

谢 华, 赵雪梅, 谢 洲, 等. 皇竹草对酸与 Cd 污染农田土壤的治理效果及安全应用分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3):478–484.

XIE Hua, ZHAO Xue-mei, XIE Zhou, et al. Phytoremediation efficiency of *Pennisetum hybridum* for acid- and cadmium-polluted soil and its safe utilization [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 478–484.

皇竹草对酸与 Cd 污染农田土壤的治理效果及安全应用分析

谢 华^{1,2}, 赵雪梅^{1,3}, 谢 洲¹, 吴开庆¹, 李相林^{1,2}, 杨瑞刚^{1,2}, 彭 波¹, 余孟好¹, 何金华³

(1.广西壮族自治区环境保护科学研究院, 南宁 530022; 2.广西高校西江流域生态环境与一体化发展协同创新中心, 南宁 530001; 3.广西壮族自治区土壤肥料工作站, 南宁 530007)

摘 要:在大田条件下,研究了在酸与 Cd 污染农田土壤中种植皇竹草对污染农田的治理效果和应用安全性。结果表明,在各土壤处理中,对照处理(不施用土壤添加剂)的皇竹草中 Cd 含量最高,为 $1.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (干重),富集系数大于 1,表现出一定的 Cd 富集特性。对照处理的皇竹草对 Cd 的提取量、提取效率分别为 $119.91 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、6.98%,修复效果优于在同等条件下种植的 Cd 超富集植物龙葵,若将试验区的土壤 Cd 修复到《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)的二级标准限值以内,经计算约需 9 年。皇竹草既可以提取土壤中的 Cd,同时还可作为饲用牧草、还田肥料、造纸原料、能源植物等进行安全利用。因此,皇竹草是治理修复及综合利用酸与 Cd 污染农田的可行性植物材料。

关键词:污染土壤;镉;皇竹草;植物修复;安全应用

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)03-0478-07 doi:10.11654/jaes.2016.03.010

Phytoremediation efficiency of *Pennisetum hybridum* for acid- and cadmium-polluted soil and its safe utilization

XIE Hua^{1,2}, ZHAO Xue-mei^{1,3}, XIE Zhou¹, WU Kai-qing¹, LI Xiang-lin^{1,2}, YANG Rui-gang^{1,2}, PENG Bo¹, YU Meng-hao¹, HE Jin-hua³

(1. Scientific Research Academy of Guangxi Environmental Protection, Nanning 530022, China; 2. The Collaborative Innovation Center of the Ecological Environment & Integration Development in the Xijiang River Basin, Nanning 530001, China; 3. Guangxi Soil Fertilizer Workstation, Nanning 530007, China)

Abstract: Under field conditions, phytoremediation of acid- and cadmium-polluted soil by and its application safety were studied. *Pennisetum hybridum* exhibited Cd-enrichment capacity, as indicated by its enrichment coefficient of greater than 1. Under different soil treatments, Cd content, extraction quantity and efficiency of *P. hybridum* were the highest in the control, which was up to $1.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (dry weigh), $119.91 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ and 6.98%, respectively. This indicated that phytoremediation efficiency of *P. hybridum* was better than that of *Solanum nigrum*, a known Cd hyperaccumulator. Calculation showed that it would take only 9 years for *P. hybridum* to remedy Cd polluted soil in the experimental area by reducing soil Cd below the limit of the grade II of "Environmental Quality Standards for Soils" (GB 15618—1995). In addition to soil remediation, *P. hybridum* also has wide scope of applications, such as forage grass, organic fertilizer, paper-making material, energy plant, etc. *Pennisetum hybridum* would therefore be a feasible plant for phytoremediation of acid- and Cd-polluted farmland and safe utilization.

Keywords: polluted soil; cadmium; *Pennisetum hybridum*; phytoremediation; safe application

收稿日期:2015-10-29

基金项目:广西科学研究与技术开发计划项目(2015BC14018);广西环科院科研创新基金项目

作者简介:谢 华(1978—),女,博士,高级工程师,主要从事生态环境保护研究。E-mail: xiehuagx@139.com

镉(Cd)是毒性最强的重金属元素之一,在自然界中普遍存在^[1]。土壤中的Cd被植物根系吸收后,通过食物链进入人体并不断累积,严重威胁人类健康^[2]。近年来,随着我国工业化和城市化进程不断加快,大量污染物随之产生并排入环境中,土壤作为环境的最终受体,污染日益加剧^[3]。根据2014年4月环境保护部和国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,全国土壤调查点位超标率为16.1%,其中耕地土壤点位超标率达19.4%,土壤Cd点位超标率达7.0%,特别是西南、中南地区,土壤重金属超标范围较大^[4]。广西矿产资源丰富,土壤重金属背景值偏高,是土壤重金属超标的高发地区。2001年,特大洪灾导致广西大环江上游铅锌硫铁矿约1万m³的尾砂和硫铁粉冲入沿江的农田,致使约613hm²良田遭受酸化和重金属污染,其中Cd轻度污染农田面积约300hm²,土壤pH值低至2.31^[5-6],急需进行土壤治理和修复。

