植物营养与肥料学报 2015,21(3):684-693 doi: 10.11674/zwyf.2015.0315
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

工程排水和农业措施改良鄱阳湖区潜育化稻田的效果

李大明,余喜初*,柳开楼,叶会财,徐小林,周利军,胡惠文,黄庆海
(江西省红壤研究所,农业部江西耕地保育科学观测实验站,南昌 331717)

摘要:【目的】潜育化水稻土存在渍、冷、烂、闭(气)、毒及缺素等障碍因素。开沟排水是改良潜育化稻田最有效的方法,而垄作、湿润灌溉及冬季晒阀等栽培管理措施也具有调控水分、改善土壤结构和氧化还原状况的作用。本文研究开沟排水与农业措施相结合改良鄱阳湖区潜育化稻田的效果,旨在为湖区潜育化水稻土改良提供技术参考。**【方法】**2012~2013 年在鄱阳湖区潜育化双季稻田以工程排水(Ditching Drainage, D-D)为主处理,持续淹水(对照,Continuously Flooded, CF)、垄作(Ridge Culture, RC)、湿润灌溉(Wet Irrigation, WI)、冬季晒阀(Winter Plough, WP)4 个农业措施为副处理,通过 2 年 4 季的田间试验研究了工程排水与农业措施相结合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,分析了工程排水及农业措施相结合改良鄱阳湖区潜育化稻田的潜力。**【结果】**工程排水及优化农业措施可以明显提高水稻产量。工程排水条件下持续淹水、垄作、湿润灌溉和冬季晒阀处理的早晚稻产量分别比对应的无工程排水处理增加 12.8%、10.1%、13.3% 和 13.3%,农业措施中垄作处理的产量最高;其中工程排水与垄作相结合增产效果最明显,每季增产 1.11-1.89 t/hm^2。受排水造成田内养分流失等因素影响工程排水和农业措施对水稻收获期秸秆和籽粒中的养分含量影响没有明显规律。工程排水显著降低了潜育化稻田 0—15 cm 土壤还原物质总量,冬季晒阀和垄作处理也显著降低了土壤还原物质总量,工程排水与优化栽培模式相结合降低土壤还原物质总量的作用更明显,其中也以工程排水与垄作相结合作用最好,可减少 1.11~1.87 cmol/kg。潜育化稻田耕层土壤还原物质总量随着土壤深度增加而增高。工程排水显著提高了潜育化稻田的土壤阳离子交换量、速效磷、全氮含量,农业措施中垄作对提高土壤养分含量及改善养分供应状况的作用最明显。工程排水还提高了垄作、湿润灌溉和冬季晒阀等农业措施土壤腐殖质碳和富里酸碳含量。**【结论】**工程排水可以显著降低土壤还原物质总量,提高土壤阳离子交换量、速效磷、土壤全氮含量,垄作、湿润灌溉和冬季晒阀等农业措施也可降低土壤还原物质总量,提高土壤养分含量及改善养分供应状况,其中垄作的作用最明显。因此,在采用工程排水措施改良鄱阳湖区潜育化稻田时,还应采取适当的栽培措施。

关键词:潜育化稻田;工程排水;栽培措施;水稻产量;还原物质总量;土壤养分
中图分类号:S156.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-505X(2015)03-0684-10

Remediation effect of the combination of ditching drainage and agronomic managements on gleyed paddy field in Poyang Lake Region, China

LI Da-ming, YU Xi-chu*, LIU Kai-lou, YE Hui-cai, XU Xiao-lin, ZHOU Li-jun, HU Hui-wen, HUANG Qing-hai
(*Jiangxi Institute of Red Soil/Scientific Observational and Experimental Station of Arable Land Conservation in Jiangxi, Ministry of Agriculture, Nanchang, 331717*)

Abstract:【Objectives】 Gleyed paddy field has the characteristics of frequently waterlogging, low soil temperature, poor soil structure, bad ventilated and high content of total reducing substances, which limit the advance of rice yield. Ditching drainage is regarded as an effective method in improving gleyed paddy field. Ridge culture, wet irrigation and winter plough could also regulate soil water condition, improve soil structure and reduce soil total reducing substances, then to improve gleyed paddy field. The combined effects of ditching drainage and

收稿日期:2014-02-21 **接受日期:**2014-09-12 **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);国家自然科学基金项目(41301269)资助。
作者简介:李大明(1984—),男,江苏宿迁人,博士,副研究员,主要从事中低产田改造、农业废弃物综合利用及农田碳循环等研究。E-mail:lid_2005@126.com。 * 通信作者 E-mail:yxchu@163.com

