

水分条件对藜蒿 (*Artemisia selengensis*) 富集湿地土壤重金属的影响*

章萍, 曾宪哲, 王亲媛, 王伟, 吴代赦**

(南昌大学资源环境与化工学院鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 南昌 330031)

摘要: 基于鄱阳湖南矶山湿地土壤及藜蒿 Cd、As 污染风险评价, 利用盆栽实验研究水分条件对区域土壤理化性质、砷镉形态及其上生长的藜蒿 (*Artemisia selengensis*) 重金属富集能力的影响。结果表明: 土壤 Cd 含量超标, 存在生态风险, 藜蒿茎中 As 含量达食品污染限量标准, 存在食用风险; 藜蒿对 Cd、As 的富集能力受土壤水分环境影响, 水分增加会造成土壤 pH 与有机质含量上升, 抑制藜蒿富集 Cd 的同时促进富集 As。线性回归计算显示土壤有效态 As 含量与藜蒿 As 富集量呈显著正相关, 可以用来评价藜蒿 As 富集情况, 而土壤有效态 Cd 含量与藜蒿 Cd 富集量间无显著相关性。结合区域土壤 Cd、As 污染情况, 适宜控制水分缺水或旱湿交替条件, 可以降低藜蒿等湿地植物中 Cd 的富集量; 适宜控制水分淹水条件, 可以减少土壤 Cd、As 有效态含量。

关键词: 鄱阳湖; 南矶山湿地; 重金属; 水分条件; 藜蒿; 富集

Effects of water conditions on the enrichment of heavy metals in wetland soils by *Artemisia selengensis*

ZHANG Ping, ZENG Xianzhe, WANG Qinyuan, WANG Wei & WU Daishe**

(Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization, Ministry of Education, School of Resources Environmental & Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, P.R.China)

Abstract: On the basis of the risk assessment of Cadmium (Cd) and Arsenic (As) pollution in Nanjishan Wetland soil and *Artemisia selengensis* in March 2012, the effects of water conditions on the physicochemical properties of wetland soil, the morphology of As and Cd, and the heavy metal enrichment capacity of *Artemisia selengensis* in the Lake Poyang were studied by pot experiments. Results showed that the content of Cd in soil exceeded the standard values, suggesting kind of ecological risk. The As concentrations in the stems of *Artemisia selengensis* is up to the limit standard of food pollution, which raised the risk of food consumption. The enrichment abilities of Cd and As by *Artemisia selengensis* were affected by the soil water environment. The increasing of water would increase soil pH and organic matter content, which inhibited the enrichment of *Artemisia selengensis* toward Cd while promoted the enrichment of As. The results of the linear regression showed that there was a significant positive correlation between the effective content of As in soil and the As concentrations in *Artemisia selengensis*, which could be used to evaluate the As enrichment characteristics of *Artemisia selengensis*. However, no significant correlation was found between the effective content of Cd in soil and the Cd concentrations in *Artemisia selengensis*. Combined with the condition of Cd and As pollution in the regional soil, the suitable control of the alternation of wet and dry or water shortage water conditions could reduce the concentrations of Cd in wetland plants such as *Artemisia selengensis*, the suitable control of waterflooding water condition could reduce the effective contents of Cd and As in soil.

Keywords: Lake Poyang; Nanjishan Wetland; heavy metal; water condition; *Artemisia selengensis*; enrichment

* 国家自然科学基金项目(21767018)、国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07301002-05)、江西省杰出青年人才基金项目(20171BCB23017)和南昌大学食品科学与技术国家重点实验室开放基金项目(SKLF-KF-201807)联合资助。2019-03-12 收稿; 2019-05-20 收修改稿。章萍(1981~), 女, 博士, 副研究员; E-mail: zhangping@ncu.edu.cn.

** 通信作者; E-mail: dswu@ncu.edu.cn.

藜蒿(*Artemisia selengensis*),典型湿地植物,一种半野生传统特产蔬菜,因其分布广泛、风味独特,作为特色野生食用植物,深受广大消费者喜爱^[1-2]。已有研究表明,藜蒿富含多种生理活性物质和多种微量元素,具有极高的营养及药用价值^[3]。董萌等^[4-5]研究发现洞庭湖藜蒿对 Cd、As、Cu、Pb 等重金属的吸收及转运能力极强,其北区藜蒿根中 Cd、As、Pb 含量分别高达 2.38、9.05、13.24 mg/kg;宋鹏飞等^[6]考察鄱阳湖入湖口地区的藜蒿,其地上部 Cd 含量超过标准值 11.70~25.70 倍。由此可见,藜蒿对重金属极具富集作用,存在食用安全隐患。

鄱阳湖位于江西省北部,是我国最大的吞吐型、季节性淡水湖。因常年汇集修水、赣江、抚河、信江、饶河 5 大水系所携带的工农业污水及矿山废水,鄱阳湖重金属污染日益严重^[7]。研究表明,鄱阳湖赣江水系 Cd、As 含量超出国家Ⅲ类水质标准,且其淹没下的洲滩及湿地土壤也表现出不同程度复合污染^[8-9]。鄱阳湖湿地多处于水陆过渡地带,受季节水位变化及地下水分布影响,存在淹水、枯水、干湿交替等不同水分条件^[10-11]。大量研究表明,不同水分条件下会导致湿地土壤理化性质(如 pH 值、有机质含量等)及重金属迁移性的差异,进而影响其上生长的植物对土壤重金属的富集效应^[3,10-11]。如水淹环境会促进美人蕉、黄花鸢尾等对湿地土壤中 Cu 的富集,而抑制红蛋对 Cd 的富集^[12-13];旱湿交替的水分环境可有效增强再力花对 Cu、Zn、Cd 的富集,而抑制旱伞草对 Pb、Cd 的富集^[13-14]。然而,目前有关水分条件对鄱阳湖藜蒿富集重金属影响的研究尚少。

