

李文略, 金关荣, 骆霞虹, 等. 不同红麻品种的土壤重金属污染修复潜力对比研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2150–2158.

LI Wen-lüe, JIN Guan-rong, LUO Xia-hong, et al. Comparative study on the potential of a kenaf (*Hibiscus cannabinus*) variety for remediating heavy metal contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2150–2158.

不同红麻品种的土壤重金属污染修复潜力对比研究

李文略, 金关荣, 骆霞虹, 安霞, 李苹芳, 朱关林, 陈常理*

(浙江省萧山棉麻研究所, 杭州 311202)

摘要:为明确红麻的土壤重金属污染修复潜力,以7个国内代表红麻品种为试验材料,种植于Zn、Cu、Cr、Cd、Ni复合污染($P_{\text{综合}}=6.2$)土壤。在纤维成熟期测定红麻产量,以及叶片、茎秆、根系重金属含量,并计算红麻重金属转移系数、富集系数以及重金属转移量。结果表明:杂交组合红优2号在两年试验中,生物量均为最佳,分别为 $10.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $16.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;红麻不同器官的重金属累积差异显著,叶片和根系重金属累积量均高于茎秆,但富集系数均低于1,未达到高富集植物特征;湘红1号转移系数优于其他品种,其中重金属Cd的转移系数达到1.39;红麻单季最高可转移重金属Cu $185.3 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ (福红991)、Zn $1012.9 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ (湘红1号)、Cd $25.7 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ (浙8310)、Cr $40.8 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ (H368)、Ni $34.8 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ (H368)。研究表明:红麻生物量大,重金属耐性高,具有一定经济价值,但重金属提取能力不强,可适用于重金属污染土壤的复垦。

关键词:红麻;重金属;干生物量;富集系数;转移系数

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)10-2150-09 doi:10.11654/jaes.2018-0381

Comparative study on the potential of a kenaf (*Hibiscus cannabinus*) variety for remediating heavy metal contaminated soils

LI Wen-lüe, JIN Guan-rong, LUO Xia-hong, AN Xia, LI Ping-fang, ZHU Guan-lin, CHEN Chang-li*

(Cotton and Bast Fiber Crops Research Institute of Xiaoshan Zhejiang Province, Hangzhou 311202, China)

Abstract: Soil heavy metal pollution has been a focus of research, and phytoremediation is currently a commonly used strategy for heavy metal contaminated soil restoration. However, it usually takes many years for plants to remediate heavy metal-contaminated soil. Furthermore, most of the plants used for restoration have small biomass and low economic value. Therefore, scientists have considered large biomass plants for remediation of heavy metal contaminated soils. In this study, kenaf, which has high economic value and biomass, was used to study the potential for remediating heavy metal contaminated soils. Seven kenaf varieties were planted in soils, which were heavily polluted by zinc (Zn), copper (Cu), chromium (Cr), cadmium (Cd), and nickel (Ni). The yield of kenaf and heavy metal contents in leaves, stems, and roots were determined at the maturity stage of the fiber; furthermore, the bioconcentration factor, transfer factor, and heavy metal transfer amount were calculated. The results showed that the biomass of the hybrid combination Hongyou-2 ranked first in the last two years' experiments, and its biomass values were $10.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $16.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. There was a significant difference in the concentration of heavy metals in different organs of kenaf ($P < 0.05$). The accumulation of heavy metals in leaves and roots was higher than that in stalks, but the bioconcentration factors were < 1 ; thus, they did not reach the values as high hyperaccumulating plants. The transfer factor of Xianghong-1 was higher than that of the other varieties, in which the transfer factor of Cd reached 1.39. Kenaf could transfer at most $185.3 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ Cu (Fuhong-991), $1012.9 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ Zn (Xianghong-1), $25.7 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ Cd (Zhe-8310), $40.8 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ Cr (H368), and $34.8 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ Ni (H368). In general, kenaf is a heavy metal tolerant plant with a large biomass, but its heavy metal absorption capacity is not exceptionally good. It could be used as a reclamation crop grown on heavy metal contaminated soils.

Keywords: kenaf; heavy metal; plant biomass; bioconcentration factor; transfer factor

收稿日期:2018-03-22 录用日期:2018-06-20

作者简介:李文略(1990—),男,湖北咸宁人,硕士研究生,主要从事经济作物育种、栽培科研工作。E-mail:kobe1924@163.com

*通信作者:陈常理 E-mail:chenchangli66@163.com

基金项目:国家麻类产业技术体系建设专项(CARS-16-S05);浙江省公益性技术应用研究计划项目(2017C32022)

Project supported: China Agriculture Research System for Bast and Leaf Fibre Crops (CARS-16-S05); Special Scientific Research Fund of Public Welfare Profession of Zhejiang (2017C32022)

随着经济社会的发展,环境问题日益凸显,已成为全面建成小康社会的突出短板之一^[1]。重金属在环境中产生的污染效应具有隐蔽性、长期性以及不可逆性,针对重金属污染的治理是目前环境问题的热点和难点^[2]。土壤重金属通过食物链进入人体,严重危害人类健康。每年粮食因重金属污染造成的直接经济损失超过200亿元^[3-4]。如何修复农田土壤重金属污染,保障作物的安全生产,是当前土壤和环境领域研究的重点和难点。

重金属污染治理,目前可分为两种思路:(1)采取一定方法将土壤中重金属移出土体(活化);(2)降低重金属迁移性和生物有效性,使之固定在土壤中,而不是进入作物,降低其健康风险和环境风险(钝化)^[5]。后者从重金属土壤安全生产的角度出发,主要措施有筛选低积累作物品种,如水稻^[6]、油菜^[7]、玉米^[8]、小麦^[9]等,或向土壤中添加一些有机、无机和微生物钝化剂,降低土壤重金属有效性^[10]。前者主要依托一些高富集的植物,将重金属从土壤中移除,但目前用于研究的大部分高富集植物皆存在生物量小、经济价值不高的缺点,在实际应用中通常难以达到预期效果^[11]。因而一些重金属耐性强、生长快、生物量大、经济价值高并有一定的重金属富集能力的植物近年来被逐步应用到重金属修复当中,如油菜^[12]、苕麻^[13]、玉米^[14]。王凯荣等^[15]通过对南方集中主要栽培作物耐土壤Cd污染分析,认为黄麻、红麻、苕麻等纤维植物可作为Cd污染农区的首选对象;杨煜曦等^[16]通过5年定点大田试验表明,利用红麻复垦重金属污染土壤,具有潜在经济价值。

