

# 干湿交替灌溉对富硒土壤硒形态及水稻硒积累的影响

张青, 王煌平, 孔庆波, 栗方亮, 安梦鱼, 罗涛

(福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福州 350013)

**摘要:** 以自然富硒土壤为试材, 采用盆栽试验, 探讨了轻干湿交替、重干湿交替、正常管理和淹水状态下的土壤硒形态及水稻硒积累。结果表明: 粽粒产量以轻干湿交替处理最高, 比淹水处理高 22.17%, 二者差异显著。所有处理水稻不同部位的含硒量均表现为根(0.411~0.695 mg/kg) > 茎(0.214~0.378 mg/kg) > 叶(0.187~0.327 mg/kg) > 谷壳(0.156~0.235 mg/kg) > 粽粒(0.132~0.185 mg/kg)。粽粒含硒量和土壤可溶态硒含量以重干湿交替处理最高, 淹水处理最低, 其中二者含硒量差异也达显著水平。土壤有效硒含量与水稻根、茎叶、谷壳和粽粒中硒含量均呈现显著或极显著正相关(0.939\*\*, 0.896\*\*, 0.793\*\*, 0.723\*)。水稻根的硒吸收系数也以重干湿交替处理最高(0.438), 淹水处理最低(0.259), 表明干湿交替提高了水稻硒吸收能力。综合分析得出, 干湿交替灌溉不但能提高水稻产量, 还能提高稻米硒含量, 且比正常管理节约用水, 整体表现以轻干湿交替处理为最佳。

**关键词:** 干湿交替; 富硒土壤; 硒形态; 硒含量

**中图分类号:** S154.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2018)01-0327-05

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbexb.2018.01.051

## Effects of Wetting and Drying Alternated Irrigation on Soil Selenium Forms and Rice Selenium Accumulation in Se-enriched Soil

ZHANG Qing, WANG Huangping, KONG Qingbo, LI Fangliang, AN Mengyu, LUO Tao

(Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Science, Fuzhou 350013)

**Abstract:** Pot experiments with selenium-enriched soil were conducted to investigate the effects of moisture condition on selenium forms in soil and selenium accumulation in rice. The treatments included alternation of wetting and moderate drying (AWMD), alternation of wetting and severe drying (AWSA), conventional (C) and flooding (F) water management. The results showed that the rice grain yield was the highest in the AWMD treatment, 22.17% higher than that of the F treatment, and the difference between these two treatments was significant. The selenium contents in different parts of rice were in the order of root (0.411~0.695 mg/kg) > stem (0.214~0.378 mg/kg) > leaf (0.187~0.327 mg/kg) > shell (0.156~0.235 mg/kg) > grain (0.132~0.185 mg/kg) in all treatments. The selenium contents of grain and available selenium contents in soil both were the highest in the AWSA treatment, and the lowest in the F treatment, and the selenium contents of grain was significantly different between the two treatments. Significant or extremely significant positive correlations were found between the available selenium contents in soil and selenium contents in roots, stem, shell and grain of rice. The correlation coefficients were 0.939\*\*, 0.896\*\*, 0.793\*\* and 0.723\*, respectively. The selenium absorption coefficient in rice root was the highest in the AWSA treatment (0.438), and the lowest in F treatment (0.259), indicating that the dry and wet alternation enhanced selenium absorption capacity of rice. In summary, wetting and drying alternated irrigation could not only improve rice yield, but also increase selenium absorption of rice, and this kind of irrigation saved water than normal management. The overall performance of the AWMD treatment was the best.

