

DOI: 10.20103/j.stxb.202307021413

何菊霞,唐以胜,寇占胜,温皓玥,李烁宇,蒙德乐,黎华寿.水管理耦合氮肥种类对多茬刈割空心菜生长及砷积累的影响.生态学报, 2024, 44(22): 10322-10335.

He J X, Tang Y S, Kou Z S, Wen H Y, Li S Y, Meng D L, Li H S. Effect of water management coupled with nitrogen fertilizer types on growth and arsenic accumulation in multi-crop mowed water spinach. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10322-10335.

水管理耦合氮肥种类对多茬刈割空心菜生长及砷积累的影响

何菊霞,唐以胜,寇占胜,温皓玥,李烁宇,蒙德乐,黎华寿*

华南农业大学资源环境学院,广州 510642

摘要:地质高背景值与工矿业砷污染是我国和东南亚地区土壤重金属污染的突出环境问题,相对易吸收积累砷的空心菜是这些地区常年主要的叶菜和砷暴露的风险源。水分和肥料会影响土壤—作物系统中砷的转化迁移和累积,但有关水肥管控对轻度砷污染菜地中多茬刈割的空心菜生长和砷积累的影响尚不明确。因此,试验选用实际生产中广泛种植的高产品种大叶空心菜,于淹水(WF)和干湿交替(AWD)的水管理下分别施加尿素(Urea)、过氧化尿素(UHP)和有机肥(OF),在为期178d的盆栽试验期间,分别对各处理空心菜的地上部食用嫩茎叶连续刈割三茬,探究空心菜对砷的累积及土壤中砷迁移转化的影响。结果表明,不同水分与肥料组合及刈割次数都会显著影响空心菜产量和砷积累量。增加刈割次数使WF条件下第三茬空心菜地上部生物量比第一茬增加了11.23%—51.61%,总砷含量显著减少了57.24%—94.43%,空心菜转运砷的能力降低了2.4—18.05倍;在第三茬时,AWD-Urea和AWD-UHP处理地上部累积的砷低于国家食品安全限量标准,实现安全生产。总之,在中度砷污染菜地种植空心菜时,推荐前三茬以修复为主线,在WF-OF模式下种植;刈割三茬后,在AWD-UHP或AWD-Urea条件下安全生产。研究明确了水肥管理和刈割次数对空心菜积累砷的影响,为轻度砷污染蔬菜地修复提供理论参考。

关键词:砷;肥料类型;水管理;刈割次数;空心菜

Effect of water management coupled with nitrogen fertilizer types on growth and arsenic accumulation in multi-crop mowed water spinach

HE Juxia, TANG Yisheng, KOU Zhansheng, WEN Haoyue, LI Shuoyu, MENG Dele, LI Huashou*

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

Abstract: Geological high background values and arsenic contamination from industrial and mining industries are the prominent environmental problems of soil heavy metal contamination in China and Southeast Asia. Airborne vegetable with the relatively easy uptake and accumulation of arsenic is the main year-round leafy vegetable and risk source of arsenic exposure in these regions. Moisture and fertiliser affect the translational transport and accumulation of arsenic in the soil-crop system, but information on the effects of water and fertiliser control on the growth and arsenic accumulation of multi-cropped mowed water spinach in mild-to-moderate arsenic-contaminated vegetable plots is not yet clear. Therefore, in this experiment, a high-yielding variety of large-leafed water spinach, which is widely grown in actual production, was selected, and urea (Urea), urea peroxide (UHP), and organic fertiliser (OF) were applied under water management of flooding (WF) and alternating wet and dry (AWD), respectively. Three consecutive above-ground edible young stems and leaves of each treatment of the water spinach were mowed for three consecutive crops during the 178 days potting experiment, to

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YEC1807805);国家自然科学基金(42277223)

收稿日期:2023-07-02; 网络出版日期:2024-08-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lihuashou@scau.edu.cn

explore the effects of the water spinach on the Arsenic accumulation and the effect of arsenic transport and transformation in soil. The results showed that different combinations of water and fertiliser and the number of mowing significantly affected the yield and arsenic accumulation in water spinach. Increasing the number of mowing increased the above-ground biomass of third-crop water spinach under WF conditions by 11.23%—51.61% compared with the first crop, the total arsenic content was significantly reduced by 57.24%—94.43%, and the ability of water spinach to transport arsenic was reduced by 2.4—18.05-fold; the arsenic accumulated in the above-ground of AWD-Urea and AWD-UHP treatments at the time of the third crop was lower than the national food safety limit standard, achieving safe production. In conclusion, when planting water spinach in moderately arsenic-contaminated vegetable land, it is recommended that the first three crops are planted in WF-OF mode with remediation as the main line; and after mowing the three crops, it is safe to produce under AWD-UHP or AWD-Urea conditions. This study clarified the effects of water and fertiliser management and the number of mowing on the accumulation of arsenic in water spinach, and provided theoretical references for the remediation of mildly to moderately arsenic-contaminated vegetable land.

Key Words: arsenic; fertilizer type; water management; number of harvests; water spinach

砷(As)作为一种类金属,具有剧毒性和致癌风险,即使微量摄入也会对人的健康造成极大威胁^[1]。地质高背景值与工矿业砷污染是我国和东南亚地区土壤重金属污染的突出环境问题^[2-3]。据调查,中国大约2.7%的土壤受到不同程度的砷污染^[4]。目前对中低程度砷污染农田的修复和安全利用相关的研究,主要集中在生物炭等环境功能材料研发应用和选育高低累积植物等方面^[5]。生物炭等土壤调理剂施加到土壤可以短期调控重金属,但对重金属原位固定的时效短、成本高,且重金属存在二次释放的风险^[6],此外,土壤调理剂施加到土壤可能影响土壤结构,多次施加会给土壤造成负担。植物修复是一种可以将砷从土壤彻底去除且不破坏土壤结构的原位修复方式,有广泛的应用前景^[7]。然而目前筛选的大多数高累积植物多应用于矿区等重度污染土地修复,由于农田的生长环境和水分条件等限制,导致其很难在我国水旱皆存的砷污染农田推广种植。

水分是影响砷毒性和形态转化的关键因素。研究发现,淹水条件会使土壤 pH 升高的同时增加土壤中三价砷的占比^[8],且淹水条件下显著增加砷的迁移性和生物有效性,进而增加砷暴露风险^[9-10]。如淹水条件下水稻籽粒中砷的浓度是干湿交替处理下 As 浓度的 14 倍^[11],且干湿交替的水分管理可以显著减少重金属砷在糙米中的累积^[12],即不同的水分管理模式会显著影响土壤砷的毒性和作物累积砷的能力。充足的养分供应能为作物的生长保驾护航,同时不同类型的肥料对作物吸收累积重金属的能力有显著影响^[13-14]。Chen 等^[15]研究发现硝态氮可以降低水稻对总 As 和无机 As 的吸收比,而铵态氮则正好相反。此外,施氮量的多少也会影响黑龙葵对砷等重金属的累积^[16]。此外,也有研究发现有机肥处理促进了紫花苜蓿对砷和汞的生物积累^[17],但有机肥施加后对作物累积重金属的作用报道不一,大量文献报道施用有机肥对土壤中重金属砷的活化和作物吸收累积有促进作用^[18-19]。也有部分报道称,施用有机肥的处理土壤重金属富集量明显下降^[20];这可能与重金属类型、试验环境、有机肥种类和培养时间有极大的关系^[21]。过氧化物由于其具有良好的氧化性能和缓慢释放的特性,越来越受到人们的关注^[22]。而最新研究发现,兼具氮肥和调理剂作用的过氧化尿素被越来越广泛的应用到砷污染农田的修复和砷调控方面^[23-24]。因为过氧化尿素施入土壤后分解产生的过氧化氢可以直接或间接与土壤中铁等作用产生自由基(ROS)进而氧化三价砷和吸附络合钝化砷,从而减少土壤砷的生物有效性及其带来的暴露风险;同时 UHP 中 30% 的含氮量,可供作物生长所需^[25-27]。也有人将肥料和水分结合起来探究砷对作物的影响,比如 Song 等^[28]报道称干湿交替在低磷的条件下可以减少作物累积重金属砷,而在高磷肥处理下会增加水稻累积重金属砷的能力。Hu R 等^[29]也报道称,在有机质含量高的土壤中淹水条件会提高水稻籽粒中砷含量。可见,肥料类型和水分条件及其互作对作物累积砷的影响比较复杂。

我国特别是南方地区乃至东南亚地区的砷地质背景值相对较高,而相对易积累砷污染物的空心菜是该地区常年主要的叶菜品种,探讨轻度砷污染蔬菜地的作物安全生产十分必要。本试验选取生长快速、水旱两

