物生物量碳、氮含量

Fig. 6 Microbial biomass carbon and nitrogen contents of cold-waterlogged paddy fields with different distances from stony open deep-narrow drainage ditches

2.3 石砌深窄沟改造对冷浸田水稻产量的影响

从图 7 可以看出，冷浸田经过长期深窄沟排水，0~25 m 各位点水稻籽粒产量较 CK 提高 6.6%~20.7%，差异均显著。且距沟越近，产量越高，其中 5 m 位点水

稻产量显著高于其余位点。将水稻产量与离沟距离拟合方程后发现，二者呈极显著负指数关系( $y=566.6e^{(0.764/x)}$ ,  $R^2=0.99^{**}$ ),表明冷浸田经过石砌深窄沟长期改造后可显著提高作物产量，即使离沟较远的 25 m 位点。

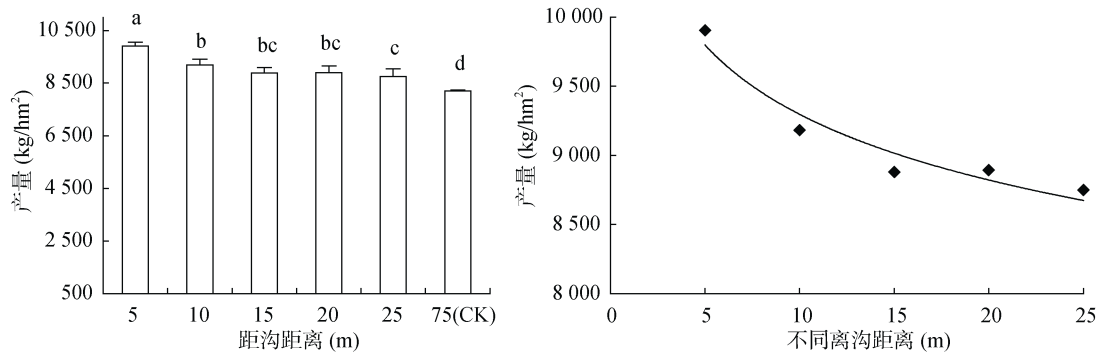


图 7 不同离沟距离冷浸田水稻产量  
Fig. 7 Rice yields of cold-waterlogged paddy fields with different distances from stony open deep-narrow drainage ditches

2.4 冷浸田土壤理化特性与产量的关系

表 1 显示，水分与土壤还原性指标 Eh、还原性物质总量、Fe<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup> 含量呈显著的正相关。土壤 pH 与土壤还原状态性指标还原性物质总量、Fe<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup> 含量均呈极显著正相关，而与产量呈显著负相关；土壤速效钾含量与 Eh 呈显著正相关，而与还原性物质总量呈显著负相关，土壤有机磷含量与 Fe<sup>2+</sup>、

Mn<sup>2+</sup> 呈显著负相关。从产量关联因子来看，产量与 pH 呈极显著负相关，与土壤有效磷呈显著正相关，而与土壤还原性物质总量、Fe<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup> 还原性指标呈显著的负相关。上述说明，对特定的冷浸田而言，土壤有效磷、速效钾含量与还原性物质呈彼消此长的关系，而土壤还原强度大小与有效磷含量均是影响水稻产量的主要因素。

表 1 土壤理化性质与产量间相关性  
Table 1 Correlation coefficients between soil chemical characteristics and rice yields

| 项目    | 水分      | Eh    | 还原性物质总量 | Fe <sup>2+</sup> | Mn <sup>2+</sup> | 浸水体积质量  | 产量      |
|-------|---------|-------|---------|------------------|------------------|---------|---------|
| 水分    | 1.00    | -0.25 | 0.80**  | 0.91**           | 0.74**           | -0.71** | -0.89** |
| pH    | 0.93**  | -0.47 | 0.75**  | 0.83**           | 0.65**           | -0.65** | -0.81** |
| 有机质   | -0.09   | 0.1   | 0.08    | 0.03             | -0.31            | -0.05   | -0.18   |
| 碱解氮   | -0.34   | 0.47  | -0.39   | -0.13            | -0.29            | 0.14    | -0.01   |
| 有效磷   | -0.74** | 0.08  | -0.36   | -0.75**          | -0.68**          | 0.58*   | 0.69**  |
| 速效钾   | -0.57*  | 0.59* | -0.67** | -0.31            | -0.26            | 0.36    | 0.28    |
| 微生物量碳 | 0.04    | -0.08 | -0.25   | 0.15             | 0.13             | 0       | -0.11   |
| 微生物量氮 | -0.30   | 0.50  | -0.47   | -0.04            | 0.01             | 0.09    | 0.06    |
| 产量    | -0.89** | 0.04  | -0.70** | -0.87**          | -0.60*           | 0.72**  | 1.00    |