agronomic managements on improving gleyed paddy field were studied. 【**Methods**】 A field experiment was conducted on a double rice gleyed paddy field to study soil total reducing substances, soil physical and chemical properties in Poyang Lake Region from 2012 to 2013. The main treatment included ditching drainage(D - D) and the auxiliary treatment with continuously flooded(CF), ridge culture(RC), wet irrigation(WI) and winter plough (WP). The rice yield and total soil reducing substances, and the rice straw and seed nutrient content after harvest in typical rice growing season were measured from 2012 to 2013. The remediation potential of ditching drainage and rice cultivation managements on gleyed paddy field were estimated. 【**Results**】 Ditching drainage, ridge culture (RC), wet irrigation(WI) and winter plough(WP) all could increase rice yield in gleyed paddy field. Compared to non-ditching drainage, the rice yield of continuously flooded, ridge culture, wet irrigation and winter plough under ditching drainage condition was increased by 12.8%, 10.1%, 13.3% and 13.3%, respectively. The combination practice of ditching drainage and water control management could increase rice yield obviously. The rice yield of the combination of ditching drainage and ridge culture was the highest in all the treatments, which reached 1.11 - 1.89 t/hm^2. The ditching drainage had noticeable effects on reducing the soil total reducing substances, and the combination practice of ditching drainage and water control management could reduce soil total reducing substances significantly, the soil total reducing substances of the combination of D - D and RC were the lowest in all treatments, which reduced the soil total reducing substances by 1.11-1.87 cmol/kg. The soil total reducing substances increased with the increase of soil depth. Compared to non-ditching drainage, the ditching drainage increased the content of humus carbon and fulvic acid carbon of RC, WI and WP with no significant effect on the content of soil HM acid carbon. The ditching drainage could increase the soil cation exchange capacity and the content of soil organic carbon and available P considerably, with no significant effect on the pH, the content of available K and total N. The nutrient content and nutrient supplication condition of RC were much better than other water control management practices in this study. 【**Conclusions**】 The ditching drainage had steadily effects on increasing rice yield, reducing soil total reducing substances and improving soil physical and chemical properties in gleyed paddy field in Poyang Lake Region. The combination of ditching drainage and agronomic practices could improve the benefit of ditching drainage, and ridge culture shows the best combination effects among the treated practices. Therefore, the combination of ditching drainage and ridge culture is recommended in gleyed paddy field in Poyang Lake Region.

Key words: gleyed paddy field; ditching drainage; ridge culture; rice yield; soil total reducing substances; soil nutrients

我国南方湖泊水体密布,湖区周边稻田潜育化现象严重。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。长期渍水导致土壤缺氧,活性还原物质过度积累[2-4]。虽然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,且水土温度低,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],强潜育化稻田水稻产量仅为非潜育化的 56%[6]。由于潜育化水稻土主要分布在肥水条件较好的地势低洼区域,富含有机质,潜在肥力高,被认为是具有较强增产潜力的低产土壤类型。

近二十年来,对潜育化水稻土的研究几乎处在停滞的状态,所积累的潜育化水稻土改良措施主要是上世纪 80 年代的研究所获得,目前急需进行潜育化水稻土质量改良及水稻产量提升相关技术的研究。工程排水措施(开挖排水沟或埋设暗沟、暗管等)可以显著降低稻田的潜育化程度,提高水稻的产量[7-8],是改良潜育化稻田最有效的方法。垄作、湿润灌溉、冬季晒阀等农业管理措施也是调控稻田水分、改善土壤氧化还原状况的重要措施[9-12]。工程排水与农业措施相结合进行湖区潜育化稻田改良报道较少。因此,本项目进行了工程排水和农业措施对湖区潜育化稻田水稻产量、土壤还原物质总量、土壤物理化学性质的研究和评价,为制定改良潜育化稻田集成技术提供理论依据。

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″),该地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,土壤还原物质总量2.69 cmol/kg,pH 4.86,土壤有机质含量24.56 g/kg,全氮、速效磷和速效钾分别为1.32 g/kg、5.87 mg/kg和69.17 mg/kg。

1.2 试验设计

试验为两因素裂区设计,其中主处理为工程排水(Ditching Drainage, D-D)和无工程排水(Non Ditching Drainage, N-D-D),副处理为持续淹水(Continuously Flooded, CF)、垄作(Ridge Culture, RC)、湿润灌溉(Wet Irrigation, WI)和冬季晒阁(Winter Plough, WP)。主处理不设小区试验,选取对应田块,工程排水试验区周边开挖深30 cm、宽30 cm的排水沟,在水稻生育期内及时排出田面过量积水以降低地下水位;无工程排水试验区不开挖排水沟,采用农民习惯方式进行水分管理。副处理采用小区试验,在工程排水和无工程排水田块分别设置小区试验;小区面积为30 m^2(5m*6m),3次重复,随机排列,每个小区周围围成30 cm宽、50 cm高的堤坝(农膜包裹堤坝防止水肥流失)。持续淹水处理始终保持田面有1 cm以上的水层,湿润灌溉除了关键生育期稻田有水层外,其他时期不建立水层,但保持田间湿润;垄作处理在小区内起垄,垄高5 cm,垄宽60 cm;垄间用15 cm宽、15 cm深的排水沟隔开;冬季晒阁处理晚稻收获后深翻土壤25—30 cm冬晒。试验于2011年晚稻收获后确定试验地点,并做好试验准备;2012年早稻生长季开始实施,共进行2年4季试验。

