

周飞, 曾露苹, 杨旭, 等. 水稻和不同品种苋菜间作对水稻产量、根区速效养分及砷累积的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(6): 38-44.
ZHOU Fei, ZENG Luping, YANG Xu, et al. Effects of rice-amaranth intercropping on rice yield, rhizosphere soil available nutrient and As accumulation[J].
Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(6): 38-44.

水稻和不同品种苋菜间作对水稻产量、根区速效养分及砷累积的影响

周 飞, 曾露苹, 杨 旭, 黎华寿

(华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】探究水稻与苋菜间作对水稻产量、根区速效养分及水稻各部位吸收累积 As 的影响。【方法】通过小区试验研究水稻单作 (对照)、水稻与圆叶白苋菜间作、水稻与籽粒苋间作、水稻与红苋菜间作条件下水稻产量、根际土壤速效养分与有机质含量、As 累积量的变化。【结果】4 个处理水稻收获期地上部、地下部、谷壳和糙米中 As 含量均表现为: 水稻与圆叶白苋菜间作>水稻与籽粒苋间作>水稻与红苋菜间作>水稻单作。与对照相比, 水稻与圆叶白苋菜间作显著提高了水稻地上部、地下部、谷壳和糙米 As 含量, 增幅分别为 88.50%、65.38%、68.25% 和 45.45%; 对土壤 As 的提取量为 $5.44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 显著高于对照, 为对照的 1.67 倍; 水稻单株生物量显著高于对照、与红苋菜间作和与籽粒苋间作, 地上部生物量比对照提高 63.79%。与水稻单作相比, 间作处理水稻单位面积产量比对照显著下降, 间作中单位面积产量最高的为与圆叶白苋菜间作, 为对照的 59.15%; 间作处理水稻根际土壤速效养分、有机质含量均有不同程度的增加。【结论】水稻与苋菜间作, 水稻单位面积产量降低, 地上部、地下部、谷壳和糙米中 As 含量以及根区土壤速效养分与有机质含量显著提高。水稻与圆叶白苋菜间作能从 As 污染土壤中提取最多的 As, 生产出的苋菜符合国家安全标准, 为最优方案。

关键词: 水稻; 苋菜; 间作; As 累积; As 污染土壤

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2019)06-0038-07

Effects of rice-amaranth intercropping on rice yield, rhizosphere soil available nutrient and As accumulation

ZHOU Fei, ZENG Luping, YANG Xu, LI Huashou

(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To explore the effects of rice-amaranth intercropping on rice yield, rhizosphere soil available nutrient and As accumulation in various parts of rice. 【Method】Through field plot experiment, four treatments including rice monocropping (control), rice-white amaranth intercropping, rice-grain amaranth intercropping and rice-red amaranth intercropping were setted to study the changes of rice yield and As accumulation, rhizosphere soil available nutrient and organic matter contents. 【Result】As contents of shoot, root, husk and brown rice during harvest time in four treatments all behaved as rice-white amaranth intercropping > rice-grain amaranth intercropping > rice-red amaranth intercropping > rice monocropping. Compared with the control, rice-white amaranth intercropping significantly increased As contents of shoot, root, husk and brown rice by 88.50%, 65.38%, 68.25%, 45.45% respectively. As extract amount from soil in rice-white amaranth intercropping treatment reached $5.44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, which was 1.67 times significantly higher than

收稿日期: 2018-11-25 网络首发时间: 2019-10-28 09:20:42

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20191025.0844.024.html>

作者简介: 周 飞 (1993—), 男, 硕士研究生, E-mail: 850560934@qq.com; 通信作者: 黎华寿 (1963—), 男, 教授, 博士, E-mail: lihuashou@scau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0800903)

control. The biomass per rice plant in rice-white amaranth intercropping treatment was significantly higher than control, rice-red amaranth intercropping and rice-grain amaranth intercropping, and 63.79% higher than control. Compared with control, intercropping treatments significantly reduced rice yield per unit area. Rice-white amaranth intercropping had the highest yield per unit area, which was 59.15% of control. The available nutrient and organic matter contents in rice rhizosphere soil increased in different degrees compared with monoculture. 【Conclusion】 Rice-amaranth intercropping reduces rice yield per unit area, and significantly increases As contents in shoot, root, husk and brown rice, and available nutrient and organic matter contents in rhizosphere soil. Rice-white amaranth intercropping is the optimal scheme, as it extract the most As in As contaminated soil, and the grown amaranth meets national safety standards.