**Keywords:** alternation of wetting and drying; Se-enriched soil; Se forms; Se accumulation

硒(Se)是人体 14 种必需的微量元素之一<sup>[1]</sup>, 对人体健康具有非常重要的作用。中国有 70% 以上区

域的土壤硒含量偏低, 即使在富硒土壤区, 其生长的作物也不一定达到富硒标准, 作物硒吸收量除了与土

收稿日期: 2017-09-12

资助项目: 福建省省属公益项目“干湿交替条件下对红壤中硒、镉有效性及对水稻吸收的影响”(2015R1022-9); 国家科技支撑计划项目“南方轻中度重金属污染耕地防治调控技术集成示范”(2015BAD05B01)

第一作者: 张青(1977—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事土壤硒营养调控技术研究。E-mail: zhangqing202@163.com

通信作者: 罗涛(1961—), 男, 研究员, 学士, 主要从事土壤肥料研究。E-mail: luotaofjz@188.com

壤总硒含量有关外,还与土壤中有效态硒含量密切相关,土壤有效态硒含量是作物硒吸收量能否达到富硒标准的主要因素之一<sup>[2]</sup>。土壤硒的有效性由其赋存形态决定,与土壤 pH、土壤氧化还原电位(Eh)、有机质含量、全硒量、质地、阳离子交换量及离子竞争等因素有关<sup>[3-4]</sup>。其中土壤 pH、Eh 以及有机质含量是土壤硒有效性的重要影响因子<sup>[5-8]</sup>。

水稻是世界上主要的粮食作物之一,可为 30 亿人口提供 35%~80% 的饮食热量<sup>[9]</sup>。水稻也是农业用水的第一大作物,约有 70% 的农业用水用于水稻灌溉<sup>[10-11]</sup>。在自然富硒稻田土壤上,影响土壤硒形态的主要因子是土壤的氧化还原电位,土壤的氧化还原电位变化能通过改变硒元素的形态从而使得硒在土壤中的有效性发生变化,继而影响到硒元素的生物有效性。水稻的灌溉方式不同,不但能节水,优质高产,还能提高水稻中硒的含量,对利用灌溉技术生产富硒水稻具有重要的意义。以往在水稻灌溉指标上应用灌水深度、地下水位埋深、土壤含水量、田间持水量的百分率等<sup>[12-13]</sup>,这些方法不但速度慢、精度差,而且因土壤质地不同差异较大。本研究采用土壤张力计测定土壤水势的方法不但能便捷、精确的测定土壤水分,而且不受土壤类型的影响。张慎凤<sup>[14]</sup>研究表明,水稻高产优质水分高效利用的灌溉模式为土壤落干的低限土壤水势为  $(-5) \sim (-15)$  kPa,因此本研究轻干湿交替处理选为  $-10$  kPa,达到水稻优质高产。

以往的很多研究是通过外源添加硒来生产富硒水稻,这不但增加成本,还有可能造成环境的污染。本研究以福建省富硒区的富硒土壤(土壤硒含量大于 0.40 mg/kg 为富硒土壤)为研究对象,研究了土壤不同干湿交替灌溉对富硒土壤中有效硒含量、硒元素形态转化及其对水稻有效性的影响,为我国南方红壤区富硒土壤中硒的活化以及富硒水稻的生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

供试土壤为富硒土壤,采自福建省大田县武陵乡(东经  $117^{\circ}42'$ ,北纬  $25^{\circ}37'$ )。大田县位于福建省中部,属亚热带海洋性季风气候区,当地年平均气温  $16.83^{\circ}\text{C}$ 。土壤类型为黄红壤,土壤取回后进行风干,磨细,过 2 cm 筛,进行盆栽试验。土壤基本理化性状为:pH 4.51,有机质含量 16.35 g/kg,全氮含量 1.67 g/kg,全磷含量 1.56 g/kg,全钾含量 5.65 g/kg,碱解氮含量 149.40 mg/kg,速效磷含量 155.14 mg/kg,速效钾含量 154.54 mg/kg,总硒含量 1.585 mg/kg,有效硒含量 35.41  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

