

# 不同植物配置人工湿地对废水中镉的去除和富集效应

陈银萍, 丁浚刚, 柯昀琪, 杨波, 师小平, 颀海帆

(兰州交通大学环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**人工湿地是一种人工建造的安全高效的生态处理技术,植物和基质都是其重要组成部分,其中的植物可以吸收污水中的营养物质、重金属及其他有毒、有害物质。为研究植物对含Cd废水的处理效果,检验植物丰富度对人工湿地Cd去除能力的影响,探讨湿地植物对Cd的富集特性,为人工湿地建设提供理论支持。选用3种湿地植物灯心草(*Juncaceae*)、水葫芦(*Eichhornia crassipes*)和水芹菜(*Oenanthe javanica*),按2种或3种混合方式,构建小型模拟人工湿地,测定分析其对低浓度(5 mg/L)含Cd废水中Cd的去除率、溶解氧(DO)浓度的影响及3种植物富集Cd含量、Cd在植物体内的亚细胞分布和化学形态。结果表明:水芹菜、灯心草、水葫芦共同配置的湿地系统中,植物间发生协同作用,废水中DO浓度、Cd的去除率及3种植物对Cd的总富集量均最高;水芹菜的地下部分(根)富集量显著高于另外2种植物,灯心草对Cd的抗性最强且转运系数最高,这2种植物属于优势湿地植物;Cd主要富集在3种植物细胞壁部分,以减轻对其他细胞器的毒害作用;植物体内的Cd以游离态为主,与有机配体结合较少,以减轻植物受害程度。在低浓度Cd污染下,水芹菜+灯心草+水葫芦的组合对废水的净化效果最好,Cd去除率达到68.14%。

**关键词:**人工湿地;植物配置;Cd去除率;富集效应

**中图分类号:**X171 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2021)03-0114-07

随着工业生产和城市的发展,大量重金属通过各种途径进入水体,因其难降解特性和较高的稳定性使治理难度增加(于晓霞等,2017)。其中,镉(Cd)毒性较强,可通过食物链或皮肤被吸收和积累,并对人和动物产生危害(李婧等,2015)。人工湿地处理技术作为一种生态型、低成本的治理方式得到广泛应用(Vymazal,2014; Guittonny-Philippe et al,2014; Dan et al,2017),其中的植物可以吸收污水中的营养物质、重金属及其他有毒、有害物质,也可为根区好氧微生物输送氧气(Yadav et al,2011; Yang et al,2017);能够大量积累重金属的湿地植物大多具有较强的根系泌氧能力,可有效提升水体和底泥中的DO浓度和氧化还原电位,在根部区域形成氧化态的环境,改变根部区域水中重金属的溶解性及其氧化还原状态(王倩,2015;毛凌晨和叶华,2018;Chatterjee et al,2013),进而增强重金属的生物有效性和植物对重金属离子的提取和富集效果(李光辉等,2010;葛星延,2019)。近年来,有研究通

过丰富人工湿地植物多样性来增强系统对有机物、氮、磷等污染水体的净化功能(朱世殊,2015),对重金属污染水体的研究主要集中在单种植物处理对重金属的去除效果(周桑扬等,2016),而植物多样性对净化功能影响及机制方面的研究较少(胡啸等,2012)。

灯心草(*Juncaceae*)(铁柏清等,2006)、水葫芦(*Eichhornia crassipes*)(董小群,2012)和水芹菜(*Oenanthe javanica*)(邱树敏,2010)生物量较大,适应性强,且耐酸性,易于收割,对重金属离子的解毒作用较强,能高效地从土壤中吸收重金属元素,并集中到易于收割的茎、叶中,具有良好的运输机制。本研究选择这3种湿地植物按照两两或3种组合的方式配置,构建小型模拟人工湿地,研究植物对含Cd废水的处理效果,检验植物丰富度对人工湿地Cd去除能力的影响,探讨湿地植物对Cd的富集特性,为人工湿地建设提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