3 讨论

3.1 石砌深窄沟改造长期排水对冷浸田土壤环境的影响及工程借鉴

冷浸田在长期渍水条件下土壤中的氧气逐渐被消耗掉，在强烈的厌氧环境下，还原性物质如 S<sup>2-</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup> 以及有机酸等在土壤中大量累积，使冷浸田土壤产生毒害<sup>[8,11]</sup>。本课题组前期研究结果表明<sup>[12]</sup>，冷浸田经过长期深窄沟排渍可降低地下水位，离沟越近常年平均地下水位越低，地下水位变幅也越大，土壤干

湿交替较为明显。从本研究结果来看，冷浸田经过石砌深窄沟改造后，离沟较近的位点，由于地下水位降低，使得土壤水分含量下降，土壤通气状况得到明显改善，因此氧化还原电位显著提高，一部份土壤 Fe<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup> 还原性物质通过氧化沉淀，这可通过离沟较近位点土体锈纹、锈斑明显得到证实<sup>[12]</sup>，另一部分还原性物质随着水分通过石砌的缝隙而逐渐排除，从而提高了土壤耕性条件，生产力水平随之提升，这与以往研究结果相一致<sup>[3,5,13]</sup>。进一步研究表明，0~25 m 位点土壤质量含水量与离沟距离二者间呈极显著对

数关系(图 1), 表明随着离沟距离的增加, 石砌深窄沟改造对冷浸田土壤水分的影响效果在减弱, 而土壤水分是影响冷浸田还原状况的首要因素, 因此土壤还原性物质也随着离沟距离的增加其削减效果在逐渐减弱。综合分析, 离沟 20 m 范围内改造效果较好, 离沟 15 m 内尤为明显, 可实现机耕。石砌深窄沟改造冷浸田可为当前开沟布局与沟渠工程结构提供借鉴, 如本研究表明, 一条深窄沟可管控沟两侧 15 ~ 20 m 的有效距离, 这可为区域冷浸田开沟工程的沟渠密度提供依据。值得一提的是, 随着当前抛荒山垵田复垦改造的兴起, 水泥砂浆砌面多数替代了传统的石砌深窄沟工程, 但从石砌沟得到的借鉴是应该在工程设计时预留有充足的排渍洞口, 使沟渠兼具排泄与排渍的功能。但石砌深窄沟通过孔隙排渍降潜的机理还有待进一步研究。

### 3.2 石砌深窄沟改造对土壤理化、生化过程及产量的影响

有研究表明<sup>[14]</sup>, 土壤在淹水厌氧条件下部分  $\text{NO}_3^-$ -N 会发生反硝化作用, 能够在一定程度上提高土壤 pH, 而在好气条件下, 易于  $\text{NH}_4^+$ -N 的硝化作用和  $\text{NO}_3^-$ -N 的淋失, 导致土壤酸化。冷浸田经过石砌深窄沟改造后土壤水分含量显著下降, 因此在干湿交替环境下土壤易产生硝化过程而导致 pH 下降, 从水分与土壤 pH 呈极显著正相关也可看出水分变化对土壤 pH 的影响。

土壤水分状况通过导致土壤通气状况、pH 和可溶性物质数量的变化, 调节微生物活性, 促进或抑制有机碳的分解, 改变土壤有机碳的组分分布, 进而影响土壤的理化和生物学性质<sup>[15]</sup>。冷浸田类水稻土有机质含量高, 但由于土壤水分过多, 长期处于嫌气分解条件, 微生物活动力弱, 分解转化缓慢, 有机质矿化率低, 导致土壤有效养分贫乏<sup>[16-17]</sup>, 属典型的“高肥低效型”土壤。而冷浸田经过石砌深窄沟改造后, 干化过程土壤胶体表面的有机质碎裂, 增大了暴露面, 易被微生物所分解; 在复水的初期, 裂隙面尚未完全密合之前, 可使铵化作用加强, 因而土壤在干湿交替环境下有利于促进土壤有机质矿化, 并提高土壤微生物生物量碳、氮活性, 使得矿质养分得到不同程度提高, 这与以往干湿交替提高农田生产力的研究结果一致<sup>[18-20]</sup>。本研究也进一步显示, 微生物生物量碳、氮最高值区分布在离沟 15 m 位点, 显示对冷浸田微生物而言, 开沟排水干化过度可能不利于微生物繁殖活动。刘艳丽等<sup>[21]</sup>研究表明在干湿交替条件下土壤有机质的矿化与微生物数量、土壤 pH 等之间的相互作用关系复杂, 因此不同水分条件下土壤有机质