Key words: rice; amaranth; intercropping; As accumulation; As contaminated soil

砷 (As) 是土壤污染中常见的有毒元素之一。我国首次土壤污染普查结果显示, As 的点位超标率为 2.7%^[1]。As 不仅危害作物, 还通过食物链影响人体健康^[2-3]。水稻是我国重要粮食作物之一, 供应了我国 40% 的粮食^[4], 但当前稻田中 As 污染非常严重^[5-7], 如何修复 As 污染土壤及减少水稻糙米中 As 累积成为近几年的研究热点^[8]。如今降低稻米 As 含量的研究很多, 如挑选低 As 积累水稻品种在污染区种植^[9], 加入不同的外源添加剂或施硅肥等^[7], 有研究表明改变水稻种植期间水分条件也可以减少水稻糙米 As 累积^[10]。目前常用的土壤 As 污染修复方法有物理化学修复^[11-12]和植物修复^[13-14], 植物修复是通过植物转移、吸收土壤中的 As 以降低土壤中 As 含量, 达到修复土壤的目的。植物修复是目前最热门的修复技术之一。有研究显示, 对轻度 As 污染的土壤, 种植 1~2 次粉叶蕨可使土壤中 As 含量降到环境安全标准以下^[15]。Ampiah-Bonney 等^[16]用蓉草 *Leersia oryzoides* 修复 As 含量为 110 mg·kg⁻¹ 的污染土壤时, 发现种植蓉草 16 周后可从 1 hm² 土壤中提取 130 g As, 效果显著。

水稻与其他作物间作可以提高对土壤养分的利用效率, 增加作物产量^[17], 同时减少水稻对重金属的吸收^[18], 减缓重金属对水稻的胁迫。宁川川等^[19]发现水稻和雍菜间作可以促进水稻对硅和氮的吸收, 增强水稻的竞争能力; 吴华杰等^[20]在镉污染土壤上间作小麦与水稻, 发现 2 种作物地上部镉吸收和累积量都有所降低。苋菜在我国消费量较大, 不仅是人类的食用蔬菜, 还可以用作牲畜饲料, 具有一定的重金属修复潜力。不同苋菜品种的 As 吸收能力已有过相关研究, 如张骞等^[21]研究发现不同品种苋菜的地上部 As 含量差异显著, 说明不同苋菜品种对 As 的吸收能力存在差异。水稻与

不同品种苋菜间作, 能否边生产边修复, 在尽可能多地修复污染土壤的同时生产出能够安全食用的水稻或者苋菜。这是个值得探讨的问题, 基于此, 本文选取水稻与 3 种生物量较大的苋菜品种进行间作, 探讨在 As 污染土壤间作水稻与苋菜实现边生产边修复的可能性。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验区

试验采用的水稻品种为领科 8 号, 3 种苋菜品种分别为圆叶白苋菜、籽粒苋与红苋菜, 试验地点位于广东省广州市天河区华南农业大学生态系农场 (E113°37', N23°16')。使用水泥池进行小区试验, 水泥池规格为长 1 m、宽 1 m、高 0.65 m。水泥池土壤来自连续种植 3 年水稻的 As 污染稻田, 基本化学性质: pH 6.45, 有机质 25.02 g·kg⁻¹, 铵态氮 23.12 mg·kg⁻¹, 速效磷 120.66 mg·kg⁻¹, 速效钾 137.20 mg·kg⁻¹, 总 As 66.40 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