植物:水芹、灯心草和水葫芦幼苗均购自苗棚,在实验室用1/2的Hoagland营养液进行预培养,植物生长状况如表1。

装置:34 cm×22 cm×18 cm的泡沫箱。

收稿日期:2019-12-13 修回日期:2020-01-12

基金项目:国家自然科学基金项目(31560161;31260089;31971466)。

作者简介:陈银萍,1974年生,女,教授,研究方向为重金属污染植物修复。E-mail:yinpch@mail.lzjtu.cn

## 1.2 试验设计

结合相关文献(朱世殊,2015;周桑扬等,2016;胡啸等,2012),设计污水 Cd 浓度为 5 mg/L,进水 pH 为 7.0~7.3。

表 1 3 种植物材料生长状况

Tab.1 Growth parameters of the three tested plants

植物	株高/cm	地上鲜重/g·株 <sup>-1</sup>	地下鲜重/g·株 <sup>-1</sup>	地上干重/g·株 <sup>-1</sup>	地下干重/g·株 <sup>-1</sup>
水芹菜	33.53±0.65	22.19±0.46	6.22±0.41	6.98±0.32	1.76±0.18
灯芯草	70.83±1.37	1.26±0.09	0.89±0.06	0.67±0.05	0.37±0.08
水葫芦	10.50±0.30	18.14±0.44	9.20±0.44	3.69±0.15	1.44±0.12

试验分组:(1)2种植物混合配置。水芹菜+水葫芦(A)、水芹菜+灯芯草(B)、水葫芦+灯芯草(C),各组分别栽种水芹菜3株、水葫芦3株和灯心草3丛(14株左右/丛)。(2)3种植物同时配置。水芹菜+水葫芦+灯芯草(D),栽种水芹菜2株、水葫芦2株和灯心草2丛。

植物采用泡沫板定植。向每个泡沫箱内投加 5 mg/L 的 CdCl<sub>2</sub> 模拟 Cd 废水,每种植物配置设 3 个平行。分别在第 1、3、5 和 7 天取水样测定 Cd 含量和溶解氧(DO)浓度;7 d 后收集植物样,测定 Cd 含量、Cd 在各亚细胞组分中含量和不同化学形态 Cd 的含量。

## 1.3 测定方法

用美国 Nicolet 公司的 220 型火焰原子吸收分光光度计测定水样中 Cd 浓度和植物富集 Cd 含量(魏复盛,2002);HQ30D 型溶解氧(DO)仪测定水样 DO 浓度;差速离心法(徐君等,2012)测定 Cd 在植物体内的亚细胞分布;化学试剂逐步提取法(秦建桥等,2009)测定 Cd 的化学形态。

植物转运系数的计算公式为:

$$\text{转运系数 (TF)} = \frac{\text{地上部分植物体内或叶片内重金属含量}}{\text{根系重金属含量}} \quad (1)$$

## 1.4 数据分析

数据处理和分析采用 SPSS 19 和 Origin 2016 软件,在 95% 的置信区间采用方差分析(ANOVA)与 Duncan's 多重极差检验进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 植物配置对人工湿地 Cd 去除率的影响

人工湿地的植物配置显著影响废水中 Cd 的去除( $P < 0.05$ ),4 种配置的人工湿地对 Cd 的去除率在第 7 天均达到最大。A 配置 Cd 的去除率在前 7 d 持续上升;B 配置在前 3 d 天呈下降趋势,之后持续上升;C 呈上升趋势;D 也呈上升趋势且最终去除率

6 月 15 日开始,用 1/2 的 Hoagland 营养液预培养 3 种供试植物,每周更新 1 次培养液,待 6 月 29 日植物生长稳定后,选取大小一致的苗木在含有 4 L 培养液的泡沫箱内进行水培试验。

达到 4 组中的最大值,显著高于 A、B 和 C ( $P < 0.05$ );前 3 d 4 组的去除效率为  $C > D > A > B$ ,第 7 天时为  $D > C > A > B$ ;3 种植物同时配置对 Cd 的去除率最高,而水芹菜+灯芯草配置的 B 组去除率显著低于其他配置组( $P < 0.05$ )(图 1)。

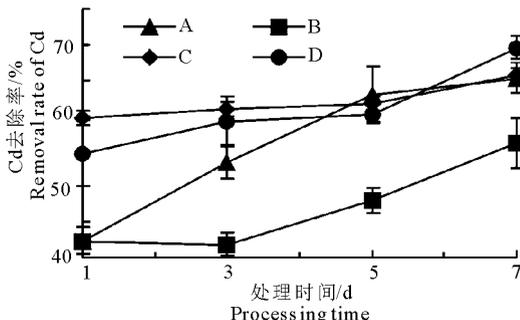


图 1 植物配置对人工湿地 Cd 去除率的影响

Fig.1 Effect of plant combination on Cd removal rate in the simulated wetland

### 2.2 植物配置对人工湿地系统 DO 的影响

人工湿地植物配置对水体中 DO 浓度有显著影响( $P < 0.05$ )。A 配置从第 1 天到第 7 天波动幅度不大;B 配置呈持续上升趋势,且上升幅度较大,但初始值显著低于其他 3 种配置( $P < 0.05$ ),为各配置中的最低值;C 配置虽呈下降趋势,但从第 1 天到第 5 天,同一水力停留时间都比其他配置的浓度高;与 C 配置相似,D 配置也呈下降趋势。第 1 天时 DO 浓度为  $C > D > A > B$ ,但在第 7 天试验结束时 DO 浓度为  $D > C > A > B$ ,D 配置 DO 浓度显著高于 A、B 和 C 配置( $P < 0.05$ )(图 2)。