生且刈割后可再生的大叶白骨空心菜 (*Spinacia oleracea*)^[30–31] 为试验对象。设置淹水 (WF)、干湿交替 (AWD) 的两种水分条件下分别施加尿素 (Urea)、过氧化尿素 (UHP) 和有机肥 (OF) 6 个处理, 试验期间刈割 3 次, 为砷污染农田探究出一种合适的“前期绿色修复—后期安全生产”的肥水管理新模式, 为砷污染农田的修复和安全利用提供一种新思路。

1 试验材料与方法

1.1 供试材料与土壤

供试空心菜品种为大叶白骨空心菜。盆栽试验选用花盆型号 A80 口径: 7 cm、高: 6.2 cm。供试土壤取自华南农业大学甜玉米—蔬菜轮作地的赤红壤, 土壤风干后过 2 mm 筛去除杂质, 其主要理化性质为: pH: 5.90、Eh: 168 mV、Ec: 181 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、总碳: 1.83 g/kg、总氮: 0.21 g/kg、碱解氮: 82.68 mg/kg、有机质: 17.67 g/kg、总砷: 5.3 mg/kg。由于赤红壤土壤在华南比较常见, 其土壤砷的背景值较高, 参考《土壤环境质量建设用地土壤风险管控标准》(GB36600—2018) 附录 A 中的赤红壤土壤污染风险筛选值为 60 mg/kg^[32], 例如赵述华等对深圳市土壤砷的背景含量现状调查的土壤表层样点 450 个、土壤典型剖面样点 50 个的全面检测。结果表明, 深圳市表层土壤砷的背景含量范围为 0.07—202 mg/kg, 算术平均值为 11.3 mg/kg, 95% 分位值为 55.9 mg/kg^[33]。因此本试验预设土壤总砷浓度约 60 mg/kg, 实际操作中每盆 1.5 kg 土壤中将 118.8 mg 的 As_2O_3 溶于 200 mL 的碱性水中, 把配置好的 As_2O_3 溶液浇入每盆土壤中, 反复搅拌使其在土壤中混匀, 淹水老化 30 d 自然凉干作为供试土壤, 试验取样检测供试土壤砷的含量为 63.68 mg/kg。供试肥料: 尿素 (Urea) 氮含量 46%, 过氧化尿素 (UHP) 氮含量 30% 和有机肥 (OF) 有机质 $\geq 45\%$ 、总养分 (氮+五氧化二磷+氯化钾) $\geq 5\%$ (均以烘干基计), 复合肥 (N-P-K=15-15-15)。

1.2 试验设计

根据广州地区亚热带季风气候特征, 试验于 2022 年 3 月 20 日开始进行空心菜的种植培育, 将育苗 15 d 后空心菜作为试验移栽供试植株。本试验共设 6 个处理, 分别为干湿交替施加尿素 AWD-Urea、干湿交替施加过氧化尿素 AWD-UHP、干湿交替施加有机肥 AWD-OF、淹水施加尿素 WF-Urea、淹水施加过氧化尿素 WF-UHP 和淹水施加有机肥 WF-OF, 每个处理各设 3 个重复, 每盆移栽空心菜幼苗 4 株。移栽时干湿交替处理 (AWD) 供试土壤含水量调整至 80%, 种植期间定期使用土壤参数速测仪 (控赛恩) 测定土壤含水率, 将土壤参数速测仪的土壤温度水分传感器探针插入土壤后, 其彩屏上会显示出土壤此时的含水量, 当土壤含水量数值小于 40% 时开始浇水, 浇水后过五分钟再次测定土壤含水量, 当含水量值大于 80% 时停止浇水, 保持土壤含水量在 80% 以上; 淹水处理 (WF) 的始终保持盆栽水位高出土壤表面 3—5 cm^[34]。空心菜移栽时不施加任何底肥, 移栽半个月后全部处理均按照 675 kg/hm² 用量统一施复合肥一次。经过前期的预试验发现尿素和过氧化尿素含量过高会影响空心菜的生长, 严重时导致空心菜幼苗枯死, 而 1% 的 Urea 和 0.1% 的 UHP 更适合空心菜的生长。于 2022 年 5 月 1 日至 2022 年 8 月 20 日的试验期间, 每 10 d 在 AWD 和 WF 水分管理下分别施加 1% Urea、0.1% UHP 和 2% OF 各一次 (每次 200 mL), 总共施 12 次肥。试验期间共对通心菜地上部茎叶刈取 3 茬, 具体取样时间为 2022 年的 6 月 24 日、7 月 31 日和 8 月 31 日。本试验从土壤处理到试验完成为期 178 d。

1.3 样品收集

1.3.1 植物样品

在以离根部 2 cm 左右留茬标准用剪刀进行刈取, 作为地上部样品 (淹水处理在收获前 3 d 不浇水)。收获的样品用去离子水冲洗, 放入烘箱 105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min 后调至 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重保存备用。

1.3.2 土壤样品

本试验土壤指标、砷形态等的测定土壤样品均来自第三茬空心菜收获之后的根系土壤。在第三茬收获完成后, 将根表层中大块土小心去除后把根部紧密黏贴的土壤抖落, 收集为根际土^[35]。收集的土壤样品放入阴

凉位置自然风干后过 0.149 mm、1 mm 和 2 mm 筛保存备用。

1.4 样本分析与指标计算

按照土水比为 1:2.5;称取 10.0 g 土放入 25 mL 去离子水使用磁力搅拌器搅拌一分钟使土壤颗粒在溶液中充分分散,静置 30 min 后再分别用 SX-620pH 计、SX-630-ORP 计和 SX-650Ec 计测定上清液的 pH、Eh(氧化还原电位)和 Ec(电导率)。土壤水溶性有机碳(DOC)使用比色法进行测定^[36]。土壤总碳(TC)总氮(TN):将旱稻根际土风干过 100 目筛,使用 TOC 分析仪测定。采用扩散法测定土壤碱解氮含量。样品中砷含量测定:分别称取粉碎后的植物地上部和根 0.1—0.2 g 放入微波消解管中,加入 10 mL 的硝酸(优级纯),在 120 ℃ 下预消解 30 min 后放入微波消解仪(Mars 6, CEM corporation)消解;土壤样品加入 8 mL 硝酸和 2 mL 氢氟酸进行微波消解(无需预消解)。样品消解完成后在 120 ℃ 条件下赶酸直到消解管中溶液 2—3 mL 后,冷却定容至 25 mL 容量瓶,过滤至小白瓶密封保存。消解液稀释至合适浓度后使用 ZAF—3100 原子荧光光度计测定 As 含量,试验过程设置空白对照和国家标准参考物质对照(CDHK—GBW(E)100349),参比物质回收率在 90%—105%之间。砷在土壤中的存在形态采用 Wanzel 连续提取法^[37]。生物量使用万分之一天平称量烘干后的空心菜各部分重量。

指标计算: $BCA = \sum C_p \times B_p$ (注:BCA 为重金属生物富集量; C_p 为植物体内重金属含量; B_p 为植物相应部位生物量,单位:mg/kg)。空心菜砷的转运系数(Translocation Factor, TF)指重金属从植物地下部转运到地上部各个器官的强弱能力。 TF 的计算公式为: $TF = \frac{C_{short}}{C_{root}}$, 其中 C_{short} 为植物地上部各部位重金属浓度, C_{root} 为该植物根部重金属浓度。

1.5 数据分析与作图

试验数据均使用 Microsoft Excel 2016 与 IBM SPSS Statistics 26 进行分析,绘图软件使用 Origin 64 2021 和 genescloud 平台作图。

2 结果分析

2.1 空心菜生物量

对空心菜前三茬地上部生物量分析发现,第一茬时 AWD 条件下空心菜长势较好,在第二茬、第三茬时,WF 条件下长势最好,且随着空心菜刈割次数的增加,施加三种肥料的处理在两种水分条件下差异显著(图 1) ($P < 0.05$)。而施 Urea 和 UHP 的处理,在相同水分条件下其第一茬空心菜地上部生物量差异都不显著。值得注意的是,在第二茬时,施 UHP 和 OF 的处理在 WF 条件下比 AWD 条件下空心菜地上部生物量高出 2.84 倍和 1.98 倍;第 3 茬时,在 WF 条件下施加 Urea、UHP 和 OF 处理的空心菜地上部生物量分别比 AWD 条件下高出 1.63 倍、1.95 倍和 1.64 倍。总的来看,在 WF 条件下施加三种肥料空心菜的生物量最大。空心菜地下部干重在 WF 条件下施 Urea、UHP 和 OF 的处理分别比 AWD 条件下高 1.3 倍、1.48 倍和 1.34 倍 ($P < 0.05$),且 AWD 条件下施加三种肥后空心菜根部生物量无明显变化。