本文以鄱阳湖南矶山湿地土壤及其上生长的藜蒿为研究对象,选取镉和砷为代表性重金属污染物,以原土及藜蒿中重金属含量为自然对照,利用盆栽实验考察不同水分条件对土壤理化性质、重金属形态及藜蒿富集重金属的影响,以期明晰水分条件对土壤-植物系统中重金属富集的影响,为鄱阳湖地区土壤重金属污染治理及湿地植物水分管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 采样点布设与样品采集

南矶山湿地处于赣江三大支流的河口与湖体之间的过渡地带,接纳来自各支流及湖体携带的污染物,具有潜在污染威胁^[15]。综合考虑赣江支流和湖体间的河流分布、水体污染程度、水域面积等因素,在南矶山布设 4 个采样点(穿盩甲附近洲滩 A₁、东谢附近洲滩 A₂、南矶乡信用社附近洲滩 A₃和柏家附近洲滩 A₄),如图 1 所示。2012 年 3 月,每个采样点随机采集一定量的藜蒿及其根周土,采样后立即将样品密封于聚乙烯袋中,低温保存运回实验室进行处理及分析。

1.2 盆栽试验

将采集的藜蒿与其根周土分离,从中选取长势一致、根系完整的藜蒿幼苗(株高 10 cm 左右)及混匀后的根周土分别作为盆栽藜蒿和试验土壤。称取 10 kg 左右的混匀土装于聚乙烯塑料花盆(直径 30 cm × 高 25 cm)中,每盆种植 20 株藜蒿幼苗。为保持土壤原有肥力,试验期间不添加任何肥料。实验设置三种水分条件^[13,16-17],包括:旱培组(低水分条件,整个生长期土壤水势为-25 kPa),旱湿交替组(旱湿交替条件,整个生长期由 3 cm 的浸没水层自然落干到土壤水势-25 kPa 处,再添加去离子水至相应水层,再落干,如此循环),湿培组(淹水条件,整个生长期保持 3 cm 的浸没水层,土壤水势为 0 kPa),另设置对照组(湿润条件,整个生长期土壤水势为-10 kPa)。每种水分条件下均设置 3 个盆栽实验。

盆栽试验于 2012 年 3 月 20 日进行,试验期间藜蒿生长及采摘时间记录如下:湿培组 15 cm(3 月 25 日)、对照组 15 cm(3 月 28 日)、旱培组 15 cm(4 月 2 日);旱湿交替组 15 cm(4 月 2 日);湿培组 20 cm(4 月 4 日)、对照组 20 cm(4 月 8 日)、旱培组 20 cm(4 月 16 日);对照组 30 cm(5 月 7 日)、旱培组 30 cm(5 月 13 日)、湿培组 30 cm(5 月 15 日)。当藜蒿平均生长至 15、20 和 30 cm 时,每盆随机挖取 3 株带土藜蒿测定其植株及土壤的重金属含量,并测定土壤的 pH 值及有机质含量。

1.3 样品处理及分析

藜蒿样品经四分法缩分选取 1 kg 左右,然后立即除杂、洗净、拭干,称量整株、根、茎及叶的鲜重。然后于鼓风干燥箱中 105℃杀青,70℃烘干后称量各部分干重,经植物粉碎机粉碎过 100 目筛后密封保存^[3]。土壤样品经冷冻干燥机干燥并剔除动植物残体及石块,经玛瑙研钵研磨并过 100 及 200 目尼龙筛后置于干燥器

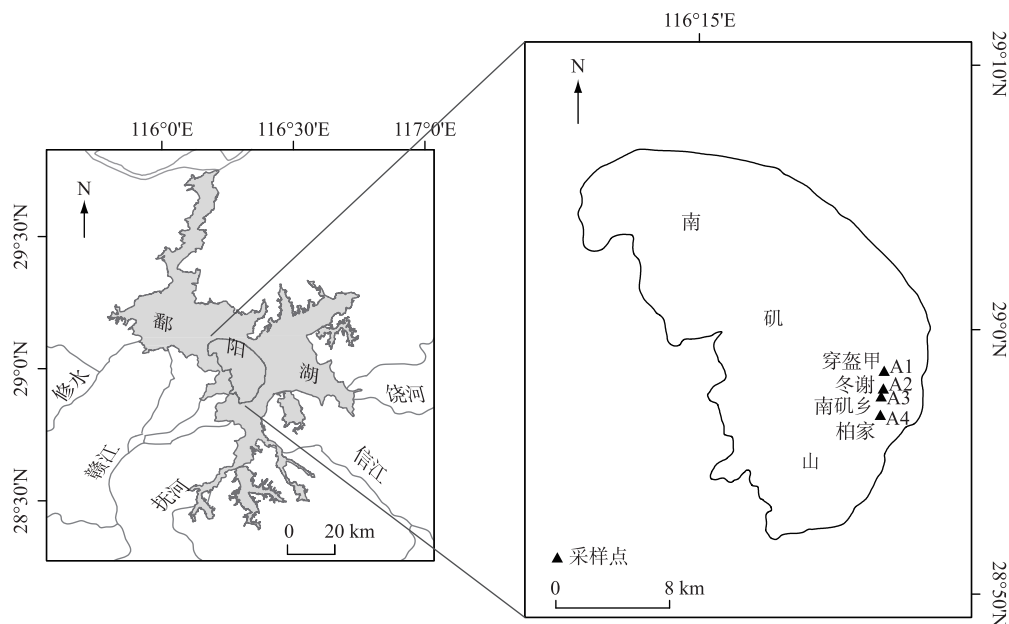


图1 鄱阳湖南矶山湿地采样点布设

Fig.1 Layout of sampling sites in Nanjishan Wetland of Lake Poyang

中待用,其中粗磨样(100目)用于土壤pH值、有机质测定及土壤砷、镉有效形态提取,细磨样(200目)用于土壤砷、镉全量分析。土壤有效态砷(水溶态、表层吸附态)及有效态镉(可交换态、碳酸盐结合态)的提取分别参考刘冠男^[18]和马玲^[19]等研究中的Shiowatana法及Tessier法。