### 2.3 植物对 Cd 的富集和转运

同种植物在不同配置系统中的 Cd 富集量差异显著( $P < 0.05$ ),且每种植物都是在 3 种植物配置的 D 系统中的富集量最高(表 2)。3 种植物的转运系数均小于 1,总体表现为灯芯草 > 水葫芦 > 水芹菜( $P < 0.05$ ),其中灯芯草在 D 系统中转运最快,水芹菜的转运系数最低( $P < 0.05$ )。

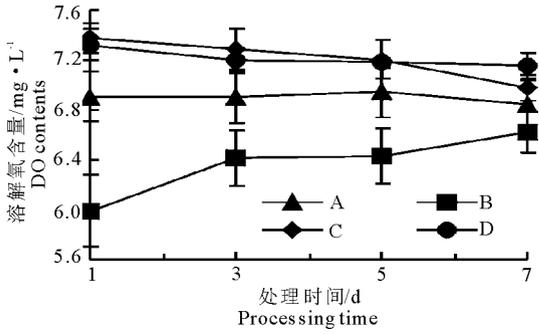


图2 植物配置对人工湿地系统 DO 的影响

Fig.2 Effect of plant combination on DO concentration in the simulated wetland

表2 3种植物体内 Cd 含量和转运系数

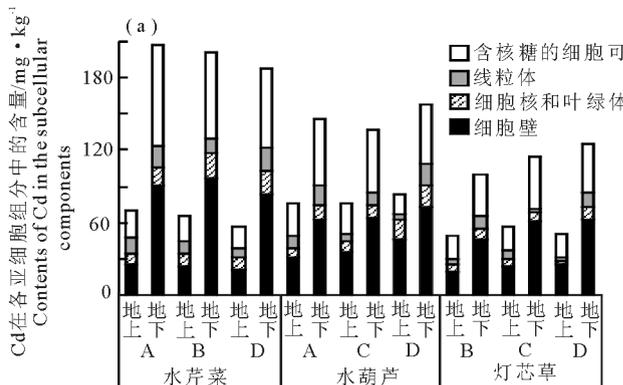
Tab.2 Cd content of the three plants in the different combinations with translocation factors

植物	配植	Cd 含量(干重)/mg·kg <sup>-1</sup>		转运系数 TF
		地上部分	地下部分	
水芹菜	A	161.55±4.22 <sup>c</sup>	727.04±5.05 <sup>b</sup>	0.22±0.01 <sup>a</sup>
	B	167.33±1.95 <sup>b</sup>	732.69±4.13 <sup>b</sup>	0.23±0.00 <sup>a</sup>
	D	174.28±2.41 <sup>a</sup>	775.28±9.26 <sup>a</sup>	0.22±0.01 <sup>a</sup>
灯芯草	B	92.65±2.43 <sup>c</sup>	242.76±4.08 <sup>c</sup>	0.38±0.02 <sup>c</sup>
	C	118.29±4.76 <sup>b</sup>	267.44±9.95 <sup>b</sup>	0.44±0.01 <sup>b</sup>
	D	139.57±5.40 <sup>a</sup>	288.47±4.66 <sup>a</sup>	0.48±0.01 <sup>a</sup>
水葫芦	A	163.36±3.91 <sup>b</sup>	415.75±5.58 <sup>b</sup>	0.39±0.01 <sup>c</sup>
	C	167.13±3.80 <sup>b</sup>	385.61±6.47 <sup>c</sup>	0.43±0.01 <sup>a</sup>
	D	185.42±3.25 <sup>a</sup>	455.05±7.39 <sup>a</sup>	0.41±0.01 <sup>b</sup>

注:同种植物同列中不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

Note: For the same plant, different lowercase letters indicate significant differences ( $P<0.05$ ).

