

不同品种红麻在重度与轻微镉污染耕地的修复试验

尹明, 唐慧娟, 杨大为, 邓勇, 李德芳, 赵立宁, 黄思齐

引用本文:

尹明, 唐慧娟, 杨大为, 等. 不同品种红麻在重度与轻微镉污染耕地的修复试验[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2267–2276.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0257>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2150–2158 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0381>

三叶草(*Trifolium repens*)用于土壤镉污染的修复潜力

刘勇, 刘燕, 杨丹, 梁清, 娄杰

农业环境科学学报. 2017, 36(11): 2226–2232 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0518>

不同黄麻品种对重金属污染农田镉的富集和转移效率研究

郭媛, 邱财生, 龙松华, 王玉富

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1929–1935 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0597>

不同类型水稻镉富集与转运能力的差异分析

蔡秋玲, 林大松, 王果, 王迪

农业环境科学学报. 2016, 35(6): 1028–1033 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.06.002>

不同木薯品种对重金属Cu Zn Cd累积差异及健康风险分析

曾露苹, 秦俊豪, 董淑玉, 张润涵, 黎华寿

农业环境科学学报. 2017, 36(6): 1044–1052 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0075>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

尹明, 唐慧娟, 杨大为, 等. 不同品种红麻在重度与轻微镉污染耕地的修复试验[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2267–2276.
YIN Ming, TANG Hui-juan, YANG Da-wei, et al. Comparative repair test of different varieties of kenaf in heavily and lightly cadmium-contaminated farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2267–2276.



开放科学 OSID

不同品种红麻在重度与轻微镉污染耕地的修复试验

尹明, 唐慧娟, 杨大为, 邓勇, 李德芳, 赵立宁, 黄思齐*

(中国农业科学院麻类研究所/农业农村部麻类生物学与加工重点实验室, 长沙 410205)

摘要:为明确不同品种红麻在不同镉(Cd)污染程度耕地中的修复能力,以7种红麻在重度与轻微Cd污染耕地中进行植物修复对比试验,对红麻各部位Cd的累积量、富集系数、转运系数、生长指标、相应土壤Cd变化量进行了测定,并计算了试验总变异来源及各品种回归系数。结果表明:7种红麻均能在Cd污染耕地中正常生长,在重度污染耕地中的Cd移除量为72.49~149.17 g·hm⁻²,在轻微污染耕地中的Cd移除量为25.95~49.91 g·hm⁻²。红麻各部位Cd的富集能力排序为:叶>根>茎,转移能力排序为:叶>茎。重度Cd污染下,红麻各部位富集系数为1.11~8.83,转移系数为0.32~4.25;轻微Cd污染下,红麻各部位富集系数为2.08~14.63,转移系数为0.38~2.92。所有红麻的回归系数均小于1,稳定性都较高。研究表明:7种红麻都具较好的生物产量及Cd富集与转移机制,均可用于Cd污染耕地修复,其中中红麻13号可用于重度Cd污染耕地修复,中红麻13号与中杂红328号可用于轻微Cd污染耕地修复。

关键词:Cd污染;红麻;植物修复;耕地;对比试验

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)10-2267-10 doi:10.11654/jaes.2020-0257

Comparative repair test of different varieties of kenaf in heavily and lightly cadmium-contaminated farmland

YIN Ming, TANG Hui-juan, YANG Da-wei, DENG Yong, LI De-fang, ZHAO Li-ning, HUANG Si-qi*

(Institute of Bast Fiber Crops, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Biological and Processing for Bast Fiber Crops of Ministry of Agriculture and Rural, Changsha 410205, China)

Abstract: The aim of this study is to determine the repair ability of different varieties of kenaf in farmland containing different levels of cadmium(Cd) pollution. A phytoremediation experiment with seven types of kenaf in heavily and lightly Cd-contaminated farmland was undertaken to determine the Cd accumulation and enrichment, transfer coefficients, physiological signs of various parts of kenaf, and relevant soil changes. The source of the total variation in the experiment and the regression coefficient of each variety were calculated. The results showed that all kenaf grew well in Cd-contaminated farmland and Cd removal in kenaf in the heavily Cd-contaminated farmland was 72.49~149.17 g·hm⁻² and in the lightly polluted farmland was 25.95~49.91 g·hm⁻². The enrichment ability of Cd in different parts of kenaf was leaves>roots>stems and the transfer ability of Cd was leaves>stems. In heavily Cd-contaminated farmland, the Cd enrichment coefficients of kenaf ranged from 1.11 to 8.83 and the transfer coefficients ranged from 0.32 to 4.25. In the lightly Cd-contaminated farmland, the Cd enrichment coefficients of kenaf ranged from 2.08 to 14.63 and the transfer coefficients ranged from 0.38 to 2.92. The regression coefficients of the different varieties of kenaf were less than 1 and the stability was high. The study shows that all seven types of kenaf have good biological yield and Cd enrichment and transfer mechanism for restoring Cd-contaminated farmland. Among them, China kenaf No.13 is recommended for the restoration of heavily Cd-contaminated farmland, whereas China kenaf No.13 and China hybrid kenaf No.328 are recommended for the restoration of lightly Cd-contaminated farmland.