目前,土壤治理和修复的方法主要有物理法(如换土、深耕翻土、土壤淋洗和电动修复等)和化学法(如化学沉淀法、氧化还原法和化学浮选法等)。这类方法虽然治理速度快,效果较好,但其成本高,对土壤结构有损害,易造成二次污染,只适合小面积污染土壤的治理^[7]。植物修复因成本低、环境友好以及可大规模原位修复而备受欢迎,成为近年来迅速发展的土壤污染治理技术^[8]。皇竹草(*Pennisetum hybridum*)为多年生三倍体禾本科植物,原产于哥伦比亚,属C4植物,具有根系发达、生长快、产量高、耐旱涝、耐贫瘠、抗酸碱等特点。我国于20世纪80年代作为牧草引进,近年来不仅广泛应用于饲料、造纸、饮料和食品等领域,而且作为一种无入侵风险的引种植物,还被探索性地用于生态环境治理^[9-10]。本研究根据广西环江县重金属Cd污染农田的实际情况,选用皇竹草作为重金属Cd提取材料,研究在施用不同土壤添加剂的辅助配合下,皇竹草对污染农田的实地治理和修复效果,并分析其后续应用的安全性,从而为酸与Cd低污染土壤的治理、修复和安全应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概述

试验区位于广西环江毛南族自治县西北部大环江沿岸农田,位于东经107°51'~108°43',北纬24°44'~25°33',属亚热带季风气候,年平均气温19.9℃,年降雨量1389~1750mm。

试验区土壤基本理化性状:容重(1.21 ± 0.08)g·cm⁻³,孔隙度53.52%±2.70%,有机质含量(17.09 ± 1.95)g·kg⁻¹,碱解氮含量(73.12 ± 7.00)mg·kg⁻¹,速效钾含量(43.16 ± 13.36)mg·kg⁻¹,速效磷含量(14.39 ± 5.47)mg·kg⁻¹。

试验区土壤污染状况:pH为4.60±0.74,呈酸性;土壤全Cd为(0.71 ± 0.26)mg·kg⁻¹,超出《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)二级限值^[11](土壤全Cd≤0.3mg·kg⁻¹,pH<6.5),为Cd轻度污染。

1.2 试验设计与管理

1.2.1 供试材料

皇竹草:种苗由当地牧场提供。

石灰:来自环江县水源镇温平石灰厂,pH13,全Cd含量为0.19mg·kg⁻¹。

氢氧化钠:来自新疆中泰化学股份有限公司,全Cd含量为1.19mg·kg⁻¹。

有机肥:来自环江县大才乡新坡村木连屯,为当地农家自制的腐熟鸡粪肥,pH6.5,全Cd含量为0.31mg·kg⁻¹。

蚕沙:来自环江县思恩镇文化村下兰屯,pH9,全Cd含量为0.11mg·kg⁻¹。

1.2.2 试验设计与管理

采用田间定位试验,设两个试验小区,分别为种植皇竹草和不种植物,每个小区面积约667m²。每个小区内设置4组土壤添加剂施用处理,分别为不施用土壤添加剂(对照)、石灰-氢氧化钠单施、石灰-氢氧化钠与有机肥配施、石灰-氢氧化钠与蚕沙配施。土壤添加剂施加情况为:石灰1000kg·667m⁻²,氢氧化钠500kg·667m⁻²,有机肥2000kg·667m⁻²,蚕沙2000kg·667m⁻²。每组处理设2次重复,各处理在小区中的方位随机分布。

实验区土壤经过土地平整、翻耕、划片分区后施用添加剂,平衡60d后种植皇竹草,种植密度(行距×株距)为80cm×50cm,试验周期为2011年3月至2011年10月,植物全生育期不进行施肥,灌溉用水符合《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)^[12],采用人工除草方式去除田间杂草。

1.3 样品分析

翻耕土壤及植物收获后,每个片区按五点法采集土壤样品,取耕层0~20cm土壤组成混合样品,于取样现场编号,在室内风干,除去土壤中的石块、植物根系和凋落物后粉碎,过30目(0.6mm)筛,用于测定土壤Cd含量。植物成熟后对地上部进行测产,并在每个