### 1.2 供试水稻

供试水稻品种为“中浙优 1 号”,购自当地农资部

门,由中国水稻研究所与浙江勿忘农种业股份有限公司合作育成,适宜在福建省中籼迟熟稻区种植,全生育期约 135 d。

### 1.3 试验设计

盆栽试验在福建省农业科学院土壤肥料研究所网室进行,设 4 个处理,分别为:(1)ck(正常管理,灌浆期前淹水,灌浆期后轻干湿交替);(2) $t_1$ (淹水,整个生育期保持  $1 \sim 2$  cm 的水层,土水势  $0$  kPa);(3) $t_2$ (轻干湿交替,整个生育期由  $1 \sim 2$  cm 水层自然落干到土水势  $-10$  kPa,再添加去离子水至相应水层,再落干,如此循环);(4) $t_3$ (重干湿交替,整个生育期由  $1 \sim 2$  cm 水层自然落干到土水势  $-20$  kPa,再添加去离子水至相应水层,再落干,如此循环),每个处理重复 4 次。盆栽试验所用的培养钵为聚乙烯盆(直径 26 cm,高 28 cm),每盆装土 4 kg。2016 年 5 月 8 日施基肥,肥料为尿素、过磷酸钙和氯化钾,用量分别为 0.3,0.55,0.275 g/kg。肥料与土壤充分混匀后装盆,5 月 9 日移栽水稻,每盆 3 丛。于 5 月 24 日追施尿素 0.25 g/kg,7 月 11 日再次追施尿素 0.25 g/kg 和氯化钾 0.02 g/kg,于 8 月 8 日收获。测定水稻的株高、产量、分蘖数、有效穗以及水稻各部位硒含量和土壤有效硒含量。

### 1.4 测试方法

土壤水势使用浙江托普云农业科技有限公司生产的 TEN 系列土壤张力计调节,土壤基础理化性质的分析方法参照鲍士旦的《土壤农化分析》<sup>[15]</sup>,土壤有效硒的浸提参考温国灿等<sup>[16]</sup>的方法,上清液的消化和土壤各形态硒的浸提参照瞿建国等<sup>[17]</sup>的方法,采用连续浸提技术把硒元素分为 5 种形态,分别为可溶态、可交换态及碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机硫化物结合态和残渣态;土壤硒的测定参照农业行业标准<sup>[18]</sup>;植株硒的测定方法参照国家标准方法<sup>[19]</sup>,硒的含量用海光 LC- AFS 9700 原子荧光光谱仪测定。

### 1.5 数据处理

所得数据用 SPSS 17.0 进行方差分析(LSD 法)和相关性分析,并用 Excel 2003 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 干湿交替灌溉对水稻产量及其农艺性状的影响

收获期水稻的株高表现为 ck(正常管理)(110.25 cm)  $> t_2$ (轻干湿交替)(107.75 cm)  $> t_3$ (重干湿交替)(106.00 cm)  $> t_1$ (淹水)(104.33 cm),且 ck 处理的水稻株高显著高于  $t_1$  和  $t_3$  处理,与  $t_2$  处理差异不显著(表 1)。可见,不同干湿交替处理会影响水稻的株高,淹水处理水稻株高最低,这与张慎凤<sup>[14]</sup>的研究结果不一致,可能原因为土水势处理程度不同。水稻

分蘖数和有效穗都表现为  $t_1$  和  $t_2$  处理显著高于  $t_3$  和  $t_4$  处理, 可见, 重干湿交替灌溉和淹水都不利于水稻分蘖和有效穗数形成。

水稻的产量为  $t_2$ (16.10 g/盆)  $>$  ck(15.34 g/盆)  $>$   $t_3$ (13.35 g/盆)  $>$   $t_1$ (12.53 g/盆),  $t_2$  处理水稻产量略高于 ck 和  $t_3$  处理, 显著高于  $t_1$  处理, 比 ck、 $t_3$  和  $t_1$  处理分别增产 4.72%, 17.08%, 22.17%。可见, 轻干湿交替灌溉处理水稻产量增加, 这与轻干湿交替处理有效穗显著高于淹水处理有关。