红麻(*Hibiscus cannabinus*)亦称洋麻、槿麻,为锦葵科木槿属一年生韧皮纤维作物。生物量是针叶木材的3~4倍,具有适应性高、用途广等特点,其用途涉及麻纺、造纸、建材、麻塑、活性炭、饲料、食用等诸多领域^[17]。关于红麻修复重金属已有相关报道,但大多采用盆栽试验或水培试验,试验污染源也多为单一重金属,没有针对现实中多为复合污染这一事实进行深入研究。本试验以国内推广面积较大的7个红麻品种为试验材料,在Cu、Zn、Cd、Cr、Ni复合污染土壤上种植比较,旨在研究不同红麻品种对重金属的修复潜能,以及红麻在重金属污染土壤上复垦的前景。

1 材料与方法

1.1 试验材料及地点

试验选取的国内7个代表性红麻品种,分别为福

建农林大学提供的晚熟常规品种——福红991和晚熟航天诱变品种——福红航992,中国农业科学院麻类研究所提供的晚熟杂交组合——H368和晚熟常规品种——湘红1号,浙江省萧山棉麻研究所提供的中熟航天诱变品种——航优1号和晚熟常规品种——浙8310,以及广西大学提供的晚熟杂交组合——红优2号。试验地点位于杭州市富阳区常安镇,周边有电镀厂和电池厂,试验土壤为农田水稻土(有机质9.52%、全氮0.93 g·kg⁻¹、全磷1.16 g·kg⁻¹、全钾13.75 g·kg⁻¹),土壤重金属超标严重。

1.2 试验设计

试验采用7个品种,3次重复,随机区组试验,各小区面积为5.5 m×1.4 m。于2015—2016年重复种植,2015年红麻种植时间为5月27日至10月22日,2016年红麻种植时间为6月6日至10月10日。按常规红麻栽培方式管理,并对2016年7个红麻品种的叶片、茎秆、根系的重金属含量进行测定分析。

1.3 样品采集和分析方法

土壤样品:采集各处理小区0~20 cm表层土壤样品共21个,剔除植物残体和石块,混匀后自然风干,研磨后过80目筛。委托浙江省农业科学院农产品质量标准研究所测定土壤样品中Zn、Cr、Cd、Cu、Ni 5种重金属含量和pH值。土壤样品采用王水-高氯酸法消化,具体各重金属指标测定方法:Zn(GB/T 17138—1997)、Cr(HJ 491—2009)、Cd(GB/T 17141—1997)、Cu(GB/T 17138—1997)、Ni(GB/T 17139—1997)。

植株样品:对2016年各处理红麻,随机取5株,分叶片、茎秆、根系收获,用自来水和去离子水将各部位清洗干净,先于105℃杀青1 h,随后调至80℃条件下烘干至恒质量,粉碎后过80目筛。植株样品采用硝酸-高氯酸法消化,SOLAAR M6型原子吸光光谱仪分别测定重金属Zn、Cu、Cd、Cr、Ni含量(试验样品委托湖南农业大学检测)。

植株收获期产量性状考查:先记录各小区有效茎数,再随机选取20株考查株高、茎粗、鲜皮厚、干麻叶质量、干麻骨质量、干麻皮质量,计算出相应产量。

1.4 各指标计算

土壤中污染物*i*的环境质量指数

P_i =污染物*i*的实际测量浓度/土壤环境标准中*i*的临界值

环境综合污染指数^[18]

$$P_{\text{综合}} = \sqrt{\frac{\bar{P}_i^2 + \max P_i^2}{2}}$$

重金属富集系数=植物各部位重金属含量/土壤重金属含量

转运系数=植株地上部分重金属含量/植株地下部分重金属含量^[19]。

每年植物提取总量($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$)=叶片生物量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) $\times$ 叶片重金属含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)+茎秆生物量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) $\times$ 茎秆重金属含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)+根系生物量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) $\times$ 根系重金属含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[19]。

1.5 数据处理

使用Excel 2010对数据进行分析 and 制图,利用SPSS 23.0软件进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 试验地土壤污染情况

试验地21个小区土壤重金属检测结果见表1,供试土壤呈弱碱性,多种重金属超过《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)^[20]。其中重金属Zn检测总量达 $1325 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超过土壤环境质量Ⅲ级标准165%;重金属Cd达到 $4.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是土壤环境质量Ⅲ级标准的4.9倍;重金属Ni检测值超过土壤环境质量Ⅱ级标准,但未达Ⅲ级标准;重金属Cu检测值为 $97.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,接近土壤环境质量Ⅱ级标准;重金属Cr检测量为 $136.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,未超过土壤环境质量Ⅱ级标准。

各重金属环境质量指数计算结果见表2。参考重金属污染评价标准, $P_i \leq 1$ 表示无污染, $1 < P_i \leq 2$ 表示轻微污染, $2 < P_i \leq 3$ 表示轻度污染, $3 < P_i \leq 5$ 表示中度污染, $P_i > 5$ 表示重度污染; $P_{\text{综合}} > 3$ 表示重度污染。试验土壤 P_{Cd} 为8.2,达到重度污染, P_{Zn} 为4.4,为中度污染, P_{Ni} 为2.5,为轻度污染,试验区 $P_{\text{综合}}$ 为6.2,达到重