D 系统中,地上部分富集量为水葫芦>水芹菜>灯芯草,地下部分为水芹菜>水葫芦>灯芯草,总富集量为水芹菜>水葫芦>灯芯草( $P<0.05$ )。3种植物地下部分 Cd 富集量显著高于地上部分( $P<0.05$ )。Cd 富集量与湿地系统 DO 含量之间存在正相关,其中水芹菜地下部分、水葫芦地上部分及灯芯草的地上和地下部分 Cd 富集量与系统 DO 含量之间的相关系数达到极显著水平( $P<0.01$ )(表 3)。



## 2.4 Cd 在 3 种植物中的亚细胞分布

Cd 在植物细胞壁中含量最高,其次是含核糖体的可溶部分(图 3a)。Cd 在植物地下部分(根)细胞组分中的分配比例均为细胞壁>含核糖体的可溶部分>细胞核和叶绿体部分>线粒体部分,地上部分(茎叶)与地下部分相似,且 4 种配置中细胞壁和含核糖体的可溶部分之和占总量的比值均大于 80% (图 3b)。植物细胞壁中 Cd 分配比例基本为地下部分>地上部分,灯心草地下部分细胞壁中 Cd 分配比例显著高于水芹菜和水葫芦( $P<0.05$ )(图 3)。

表3 植物 Cd 含量与人工湿地系统 DO 含量的回归分析  
Tab.3 Regression and correlations between Cd content in the three plants and DO content in the simulated wetland

植物	不同部位	回归方程	决定系数( $R^2$ )
水芹菜	地上部分	$y=14.935x+65.089$	0.3882
	地下部分	$y=85.319x+158.72$	0.7402**
水葫芦	地上部分	$y=73.03x-338.51$	0.9190**
	地下部分	$y=140.35x-562.26$	0.3897
灯芯草	地上部分	$y=86.215x-479.46$	0.9803**
	地下部分	$y=83.107x-308.74$	0.9800**

注:  $x$  为 DO 含量,  $y$  为 Cd 含量, \*  $P<0.05$ , \*\*  $P<0.01$

Note:  $x$  represents DO contents;  $y$  represents Cd contents. \* denotes a significant difference  $P<0.05$ ; \*\* denotes a highly significant difference  $P<0.01$ .

## 2.5 Cd 在 3 种植物细胞中的化学形态

对 Cd 在 D 系统 3 种植物组织细胞内的形态差异进行了研究。结果表明,3 种植物地下部分均以活性较高的去离子水提取态 Cd 含量最高( $P<0.05$ ),活性较低的氯化钠提取态 Cd 次之;水葫芦和灯心草地上部分也是去离子水提取态 Cd 含量最高( $P<0.05$ ),水芹菜地上部分氯化钠提取态 Cd 占比最高( $P<0.05$ )(图 4a)。3 种植物地上和地下部分迁移能力强的乙醇提取态、去离子水提取态和氯化钠提取态 Cd 占比之和在 75%~80%,难溶性的醋酸提取态、盐酸提取态和残渣态 Cd 占比之

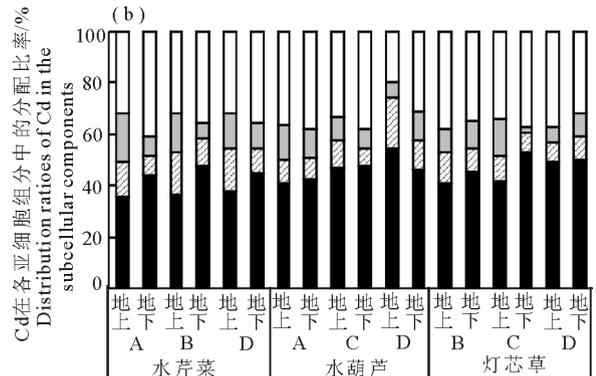
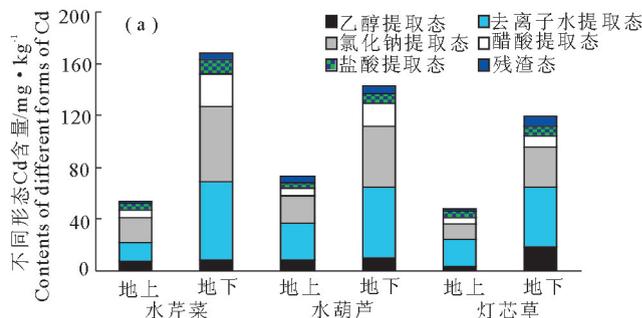


图3 Cd 在 3 种植物中的亚细胞分布

Fig.3 Cd content and distribution ratios in the subcellular components of the three plants