Keywords: cadmium pollution; kenaf; phytoremediation; farmland; comparative test

收稿日期:2020-03-10 录用日期:2020-06-01

作者简介:尹明(1996—),男,四川遂宁人,硕士研究生,从事麻类作物非生物胁迫研究。E-mail:1586887698@qq.com

*通信作者:黄思齐 E-mail:siqihuang@caas.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0801105);国家麻类产业技术体系分子育种(CARS-16-E02)

Project supported: National Key R&D Program of China (2017YFD0801105); China Agriculture Research System for Bast and Leaf Fibre Crops(CARS-16-E02)

据2014年我国环境保护部和国土资源部公布的土壤污染数据,我国Cd污染点位超标率已达到7.0%,在无机污染物中居首位,农田耕地是污染程度最大的土壤类型^[1]。有研究表明,我国每年有1 417 t的Cd进入农田耕地,主要源于大气沉降、家畜粪便、化肥以及灌水,而每年耕地自然条件下减少的Cd只占其总量的13.00%,剩余Cd还会残留在土壤中^[2]。如果不进行人为的耕地Cd污染修复,我国耕地Cd含量将会在2040年全面超过现设的土壤Cd污染标准^[3]。我国湖南、广东、广西等南方省份Cd污染尤为严重,污染耕地已达全国总耕地的1/6^[4],这严重影响到我国农业的可持续发展。Cd不是人体必需的元素,具有较强的致癌、致畸形及致突变作用,联合国环境规划署(UNEP)将其列为全球性的危险化学品物质^[5]。当前针对Cd污染耕地的治理主要有物理、化学、生物等方法^[6],通过物理或化学的方法降低或活化Cd的活性,使其更容易被固定在耕地中或移除出耕地,通过生物的方法筛选出对Cd低富集或高富集的植物品种,低富集的植物可以减少植物中的Cd含量,高富集的植物可以有效移除耕地中的Cd,其本质都是减少Cd对人体的影响^[7]。在这些方法中,植物修复利用高富集植物移除耕地中的Cd,因不对环境产生二次污染而被重点研究和推广^[8-9]。但植物修复中多数高富集植物经济价值较低,难以大规模应用^[10]。

红麻(*Hibiscus cannabinus*)是锦葵科木槿属一年生韧皮纤维作物,生物量大、生长周期短、经济价值较高,且不易将Cd带入人类食物体系^[11-12]。红麻近年来也开始被用于修复Cd污染耕地,王路为等^[13]发现重金属污染区的红麻Cd富集系数大于1;王玉富等^[10]发现种植红麻可使土壤Cd含量每年降低347 g·hm⁻²;李文略等^[12]发现红麻可使土壤Cd含量每年降低25.7 g·hm⁻²。虽然近几年已有红麻修复重金属污染土壤的相关研究,但多数只于单个环境下试验,无不同环境的对比试验;多数试验只检测红麻收获时各部位Cd含量,计算其富集与转移系数,未有不同时间点红麻各部位Cd含量的变化趋势;这些试验虽肯定了红麻对重金属的修复效果,但结论中红麻所能提取的Cd含量却相差巨大。故本试验将7种红麻作为试验材料,测定其在重度与轻微Cd污染耕地不同时间点各器官的Cd含量,计算其富集系数与转移系数,研究不同环境下不同时间点不同红麻品种对Cd的移除能力及其生长特性,为不同污染程度的耕地推荐适宜的红麻品种,确定红麻各部位合理收获时间提供数据基

础,为红麻修复Cd污染耕地提供更多的理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料由中国农业科学院麻类研究所提供,见表1。

表1 试验材料编号与品种
Table 1 Test material number and varieties

材料编号 Material number	对应品种 Kenaf varieties	材料编号 Material number	对应品种 Kenaf varieties
X1	中红麻13号	X2	中红麻16号
XT3	中杂红328号	XT4	红麻K1703A
XT5	红麻H1701	XT6	红麻H1704
16C	饲用圆叶红麻		

1.2 试验设计

1.2.1 重度污染耕地修复试验

试验基地选取湖南省浏阳市Cd污染基地,土壤Cd含量为1.72~2.18 mg·kg⁻¹。将7种红麻于2018年5月16日播种,9月27日收获。每个红麻品种播种一个独立小区,小区面积7.5 m²,小区间行列间距20 cm,红麻播种量25 g,7个红麻品种小区为一个区组,共设3个区组为试验重复,区组内随机种植红麻小区,于3个区组周围设保护行。种植期间,于6月22日、7月23日、8月23日、9月27日进行红麻取样,测定相应根、茎、叶的Cd含量;于5月16日(播种期)与9月27日(收获期)取土样,测定土壤Cd含量、测定各小区红麻最终的株高、茎粗、样方干质量、样方有效株数、单位面积干生物量,计算各红麻品种的富集系数、转移系数、Cd移除量。

1.2.2 轻微污染耕地修复试验

试验基地选取湖南省湘潭市Cd污染基地,土壤Cd含量为0.38~0.50 mg·kg⁻¹。7种红麻于2018年5月10日播种,9月30日收获。样方面积和种植方式与重度污染修复试验相同。种植期间,于6月20日、7月20日、9月22日进行红麻取样,测定相应根、茎、叶的Cd含量;于5月14日(播种期)与9月22日(收获期)取土样,测定土壤Cd含量;测定各小区红麻最终的株高、茎粗、样方干质量、样方有效株数、单位面积干生物量,计算各品种红麻的富集系数、转移系数、Cd移除量、两个环境试验结果的总变异、各品种红麻的回归系数。

1.3 样品采集与分析方法

取样时,每种红麻在2个环境下3个小区里共取

6株样本进行测定,同时取6个相应土样。植株取样时,确保其完整性与整洁性,用自来水与去离子水清洗,先105℃杀青1h,后80℃烘干至恒质量,每个小区的样研磨后混匀。土壤取样时,取小区表层下3~5cm处土壤,80℃烘干,研磨混匀,送至湖南省分析测试中心检测其Cd含量。植株和土壤检测方法分别参照《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》(GB 5009.268—2016)和《土壤和沉积物 12种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法》(HJ 803—2016)执行。