种植制度为早稻-晚稻-冬闲,早稻品种为金优458,晚稻品种为淦鑫688。肥料用量为N 180 kg/hm^2、P_2O_5 90 kg/hm^2、K_2O 120 kg/hm^2,氮肥种类为尿素(含氮量为46%),磷肥为钙镁磷肥(P_2O_5为12.5%),钾肥为氯化钾(K_2O含量为60%),磷钾肥作基肥一次施加,氮肥分为基蘖穗三次施用,施用比例为4:3:3。稻田病虫害按当地习惯采用农药进行防治,杂草人工拔除。

1.3 测定指标

水稻产量:在每季水稻成熟期,每个小区单打单收,晒干后称重,并换算成标准产量;

植株及籽粒养分含量:在2012年晚稻成熟期,每个小区采集代表性的植株3穴,将秸秆和籽粒分开后放入信封105℃杀青后,于75℃烘至恒重,粉碎、过筛,经H_2SO_4-H_2O_2消煮后定容过滤,采用常规方法测定籽粒和秸秆中的氮磷钾养分含量[13];

土壤理化性质:样品采集时间为2012年早稻和晚稻收获后,分别用土钻采集耕层土壤样品(0—15 cm),每个小区随机采集5个点混匀后去除植物根系等杂物,风干过筛以备分析土壤pH、有机质、全氮、速效磷和速效钾。具体方法参见《土壤农化分析》[13]。

土壤还原物质总量:分别在每季水稻收获后,采用土钻采集耕层土壤样品(0—15 cm),每个小区随机采集5个点混匀后去除植物根系等杂物,采用四分法分出一部分鲜样分析土壤还原物质总量;其中2012年晚稻收获后分层采集0—5 cm、5—10 cm和10—15 cm土壤样品。采用硫酸铝浸提—重铬酸钾滴定法测定[14]。

土壤团聚体分析:在2012年晚稻收获后,采集0—15 cm耕层原状土壤样品,放入塑料方盒中带回室内,人工筛分具体步骤参见《土壤理化分析》[15]。

土壤腐殖质组成及含量:在2012年晚稻收获后,采集0—15 cm耕层土壤样品,采用焦磷酸钠浸提—重铬酸钾氧化法,具体步骤参见国标GB7858—87。

土壤阳离子交换量:在2012年晚稻收获后,采集耕层土壤样品(0—15 cm),风干后过筛,采用EDTA-铵盐快速法测定土壤阳离子交换量。具体步骤参见《土壤理化分析》[15]。

1.4 数据分析与统计

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)于$P<0.05$水平上进行,工程排水和农业措施对土壤还原物质总量、水稻产量及土壤养分的影响采用双因素方差分析进行分析(ANOVA);采用Origin 7.5软件作图。

2 结果与分析

2.1 工程排水和农业措施对水稻产量的影响

工程排水和农业措施显著影响潜育化稻田水稻产量(表1)。与无工程排水相比,工程排水处理下

水稻产量显著提高;在工程排水条件下持续淹水、垄作、湿润灌溉和冬季晒阀处理的早晚稻产量分别比对应的无工程排水处理增加 12.8%、10.1%、13.3% 和 13.3%。农业措施之间垄作处理的产量最高,冬季晒阀和湿润灌溉次之,持续淹水产量最低(表 1)。本研究中,工程排水和农业措施的改良效果表现出早稻 > 晚稻的总体趋势,这与鄱阳湖区潜育化稻田早稻生长季普遍存在持续的低温多雨天气有关。此外,2013 年不同管理方式早晚稻的产量增加幅度较 2012 年有一定的下降,这与 2013 年水稻生长期间降雨偏少,存在明显的干旱有关。

表 1　不同农艺管理方式下的水稻产量(t/hm^2)

Table 1　The rice yield under different field agronomic managements in gleyed paddy field

处理 Treatment		2012		2013	
		早稻 Early rice	晚稻 Later rice	早稻 Early rice	晚稻 Later rice
CF	D-D	6.17 ± 0.31 b	5.31 ± 0.27 c	6.47 ± 0.18 ab	7.29 ± 0.05 ab
	N-D-D	5.13 ± 0.29 c	4.89 ± 0.33 c	5.57 ± 0.27 b	6.87 ± 0.24 b
RC	D-D	7.02 ± 0.36 a	6.59 ± 0.14 a	6.83 ± 0.24 a	7.98 ± 0.54 a
	N-D-D	5.84 ± 0.39 bc	6.06 ± 0.42 ab	6.27 ± 0.27 b	7.77 ± 0.42 a
WI	D-D	6.39 ± 0.26 ab	6.27 ± 0.38 a	6.38 ± 0.42 ab	7.71 ± 0.48 a
	N-D-D	5.28 ± 0.41 c	5.37 ± 0.53 c	5.89 ± 0.29 b	7.20 ± 0.47 ab
WP	D-D	6.51 ± 0.24 ab	6.39 ± 0.29 a	6.33 ± 0.49 ab	7.82 ± 0.38 a
	N-D-D	5.39 ± 0.47 c	5.51 ± 0.18 bc	5.84 ± 0.32 b	7.25 ± 0.50 ab

注(Note): CF—持续淹水 Continuously flooded; RC—垄作 Ridge Culture; WI—湿润灌溉 Wet Irrigation; WP—冬季晒阀 Winter Plough; D-D—工程排水 Ditching drainage; N-D-D—无工程排水 Non ditching drainage. 同一列数值后不同字母表示 $P < 0.05$ 水平上差异显著 Values followed by different letters in a column stand for values significant differences($P < 0.05$).