表 1 水稻产量及农艺性状

处理	株高/		分蘖数/		有效穗/		产量/	
	cm	(个·丛 <sup>-1</sup> )	(穗·丛 <sup>-1</sup> )	(g·盆 <sup>-1</sup> )				
ck	110.25±1.89a	14.46±0.33a	12.80±0.73a	15.34±1.96ab				
t <sub>1</sub>	104.33±2.16b	12.23±1.36b	9.96±0.39b	12.53±1.33b				
t <sub>2</sub>	107.75±2.50ab	13.58±1.00ab	12.50±0.38a	16.10±2.75a				
t <sub>3</sub>	106.00±0.82b	12.96±0.74b	10.10±0.42b	13.35±1.46ab				

注:表中数据为平均值±标准误差;同列中不同小写字母表示差异达显著水平( $P<0.05$ )。下同。

## 2.2 干湿交替灌溉对水稻不同部位硒含量的影响

从图1可以看出,各处理水稻不同部位的硒含量均表现为根( $0.411\sim0.695\text{ mg/kg}$ )>茎( $0.214\sim0.378\text{ mg/kg}$ )>叶( $0.187\sim0.327\text{ mg/kg}$ )>谷壳( $0.156\sim0.235\text{ mg/kg}$ )>籽粒( $0.132\sim0.185\text{ mg/kg}$ )。其中根的硒含量是茎的 $1.82\sim2.02$ 倍,是叶的 $2.13\sim2.44$ 倍,是谷壳的 $2.63\sim3.08$ 倍,是籽粒的 $3.10\sim3.76$ 倍,其籽粒的含硒量为 $0.132\sim0.185\text{ mg/kg}$ ,均达到了富硒标准<sup>[20]</sup>。

不同处理水稻各部位含硒量均表现为  $t_3$  (0.185~0.695 mg/kg) >  $t_2$  (0.181~0.573 mg/kg) > ck (0.158~0.491 mg/kg) >  $t_1$  (0.132~0.411 mg/kg)。 $t_3$  处理的水稻根部硒含量分别比  $t_2$ 、ck 和  $t_1$  高出 21.24%、41.45%、69.10%，茎部分别高出 33.56%、40.30%、76.64%，叶部分别高出 38.94%、48.74%、74.87%，谷壳分别高出 26.12%、32.90%、69.10%，籽粒分别高出 2.16%、16.77%、40.15%。水稻吸收土壤硒的效应集中反映在稻米上，重干湿交替处理稻米硒含量稍高于轻干湿交替处理，两者差异不显著，但都与正常管理和淹水处理显著。轻干湿交替处理各部位硒含量都稍高于正常管理和淹水处理。可见，干湿交替处理会促进水稻对硒的吸收。

### 2.3 干湿交替处理对土壤硒形态的影响

不同干湿交替处理对土壤硒各形态影响不同(图2),可溶态硒含量以 $t_3$ 处理最高, $t_1$ 处理最低,因可溶态硒易被作物直接吸收,因此,水稻各部位硒含量以 $t_3$ 处理含量最高, $t_1$ 处理含量最低;可溶态硒和可交换态硒含量均为可被作物吸收的形态,二者含量之和依次表现为 $t_4 > t_2 > ck > t_1$ ,占总硒量的5.67%~13.91%;土壤

中的硒主要以有机硫化物结合态和残渣态存在,占总量的 66.15%~74.76%;残渣态硒含量以  $t_1$  处理最高,即土壤由干燥到淹水过程,土壤中的硒会由可溶态向残渣态转化,植物的有效性逐渐降低。