土壤及藜蒿样品中As、Cd含量使用安捷伦7700X型电感耦合等离子体质谱仪测定,pH用雷磁PHS-3C型离子型酸度计测定,有机质含量采用烘箱加热重铬酸钾容量法测定^[20],土壤水势利用水分张力计进行监测^[16]。

1.4 评价方法

1.4.1 地累积指数法 地累积指数法是国内外广泛应用的沉积物重金属污染评价方法之一^[7,21-22],其计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 C_i / (K \cdot \beta_i) \quad (1)$$

式中, I_{geo} 为地累积指数; C_i 为重金属*i*的实测含量(mg/kg); β_i 为重金属*i*的参比值,其取值为该种重金属的地球化学平均背景值,该研究区Cd的背景为0.75 mg/kg^[22];K为考虑到造岩运动可能引起背景值波动而设定的常数,一般取值1.5。根据地累积指数大小可对重金属污染进行等级划分^[7,21-22], $I_{\text{geo}} \leq 0$,清洁;介于0~1,轻度污染;介于1~2,偏中度污染;介于2~3,中度污染;介于3~4,偏重污染;介于4~5,重污染; $I_{\text{geo}} > 5$,严重污染。

1.4.2 内梅罗综合污染指数法 内梅罗综合污染指数法是一种兼顾单一元素污染指数平均值和极值的环境污染评价指数^[7],其计算公式为:

$$P_i = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{\text{av}}^2 + (C_i/S_i)_{\text{max}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中, P_i 为评价区沉积物的重金属污染指数; C_i 为重金属*i*的实测含量(mg/kg); S_i 为重金属*i*的评价标准值(mg/kg); $(C_i/S_i)_{\text{av}}$ 为监测点土壤重金属元素单项污染指数的平均值; $(C_i/S_i)_{\text{max}}$ 为监测点土壤重金属单项污染指数的最大值。根据内梅罗综合污染指数大小可对重金属污染进行等级划分^[7,21-22], $P_i \leq 1$,清洁;介于1~2,轻度污染;介于2~3,偏中度污染;介于3~4,中度污染;介于4~5,偏重污染;介于5~6,重污染; $P_i > 6$,

严重污染.

1.4.3 潜在生态危害指数法 潜在生态危害指数法可定量分析单一污染和多因素综合污染的潜在生态风险程度^[7, 21-22],其计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \tag{3}$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \tag{4}$$

$$C_f^i = C_r^i / C_n^i \tag{5}$$

式中, RI 为沉积物重金属污染的潜在生态危害指数; E_r^i 为重金属*i*的潜在生态风险单项指数; C_r^i 为重金属*i*的潜在生态风险单项系数; r 为重金属*i*的毒性相应系数,Cd取值30^[22]; C_f^i 为重金属*i*的富集系数; C_r^i 为重金属*i*的实测含量(mg/kg); C_n^i 为底质背景参考值(mg/kg). 根据潜在生态风险单项指数大小可对重金属污染进行等级划分^[7, 21-22], $E_r^i \leq 40$,清洁;介于40~80,轻度污染;介于80~160,中度污染;介于160~320,重污染; $E_r^i > 320$,严重污染.

1.5 数据处理及分析

利用 ArcGIS 10.2 和 Origin 8.6 软件绘图,SPASS 19 软件进行相关性及差异性分析.

2 结果与分析

2.1 重金属污染情况分析

2.1.1 土壤重金属含量分析 南矶山湿地处于赣江三大支流的河口与湖体间过渡带,地区内土壤及沉积物易因常年接纳赣江支流和湖体所携污染物导致重金属超标^[15, 24]. 对该区域内采集的湿地土壤进行了理化性质与重金属含量测定,结果如表1所示,As、Cd含量分别为4.75±0.07和0.97±0.03 mg/kg,As含量大幅高于Cd,这与李传琼等^[25]在2018年对鄱阳湖赣江水系的金属元素分布特征调查结果相近,说明南矶山湿地所含重金属可能来源于汇入赣江水系的自然沉积. 对照鄱阳湖背景值和国家土壤质量标准可知,各采样点土壤As含量均在标准范围内,未造成污染;而南矶山土壤中Cd含量为鄱阳湖背景值的1.29倍,是国家土壤一级标准(自然背景)的4.85倍和国家土壤二级标准(酸性)的3.23倍,属于严重超标. 此外,运用内梅罗综合指数法和潜在生态危害法对Cd进行风险评价,计算其 P_r 和 E_r 值分别为1.33和106.80,结果显示为轻度污染和中度污染,表明该地区Cd存在一定的生态风险,会对如藜蒿等植物的正常生长及食用品质造成潜在威胁^[4, 26-27].

2.1.2 藜蒿重金属含量分析 为探究南矶山湿地藜蒿对土壤重金属As、Cd的吸收特点并评价其风险,测定了湿地藜蒿样品中重金属含量分布,并利用根茎转移系数 TF 和富集系数 CF 来描述藜蒿富集重金属能力. 考虑藜蒿含水率及各部分比重等因素,选择最能体现藜蒿对重金属富集能力的计算方法,其中 TF =地上鲜株中重金属含量/植物鲜株中重金属含量, CF =植物鲜株中重金属含量/土壤中重金属含量.