片区采用五点法取样,采集各样点 1 m² 内的植物地上部,组成混合样品,用自来水清洗表面粘附的土壤,再用去离子水淋洗 3 遍,晾干,105 ℃杀青 30 min,65 ℃烘至恒重,粉碎,用于测定植物中 Cd 含量。

土壤样品采用 HNO₃-H₂O₂ 消煮,植物样品采用 HNO₃-HClO₄ 消煮^[13],电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)测定 Cd^[14]。分析过程添加国家标准物质(土壤:GSS-1、GSS-4;植物:GSV-3)进行分析质量控制。

1.4 修复效果评估方法

修复效果评估采用植物提取量、植物提取效率、预计修复年限等指标进行比较和分析,计算公式^[15]如下:

$$P_i = C_i \cdot W_i \quad (1)$$

$$Q_i = \rho_b \cdot S_i \cdot H_i \quad (2)$$

$$EE_{\text{植物}} = \left(\frac{P_i}{C_i \cdot Q_i} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

$$BAF = \frac{C_i}{C_1} \quad (4)$$

$$A_i = \frac{Q_i \cdot (C_1 - S_1)}{P_i} \quad (5)$$

式中: P_i 为植物重金属 Cd 的提取量, g·hm⁻²; C_i 为植物重金属 Cd 平均浓度, mg·kg⁻¹ 干重; W_i 为每茬植物干重, t·hm⁻²; Q_i 为土壤质量, kg; ρ_b 为土壤容重, g·cm⁻³; S_i 为种植面积, m²; H_i 为耕层土壤厚度,按 20 cm 计算; $EE_{\text{植物}}$ 为植物重金属 Cd 的提取效率, %; C_1 为修复前土壤重金属 Cd 平均浓度, mg·kg⁻¹; BAF 为富集系数; A_i 为预计修复时间, a; S_1 为国家土壤环境质量

二级标准限值, mg·kg⁻¹。

1.5 数据处理

所有试验数据均采用 Excel 2003 和 SPSS 19.0 LSD 法进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 的变化

不同处理条件下,耕层土壤 pH 变化如表 1 所示。植物种植与否对土壤 pH 值影响很小,而施用添加剂后土壤酸性得到改善,土壤的 pH 值均显著提高 ($P < 0.05$),但不同的添加剂施用措施之间无显著性差异。与对照组相比,单施碱性添加剂或碱性添加剂与有机质配施均可有效中和土壤溶液中大量活性酸,提高土壤 pH 值。而添加有机肥和蚕沙等有机质后,有机质增加了土壤缓冲性,使添加的碱性添加剂缓释,能有效抑制土壤返酸。

2.2 植物生物量、镉含量及其对镉的提取量和提取效率

由表 2 可以看出,各处理条件下,皇竹草生物量为 71.13~85.24 t·hm⁻²,在试验期间皇竹草生长发育均未出现明显胁迫现象,各生长阶段无受抑制表现,可正常生长。与对照相比,添加石灰+氢氧化钠和有机质或蚕沙后皇竹草生物量显著增加 ($P < 0.05$),增加量为 17.52~24.11 t·hm⁻²。施用添加剂后,皇竹草生物量增加主要是由于碱性添加剂减缓了土壤酸性,同时土壤有机质提供了充足的养分,促进了植物生长。

表 1 不同处理条件下耕作层土壤 pH 值
Table 1 Effects of different treatments on soil pH

处理方式	种植皇竹草		未种植植物	
	种植前	收获后	种植前	收获后
对照(不施用添加剂)	5.17±0.25a	5.56±0.07a	3.95±0.57a	3.98±0.64a
石灰+氢氧化钠	7.41±0.22b	6.80±0.56b	6.33±0.11b	7.47±0.02b
石灰+氢氧化钠+有机肥	7.83±0.42b	7.84±0.52b	7.33±0.02b	7.80±0.28b
石灰+氢氧化钠+蚕沙	7.44±0.40b	7.49±0.93b	5.71±1.97b	6.87±1.14b

注: 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different letters in a row indicate significant difference ($P < 0.05$). The same below.