度污染水平。

2.2 不同红麻品种产量及农艺性状

2015年各红麻品种产量和农艺性状结果见表3,各指标存在一定差异。干生物量平均值为 $8.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,7个品种表现为:红优2号>湘红1号>航优1号>H368>福红航992>浙8310>福红991,以红优2号最高,达到 $10.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,较其他品种高出17.8%~36.1%。农艺性状方面,红优2号株高(340.9 cm)优势明显,较其他品种高出25.6~50.8 cm,茎粗约14.8 mm,超出其他品种5.7%~34.5%;皮厚以福红991和红优2号表现最优,超过1 mm;有效株数以H368最高,达到20.75万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$,是最低值福红991的1.96倍。

2016年各品种生物量及产量性状较2015年均有一定增长(表3),品种间差异较2015年小。干生物量方面,福红991、浙8310、H368和红优2号均达到 $16.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,以H368($17.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)最高,较最低值航优1号($12.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)高出37.9%,各品种干生物量表现为:H368>红优2号>福红991>浙8310>湘红1号>福红航992>航优1号。株高、茎粗和皮厚各品种间差异较小,株高以红优2号和H368表现最佳,超过355.0 cm;茎粗以浙8310最佳,达到14.7 mm;皮厚以红优2号最优,为0.98 mm;有效株数仍以H368表现最佳,达到21.50万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 。综合两年表现,红优2号在重金属土壤中的表现要优于其他品种。

2.3 红麻重金属含量、富集系数、转运系数和提取总量

植株样品重金属检测结果(图1~图5)表明,红麻不同品种、不同部位重金属积累量存在差异。总体来看,重金属积累量表现为 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Cd}$;5种重金属在茎秆中累积量均为最少。重金属Cu的累积整体

表1 土壤重金属含量

Table 1 The concentration of heavy metals in soils

项目 Items	pH	Zn/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cr/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Ni/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cu/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cd/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
试验地土壤 Test soil	7.54~7.72	1 325.0 $\pm$ 98.6	136.3 $\pm$ 16.4	147.1 $\pm$ 10.1	97.9 $\pm$ 9.0	4.9 $\pm$ 0.3
土壤质量Ⅲ级标准 ^[8] Soil quality grade Ⅲ standard	>6.5	500	300	200	400	1
土壤质量Ⅱ级标准 ^[8] Soil quality grade Ⅱ standard	>7.5	300	250	60	100	0.6

表2 土壤重金属污染情况

Table 2 The heavy metals pollution in soils

重金属种类 Heavy metal species	P_{Zn}	P_{Cr}	P_{Ni}	P_{Cu}	P_{Cd}	$P_{\text{综合}}$
污染指数 Pollution index	4.4	0.5	2.5	1.0	8.2	6.2
污染等级 Pollution level	中度污染	无污染	轻度污染	无污染	重度污染	重度污染

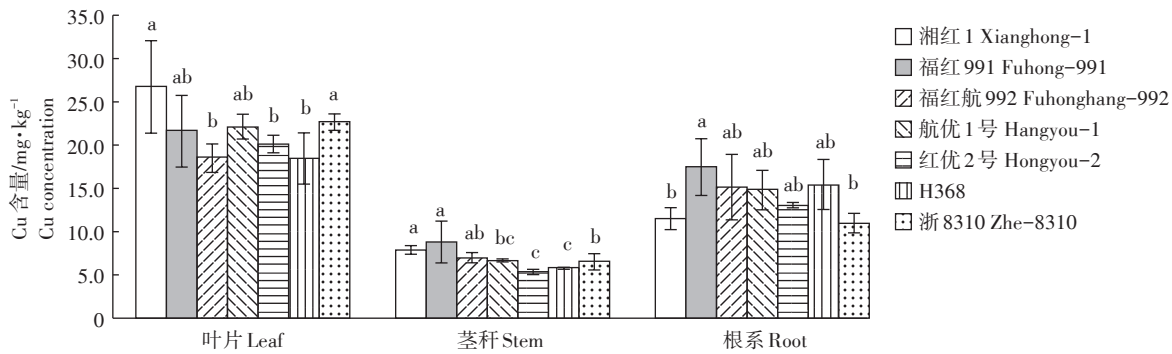
注:各指数均参考土壤环境质量Ⅱ级标准。

Notes: Each index is referenced to grade Ⅱ soil quality standards.

表3 7个红麻品种产量及农艺性状
Table 3 Results of biomass and agronomic traits of 7 kenaf varieties

时间 Time	品种名 Variety	株高 Height/ cm	茎粗 Stem diameter/ mm	皮厚 Thickness of bast/mm	有效株数 Effective number/ 万株·hm ⁻²	单株麻皮质量 Individual fibre weight/g	干生物量 Biomass/ t·hm ⁻²
2015	福红 991 Fuhong-991	313.5±17.4ab	14.0±1.2a	1.16±0.07a	10.58±2.10b	23.6±4.1a	7.5±1.6a
	福红航 992 Fuhonghang-992	306.7±9.2ab	11.8±0.8bc	0.93±0.04bc	15.89±2.03ab	17.6±3.6abc	7.7±1.1a
	H368	304.2±25.7b	11.1±1.2c	0.87±0.13c	20.75±6.40a	15.3±4.2bc	8.1±2.5a
	红优 2 号 Hongyou-2	340.9±24.8a	14.8±1.1a	1.06±0.03ab	12.44±0.51b	23.8±1.8a	10.1±0.9a
	航优 1 号 Hangyou-1	315.3±14.7ab	12.0±0.8bc	0.87±0.10c	15.75±3.11ab	15.8±3.1bc	8.2±0.5a
	湘红 1 号 Xianghong-1	314.0±6.3ab	13.1±0.5ab	0.91±0.16bc	14.48±2.70ab	19.6±3.1ab	8.6±1.3a
	浙 8310 Zhe 8310	290.1±18.2b	11.0±1.0c	0.75±0.07c	19.81±3.60a	12.2±3.2c	7.5±1.2a
	平均值 Average	312.1	12.5	0.94	15.67	18.7	8.3
2016	福红 991 Fuhong-991	350.3±15.1ab	14.6±0.5a	0.93±0.03ab	18.64±0.52ab	29.7±2.9ab	16.3±1.8a
	福红航 992 Fuhonghang-992	343.2±24.2ab	13.8±1.2ab	0.89±0.02ab	18.52±3.22ab	24.2±1.7bc	14.5±1.1a
	H368	355.0±9.6ab	13.6±0.8ab	0.92±0.02ab	21.50±1.03a	28.8±3.3ab	17.1±2.8a
	红优 2 号 Hongyou-2	357.9±15.5a	14.1±1.0a	0.98±0.06a	19.35±1.62ab	31.8±6.7a	16.7±3.3a
	航优 1 号 Hangyou-1	327.7±9.5b	12.4±0.6b	0.86±0.10b	18.52±1.01ab	19.3±2.2c	12.4±0.6a
	湘红 1 号 Xianghong-1	329.7±10.7ab	14.2±0.9a	0.91±0.06ab	17.51±3.10ab	26.2±2.3ab	15.1±4.3a
	浙 8310 Zhe 8310	337.0±12.7ab	14.7±0.3a	0.95±0.04ab	16.26±2.88b	32.3±2.5a	16.1±1.8a
	平均值 Average	343.0	13.9	0.92	18.61	27.5	15.5