对藜蒿样品中重金属含量分布及根茎转移系数、富集系数的测定结果如表2所示. 由表可知,藜蒿组织中As、Cd含量以根部最高,茎中次之,这与大多数重金属在植物中的含量分布相同^[28]. 计算所得藜蒿对As和Cd的富集系数分别为0.06±0.01和0.35±0.02,说明藜蒿对Cd具有更强的根部富集能力,易受土壤镉污染影响;而As、Cd的根茎转移系数分别为0.29±0.02和0.19±0.01,说明As更易转移至藜蒿生长于地面的可

表1 南矶山湿地土壤理化性质与重金属含量*

Tab.1 Physical and chemical properties and heavy metal content of soil in Nanjishan Wetland

采样点	pH	有机质/ (g/kg)	As/ (mg/kg)	Cd/ (mg/kg)
A1	5.34	13.40	4.72	0.96
A2	5.36	12.70	4.80	0.97
A3	5.31	13.80	4.65	1.02
A4	5.36	13.10	4.84	0.93
平均值	5.34	13.25	4.75	0.97
标准差	0.02	0.40	0.07	0.03
盆栽原土	5.37	13.90	4.79	0.98
鄱阳湖背景值	/	/	13.37	0.75
土壤一级标准	/	/	15.00	0.20
土壤二级标准	/	/	30.00	0.30

* 鄱阳湖背景值指鄱阳湖沉积物重金属背景值^[23];土壤一级标准指国家土壤环境质量一级标准(自然背景)(GB 15618—1995);土壤二级标准指国家土壤环境质量二级标准(酸性)(GB 15618—1995).

食用部分. 经测定发现藜蒿茎中 As 含量达 $49.81 \pm 3.67 \mu\text{g/kg}$, 在食品污染物限量标准 ($50 \mu\text{g/kg}$) 水平^[3], 可能存在食用安全风险; 藜蒿茎中 Cd 的测定含量 ($28.68 \pm 0.73 \mu\text{g/kg}$) 虽处于安全范围内, 但鉴于藜蒿对 Cd 的强富集能力和近年来南矶山地区土壤 Cd 污染较重的情况, 存在潜在的食用安全风险.

表 2 南矶山湿地藜蒿样品中重金属含量的分布

Tab.2 Distribution of heavy metal content in *Artemisia selengensis* samples from Nanjishan Wetland

采样点	Cd 含量/($\mu\text{g/kg}$)			土壤含量/ ($\mu\text{g/kg}$)	TF	CF	As 含量/($\mu\text{g/kg}$)			土壤含量/ ($\mu\text{g/kg}$)	TF	CF
	根	茎	叶				根	茎	叶			
A ₁	267.32	27.74	36.54	960.84	0.19	0.35	197.94	48.24	29.24	4723.53	0.28	0.06
A ₂	301.21	29.79	40.88	968.27	0.19	0.38	200.17	50.59	35.28	4802.72	0.30	0.06
A ₃	236.49	28.66	34.75	1016.38	0.21	0.32	206.06	55.24	41.09	4649.49	0.32	0.07
A ₄	258.67	28.52	27.99	931.19	0.18	0.34	221.91	45.18	32.63	4841.41	0.26	0.06
平均值	265.92	28.68	35.04	969.17	0.19	0.35	206.52	49.81	34.56	4754.29	0.29	0.06
标准差	23.27	0.73	4.64	0.03	0.01	0.02	9.37	3.67	4.34	0.07	0.02	0.01
盆栽原土	264.15	30.82	22.27	981.57	0.17	0.32	226.19	54.46	27.27	4793.37	0.27	0.06

2.2 水分条件对土壤及藜蒿砷、镉吸收的影响

本研究基于南矶山湿地土壤及藜蒿 Cd、As 污染风险评价的基础上, 以该区域土壤及藜蒿样品为试验材料, 采用不同水分条件进行了盆栽实验, 并在藜蒿平均生长至 15、20 和 30 cm 时采集植物及土壤样品, 测定了土壤理化性质 (pH 值、有机质含量)、砷镉有效态含量及藜蒿重金属吸收情况, 以研究水分条件对土壤环境及藜蒿重金属富集作用的影响.

2.2.1 不同水分条件下土壤理化性质及重金属形态变化 对在旱培 (干旱条件)、湿培 (淹水条件)、交培 (旱湿交替) 及对照 (自然条件) 4 种体系下各不同时期土壤理化性质及重金属含量进行测定, 结果如表 3 所示. 根据表 3, 不同水分条件下, 藜蒿各生长期 (15、20、30 cm) 土壤 pH 与有机质含量的变化趋势基本保持一致 ($P>0.05$): 对照组 pH 及有机质含量无明显变化, 湿培组表现为 pH 和土壤有机质含量升高, 旱培组 pH 和有机质含量降低, 而交培组 pH 和有机质含量随着培育时间增加呈现先增加后下降的趋势. 各水分条件下土壤中 Cd、As 有效态含量变化存在显著差异 ($P<0.05$): 湿培组土壤有效态 Cd 含量最低, 有效态 As 含量最高; 旱培组土壤有效态 Cd 含量有所增加, 有效态 As 含量出现减少; 交培组土壤 Cd 和 As 有效态含量随水分条件波动, 当转变为淹水环境时有效态 Cd 减少而有效态 As 增加. 可以看出, 土壤重金属有效态含量与土壤理化性质具有一定关联性, 其 pH 值和有机质含量是影响土壤 Cd、As 吸附性和溶解性的重要因素.