2.2 空心菜中砷含量

对空心菜前三茬地上部砷含量分析发现,在第一茬时,AWD 条件下空心菜累积的砷含量较高,但从第二茬开始,施加三种肥料后 WF 条件下空心菜累积到的砷含量显著高于 AWD 条件(图 2)。从肥料类型分析发现,第一茬时,OF 处理在不同水分条件下均显著低于 Urea 处理和 UHP 处理;在第二茬时,三种肥料在不同的水分条件下空心菜地上部累积的砷含量差异均不显著;在第三茬时,OF 处理在两种水分条件下与 Urea 和 UHP 处理间均差异显著;且在 AWD 条件下,Urea 和 UHP 的砷含量分别为 4.42 mg/kg 和 3.90 mg/kg。值得注意的是,空心菜地上部砷的浓度随着刈割次数的增加越来越小,且对于 AWD-Urea 和 AWD-UHP 处理的第 1 茬和第 3 茬而言,相差 17.5 倍和 17.4 倍。将空心菜连续刈割三茬后对其根部的砷含量分析发现,在 WF 条件下施 Urea、UHP 和 OF 三种肥料后空心菜根部累积的砷分别是 AWD 条件下的 1.68 倍、3.67 倍和 3.45 倍。从

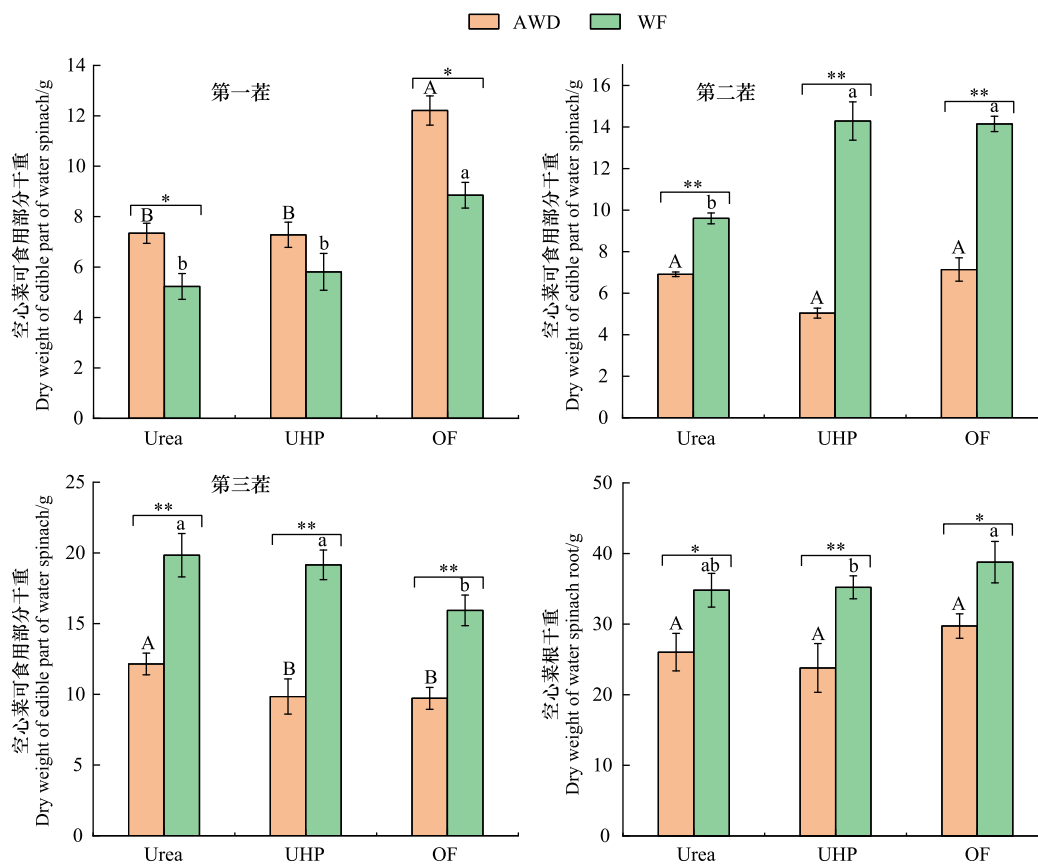


图1 不同水分管理与肥料对空心菜生物量的影响

Fig.1 Effect of different water management and fertilisers on biomass of water spinach

AWD: 干湿交替 Alternation of dry and wet; WF: 淹水 Water flooding; Urea: 尿素 Urea; UHP: 过氧化尿素 Urea peroxide; OF: 有机肥 Organic fertiliser; 根据邓肯检验, 大写字母和小写字母分别代表干湿交替和淹水条件下不同肥料处理间显著差异 ($P < 0.05$), * 代表同一肥料不同水分管理之间的显著差异; * ($P < 0.05$); ** ($P < 0.01$), 图中数据为平均值 $\pm$ 标准差 ($n = 3$); 图中是 4 颗空心菜总的生物量

肥料类型分析发现, 相同水分条件下, WF-OF 处理的神浓度最高为 187.03 mg/kg, 显著高于 WF-Urea 处理 ($P < 0.05$)。在 AWD 条件下, WF-OF 处理的神浓度最高为 84.45 mg/kg, AWD-UHP 处理则最低为 46.19 mg/kg, 两者差异显著 ($P < 0.05$), 而 AWD-Urea 处理和 AWD-UHP 处理的神含量差异不显著。

2.3 根际土中神形态分布

空心菜根际土壤中不同形态神含量占比如图 3 所示, 对比五种形态的神含量分析发现, 离子交换态神 (F1) 含量最低, 仅占五种形态神总和的 1%—2%, 其次是碳酸盐结合态神 (F2) 含量, 仅占 5%—8%。铁锰氧化物结合态神 (F3) 含量占五种形态神总和的 17%—37%; 此外, 在 AWD 条件下施加三种肥料后 F3 含量比 WF 条件下减少了 6%—20%。有机物、硫化物结合态神 (F4) 含量占五种形态神总和的 7%—12%; 值得注意的是, 在 AWD 条件下施加 UHP 后, F4 的含量比 WF 条件下减少了 5%。所有处理中残渣态神 (F5) 含量最高, 占有形态神总和的 43%—69%; 且在 WF 条件下施加三种肥料后, F5 的含量比 AWD 条件下增加了 4%—26%, 尤其是施加 UHP 后, F5 的含量在两种水分条件下变化最大。总之, 对五种形态的神占比由大到小排列为 $F5 > F3 > F4 > F2 > F1$ 。

2.4 重金属神的生物富集量 (BCA) 和转运系数 (TF)

空心菜前三茬地上部 BCA 如图 4 所示, 在第一茬时, 施加三种肥后 AWD 处理下空心菜地上部 BCA 均高于 WF 处理, 尤其是施 OF 的处理在两种水分条件下差异显著 ($P < 0.05$)。从肥料类型分析发现, WF 条件下第一茬空心菜施三种肥料后 BCA 无显著差异, 而 AWD 条件下施 UHP 的处理显著低于其它处理 ($P < 0.05$)。第