注:表中方差分析仅对相同年份进行比较,同一列不同字母表示差异达5%显著水平。
Note: The analysis of variance in the table only compares the same year, different letters in the same column indicate that the difference is up to 5% significant level.



同一部位不同字母表示差异达5%显著水平。下同
The different letter indicates the significant difference is up to 5% significant level in the same organ. The same below

图1 红麻不同部位 Cu 含量

Figure 1 The concentration of Cu in different part of kenaf

趋势表现为叶片>根系>茎秆,重金属Cr和Ni则表现为根系>叶片>茎秆,重金属Cd在不同部位累积量大小随品种间差异较大,但叶片累积量显著高于茎秆和根系。重金属Zn在湘红1号、红优2号、浙8310的累积量表现为:叶片>根系>茎秆,福红991、福红航992、航优1号、H368则表现为根系>叶片>茎秆。

根据计算得出各品种重金属富集系数见表4。可以看出,红麻植株各部位对重金属的富集系数较小,其中Ni、Cr和Zn富集系数大部分不足0.1;不同红

麻器官重金属Cu富集系数在0.057~0.279之间;重金属Cd富集系数显著高于其他重金属,其中各品种叶片富集系数均超过0.5,以湘红1号、红优2号、浙8310表现最佳,超过0.8。

根据计算得出不同品种重金属转移系数如表5所示。不同重金属转移系数间存在一定差异,其中红麻重金属Cd平均转移系数为1.12,以湘红1号和浙8310转移系数最高,达到1.39,超出平均值24.1%;重金属Cu平均转运系数为0.64,仅湘红1号和浙8310