以高畦 (畦高 5 cm, 种植苋菜, 保持不淹水) 深沟 (种植水稻, 保持淹水) 的方式间作, 畦沟面积比为 1:1。试验设置 4 个处理, 每个处理重复 3 次, 4 个处理分别为: 水稻与圆叶白苋菜间作、水稻与籽粒苋间作、水稻与红苋菜间作、水稻单作 (对照)。采用小区试验, 间作时每个小区种植 8 株水稻与 8 株苋菜, 均分 2 行种植, 每行 4 株, 株行距均 20 cm, 对照处理每个小区种植 16 株水稻。水稻育秧于温室大棚进行, 育秧时间为 2017 年 8 月 1 日—8 月 20 日, 在“三叶一心”期 (2017 年 8 月 21 日) 移栽, 苋菜同步播种并在真叶期后间苗。水稻秧苗移栽后土壤表层保持 2 cm 水层, 苋菜畦面保持土壤湿润不淹水。植株样品和土壤样品在水稻收获期取

样测定, 取样时间为 2017 年 11 月 27 日。每个试验小区均设置保护行, 统一用自来水浇灌。

1.3 样品处理与分析

植株样品: 每小区取水稻和苋菜各 1 株。样株先用自来水冲洗干净, 再用去离子水反复冲洗叶片与根部后, 置于 105 °C 烘箱中杀青 30 min, 然后在 60 °C 烘干至恒质量。获得样品的地上部、地下部干质量后, 粉碎备用。

土壤样品: 水稻取样后, 将水稻根系上附着的土壤用镊子轻轻剥离, 作为根际土壤, 风干后磨碎, 过 1 mm 筛备用。

总 As 含量测定: 称取 0.2 g 植物干样置于消解管中, 通风橱内先加入 8 mL 硝酸, 再加入 2 mL 体积分数为 30% 的过氧化氢, 随后进行微波消解, 消解液中总 As 含量用双道原子荧光光度计 (AFS-230E, 北京科创海光仪器有限公司) 测定。样品制备和测定过程均用植物标准样品 GBW(E)100349 进行质量控制。

水稻经济产量按理论产量计算。单位面积产量=每个水泥池总有效穗数×每穗粒数×千粒质量/1 000。

土壤速效养分含量测定: 采用联合浸提-比色法测定, 具体参考中华人民共和国农业部发布的标准 NY/T 1849—2010^[22]。

土壤有机质含量测定: 风干土壤样品过 100 目筛后, 先用 1 mol·L⁻¹ HCl 溶液浸泡 0.5 h, 然后于

105 °C 烘干, 称取约 25 mg 包进锡舟中, 用 TOC 测定仪测定有机碳 (C) 含量。w(有机质) = w(C) × 10 × 1.724, 1.724 是土壤有机碳换算成土壤有机质的平均换算系数。

1.4 数据统计与分析

试验结果用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 18.0 进行数据处理和分析, 数据统计分析方法为单因素方差分析, 数据结果用 3 次重复的平均值±标准误表示。

2 结果与分析

2.1 间作对水稻生物量(干质量)及产量的影响

由表 1 可知, 4 个处理中水稻单株地上部生物量最大的为与圆叶白苋菜间作, 显著高于对照、与籽粒苋间作和与红苋菜间作, 比对照提高 63.28%。4 个处理间单株地下部生物量差异不显著。与对照相比, 间作处理水稻千粒质量与每穗粒数无显著变化, 水稻与圆叶白苋菜间作单株产量最高, 显著高于与籽粒苋和红苋菜间作; 间作处理每个试验小区种植 8 株水稻, 仅为对照的一半, 导致间作条件下每试验小区的水稻总有效穗数均显著降低; 对照处理水稻产量为 185.34 g·m⁻², 间作处理水稻产量较对照均有不同程度下降, 水稻与圆叶白苋菜、籽粒苋和红苋菜间作处理产量分别为对照的 59.16%、46.22% 和 46.28%。

表 1 单作与间作处理水稻生物量、产量及单株产量¹⁾

Table 1 Biomass, yield per unit area and yield per plant of rice in monoculture and intercropping treatments