和仅有 20%~25%,且 3 种植物及其地上与地下部



分没有显著性差异 ( $P > 0.05$ ) (图 4b)。

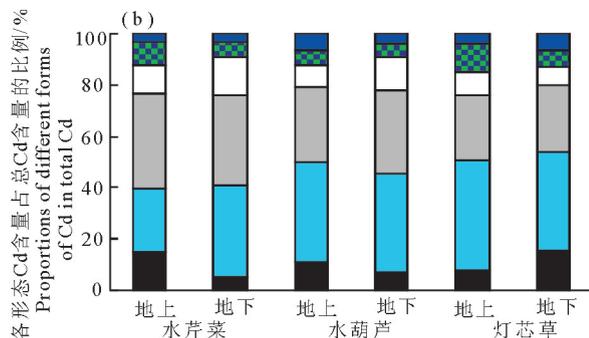


图 4 D 系统中 3 种植物体内 Cd 的化学形态

Fig.4 Chemical forms of Cd in the three plants in treatment D

### 3 讨论

#### 3.1 植物配置对人工湿地 Cd 去除率的影响

不同植物对重金属的去除具有特异性,因此,单一种植的人工湿地系统对重金属的去除具有一定的限制性,同时,植物根系分泌的化感物质可能会促进或抑制其他种类植物的生长,也可能改变水体中重金属的形态,因此,选择不同种类和不同富集能力的植物进行搭配,能够增强人工湿地系统的稳定性和对重金属的去除能力(朱世殊,2015;王谦和成水平,2010)。本研究中,人工湿地的植物配置对废水中 Cd 的去除有显著影响,Cd 的去除率随处理时间的延长而上升,第 7 天时,4 种不同配置系统的去除率均达到最大,其中 3 种植物同时配置的 D 系统达到 4 种配置中的最大值,说明在人工湿地中配置更多样的植物会促进系统对 Cd 的去除。3 种植物庞大的根系表面形成生物膜,聚集大量微生物,微生物分泌出各种酶催化微生物吞噬和代谢根际周围大分子物质,使其转变为无机物,成为植物的营养物质促进其生长,同时还提高了污水净化效率,3 种植物同时配置时,互相影响发生协同作用,使系统对 Cd 的去除率最高,而水芹菜+灯芯草配置的 B 系统去除率显著低于其他配置系统,可能是这两种植物间存在竞争抑制产生了拮抗作用所导致(靳阳阳等,2015)。

#### 3.2 植物配置对人工湿地系统 DO 的影响

重金属积累能力强的湿地植物根系泌氧能力也较强,配置这种湿地植物使植物根际、人工湿地系统水体和底泥中 DO 浓度和氧化还原电位相应升高,而氧化还原电位决定着重金属形态的变化和溶解度,进而影响重金属的毒性和活性(毛凌晨和叶华,2018)。有研究表明,几种漂浮植物复合栽培提升水体 DO 浓度和氧化还原电位效果显著,相应地增加了氧化态重金属含量,增强了重金属的生物有效性,

植物对重金属离子的提取和富集效果更好,对铅尾矿渗出液的水质有较好的修复能力(葛星延,2019)。本试验中,人工湿地植物配置对水体中 DO 浓度有显著影响,虽然随着试验时间的延长,A、C 和 D 系统水体中 DO 浓度呈下降趋势,但在整个试验期,C 和 D 系统水体中 DO 浓度显著高于 A 和 B,且试验初期 C 系统水体中 DO 浓度最大,而在第 7 天试验结束时变为 D 系统 DO 浓度最大,表明 3 种植物同时配置,有助于系统水体中 DO 浓度的升高,这与 D 系统对 Cd 的去除率最高一致。

#### 3.3 植物配置对 3 种植物 Cd 富集和转运的影响

植物通过提取去除水体中重金属离子的量仅占重金属去除总量的一小部分,但植物在改善和增强植物、微生物和基质共同构成的人工湿地系统的结构和功能中发挥着巨大的作用。利用多种植物组合构建人工湿地系统,不仅可以克服单一植物系统不稳定和去除效率低的缺点,还能实现多种植物间的优势互补(王谦和成水平,2010;Chang et al,2014)。已有研究表明,同单一的植物相比,黄菖蒲(*Iris pseudacorus*)(挺水植物)、大藻(*Pistia stratiotes*)(浮水植物)和黑藻(*Hydrilla verticillata*)(沉水植物)3 种植物组合系统对氮、磷和重金属铬都有较好的去除效果,且生长良好(胡啸等,2012),表明丰富人工湿地植物多样性可以增强系统对污染水体的净化功能(杜甫义等,2017;廖建雄等,2019)。本研究中,每种植物都是在 3 种植物共同生长的 D 系统中对 Cd 的富集量最大,表明 3 种植物共同生长促进了植物对 Cd 的富集。D 系统中,水芹菜吸收效果最好,可能是因为试验期间水芹菜的根状茎不断分化,种植密度变大,生物量增加,使其富集量显著高于另外两种植物。因为根系淹没在水体中,最先与重金属离子接触并通过根细胞壁中的交换位点将重金属离子交换吸收,也可能会将重金属离子固定区