表 3 不同水分条件下土壤理化性质及重金属含量的变化

Tab.3 Changes of soil physical with chemical properties and heavy metal content under different water conditions

理化参数	旱培组		湿培组		交培组			对照组		
	15 cm	15 cm	20 cm	30 cm	15 cm	20 cm	30 cm	15 cm	20 cm	30 cm
pH	5.17±0.04	5.93±0.18	6.04±0.40	6.19±0.02	5.45±0.25	6.07±0.26	5.67±0.13	5.37±0.20	5.38±0.06	5.35±0.06
有机质/(g/kg)	6.50±0.33	11.90±0.14	12.30±0.25	13.30±1.05	6.60±0.41	10.70±0.29	9.80±0.21	10.40±0.33	10.30±0.21	10.50±0.40
有效态 Cd/($\mu\text{g/kg}$)	167.28±1.60	130.77±1.89	133.62±1.87	136.06±2.30	169.9±2.12	143.49±1.63	159.40±2.02	151.45±1.51	150.82±0.53	151.41±3.97
有效态 As/($\mu\text{g/kg}$)	36.33±1.26	53.05±2.24	58.00±1.31	61.13±0.72	36.42±1.96	53.19±2.14	49.36±0.64	43.54±0.84	44.35±2.60	44.28±0.85

已有研究表明, 土壤 pH 的改变可影响土壤胶体的带电性质, 使其对重金属离子的吸附能力发生变化, 进而影响重金属在土壤中的有效性^[3, 30-31]. 土壤有机质是一种带负电的胶体, 相比于阴离子其更易通过络合作用吸附土壤中的阳离子, 降低其在土壤中的有效性^[3]. 自然条件下, 土壤环境中的缓冲体系使 pH 值保持相对稳定, 有机质处于消耗与分泌平衡的状态, 土壤 Cd、As 有效态含量维持动态平衡. 淹水条件下, 土壤处于强氧化环境, 土壤中 Cd、As 主要分别以 Cd^{2+} 和 AsO_4^{3-} 形态存在^[29-32], 且该水分条件下植物呼吸和微生物代谢转为厌氧型, 土壤 pH 升高和有机质累积, 均使得土壤胶体对 Cd^{2+} 的吸附作用增强和对 AsO_4^{3-} 的吸附作用

减弱,土壤 Cd 有效态含量减少而 As 有效态含量增加;干旱条件下,土壤处于强还原环境,土壤 Cd、As 主要以有机结合态和 As^{3+} 形态存在^[30-32],该水分条件下 pH 降低且有机质被快速消耗,土壤 Cd 有效性升高,而 As^{3+} 因易被土壤胶体吸附导致 As 有效性降低;旱湿交替条件下,土壤环境处于强氧化与强还原状态的交替变化,土壤 Cd 以离子交换态和有机结合态形式交替存在,As 以 AsO_4^{3-} 和 As^{3+} 形态交替存在,表现为有效态 Cd 和 As 含量的波动^[17,31-32]。

2.2.2 不同水分条件下藜蒿重金属富集变化 为研究水分条件对藜蒿富集 As 和 Cd 能力的影响,测定了不同水分条件下藜蒿的重金属含量作为富集量,结果如图 2 所示。由图可知,各生长期对照组中藜蒿 Cd 富集量均最高,15 cm 时为 $353.29 \pm 5.84 \mu\text{g/kg}$,20 cm 时为 $405.43 \pm 1.60 \mu\text{g/kg}$,30 cm 时为 $430.29 \pm 2.85 \mu\text{g/kg}$;淹水条件的湿培组藜蒿 Cd 富集量最低,15 cm 时为 $263.29 \pm 15.24 \mu\text{g/kg}$,20 cm 时为 $271.14 \pm 10.31 \mu\text{g/kg}$,30 cm 时为 $271.86 \pm 8.72 \mu\text{g/kg}$ 。各生长期湿培组中藜蒿 As 富集量均最高,15 cm 时为 $380.00 \pm 10.24 \mu\text{g/kg}$,20 cm 时为 $503.29 \pm 6.31 \mu\text{g/kg}$,30 cm 时为 $569.57 \pm 8.72 \mu\text{g/kg}$;枯水条件的旱培组与交培组富集量最低,15 cm 时分别为 280.29 ± 18.26 和 $271.29 \pm 10.96 \mu\text{g/kg}$,旱培组藜蒿无法生长到 20 cm 和 30 cm,交培组富集量分别为 356.14 ± 8.14 、 $391.86 \pm 4.64 \mu\text{g/kg}$ 。

结合不同水分条件下土壤 Cd、As 有效态含量变化,可以看出藜蒿 Cd 富集量变化与土壤 Cd 有效态含量变化不具相关性,表现为湿培组土壤 Cd 有效态含量最低且藜蒿 Cd 富集量最低,旱培组与交培组土壤 Cd 有效态含量较高而藜蒿 Cd 富集量较低。这是因为土壤溶液中的 Cd^{2+} 是藜蒿富集 Cd 的主要形式,淹水条件下虽土壤中 Cd 以 Cd^{2+} 形态为主,由于胶体吸附作用增强致使土壤 Cd 有效性降低,藜蒿 Cd 富集量减少;而干旱和旱湿交替条件下土壤 Cd 以有机结合态为主,Cd 不易被藜蒿富集。值得注意的是,虽然对照组土壤有效态 Cd 含量低于旱培组,但藜蒿 Cd 富集量却更高,这是因为自然条件较枯水条件更利于藜蒿的正常生长,促进了藜蒿对 Cd 的吸收。藜蒿 As 富集量变化与土壤有效 As 含量变化具有正相关性,表现为湿培组土壤 As 有效态含量最高且藜蒿 As 富集量最高,旱培组与交培组土壤 As 有效态含量较低且藜蒿 As 富集量较低。主要原因是土壤有效态金属最易被植物吸收利用,其含量变化会直接影响植物重金属富集量,这与其他文献报道结果一致^[3,32]。此外,相同水分条件下藜蒿 As 富集量有明显增加趋势,其 20~30 cm 生长阶段的 As 富集量明显低于 15~20 cm 的 As 富集量,这可能由藜蒿生长后期逐渐木质化和纤维化影响其对 As 的吸收所致。

