https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.953

江汉平原富硒冷浸田的利用模式

万 能[1],孙 科[1],范伟国[1],田 欢[2],严 森[1],谢淑云[1],向 武[1],鲍征宇[1,2*]

1. 中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074
2. 中国地质大学材料与化学学院,湖北武汉 430074

摘 要: 江汉平原是中国四大粮仓之一,拥有约69万公顷富硒土壤,大部分为冷浸田,如何利用富硒冷浸田种植富硒水稻是当前亟需研究解决的重大实际问题.以排水整改、强化施硒肥和排水整改后施硒肥3种模式开展了江汉平原富硒冷浸田的大田种植实验.结果表明,在排水整改模式下,排水降低了冷浸田地下水位,提升了土壤的通气性和氧化还原电位,加快了土壤中有机结合态硒向可利用态硒转化,使得土壤可利用态硒比整改前提高25.0%;促进了水稻对硒的吸收,使得水稻根系和籽实中硒含量比整改前分别增加20.6%和8.3%,仅茎干中硒含量无明显变化.在强化施硒肥模式下,每亩施加80 kg硒肥后土壤可利用态硒比施肥前提高41.7%;极大地促进了水稻对硒的吸收,使得水稻根系、茎秆、籽实中硒含量比施肥前分别提升79.4%、37.1%、25.0%.在冷浸田排水整改后每亩施加80 kg硒肥模式下,土壤可利用态硒含量和水稻根系、茎干、籽实中硒含量分别增加50.0%和41.8%、46.1%、47.9%.总之,上述3种利用模式均可提高土壤可利用态硒含量,有利于水稻对土壤硒的吸收,能够显著提高水稻籽实中硒含量;冷浸田排水整改后强化施硒肥利用模式效果最佳.

关键词: 硒;冷浸田;利用模式;土壤;水稻;地球化学.

中图分类号: P595 **文章编号:** 1000-2383(2020)03-1041-10 **收稿日期:** 2019-02-24

The Utilization Mode of Cold Waterlogged Paddy Field in Jianghan Plain

Wan Neng[1], Sun Ke[1], Fan Weiguo[1], Tian Huan[2], Yan Sen[1], Xie Shuyun[1], Xiang Wu[1], Bao Zhengyu[1,2*]

1. *School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*
2. *Faculty of Materials Science and Chemistry, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*

Abstract: As one of the four granaries in China, Jianghan Plain has approximately 690 thousand hectares of seleniferous soil, most of which are cold waterlogged paddy field. How to utilize the seleniferous cold waterlogged paddy field to cultivate selenium-enriched rice is a major practical problem that needs to be solved urgently. In order to find the best utilization mode of seleniferous cold waterlogged paddy field in Jianghan Plain, this study conducted field experiments using three different utilization modes, namely drainage mode, selenium fertilizer amendment mode, drainage and selenium fertilizer amendment mode. The results show that under the drainage mode both bioavailable Se content in soil and Se content in rice grain increased by 20.6% and 8.3% respectively, compared to those in control samples, because drainage decreased the groundwater table level and improved the aeration and redox potential in soil, thus accelerated the organic-bound selenium transform to bioavailable selenium in soil, and promoted the uptake of selenium by rice. Under the selenium fertilizer amendment mode, the bioavailable selenium content in soil increased by 41.7% after applying selenium fertilizer than that in control without selenium fertilizer, which greatly promoted the uptake of selenium by rice, and the selenium contents in rice root, straw and grain increased by 79.4% 37.1% and 25.0%, respectively. Under the drainage and selenium fertilizer amendment mode, the bioavailable selenium content in soil and selenium

基金项目: 中国地质调查局项目(Nos. 1212011120324, 12120113087100, 12120113087000);中央高校基本科研业务费专项资金(No.CUG170104).
作者简介: 万能(1986-),男,博士研究生,研究方向为环境地球化学. ORCID: 0000-0003-2602-269X. E-mail: 414572124@qq.com
***通讯作者:** 鲍征宇, ORCID: 0000-0002-2928-4356. E-mail: zybao@cug.edu.cn

引用格式: 万能,孙科,范伟国,等,2020.江汉平原富硒冷浸田的利用模式.地球科学,45(3):1041-1050.

contents in rice root, straw, and grain increased by 50.0%, 41.8%, 46.1% and 47.9% respectively than those in the control samples. This study demonstrates that all the three utilization modes mentioned above can increase the bioavailable selenium content in the cold waterlogged paddy soil, which is beneficial to the uptake of selenium from soil by rice, and can significantly increase the content of selenium in rice grain. Overall, the drainage and selenium fertilizer amendment is the best mode for the utilization of seleniferous cold waterlogged paddy soil.

Key words: selenium; cold waterlogged paddy field; utilization mode; soil; rice; geochemistry.

硒是地球表层中的一种稀有分散元素,也是人体必需的微量元素,是谷胱甘肽过氧化物酶和硫氧化还原酶的重要组分(Jones *et al.*, 2017; 李海蓉等, 2017; Dinh *et al.*, 2018).人体缺硒会导致克山病和大骨节病等(中国科学院地理研究所环境与地方病研究组, 1986; Lü *et al.*, 2014),摄入适量硒可以提高人体抗氧化能力、增强免疫力、抗衰老和预防癌变等(Xu *et al.*, 2018).硒的特殊生理功能使其成为最受关注的微量元素之一,目前硒已成为医学、地球化学和农学等学科的研究热点(Tian *et al.*, 2016a, 2016b; 梁东丽等, 2017;马丽佳等, 2017; Hussain *et al.*, 2018; Long *et al.*, 2018).据报道,中国约72%的地区处于严重缺硒或低硒状态,约7亿人生活在低硒地区,通过膳食补硒已成为这些地区人群摆脱缺硒状态的主要途径(Williams *et al.*, 2009;李海蓉等, 2017; 孙国新等, 2017).人体主要通过粮食作物吸收利用土壤中的硒(Williams *et al.*, 2009; Long *et al.*, 2018; Shen *et al.*, 2019),而硒在土壤中分布极不均匀,我国主要农耕区表层土壤硒含量范围为0.005~0.754 mg/kg,平均值0.217 mg/kg(王锐等, 2017).前人研究发现我国存在一条从东北到西南的低硒带(中国科学院地理研究所环境与地方病研究组,1986),缺硒省份多达22个,只有极少数地区存在富硒土壤资源(李海蓉等, 2017; 王锐等, 2017).近年来,我国开展的多目标地球化学调查在江汉平原发现较大面积富硒冷浸田资源,开发利用这些富硒冷浸田种植富硒水稻具有极大的社会意义和经济价值.