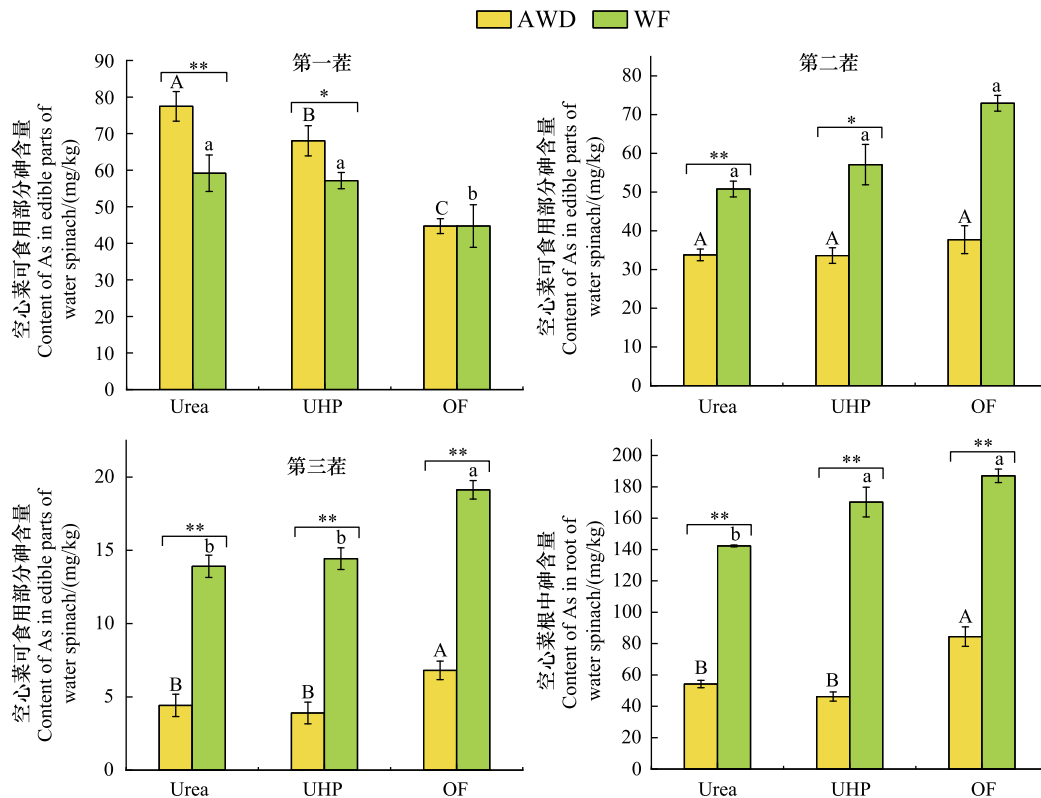


图2 不同水管理方法与肥料对空心菜各部位砷积累的影响

Fig.2 Effects of different water management and fertilisers on arsenic accumulation in various parts of water spinach

二茬时,WF 条件下 BCA 含量显著高于 AWD 处理,且 Urea 和 OF 在两种水管理下差异极显著 ($P<0.01$)。在 WF 条件下施三种肥料空心菜 BCA 含量差异均显著;在 AWD 条件下时,施加 UHP 的处理其 BCA 含量显著低于其它处理 ($P<0.05$)。在第三茬时,从水分条件发现,施三种肥料在 WF 条件下空心菜 BCA 含量均显著高于 AWD 条件,且施加 Urea、UHP 和 OF 三种肥料后分别相差 5.70、8.41 倍和 4.62 倍;从肥料类型发现,WF 条件下三种肥料空心菜 BCA 差异均不显著,而 AWD 条件下结果与第二茬结果相似。空心菜地下部 BCA 在两种水分条件下差异极显著 ($P<0.01$),且分别高出 AWD 条件下 3.52、5.41 倍和 2.90 倍。在两种水分条件下,施加 OF 的处理其 BCA 均显著大于其它处理 ($P<0.05$)。对试验期间各处理所有空心菜 BCA 而言,从不同水分条件发现,WF 条件下均显著高于 AWD 处理 ($P<0.05$);在 AWD 条件下时,OF 处理 BCA 含量最高, UHP 处理最低 ($P<0.05$),且三种肥料在两种水分条件下均差异显著 ($P<0.05$)。

空心菜砷的转运系数 (TF) 在第一茬时,AWD 处理下 Urea 和 UHP 处理的砷从根部转运到地上部的能力最强,且与第二茬结果类似。AWD-UHP 处理砷的转运能力在前二茬样品中均是最强的。前二茬空心菜地上部的转运系数 (TF) 在 AWD 的水管理下均显著高于 WF 处理,且随着刈割次数的增加,砷的转运能力逐渐下降 (第二茬 WF-OF 除外)。第三茬时砷的转运系数在 0.08—0.1 之间,转运系数较第一茬降低了 2.4—18.5 倍。

3 讨论

3.1 养分与水管理对空心菜生长和砷积累转运的影响

试验结果表明,随着空心菜刈割次数的增加,WF 条件下空心菜长势更好,这是因为在水分充足的条件下,空心菜的茎部发根产生了更多侧芽导致其地上部生物量随之增加,而在 WF 条件下,施三种肥料处理的空心菜地上部生物量均呈上升趋势,且前两茬施 OF 的处理对空心菜生长更有利,而施 Urea 和 UHP 的处理越到

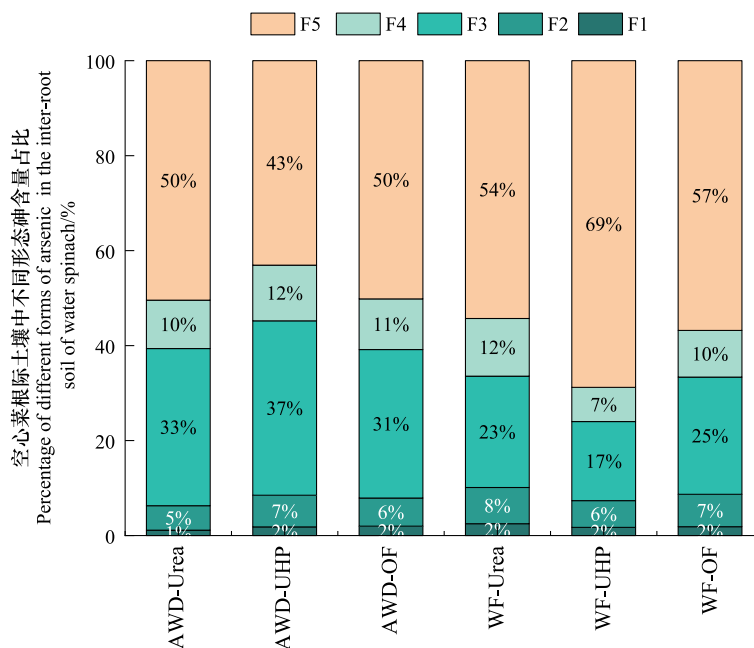


图3 空心菜根际土壤中不同形态砷含量占比

Fig.3 Percentage of different forms of arsenic in the inter-root soil of water spinach

F1: 离子交换态砷 Ion-exchanged arsenic; F2: 碳酸盐结合态砷 Carbonate-bound arsenic; F3: 铁锰氧化物结合态砷 Iron-manganese oxide-bound arsenic; F4: 有机物硫化物结合态砷 Organic matter sulphide-bound arsenic; F5: 残渣态砷 Residual arsenic; AWD-Urea: 尿素-干湿交替处理 Alternation of dry and wet-urea; AWD-UHP: 过氧化尿素-干湿交替处理 Alternation of dry and wet-Urea peroxide; AWD-OF: 有机肥-干湿交替处理 Alternation of dry and wet-Organic fertiliser; WF-Urea: 尿素-淹水处理 Water flooding-urea; WF-UHP: 过氧化尿素-淹水处理 Water flooding-Urea peroxide; WF-OF: 有机肥-淹水处理 Water flooding-Organic fertiliser, 图中数据为平均值 $\pm$ 标准差 ($n=3$)

后期优势越显著,这与肥料为空心菜提供的可供其吸收的氮素含量和土壤中的砷浓度有关^[38-40]。对于空心菜累积的砷而言,本研究结果表明在两种水管理下,空心菜地上部累积的砷在 Urea 和 UHP 处理中整体都呈下降趋势,而施加 OF 的处理呈现先增加后降低的趋势,这是因为 OF 处理的前期腐殖质 (DOM) 诱导 As 与 Fe 之间形成络合物^[41],将土壤中的砷暂时固定,但随着培养时间的增加,OF 中不稳定的有机质与 As 形成溶解配合物,促进其从土壤颗粒中解吸^[42],这部分砷又被释放到土壤中被植物吸收所导致。

本实验进一步证明,砷在土壤-水溶液中的溶解度和流动性受土壤 pH、Eh 和 DOC 等因素影响。WF 条件下土壤的 pH 和 Ec 显著高于 AWD 条件,土壤 pH 值的增加导致生物可利用态砷含量也增加^[43];且 DOC 会与土壤中的砷酸根竞争铁锰氧化物表面的吸附位点,让更多的有效态砷释放,进而被植物吸收^[44]。而干湿交替的水分条件下砷的浓度会显著降低,尤其是三价砷,因为干湿交替时,土壤处于好氧状态,此条件下三价铁还原菌 (FeRB) 和异化硫酸盐还原菌 (SRB) 的含量显著减少,进而导致 aioA 基因和 arsMAs 基因丰度显著减少,而这两个基因会影响土壤中异化亚硫酸盐还原酶 β -亚基,此酶在土壤中二甲基砷酸盐的产生中发挥重要作用,进而影响土壤中砷的种类与流动性^[45-46]。这与本试验中 WF 条件下空心菜根部累积的砷更多的研究结果一致。此外,砷的释放时间与所处土壤环境的 pH 和氧化还原条件有关。碱性条件下释放速率是酸性条件下的 10—45 倍,且好氧条件下砷在 12h 内会快速释放,此后释放量非常小且缓慢^[47],这也与本试验中 WF 条件下空心菜根部累积的砷远高于 AWD 条件的结果一致。试验发现越到后期,空心菜地上部砷含量越低,且砷从根部转移到地上部的能力也越小,尤其是 WF 处理下转运系数 (TF) 最小,这可能与植物的砷转运蛋白有关^[48]。如 Zhao 等^[49] 研究报道在水稻 NIP 水通道蛋白中的 OsNIP1;1 或者 OsNIP3;3 不影响 As (III) 的吸收,但能够显著降低 As (III) 向地上部的转运^[50],且 NIP 中还存在其他的外排转运蛋白,但空心菜水通道蛋白调控砷的具体基因还有待研究。