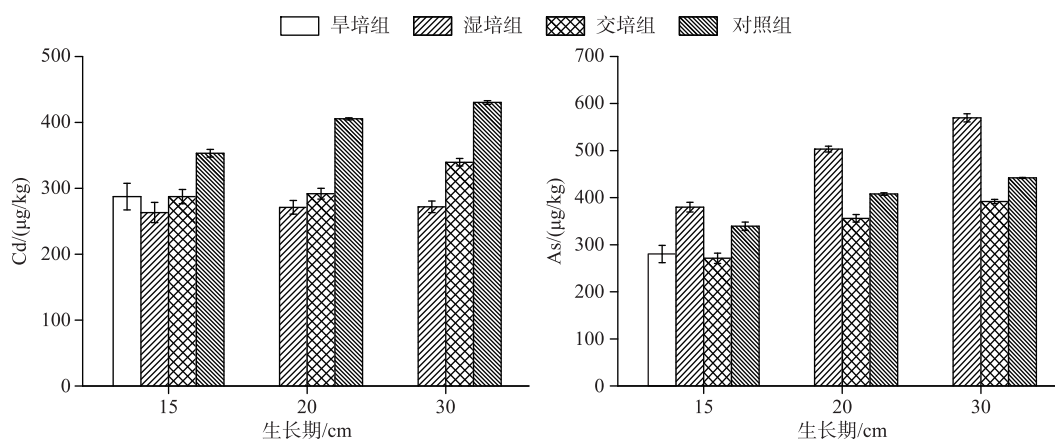


图 2 不同水分条件下藜蒿中 Cd 和 As 含量

Fig.2 The content of Cd and As in *Artemisia selengensis* under different water conditions

2.2.3 土壤有效态重金属含量与藜蒿富集量的关系分析 为进一步验证土壤有效态金属含量对藜蒿金属富集量的影响,本文对不同水分条件下土壤有效态 Cd、As 含量分别与藜蒿富集 Cd、As 总量进行线性回归及相关性分析,计算结果如表 4 所示。土壤有效态 Cd 与藜蒿富集量在淹水条件下相关系数为 0.846,具有一定正相关性 ($P < 0.05$),而在自然和旱湿交替条件下不具有相关性 ($P > 0.05$);土壤有效态 As 含量与藜蒿富集总

量在淹水、自然及早湿交替条件下相关系数分别为 0.998、0.760 和 0.840,均具有一定正相关性($P<0.05$),淹水条件下相关性尤为显著($P<0.01$). 其主要原因是:在早湿交替和自然环境下水分含量较低造成土壤有效态金属分布不均匀,影响了两者的相关性;湿培组的淹水条件使土壤中有效态重金属基本溶解于土壤溶液中,藜蒿根部的吸收量直接受溶液离子浓度的影响,表现为显著的相关性. 因此,针对 Cd 污染严重的土壤:从食品安全角度,可调控土壤水分分为缺水或早湿交替来减少藜蒿 Cd 富集量;从土壤修复角度,可通过种植藜蒿并调控其土壤水分分为淹水来减少土壤 Cd 有效态含量. 针对 As 污染严重的土壤,从土壤修复角度,通过种植藜蒿并调控其土壤水分分为淹水来减少土壤 As 有效态含量.

表 4 不同水分条件下土壤有效 Cd、As 含量与藜蒿富集量的关系

Tab.4 The relationship between the effective cadmium and arsenic contents in soil and the absorption of *Artemisia selengensis* under different water conditions

水分环境	有效 Cd 含量与藜蒿吸收的关系	有效 As 含量与藜蒿吸收的关系
旱培组(干旱条件)	/	/
湿培组(淹水条件)	$y=1.6519x+48.263(R^2=0.846, P<0.05, n=9)$	$y=23.592x-869.77(R^2=0.998, P<0.01, n=9)$
交培组(早湿交替)	$y=0.0839x+293.06(R^2=0.0015, P>0.05, n=9)$	$y=6.1433x+55.184(R^2=0.760, P<0.05, n=9)$
对照组(自然条件)	$y=-28.481x+4703.5(R^2=0.0654, P>0.05, n=9)$	$y=106.69x-4303.8(R^2=0.840, P<0.05, n=9)$

3 结论

- 1) 南矶山湿地土壤 As 含量(4.75 ± 0.07 mg/kg) 低于鄱阳湖背景值(13.37 mg/kg) 和国家土壤一级标准值(15 mg/kg), 未造成污染;Cd 含量(0.97 ± 0.03 mg/kg) 严重超标,具有一定生态风险.
- 2) 南矶山湿地藜蒿根部 As、Cd 含量最高,茎叶次之;藜蒿茎中 As 含量(49.81 ± 3.67 μg/kg) 在食品污染限量标准(50 μg/kg) 水平,可能存在食用安全风险;茎中 Cd 含量(28.68 ± 0.73 μg/kg) 在安全范围内,存在潜在食用风险.
- 3) 藜蒿的 As、Cd 富集量与土壤 As、Cd 有效含量具有一定关系,不同水分条件区域所生长的藜蒿所含重金属含量会因土壤金属有效性差异而不同,且高水分条件下两者相关性尤为显著.
- 4) 针对 Cd 污染土壤,可调控土壤水分分为缺水或早湿交替来减少藜蒿 Cd 富集量,调控土壤水分分为淹水来减少土壤 Cd 有效态含量;针对 As 污染土壤,通过种植藜蒿并调控其土壤水分分为淹水来减少土壤 As 有效态含量.