1.4 指标计算

富集系数=植株各部位Cd含量(mg·kg⁻¹)/土壤Cd含量(mg·kg⁻¹)^[14]

转运系数=植株地上各部Cd含量(mg·kg⁻¹)/植株地下部Cd含量(mg·kg⁻¹)^[15]

植株Cd富集系数或转移系数越大,则表示植株的Cd富集或转移能力越强^[16-17]

单位面积植物提取总量(g·hm⁻²)=叶片生物量(kg·hm⁻²)×叶片重金属含量(g·kg⁻¹)+茎秆生物量(kg·hm⁻²)×茎秆重金属含量(g·kg⁻¹)

试验总变异数学模型为: $x_{ijk}=\mu+t_i+L_j+(tv)_{ij}+r_{jk}+e_{ijk}$, μ 为群体的平均值, t_i 为品种*i*的效应值, L_j 为地点*j*的效应, $(tv)_{ij}$ 为品种与地点互作效应, r_{jk} 为地点内的区组效应, e_{ijk} 为随机误差,利用一年多点试验方差分析中的*F*检验判定其变异效果是否对试验产生显著差异^[18]。

利用Finlay和Wilkinson模型对各红麻品种进行回归分析,回归系数 b_i 的计算方法^[19]为:

$$b_i = \frac{\sum_j (\bar{y}_j - \bar{y})(y_{ij} - \bar{y}_i)}{\sum_j (\bar{y}_j - \bar{y})^2} = \frac{\sum_j y_{ij} \bar{y}_j - \frac{1}{e} (\sum_j y_{ij}) (\sum_j \bar{y}_j)}{\sum_j \bar{y}_j^2 - \frac{1}{e} (\sum_j \bar{y}_j)^2}$$

1.5 数据统计与分析

数据采用SPSS 21与Microsoft Office 2019进行统计分析,差异性分析采用Duncan分析。

2 结果与分析

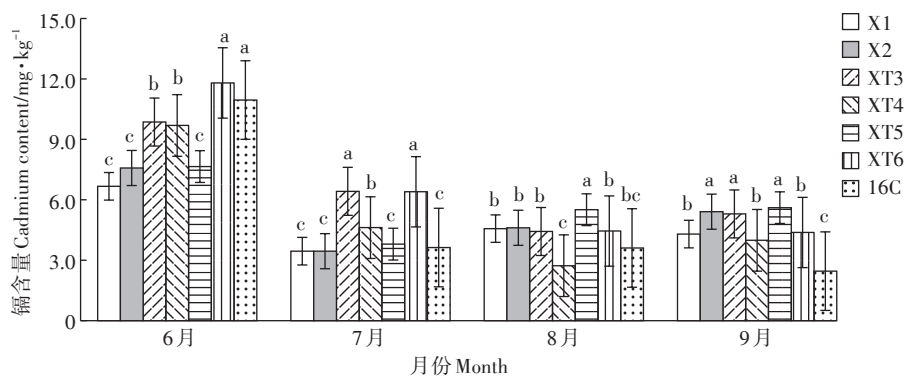
2.1 重度Cd污染土壤修复试验

2.1.1 不同品种红麻Cd累积情况

由图1~图3可知,重度Cd污染下不同品种红麻各部位各时期的Cd累积差异明显,但变化趋势近似一致。根的Cd含量,6月最高,平均值9.17 mg·kg⁻¹;7月大幅下降;8月小幅下降,含量最低,平均值4.27 mg·kg⁻¹;9月小幅度上涨。茎的Cd含量,6月最高,平均值11.30 mg·kg⁻¹;7月大幅下降;8月与9月小幅下降,9月最低,平均值1.95 mg·kg⁻¹。叶的Cd含量,6月最高,平均值14.38 mg·kg⁻¹;7月与8月小幅下降,8月最低,平均值6.56 mg·kg⁻¹;9月部分提升。7种红麻各部位Cd含量,6月时叶>茎>根;7月时叶>茎≈根;8月时叶>根>茎;9月时叶>根>茎。

2.1.2 不同品种红麻Cd富集系数

由表2可得,重度Cd污染下不同品种红麻各部位各时期的Cd富集系数差异明显。6月,各品种红麻根的富集系数范围为3.51~6.82,平均值5.08;茎的范围为4.79~7.73,平均值6.22;叶的范围为6.25~9.91,平均值7.89;富集系数排列为叶>茎>根。9月,根的范围为1.58~4.38,平均值3.33;茎的范围为1.11~



同一时期不同字母表示差异达5%显著水平。下同

The different letters indicate the significant differences up to 5% significant level in the same month. The same below

图1 重度Cd污染下不同品种红麻中根的Cd含量

Figure 1 Cadmium content in different varieties of kenaf roots under heavily cadmium pollution

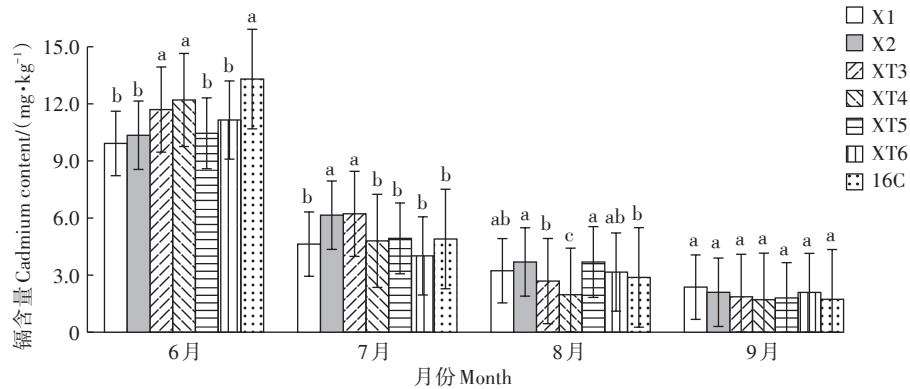


图2 重度Cd污染下不同品种红麻中茎的Cd含量

Figure 2 Cadmium content in different varieties of kenaf stems under heavily cadmium pollution