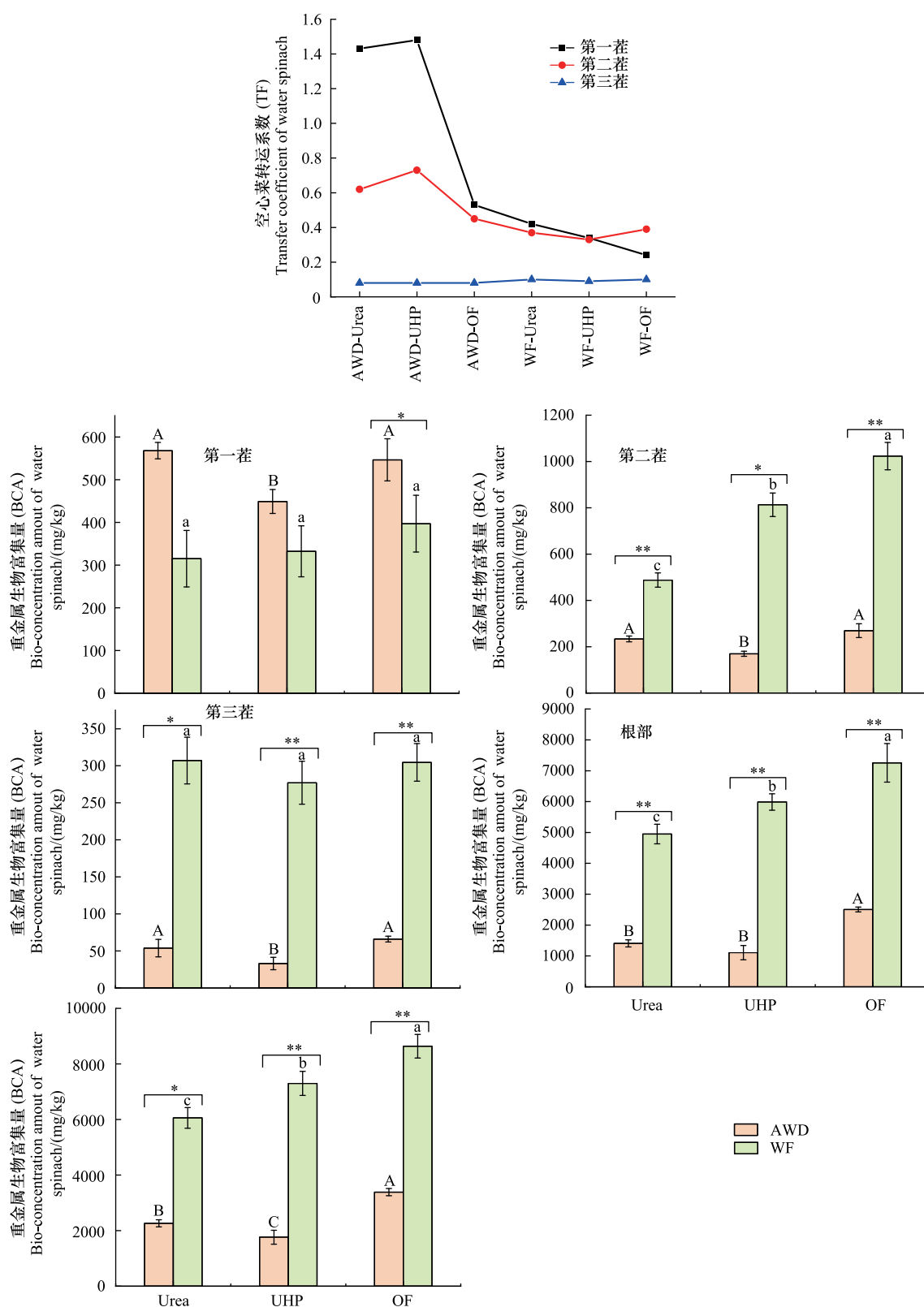


图4 空心菜重金属生物富集量(BCA)和砷转运系数(TF)

Fig.4 Heavy metal bioconcentration (BCA) and arsenic transport factor (TF) in water spinach

根据邓肯检验,大写字母和小写字母分别代表干湿交替和淹水条件下不同肥料处理间显著差异($P<0.05$), * 代表同一肥料不同水分管理之间的显著差异; * ($P<0.05$); ** ($P<0.01$),图中数据为平均值 $\pm$ 标准差($n=3$)

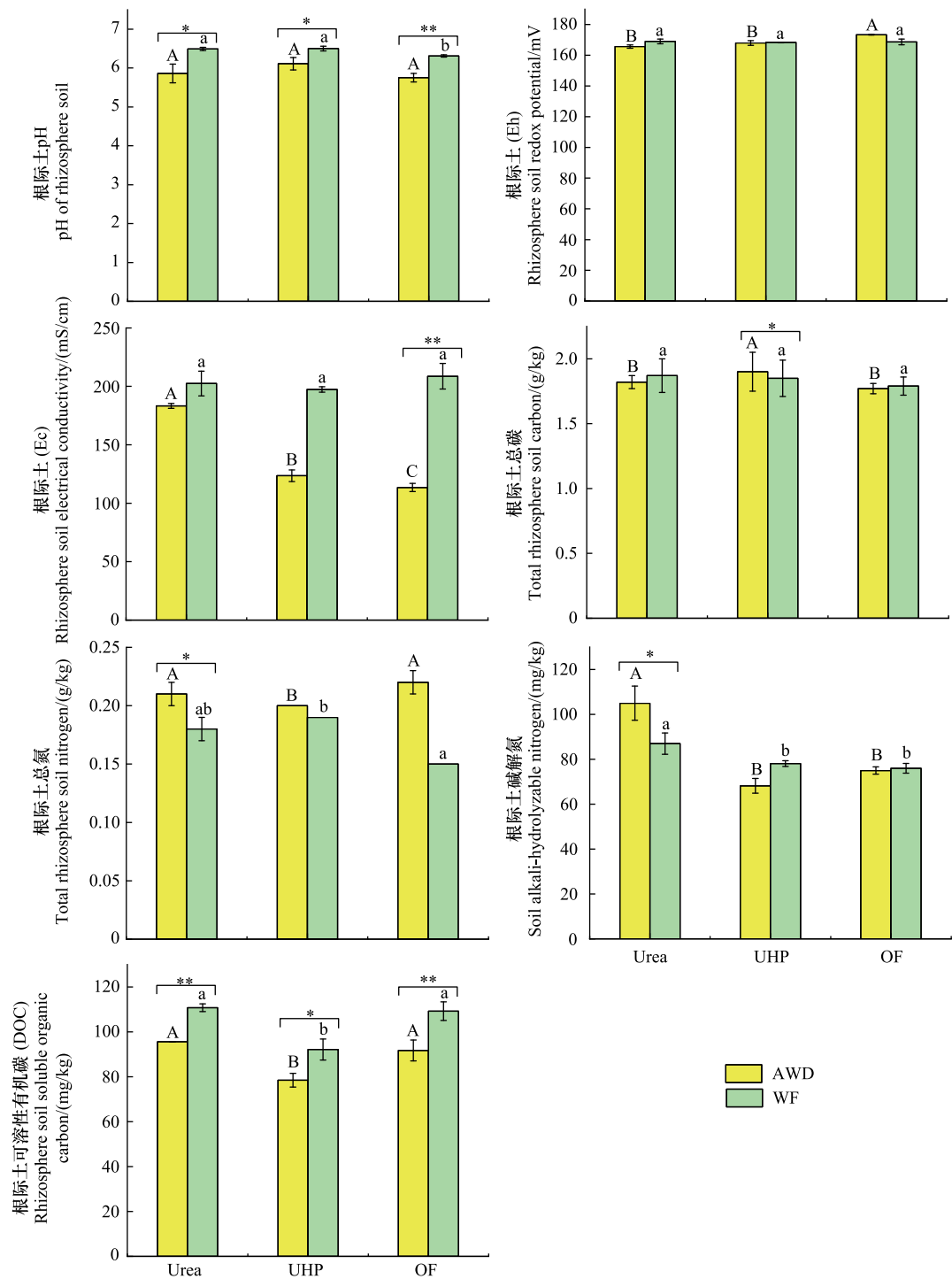


图 5 不同肥料和水分管理对空心菜根际土壤理化性质的影响

Fig.5 Effect of different fertiliser and water management on the physico-chemical properties of inter-root soil of water spinach