2.2　工程排水和农业措施对水稻籽粒和植株养分含量的影响

不同管理方式对鄱阳湖区潜育化稻田成熟期水稻籽粒和秸秆的氮磷钾养分含量有明显影响(表 2)。工程排水条件下持续淹水处理的籽粒氮磷含量分别比对应无工程排水增加 16.6% 和 6.0%;而

表 2　2012 年不同管理方式下晚稻植株养分含量(g/kg)

Table 2　The N, P and K contents in late rice under different treatments in gleyed paddy field in 2012

处理 Treatment		籽粒 Seed			秸秆 Rice straw		
		N	P	K	N	P	K
CF	D-D	10.03 ± 0.24 b	8.08 ± 0.48 ab	5.42 ± 0.37 bc	4.57 ± 0.23 bc	1.70 ± 0.13 b	20.47 ± 0.80 b
	N-D-D	8.60 ± 0.67 c	7.63 ± 0.54 bc	5.82 ± 0.27 b	3.98 ± 0.35 c	1.76 ± 0.09 b	20.49 ± 0.94 b
RC	D-D	8.59 ± 0.35 c	7.41 ± 0.17 c	4.70 ± 0.64 c	4.85 ± 0.45 b	1.75 ± 0.15 b	18.85 ± 0.22 c
	N-D-D	10.02 ± 0.64 b	7.85 ± 0.44 bc	5.69 ± 0.46 bc	4.90 ± 0.37 b	1.73 ± 0.16 b	20.80 ± 0.91 b
WI	D-D	8.26 ± 0.85 c	7.62 ± 0.27 bc	5.72 ± 0.38 b	4.28 ± 0.27 c	1.72 ± 0.13 b	20.11 ± 0.71 b
	N-D-D	8.06 ± 0.87 c	7.64 ± 0.74 bc	6.01 ± 0.34 ab	5.56 ± 0.23 a	2.18 ± 0.09 a	22.88 ± 0.65 a
WP	D-D	7.83 ± 0.72 c	8.64 ± 0.28 a	6.59 ± 0.39 a	4.71 ± 0.27 bc	1.85 ± 0.17 b	22.17 ± 0.40 a
	N-D-D	11.01 ± 0.52 a	7.59 ± 0.50 bc	6.16 ± 0.39 a	5.43 ± 0.33 ab	1.85 ± 0.13 b	21.61 ± 0.62 ab

注(Note): CF—持续淹水 Continuously flooded; RC—垄作 Ridge Culture; WI—湿润灌溉 Wet Irrigation; WP—冬季晒阀 Winter Plough; D-D—工程排水 Ditching drainage; N-D-D—无工程排水 Non ditching drainage. 同一列数值后不同字母表示 $P < 0.05$ 水平上差异显著 Values followed by different letters in a column stand for values significant differences($P < 0.05$).

工程排水垄作的籽粒氮磷钾含量分别比无工程排水降低14.3%、5.6%和29.7%;工程排水冬季晒阀处理籽粒氮含量比无工程排水降低28.0%;工程排水湿润灌溉的籽粒氮磷钾含量与无工程排水没有显著差异。在水稻秸秆中,工程排水只显著降低了湿润灌溉处理的秸秆氮磷含量,而对其他农业措施的秸秆氮磷含量没有显著影响。工程排水对持续淹水和冬季晒阀处理秸秆钾含量没有显著影响。

2.3 工程排水和农业措施对土壤还原物质总量的影响

不同管理方式土壤还原物质总量存在显著差异(表3)。农业措施中,持续淹水土壤还原物质总量最高,湿润灌溉次之,冬季晒阀和垄作处理最低(2012年早稻收获后)。与无工程排水相比,工程排水显著降低0—15 cm土壤还原物质总量,工程排水持续淹水、垄作、湿润灌溉和晒阀处理的土壤还原物质总量分别减少34.6%、28.7%、30.7%和30.4%(2012年早稻收获后)。在2012年晚稻收获后,不同深度土壤还原物质总量呈现出0—5 cm < 5—10 cm < 10—15 cm,在0—5 cm层次,工程排水对持续淹水和湿润灌溉处理的土壤还原物质总量没有显著影响,但显著减少了垄作和冬季晒阀处理土壤还原物质总量,分别下降27.9%和23.8%;在5—10 cm土层,工程排水对垄作处理土壤还原物质总量没有显著影响,但显著减少持续淹水、湿润灌溉和冬季晒阀等处理土壤还原物质总量,对应处理分别减少19.2%、38.4%和23.4%;在10—15 cm层次中,工程排水仅显著降低了湿润灌溉处理土壤还原物质总量,对其他处理没有显著影响。2013年的试验结果与2012年基本一致,总体表现出工程排水处理土壤还原物质总量低于无工程排水,农业措施中垄作、冬季晒阀处理土壤还原物质总量较低,持续淹水处理土壤还原物质总量最高。