隔化,阻止其向上运输(杨倩,2009),所以3种植物地下部分Cd富集量显著高于地上部分。

3种植物不同部位Cd富集量与所在人工湿地系统DO含量正相关,这与前人研究结果一致(王倩,2015;毛凌晨和叶华,2018;李光辉等,2010),说明湿地植物对废水中重金属的吸收积累能力在相当大的程度上取决于其根系的泌氧能力。其中,水芹菜地下部分、水葫芦地上部分及灯芯草的地上和地下部分Cd富集量与所在人工湿地系统DO含量极显著相关,说明系统DO显著影响水芹菜地下部分、水葫芦地上部分及灯芯草整株对Cd的吸收。3种植物的转运系数均小于1,这可能与试验期较短有关。灯芯草在D系统对Cd的转运最快,可能是D系统中3种植物根系分泌物相互影响发生协同作用的结果(Lambers et al,2015),水芹菜的转运系数最低,表明大部分Cd被滞留在水芹菜的根部。

### 3.4 植物配置对Cd在植物中亚细胞分布的影响

为避免重金属对植物重要细胞器的损伤,植物会对吸收的重金属进行选择性的分配,如重金属在非原生质体部位细胞壁中的积累及细胞对重金属的区隔化作用就是其中两个重要的途径。有研究表明,水花生(*Alternanthera philoxeroides*)叶片(徐君等,2012)和茭白(*Zizania latifolia*)(黄凯丰和江解增,2011)细胞壁中Cd含量最高,其次是可溶成分,与此相似,本研究中,3种植物细胞组分中的Cd含量和分配比例均为细胞壁中最高,含核糖体的可溶部分次之,且细胞壁和含核糖体的可溶部分占比之和大于80%。可能是因为Cd进入植物体时遇到的第一道屏障是细胞壁,为了降低其他细胞器中的金属离子浓度,维持细胞正常的生理代谢活动,大部分Cd会与细胞壁上的蛋白质及多糖分子含有的羟基、羧基及磷酸基等亲金属离子的配位基团发生配位而储藏重金属,以减少金属离子的跨膜运输,阻止Cd对细胞内物质的伤害,使植物对Cd表现出耐性,也可能是叶绿体和线粒体只结合少量有毒有害的Cd以保证其光合和呼吸作用的正常进行,这些可能是植物的自我保护机制(Nyquist & Greger,2009)。同种植物地下部分各组分中Cd含量均显著高于地上部分,这与以往关于植物吸收重金属的研究一致(Zhao et al,2015),可能是重金属从根到地上部分的远距离转运而导致的。同种植物地下部分细胞壁组分中Cd分配比例大于地上部分细胞壁组分中Cd分配比例,表明根部细胞壁对Cd的区隔化作用更强,灯芯草地下部分细胞壁组分中Cd分配比例显

著高于水芹菜和水葫芦,表明灯芯草对Cd的抗性高于水芹菜和水葫芦,进一步印证了虽然在Cd去除率最高的D系统中,灯芯草的地上部富集量、地下部富集量和总富集量都最低,但其转运系数最高,说明灯芯草在Cd污染水体中不仅能正常生长,还能将地下部分吸收的Cd及时转运至地上部分。而目前,在植物修复方面,超积累植物与非超积累植物最大的区别在于其向地上部转运重金属的能力(罗洁文,2017),因此灯芯草在用于重金属污染植物修复方面可能具有更大的潜力。

### 3.5 植物配置对Cd在植物细胞中化学形态的影响

只依据Cd在环境中的总浓度来评价其毒性和生物有效性是不充分的,Cd的迁移转换能力以及生物有效性和毒性大小与其存在形态密切相关,不同形态分布的Cd具有不同的生物效应与环境效应(Wali et al,2015)。但Cd在不同植物中的化学形态分布没有规律,如Cd在灯盏花(*Erigeron breviscapus*)中的优势形态为残渣形式(马莎等,2010),在冬虫夏草(*Cordyceps sinensis*)中主要是活性较低的氯化钠提取态(陈炜等,2015),在香瓜草(*Echinodorus osiris*)根部主要是氯化钠提取态、去离子水提取态和乙醇提取态(Zhang et al,2013)。本研究中,以Cd去除率最高的D系统为例,Cd在3种植物组织细胞内的形态差异与前人研究结果一致(Wali et al,2015;Zhang et al,2013),3种植物地下和地上部分中均以去离子水提取态和氯化钠提取态Cd为主,迁移能力强的乙醇提取态、去离子水提取态和氯化钠提取态Cd占比之和在大于75%,难溶性的醋酸提取态、盐酸提取态和残渣态Cd占比之和小于25%,说明为减轻Cd的毒性效应,增强Cd的迁移转运,3种植物体内的Cd均以迁移能力强的3种游离态为主,而与有机配体结合较少,这与D系统对Cd的去除率最高一致。