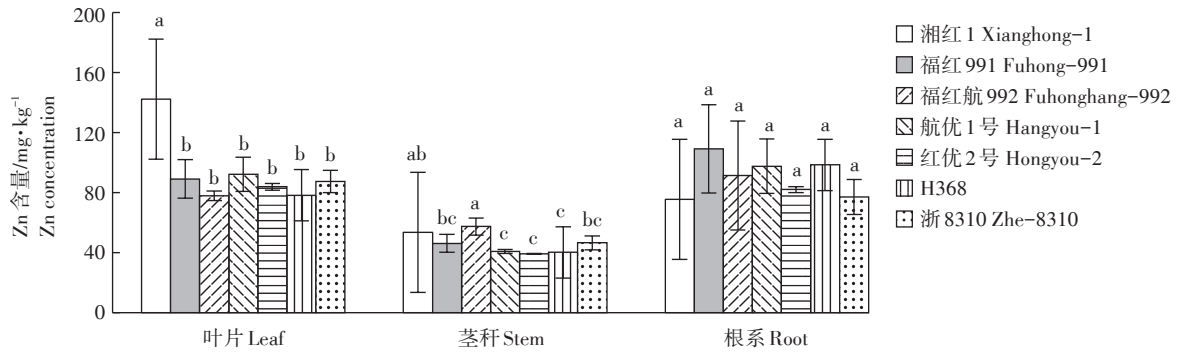


图2 红麻不同部位 Zn 含量

Figure 2 The concentration of Zn in different part of kenaf

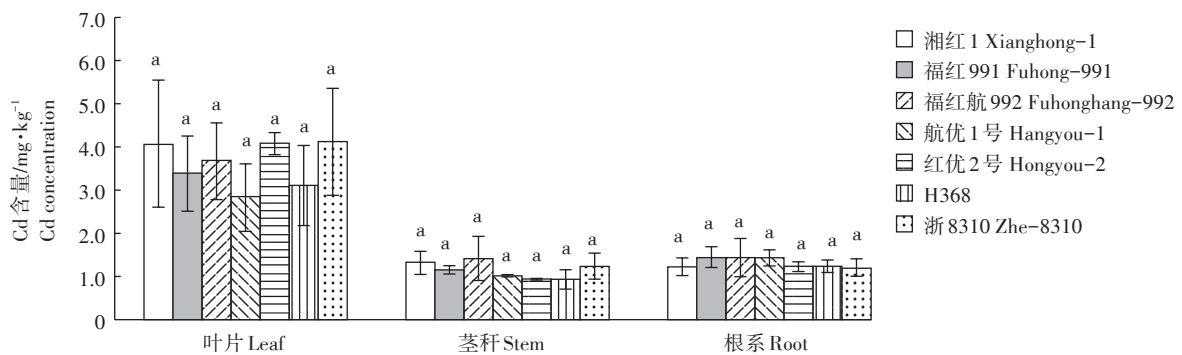


图3 红麻不同部位 Cd 含量

Figure 3 The concentration of Cd in different part of kenaf

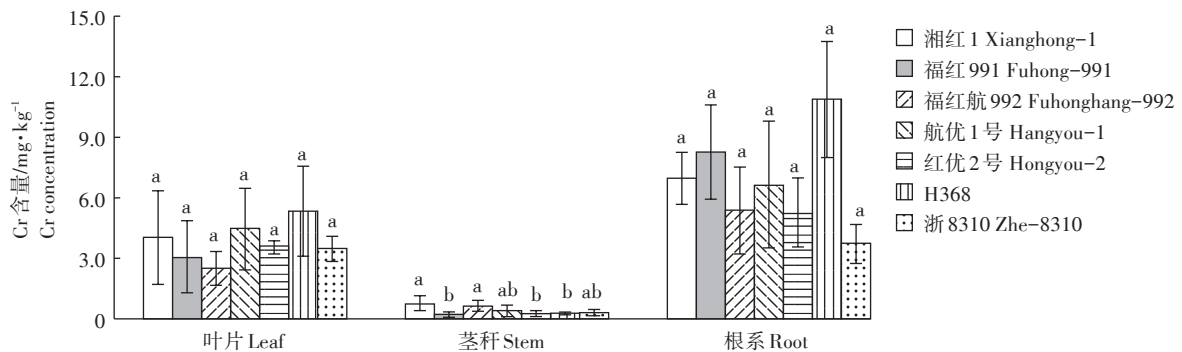


图4 红麻不同部位 Cr 含量

Figure 4 The concentration of Cr in different part of kenaf

超过平均值;重金属 Zn 转运系数平均值为 0.60,其中湘红 1 号、福红航 992 和浙 8310 分别超过平均值 45.0%、10.0% 和 13.3%;重金属 Cr 和 Ni 转运系数前两位均分别浙 8310 和湘红 1 号。

结合红麻生物量及重金属在各部位积累量,计算出种植一季红麻可转移重金属量见表 6。红麻累计每公顷每年最高可转移重金属 Cu 185.3 g、Zn 1 012.9 g、Cd 25.7 g、Cr 40.8 g 和 Ni 34.8 g。不同品种红麻转移量不同,其中重金属 Cu 以福红 991 和湘红 1

号最佳,重金属 Zn 以湘红 1 号和福红 991 最佳,重金属 Cd 转移量最高为浙 8310 和湘红 1 号,重金属 Cr 转移量最高为 H368 和湘红 1 号,重金属 Ni 转移量则以 H368 和福红 991 表现最佳。

3 讨论

红麻生长周期短、抗逆性强、耐粗放,在一定逆境条件下仍能正常生长^[11]。王凯荣等^[15]发现当土壤 Cd 含量超过 62 mg·kg⁻¹ 时,红麻经济产量显著下降。本

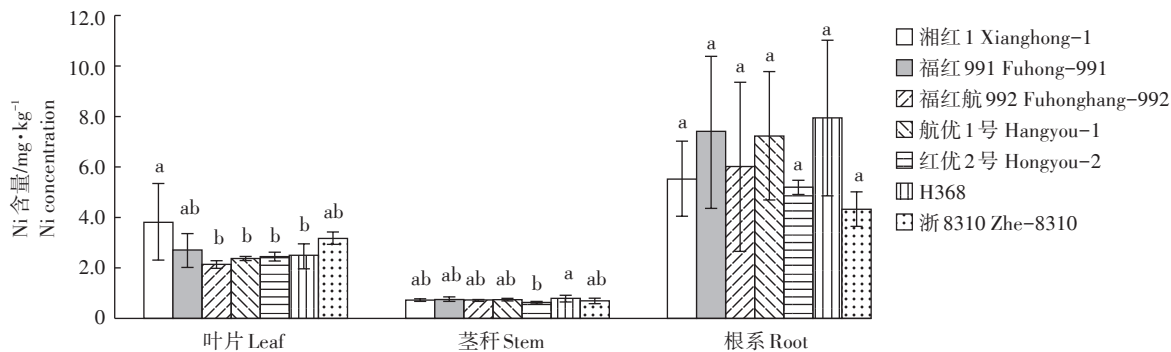


图5 红麻不同部位 Ni 含量

Figure 5 The concentration of Ni in different part of kenaf

表 4 不同红麻重金属富集系数

Table 4 Bioconcentration factors of different kenaf varieties

植株部位 Organs	品种名 Variety	Cu	Zn	Cd	Cr	Ni
叶片 Leaf	湘红 1 号 Xianghong-1	0.279±0.076a	0.108±0.039a	0.800±0.230a	0.033±0.022a	0.026±0.012a
	福红 991 Fuhong-991	0.221±0.020ab	0.067±0.005b	0.691±0.122a	0.022±0.013a	0.019±0.004ab
	福红航 992 Fuhonghang-992	0.192±0.036b	0.059±0.009b	0.724±0.166a	0.017±0.006a	0.015±0.002b
	航优 1 号 Hangyou-1	0.222±0.038ab	0.072±0.012b	0.595±0.185a	0.032±0.009a	0.016±0.002b
	红优 2 号 Hongyou-2	0.214±0.028ab	0.064±0.008b	0.855±0.069a	0.028±0.002a	0.017±0.003b
	H368	0.182±0.037b	0.057±0.006b	0.623±0.177a	0.036±0.019a	0.016±0.002b
	浙 8310 Zhe 8310	0.242±0.026ab	0.067±0.003b	0.852±0.198a	0.029±0.006a	0.023±0.001ab
茎秆 Stem	湘红 1 号 Xianghong-1	0.082±0.013ab	0.041±0.004ab	0.266±0.042ab	0.006±0.003a	0.005±0.000a
	福红 991 Fuhong-991	0.091±0.028a	0.035±0.006bc	0.237±0.005ab	0.002±0.001b	0.005±0.000a
	福红航 992 Fuhonghang-992	0.071±0.004ab	0.043±0.001a	0.277±0.096a	0.004±0.002ab	0.005±0.000a
	航优 1 号 Hangyou-1	0.067±0.011ab	0.032±0.001c	0.211±0.015ab	0.003±0.002ab	0.005±0.000a
	红优 2 号 Hongyou-2	0.057±0.009b	0.030±0.004c	0.198±0.019ab	0.002±0.001b	0.004±0.001a
	H368	0.058±0.003b	0.029±0.003c	0.186±0.035b	0.002±0.000b	0.005±0.001a
	浙 8310 Zhe 8310	0.070±0.013ab	0.036±0.005bc	0.255±0.045ab	0.003±0.002ab	0.005±0.001a
根系 Root	湘红 1 号 Xianghong-1	0.118±0.003bc	0.058±0.004a	0.243±0.023a	0.053±0.005a	0.037±0.008a
	福红 991 Fuhong-991	0.179±0.016a	0.082±0.019a	0.295±0.037a	0.061±0.023a	0.050±0.017a
	福红航 992 Fuhonghang-992	0.153±0.025ab	0.068±0.023a	0.281±0.082a	0.037±0.041a	0.041±0.021a
	航优 1 号 Hangyou-1	0.147±0.006abc	0.075±0.010a	0.298±0.049a	0.047±0.015a	0.048±0.014a
	红优 2 号 Hongyou-2	0.138±0.013bc	0.062±0.006a	0.258±0.025a	0.040±0.013a	0.036±0.003a
	H368	0.152±0.031abc	0.071±0.023a	0.248±0.025a	0.074±0.068a	0.051±0.022a
	浙 8310 Zhe 8310	0.117±0.017c	0.059±0.003a	0.248±0.032a	0.030±0.005a	0.031±0.004a