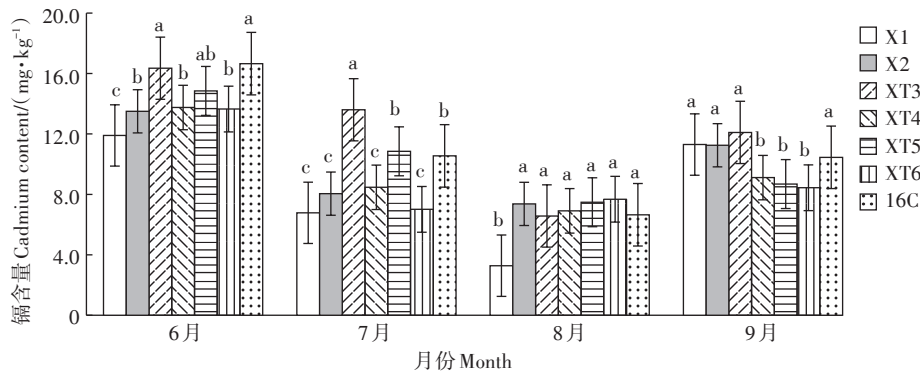


图3 重度Cd污染下不同品种红麻中叶的Cd含量

Figure 3 Cadmium content in different varieties of kenaf leaves under heavily cadmium pollution

1.76, 平均值 1.44; 叶的范围为 6.49~8.83, 平均值 7.45; 富集系数排列为叶>根>茎。从6月到9月, 根富集系数下降了 34.45%、茎下降了 76.85%、叶下降了 5.58%, 下降幅度茎>根>叶。

2.1.3 不同品种红麻Cd转移系数

由表3可得, 重度Cd污染下不同品种红麻各部

位各时期的Cd转移系数差异较明显。6月, 各品种红麻茎的转移系数范围为 0.94~1.49, 平均值为 1.26; 叶的范围为 1.16~1.94, 平均数为 1.61。7月, 茎的范围为 0.63~1.78, 平均值为 1.20; 叶的范围为 1.10~2.91, 平均数为 2.16。8月, 茎的范围为 0.61~0.80, 平均值为 0.72; 叶的范围为 0.72~2.53, 平均数为 1.61。9月, 茎的范围为 0.32~0.70, 平均值为 0.46; 叶的范围为 1.55~4.25, 平均数为 2.43。从6月到9月, 茎的转移系数一直下降, 最终下降 63.49%; 而叶的转移系数先下降, 后上升, 最终上升 50.93%。

2.2 轻微Cd污染土壤修复试验

2.2.1 不同品种红麻Cd累积情况

由图4~图6可知, 轻微Cd污染下不同品种红麻各部位各时期的Cd累积有明显差异, 但变化趋势近似一致。根的Cd含量, 6月最低, 平均值为 1.75 mg·kg⁻¹; 7月与9月小幅上升, 9月最高, 平均值为 1.93 mg·kg⁻¹。茎的Cd含量, 6月最高, 平均值为 2.58 mg·kg⁻¹; 7月大幅下降, 含量最低, 平均值为 0.79 mg·kg⁻¹; 9月小幅提升。叶的Cd含量, 6月最高, 平均值为

表2 不同品种红麻不同部位Cd富集系数

Table 2 Cadmium enrichment factor in different parts of different varieties of kenafs

品种 Varieties	6月 June			9月 September		
	根 Roots	茎 Stems	叶 Leaves	根 Roots	茎 Stems	叶 Leaves
X1	3.83c	5.70bc	6.84c	3.19b	1.76a	8.37a
X2	3.51c	4.79c	6.25c	3.92b	1.52a	8.15a
XT3	5.98b	7.09b	9.91a	3.87b	1.36a	8.83a
XT4	5.54b	6.97b	7.86b	3.00b	1.29a	6.85b
XT5	3.51c	4.79c	6.81c	4.38a	1.41a	6.78b
XT6	6.82a	6.45b	7.89b	3.37b	1.61a	6.49b
16C	6.37a	7.73a	9.68a	1.58c	1.11a	6.70b

注: 同列不同小写字母表示品种间差异显著(P<0.05)。下同。
Note: The different lowercases in a column indicate significant differences among varieties at P<0.05. The same below.