表 2 皇竹草的生物量、Cd 的含量及其对 Cd 的富集系数、提取量和提取效率

Table 2 Effects of different treatments on biomass, and Cd concentration, BAF, extraction amount and extraction efficiency of plant

处理方式	生物量/t·hm ⁻² (鲜重)	Cd 含量/mg·kg ⁻¹ (干重)	富集系数	Cd 提取量/g·hm ⁻²	Cd 提取效率/%	理论修复年限/a
对照(不施用添加剂)	71.13±3.10a	1.69±0.12a	2.38±0.17	119.91±3.29a	6.98	8.27
石灰+氢氧化钠	95.24±5.09b	0.99±0.03b	1.39±0.04	94.29±7.75ab	5.49	10.52
石灰+氢氧化钠+有机肥	88.65±1.51b	0.86±0.18b	1.21±0.25	76.33±16.90b	4.44	13.00
石灰+氢氧化钠+蚕沙	91.48±0.73b	0.88±0.20b	1.24±0.29	80.63±17.93b	4.69	15.82

各处理条件下,皇竹草中Cd含量为0.86~1.69 mg·kg⁻¹,富集系数均大于1,表现出一定的Cd富集特性。与对照相比,施用土壤添加剂处理后,皇竹草中Cd含量均显著下降($P<0.05$),但三种添加剂处理之间差异不明显($P>0.05$)。这主要是因为施用添加剂后,土壤中Cd的有效性降低,抑制了皇竹草对Cd的吸收,此外皇竹草生物量增加,对植物体内的Cd含量也起到一定的稀释作用。

各处理条件下,皇竹草对Cd的提取量为76.33~119.91 g·hm⁻²,提取效率为4.44%~6.98%。对照处理产出的皇竹草对Cd的提取量最大,达到119.91 g·hm⁻²,提取效率为6.98%,是其他施用添加剂处理的1.27~1.57倍。

不考虑雨水淋溶等影响,假设植物对土壤Cd的提取效率一定,将试验区耕作层土壤Cd含量(0.71 mg·kg⁻¹)修复到国家土壤环境质量二级标准限值以内,根据公式计算,在不施用添加剂处理中,种植皇竹草的修复年限最短,仅为9 a,添加石灰+氢氧化钠、石灰+氢氧化钠+有机质、石灰+氢氧化钠+蚕沙处理的修复年限分别为11、13、16 a。因此,在酸与Cd低污染农田土壤中,不施用添加剂处理,利用皇竹草作为修复材料进行土壤修复具有较好的潜力。

2.3 土壤中Cd的含量变化

由表3可见,试验区种植前耕层土壤Cd含量为0.52~0.95 mg·kg⁻¹,平均含量为(0.71±0.26)mg·kg⁻¹,超出国家土壤环境质量二级标准中Cd限值,需进行土壤修复。不同添加剂处理模式下,种植皇竹草土壤中Cd的含量降低0.05~0.10 mg·kg⁻¹,其中对照处理种植皇竹草的土壤Cd含量降低最多,与该处理条件下皇竹草提取效率最高的结果一致。未种植作物土壤中Cd的含量降低0.01~0.02 mg·kg⁻¹。

2.4 皇竹草Cd含量对其安全应用的影响

皇竹草的干湿比为0.218,依据表2所列皇竹草干重中Cd含量0.86~1.69 mg·kg⁻¹,计算得到试验区各处理产出的皇竹草鲜重中Cd含量为0.11~0.28

mg·kg⁻¹。按照皇竹草的用途(饲料、肥料、生物燃料等),将本研究得到的皇竹草中Cd含量值与相关国家标准中Cd含量限值进行比较,可确定其应用是否安全。产出的皇竹草若作为饲料用于养殖用途,各处理产出皇竹草鲜重中的Cd含量均在《饲料卫生标准》(GB 13078—2001)^[16]中最严格的Cd最高限量值(鸡配合饲料、猪配合饲料)范围(≤ 0.5 mg·kg⁻¹)内,故可安全应用。若作为肥料,用于还田用途,各处理产出皇竹草鲜重中的Cd含量均在《肥料中砷、镉、铅、铬、汞生态指标》(GB/T 23349—2009)^[17]规定的肥料中Cd及其化合物的限量值范围(≤ 10 mg·kg⁻¹)内,亦可安全应用。若作为生物燃料,用于替代薪材用途,施用添加剂的各处理产出皇竹草干重中的Cd含量均在《生物质成型燃料及燃烧设备技术规范》(SZDB/Z 109—2014)^[18]规定的生物质成型燃料的可溶性Cd限量要求范围(≤ 1 mg·kg⁻¹)内,同样可安全应用;而对照处理产出皇竹草干重中的Cd含量超出了该限量标准值,还需开展进一步研究。若作为造纸或生物乙醇的生产原料,未见相关原材料的Cd限量值标准,故可安全应用。