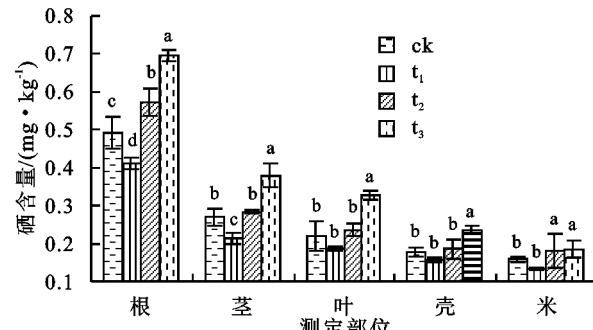
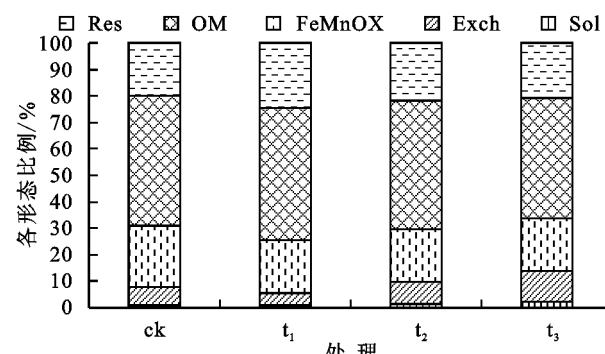


图 1 水稻各部位硒含量



注:Sol 为可溶态硒;Exch 为可交换态及碳酸盐结合态硒;FeMnO<sub>x</sub> 为铁锰氧化物结合态硒;OM 为有机硫化物结合态硒;Res 为残渣态硒。

图 2 不同干湿交替处理对土壤硒形态的影响

## 2.4 土壤有效硒与水稻各部位硒的相关性

对土壤有效硒与水稻各部位硒的相关性分析表明,土壤中有效硒含量与水稻各部位的硒含量均呈现显著或极显著正相关(图3),其与水稻根、茎叶、谷壳和籽粒的相关系数分别为0.939,0.896,0.793,0.723,而且相关系数随着硒运输距离延长逐渐降低。由此可推断,有效硒含量高的土壤其种植的水稻硒含量也高,可以通过提高土壤有效硒含量的方法提高作物硒含量。

## 2.5 干湿交替处理水稻对硒元素的吸收与转运特征

水稻的根系吸收系数(RAI)表示水稻富硒能力的高低,等于水稻根部的硒含量与土壤硒含量的比值;水稻的转运系数表示水稻转运硒能力的高低,分为初级转运系数(PTI)和次级转运系数(STI)<sup>[21]</sup>,初级转运系数是茎叶中的含硒量与根部含硒量的比值,次级转运系数是籽粒的含硒量与茎叶含硒量的比值。

由表 2 可以看出,各处理水稻的 RAI 值在 0.259~0.438,大小表现为处理  $t_3 > t_2 > ck > t_1$ ,可见,  $t_1$  处理的根系吸收系数最小,  $t_3$  处理最大,两者达显著差异,这与淹水处理土壤有效硒含量较低有关。PTI 值在

0.452~0.508,  $t_3$  处理初级转运系数最大, 说明  $t_3$  处理由根部向茎、叶转运硒的能力最强, 与图 1 中  $t_3$  处理茎、叶中硒含量最高相一致。STI 值在 0.525~0.699,  $t_2$  处理的次级转运系数最大,  $t_3$  处理较低, 因为  $t_3$  处理

茎、叶中硒含量较高, 因此转运相同量的硒到籽粒中的情况下所表现出的次级转运系数会低于其他处理。可见, 重干湿交替灌溉增加了水稻的根系吸收系数和初级转运系数, 增加地上部硒的含量。