处理 Treatment	生物量/g Biomass		总有效穗数 Total effective panicles	每穗粒数 Grains per panicle	千粒质量/g 1 000-grain weight	产量/ (g·m ⁻²) Yield	单株产量/g Yield per plant
	地上部 Shoot	地下部 Root					
水稻单作(对照) Rice monocropping (control)	11.63±1.24b	0.87±0.14a	72.00±2.08a	117.30±2.49a	21.93±0.70a	185.34±10.23a	11.58±0.64ab
水稻与圆叶白苋菜间作 Rice-white amaranth intercropping	18.99±0.62a	0.74±0.06a	43.33±1.86b	117.17±3.62a	21.59±0.34a	109.65±6.50b	13.71±0.81a
水稻与籽粒苋间作 Rice-grain amaranth intercropping	8.36±0.88c	0.61±0.10a	35.00±0.58c	116.43±1.51a	21.01±0.59a	85.67±3.72b	10.71±0.47b
水稻与红苋菜间作 Rice-red amaranth intercropping	10.76±0.43bc	0.93±0.19a	34.33±2.40c	111.61±1.72a	22.52±0.53a	85.78±6.57b	10.72±0.82b

1) 同列数据后的不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$, Duncan's 法)

1) Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$, Duncan's method)

2.2 间作对水稻各部位 As 吸收的影响

水稻地上部、地下部、谷壳和糙米中 As 含量最高的均为与圆叶白苋菜间作, 比对照分别提高了 88.50%、65.38%、68.25% 和 45.45%。总体看来, 水

稻地上部、地下部、谷壳、糙米中 As 含量大小均表现为水稻与圆叶白苋菜间作>水稻与籽粒苋间作>水稻与红苋菜间作>对照, 说明水稻与苋菜间作能在一定程度上提高水稻各部位对 As 的吸收 (表 2)。

表 2 单作与间作处理水稻各部位 As 含量¹⁾

Table 2 As contents in various parts of rice in monoculture and intercropping treatments

处理 Treatment	w(As)/(mg·kg ⁻¹)			
	地上部 Shoot	地下部 Root	谷壳 Husk	糙米 Brown rice
水稻单作(对照) Rice monocropping (control)	11.74±1.16b	103.63±11.66b	0.63±0.10b	0.44±0.03c
水稻与圆叶白苋菜间作 Rice-white amaranth intercropping	22.13±1.97a	171.38±12.95a	1.06±0.21a	0.64±0.02a
水稻与籽粒苋间作 Rice-grain amaranth intercropping	20.55±1.76a	167.43±13.21a	0.86±0.04a	0.52±0.01b
水稻与红苋菜间作 Rice-red amaranth intercropping	18.81±1.03a	133.33±12.60ab	0.80±0.04ab	0.52±0.01b

1) 同列数据后的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$, Duncan's 法)

1) Different lowercase letters in the same column indicate significant differences($P<0.05$, Duncan's method)

2.3 不同品种苋菜生物量(干质量)及 As 吸收的差异

圆叶白苋菜、籽粒苋和红苋菜地上部与地下部生物量存在一定差异, 圆叶白苋菜地上部生物量最大, 单株 26.57 g, 显著高于籽粒苋, 与红苋菜差异不显著。地下部生物量最大的同样是圆叶白苋菜, 单株 5.20 g, 显著高于籽粒苋与红苋菜 (表 3)。地上部 As 含量最高的为籽粒苋, 达 3.18 mg·kg⁻¹, 显著

高于圆叶白苋菜与红苋菜; 圆叶白苋菜与红苋菜地上部 As 含量无显著差异, 分别为 1.54、1.22 mg·kg⁻¹。地下部 As 含量最高的是红苋菜, 为 25.42 mg·kg⁻¹, 显著高于另外 2 个品种 (表 3)。若以叶菜类蔬菜的平均含水率 90% 计算鲜质量 As 含量, 3 个品种苋菜食用部分即地上部 As 含量均未超出 GB 2762—2017^[23] 的食用安全限量标准(0.5 mg·kg⁻¹)。

表 3 不同品种苋菜单株生物量及 As 含量¹⁾

Table 3 Biomass per plant and As contents in various parts of different amaranth varieties