3 讨论

各处理条件下,土壤中Cd含量为0.71 mg·kg⁻¹时,皇竹草中Cd的含量为0.86~1.69 mg·kg⁻¹(干重),富集系数均大于1,表明皇竹草对Cd具有一定的富集作用。易自成等^[1]研究结果显示,在1 mg·kg⁻¹ Cd处理土壤中,皇竹草地上部分Cd的含量为2.56 mg·kg⁻¹,与本研究结果基本一致。李钱鱼等^[19]研究发现,在1 mg·L⁻¹ Cd处理水中皇竹草地上部分Cd的含量为13.38 mg·kg⁻¹,高于本研究Cd含量,可能是因为水培条件下Cd的有效性更高,更易于植物吸收。本文未开展土壤中Cd有效性的变化研究,可在未来开展相关研究,分析土壤Cd有效性与皇竹草对Cd的吸收富集量之间的关系,以便更好地通过施用添加剂等辅助措施来提高修复效果。

表3 耕作层土壤中Cd的含量(mg·kg⁻¹干重)

Table 3 Effects of different treatments on Cd concentration in soil(mg·kg⁻¹ dry weight)

处理方式	种植皇竹草		未种植植物	
	种植前	收获后	种植前	收获后
对照(不施用添加剂)	0.67±0.31	0.58±0.14	0.56±0.27	0.55±0.15
石灰+氢氧化钠	0.68±0.28	0.59±0.27	0.77±0.30	0.75±0.13
石灰+氢氧化钠+有机肥	0.65±0.07	0.60±0.00	0.52±0.13	0.51±0.19
石灰+氢氧化钠+蚕沙	0.87±0.37	0.81±0.25	0.54±0.13	0.54±0.08

皇竹草对 Cd 的提取量和提取效率最高分别达 $119.91 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 6.98%, 优于同等条件下种植的 Cd 超富集植物龙葵和甘蔗, 分别为龙葵和甘蔗的 3.5 倍和 10 倍^[20]。植物提取效果与生物量密切相关^[21-22]。本研究中, 尽管皇竹草 Cd 含量是同等种植条件下龙葵的 10% 左右, 但其生物量是龙葵的 65 倍, 由于重金属在皇竹草体内的生物稀释效应, 使皇竹草并未出现 Cd 的胁迫反应, 大生物量的积累使皇竹草表现出了比 Cd 富集植物龙葵更高的 Cd 提取效率。因此, 在中轻度污染情况下, 大生物量的植物皇竹草比龙葵的修复效果更好。杨勇等^[23]比较了超富集植物遏蓝菜 (*Thlaspi caerulescens*) 和 3 种高生物量植物印度芥菜 (*Brassica juncea*)、烟草 (*Nicotiana tabacum*) 和向日葵 (*Helianthus annuus*) 对土壤 Cd (总 Cd $2.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的提取效率, 结果分别为: 烟草 1%, 遏蓝菜 0.6%, 印度芥菜 0.5%, 向日葵 0.08%。尽管遏蓝菜体内 Cd 含量可达 $43.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但大生物量植物对 Cd 的提取效率高于小生物量的超富集植物, 因此大生物量植物更具有实际修复意义。侯新村等^[24]在轻度污染土壤上 (总 Cd $0.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 分析了柳枝稷 (*Panicum virgatum*)、荻 (*Triarrhena sacchariflor*)、芦竹 (*Arundo donax*) 和杂交狼尾草 (*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*) 对 Cd 的吸收能力, 发现 4 种植物对 Cd 的提取量分别为 1.36 、 2.23 、 2.66 、 $6.07 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。熊国焕等^[25]通过大田试验 (总 Cd $3.33 \sim 3.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 发现, 龙葵地上部对 Cd 的年提取量为 $152.04 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$, 年提取效率为 0.94%。Wu 等^[26]的田间试验结果表明, 东南景天 (*Sedum alfredii*) 对 Cd 的提取效率为 1% 左右。本试验在大田环境下进行, 皇竹草的提取效率均远高于以上植物, 因而皇竹草是一种修复酸与 Cd 污染农田的可行性材料。

以皇竹草为修复材料, 将试验区 0~20 cm 表层土壤中的 Cd ($0.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 修复到国家土壤环境质量二级标准限值以内 (全 Cd $\leq 0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH < 6.5), 根据计算最短只需要 9 年, 显示利用皇竹草对酸与 Cd 污染土壤进行治理和修复具有很大的潜力。此外, 皇竹草是一种刈割型植物, 生长周期短, 收获期长。李德明等^[27]研究了刈割频率对皇竹草产量的影响, 结果表明刈割周期在 90 d 左右时, 皇竹草的产量最高。因此, 在实际应用中, 皇竹草每年可以种植 4~6 茬, 实际修复年限更短。