表3 不同品种红麻不同部位Cd转移系数
Table 3 Cadmium transfer factor in different parts of different varieties of kenafs

品种 Varieties	6月 June		7月 July		8月 August		9月 September	
	茎 Stems	叶 Leaves	茎 Stems	叶 Leaves	茎 Stems	叶 Leaves	茎 Stems	叶 Leaves
X1	1.49a	1.78a	1.34a	1.97b	0.71a	0.72c	0.55a	2.63b
X2	1.37a	1.78a	1.78a	2.33a	0.80a	1.60b	0.39a	2.08b
XT3	1.19a	1.66a	0.97b	2.12a	0.61a	1.48b	0.35a	2.28b
XT4	1.26a	1.42a	1.04b	1.83b	0.72a	2.53a	0.43a	2.28b
XT5	1.37a	1.94a	1.30a	2.86a	0.67a	1.36b	0.32a	1.55c
XT6	0.94b	1.16a	0.63b	1.10b	0.71a	1.73b	0.48a	1.93c
16C	1.21a	1.52a	1.35a	2.91a	0.80a	1.84b	0.70a	4.25a

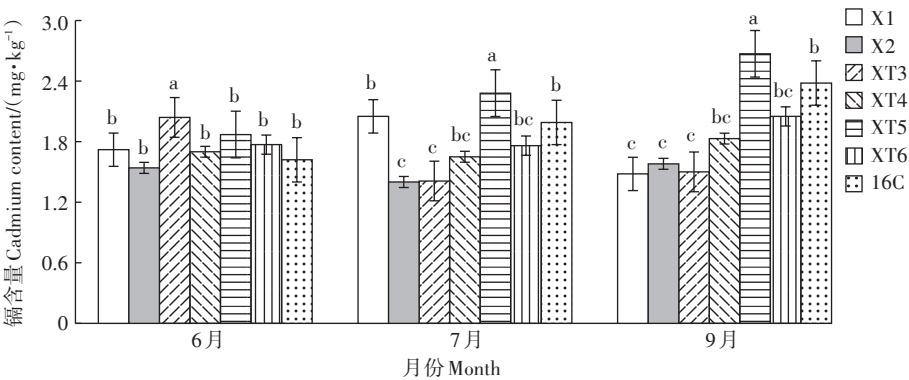


图4 轻微Cd污染下不同品种红麻中根的Cd含量
Figure 4 Cadmium content in different varieties of kenaf roots under slightly cadmium pollution

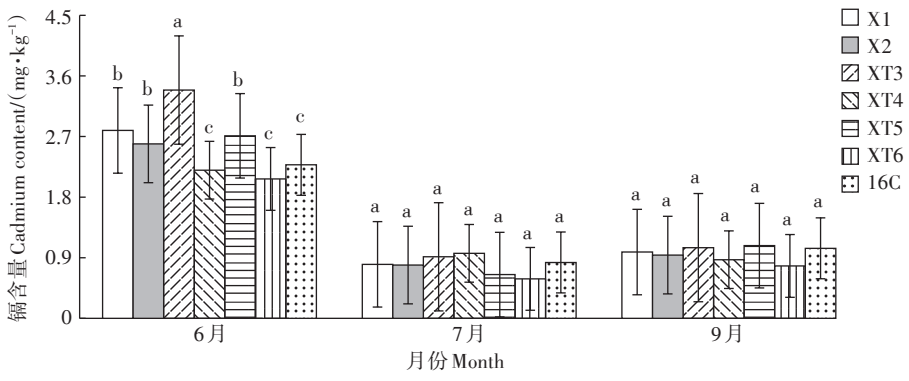


图5 轻微Cd污染下不同品种红麻中茎的Cd含量
Figure 5 Cadmium content in different varieties of kenaf stems under slightly cadmium pollution

4.56 mg·kg⁻¹;7月小幅下降,含量最低,平均值为2.86 mg·kg⁻¹;9月小幅提升。7种红麻各部位的Cd含量,在6月时为叶>茎>根;7月时叶>茎>根;9月时叶>根>茎。
2.2.2 不同品种红麻Cd富集系数

由表4可知,轻微Cd污染下不同品种红麻各部位各时期的Cd富集系数差异明显。6月时,各品种红麻根的富集系数范围3.47~4.53,平均值4.07;茎的范围4.91~7.53,平均值5.96;叶的范围7.91~13.91,平均值10.53;富集系数排列为叶>茎>根。9月时,根的范围

围3.79~6.76,平均值4.86;茎的范围2.08~2.73,平均值2.42;叶的范围7.67~14.63,平均值11.35;富集系数排列为叶>根>茎。从6月到9月,根的富集系数上升了19.41%、茎的下降59.40%、叶的上升7.79%,下降幅度茎>叶>根。

2.2.3 不同品种红麻Cd转移系数

由表5可知,在轻微Cd污染耕地中,不同红麻中叶的Cd转移系数差异明显,茎中无明显差异。6月时,各红麻茎的转移系数范围1.17~1.68,平均值

1.47; 叶的转移系数范围 1.89~3.07, 平均数 2.63。7 月时, 茎的范围 0.29~0.65, 平均值 0.46; 叶的范围 1.26~2.38, 平均数 1.72。9 月时, 茎的范围 0.38~0.70, 平均值 0.52; 叶的范围 2.02~2.92, 平均数 2.50。从 6 月到 9 月, 茎的转移系数一直下降; 而叶的转移系数先下降, 后上升, 最终下降 4.94%。

2.3 植株 Cd 移除量与土壤 Cd 含量变化

由表 6 可知, 重度 Cd 污染耕地中不同品种红麻移除的 Cd 含量为 72.49~149.17 g·hm⁻², 平均 92.08 g·hm⁻²; 轻微 Cd 污染耕地中不同品种红麻移除的 Cd 含

量为 25.95~49.91 g·hm⁻², 平均 39.18 g·hm⁻²。从表 7 可得, 重度 Cd 污染耕地中 Cd 含量下降 0.16~0.90 mg·kg⁻¹, 平均值 0.48 mg·kg⁻¹, 下降幅度 9.30%~41.28%, 平均降幅 24.99%; 轻微 Cd 污染耕地中 Cd 含量下降 0.02~0.11 mg·kg⁻¹, 平均值 0.05 mg·kg⁻¹, 下降幅度 4.65%~22.00%, 平均降幅 11.39% (除 XT4 外)。将两个环境的数据进行对比, 重度污染耕地 Cd 含量为轻微污染的 4.30 倍, 红麻 Cd 移除量为轻微污染下的 2.35 倍, 土壤下降 Cd 含量是轻微污染环境的 16.00 倍, 下降幅度是轻微污染环境下的 2.19 倍。