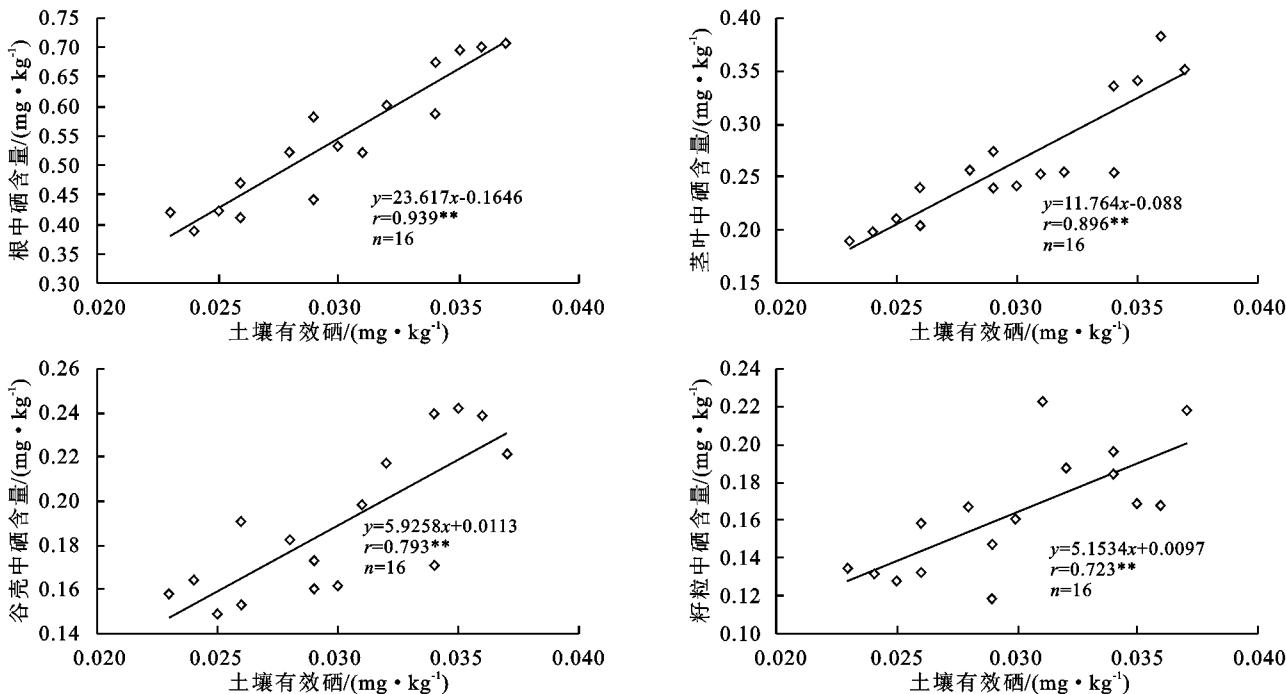


图 3 土壤有效硒与水稻各部位硒的相关性

表 2 不同干湿交替处理水稻的吸收系数与转运系数

处理	RAI	PTI	STI
ck	$0.310 \pm 0.027$ b	$0.498 \pm 0.038$ ab	$0.648 \pm 0.024$ ab
$t_1$	$0.259 \pm 0.010$ c	$0.488 \pm 0.027$ ab	$0.658 \pm 0.043$ ab
$t_2$	$0.362 \pm 0.022$ b	$0.452 \pm 0.029$ b	$0.699 \pm 0.193$ a
$t_3$	$0.438 \pm 0.009$ a	$0.508 \pm 0.024$ a	$0.525 \pm 0.077$ b

### 3 讨论

#### 3.1 干湿交替灌溉处理对土壤硒形态的影响

土壤中易被利用的硒的价态有  $\text{SeO}_4^{2-}$ 、 $\text{HSeO}_3^-$  和  $\text{SeO}_3^{2-}$ <sup>[22]</sup>。研究<sup>[23]</sup>表明, 在长期淹水缺氧的高度还原条件下(Eh 值一般在 100 mV 以下), 土壤中的嫌气微生物会把氧化态硒还原为零价和负二价, 其中零价的元素态硒最稳定, 而还原态可以形成稳定的且在土壤中很难迁移的金属硒化物, 这两种化合物都会使得土壤的生物有效性降低, 且土壤的还原性越强, 这样的转化就越快, 这是淹水对硒价态的影响; 淹水状况下硒的形态会从对植物有效性高的可溶态和可交换态向植物有效性低的有机结合态和残渣态转化, 不管是形态的转化还是价态的转化对植物吸收硒的影响是一致的。在氧化条件下, 硒的主要形态是硒酸盐, 土壤有效硒含量就会明显增加, 且强氧化条件下更是这样的<sup>[24]</sup>; 在氧化条件下, 植物有效性高的可溶态硒会增加, 会促进植物的吸收。刘鹏等<sup>[25]</sup>在进行淹水土壤中硒迁移转化的研究时, 发现降低了氧化还原电位会使得土壤有效硒含量减少,