皇竹草用途广泛, 不仅是植物修复材料, 也是优质牧草和能源植物。利用皇竹草修复和治理 Cd 污染

的农田既可有效去除土壤中 Cd, 又可以利用污染农田产出的皇竹草生产生物乙醇, 同时还可以探索利用皇竹草养殖鸡、鹅、兔、猪、牛等农田安全综合利用措施。皇竹草作为能源植物, 可用于生产乙醇、生物质发电、发酵产生沼气等方面^[28-30], 作为牧草, 其养殖经济效益也较高^[31-32]。因此, 利用皇竹草修复和治理 Cd 污染农田土壤是可行的, 并可利用污染区产出的皇竹草开展后续利用, 在污染治理的同时还能获得一定的经济效益, 应用前景良好。

在应用的安全性方面, 根据本研究的分析结果可知, 污染区各处理产出的皇竹草可以安全应用于畜牧养殖以及作为还田材料、造纸原料和生物乙醇原料, 其 Cd 含量均在相关标准限制范围内。若作为生物质燃料应用, 则经过添加剂处理的农田产出的皇竹草可以安全应用, 未经处理的农田产出皇竹草干重中 Cd 总量超过生物质成型燃料中可溶性 Cd 的限量值, 由于该标准为地方标准化指导性技术文件, 国家尚未对于该类指标发布强制性标准限制, 故总体而言, 污染区各处理产出的皇竹草仍可安全应用于生物质成型燃料制造。此外, 根据杨居荣等^[33]对植物体内 Cd 的形态分布的研究结果, 一般植物体内可溶性 Cd 占总量的 45%~69%, 对照处理产出的皇竹草体内可溶性 Cd 的含量有可能在标准限量范围内。本研究未测定皇竹草干重中的可溶性 Cd 含量, 对此还需开展进一步研究, 继续探索污染区产出的皇竹草在更多用途中的安全性。从污染农田综合利用角度考虑, 经过添加剂处理的污染农田, 受土壤中 Cd 有效性影响, 所产出的皇竹草体内 Cd 含量更低, 且生物量更大, 会有更高的经济效益和应用安全性, 虽然施用添加剂对于土壤 Cd 修复的效果有一定抑制, 使整体修复年限较对照处理延长 1.2~1.7 倍, 但更具备污染农田的修复与安全综合利用相结合的推广应用前景。今后还应开展土壤添加剂处理对土壤 Cd 有效态含量与植物生物量的影响研究, 以便合理权衡获取生物量和累积镉浓度间最适当的配合, 为进一步修复和安全利用 Cd 污染农田土壤提供更可靠的科学依据。

4 结论

(1) 大田试验条件下, 皇竹草对土壤重金属 Cd 表现出一定的富集特性, 是治理和修复酸与 Cd 污染土壤良好的植物修复材料。

(2) 不施用添加剂处理下, 皇竹草对土壤 Cd 的提取量和提取效率最高, 修复到国家土壤环境质量二

级标准限值最短仅为9年,故用于进行酸与Cd污染土壤的治理和修复是可行的。

(3)以皇竹草为修复植物材料对污染土壤进行治理和修复,既可实现重金属污染土壤修复,又可安全应用于饲用牧草、还田肥料、造纸原料、能源植物等用途,拓展了污染农田的综合应用前景。

参考文献:

- [1] 易自成,贺俊波,程 华,等.镉对皇竹草构件生长及生理特性的影响[J].农业环境科学学报,2014,33(2):276-282.
YI Zi-cheng, HE Jun-bo, CHENG Hua, et al. Effects of Cd polluted soil on the modular growth and physiological characteristics of *Pennisetum hybridum*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(2):276-282.
- [2] Wang Z X, Hu X B, Xu Z C, et al. Cadmium in agricultural soils, vegetables and rice and potential health risk in vicinity of Dabaoshan Mine in Shaoguan, China[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2014, 21(5):2004-2010.
- [3] 贾伟涛,吕素莲,冯娟娟,等.利用能源植物治理土壤重金属污染[J].中国生物工程杂志,2015,35(1):88-95.
JIA Wei-tao, LÜ Su-lian, FENG Juan-juan, et al. Restore heavy metal contaminated soil with energy plants[J]. *China Biotechnology*, 2015, 35(1):88-95.
- [4] 中华人民共和国环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[R].2014.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. National survey of soil pollution[R]. 2014.
- [5] 翟丽梅,陈同斌,廖晓勇,等.广西环江铅锌矿尾砂坝坍塌对农田土壤的污染及其特征[J].环境科学学报,2008,28(6):1206-1211.
ZHAI Li-mei, CHEN Tong-bin, LIAO Xiao-yong, et al. Pollution of agricultural soils resulting from a tailing spill at a Pb-Zn mine: A case study in Huanjiang, Guangxi[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 28(6):1206-1211.
- [6] 王莉霞,陈同斌,宋 波,等.广西环江流域硫污染农田的土壤酸化与酸性土壤分布[J].地理学报,2008,63(11):1179-1188.
WANG Li-xia, CHEN Tong-bin, SONG Bo, et al. Spatial distribution of acid soil in the Huanjiang river valley, Guangxi[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 63(11):1179-1188.
- [7] 王海慧,邹恒福,罗 瑛,等.土壤重金属污染及植物修复技术[J].中国农学通报,2009,25(11):210-214.
WANG Hai-hui, HUAN Heng-fu, LUO Ying, et al. Soil contaminated by heavy metals and its phytoremediation technology[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(11):210-214.
- [8] Carlos G, Itzia A. Phytoextraction: A cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment[J]. *Bioresource Technology*, 2001, 77(3):229-236.
- [9] 马崇坚,刘发光.皇竹草在生态环境治理中的应用研究进展[J].中国水土保持,2012(1):41-44.
MA Chong-jiang, LIU Fa-guang. Progress in the application research of *Pennisetum hybridum* in the ecological environment[J]. *Soil and Water Conservation China*, 2012(1):41-44.
- [10] 郑 海,易自成,黎俏文,等.多功能作物皇竹草引种的环境风险评价[J].农业环境科学学报,2014,33(2):288-297.
ZHENG Hai, YI Zi-cheng, LI Qiao-wen, et al. Environmental risk assessment of exotic *Pennisetum hybridum* as a biofuel and forage crop[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(2):288-297.
- [11] 国家环境保护局. GB 15618—1995 土壤环境质量[S].北京:中国标准出版社,1995.
State Bureau of Environmental Protection. GB 15618—1995 Environmental quality standards for soils[S]. Beijing: China Standards Press, 1995.
- [12] 中华人民共和国农业部. GB 5084—2005 农田灌溉水质标准[S].北京:中国标准出版社,2005.
Ministry of Agriculture of the PRC. GB 5084—2005 Standards for irrigation water quality[S]. Beijing: China Standards Press, 2005.
- [13] 中华人民共和国卫生部. GB/T 5009.15—2003 食品安全国家标准:食品中镉的测定[S].北京:中国标准出版社,2003.
Ministry of Health of PRC. GB/T 5009.15—2003 National food cadmium standard: Determination of lead in foods[S]. Beijing: China Standards Press, 2003.
- [14] Duz M Z, Celik K S, Aydin I, et al. Microwave digestion followed by ICP-OES for the determination of Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, and Sn in maize[J]. *Atomic Spectroscopy*, 2012, 33(3):78-82.
- [15] 朱俊艳,于玲玲,黄青青,等.油菜-海州香薷轮作修复铜镉复合污染土壤:大田试验[J].农业环境科学学报,2013,32(6):1166-1171.
ZHU Jun-yan, YU Ling-ling, HUANG Qing-qing, et al. Application of rotation system of *Brassica juncea* and *Elsholtzia splendens* to remediate copper and cadmium-contaminated soil: A field trial[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(6):1166-1171.
- [16] 中华人民共和国饲料工业标准化技术委员会. GB 13078—2001 饲料卫生标准[S].北京:中国标准出版社,2001.
Technical Committee for Standardization of Feed Industry of the PRC. GB 13078—2001 Hygienical Standard for Feeds[S]. Beijing: China Standards Press, 2001.
- [17] 中国石油和化学工业协会. GB/T 23349—2009 肥料中砷、镉、铅、铬、汞生态指标[S].北京:中国标准出版社,2009.
China Petroleum and Chemical Industry Association. GB/T 23349—2009 Ecological index of arsenic, cadmium, lead, chromium and mercury for fertilizers[S]. Beijing: China Standards Press, 2009.
- [18] 深圳市人居环境委员会. SZDB/Z 109—2014 生物质成型燃料及燃烧设备技术规范[S].深圳:深圳市市场监督管理局,2014.
Human Settlements Environment Committee of Shenzhen. SZDB/Z 109—2014 Technical specification for molded-chips biomass fuel and combustion equipment[S]. Shenzhen: Shenzhen Market Supervision and Administration Bureau, 2014.
- [19] 李钱鱼,肖艳辉,何金明,等.镉对皇竹草生长及其镉吸收累积的影响[J].江苏农业科学,2012,40(11):354-356.
LI Qian-yu, XIAO Yan-hui, HE Jin-ming, et al. Effects of Cd polluted soil on the growth and accumulation of *Pennisetum hybridum*[J]. *Jiang-*