表3 不同管理方式下稻田土壤还原物质总量(cmol/kg)

Table 3 The total reducing substance contents of soil under different treatments in gleyed paddy field

处理 Treatment		2012				2013	
		早稻 Early rice		晚稻 Later rice		早稻 Early rice	晚稻 Later rice
		0—15 cm	0—5 cm	0—15 cm	0—5 cm	0—5 cm	0—15 cm
CF	D-D	1.76±0.19 b	1.79±0.16 a	2.40±0.25 b	3.55±0.41 ab	2.16±0.15 c	1.36±0.14 bc
	N-D-D	2.69±0.27 a	1.99±0.18 a	2.97±0.31 a	4.15±0.48 a	3.03±0.28 a	2.19±0.21 a
RC	D-D	0.82±0.33 d	0.88±0.08 d	1.47±0.15 c	2.37±0.27 c	1.44±0.34 d	1.02±0.18 c
	N-D-D	1.15±0.17 c	1.22±0.11 c	1.60±0.16 c	2.50±0.29 bc	2.24±0.33 c	1.35±0.11 bc
WI	D-D	1.76±0.16 b	1.43±0.13 bc	1.62±0.17 c	2.18±0.25 c	1.97±0.29 c	1.56±0.10 b
	N-D-D	2.54±0.21 a	1.67±0.15 b	2.63±0.27 ab	3.18±0.37 b	2.84±0.23 b	2.14±0.24 a
WP	D-D	1.33±0.17 c	1.22±0.11 c	1.67±0.17 c	2.41±0.28 bc	1.42±0.23 d	1.23±0.13 c
	N-D-D	1.91±0.17 b	1.60±0.14 b	2.18±0.22 b	2.96±0.34 b	3.39±0.25 a	1.64±0.20 b

注(Note):CF—持续淹水 Continuously flooded; RC—垄作 Ridge Culture; WI—湿润灌溉 Wet Irrigation; WP—冬季晒阀 Winter Plough; D-D—工程排水 Ditching drainage; N-D-D—无工程排水 Non ditching drainage. 同一列数值后不同字母表示 $P<0.05$ 水平上差异显著 Values followed by different letters in a column stand for values significant differences($P<0.05$).

2.4 工程排水和农业措施对土壤团聚体组成的影响

工程排水对垄作、湿润灌溉处理湿筛法分离的土壤团聚体组成没有明显影响,工程排水降低了持续淹水处理2～0.25 mm粒级团聚体含量,但显著提高冬季晒阀处理小于1 mm粒级的团聚体含量(表4)。

2.5 工程排水和农业措施对土壤腐殖质组成和含量的影响

工程排水提高了垄作、湿润灌溉和冬季晒阀等处理腐殖质碳含量,其中垄作、冬季晒阀处理差异达到显著性($P<0.05$),与对应无工程排水处理相比分别提高9.55%、15.1%和18.3%(表5);富里酸碳含量也表现出相同的规律,对应处理分别提高

表 4　2012 年晚稻收获后稻田土壤不同粒级团聚体含量(湿筛法,%)

Table 4　The soil aggregate contents in different sizes after later rice harvest in 2012(Wet sieving,%)

处理 Treatment		>5 mm	5～3 mm	3～2 mm	2～1 mm	1～0.5 mm	0.5～0.25 mm	<0.25 mm
CF	D-D	42.09	2.29	0.80	2.83	8.88	7.59	35.51
	N-D-D	42.17	2.32	0.81	3.32	11.72	8.47	31.19
RC	D-D	45.35	2.43	0.89	2.64	9.35	8.59	30.75
	N-D-D	45.78	2.39	0.85	2.99	9.47	8.40	30.11
WI	D-D	42.03	1.83	0.67	2.35	10.14	10.11	32.87
	N-D-D	43.57	1.62	0.58	2.55	10.47	8.12	33.09
WP	D-D	34.33	2.14	0.79	2.68	10.98	11.41	37.67
	N-D-D	43.23	2.03	0.64	2.43	9.89	8.12	33.65

注(Note): CF—持续淹水 Continuously flooded; RC—垄作 Ridge Culture; WI—湿润灌溉 Wet Irrigation; WP—冬季晒阀 Winter Plough; D-D—工程排水 Ditching drainage; N-D-D—无工程排水 Non ditching drainage.

表 5　2012 年晚稻收获后稻田土壤腐殖质组成及含量

Table 5　The composition and content of soil humus carbon in gleyed paddy field after late rice harvested in 2012