与本试验结果一致。本试验采用自然富硒土壤, 其可溶态硒含量仅占总硒比例 0.97%~2.11%, 而樊俊等<sup>[26]</sup>研究表明, 在外源添加硒的情况下可溶态硒(Se(Ⅵ))含量占总硒比例高达 53.1%~65.8%, 而有机结合态和残渣态硒含量远低于本试验。可见, 外源添加硒和自然富硒土壤中的硒对作物的有效性差异还是非常大的。目前对硒的研究很多是通过外源添加的方式进行<sup>[26~29]</sup>, 而对自然富硒的土壤上作物吸收硒的研究较少, 而且干湿交替条件下对硒有效性变化的研究更少。因此, 本试验的进行非常有必要。

#### 3.2 干湿交替灌溉处理对水稻硒吸收及转运的影响

高冬梅等<sup>[30]</sup>在研究不同灌溉方式对寒地粳稻农艺性状及产量的影响时, 发现作干湿交替处理的水稻其成穗率和分蘖数都会降低, 其研究还发现有干湿交替处理的水稻其产量都会有所减少, 与本试验结果不一致, 这可能是由于土壤干湿交替处理的程度不同; 而张自常等<sup>[31]</sup>却发现干湿交替处理的水稻可以增产, 与本试验结果不完全一致, 本试验结果为轻干湿交替处理水稻增产, 而重干湿交替处理水稻减产; 张慎凤<sup>[14]</sup>的研究发现轻干湿交替可以使得水稻增产, 重干湿交替使得水稻减产, 与本试验结果一致。周超等<sup>[32]</sup>的研究结果表明, 在旱地土壤中随土壤水分含量的增加, 茶树不同部位硒含量也随之增加, 与本试验的结果不太一致, 这可能是因为旱地和水田条件下

不同水分含量对硒形态影响不同。本试验中淹水处理硒的有效性低,而干湿交替后增加了土壤的氧化性,提高了硒的有效性,而不同的干湿交替条件硒的有效性和对植物的影响也是不同的。因此,在作物生产中可以通过调节土壤水分达到有效利用硒资源的目的。例如,在硒含量过高的土壤上,可以通过旱田改水田的方式减少作物的吸收积累;而硒含量低的土壤上,可以采用旱地种植的方式或采用干湿交替灌溉的方式种植作物,以增加作物对硒的吸收。

## 4 结论

(1)轻干湿交替处理水稻的产量最高,与正常管理和重干湿交替处理差异不显著,但显著高于淹水处理。不同处理水稻不同部位的含硒量都表现为根>茎>叶>谷壳>籽粒。重干湿交替处理籽粒含硒量最高,与轻干湿交替处理差异不显著,但与正常管理和淹水处理差异显著,淹水处理籽粒硒含量最低。

(2)可溶态硒含量以重干湿交替处理最高,淹水处理最低;土壤的有效硒含量与水稻各部位的硒含量均呈现显著或极显著正相关。土壤由干燥到淹水过程,土壤中的硒会由可溶态向残渣态转化,植物的有效性逐渐降低。水稻的吸收系数为重干湿交替处理最高,淹水处理最低,进行干湿交替处理的水稻其硒含量会提高。