- su *Agricultural Science*, 2012, 40(11):354-356.
- [20] 赵雪梅, 谢 华, 吴开庆, 等. 酸与 Cd 污染农田的植物修复及健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(4):702-708.
- ZHAO Xue-mei, XIE Hua, WU Kai-qing, et al. Phytoremediation and health risk assessment of acidified and cadmium contaminated farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(4):702-708.
- [21] Manousaki E, Kalogerakis N. Phytoextraction of Pb and Cd by the mediterranean saltbush (*Atriplex halimus* L.); Metal uptake in relation to salinity[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2009, 16(7):844-854.
- [22] 申时立, 黎华寿, 夏北成, 等. 大生物量植物治理重金属重度污染废弃地可行性的研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3):572-578.
- SHEN Shi-li, LI Hua-shou, XIA Bei-cheng, et al. A field experiment on phytoextraction of heavy metals from highly contaminated soil using big biomass plants of *Sauropus androgynus* and *Manihot* sp.[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3):572-578.
- [23] 杨 勇, 王 巍, 江荣凤, 等. 超累积植物与高生物量植物提取镉效率的比较[J]. 生态学报, 2009, 129(5):2732-2737.
- YANG Yong, WANG Wei, JIANG Rong-feng, et al. Comparison of phytoextraction efficiency of Cd with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and three high biomass species[J]. *Acta Ecologica sinica*, 2009, 129(5):2732-2737.
- [24] 侯新村, 范希峰, 武菊英, 等. 草本能源植物修复重金属污染土壤的潜力[J]. 中国草地学报, 2012, 34(1):59-64, 76.
- HOU Xin-cun, FAN Xi-feng, WU Ju-ying, et al. Potentiality of herbaceous bioenergy plants in remediation of soil contaminated by heavy metals[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2012, 34(1):59-64, 76.
- [25] 熊国焕, 何艳明, 栾景丽, 等. 龙葵、大叶井口边草和短萼灰叶对 Pb、Cd 和 As 污染农田的修复研究[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(4):512-518.
- XIONG Guo-huan, HE Yan-ming, LUAN Jing-li, et al. Cd-, As-, and Pb- polluted farmland remediation potentials of *Solanum nigrum*, *Pteriscretica* var. *nervosa* and *Tephrosia candida*[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(4):512-518.
- [26] Wu Q T, Wei Z B, Ouyang Y. Phytoextraction of metal-contaminated soil by *Sedum alfredii* H: Effects of chelator and co-planting[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2007, 180(1):131-139.
- [27] 李德明, 刘金祥, 孙进武, 等. 刈割频率对皇竹草产量及其光合生理生态的影响[J]. 广东农业科学, 2010, 37(5):39-41.
- LI De-ming, LIU Jin-xiang, SUN Jin-wu, et al. Effect of different cutting frequency on yield, photosynthetic physioecological of *Pennisetum hybridum*[J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2010, 37(5):39-41.
- [28] 王会勤. 能源作物皇竹草的品种选育及生产乙醇研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2009.
- WANG Hui-qin. Studies on cultivation and fuel ethanol production of *Pennisetum hybridum* suitable for Yellow River area[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2009.
- [29] 刘 毅. 一种新型生物质电厂燃料组织模式的探讨[J]. 沿海企业与科技, 2013(6):19-21.
- LIU Yi. Discussion on a new organizational model of fuel in the biomass power plant[J]. *Coastal Enterprises and Science & Technology*, 2013(6):19-21.
- [30] 罗 艳, 郑 正, 杨世关, 等. 皇竹草厌氧发酵产沼气特性[J]. 环境化学, 2010, 2(29):258-261.
- LUO Yan, ZHENG Zheng, YANG Shi-guan, et al. Study on the fermentation characteristics of *Pennisetum hybridum*[J]. *Environmental Chemistry*, 2010, 2(29):258-261.
- [31] 任 莉, 易克贤, 陈河龙, 等. 几种亚热带牧草的营养价值研究[J]. 中国奶牛, 2012(1):39-41.
- REN Li, YI Ke-xian, CHEN He-long, et al. Study on nutrition value of some subtropical forage[J]. *China Dairy Cattle*, 2012(1):39-41.
- [32] 彭乃木, 胡文胜, 李金顺, 等. 青贮皇竹草替代稻草饲喂育肥牛增重效果试验[J]. 中国草食动物, 2010, 30(5):84-85.
- PENG Nai-mu, HU Wen-sheng, LI Jin-shun, et al. The weight gain test of silage *Pennisetum hybridum* substitute straw fed cattle[J]. *China Herbivore Science*, 2010, 30(5):84-85.
- [33] 杨居荣, 鲍子平, 张素芹. 镉、铅在植物细胞内的分布及其可溶性结合形态[J]. 中国环境科学, 1993, 13(4):263-268.
- YANG Ju-rong, BAO Zi-ping, ZHANG Su-qin. The distribution and binding of Cd and Pb in plant cell[J]. *China Environmental Science*, 1993, 13(4):263-268.