注:表中方差分析仅对相同部位进行比较,同一列不同字母表示差异达5%显著水平。
Note: The analysis of variance in the table only compares the same part, different letters in the same column indicate that the difference is up to 5% significant level.

研究中7种红麻两年平均干生物量为11.88 t·hm⁻²,达到一般农田生产水平,反映了红麻对重金属具有一定耐受性。且根据前人报道,红麻在重金属污染土壤上种植,其纤维可达到纺织标准^[15-16],保证了红麻修复重金属的同时,还能有一定经济产值。

植物修复重金属潜能主要取决于植物的生物量

及其对重金属的富集能力^[19]。已有研究表明,当土壤中Pb浓度在100~400 mg·kg⁻¹范围内时,红麻富集系数最高可达3^[11];李丰涛等^[21]发现在闽中南重金属污染区,红麻对Cd的富集系数大于1。本试验中,将红麻种植于多种重金属复合污染土壤上,各品种红麻对Cd富集系数最高,但不超过0.8,未达到前人报道水

表5 不同红麻重金属转移系数

Table 5 Transfer factors of different kenaf varieties

重金属种类 Heavy metal species	湘红1号 Xianghong-1	福红991 Fuhong-991	福红航992 Fuhonghang-992	航优1号 Hangyou-1	红优2号 Hongyou-2	H368	浙8310 Zhe 8310
Cu	0.91±0.19a	0.59±0.17bc	0.56±0.12c	0.60±0.10bc	0.53±0.03c	0.48±0.10c	0.82±0.18ab
Zn	0.87±0.08a	0.47±0.09c	0.66±0.17ab	0.50±0.10bc	0.53±0.01bc	0.46±0.13c	0.68±0.08ab
Cd	1.39±0.20a	0.99±0.11b	1.18±0.10ab	0.90±0.12b	1.02±0.07b	0.97±0.11b	1.39±0.25a
Cr	0.17±0.11ab	0.07±0.02b	0.16±0.06ab	0.16±0.05ab	0.11±0.07ab	0.08±0.04b	0.21±0.09a
Ni	0.21±0.09a	0.13±0.04a	0.15±0.10a	0.14±0.05a	0.16±0.02a	0.13±0.06a	0.25±0.05a

注:表中同一行不同字母表示差异达5%显著水平。

Note: Different letters in the same row in the table indicate that the difference is 5% significant.

表6 不同红麻累计重金属吸收量($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)Table 6 The amount of heavy metals extracted by different kenaf varieties($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

部位	品种	重金属种类 Heavy metal species				
		Cu	Zn	Cd	Cr	Ni
红麻地上部分 The amount of heavy metals in aerial part of kenaf	湘红1号 Xianghong-1	134.3±14.7a	842.6±40.7a	21.9±4.5a	15.3±8.3a	14.7±2.3a
	福红991 Fuhong-991	142.9±28.5a	710.0±67.6bc	19.6±2.5ab	7.7±2.6a	13.6±1.8ab
	福红航992 Fuhonghang-992	104.0±5.1bc	741.7±59.1b	21.0±6.9ab	10.7±4.0a	11.2±0.1bc
	航优1号 Hangyou-1	95.1±2.5c	515.4±15.5d	13.7±1.2b	10.9±1.7a	10.5±0.4c
	红优2号 Hongyou-2	97.8±4.5c	622.7±6.7c	18.0±0.3ab	8.5±2.3a	11.6±0.7bc
	H368	107.6±5.7bc	653.0±60.3bc	17.5±4.2ab	13.1±3.4a	14.6±1.6a
	浙8310 Zhe 8310	122.9±12.7ab	721.7±55.8b	22.8±1.2a	10.7±1.2a	14.5±1.0a
红麻地下部分 The amount of heavy metals in the underground part of kenaf	湘红1号 Xianghong-1	25.9±2.9b	170.3±19.6a	2.8±0.5a	15.7±2.9a	12.4±3.4a
	福红991 Fuhong-991	42.4±7.8a	264.5±71.3a	3.5±0.6a	20.0±8.1a	18.0±7.2a
	福红航992 Fuhonghang-992	32.7±8.2ab	197.9±78.4a	3.1±1.0a	11.7±2.3a	13.0±7.2a
	航优1号 Hangyou-1	27.6±4.1b	180.7±33.6a	2.7±0.3a	12.3±5.9a	13.4±4.7a
	红优2号 Hongyou-2	32.4±0.9ab	204.2±4.8a	3.1±0.3a	13.0±4.4a	12.9±0.7a
	H368	39.2±7.5a	251.0±85.5a	3.1±0.4a	27.7±12.3a	20.2±7.8a
	浙8310 Zhe 8310	26.3±2.9b	185.2±29.8a	2.9±0.6a	9.0±2.4a	10.4±1.8a
整个植株 The amount of heavy metals in whole kenaf	湘红1号 Xianghong-1	160.2±13.4b	1 012.9±53.5a	24.6±4.9ab	31.0±7.0a	27.1±2.4a
	福红991 Fuhong-991	185.3±27.5a	974.5±128.6ab	23.1±3.0ab	27.7±10.4a	31.5±9.0a
	福红航992 Fuhonghang-992	136.7±13.0bcd	939.6±131.3ab	24.1±7.8ab	22.4±12.9a	24.2±7.2a
	航优1号 Hangyou-1	122.7±3.2d	696.1±41.3c	16.4±1.4b	23.2±7.4a	23.8±5.0a
	红优2号 Hongyou-2	130.2±4.1cd	826.9±8.3bc	21.1±0.6ab	21.5±3.5a	24.6±0.4a
	H368	146.7±4.9bcd	904.0±132.7ab	20.6±4.6ab	40.8±25.7a	34.8±7.9a
	浙8310 Zhe 8310	149.3±9.8bc	907.0±73.9ab	25.7±5.7a	19.7±1.2a	24.9±1.8a