4 参考文献

[1] Liu HW, Nie XD. Analysis of trace elements in wild *Artemisia selengensis* using inductively coupled plasma tandem mass spectrometry. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, **38**(12): 3923-3928. [刘宏伟, 聂西度. 野生藜蒿中的微量元素的质谱分析. *光谱学与光谱分析*, 2018, **38**(12): 3923-3928.]

[2] LI SM, Ke WD, Huang XF *et al.* Study survey on *Artemisia selengensis* Turcz. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2017, (18): 49-55. [李双梅, 柯卫东, 黄新芳等. 藜蒿的研究概况. *长江蔬菜*, 2017, (18): 49-55.]

[3] Wang W. Study on the absorption and enrichment of Arsenic, Selenium and Cadmium uptaked by *Artemisia selengensis* Turcz in wetland habitat[Dissertation]. Nanchang: Nanchang University, 2014. [王伟. 藜蒿在湿地生境下吸收富集砷、硒和镉的研究[学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2014.]

[4] Dong M, Zhao YL, Lei CX. Accumulation characteristics to heavy metals and edible safety of South Dongting Lake dominant plants *Aremisia selengensis* Turcz. *Journal of Hunan City University: Natural Science*, 2008, **17**(4): 44-48. [董萌, 赵运林, 雷存喜. 南洞庭湖优势植物藜蒿的重金属富集特征及其食用安全性. *湖南城市学院学报: 自然科学版*, 2008, **17**(4): 44-48.]

[5] Zhu YL, Sun XZ, Hu YH. Characteristics of heavy metal element of *Artemisia selengensis* and Lotus root in Datong Lake and East Dongting Lake. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2014, **42**(2): 248-250. [祝云龙, 孙小舟, 胡亚辉. 大通湖及东洞庭湖藜蒿和莲藕中重金属元素的含量特征. *江苏农业科学*, 2014, **42**(2): 248-250.]

- [6] Song PF, Zeng XZ, Ni CY *et al.* The assessment of heavy metal pollution in the estuaries in Poyang Lake Wetland and the edible safety analysis of *Artemisia selengensis*. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2015, **37**(2): 369-375. [宋鹏飞, 曾雪真, 倪才英等. 鄱阳湖入湖河口土壤重金属污染评价及藜蒿食用安全分析. 江西农业大学学报, 2015, **37**(2): 369-375.]
- [7] Jian MF, Xu PF, Xiong JQ *et al.* Risk of heavy metal pollution in surface soil and diversity of aquatic plant communities in the Le'an River-Poyang Lake Wetland. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, **29**(4): 415-421. [简敏菲, 徐鹏飞, 熊建秋等. 乐安河-鄱阳湖段湿地表土重金属污染风险及水生植物群落多样性评价. 生态与农村环境学报, 2013, **29**(4): 415-421.]
- [8] Ji Y, Zhang J, Fan HB *et al.* Distribution characteristics of heavy metal and environmental assessment in the mid-lower reaches of the Ganjiang River. *China Rural Water and Hydropower*, 2013, (5): 42-45. [计勇, 张洁, 樊后保等. 赣江中下游城市断面重金属分布特征及生态风险评价. 中国农村水利水电, 2013, (5): 42-45.]
- [9] Zhang DW, Luo LG, Zhang L *et al.* Speciation and potential ecological risk assessment of As and heavy metals in surface sediments of Poyang Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(8): 1132-1138. [张大文, 罗林广, 张莉等. 鄱阳湖表层沉积物中砷及重金属赋存形态及其潜在生态风险. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(8): 1132-1138.]
- [10] Xu XL, Zhang Q, Li YL *et al.* Inner-annual variation of soil water content and groundwater level in a typical islet wetland of Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2014, **26**(2): 260-268. DOI: 10.18307/2014.0213. [许秀丽, 张奇, 李云良等. 鄱阳湖典型洲滩湿地土壤含水量和地下水位年内变化特征. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 260-268.]
- [11] Zhang GS, Yu XB, Liu Y *et al.* Accumulation effect of litter decomposition and water level on carbon and nitrogen in shallow lake water of Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2018, **30**(3): 90-101. DOI: 10.18307/2018.0309. [张广帅, 于秀波, 刘宇等. 鄱阳湖碟形湖泊植物分解和水位变化对水体碳、氮浓度的叠加效应. 湖泊科学, 2018, **30**(3): 90-101.]
- [12] Zhang P, Pan LP, Zhang CL. Effect of water conditions on *echinodorus osiris* absorption of cadmium and on Cd speciation changes in rhizosphere soil. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, **29**(5): 1177-1182. [张鹏, 潘丽萍, 张超兰. 水分条件对湿地植物红蛋吸收镉及其根际土壤中镉化学形态变化的影响. 西南农业学报, 2016, **29**(5): 1177-1182.]
- [13] Fang F, Pu CX, Wu S *et al.* Adsorption and enrichment effect of heavy metals by four aquatic plants under water regulation. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, **46**(14): 78-81, 160. [方飞, 浦晨霞, 武帅等. 水分调控下4种水生植物对重金属的吸附与富集作用. 安徽农业科学, 2018, **46**(14): 78-81, 160.]
- [14] Zhang CL, Chen WH, Wei BM *et al.* Response of physiology and biochemistry of plants in wetland to heavy metal cadmium stress. *Ecology and Environment*, 2008, **17**(4): 1458-1461. [张超兰, 陈文慧, 韦必帽等. 几种湿地植物对重金属镉胁迫的生理生化响应. 生态环境, 2008, **17**(4): 1458-1461.]
- [15] Jian MF, Gong XF, You H *et al.* Assessment of pollution of heavy metals in water sediments and aquatic plants in Poyang Lake Basins. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, **13**(6): 589-593. [简敏菲, 弓晓峰, 游海等. 鄱阳湖水环境及其水生维管束植物重金属污染. 长江流域资源与环境, 2005, **13**(6): 589-593.]
- [16] Zhang Q, Wang HP, Kong QB *et al.* Effect of wetting and drying alternated irrigation on soil selenium forms and rice selenium accumulation in se-enriched soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(1): 327-329. [张青, 王煌平, 孔庆波等. 干湿交替灌溉对富硒土壤硒形态及水稻硒积累的影响. 水土保持学报, 2018, **32**(1): 327-329.]
- [17] Wu J, Ji XH, Wei W *et al.* Effect of water levels on cadmium and arsenic absorption and transportation in rice. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(7): 1427-1434. [吴佳, 纪雄辉, 魏维等. 水分状况对水稻镉吸收转运的影响. 农业环境科学学报, 2018, **37**(7): 1427-1434.]
- [18] Liu GN, Chen M, Li WQ *et al.* A critical review on the speciation and development of sequential extraction procedures for arsenic in soils. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(12): 2629-2638. [刘冠男, 陈明, 李梧庆等. 土壤中砷的形态及其连续提取方法研究进展. 农业环境科学学报, 2018, **37**(12): 2629-2638.]
- [19] Ma L, Liu WC, Zha LX *et al.* Analysis of the form of cadmium in soil sample. *Geology of Anhui*, 2010, **20**(4): 273-276. [马玲, 刘文长, 查立新等. 土壤样品中镉的形态分析研究. 安徽地质, 2010, **20**(4): 273-276.]
- [20] Geng N, Tang YX, Wang HM *et al.* Study on the determination of organic matter in soil by the oven heating method. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, **32**(S1): 343-346. [耿暖, 唐玉霞, 王慧敏等. 烘箱加热法测定土壤有机质的研究. 华北农学报, 2017, **32**(S1): 343-346.]