* ($P < 0.05$); ** ($P < 0.01$), 图中数据为平均值 $\pm$ 标准差 ($n = 3$)

3.2 养分与水分管理对土壤砷形态的影响

三种肥料和两种水分条件均会影响土壤中各形态砷含量,且不同形态砷在土壤中的迁移转化受土壤 pH、Eh、和离子环境(如 Ec)的影响^[51]。

试验结果发现,空心菜根际土中离子交换态砷(F1)和碳酸盐结合态砷(F2)的占比较小(图 3),这可能与

游离态砷易被植物吸收或被土壤中的铁锰等金属离子暂时固定有关^[52]。此外,WF 条件下,土壤 F1 和 F2 占比普遍高于 AWD 条件,这与 WF 条件下土壤 pH 显著高于 AWD 条件有关^[29]。试验结果显示 Eh 降低 pH 升高时会增加砷的溶解性,这与 Shen 等^[53]的结果相似,且砷的吸附与有机质的含量关系不大^[48]。本试验结果发现,AWD 条件下 F3 的含量显著高于 WF 条件,这与 AWD 条件影响土壤中铁氧化物活性转化的过程有关^[54],在 AWD 条件下,土壤的氧化还原条件会发生相应的波动,氧化铁可能经历还原性溶解、再氧化和(共)沉淀^[55]。此外,结晶度不同的土壤氧化铁对重金属的固定能力也不同^[56],土壤落干可使无定形铁氧化物转化为结晶铁氧化物,淹水可使土壤中无定形铁氧化物的质量分数显著增加,而游离态铁氧化物可以吸附固定更多的砷^[56-57],这与本试验的研究结果一致。前人研究发现 pH 增加会减小硫对氧化铁的腐蚀性,进而减少硫铁混合物络合的砷溶出^[58-59],这与本试验中 AWD 条件下, F4 含量高于 WF 条件, pH 含量低于 WF 条件的结论一致。在两种水分条件下施加 Urea 和 OF 对残渣态砷(F5)的占比影响较小,但施加 UHP 在两种水分条件下 F5 的占比相差较大(图 3),推测这与 UHP 施入土壤后分解产生的 H_2O_2 在两种水分条件下的稳定性不同,导致其与土壤中的硫铁等元素反应生成更难溶的砷化物有关^[26-27,60-61]。此外,砷的释放速率和释放量与土壤中的 DOC 和 pH 有很大关系,DOC 浓度越高、pH 值越大越有利于砷的释放^[62-63],这与本试验研究结果一致。

3.3 刈割次数对空心菜生物量及砷积累的影响

植物不同器官部位、不同生长阶段对砷的积累能力不同,往往是从地下根部到地上部可食部位 As 积累减少^[64-65],此外,刈割次数也会影响作物地上部砷含量^[50]。空心菜修复砷污染土壤的报道中,对目标植物都仅收获一茬,且培养时间大多在 15—45 d 左右,鲜少有报道将空心菜种植收获多茬去探究其砷积累情况^[66]。本试验对空心菜地上部收获了三茬并测定了其总砷含量,发现多茬刈割不仅可以促进空心菜地上部的再生能力,而且在 WF 条件下,第一茬和第三茬空心菜地上部 BCA 总砷基本持平而第二茬显著高于第一茬,显然增加空心菜地上部刈割次数有利于空心菜吸附累积更多的砷。随着刈割次数的增加,空心菜地上部产量也随之增加(图 6),尤其从第三茬开始差异更明显,这与刈割促进了空心菜茎部产生侧芽有关。Urea 和 UHP 对空心菜地上部生物量的影响不大,而 OF 对空心菜的生物量影响与水分条件有关,这是因为有机肥释放肥力的过程较缓慢,且淹水条件下有机肥不容易向下层土壤迁移而停留在水土界面,导致根部不容易接触到肥料并吸收,进而影响空心菜长势。对空心菜地上部砷含量而言,刈割次数和水分都会显著影响空心菜地上部砷含量,这是因为顶端优势解除后,水分充足条件下多次刈割会促进空心菜侧芽生长,且根部累积的砷向地上部转运越来越小,因此增加刈割次数对空心菜的生长和安全生产更有利。总之,当肥料与刈割次数相同时,水分是影响空心菜生物量及砷积累的关键因素,而肥料和刈割次数主要影响空心菜的生长。

试验发现在第三茬时,WF 条件下的空心菜富集和转运砷的能力会大幅度减少,且第三茬 AWD-Urea 和 AWD-UHP 处理的鲜重(按蔬菜含水量 90% 计算)总砷含量分别为 0.44 mg/kg 和 0.39 mg/kg,符合国家叶菜安全限量标准(GB 2762—2022)^[67],实现安全生产。

4 结论与展望

本研究发现,多茬刈割、水分条件和肥料类型对空心菜的生长和砷累积情况都有一定的影响,适当增加空心菜刈割次数有利于空心菜生长的同时,能逐渐减少其地上部砷累积量;水分条件是影响空心菜累积砷的关键因素,尤其是 WF 条件下空心菜累积砷与 AWD 条件相比差异显著,且随着刈割次数的增加降砷效果更明显;肥料类型对空心菜生长和砷累积的影响与水分条件密切相关,而与刈割次数没有显著相关性。总之,在中度砷污染菜地种植空心菜时,推荐前三茬以修复为主线,在 WF-OF 模式下种植;在刈割三茬后,以安全生产为主线,在 AWD-UHP 或 AWD-Urea 条件下生产。此外,本试验选用的大叶白骨空心菜对砷的累积能力较强,但在第三茬刈割后,此品种地上部砷已经符合国家食品安全(GB 2762—2022)中叶菜安全砷限量标准的要求。但推广应用前还有待在大田中验证。

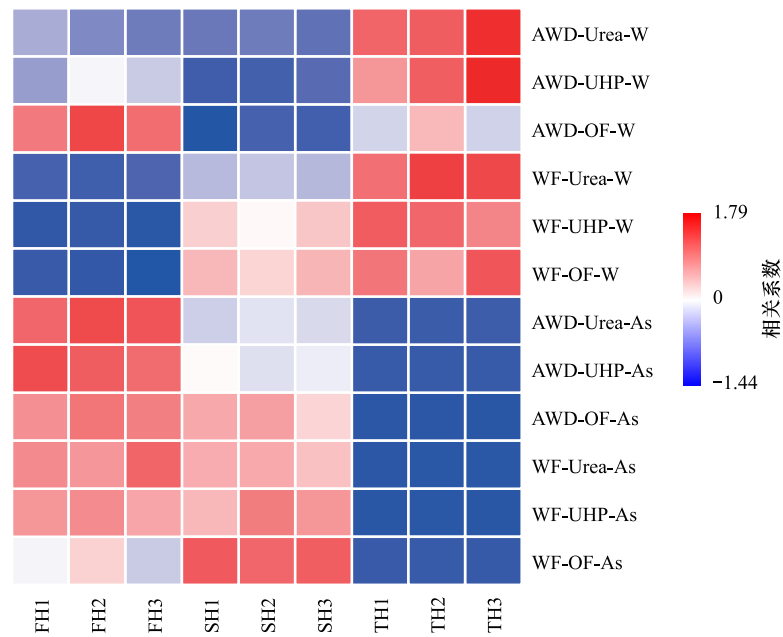


图6 以刈割次数为主因素分析三种肥料处理下空心菜地上部生物量和砷积累的关系

Fig.6 Relationship between above-ground biomass and arsenic accumulation in water spinach under three fertiliser treatments analysed with the number of mowings as the main factor

FH:第一茬 First harvest(后面数字代表重复);SH:第二茬 Second harvest;TH:第三茬 Third harvest;AWD:干湿交替 Alternation of dry and wet;WF:淹水 Water flooding;Urea:尿素 Urea;UHP:过氧化尿素 Urea peroxide;OF:有机肥 Organic fertiliser;As:空心菜地上部砷含量 Aboveground arsenic content of water spinach;W:空心菜地上部干重 Aboveground dry weight of water spinach.例如:AWD-Urea-W;干湿交替-尿素-空心菜地上部干重 Alternation of dry and wet-Urea-Aboveground dry weight of water spinach,AWD-Urea-As;干湿交替-尿素-空心菜地上部砷含量 Alternation of dry and wet-Urea-Aboveground arsenic content of water spinach

参考文献 (References):

[1] Rahaman M S, Rahman M M, Mise N, Sikder M T, Ichihara G, Uddin M K, Kurasaki M, Ichihara S. Environmental arsenic exposure and its contribution to human diseases, toxicity mechanism and management. Environmental Pollution, 2021, 289: 117940.