注:表中方差分析仅对相同部位进行比较,同一列不同字母表示差异达5%显著水平。

Note: The analysis of variance in the table only compares the same part, different letters in the same column indicate that the difference is up to 5% significant level.

平,推测可能与不同重金属间相互作用^[22]、土壤pH值^[23]以及红麻品种有关。转移系数也以Cd最高,其中湘红1号和浙8310转移系数高达1.39。各红麻品种对重金属Cd的富集系数和转运系数均高于其他重

金属,推测可能与重金属Cd在土壤中活性较高,以及重金属Zn与Cd的协同作用有关^[24]。

红麻重金属富集能力较一般高富集作物低,但是生物量远远高于一些常规报道的高富集作物^[19]。本

研究中,2016年红麻平均干生物量达 $15.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别是遏兰菜($0.38\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、东南景天($0.85\sim 1.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)的40.7倍和10.3~18.2倍^[19]。庞大的生物量在一定程度上弥补了红麻富集能力低的缺点,本试验中红麻种植一季最高能转移重金属Cu约 $185.3\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、Zn $1\ 012.9\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、Cd $25.7\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、Cr $40.8\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、Ni $34.8\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。而据报道,在大田条件种植的东南景天^[25]每年可提取Cd $184\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、Zn $7\ 800\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、Cu $29\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$;矿区苕麻^[13]地上部分每年可提取Cd $110\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、Zn $6\ 710\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、Cu $1\ 690\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、As $720\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、Pb $1\ 170\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。红麻提取重金属的总量与之还存在一定差距,作为重金属修复效果不如苕麻等作物。

4 结论

在重金属重度污染土壤上,不同红麻品种生物量表现各异,其中晚熟杂交组合红优2号最高,中熟航天诱变品种航优1号最低;红麻不同部位重金属含量差异显著,叶片和根系重金属含量均高于茎秆;各红麻品种均有一定的重金属富集和转移能力,但达不到高富集作物标准,品种间也存在一定差异,以湘红1号能力最强;不同重金属富集系数和转运系数存在显著差异,均以重金属Cd最高;单季种植可转移的重金属量小,作为修复作物,修复耗时较长,可作为重金属污染土壤复垦作物。

参考文献:

- [1] 国务院. 土壤污染防治行动计划[R/OL]. [2016-05-28][2018-03-18]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5082978.htm
- The State Council. Soil pollution prevention action plan[R/OL]. [2016-05-28][2018-03-18]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5082978.htm
- [2] 鲍桐,廉梅花,孙丽娜,等. 重金属污染土壤植物修复研究进展[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 858-865.
- BAO Tong, LIAN Mei-hua, SUN Li-na, et al. Research progress on phytoremediation of soils contaminated by heavy metals[J]. *Ecology and Environmental*, 2008, 17(2): 858-865.
- [3] 戴睿,李燕燕,杨少辉. 土壤重金属治理方案浅析[J]. 技术与市场, 2010(7): 18.
- DAI Rui, LI Yan-yan, YANG Shao-hui. Analysis of soil heavy metal treatment program[J]. *Technology and Market*, 2010(7): 18.
- [4] 冯凤玲,成杰民,王德霞. 蚯蚓在植物修复重金属污染土壤中的应用前景[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 809-814.
- FENG Feng-ling, CHENG Jie-min, WANG De-xia. Potential application of earthworm for the phytoremediation of soils contaminated by heavy metals[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(4): 809-814.
- [5] 串丽敏,赵同科,郑怀国,等. 土壤重金属污染修复技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(增刊2): 213-222.
- CHUAN Li-min, ZHAO Tong-ke, ZHENG Huai-guo, et al. Research advances in remediation of heavy metal contaminated soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(Suppl 2): 213-222.
- [6] 蒋彬,张慧萍. 水稻精米中铅镉含量基因型差异的研究[J]. 云南师范大学学报, 2002, 22(3): 37-40.
- JIANG Bin, ZHANG Hui-ping. Genotypic differences in concentrations of plumbum, cadmium and arsenicum in polished rice grains[J]. *Journal of Yunnan Normal University*, 2002, 22(3): 37-40.
- [7] 王激清,茹淑华,苏德纯. 用于修复土壤超积累镉的油菜品种筛选[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(1): 67-70.
- WANG Ji-qing, RU Shu-hua, SU De-chun. Selection of a hyperaccumulator for phytoremediation of cadmium contaminated soil[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 8(1): 67-70.
- [8] 杨刚,吴传星,李艳,等. 不同品种玉米Hg、As积累特性及籽粒低积累品种筛选[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(6): 228-232.
- YANG Gang, WU Chuan-xing, LI Yan, et al. Accumulation characteristics of Hg and As in different maize varieties and screening their cultivars via low-grain accumulation[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(6): 228-232.
- [9] 杨素勤,程海宽,张彪,等. 不同品种小麦Pb积累差异性研究[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(5): 646-651.
- YANG Su-qin, CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, et al. Differences in Pb accumulation between wheat varieties[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(5): 646-651.
- [10] 杨辰. 我国农田土壤重金属污染修复及安全利用综述[J]. 现代农业科技, 2017(3): 164-167.
- YANG Chen. Review on remediation and safety utilization of heavy metal pollution of farmland soil in China[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017(3): 164-167.
- [11] 王玉富. 黄麻、红麻在重金属污染耕地修复中的应用研究进展[J]. 湖南农业科学, 2015(8): 49-52.
- WANG Yu-fu. Review of jute and kenaf application in remediation of arable lands contaminated by heavy metals[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2015(8): 49-52.
- [12] 王激清,张宝悦,苏德纯. 修复镉污染土壤的油菜品种的筛选及吸收累积特征研究: 高积累镉油菜品种的筛选(I)[J]. 河北北方学院学报: 自然科学版, 2005, 21(1): 58-61.
- WANG Ji-qing, ZHANG Bao-yue, SU De-chun. The study on selection of rape species in phytoremediated cadmium contaminated soil and their cadmium absorbing characters: Selection of oilseed species with higher cadmium accumulation (I)[J]. *Journal of Hebei North University(Natural Science Edition)*, 2005, 21(1): 58-61.
- [13] 余玮,揭雨成,邢虎成,等. 湖南石门、冷水江、浏阳3个矿区的苕麻重金属含量及累积特征[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 874-881.
- SHE Wei, JIE Yu-cheng, XING Hu-cheng, et al. Heavy metal concentrations and bioaccumulation of ramie (*Boehmeria nivea*) growing on 3 mining areas in Shimen, Lengshuijiang and Liuyang of Hunan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(3): 874-881.
- [14] 辛艳卫,梁成华,杜立宇,等. 不同玉米品种对镉的富集和转运特