综合分析,干湿交替灌溉不但能提高水稻产量,还能提高稻米硒含量,且比正常管理节约用水,整体表现以轻干湿交替处理为最佳。

## 参考文献:

- [1] Hamilton S J. Review of selenium toxicity in the aquatic food chain [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 326(1/3):1-31.
- [2] 赵少华, 宇万太, 张璐, 等. 土壤—植物系统中硒的浸提形态研究进展[J]. *土壤通报*, 2006, 37(2):2395-2397.
- [3] 徐文. 硒的生物有效性及植物对硒的吸收[J]. *安徽农学通报*, 2009, 15(23):46-47, 67.
- [4] 刘新伟, 段碧辉, 夏全杰, 等. 硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35(9):3564-3571.
- [5] Ashworth D J, Moore J, Shaw G. Effects of soil type, moisture content, redox potential and methyl bromide fumigation on K(d) values of radio-selenium in soil [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2008, 99(7): 1136-1142.
- [6] Hockin S L, Gadd G M. Linked redox precipitation of sulfur and selenium under anaerobic conditions by sulfate-reducing bacterial biofilms [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, 69(12): 7063-7072.
- [7] 吴丽霞, 林立弘, 方楚凝. 影响富硒土壤产出富硒农产品的因素[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(12):3546-3549.
- [8] 朱建明, 郑宝山, 李社红. 自然硒矿物的形貌特征及其成因研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2000, 19(4):353-355.
- [9] Maclean J, Hardy B, Hettel G. *Rice Almanac* [M]. 2nd Edition. Los Banos (Philippines): IRRI (International Rice Research Institute), 1997:35-48.
- [10] Guerra L C, Bhuiyan S I, Tuong T P, et al. *Producing more rice with less water from irrigated systems* [M]. Manila (Philippines): International Rice Research Institute, 1998:24.
- [11] Bouman B A M, Toung T P. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice [J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 49(1): 11-30.
- [12] 王熹, 陶龙兴, 黄效林, 等. 灌溉稻田水稻旱作技术要素及产量形成[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(4):502-509.
- [13] 杨建昌, 袁莉民, 唐成, 等. 结实期干湿交替灌溉对稻米品质及籽粒中一些酶活性的影响[J]. *作物学报*, 2005, 31(8):1052-1057.
- [14] 张慎凤. 干湿交替灌溉对水稻生长发育、产量与品质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2009:3-5.
- [15] 鲍士旦. *土壤农化分析* [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000:30-33.
- [16] 温国灿, 黄艳, 郭永玲, 等. 酸性土壤有效硒提取条件优化的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(5):1996-2000.
- [17] 霍建国, 徐伯兴, 龚书椿. 连续浸提技术测定土壤和沉积物中硒的形态[J]. *环境化学*, 1997, 16(3):277-283.
- [18] 中华人民共和国农业部. NY/T 1104—2006. 土壤中全硒的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006:1-5.
- [19] 中华人民共和国卫生部. GB 5009. 93—2010. 食品安全国家标准: 食品中硒的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010:1-6.
- [20] 中国食品工业协会花卉食品专业委员会. HB001/T-2013. 天然富硒食品硒含量分类标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013:1-5.
- [21] Carbonell-Barrachina A A, Burló-Carbonella F, Mataix-Beneyto J. Arsenic uptake, distribution, and accumulation in bean plants: Effect of arsenite and salinity on plant growth and yield [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1997, 20(10): 1419-1430.
- [22] 王勤锋, 解启来, 杨彬, 等. 硒的土壤化学特性及有效性研究进展[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2011, 37(2):220-224.
- [23] 张新凯. 富硒茶园区不同母质(岩石)土壤中硒的生物可利用性及微量元素影响研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014:5-6.
- [24] 李娟, 龙健, 汪境仁. 黔中地区水稻土的含硒量及其对糙米硒含量的影响[J]. *土壤通报*, 2005, 36(4):571-574.
- [25] 刘鹏, 杨志辉, 葛旦之, 等. 淹水条件下土壤硒迁移行为的研究 I. 还原淋溶作用下土壤硒的溶液迁移[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2000, 26(1):1-4.