[2] Golui D, Raza M B, Roy A, Mandal J, Sahu A K, Ray P, Datta S P, Rahman M M, Bezbaruah A. Arsenic in the soil-plant-human continuum in regions of Asia: exposure and risk assessment. Current Pollution Reports, 2023, 9(4): 760-783.

[3] Mondal R, Majumdar A, Sarkar S, Goswami C, Joardar M, Das A, Mukhopadhyay P K, Roychowdhury T. An extensive review of arsenic dynamics and its distribution in soil-aqueous-rice plant systems in south and Southeast Asia with bibliographic and meta-data analysis. Chemosphere, 2024, 352: 141460.

[4] Liu J, Su J Y, Wang J, Song X, Wang H W. A case study: arsenic, cadmium and copper distribution in the soil-rice system in two main rice-producing provinces in China. Sustainability, 2022, 14(21): 14355.

[5] Mudgal V, Raninga M, Patel D, Ankoliya D, Mudgal A. A review on Phytoremediation: sustainable method for removal of heavy metals. Materials Today: Proceedings, 2023, 77: 201-208.

[6] Bolan N, Kunhikrishnan A, Thangarajan R, Kumpiene J, Park J, Makino T, Kirkham M B, Scheckel K. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils—to mobilize or to immobilize? Journal of Hazardous Materials, 2014, 266: 141-166.

[7] Pouresmaeili M, Ataei M, Forouzandeh P, Azizollahi P, Mahmoudifard M. Recent progress on sustainable phytoremediation of heavy metals from soil. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(5): 108482.

[8] Yamaguchi N, Nakamura T, Dong D, Takahashi Y, Amachi S, Makino T. Arsenic release from flooded paddy soils is influenced by speciation, Eh, pH, and iron dissolution. Chemosphere, 2011, 83(7): 925-932.

[9] Wu C, Ye Z H, Shu W S, Zhu Y G, Wong M. Arsenic accumulation and speciation in rice are affected by root aeration and variation of genotypes. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(8): 2889-2898.

- [10] Xu X Y, McGrath S P, Meharg A A, Zhao F J. Growing rice aerobically markedly decreases arsenic accumulation. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(15): 5574-5579.
- [11] Norton G J, Adomako E E, Deacon C M, Carey A M, Price A H, Meharg A A. Effect of organic matter amendment, arsenic amendment and water management regime on rice grain arsenic species. *Environmental Pollution*, 2013, 177: 38-47.
- [12] Yang Y Q, Hu H Q, Fu Q L, Zhu J, Huang G Y. Water management of alternate wetting and drying reduces the accumulation of arsenic in brown rice-as dynamic study from rhizosphere soil to rice. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 185: 109711.
- [13] Wang R, Liu T, Lu C Y, Zhang Z C, Guo P R, Jia B B, Hao B H, Wang Y C, Guo W. Bioorganic fertilizers improve the adaptability and remediation efficiency of *Puccinellia distans* in multiple heavy metals-contaminated saline soil by regulating the soil microbial community. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 448: 130982.
- [14] Guo S R, Jiang M Q, Lin J J, Khan N I, Owens G, Chen Z L. Arsenic speciation, oxidation and immobilization in an unsaturated soil in the presence of green synthesized iron oxide nanoparticles and humic acid. *Chemosphere*, 2023, 311(Pt 2): 137198.
- [15] Chen G N, Du Y H, Fang L P, Wang X Q, Liu C P, Yu H Y, Feng M, Chen X, Li F B. Distinct arsenic uptake feature in rice reveals the importance of N fertilization strategies. *The Science of the Total Environment*, 2023, 854: 158801.
- [16] Yang W, Dai H P, Skuza L, Wei S H. The front-heavy and back-light nitrogen application mode to increase stem and leaf biomass significantly improved cadmium accumulation in *Solanum nigrum* L. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 393: 122482.
- [17] Baragaño D, Forján R, Álvarez N, Gallego J R, González A. Zero valent iron nanoparticles and organic fertilizer assisted phytoremediation in a mining soil: arsenic and mercury accumulation and effects on the antioxidative system of *Medicago sativa* L. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 433: 128748.
- [18] Sun W C, Ye J, Lin H, Yu Q G, Wang Q, Chen Z M, Ma J C, Ma J W. Dynamic characteristics of heavy metal accumulation in agricultural soils after continuous organic fertilizer application: field-scale monitoring. *Chemosphere*, 2023, 335: 139051.
- [19] Liu T, Wang S S, Chen Y N, Luo J Q, Hao B H, Zhang Z C, Yang B, Guo W. Bio-organic fertilizer promoted phytoremediation using native plant *Leymus chinensis* in heavy Metal(loid)s contaminated saline soil. *Environmental Pollution*, 2023, 327: 121599.
- [20] Zhou S W, Liu J, Xu M G, Lv J L, Sun N. Accumulation, availability, and uptake of heavy metals in a red soil after 22-year fertilization and cropping. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(19): 15154-15163.
- [21] Park J H, Lamb D, Paneerselvam P, Choppala G, Bolan N, Chung J W. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185(2/3): 549-574.
- [22] Zhou L L, Qian Y J, Chen J B, Zhang Y L, Zhou X F. A critical review of solid peroxides in environmental remediation and water purification: from properties to field applications. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 465: 142424.
- [23] 丁汉卿. 土壤磷铁比和过氧化尿素对水稻根表铁膜形成和水稻镉吸收的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [24] 王瑞, 李奕林, 喻敏, 施卫明. 过氧化脲及尿素配比对水培上海青生长及品质的影响. *土壤*, 2022, 54(2): 240-246.
- [25] 杜宏儒, 刘利, 李勃, 韩真, 谢兆森. 过氧化尿素对葡萄幼树淹水胁迫的缓解效果. *北方园艺*, 2020(1): 21-26.
- [26] Zimmerman A J, Garcia Gutierrez D, Shaghghi N, Sharma A, Deonarine A, Landrot G, Weindorf D C, Siebecker M G. Mobility and bioaccessibility of arsenic (As) bound to titanium dioxide (TiO₂) water treatment residuals (WTRs). *Environmental Pollution*, 2023, 326: 121468.
- [27] Kato T, Uaciquete D L E, Onodera G, Okawa H, Sugawara K, Worasuwanarak N. Changes in the sulfur forms of subbituminous coals during oxidation with hydrogen peroxide and peracetic acid. *Fuel*, 2022, 330: 125544.
- [28] Song T, Das D, Hu Q J, Yang F, Zhang J H. Alternate wetting and drying irrigation and phosphorus rates affect grain yield and quality and heavy metal accumulation in rice. *The Science of the Total Environment*, 2021, 752: 141862.
- [29] Hu R F, Cooper J A, Daroub S H, Kerl C F, Planer-Friedrich B, Seyfferth A L. Low levels of arsenic and cadmium in rice grown in southern Florida Histosols-Impacts of water management and soil thickness. *The Science of the Total Environment*, 2023, 869: 161712.
- [30] 崔星怡, 秦俊豪, 李智鸣, 黎华寿. 不同品种空心菜对重污染土壤砷的吸收累积及其亚细胞分布. *农业环境科学学报*, 2017, 36(1): 24-31.
- [31] Zama E F, Reid B J, Sun G X, Yuan H Y, Li X M, Zhu Y G. Silicon (Si) biochar for the mitigation of arsenic (As) bioaccumulation in spinach (*Spinacia oleracea*) and improvement in the plant growth. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 189: 386-395.
- [32] 罗飞, 廖曼, 林挺, 郝秀平, 陈梦舫, 宋静. 深圳市建设用地土壤污染风险筛选值和管制值研究. *环境工程*, 2023: 1-9. (2023-11-29). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.x.20231128.1455.002.html>.
- [33] 赵述华, 罗飞, 郝秀平, 杨坤, 廖曼, 赵妍, 吴静雅. 深圳市土壤砷的背景含量及其影响因素研究. *中国环境科学*, 2020, 40(7): 3061-3069.
- [34] Yang X, Shaheen S M, Wang J X, Hou D Y, Ok Y S, Wang S L, Wang H L, Rinklebe J. Elucidating the redox-driven dynamic interactions