处理 Treatment		有机碳(g/kg) Organic C	腐殖质碳(g/kg) Humus organic	胡敏酸碳(g/kg) HM acid C	富里酸碳(g/kg) Fulvic acid C	胡敏素碳(g/kg) Humin C
CF	D-D	16.42 ±0.76 b	4.96 ±0.26 ab	2.24 ±0.17 a	2.72 ±0.37 ab	11.46 ±0.82 b
	N-D-D	17.61 ±0.57 ab	5.06 ±0.22 a	2.31 ±0.13 a	2.75 ±0.34 ab	12.55 ±0.59 b
RC	D-D	18.05 ±0.69 a	4.97 ±0.20 ab	2.45 ±0.06 a	2.52 ±0.26 b	13.08 ±0.78 ab
	N-D-D	16.38 ±0.67 b	4.54 ±0.17 c	2.31 ±0.15 a	2.23 ±0.33 b	11.85 ±0.63 b
WI	D-D	18.71 ±0.66 a	4.66 ±0.25 bc	1.99 ±0.21 b	2.67 ±0.72 ab	14.05 ±0.76 a
	N-D-D	17.29 ±0.65 ab	4.05 ±0.16 d	2.49 ±0.11 a	1.55 ±0.23 c	13.24 ±0.61 ab
WP	D-D	16.73 ±0.78 b	5.10 ±0.11 a	1.91 ±0.13 b	3.18 ±0.16 a	11.63 ±0.77 b
	N-D-D	17.15 ±0.56 b	4.31 ±0.19 b	2.24 ±0.15 a	2.07 ±0.28 bc	12.85 ±0.95 ab

注(Note): CF—持续淹水 Continuously flooded; RC—垄作 Ridge Culture; WI—湿润灌溉 Wet Irrigation; WP—冬季晒阀 Winter Plough; D-D—工程排水 Ditching drainage; N-D-D—无工程排水 Non ditching drainage. 同一列数值后不同字母表示 $P<0.05$ 水平上差异显著 Values followed by different letters in a column stand for values significant differences($P<0.05$).

13.0%、72.3% 和 53.6%;而工程排水对土壤胡敏酸碳含量没有显著影响。相同主处理下,垄作和湿润灌溉处理的土壤有机碳明显高于对应的持续淹水和冬季晒阀处理。工程排水条件下,冬季晒阀处理的腐殖质碳含量最高,显著高于湿润灌溉处理,与其他处理没有显著差异;无工程排水条件下,土壤腐殖质碳含量表现出持续淹水>冬季晒阀>垄作>湿润灌溉,且不同处理之间差异均达到显著性($P<0.05$)。工程排水条件下,农业措施间土壤富里酸碳含量没有显著差异;在无工程排水条件下,湿润灌溉处理土壤富里酸碳含量显著偏低,其他处理间没有显著差异;胡敏素碳含量也表现出相同的规律(表5)。

2.6　工程排水和农业措施对土壤养分含量的影响

不同管理方式下土壤 pH、有机质及速效养分含量见表6。在早稻收获后,不同管理方式土壤 pH、速效钾和全氮含量没有显著差异,但持续淹水处理土壤有机质和速效磷含量显著低于垄作、湿润灌溉和冬季晒阀处理。与无工程排水相比,工程排水处理的土壤 pH 值略有上升;工程排水分别提高持续淹水、垄作、湿润灌溉和冬季晒阀处理土壤速效磷含量 39.7%、37.2%、35.7% 和 28.6%,工程排水分别

表6 不同农业措施处理稻田土壤理化性质(2012年)

Table 6 The soil properties under different agronomic methods(2012)

处理 Treatment			pH	有机质 Organic matter (g/kg)	速效P Available P (mg/kg)	速效K Available K (mg/kg)	全氮 Total N (g/kg)
早稻 Early Rice	CF	D-D	4.77±0.02 a	27.96±0.85 bc	10.77±0.53 b	69.17±4.29 bc	1.46±0.04 b
		N-D-D	4.61±0.06 b	27.95±0.52 bc	7.71±0.56 d	70.83±1.44 b	1.45±0.03 b
	RC	D-D	4.69±0.05 b	28.82±0.23 ab	12.33±0.57 a	76.67±6.55 ab	1.51±0.03 a
		N-D-D	4.61±0.06 b	28.05±0.62 b	8.99±0.50 c	77.50±2.50 a	1.37±0.10 bc
	WI	D-D	4.72±0.09 ab	29.48±0.69 a	11.21±0.49 b	71.67±5.20 ab	1.51±0.07 a
		N-D-D	4.65±0.02 b	26.93±0.76 c	8.26±0.37 cd	67.50±4.50 c	1.34±0.06 c
	WP	D-D	4.71±0.03 b	28.12±0.27 b	11.50±0.35 a	75.83±5.78 ab	1.48±0.02 ab
		N-D-D	4.60±0.07 b	27.12±0.40 bc	8.94±0.48 c	60.83±1.44 d	1.40±0.10 bc
晚稻 Later Rice	CF	D-D	4.93±0.09 a	26.94±0.84 a	8.86±0.50 a	71.67±4.22 ab	1.40±0.07 a
		N-D-D	4.86±0.04 a	24.56±058 b	6.87±0.56 c	69.17±3.82 ab	1.32±0.05 ab
	RC	D-D	4.97±0.04 a	26.80±0.52 a	8.55±0.41 ab	80.83±6.61 a	1.39±0.07 a
		N-D-D	4.92±0.09 a	24.85±0.64 b	6.06±0.21 d	75.00±3.82 a	1.21±0.09 b
	WI	D-D	4.98±0.08 a	25.77±0.63 ab	7.72±0.26 b	64.17±5.20 b	1.29±0.03 b
		N-D-D	4.87±0.04 a	23.38±0.37 c	6.35±0.47 cd	73.33±1.44 ab	1.22±0.10 b
	WP	D-D	4.95±0.10 a	24.89±0.37 b	9.28±0.55 a	76.67±5.33 a	1.33±0.12 ab
		N-D-D	4.90±0.04 a	23.84±0.34 c	6.96±0.57 bc	75.00±5.00 a	1.27±0.04 b