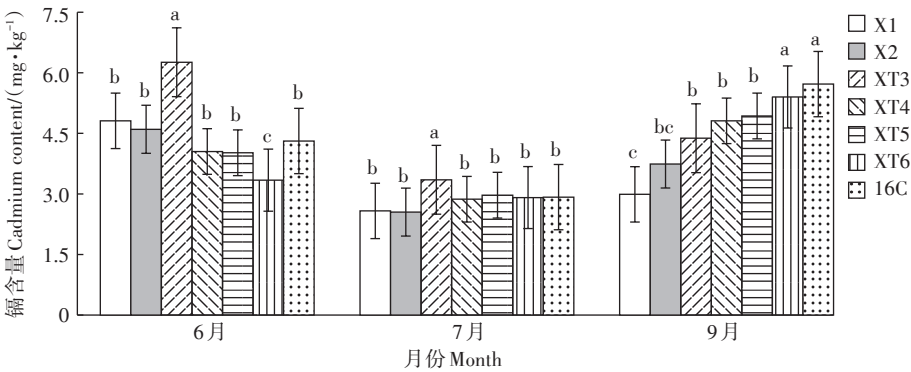


图 6 轻微 Cd 污染下不同品种红麻中叶的 Cd 含量

Figure 6 Cadmium content in different varieties of kenaf leaves under slightly cadmium pollution

表 4 不同品种红麻不同部位 Cd 富集系数

Table 4 Cadmium enrichment factor in different parts of different varieties of kenafs

品种 Varieties	6月 June			9月 September		
	根 Root	茎 Stems	叶 Leaves	根 Root	茎 Stems	叶 Leaves
X1	3.47b	5.63bc	9.70bc	3.79c	2.53a	7.67c
X2	3.68b	6.20b	11.00ab	3.95c	2.35a	9.35b
XT3	4.53a	7.53a	13.91a	3.81c	2.66a	11.12a
XT4	4.45a	5.76bc	10.60b	4.37b	2.08a	11.48a
XT5	4.37a	6.33b	9.88bc	6.76a	2.73a	12.71a
XT6	4.19a	4.91c	7.91c	5.56ab	2.11a	14.63a
16C	3.79b	5.33bc	10.07b	5.75ab	2.51a	13.82a

表 5 不同品种红麻不同部位 Cd 转运系数

Table 5 Cadmium transfer factor in different parts of different varieties of kenafs

品种 Varieties	6月 June		7月 July		9月 September	
	茎 Stems	叶 Leaves	茎 Stems	叶 Leaves	茎 Stems	叶 Leaves
X1	1.62a	2.80b	0.39a	1.26b	0.67a	2.02a
X2	1.68a	2.99b	0.57a	1.82b	0.59a	2.37a
XT3	1.66a	3.07a	0.65a	2.38a	0.70a	2.92a
XT4	1.29a	2.38b	0.59a	1.74b	0.48a	2.63a
XT5	1.45a	2.03c	0.29a	1.73b	0.40a	2.65a
XT6	1.17a	1.89c	0.33a	1.65b	0.38a	2.63a
16C	1.41a	2.66b	0.42a	1.47b	0.44a	2.40a

2.4 Cd污染下不同品种红麻生长指标

由表8可知,重度Cd污染环境下,不同品种红麻各项生长指标具明显差异。7种红麻中,X1、X2、XT4的株高超过5 m;X1、X2、XT5、16C的茎粗超过26 mm;X1与XT5的单位面积干生物量超过 $2.70\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,其中X1与XT5的生长指标与产量较其他品种红麻表现更优良。由表9可知,轻微Cd污染环境下,不同品种红麻各项生长指标也具明显差异。7种红麻中,X1与X2的株高超过5 m,茎粗超过24 mm,单位面积干生物量超过 $3.00\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,其生长指标与产量较其他品种红麻表现更优良。

2.5 试验总变异来源及各品种回归系数分析

从表10可知,地点间、品种间、地点与品种互作的变异显著性均小于0.05,可与 F 检验临界表进行对比,而地点内区组的变异显著性为0.534,为不显著变

异。从 F 检验临界值表中,可得 $F_{0.05(1,24)}=4.260$,小于地点间的 F 值; $F_{0.05(6,24)}=2.508$,小于品种间、地点与品种互作间的 F 值。表明试验的总变异主要来源于地点间、品种间、地点与品种互作,而地点内区组的变异对试验总变异未产生显著影响。从表11可知,各品种的回归系数均小于1,表明各品种的稳定性都较高,在重度Cd污染耕地中,X1与XT5各方面指标较其他品种更优,但X1回归系数更低,表现更稳定;轻微Cd污染耕地中,X1与X2各方面指标较其他品种更优,但X2回归系数更低,表现更稳定。

3 讨论

3.1 不同品种红麻各部位Cd含量变化趋势

在两种污染耕地中,红麻根与茎的Cd含量都呈下降趋势,而叶Cd含量在下降后,9月明显上升,各部

表6 不同品种红麻Cd移除量($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 6 Cadmium removal capacity of different varieties of kenafs($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$)

项目 Items	X1	X2	XT3	XT4	XT5	XT6	16C	平均 Average
重度污染土壤 Heavily pollution soils	149.17	101.84	87.92	72.49	74.42	83.63	75.08	92.08
轻微污染土壤 Slightly pollution soils	49.91	48.26	36.41	25.95	36.92	37.52	39.28	39.18