及矿质养分等变化趋势还有待于进一步研究。

冷浸田在特殊的环境下, 影响作物产量因子与非冷浸稻田有明显差异。现有研究表明非冷浸稻田水稻产量与土壤有机质、速效养分以及微生物活性呈显著正相关关系<sup>[22-24]</sup>。从本研究结果看, 养分含量与产量的相关性仅土壤有效磷与水稻产量有显著正相关, 而冷浸田的还原性物质与产量均有显著负相关。说明对冷浸田而言, 传统的有机质因子并非限制因素, 改良的首要任务是削减还原性物质, 在此基础上, 再提升土壤有效养分、改善土壤结构与土体结型, 促进地力进一步提升。从产量与离沟距离呈极显著负指数关系也可看出, 通过石砌深窄沟改造冷浸田影响范围具有空间局限性。从综合改造效果来看, 离沟 0 ~ 20 m 范围内土壤养分含量较对照提高幅度大, 土壤障碍因子含量下降较多, 改造效果较为明显。

另值得一提的是, 虽然起垄、简易开沟排水等措施可提高冷浸田水稻产量, 但有研究表明冷浸田在单季很难显著降低土壤还原性物质含量和改变土壤氧化还原状况<sup>[5,13]</sup>, 而起垄栽培等耕作方式在下季种植水稻还需重新起垄, 土壤还原状况难以根本改变, 且花工较大, 从长远来看, 在经济条件允许情况下冷浸田改造还是以开深沟排水的水利措施为根本途径。当然, 开沟工程挤占部分耕地资源, 可结合暗管对明沟工程作进一步优化。此外, 我国南方水稻受害的  $\text{Fe}^{2+}$  临界浓度是 50 ~ 100 mg/L<sup>[25]</sup>。从本研究来看, 冷浸田经过改造后  $\text{Fe}^{2+}$  浓度有不同程度降低, 但仅离沟 5 m 内  $\text{Fe}^{2+}$  浓度未超过临界值, 因此在工程改造的基础上配合适宜的农艺措施抑制土壤铁的毒害, 如水旱轮作、增施磷、钾肥等, 才有助于最大提升改造效果。

## 4 结论

1) 冷浸田经过石砌深窄沟改造后提高土壤 Eh 值, 降低土壤水分, 降低土壤还原性物质总量、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$  等含量, 耕性得到明显改善。在离沟距离 25 m 范围内趋势表现为离沟越近, 变幅越大。

2) 开沟降低土壤 pH, 促进土壤有机质矿化, 土壤微生物活性增强, 土壤有效养分含量提高。开沟在 25 m 范围内作物产量可提高 6.6% ~ 20.7%, 且离沟越近增幅越大。冷浸田还原性物质含量与作物产量呈极显著负相关。从综合改造效果看, 距沟 15 ~ 20 m 以内对土壤理化改良与产量提升效果较为明显。