注(Note):CF—持续淹水 Continuously flooded;RC—垄作 Ridge Culture;WI—湿润灌溉 Wet Irrigation;WP—冬季晒阀 Winter Plough;D-D—工程排水 Ditching drainage;N-D-D—无工程排水 Non ditching drainage. 同一列数值后不同字母表示 $P<0.05$ 水平上差异显著 Values followed by different letters in a column stand for values significant differences($P<0.05$).

提高湿润灌溉和冬季晒阀处理土壤有机质9.5%、3.7%,提高垄作、湿润灌溉和冬季晒阀处理土壤全氮10.2%、12.7%和5.7%。在晚稻收获后,不同农业措施之间土壤养分没有显著差异。与无工程排水相比,工程排水下持续淹水处理土壤有机质、速效磷、速效钾和全氮分别提高13.8%、50.9%、3.6%和6.6%;垄作处理土壤有机质、速效磷和全氮分别提高65.0%、41.1%和14.9%;湿润灌溉处理土壤有机质、速效磷分别提高10.2%和21.6%;冬季晒阀处理土壤速效磷增加55.4%。总体上表现出工程排水处理土壤养分含量高于无工程排水,垄作等优化农业措施土壤养分高于持续淹水处理;早稻收获后土壤养分含量高于晚稻收获后。

2.7 工程排水和农业措施对土壤阳离子交换量的影响

不同稻田管理方式对潜育化稻田土壤阳离子交换量的影响见图1(2012年晚稻收获后测定)。除冬季晒阀副处理外,工程排水显著提高了持续淹水、垄作和湿润灌溉副处理下土壤阳离子交换量。工程

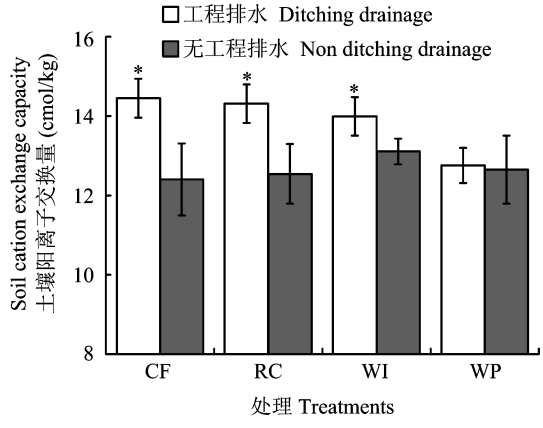

图1 不同管理方式稻田土壤阳离子交换量(2012年晚稻收获后)

Fig. 1 The soil cation exchange capacity under different field agronomic managements in gleyed paddy field (after 2012 later rice harvest)

[注(Note):CF—持续淹水 Continuously flooded;RC—垄作 Ridge Culture;WI—湿润灌溉 Wet Irrigation;WP—冬季晒阀 Winter Plough.]

排水条件下,冬季晒阀处理土壤阳离子交换量显著减少;而无工程排水条件下,不同农业措施之间土壤阳离子交换量没有显著差异。

2.8　工程排水与农业措施改良潜育化稻田影响效应分析

采用双因素方差分析,分析了工程排水及农业措施对潜育化稻田水稻产量、土壤还原物质总量及养分状况的影响效应(表 7)。表明工程排水措施对土壤还原物质总量、水稻产量、速效磷和全氮有显著影响,对土壤有机质和速效钾含量没有显著影响。农业措施对土壤还原物质总量和土壤速效钾含量有显著影响,对水稻产量、有机质、速效磷和全氮含量没有明显影响。

表 7　不同工程排水和农业措施下潜育化稻田水稻产量、土壤还原物质总量及养分状况的响应

Table 7　The effect of ditching drainage and agronomic managements on rice yield, soil total reducing substances and soil nutrient contents in gleyed paddy field

项目 Item	还原物质总量 Soil total reducing substances			水稻产量 Rice yield			有机质 Organic matter		
	P	SS	F	P	SS	F	P	SS	F
工程排水 Ditching drainage	6.10	11.15	0.01**	38781.8	11.7	0.01**	42.71	2.64	0.11
农业措施 Agronomic managements	11.14	6.79	0.01**	36165.1	3.6	0.16	36.98	0.76	0.52

项目 Item	速效磷 Available P			速效钾 Available K			全氮 Total N		
	P	SS	F	P	SS	F	P	SS	F
工程排水 Ditching drainage	85.87	22.06	0.001**	6.38	0.12	0.73	0.12	12.31	0.001**
农业措施 Agronomic managements	0.95	0.08	0.97	495.18	3.11	0.04*	0.03	0.82	0.49

注(Note): * —$P<0.05$; * * — $P<0.01$.