### 参考文献

- 陈炜,杜光,郭霞,2015.冬虫夏草重金属化学形态的研究[J].中国医院药学杂志,35(22):2062-2064.
- 董小群,2012.水葫芦和水花生深度处理制革废水的研究[D].南昌:南昌大学.
- 杜甫义,阿琼,董凡超,等,2017.西藏地区不同湿地植物配置对污水的净化效果[J].环境工程,35(1):26-30,40.
- 葛星延,2019.几种漂浮植物对铅尾矿渗出液的耐性及修复潜力研究[D].南昌:江西财经大学.
- 胡啸,蔡辉,陈刚,等,2012.3种类型水生植物及其组合对污染水体中铬、氮和磷的净化效果研究[J].水处理技术,

- 38(4):45-48,54.
- 黄凯丰,江解增,2011.复合胁迫下茭白体内镉、铅的亚细胞分布和植物络合素的合成[J].植物科学学报,29(4):502-506.
- 靳阳阳,霍张丽,郭晓宏,2015.模拟人工湿地不同植物配植对富营养化水体修复能力研究[J].中国水土保持,(1):44-46.
- 李光辉,何长欢,刘建国,等,2010.不同湿地植物的根系泌氧作用与重金属吸收[J].水资源保护,26(1):17-20.
- 李婧,周艳文,陈森,等,2015.我国土壤镉污染现状、危害及其治理方法综述[J].安徽农学通报,21(24):104-107.
- 廖建雄,曾丹娟,姚月锋,等,2019.浮床植物多样性及组合影响生活污水的净化效果[J].广西植物,39(1):117-125.
- 罗洁文,2017.类芦对重金属的吸收、富集机制及修复效果研究[D].福州:福建农林大学.
- 马莎,杨晓梅,杨光宇,2010.灯笼花中重金属元素的化学形态及分布[J].理化检验(化学分册),46(2):133-135.
- 毛凌晨,叶华,2018.氧化还原电位对土壤中重金属环境行为的影响研究进展[J].环境科学研究,31(10):1669-1676.
- 秦建桥,夏北成,赵鹏,等,2009.镉在五节芒(*Miscanthus floridulus*)不同种群细胞中的分布及化学形态[J].生态环境学报,18(3):817-823.
- 邱树敏,2010.水芹和菖蒲对Pb-Cd污染水体的净化与修复试验研究[D].赣州:江西理工大学.
- 铁柏清,孙健,钱湛,等,2006.重金属复合污染对灯心草的生态毒性效应及重金属积累特性的影响[J].农业环境科学学报,(3):629-636.
- 王谦,成水平,2010.大型水生植物修复重金属污染水体研究进展[J].环境科学与技术,33(5):96-102.
- 王倩,2015.人工湿地植物根系泌氧影响污染物去除的机制研究[D].济南:山东大学.
- 魏复盛,2002.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社.
- 徐君,贾荣,施国新,等,2012.镉在水花生叶片中的亚细胞分布及其毒理学[J].应用生态学报,23(4):1070-1076.
- 杨倩,2009.三种湿地植物对污染水体中重金属离子的积累能力研究[D].兰州:兰州交通大学环境科学.
- 于晓霞,赵学强,孙滨峰,等,2017.济南市小清河流域表层沉积物中重金属的空间分布、生态风险及源解析[J].西南师范大学学报:自然科学版,42(2):78-84.
- 周桑扬,杨凯,吴晓芙,等,2016.人工湿地植物去除废水中重金属的作用机制研究进展[J].湿地科学,14(5):717-724.
- 朱世殊,2015.不同季节条件下植物多样性配置对人工湿地功能的影响研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学.
- Chang J, Fan X, Sun HY, et al, 2014. Plant species richness enhances nitrous oxide emissions in microcosms of constructed wetlands[J]. Ecological Engineering, 64: 108-115.
- Chatterjee S, Datta S, Mallick P H, et al, 2013. Use of Wetland Plants in Bioaccumulation of Heavy Metals[M]// Dharmendra Kumar Gupta. Plant-Based Remediation Processes. Berlin Heidelberg: Springer.
- Dan A, Masao O, Yuta F, et al, 2017. Removal of heavy metals from synthetic landfill leachate in lab-scale vertical flow constructed wetlands[J]. Science of the Total Environment: 584-585, 742-750.
- Guitttonny-Philippe A, Masotti V, Höhener P, et al, 2014. Constructed wetlands to reduce metal pollution from industrial catchments in aquatic Mediterranean ecosystems: A review to overcome obstacles and suggest potential solutions[J]. Environment International, (64): 1-16.
- Lambers H, Hayes PE, Laliberté E, et al, 2015. Leaf manganese accumulation and phosphorus-acquisition efficiency [J]. Trends Plant Science, 20(2): 83-90.
- Nyquist J, Greger M, 2009. Response of two wetland plant species to Cd exposure at low and neutral pH[J]. Environmental & Experimental Botany, 65(2): 417-424.
- Vymazal J, 2014. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review[J]. Ecological Engineering, 73: 724-751.
- Wali M, Fourati E, Hmaeid N, et al, 2015. NaCl alleviates Cd toxicity by changing its chemical forms of accumulation in the halophyte *Sesuvium portulacastrum* [J]. Environmental Science and Pollution Research, 22(14): 10769-10777.
- Yadav BK, Siebel MA, Bruggen JJAV, 2011. Rhizofiltration of a heavy metal(lead) containing wastewater using the wetland plant *Carex pendula* [J]. Acta Hydrochimica Et Hydrobiologica, 39(5): 467-474.
- Yang J, Zheng G, Yang J, et al, 2017. Phytoaccumulation of heavy metals(Pb, Zn, and Cd) by 10 wetland plant species under different hydrological regimes[J]. Ecological Engineering, 107: 56-64.
- Zhang C, Zhang P, Mo C, et al, 2013. Cadmium uptake, chemical forms, subcellular distribution, and accumulation in *Echinodorus osiris* Rataj [J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 15(7): 1459-1465.
- Zhao L, Li T, Yu H, et al, 2015. Changes in chemical forms, subcellular distribution, and thiol compounds involved in Pb accumulation and detoxification in *Athyrium wardii* (Hook.) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 22(16): 12676-12688.