- between arsenic and iron-impregnated biochar in a paddy soil using geochemical and spectroscopic techniques. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 422: 126808.
- [35] Zhang S Z, Li W, Shan X Q, Lu A X, Zhou P J. Effects of low molecular weight organic anions on the release of arsenite and arsenate from a contaminated soil. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2005, 167(1): 111-122.
- [36] 占新华, 周立祥. 土壤溶液和水体中水溶性有机碳的比色测定. *中国环境科学*, 2002, 22(5): 433-437
- [37] Wenzel W W, Kirchbaumer N, Prohaska T, Stingeder G, Lombi E, Adriano D C. Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure. *Analytica Chimica Acta*, 2001, 436(2): 309-323.
- [38] Talukder A S M H M, Meisner C A, Sarkar M A R, Islam M S, Sayre K D. Effects of water management, arsenic and phosphorus levels on rice yield in high-arsenic soil-water system. *Rice Science*, 2014, 21(2): 99-107.
- [39] Spanu A, Daga L, Orlandoni A M, Sanna G. The role of irrigation techniques in arsenic bioaccumulation in rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(15): 8333-8340.
- [40] Zhang L, Li C B, Liu Y X, Sun Z C, He Y, Wen D F, Wang Y C, Chen X, Cai H Q, Li G T. Participation of urea-N absorbed on biochar granules among soil and tobacco plant (*Nicotiana tabacum* L.) and its potential environmental impact. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 313: 107371.
- [41] Chen Z, Wang Y P, Jiang X L, Fu D, Xia D, Wang H T, Dong G W, Li Q B. Dual roles of AQDS as electron shuttles for microbes and dissolved organic matter involved in arsenic and iron mobilization in the arsenic-rich sediment. *The Science of the Total Environment*, 2017, 574: 1684-1694.
- [42] Pothier M P, Lenoble V, Garnier C, Misson B, Rentmeister C, Poulain A J. Dissolved organic matter controls of arsenic bioavailability to bacteria. *The Science of the Total Environment*, 2020, 716: 137118.
- [43] Wu Q H, Mou X Y, Wu H X, Tong J H, Sun J C, Gao Y, Shi J Y. Water management of alternate wetting and drying combined with phosphate application reduced lead and arsenic accumulation in rice. *Chemosphere*, 2021, 283: 131043.
- [44] Fang W, Yang D X, Williams P N, Yang Y. Distinct response of arsenic speciation and bioavailability to different exogenous organic matter in paddy soil. *Chemosphere*, 2022, 309: 136653.
- [45] Kaya C, Uğurlar F, Ashraf M, Hou D Y, Kirkham M B, Bolan N. Microbial consortia-mediated arsenic bioremediation in agricultural soils: current status, challenges, and solutions. *The Science of the Total Environment*, 2024, 917: 170297.
- [46] Zhao F J, Harris E, Yan J, Ma J C, Wu L Y, Liu W J, McGrath S P, Zhou J Z, Zhu Y G. Arsenic methylation in soils and its relationship with microbial arsM abundance and diversity, and as speciation in rice. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(13): 7147-7154.
- [47] Fathi-Gerdelidani A, Towfighi H, Shahbazi K. Kinetic studies on arsenic release from geogenically enriched soils under oxidized and reduced conditions. *Journal of Geochemical Exploration*, 2022, 242: 107083.
- [48] Yan M M, Zhu C X, Song T T, Li B X, Su S M, Li H N. Impact of different manure-derived dissolved organic matters on the fate of arsenic-antibiotic in co-contaminated paddy soils. *Environmental Pollution*, 2022, 306: 119376.
- [49] Zhao F J, Ago Y, Mitani N, Li R Y, Su Y H, Yamaji N, McGrath S P, Ma J F. The role of the rice aquaporin Lsi1 in arsenite efflux from roots. *The New Phytologist*, 2010, 186(2): 392-399.
- [50] Zhang J, Hamza A, Xie Z, Hussain S, Brestic M, Tahir M A, Ulhassan Z, Yu M, Allakhverdiev S I, Shabala S. Arsenic transport and interaction with plant metabolism: Clues for improving agricultural productivity and food safety. *Environmental Pollution*, 2021, 290: 117987.
- [51] Zhou Y, Huang W, Nie Z, Liu H, Liu Y, Wang C, Xia J, Shu W. Fe/S oxidation-coupled arsenic speciation transformation mediated by AMD enrichment culture under different pH conditions. *Journal of Environmental Sciences*, 2024, 137: 681—700.
- [52] Chen R, Han L, Zhao Y H, Liu Z, Fan Y M, Li R S, Xia L F. Response of plant element traits to soil arsenic stress and its implications for vegetation restoration in a post-mining area. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109931.
- [53] Shen B B, Wang X M, Zhang Y, Zhang M, Wang K, Xie P, Ji H B. The optimum pH and Eh for simultaneously minimizing bioavailable cadmium and arsenic contents in soils under the organic fertilizer application. *The Science of the Total Environment*, 2020, 711: 135229.
- [54] 徐梅华, 顾明华, 王骋臻, 雷静, 韦燕燕, 沈方科. 锰对土壤砷形态转化及水稻吸收砷的影响. *生态环境学报*, 2022, 31(4): 802-813.
- [55] Liu Q J, Huang Y T, Zhou Y M, Chen Z L, Luo J Y, Yan X M. Impacts of wet-dry alternations on cadmium and zinc immobilisation in soil remediated with iron oxides. *Journal of Environmental Management*, 2023, 326(Pt A): 116660.
- [56] Sarkar S, Basu B, Kundu C K, Patra P K. Deficit irrigation: an option to mitigate arsenic load of rice grain in West Bengal, India. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 146(1): 147-152.
- [57] Souza T G F, Ciminelli V S T. Arsenic removal and fixation by iron (oxyhydr)oxides: what is new? *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2023, 33: 100466.
- [58] Mensah A K, Marschner B, Shaheen S M, Rinklebe J. Biochar, compost, iron oxide, manure, and inorganic fertilizer affect bioavailability of

- arsenic and improve soil quality of an abandoned arsenic-contaminated gold mine spoil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 234: 113358.
- [59] Liu Y, Qiao J L, Sun Y K. Enhanced immobilization of lead, cadmium, and arsenic in smelter-contaminated soil by sulfidated zero-valent iron. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 447: 130783.
- [60] Wang J, Ding X T, Zhou X Q, Liao Z W, Cai J Y, Wang S Q, Jawad A, Ifthikar J, Yang L, Wang S L, Chen Z Q. A versatile Fe^{2+} /urea hydrogen peroxide advanced oxidation process for not only organoarsenic remediation but also nitrogen supplement in soil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(3): 109677.
- [61] Xie X D, Hu Y A, Cheng H F. Rapid degradation of p-arsanilic acid with simultaneous arsenic removal from aqueous solution using Fenton process. *Water Research*, 2016, 89: 59-67.
- [62] Eiche E, Berg M, Hönig S M, Neumann T, Lan V M, Pham T K T, Pham H V. Origin and availability of organic matter leading to arsenic mobilisation in aquifers of the Red River Delta, Vietnam. *Applied Geochemistry*, 2017, 77: 184-193.
- [63] Lawson M, Polya D A, Boyce A J, Bryant C, Ballentine C J. Tracing organic matter composition and distribution and its role on arsenic release in shallow Cambodian groundwaters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 178: 160-177.
- [64] Zhang J, Li T, Yang Y L, Liu H G, Wang Y Z. Arsenic concentrations and associated health risks in *Laccaria* mushrooms from Yunnan (SW China). *Biological Trace Element Research*, 2015, 164(2): 261-266.
- [65] Rahman M M, Asaduzzaman M, Naidu R. Consumption of arsenic and other elements from vegetables and drinking water from an arsenic-contaminated area of Bangladesh. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 262: 1056-1063.
- [66] Liu Y F, Huang Y T, Li L, Xiong Y Y, Tong L T, Wang F Z, Fan B, Gong J S. Effect of different agricultural conditions, practices, and processing on levels of total arsenic and species in cereals and vegetables: a review. *Food Control*, 2023, 152: 109876.
- [67] 崔文文, 王小飞, 王明锐, 姚晶晶. 《食品安全国家标准食品中污染物限量》修订前后对比. *中南农业科技*, 2023, 44(12): 126-128.