冷浸田是指山丘谷地受冷水、冷泉长期浸渍或湖区滩地受地下水长期浸渍的强还原性 低产水稻田(柴娟娟等, 2012; 董稳军等, 2013, 2014),又称冷浸性水稻土,是我国低产水稻土的主要类型之一,广泛分布于我国南方山区丘陵谷地和冲积平原的低洼地带(邓青军等, 2014).最近多目标地球化学调查在江汉平原发现约69万公顷富硒土壤(万能等,2017),大部分为富硒冷浸田,即土壤总硒含量高于400 μg/kg的冷浸田,如何利用这些富硒冷浸田种植富硒水稻是当前亟需研究解决的现实问题.长期渍水是冷浸田强潜育型土壤形成的重要原因,排除渍水是开发利用冷浸田的首要技术措施(王飞等, 2015a, 2015b, 2016).通过开沟排水、降低冷浸田地下水位、截断地面和地下水源、排除冷水和锈水等方式可较快地提高土温,使土壤空气增多、氧化还原电位升高、微生物活性增强、养分分解加快,从而作物可吸收的有效养分增加,为水稻生长发育提供较适宜的土壤环境(王飞等, 2015a, 2015b).因此,排除渍水是富硒冷浸田开发利用的基本策略,是强化施硒肥等其他利用措施得以实施的前提条件(刘杰等, 2015, 2016; Liu *et al.*, 2016, 2018; Si *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018).目前有关冷浸田改造利用以提高水稻产量的研究较多(刘杰等, 2015, 2016; 林诚等, 2016; Liu *et al.*, 2016; 解开治等, 2016; Si *et al.*, 2018),而有关富硒冷浸田开发利用种植富硒水稻的研究成果尚未有公开报道.本文以江汉平原富硒冷浸田为研究对象,采用排水整改、强化施硒肥和排水整改后施硒肥3种模式开展大田种植实验,旨在探究不同利用模式下江汉平原富硒冷浸田土壤和水稻中硒的迁移富集规律,提出生产富硒水稻的合理利用模式,为江汉平原富硒农业发展提供科学指导.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

江汉平原是我国重要的粮食产区和农产品生产基地,享有“鱼米之乡”的美誉,位于长江中游的湖北省中南部,西起枝江、东止武汉、北至钟祥、南望洞庭湖滨,是长江中上游最大的冲积平原,总面积约3.8×10^4 km^2.江汉平原地势自西北向东南呈1°~2°微倾斜,高程多在50 m以下,西高东低.江汉平原冷浸田主要分布于东南部四湖地区及周边岗状平原、西部山区山冲及垅田、中部的广大平原及岗地地区,尤以东南部面积最大、分布最集中.江汉

平原富硒冷浸田主要特征是地下水位埋深浅(鲁宗杰等,2017;郑天亮等,2017),终年积水长期浸泡使土壤水分处于饱和状态.土壤剖面构型为A-G型或AG-G型,其特点为土粒分散、呈稀泥糊浆状、通透性差且水温土温低,造成耕作层微生物数量下降、种类减少、生化反应弱(邓青军等, 2014).虽然冷浸田有机质含量高但有效养分不足,氧化亚铁等毒性还原性物质充斥土体,导致一系列土壤性质的恶化,不利于作物根系生长,从而成为"冷、烂、毒、瘦"的低产田,严重影响当地水稻等农作物的生长(柴娟娟等, 2012; 王飞等, 2016).本研究的野外试验田位于江汉平原腹地的荆河村,隶属于潜江市积玉口镇,地处荆州、荆门和潜江三市的交界处.

1.2　实验方法

在荆河村选取具有代表性的4块富硒冷浸田,每块约1 333 m^2,经取样分析证实所选试验田的土壤理化性质和硒含量等基本一致;从统计学意义上看,$p>0.05$,无显著性差异.其中1块作为对照组,其余3块分别采用排水整改、强化施硒肥和整改后强化施硒肥利用模式处理.其中排水整改模式主要采用明沟排除水渍,明排沟渠规格为沟宽30 cm、沟深25 cm,降低地下水位,提高土壤的通气性.强化施硒模式采用土壤施硒的方式人为施加矿物硒肥,供试硒肥为活化硒矿粉,硒肥Se含量为84 mg/kg,在水稻插播前每亩施加80 kg,采用底施后翻耕的方式进行,以进一步提高土壤硒和有效硒含量、促进水稻对硒的吸收富集.整改后强化施硒肥模式是在冷浸田排水整改后,再做相同的强化施硒肥处理.上述试验田均采用相同方式栽培同种水稻,水稻品种为鄂早18,日常田间管理方式均一致,尽量保证光照和温度等其他变量一致.

1.3　样品采集与测试方法

在水稻成熟后采集水稻和土壤样品,其中水稻样品整株采集,然后按组织分为根系、茎干和籽实样品;土壤样品采集水稻对应的根系土壤样品,每个样品取3个点混匀作为1件样品.3种不同利用模式组和对照组各采集10件水稻和土壤样品,共采集水稻和土壤样品各40件.上述样品采集后于4 ℃冷藏,并迅速送回实验室处理.水稻组织和土壤样品经风干后分别采用粉碎机和玛瑙研钵制成160目粉末,采用密闭微波消解-原子荧光光谱法测试硒含量(范博伦等, 2017),采用国家一级土壤和植物标准物质进行质量控制;标样测试结果与推荐值十分吻合,准确度介于96%~103%之间,精密度<5%,表明样品测试分析准确可靠.土壤样品除分析土壤总硒含量外,采用连续浸提法分步提取土壤中不同赋存形态的硒(田欢等, 2014; Tian *et al.*, 2016a, 2016b; Qin *et al.*, 2017),将其分为水溶态、可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、硫化物结合态、有机结合态和残渣态,以上各形态硒的加和量相当于土壤测定总硒含量的85%~115%.鉴于上述硒形态的生物可利用性不同,本文将水溶态和可交换态作为可利用态硒,碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和硫化物结合态作为潜在可利用态硒,便于探讨不同利用模式下土壤硒形态的变化规律及其对水稻富集硒的影响.