- 性[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5):839-846.
- XIN Yan-wei, LIANG Cheng-hua, DU Li-yu, et al. Accumulation and translocation of cadmium in different maize cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5):839-846.
- [15] 王凯荣, 龚惠群. 栽培植物的耐镉性与镉污染土壤的农业利用[J]. 农业环境保护, 2000, 19(4):196-199.
- WANG Kai-rong, GONG Hui-qun. Tolerance of cultivated plants towards cadmium and utilization of Cd-polluted soil in agriculture[J]. *Agro-environmental Protection*, 2000, 19(4):196-199.
- [16] 杨煜曦, 卢欢亮, 战树顺. 利用红麻复垦多金属污染酸化土壤[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3):832-838.
- YANG Yu-xi, LU Huan-liang, ZHAN Shu-shun. Using kenaf (*Hibiscus cannabinus*) to reclaim multi-metal contaminated acidic soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(3):832-838.
- [17] 陶爱芬, 张晓琛, 祁建民. 红麻综合利用研究进展与产业化前景[J]. 中国麻业科学, 2007, 29(1):1-5.
- TAO Ai-fen, ZHANG Xiao-chen, QI Jian-min. Research progress and industrialization prospect of comprehensive utilization of kenaf[J]. *Plant Fiber Science in China*, 2007, 29(1):1-5.
- [18] 宋恒飞, 吴克宁, 刘需珈. 土壤重金属污染评价方法研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(15):11-14.
- SONG Heng-fei, WU Ke-ning, LIU Pei-jia. Research progress of evaluation methods for heavy metal pollution in soil[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(15):11-14.
- [19] 杨洋, 陈志鹏, 黎红亮, 等. 两种农业种植模式对重金属土壤的修复潜力[J]. 生态学报, 2016, 36(3):688-695.
- YANG Yang, CHEN Zhi-peng, LI Hong-liang, et al. The potential two agricultural cropping patterns for heavy metals from soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3):688-695.
- [20] 国家环境保护总局科技标准司. 土壤环境质量标准(GB 15618—1995)[S]. 北京:科学出版社, 1995.
- State Environmental Protection Agency Technology Standards Division. Environmental quality standard for soils (GB 15618—1995)[S]. Beijing:Science Press, 1995.
- [21] 李丰涛, 祁建民, 牛韶华, 等. 闽中南红麻种植田土壤重金属含量及其富集特征[J]. 福建农林大学学报:自然科学版, 2013, 42(2):127-133.
- LI Feng-tao, QI Jian-min, NIU Shao-hua, et al. Heavy metal concentration and bioaccumulation of kenaf (*Hibiscus cannabinus*) growing in farmland of south-central part of Fujian Province[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2013, 42(2):127-133.
- [22] 刘孝敏, 赵运林, 庾瑞锐. 重金属复合污染植物修复的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(10):214-218.
- LIU Xiao-min, ZHAO Yun-lin, TUO Rui-rui. Research progress in phytoremediation of soil polluted by heavy metals[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2011, 39(10):214-218.
- [23] 杨洁, 瞿攀, 王金生, 等. 土壤中重金属的生物有效性分析方法及其影响因素综述[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(2):217-223.
- YANG Jie, QU Pan, WANG Jin-sheng, et al. Review on analysis methods of bioavailability of heavy metals in soil and its influencing factors[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2017, 39(2):217-223.
- [24] 顾继光. 不同作物品种对重金属的积累特性及农产品品质安全[D]. 沈阳:中国科学院研究生院(沈阳应用生态研究所), 2003.
- GU Ji-guang. Accumulative characteristics of heavy metals by crops and quality safety of agricultural products[D]. Shenyang: Institute of Applied Ecology Chinese Academy of Sciences (Shenyang Institute of Applied Ecology), 2003.
- [25] Hammer D, Keller C. Phytoextraction of Cd and Zn with *Thlaspi caerulescens* in field trials[J]. *Soil Use and Management*, 2003, 19(2):144-149.