## 参考文献:

- [1] 王飞, 李清华, 林新坚, 等. 福建省冷浸田治理利用的战略思考[J]. 农业现代化研究, 2012, 33(2): 221-224



- [2] 熊又升, 徐祥玉, 张志毅, 等. 垄作免耕影响冷浸田水稻产量及土壤温度和团聚体分布[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 157-164
- [3] 王思潮, 曹凑贵, 李成芳, 等. 耕作模式对冷浸田水稻产量和土壤特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(10): 1 165-1 173
- [4] 董稳军, 张仁陟, 黄旭, 等. 明沟排水对冷浸田土壤理化性质及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(2): 114-116
- [5] 王飞, 李清华, 余广兰, 等. 开沟排渍与优化施肥对冷浸田生产力的耦合效应[J]. 土壤通报, 2015, 46(3): 703-708
- [6] 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
- [7] 福建省土壤普查办公室. 福建土壤[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1991
- [8] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [9] 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
- [10] 《林景亮论文选》编委会. 林景亮论文选[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1995: 227-228
- [11] 何春梅, 王飞, 钟少杰, 等. 冷浸田土壤还原性有机酸动态及与水稻生长的关系[J]. 福建农业学报, 2015, 30(4): 380-385
- [12] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 长期深窄沟排渍对冷浸田地下水位、土壤化学特性及水稻籽粒品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 571-578.
- [13] 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
- [14] 周晓阳, 徐明岗, 周世伟, 等. 长期施肥下我国南方典型农田土壤的酸化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1 615-1 621
- [15] 江春玉, 李忠佩, 崔萌, 等. 水分状况对红壤水稻土中有机物料碳分解和分布的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 325-334
- [16] 柴娟娟, 廖敏, 徐培智, 等. 我国主要低产水稻冷浸田土壤微生物特征分析[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 247-251, 257
- [17] 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
- [18] 王苑, 宋新山, 王君, 等. 干湿交替对土壤碳库和有机碳矿化的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1 076-1 083
- [19] 李清华, 王飞, 林诚, 等. 水旱轮作对冷浸田土壤碳、氮、磷养分活化的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 113-117
- [20] Qiu S L, Wang M K, Wang F, et al. Effects of open drainage ditch design on bacterial and fungal communities of cold waterlogged paddy soils[J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2013, 44(3): 983-991
- [21] 刘艳丽, 张斌, 胡峰, 等. 干湿交替对水稻土碳氮矿化的影响[J]. 土壤, 2008, 40(4): 554-560
- [22] 杨滨娟, 黄国勤, 王超, 等. 稻田冬种绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(10): 1 209-1 216
- [23] 余初喜, 李大明, 柳开楼, 等. 长期施肥红壤稻田有机碳演变规律及影响因素[J]. 土壤, 2013, 45(4): 655-660
- [24] 冯婉婉, 张学雷, 段金龙. 豫南水耕地土壤肥力评价及其与水稻产量相关分析[J]. 河南农业科学, 2012, 41(6): 65-70
- [25] 丁昌璞, 徐仁扣. 土壤的氧化还原过程及其研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2011

## Effects of Long-term Deep-narrow Drainage Ditches on Degleyfication Characteristics of Cold-waterlogged Paddy Soil and Rice Yield

LIN Cheng<sup>1</sup>, LI Qinghua<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>1\*</sup>, LIU Qipeng<sup>2</sup>, LIN Lihong<sup>2</sup>, HE Chunmei<sup>1</sup>, ZHONG Shaojie<sup>1</sup>

(1 *Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China;*

2 *Shunchang Soil and Fertilizer Station, Shunchang, Fujian 353200, China*)

**Abstract:** Cold-waterlogged paddy fields across Jiangnan rice-growing regions belong to low-yield paddy fields. Deep-narrow drainage is beneficial for such fields in improving grain yield. In this paper, the effects of long-term deep-narrow drainage on the characteristics of cold-waterlogged paddy soil and the yield of rice were studied, using a 30-year investigation system in Shunchang County, Fujian Province. The results showed that compared with the typical cold-waterlogged paddy soil (more than 75 m distance from drainage), the soil Eh was increased by 288.2%–323.4% in long-term deep-narrow drainage paddy soil (within 25 m distance from drainage). And the water contents were decreased by 7.5%–36.2% and the concentrations of total reducing agents,  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{Mn}^{2+}$  were decreased by deep-narrow drainage. The pH, MBC and MBN contents were increased by 0.13–0.69, 66.0%–99.0% and 77.0%–275.1% respectively in paddy soils within 25 m distance from deep-narrow drainage, the nutrient availability and soil tilth were improved and then the agricultural machinery could work in the field within 25 m distance from drainage. The intensity of soil reduction is one of the key elements for crop growth in cold-waterlogged paddy fields. The mineralization of soil organic matter and the activity of soil microbe were improved by drainage and then crop yields were increased by 6.6%–20.7%, and the increasing range of yield was decreased with the distance increasing from drainage. In a word, there was a significant positive impact of deep-narrow drainage within 25 m distance on the characteristics of cold-waterlogged paddy soil and the yield of crop.

**Key words:** Deep-narrow drainage ditch; Cold-waterlogged paddy field; Reducing agents; Degleyfication; Rice yield