2　结果与讨论

2.1　试验田土壤特征

试验田土壤呈弱碱性,pH值为7.52,土壤有机质含量为32.4 g/kg,氧化还原电位为-272 mV.土壤总硒含量为424 μg/kg,约为全国土壤总硒平均含量的2倍,其中可利用态硒含量为12 μg/kg,潜在可利用态硒含量为7 μg/kg,分别占总硒的2.8%和1.6%;有机结合态硒和残渣态硒含量分别为265 μg/kg和140 μg/kg,占总硒的62.5%和33.1%.有机结合态硒占比最高,反映出冷浸田强还原性和有机质高的自身特征,表明有机结合态硒向可利用态和潜在可利用态硒转化的潜力较大.

2.2　排水整改模式

2.2.1　排水整改对土壤硒的影响　排水整改模式主要采用明沟排除渍水,降低地下水位,提高土壤的通气性和氧化还原电位.排水整改前后试验田土壤总硒平均含量相当,分别为424 μg/kg和406 μg/kg,仅相差4.2%;经统计学检验无显著性变化,p值为0.472,表明排水整改基本不影响土壤总硒含量,这是因为冷浸田土壤中硒以有机结合态硒为主,水溶态硒含量极低.尽管排水整改模式基本没有影响土壤总硒含量,却显著提高了土壤透气性和氧化还原电位,土壤Eh提高幅度为30.5%~42.4%,从而促进了土壤中硒赋存状态的明显改变.整改前后土壤各形态硒含量如图1所示,由图可知,土壤整改后,可利用态硒平均值从12 μg/kg上升至15 μg/kg,提高了25.0%;潜在可利用态硒平均值从7 μg/kg上升到12 μg/kg,提高了71.0%;有机结合态硒平均值则从265 μg/kg下降到198 μg/kg;而残渣态硒平均

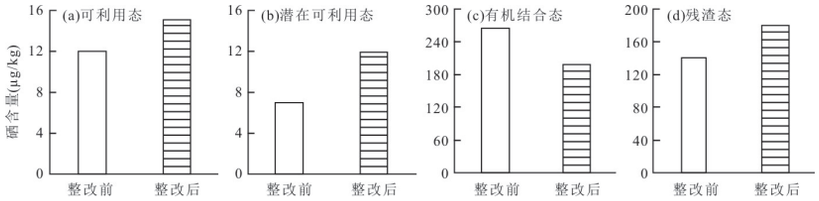

图1　排水整改前后土壤硒形态变化

Fig.1　Selenium speciation in cold waterlogged paddy soils before and after drainage treatment

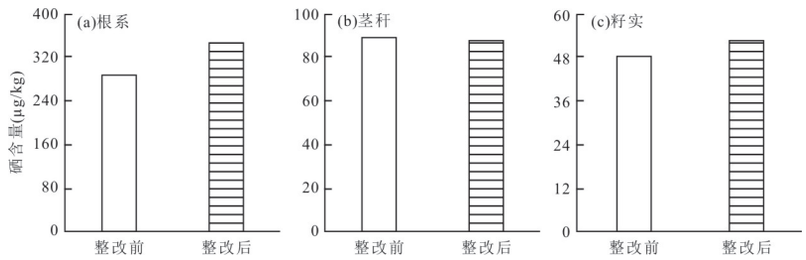

图2　排水整改前后水稻组织硒含量对比

Fig.2　Selenium contents in rice tissues before and after drainage treatment

值则从140 μg/kg增加到181 μg/kg.

上述结果表明排水整改后,土壤中有机结合态硒明显向可利用态和潜在可利用态硒转化,可利用态和潜在可利用态硒含量的显著增加表明土壤硒的生物可利用性得到改善.排水整改促进了土壤有机结合态硒向可利用态硒转化,其影响机理主要是通过开沟排水降低冷浸田地下水位,不仅增加了土壤的通气性,而且提高了土壤pH值、氧化还原电位和阳离子交换量(CEC)(董稳军等,2014;王飞等,2015a,2015b),使得有机结合态硒难以粘附在土壤颗粒表面,更容易向可利用态和潜在可利用态硒转化.排水整改后土壤pH值从7.52增长到7.90,土壤变得更富碱性,这与前人发现排水后土壤pH有一定程度提升的现象一致(董稳军等,2014).此外,CEC从18 cmol/kg增加到26 cmol/kg,这些参数变化表明排水整改措施有利于土壤硒赋存形态的转变.

2.2.2　排水整改对水稻硒的影响　如前所述,排水整改促进了土壤有机结合态硒向可利用态硒和潜在可利用态硒转化,有利于提高土壤硒的生物可利用性,最终是否会促进水稻对硒的吸收富集?试验田排水整改前后水稻组织硒含量如图2所示.由图2可知,排水整改后,水稻根系和籽实硒含量均呈增加趋势,根系中硒含量从287 μg/kg上升至346 μg/kg,提升了20.6%,而籽实中硒含量从48 μg/kg提高到52 μg/kg,提升了8.3%;茎秆中硒含量则基本不变,从整改前的89 μg/kg变为整改后的88 μg/kg.统计检验结果表明,水稻根系和籽实硒含量在排水整改后提升具有显著意义,显著性水平分别为$p<0.01$和$p<0.05$.

综合排水整改前后土壤和水稻中硒含量的对比情况,证明排水整改加快了土壤有机结合态硒向可利用态硒转化,土壤可利用态硒的增加促进了水稻从土壤中吸收硒,最终使得水稻根系和籽实中硒含量均有增加.