品种 Variety	生物量/g Biomass		w(As)/(mg·kg ⁻¹)	
	地上部 Shoot	地下部 Root	地上部 Shoot	地下部 Root
圆叶白苋菜 White amaranth	26.57±2.10a	5.20±1.35a	1.54±0.07b	16.14±0.81b
籽粒苋 Grain amaranth	14.56±0.23b	0.44±0.07b	3.18±0.13a	13.76±0.81b
红苋菜 Red amaranth	24.81±2.46a	1.48±0.02b	1.22±0.18b	25.42±0.37a

1) 同列数据后的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$, Duncan's 法)

1) Different lowercase letters in the same column indicate significant differences($P<0.05$, Duncan's method)

2.4 单作与间作处理土壤 As 提取效率的差异

单作与间作处理土壤 As 提取量存在一定差异, 水稻与圆叶白苋菜间作能从 1 m² 土壤中提取 5.43 mg As, 显著高于其他处理; 对照从 1 m² 土壤中提取 3.25 mg As, 仅为与圆叶白苋菜间作的 59.85%; 水稻与籽粒苋、红苋菜间作处理土壤 As 提取量与对照无显著差异 (表 4)。总体来讲, 水稻与

圆叶白苋菜间作能从土壤中提取更多的 As。间作品种不同, As 吸收量有差异, 说明通过间作提取土壤中的 As, 要同时考虑种植模式和作物品种。与对照相比, 与圆叶白苋菜间作处理土壤中 As 含量有一定程度的降低, 但差异未达到显著性水平; 水稻与籽粒苋、红苋菜间作处理土壤 As 含量略微高于对照, 差异不显著 (表 4)。

表 4 单作与间作处理植株不同部位 As 累积量及土壤中 As 含量¹⁾

Table 4 As accumulations in various parts of plants and As contents in soil in monoculture and intercropping treatments

处理 Treatment	As 累积量/(mg·m ⁻²) As accumulations					w(As) _{土壤} / (mg·kg ⁻¹) As content in soil
	水稻地上部 Rice shoot	水稻地下部 Rice root	苋菜地上部 Amaranth shoot	苋菜地下部 Amaranth root	总和 Sum	
水稻单作(对照) Rice monocropping (control)	2.21±0.29b	1.04±0.09a			3.25±0.38b	63.53±0.96a
水稻与圆叶白苋菜间作 Rice-white amaranth intercropping	3.36±0.24a	1.05±0.16a	0.33±0.03a	0.69±0.16a	5.43±0.34a	59.81±1.49a
水稻与籽粒苋间作 Rice-grain amaranth intercropping	1.39±0.17b	0.84±0.04a	0.37±0.01a	0.05±0.01b	2.65±0.20b	65.18±1.68a
水稻与红苋菜间作 Rice-red amaranth intercropping	1.63±0.12b	0.76±0.07a	0.24±0.01b	0.30±0.00b	2.93±0.16b	63.64±2.03a

1) 同列数据后的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$, Duncan's 法)

1) Different lowercase letters in the same column indicate significant differences($P<0.05$, Duncan's method)

2.5 间作对水稻根际土壤速效养分与有机质含量的影响

与对照相比, 间作处理水稻根际土壤中铵态氮、速效磷、速效钾、有机质含量均有不同程度的提

高, 其中水稻与圆叶白苋菜间作铵态氮、速效磷、速效钾和有机质含量最高, 比对照分别提高了 38.16%、9.89%、16.29% 和 27.23%, 差异显著, 说明间作可以提高水稻根际土壤中养分含量 (表 5)。

表 5 单作与间作水稻根际土壤速效养分与有机质含量¹⁾

Table 5 Available nutrient and organic matter contents in rice rhizosphere soil in monoculture and intercropping treatments

处理 Treatment	w(铵态氮)/(mg·kg ⁻¹) Ammonia nitrogen content	w(速效磷)/(mg·kg ⁻¹) Available phosphorous content	w(速效钾)/(mg·kg ⁻¹) Available potassium content	w(有机质)/(g·kg ⁻¹) Organic matter content
	水稻单作(对照) Rice monocropping (control)	25.86±0.89b	126.81±3.64b	91.67±5.37b
水稻与圆叶白苋菜间作 Rice-white amaranth intercropping	35.73±0.45a	139.35±2.12a	106.60±1.27a	45.92±1.84a
水稻与籽粒苋间作 Rice-grain amaranth intercropping	27.37±0.56b	128.44±3.00ab	99.17±3.87ab	40.69±0.36b
水稻与红苋菜间作 Rice-red amaranth intercropping	27.90±0.89b	130.83±3.93ab	98.40±0.75ab	41.26±1.85b