表7 不同品种红麻对应土壤Cd含量

Table 7 Cadmium content in soils corresponding to different varieties of kenafs

品种 Varieties	重度污染 Heavily pollution				轻微污染 Slightly pollution			
	6月Cd含量 June/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	9月Cd含量 September/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变化量 Change/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	降幅 Decrease/%	6月Cd含量 June/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	9月Cd含量 September/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变化量 Change/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	降幅 Decrease/%
X1	1.74b	1.35b	0.39	22.41	0.50a	0.39a	0.11	22.00
X2	2.16a	1.38b	0.78	36.11	0.42a	0.40a	0.02	4.76
XT3	1.65b	1.37b	0.28	16.97	0.45a	0.40a	0.05	13.33
XT4	1.75b	1.33b	0.42	24.00	0.38a	0.42a	-0.04	-10.53
XT5	2.18a	1.28b	0.90	41.28	0.43a	0.40a	0.03	9.30
XT6	1.73b	1.30b	0.43	24.86	0.42a	0.37a	0.05	14.29
16C	1.72b	1.56a	0.16	9.30	0.43a	0.41a	0.02	4.65
平均	1.85	1.37	0.48	24.99	0.43	0.40	0.03	8.26

表8 重度Cd污染下不同品种红麻生长指标

Table 8 Physiological indexes of different varieties of kenafs under severe cadmium pollution

品种 Varieties	株高 Plant height/m	茎粗 Stem thickness/mm	样方干质量 Dry weight in plot/kg	样方有效株数 Effective number in plot	单位面积干生物量 Biomass/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)
X1	5.09a	28.59a	32.26a	149a	3.44a
X2	5.02a	26.20a	24.30b	136a	2.59b
XT3	4.67c	25.93a	23.56b	133a	2.51b
XT4	5.01a	25.95a	24.75b	135a	2.64b
XT5	4.91b	27.43a	25.89b	140a	2.76b
XT6	4.98b	25.54a	23.78b	132a	2.54b
16C	4.83bc	26.06a	22.52b	102b	2.40b

表9 轻微Cd污染下不同品种红麻生长指标

Table 9 Physiological indexes of different varieties of kenats under severe cadmium pollution

品种 Varieties	株高 Plant height/m	茎粗 Stem thickness/mm	样方干质量 Dry weight in plot/kg	样方有效株数 Effective number in plot	单位面积干生物量 Biomass/(kg·m ⁻²)
X1	5.18a	24.45a	33.12a	174b	3.53a
X2	5.12a	24.73a	30.52a	187a	3.25a
XT3	4.96b	23.25a	21.69b	184a	2.31b
XT4	4.93b	22.52a	17.63b	188a	1.88c
XT5	4.78c	22.41a	22.30b	175b	2.38b
XT6	4.93b	21.68a	21.73b	165bc	2.32b
16C	4.94b	22.06a	21.37b	121c	2.21b

表10 试验总变异及F检验

Table 10 Total test variation and F test

变异来源 Source of variation	自由度 <i>df</i>	平方和 <i>ss</i>	均方 <i>ms</i>	F 值	显著性 <i>sig</i>
地点 Location	1	1 536.34	1 536.34	12.34	0.002
品种 Variety	6	8 238.01	1 373.00	11.03	<0.001
地点内区组 Blocks within the location	4	400.45	100.16	0.80	0.534
地点与品种互作 Interaction of location and variety	6	2 177.23	362.872	2.914	0.028
误差 Error	24	2 988.55	124.52	—	—
总计 Total	41	15 340.78	—	—	—

位Cd含量的前期排序为叶>茎>根,后期为叶>根>茎。根Cd在两个耕地中分别下降53.44%与-10.29%,茎中分别下降82.74%与69.38%,叶中下降了54.38%与37.28%。茎的Cd含量下降幅度最大,表明茎中有良好的Cd运输机制,可将茎中的Cd运输到叶中^[20]。而叶中的Cd在6月到8月有明显下降,9月后明显上升,可能是叶片中一些抗Cd或抗氧化的防御系统在发育过程中进行了响应^[21],如叶片中的POD^[22]或SOD^[23]等。红麻叶片富含蛋白,可用作饲料原料,而饲料含Cd量需低于1 mg·kg⁻¹^[24],因此可选择在红麻叶片Cd含量较低的时间段进行收割,即8月中下旬,在添加时需注意控制其比例不超过10%;如要预防重金属污染食物链,则可于9月底收割叶片来制作复合板材。红麻韧皮可作纤维生产纺织品,茎秆作复合材料制造家具,纺织品含Cd量需低于40 mg·kg⁻¹,家具含Cd量需低于75 mg·kg⁻¹^[25-26],红麻韧皮部与茎秆中Cd含量远远低于相应标准,故可以在红麻生长成熟后进行收割。

3.2 不同品种红麻Cd富集与转移系数的对比

各品种红麻9月份在重度Cd污染环境中根的富集系数平均值为3.33、茎为1.44、叶为7.45;在轻微Cd污染环境中根富集系数平均值为4.86、茎为2.42、叶为11.35。对比符慧琴等^[27]研究中,0.41 mg·kg⁻¹(轻微污染)Cd浓度土壤中20种苧麻的富集系数0.97~1.58,谷雨等^[28]研究中0.42 mg·kg⁻¹Cd浓度环境下的甜高粱富集系数1.29~1.47、玉米富集系数0.76、油菜富集系数2.30,邓婷等^[29]研究中2.00 mg·kg⁻¹(重度污染)Cd浓度土壤中玉米茎与叶的富集系数为7.45与6.20,红麻表现出了较好的Cd富集能力。各品种红麻9月份在重度Cd污染环境中茎转移系数平均值为0.46,叶为2.43;轻微Cd污染环境中茎转移系数平均值0.52,叶为2.50。对比符慧琴等^[27]研究中0.41 mg·kg⁻¹的Cd浓度土壤中的20种苧麻转移系数0.66~1.41,与邓婷等^[29]研究中在2.00 mg·kg⁻¹的Cd浓度土壤中的玉米茎与叶转移系数1.88和3.02,红麻表现出较好的Cd转移能力。