2.3　强化施硒肥模式

2.3.1　强化施硒肥对土壤硒的影响　强化施硒肥前后试验田土壤硒形态的变化如图3所示.由图3可知,施硒肥后,试验田土壤总硒为460 μg/kg,比施硒肥前的424 μg/kg增加36 μg/kg,提升8.5%,强化施硒肥提高了土壤总硒含量;从统计意义上来说,提升幅度不够显著,$p>0.10$.可能是因为冷浸田没有排水整改,土壤理化性质没有改变,而且硒肥中活性态硒比例高、容易流失,导致人为强化施加的外源硒肥不易保存在冷浸田土壤中(解开治等,2016).在强化施硒肥模式下,尽管部分活性态硒存在流失的可能,但土壤可利用态硒在强化施硒肥后从12 μg/kg增至17 μg/kg,提高了41.7%;潜在可利用态硒从7 μg/kg增至30 μg/kg;有机结合态硒从265 μg/kg上升到336 μg/kg;只有残渣态硒从140 μg/kg下降到77 μg/kg.经统计检验,土壤中上述形态硒含量的改变均具有显著性,显著性水平$p<0.01$.残渣态在施硒肥后含量下降的原因可能是不同田块土壤硒赋存形态的差异,后

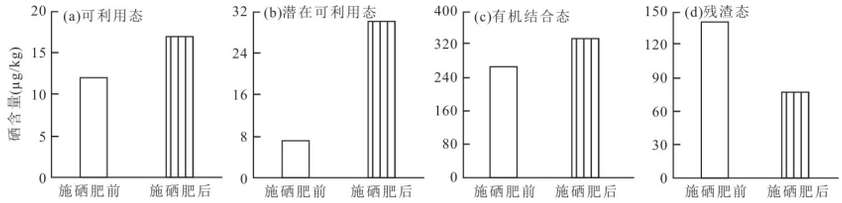

图 3　施硒肥前后试验田土壤硒形态变化

Fig.3　Selenium speciation in soils before and after applying selenium fertilizer

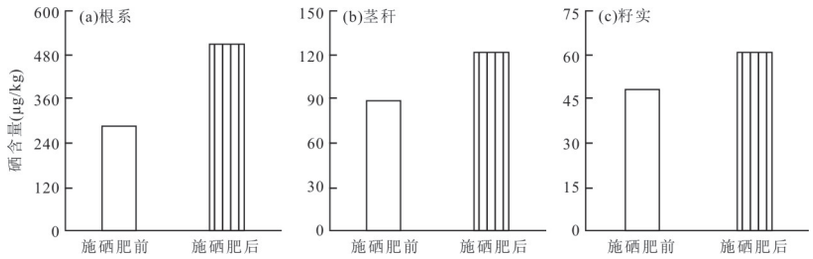

图 4　施硒肥前后水稻组织硒含量对比

Fig.4　Selenium contents in rice tissues before and after applying selenium fertilizer

期需做进一步探究.

综上所述,虽然强化施硒肥后土壤总硒增加 8.5%,除残渣态硒含量有所下降外,其余各形态硒均明显增加,尤其是可利用态硒和潜在可利用态硒,前者提升约一半,后者更是成倍增加.这说明强化施硒明显增加了土壤可利用态硒和潜在可利用态硒的含量,使得土壤中生物可利用性硒明显增加,从而促进了水稻对土壤硒的吸收利用,这与 Wang *et al.*(2018)通过施加外源硒肥提高土壤可利用态硒含量的研究结果一致.

2.3.2　强化施硒肥对水稻硒的影响　试验田强化施硒肥前后水稻组织硒含量的变化情况如图 4 所示.由图 4 可知,强化施硒肥后,水稻各组织中硒含量都明显升高,根系平均硒含量从 287 μg/kg 上升至 515 μg/kg,提升约 1 倍;茎秆平均硒含量从 89 μg/kg 提升至 122 μg/kg;籽实平均硒含量从 48 μg/kg 增加到 60 μg/kg.

综合土壤和水稻组织中硒的分布特征,说明强化施硒肥明显提高了土壤总硒和可利用态硒的含量,使得水稻组织能更好地从土壤中吸收硒,并且水稻根系、茎干和籽实中硒含量均明显增加.

2.4　排水整改后强化施硒肥模式

排水整改模式和强化施硒肥模式均能提高土壤可利用态硒含量,从而促进水稻吸收富集硒.前者在不改变土壤总硒的情况下,通过排除渍水改良土壤理化条件,使得土壤有机结合态硒向可利用态硒转化;后者则通过强化施加外源硒肥,直接提升土壤总硒和可利用态硒.如前所述,冷浸田排水整改是采取其他措施综合整治利用冷浸田的基础,鉴于此,本研究开展了排水整改后强化施硒肥的大田种植试验,并和前述 2 种模式对比,以探究富硒冷浸田的最佳利用模式.

2.4.1　排水整改后强化施硒肥对土壤硒的影响　排水整改后强化施硒肥前后土壤硒形态变化如图 5 所示.由图 5 可知,在排水整改后强化施硒肥模式下,土壤总硒含量平均值从 424 μg/kg 提升至 543 μg/kg,增加 119 μg/kg,提升 28.1%;土壤可利用态硒含量平均值从 12 μg/kg 上升至 18 μg/kg,提高 50%;潜在可利用态硒含量平均值从 7 μg/kg 上升至 22 μg/kg;有机结合态硒含量平均值从 265 μg/kg 上升至 376 μg/kg;而残渣态硒含量平均值从 140 μg/kg 下降至 127 μg/kg.通过与单独排水整改模式或单独强化施硒肥模式比较,可以间接估算施肥和排水整改对可利用态硒增加部分的贡献率分别为 75% 和 25%.与排水整改的贡献相比,强化施硒肥对增加土壤可利用态硒更具有主导作用.但与前文强化施硒肥造成的土壤硒增加量 36 μg/kg 相比,排水整改后施肥使土壤硒增加了 119 μg/kg,相差甚远,说明强化施肥过程确实导致大量硒的流失.这种人工施硒肥模式导致大量硒进入水体,造成局部水体短期硒含量迅速升高,存在一定的生态风险,需要在后续研究中特别关注.