1) 同列数据后的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$, Duncan's 法)

1) Different lowercase letters in the same column indicate significant differences($P<0.05$, Duncan's method)

3 讨论与结论

3.1 水稻苋菜间作对水稻吸收累积 As 的影响

间套作能充分利用时间与空间, 是我国传统农业的精髓。不少学者在重金属污染土壤上进行了不同作物间作下土壤修复与粮食安全的效果和机理研究, 如 Gove 等^[24] 研究表明 Zn 超富集植物天蓝遏蓝菜与大麦间作可以降低大麦对 Zn 的吸收; Whiting 等^[25] 研究表明在添加 Zn 的土壤上 Zn 超富

集植物天蓝遏蓝菜和非超富集植物苜蓿互作可减少苜蓿对锌的吸收。水稻与不同作物间作, 水稻对重金属的吸收有差异。赵冰等^[26] 研究显示小麦东南景天间作、水稻套作模式降低了水稻稻米对 Cd 的吸收; 本研究单作糙米 As 含量达 0.44 mg·kg⁻¹, 超过国家卫生安全标准 (GB 2762—2017)^[23] 2 倍以上 (0.2 mg·kg⁻¹), 间作未降低糙米 As 含量, 相反间作时糙米 As 含量显著高于单作。这种差异可能是植株类型引起的, 因为间作体系中植株吸收重金属

变化趋势主要由植株本身特性决定,选择不同的植物与目标作物间作,可能产生不一样的结果。李凝玉等^[27]研究了不同作物与玉米间作对玉米吸收累积 Cd 的影响,结果表明,与不同的植物间作玉米对 Cd 的吸收发生明显变化,与豆科作物间作能显著提高玉米对 Cd 的积累,与籽粒苋间作在一定程度上抑制玉米对 Cd 的积累。本研究中水稻与 3 种不同品种苋菜间作,水稻地上部、地下部与谷壳中 As 含量均较单作升高,与张静静等^[28]研究结果类似。本试验初步研究表明水稻与苋菜间作促进水稻对 As 的吸收累积。

若单纯从水稻产量效益看,水稻单作产量更高,但单作时水稻 As 含量超出安全标准,仅能作为工业原料处理,土地不能进行安全的农业生产。综合考虑生态效益及农业生产,对中轻度的 As 污染农田,水稻与圆叶白苋菜间作要优于与籽粒苋、红苋菜间作及水稻单作,因为水稻与圆叶白苋菜间作,水稻单株地上部生物量与单株产量均显著高于其他处理,而且在水稻种植面积减少一半的情况下,单位面积产量仍达到对照的 59.16%。同时水稻与圆叶白苋菜间作能从污染土壤中提取更多的 As,种植的苋菜也符合国家卫生安全标准,可以在 As 污染土壤中同时进行安全的农业生产和土壤 As 修复。种植后 As 含量超标的水稻可以通过焚烧、堆肥等措施处理,或是作为新兴技术“植物冶金”的原料^[29]。

3.2 水稻苋菜间作对根区土壤速效养分及有机质的影响

研究表明玉米与花生间作能提高整个间作系统根区土壤碱解氮、速效磷及有机质含量^[30-31],长期间作可以增加土壤肥力^[32]。间作系统中根系分泌物和微生物活性增加使得土壤中难溶性养分的分解和转化速度加快,从而提高土壤速效养分含量^[33]。本研究中,水稻与圆叶白苋菜间作显著提高了收获期水稻根际土壤速效养分与有机质含量,与单作相比,3 个品种苋菜与水稻间作,收获期水稻根际土壤中铵态氮、速效磷以及速效钾含量均有不同程度的提高。