## Removal and Enrichment of Cadmium in Wastewater by Different Plant Combinations in Constructed Wetlands

CHEN Yin-ping, DING Jun-gang, KE Yun-qi, YANG Bo, SHI Xiao-ping, XIE Hai-fan

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P.R.China)

**Abstract:** Heavy metal pollution of water bodies is becoming more serious and constructed wetlands are a safe and efficient ecological treatment technology. The plants and their arrangement on the substrate are crucial components of the wetland systems that absorb nutrients, heavy metals and other harmful substances in wastewater. In this study, *Juncaceae* (rush), *Eichhornia crassipes* (water hyacinth) and *Oenanthe javanica* (water celery) were planted in four combinations to simulate small constructed wetlands. The effectiveness of different arrangements were tested for Cd removal and plant enrichment characteristics to provide theoretical support for artificial wetland construction. The four plant combinations were set as follows: (A) *O. javanica* + *E. crassipes*; (B) *O. javanica* + *Juncaceae*; (C) *E. crassipes* + *Juncaceae*; (D) *O. javanica* + *E. crassipes* + *Juncaceae*. Each treatment was run in triplicate in water with an initial Cd concentration 5 mg/L. On days 1, 3, 5 and 7 of the test, the Cd content, Cd removal rate, dissolved oxygen (DO) concentration, subcellular distribution and chemical morphology of plants in each treatment were measured and analyzed. Results show that there were synergistic effects among plants when water celery, rush and water hyacinth were planted together (treatment D). The removal rate, total Cd enrichment of the three plants and DO were also the highest in this treatment, significantly higher than with the other three treatments ( $P < 0.05$ ). Cd enrichment in the roots of water celery was significantly higher than in the other two plants, and the resistance and transport coefficient of rush to Cd were highest. Thus, the combination of water celery and rush dominated removal activity. Cd was mainly concentrated in the cell walls of the three plants, protecting other organelles from Cd toxicity. Cd existed primarily in the free state in all three plants, rather than bound by organic ligands, also reducing Cd damage to plant organelles. The combination of water celery, rush and water hyacinth removed Cd most effectively with removal rates up to 68.14%.

**Key words:** constructed wetland; plant combinations; Cd removal rate; Cd enrichment