综上所述,在排水整改后强化施硒肥模式下,土壤总硒提升至 543 μg/kg,增幅最高,达 28.1%.在

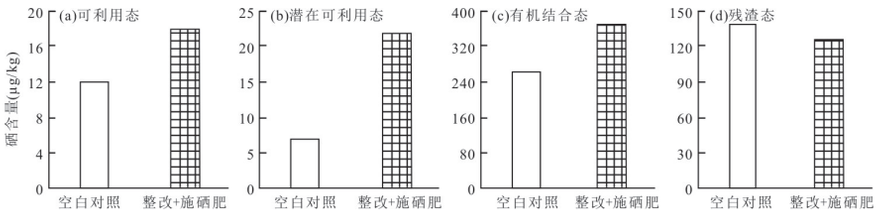

图5　排水整改后强化施硒肥前后土壤硒形态变化

Fig.5　Selenium speciation in soils before and after drainage and selenium fertilizer application

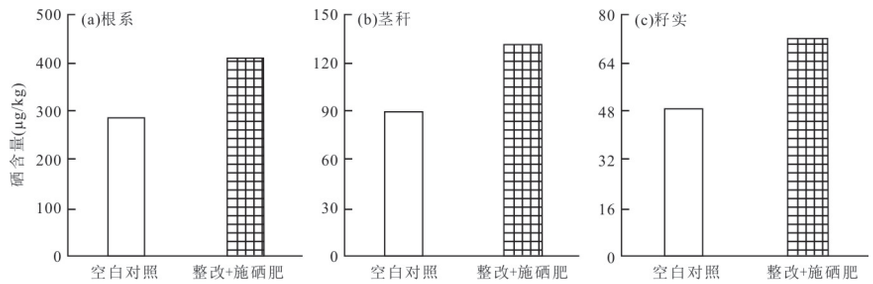

图6　排水整改后强化施硒肥对水稻组织硒含量的影响

Fig.6　Selenium contents in rice tissues before and after drainage and selenium fertilizer application

土壤硒形态方面，除残渣态硒含量下降外，其余各形态硒均明显提升，尤其是可利用硒和潜在可利用硒，前者提升50%，后者增加2倍多．土壤总硒和可利用态硒含量的明显增加，为水稻吸收富集硒元素奠定了良好基础．

2.4.2　排水整改后强化施硒肥对水稻硒的影响　排水整改后强化施硒肥模式下水稻组织中硒含量变化如图6所示．由图6可知，排水整改强化施硒肥后，水稻组织硒含量均明显增加，根系中硒含量平均值从287 μg/kg上升至407 μg/kg；茎秆硒含量平均值从89 μg/kg上升至130 μg/kg；籽实硒含量平均值从48 μg/kg增加至71 μg/kg，提升47.9%，籽实硒含量的增加幅度在3种利用模式中最大．

土壤硒和水稻组织中硒含量的变化情况表明，在冷浸田排水整改的基础上强化施硒肥有利于水稻对硒的吸收，并且水稻组织中硒含量增加明显，特别是籽实中硒含量增幅可达47.9%，为3种利用模式中最大增幅．

2.5　三种利用模式比较

综上所述，排水整改、强化施硒肥和排水整改后强化施硒肥3种模式均可增加土壤可利用态硒含量，提高土壤硒的生物可利用性，促进水稻对硒的吸收．下面从3种利用模式下土壤硒和水稻硒的对比来探讨富硒冷浸田的最佳利用模式，为富硒冷浸田开发和富硒水稻种植提供科学指导．

2.5.1　三种利用模式对土壤硒的影响　由图7可知，在排水整改后强化施硒肥模式下，土壤总硒含量平均值为543 μg/kg，要明显高于排水整改模式406 μg/kg和强化施硒肥模式460 μg/kg；这是因为排水整改改良了土壤环境，有利于硒肥在土壤中保存，从而进一步提高了土壤总硒含量．在土壤硒形态方面，可利用态硒在排水整改后强化施硒肥模式下含量最高，可达18 μg/kg，这是排水整改和强化施硒肥的共同作用所致，如前所述，两者对土壤可利用态硒增加的贡献率分别约占25%和75%．潜在可利用态硒在强化施硒肥模式下最高，可达30 μg/kg，表明在没有排水整改的情况下，单独强化施硒最有利于潜在可利用态硒在土壤中累积．有机结合态硒虽然在土壤硒中占比较高，但其生物可利用性较低，需要转化为水溶态或离子交换态等形态才能较好地被水稻吸收；有机结合态硒在排水整改后强化施硒肥模式下含量最高，可为后续硒形态转化和利用提供物质基础．残渣态硒在土壤中活动性和生物可利用性最低，基本不可能被水稻吸收利用．虽然潜在可利用态硒在排水整改后强化施硒肥模式低于强化施硒肥模式，但潜在可利用态硒向可利用态硒转化受诸多因素影响，难以全部转化，因此潜在可利用态硒不是评价土壤硒生物可利用性的最佳指标．总体而言，可利用态硒是评价土壤硒生物可利用性的最有效指标；从可利用态硒来看，排水整改后强化施硒肥模式最有利于水稻吸收利用土壤中的硒．