有机质能够影响土壤中 As 的移动及环境行为,Norton 等^[34]研究显示添加有机质能增加土壤溶液中 As 的有效性。本研究间作处理显著提高了收获期水稻根区土壤有机质含量,这在一定程度上解释了为什么间作时水稻各部位 As 吸收量都显著增加,可能是间作时根系活力提高,微生物繁殖速度加快,消耗了更多氧气,导致土壤溶液中氧化还原

电位降低,As 更容易从铁氧化物和氢氧化物中释放出来,从而增加 As 的有效性^[35],土壤中 As 有效性增加促进了水稻对 As 的吸收。

本研究水稻与苋菜间作增强了水稻各部位对 As 的吸收,说明间作苋菜可以增加水稻对土壤 As 的提取,同时生产出来的苋菜食用部分 As 含量也未超过 GB 2762—2017^[23]的食用安全限量标准 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,可以达到边生产边修复的目的。但本研究间作未降低稻米在 As 暴露环境下累积 As 的风险。单作和间作处理中水稻糙米 As 含量都超过了 GB 2762—2017^[23]的食用安全限量标准 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。今后的研究可以考虑在间作体系中结合水分调控或是添加外源调理剂等方式联合降低水稻对 As 的吸收,使水稻非食用部分吸收更多的 As 以净化土壤,降低糙米 As 含量,使其达到食用安全标准以下。

3.3 结论

水稻与 3 种不同品种苋菜间作均能不同程度地增加水稻对 As 的吸收累积,同时提高水稻根区土壤速效养分与有机质含量。水稻与圆叶白苋菜间作能从 As 污染土壤中提取最多的 As,生产出的苋菜也符合国家安全标准,可以实现边生产边修复的目的,为最优方案。

参考文献:

- [1] 环境保护部国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. [2014-04-17] http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.Htm.
- [2] 刘小诗,李莲芳,曾希柏,等. 典型农业土壤重金属的累积特征与源解析[J]. 核农学报, 2014, 28(7): 1288-1297.
- [3] 钟松雄,何宏飞,陈志良,等. 水淹条件下水稻土中砷的生物化学行为研究进展[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 1-17.
- [4] 赵宏亮,王麒,孙羽,等. 秸秆还田下灌溉方式对水稻产量及水分利用率的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(5): 959-969.
- [5] LIU C P, LUO C L, GAO Y, et al. Arsenic contamination and potential health risk implications at an abandoned tungsten mine, southern China[J]. Environ Pollut, 2010, 158(3): 820-826.
- [6] 黄亚涛. 我国稻米中无机砷的污染分布研究及风险评估[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014: 38-44.
- [7] 胡拥军,王海娟,王宏宾,等. 砷胁迫下不同砷富集能力植物内源生长素与抗氧化酶的关系[J]. 生态学报, 2015, 35(10): 3214-3224.
- [8] 沈孝辉,李仁英,徐向华,等. 土壤-水稻系统砷迁移累积的影响因素及调控措施[J]. 土壤通报, 2014, 45(5): 1273-1280.
- [9] 吴川,莫竟瑜,薛生国,等. 不同渗氧能力水稻品种对砷的耐性和积累[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 807-813.
- [10] TALUKDER A S M H M, MEISNER C A, SARKAR M A R, et al. Effect of water management, arsenic and phos-