- [21] Jian MF, You Hai, Ni CY. Characteristics of heavy metals contaminant status and migration in Raohe River of Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2006, **18**(2): 127-133. DOI: 10.18307/2006.0205. [简敏菲, 游海, 倪才英. 鄱阳湖饶河段重金属污染水平与迁移特性. 湖泊科学, 2006, **18**(2): 127-133.]
- [22] Jian MF, Lu SB, Zhu D *et al.* Distribution characteristic of heavy metal pollution in the sediments of topsoil in some representative region of Poyang Lake Wetland. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, **41**(4): 981-984. [简敏菲, 鲁顺保, 朱笃等. 鄱阳湖典型湿地表土沉积物中重金属污染的分布特征. 土壤通报, 2010, **41**(4): 981-984.]
- [23] Editorial board of Poyang Lake research ed. Poyang Lake. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1988: 573. [鄱阳湖研究编委会. 鄱阳湖. 上海: 上海科学技术出版社, 1988: 573.]
- [24] Liu XZ, Fang FS eds. Scientific investigation of Wuyi Mountain Nature Reserve in Jiangxi Province. Beijing: China Forestry Press, 2001: 377. [刘信中, 方福生. 江西武夷山自然保护区科学考察集. 北京: 中国林业出版社, 2001: 377.]
- [25] Li CJ, Wang P, Chen B *et al.* Spatial distribution and pollution source of dissolved metals in the Ganjiang River of Lake Poyang Basin. *J Lake Sci*, 2018, **30**(1): 139-149. DOI: 10.18307/2018.011. [李传琼, 王鹏, 陈波等. 鄱阳湖流域赣江水系溶解态金属元素空间分布特征及污染来源. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 139-149.]
- [26] Jiang P. Research of the growth & quality security of Seleng Wormwood in Cd pollution soil and the corresponding adjustment measures [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009. [蒋培. 土壤镉污染对芦蒿生长和品质安全的影响及调控措施研究 [学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2009.]
- [27] Pan JX, Zhang Y, Xia ZH *et al.* The periodic properties of the growth and cadmium accumulation of Seleng Wormwood in the contaminated river sandy medium. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2007, **22**(4): 577-581. [潘静娟, 张莹, 夏志华等. Cd 污染下蒌蒿生长和 Cd 积累的阶段性特征. 云南农业大学学报, 2007, **22**(4): 577-581.]
- [28] Jian MF, Li LY, Yu HP *et al.* Heavy metals pollution on the water and sediments and its influence on the submerged macrophyte community in the wetland of Poyang Lake. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(1): 96-105. [简敏菲, 李玲玉, 余厚平等. 鄱阳湖湿地水体与底泥重金属污染及其对沉水植物群落的影响. 生态环境学报, 2015, **24**(1): 96-105.]
- [29] Li YC, Ge Y. Variation of cadmium activity in flooded soils and its controlling mechanisms. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, **48**(4): 840-846. [李义纯, 葛滢. 淹水土壤中镉活性变化及其制约机理. 土壤学报, 2011, **48**(4): 840-846.]
- [30] Liu SB, Ji XH, Peng H *et al.* Effects and action mechanisms of different water management modes on rice Cd absorption and accumulation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(4): 908-914. [刘昭兵, 纪雄辉, 彭华等. 水分管理模式对水稻吸收累积镉的影响及其作用机理. 应用生态学报, 2010, **21**(4): 908-914.]
- [31] Tian T, Zeng M, Zhou H *et al.* Effects of different water managements and soil Eh on migration and accumulation of Cd in rice. *Environmental Science*, 2017, (1): 345-353. [田桃, 曾敏, 周航等. 水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响. 环境科学, 2017, (1): 345-353.]
- [32] Zhong SX, Yin GC, Chen ZL *et al.* Influencing mechanism of Eh, pH and iron on the release of Arsenic in paddy soil. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2530-2537. [钟松雄, 尹光彩, 陈志良等. Eh、pH 和铁对水稻土砷释放的影响机制. 环境科学, 2017, **38**(6): 2530-2537.]