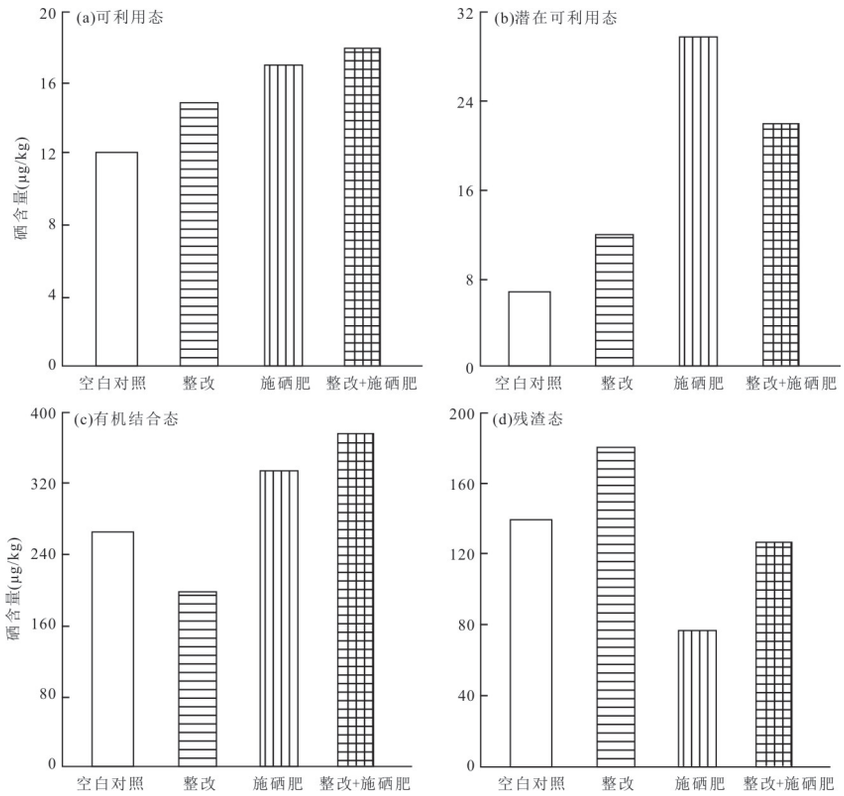

图 7　三种利用模式对土壤硒形态的影响

Fig.7　Selenium speciation in waterlogged paddy soils under three treatments

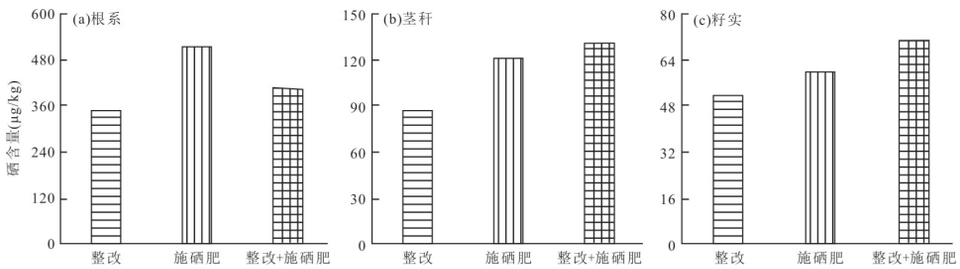

图 8　三种利用模式下水稻组织硒含量分布

Fig.8　Selenium contents in rice tissues under three treatments

2.5.2　三种利用模式对水稻硒的影响　由图 8 可知,水稻根系硒含量明显高于茎秆和籽实,这是因为水稻主要通过根系吸收利用土壤中的硒元素,然后从根系向地上组织输送硒,使得根系硒含量通常占水稻总硒含量的 50% 以上(罗杰等,2012; Gupta and Gupta, 2017).水稻是否富硒主要取决于水稻籽实中硒含量的高低,3 种利用模式下水稻籽实硒含量均超过国家富硒水稻标准值(40 μg/kg),而在排水整改后强化施硒肥模式下水稻籽实硒含量最高,可达 71 μg/kg,这样高含量的富硒大米可以极大促进人体通过膳食补硒.此外,笔者对 3 种模式下的水稻籽实样品进行了重金属含量抽检,未发现重金属超标现象,表明 3 种模式下种植的水稻是绿色富硒产品.

综上所述,与单独排水整改模式和单独强化施硒肥模式相比,排水整改后强化施硒肥模式最有利于提高土壤总硒含量和可利用态硒含量,种植的水稻也最富硒,是富硒冷浸田开发利用的最佳模式.

3　结论

排水整改模式通过排水降低冷浸田地下水位,提高土壤透气性和氧化还原电位,明显促进土壤有机结合态硒向可利用态硒转化,有利于水稻对硒的吸收,使得水稻根系和籽实中硒含量增加.强化施

硒肥模式不仅明显提升土壤总硒含量、可利用态硒和潜在可利用态硒含量,而且显著提升水稻组织中硒含量.在冷浸田排水整改后强化施硒肥模式下,土壤可利用态硒含量、水稻根系、茎干和籽实中硒含量增幅最大,与对照组相比,分别增加50.0%、41.8%、46.1%和47.9%.实验结果表明在排水整改后强化施硒肥模式下种植的水稻富硒效果最好,这对富硒冷浸田开发利用具有现实指导意义.

References

Chai, J. J., Liao, M., Xu, P. Z., et al., 2012. Feature Analysis on Nutrient's Restrictive Factors of Major Low Productive Waterlogged Paddy Soil in China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 26(2): 284−288 (in Chinese with English abstract).

Deng, Q. J., Tang, Z. H., Chen, M. Z., et al., 2014. Suitability Assessment of Cold Spring Paddy Soil for Rice Planting in Jianghan Plain. *Safety and Environmental Engineering*, 21(3):60−64 (in Chinese with English abstract).

Dinh, Q. T., Cui, Z. W., Huang, J., et al., 2018. Selenium Distribution in the Chinese Environment and Its Relationship with Human Health: A Review. *Environment International*, 112: 294−309. https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.12.035

Dong, W. J., Xu, P. Z., Zhang, R. S., et al., 2013. Effects of Soil Amendments on Soil Properties and Population Quality of Rice in Cold Waterlogged Paddy Field. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 21(7): 810−816 (in Chinese with English abstract).

Dong, W. J., Zhang, R. S., Huang, X., et al., 2014. Effects of Open Ditch Drainage on Soil Physical and Chemical Properties and Yield of Rice in Cold Spring Paddy Soils. *Journal of Irrigation and Drainage*, 33(2): 114−116 (in Chinese with English abstract).

Fan, B. L., Ma, Z. Z., Tian, H., et al., 2017. HG-AFS Determination of Seleniumin Plants with Closed Digestion. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 53(8): 905−907 (in Chinese with English abstract).