- phorus levels on rice in a high-arsenic soil-water system: II: Arsenic uptake[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2012, 80: 145-151.
- [11] ZHAO S T, LI H C, SHI Y H. Speciation analysis of antimony and arsenic in soil and remediation of antimony and arsenic in contaminated soils[J]. *Adv Mater Res*, 2015, 1088: 578-582.
- [12] CHEN J, WANG S, ZHANG S, et al. Arsenic pollution and its treatment in Yangzonghai lake in China: In situ remediation[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2015, 122: 178-185.
- [13] KLABER N S, BARKER A V. Accumulation of phosphorus and arsenic in two perennial grasses for soil remediation[J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2014, 45(6): 810-818.
- [14] 申红玲, 何振艳, 麻密. 蜈蚣草砷超富集机制及其在砷污染修复中的应用[J]. *植物生理学报*, 2014, 50(5): 591-598.
- [15] 宋书巧, 周永章, 周兴, 等. 土壤砷污染特点与植物修复探讨[J]. *热带地理*, 2004, 24(1): 6-9.
- [16] AMPIAH-BONNEY R J, TYSON J F, LANZA G R. Phytoextraction of arsenic from soil by *Leersia oryzoides*[J]. *Int J Phytoremediation*, 2007, 9(1/2/3): 31-40.
- [17] 张少斌, 梁开明, 张殷, 等. 水稻与水合欢间作对作物群体产量、氮素吸收及土壤氮素的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(11): 1856-1864.
- [18] 梁开明, 傅玲, 章家恩, 等. 水稻/再力花单、间作系统中作物对镉胁迫的叶绿素荧光响应及镉积累特征[J]. *华南农业大学学报*, 2014, 35(4): 35-41.
- [19] 宁川川, 杨荣双, 蔡茂霞, 等. 水稻-雍菜间作系统中种间关系和水稻的硅、氮营养状况[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 474-484.
- [20] 吴华杰, 李隆, 张福锁. 水稻/小麦间作中种间相互作用对镉吸收的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2003, 5(5): 43-46.
- [21] 张骞, 曾希柏, 苏世鸣, 等. 不同品种苋菜对砷的吸收能力及植株磷砷关系研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(10): 1888-1894.
- [22] 中华人民共和国农业部. 酸性土壤铵态氮、有效磷、速效钾的测定联合浸提-比色法: NY/T 1849—2010[S]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [23] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品中污染物限量: GB 2762—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [24] GOVE B, HUTCHINSON J J, YOUNG S D, et al. Uptake of metals by plants sharing a rhizosphere with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. *Int J Phytoremediation*, 2002, 4(4): 267-281.
- [25] WHITING S N, DE SOUZA M P, TERRY N. Rhizosphere bacteria mobilize Zn for hyperaccumulation by *Thlaspi caerulescens*[J]. *Environ Sci Technol*, 2001, 35(15): 3144-3150.
- [26] 赵冰, 沈丽波, 程苗苗, 等. 麦季间作伴矿景天对不同土壤小麦-水稻生长及锌镉吸收性的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2725-2731.
- [27] 李凝玉, 李志安, 丁永祯, 等. 不同作物与玉米间作对玉米吸收积累镉的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(6): 1369-1373.
- [28] 张静静, 黄河, 吴海霞, 等. 不同土壤类型中水稻间作红蛋对镉累积的影响[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(12): 2871-2876.
- [29] 刘维涛, 倪均成, 周启星, 等. 重金属富集植物生物质的处置技术研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(1): 15-27.
- [30] 章家恩, 高爱霞, 徐华勤, 等. 玉米/花生间作对土壤微生物和土壤养分状况的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1597-1602.
- [31] 曾露苹, 周飞, 陈玥如, 等. 木薯和花生间作对 Cd 吸收及根区速效养分的影响[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(2): 303-309.
- [32] IKERRA S T, MAGHEMBE J A, SMITHSON P C, et al. Soil nitrogen dynamics and relationships with maize yields in a gliricidia-maize intercrop in Malawi[J]. *Plant Soil*, 1999, 211(2): 155-164.
- [33] LI B, LI Y Y, WU H M, et al. Root exudates drive interspecific facilitation by enhancing nodulation and N₂ fixation[J]. *P Natl Acad Sci USA*, 2016, 113(23): 6496-6501.
- [34] NORTON G J, ADOMAKO E E, DEACON C M, et al. Effect of organic matter amendment, arsenic amendment and water management regime on rice grain arsenic species[J]. *Environ Pollut*, 2013, 177: 38-47.
- [35] ROWLAND H A L, BOOTHMAN C, PANCOST R, et al. The role of indigenous microorganisms in the biodegradation of naturally occurring petroleum, the reduction of iron, and the mobilization of arsenite from west bengal aquifer sediments[J]. *J Environ Qual*, 2009, 38(4): 1598-1607.

【责任编辑 李庆玲】