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,长期渍水是导致稻田潜育化的最主要原因[1-3]。因此,减少稻田积水、降低地下水位和增加土壤通气性是改良潜育化稻田最有效的方法[1,5]。

土壤还原物质总量是反映潜育化稻田潜育化程度的核心指标,本研究中工程排水及垄作、湿润灌溉、冬季晒阀等农业措施都在一定程度上降低了土壤还原物质总量,这主要是因为开沟排水等工程控水措施降低了潜育化稻田的地下水水位、及时排出了多余的积水,消除了引起稻田潜育化的最主要影响因素,土壤还原物质总量因而减少。而垄作、湿润灌溉、冬季晒阀等栽培管理技术是调节稻田水分状况、改善土壤通气性和物理结构的重要农艺管理措施[9-12,17],这些措施在减少稻田渍水的同时,可以加强土壤与空气的接触,改善土壤通气状况,增加土壤的氧气输入,这对减轻土壤还原状况,氧化有毒离子有显著的作用,所以采用垄作、湿润灌溉、冬季晒阀等农业措施也可以降低耕层土壤还原物质总量,其中以垄作的效果最明显,无其他辅助措施下可减少土壤还原物质总量 0.79 ～1.54 cmol/kg。而工程排水与农业措施相结合降低土壤还原物质总量的作用更明显,可减少土壤还原物质总量 0.93 ～1.87 cmol/kg。

土壤团聚体是土壤养分的贮存库和各种土壤微生物的生境[18],对土壤养分的保持和供应及土壤生物的活性有显著影响[19-20],而水稳性团聚体的数量和分布状况则可以反映土壤结构的稳定性和抗侵蚀的能力[21]。土壤结构差,即“烂”,也是潜育化稻田一个重要的障碍因子。本研究中,工程排水仅对冬季晒阀处理 < 1 mm 的土壤水稳性团聚体含量产生了明显影响,而其他处理对土壤水稳定性团聚体组

成均没有明显影响,这可能与潜育化双季稻田水分扰动大且耕作频繁有关。

土壤腐殖质组成和含量及土壤阳离子交换量是评价土壤养分供应状况的重要指标。潜育化水稻土全量养分丰富,但土壤矿化度低,有效养分偏少,因此,改善潜育化稻田土壤养分供应状况,提高土壤养分有效性也是改良潜育化水稻土的重要途径。本研究中,工程排水显著提高了垄作和冬季晒阀处理的土壤腐殖酸碳含量,且腐殖酸碳增加的主要成分为富里酸碳,而胡敏酸碳含量没有显著变化。农业措施中,工程排水条件下冬季晒阀处理土壤腐殖酸碳含量偏高,其他农业措施间没有明显差异。造成这一现象的主要原因可能是工程排水及垄作和冬季晒阀等措施改变了土壤氧化还原状况,加速了秸秆等有机物残体的分解矿化,促进了有机碳的累积和组成成分的优化。除冬季晒阀以外,工程排水显著提高了其他农业措施土壤阳离子交换量。土壤腐殖酸碳含量和阳离子交换量的增加在一定程度上改善了潜育化稻田的养分状况,本研究中,工程排水与对应的无工程排水处理相比土壤养分含量均有一定程度的提高,其中以有效磷和全氮最为明显;农业措施之间土壤养分含量没有明显差异。

土壤还原物质总量降低及养分状况改善减轻了还原物质对水稻根系发育的毒害,促进了作物对养分的吸收[5,7],这为提高水稻产量奠定了基础。本研究中,工程排水处理水稻产量均有提高,其中两季早稻产量均提高 0.9 t/hm^2 以上,效果明显,这与此前相关的报道一致。与持续淹水相比,垄作、湿润灌溉、冬季晒阀等栽培管理措施的水稻产量也有明显的提高;其中垄作的效果最明显,水稻产量每季提高 0.6 t/hm^2 以上,与垄作抬高土壤耕层、减少渍水及表层土壤通气状况良好有关[9-10,17],这与厢式免耕提高冷浸田水稻的产量结果一致[22]。受工程排水造成的养分流失等原因影响,不同处理间植株养分含量差异没有明显规律。本研究中,工程排水与优化农业措施相结合改良潜育化稻田的效果更为明显。因此,在采用工程排水措施改良潜育化稻田的同时,还应加强水稻的栽培管理,以便更好地发挥潜育化稻田的增产潜力。

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,工程排水及栽培管理措施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。这主要与湖区潜育化稻田自身的特点有关,湖区潜育化稻田潜在养分丰富、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,潜育化程度加剧,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。此外,近年来试验区极端天气的出现频率增加,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

工程排水可以显著降低土壤还原物质总量,提高土壤阳离子交换量、速效磷、全氮含量,垄作、湿润灌溉和冬季晒阀等农业措施也可降低土壤还原物质总量,提高土壤养分含量及改善养分供应状况,其中垄作的作用最明显。工程排水及优化农业措施均可以提高水稻产量,其中工程排水与垄作相结合效果最明显,每季增产可达 1.11 ~ 1.89 t/hm^2。因此,在采用工程排水措施改良鄱阳湖区潜育化稻田时,还应加强稻田的栽培管理。

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 gleyzation 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