Gupta, M., Gupta, S., 2017. An Overview of Selenium Uptake, Metabolism, and Toxicity in Plants. *Frontiers in Plant Science*, 7: 2074. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02074

Hussain, R., Luo, K. L., Chao, Z., et al., 2018. Trace Elements Concentration and Distributions in Coal and Coal Mining Wastes and Their Environmental and Health Impacts in Shaanxi, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(20): 19566−19584. https://doi.org/10.1007/s11356-018-2148-2

Jones, G. D., Droz, B., Greve, P., et al., 2017. Selenium Deficiency Risk Predicted to Increase under Future Climate Change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(11): 2848−2853. https://doi.org/10.1073/pnas.1611576114

Li, H. R., Yang, L. S., Tan, J. N., et al., 2017. Progress on Selenium Deficiency in Geographical Environment and Its Health Impacts in China. *Current Biotechnology*, 7(5):381−386 (in Chinese with English abstract).

Liang, D. L., Peng, Q., Cui, Z. W., et al., 2017. Progress on Selenium Bioavailibility and Influential Factors in Soil. *Current Biotechnology*, 7(5): 374−380 (in Chinese with English abstract).

Liu, J., Luo, Z. Z., Xiao, X. P., et al., 2015. Effects of Combined Application of Organic and Inorganic Fertilizers on Fertility and Rice Growth in Cold Spring Paddy Soil. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, (4):23−27 (in Chinese with English abstract).

Liu, J., Luo, Z. Z., Xiao, X. P., et al., 2016. Effects of Amendments on Soil Properties and Rice Growth in Cold Waterlogged Paddy Field. *Soils*, 48(3): 529−533 (in Chinese with English abstract).

Liu, Y. X., Lu, H. H., Yang, S. M., et al., 2016. Impacts of Biochar Addition on Rice Yield and Soil Properties in a Cold Waterlogged Paddy for Two Crop Seasons. *Field Crops Research*, 191: 161−167. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.03.003

Liu, Y. X., Yang, S. M., Lu, H. H., et al., 2018. Effects of Biochar on Spatial and Temporal Changes in Soil Temperature in Cold Waterlogged Rice Paddies. *Soil and Tillage Research*, 181: 102−109. https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.008

Long, Z. D., Yuan, L. X., Hou, Y. Z., et al., 2018. Spatial Variations in Soil Selenium and Residential Dietary Selenium Intake in a Selenium-Rich County, Shitai, Anhui, China. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 50: 111−116. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.06.019

Lu, Z. J., Deng, Y. M., Du, Y., et al., 2017. EEMs Characteristics of Dissolved Organic Matter and Their Implication in High Arsenic Groundwater of Jianghan Plain. *Earth Science*, 42(5):771−782 (in Chinese with English abstract).

Luo, J., Wang, J. Y., You, Y. H., et al., 2012. Migration and Transformation of Se in the Soil-Rice System. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science*

Edition), 37(3):60－66 (in Chinese with English abstract).

Lü, Y., Yu, T., Yang, Z. F., et al., 2014. Constraint on Selenium Bioavailability Caused by Its Geochemical Behavior in Typical Kaschin-Beck Disease Areas in Aba, Sichuan Province of China. *Science of the Total Environment*, 493: 737－749. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.050

Ma, L. J., Zhang, Z. Z., Yuan, L. X., et al., 2017. Study on Physiological Characterization of Selenium-Biofortified Wheat during Germination. *Current Biotechnology*, 7(5): 439－444 (in Chinese with English abstract).

Qin, H. B., Zhu, J. M., Lin, Z. Q., et al., 2017. Selenium Speciation in Seleniferous Agricultural Soils under Different Cropping Systems Using Sequential Extraction and X-Ray Absorption Spectroscopy. *Environmental Pollution*, 225: 361－369. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.02.062

Research Team of Environment and Endemic Diseases, 1986. Studies on Low Selenium Belt in China and Pathogeny of Keshan and Kaschin-Beck Diseases. *Environmental Science*, 7(4):89－93 (in Chinese with English abstract).

Shen, J., Jiang, C. Q., Yan, Y. F., et al., 2019. Selenium Distribution and Translocation in Rice (Oryza Sativa L.) under Different Naturally Seleniferous Soils. *Sustainability*, 11(2): 520－530. https://doi.org/10.3390/su11020520

Si, L. L., Xie, Y. N., Ma, Q. X., et al., 2018. The Short-Term Effects of Rice Straw Biochar, Nitrogen and Phosphorus Fertilizer on Rice Yield and Soil Properties in a Cold Waterlogged Paddy Field. *Sustainability*, 10(2): 537. https://doi.org/10.3390/su10020537

Sun, G. X., Li, Y., Li, G., et al., 2017. Climatic Causes of the Selenium-Deficient Soil Belt in China. *Current Biotechnology*, 7(5): 387－394 (in Chinese with English abstract).

Tian, H., Bao, Z. Y., Wei, C. H., et al., 2016a. Improved Selenium Bioavailability of Selenium-Enriched Slate via Calcination with a Ca-Based Sorbent. *Journal of Geochemical Exploration*, 169: 73－79. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.07.015

Tian, H., Ma, Z. Z., Chen, X. L., et al., 2016b. Geochemical Characteristics of Selenium and Its Correlation to other Elements and Minerals in Selenium-Enriched Rocks in Ziyang County, Shaanxi Province, China. *Journal of Earth Science*, 27(5): 763－776. https://doi.org/10.1007/s12583-016-0700-x

Tian, H., Shuai, Q., Xu, S. R., et al., 2014. Novel Technology for Preparation of Crude Selenium from Se-Rich Stone Coal. *Earth Science*, 39(7): 880－888 (in Chinese with English abstract).

Wan, N., Hu, Z. X., Zeng, M. Z., et al., 2017. Summary of Agricultural Geological Survey Results in Jianghan River Basin Economic Zone of Hubei Province. *Resources Environment & Engineering*, *(S1)*:1－5 (in Chinese with English abstract).

Wang, D., Dinh, Q. T., Thu, T.T.A., et al., 2018. Effect of Selenium-Enriched Organic Material Amendment on Selenium Fraction Transformation and Bioavailability in Soil. *Chemosphere*, 199: 417－426. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.007

Wang, F., Li, Q. H., Yu, G. L., et al., 2015a. Coupling Effects of Drainage by Opening Ditch and Formulated Fertilization on Productivity of Cold-Waterlogged Paddy Field. *Chinese Journal of Soil Science*, 46(3): 703－708 (in Chinese with English abstract).

Wang, F., Lin, C., Li, Q. H., et al., 2015b. Effects of Long-Term Drainage of Stony Open Deep-Narrow Drainage Ditches on Groundwater Level, Soil Chemical Characteristics and Rice Grain Quality in Cold-Waterlogged Paddy Fields. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 23(5):571－578 (in Chinese with English abstract).

Wang, F., Lin, C., Li, Q. H., et al., 2016. A Review on Improvement and Utilization of Southern Cold-Waterlogged Paddy Fields in China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 24(9): 1151－1160 (in Chinese with English abstract).

Wang, R., Yu, T., Zeng, Q. L., et al., 2017. Distribution Characteristics, Origin and Influencing Factors of Soil Selenium Concentration of Main Farming Areas in China. *Current Biotechnology*, 7(5): 359－366 (in Chinese with English abstract).

Williams, P. N., Lombi, E., Sun, G. X., et al., 2009. Selenium Characterization in the Global Rice Supply Chain. *Environmental Science & Technology*, 43(15): 6024－6030. https://doi.org/10.1021/es900671m

Xie, K. Z., Xu, P. Z., Jiang, R. P., et al., 2016. Combined Application of Inorganic and Organic Fertilizers Improve Rice Yield and the Abundance of Soil Nitrogen-Cycling Microbes in Cold Waterlogged Paddy Fields. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 22(5): 1267－1277 (in Chinese with English abstract).

Xu, Y. F., Li, Y. H., Li, H. R., et al., 2018. Effects of Topography and Soil Properties on Soil Selenium Distribution and Bioavailability (Phosphate Extraction): A Case Study in Yongjia County, China. *Science of the Total Environment*, 633: 240－248. https://doi.org/10.1016/

j.scitotenv.2018.03.190

Zheng, T. L., Deng, Y. M., Lu, Z. J., et al., 2017. Geochemistry and Implications of Rare Earth Elements in Arsenic-Affected Shallow Aquifer from Jianghan Plain, Central China. *Earth Science*, 42(5): 693－706 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

柴娟娟,廖敏,徐培智,等,2012.我国主要低产水稻冷浸田养分障碍因子特征分析.水土保持学报,26(2):284－288.

邓青军,唐仲华,陈敏知,等,2014.江汉平原冷浸田水稻种植适宜性综合评价.安全与环境工程,21(3):60－64.

董稳军,徐培智,张仁陟,等,2013.土壤改良剂对冷浸田土壤特性和水稻群体质量的影响.中国生态农业学报,21(7):810－816.

董稳军,张仁陟,黄旭,等,2014.明沟排水对冷浸田土壤理化性质及产量的影响.灌溉排水学报,33(2):114－116.

范博伦,马真真,田欢,等,2017.密闭消解－氢化物发生－原子荧光光谱法测定植物中硒.理化检验(化学分册),53(8):905－907.

李海蓉,杨林生,谭见安,等,2017.我国地理环境硒缺乏与健康研究进展.生物技术进展,7(5):381－386.

梁东丽,彭琴,崔泽玮,等,2017.土壤中硒的形态转化及其对有效性的影响研究进展.生物技术进展,7(5):374－380.

林诚,李清华,王飞,等,2016.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.土壤,48(6):1151－1158.

刘杰,罗尊长,肖小平,等,2015.不同有机无机肥配比对冷浸田土壤肥力及水稻生长的影响.中国土壤与肥料,(4):23－27.

刘杰,罗尊长,肖小平,等,2016.土壤调理剂对冷浸田土壤特性及水稻生长的影响.土壤,48(3):529－533.

鲁宗杰,邓娅敏,杜尧,等,2017.江汉平原高砷地下水中DOM三维荧光特征及其指示意义.地球科学,42(5):771－782.

罗杰,王佳媛,游远航,等,2012.硒在土壤－水稻系统中的迁移转化规律.西南师范大学学报(自然科学版),37(3):60－66.

马丽佳,张泽洲,袁林喜,等,2017.硒生物营养强化小麦在发芽过程中的生理特征研究.生物技术进展,7(5):439－444.

孙国新,李媛,李刚,等,2017.我国土壤低硒带的气候成因研究.生物技术进展,7(5):387－394.

田欢,帅琴,徐生瑞,等,2014.从富硒石煤回收制备粗硒的新工艺.地球科学,39(7):880－888.

万能,胡正祥,曾明中,等,2017.湖北省江汉流域经济区农业地质调查成果综述.资源环境与工程,(S1):1－5.

王飞,李清华,余广兰,等,2015a.开沟排渍与优化施肥对冷浸田生产力的耦合效应.土壤通报,46(3):703－708.

王飞,林诚,李清华,等,2015b.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.中国生态农业学报,23(5):571－578.

王飞,林诚,李清华,等,2016.江南冷浸田治理利用研究进展.中国生态农业学报,24(9):1151－1160.

王锐,余涛,曾庆良,等,2017.我国主要农耕区土壤硒含量分布特征、来源及影响因素.生物技术进展,7(5):359－366.

解开治,徐培智,蒋瑞萍,等,2016.有机无机肥配施提升冷浸田土壤氮转化相关微生物丰度和水稻产量.植物营养与肥料学报,22(5):1267－1277.

郑天亮,邓娅敏,鲁宗杰,等,2017.江汉平原浅层含砷地下水稀土元素特征及其指示意义.地球科学,42(5):693－706.

中国科学院地理研究所环境与地方病研究组,1986.我国低硒带与克山病、大骨节病病因关系的研究.环境科学,7(4):89－93.