表11 各品种回归系数

Table 11 Regression coefficient of each variety

品种 Varieties	X1	X2	XT3	XT4	XT5	XT6	16C
回归系数 Regression coefficient	0.57	0.56	0.48	0.58	0.63	0.51	0.46

3.3 不同品种红麻生长指标与相应土壤Cd含量

将7种红麻种植在Cd污染的耕地中,重度污染耕地中红麻Cd移除量为72.49~149.17 g·hm⁻²,轻微污染耕地中红麻Cd移除量为25.95~49.91 g·hm⁻²。其中重度污染耕地中红麻Cd移除量大,而轻微污染耕地中红麻Cd移除量小,可能在土壤中Cd浓度较低时,植物移除Cd的速度会随土壤Cd含量的增加而加快^[30]。经过红麻种植的土壤,重度污染耕地下降0.48 mg·kg⁻¹,降幅为24.99%;轻微污染耕地下降0.03 mg·kg⁻¹,降幅为8.26%,虽然红麻的Cd移除量相对于整个耕地较低,且无法精确检测,但地下3~5 cm的取土样处是红麻根部集中处,其Cd下降含量与幅度从侧面证实了红麻能对Cd污染耕地进行有效的修复。而土壤中出现的个别Cd含量增加情况,可能是因为施肥、农药或污染的水源所致^[31]。

4 结论

(1)7种红麻在Cd污染耕地中均可以正常生长,表明均可用于土壤的Cd污染治理。中红麻13号与红麻H1701在重度污染耕地中各生长指标与产量均较优异,其中中红麻13号表现更稳定且Cd移除量更高,推荐用于重度Cd污染耕地种植修复;中红麻13号与中红麻16号在轻微污染耕地中各生长指标与产量都较优异,且移除量与稳定性都较高,推荐用于轻微Cd污染耕地种植修复。

(2)红麻成熟后,各部位Cd积累量排序为叶>根>茎,可在叶片完全成熟前进行收割,以防止叶片成熟后脱落而二次污染耕地,红麻韧皮与茎秆可待红麻成熟后进行收割,以提高耕地种植红麻的整体经济效益。

参考文献:

- [1] 田嘉禹,刘俐,汪群慧,等.中美土壤元素背景值调查研究中数理统计方法运用及影响[J].环境科学研究,2020,33(3):718-727.
TIAN Jia-yu, LIU Li, WANG Qun-hui, et al. Application and impact of statistic methods on the soil background values in China and the United States[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(3): 718-727.
- [2] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等.《全国土壤污染状况调查公报》探析[J].农业环境科学学报,2017,36(9):1689-1692.
CHEN Neng-chang, ZHENG Yu-ji, HE Xiao-feng, et al. Analysis of the Report on the National General Survey of Soil Contamination[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [3] 王书转.长期施肥条件下土壤微量元素化学特性及有效性研究[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2016.

- WANG Shu-zhuan. Availability and chemical characteristics of trace elements in soils under long-term fertilization[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR), 2016.
- [4] 姜洋,罗远恒,顾雪元.农田土壤镉污染的原位钝化修复及持久性研究[J].南京大学学报(自然科学),2017,53(2):265-274.
JIANG Yang, LUO Yuan-heng, GU Xue-yuan. In situ immobilization of cadmium in soil and persistence study[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Science)*, 2017, 53(2): 265-274.
- [5] 高宇,程潜,张梦君,等.镉污染土壤修复技术研究[J].生物技术通报,2017,33(10):103-110.
GAO Yu, CHENG Qian, ZHANG Meng-jun, et al. Research advance on remediation technology of cadmium contaminated soil[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2017, 33(10): 103-110.
- [6] 黄玉敏,尹明,巩养仓,等.不同红麻品种修复中轻度镉污染农田试验[J].中国麻业科学,2018,40(6):19-24.
HUANG Yu-min, YIN Ming, GONG Yang-cang, et al. Remediation of mildly and moderately cadmium contaminated farmland by different varieties of kenaf(*Hibiscus cannabinus*)[J]. *Plant Fiber Sciences in China*, 2017, 40(6): 19-24.
- [7] 王学华,戴力.作物根系镉滞留作用及其生理生化机制[J].中国农业科学,2016,49(22):4323-4341.
WANG Xue-hua, DAI Li. Immobilization effect and its physiology and biochemical mechanism of the cadmium in crop roots[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(22): 4323-4341.
- [8] 孙丽娟,秦秦,宋科,等.镉污染农田土壤修复技术及安全利用方法研究进展[J].生态环境学报,2018(7):1377-1386.
SUN Li-juan, QIN Qin, SONG Ke, et al. The remediation and safety utilization techniques for Cd contaminated farmland soil: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018(7): 1377-1386.
- [9] 何军良,祝亚平,朱密,等.土壤中重金属污染的植物修复强化技术概览[J].安全与环境工程,2019,26(1):62-67,80.
HE Jun-liang, ZHU Ya-ping, ZHU Mi, et al. Enhanced phytoremediation technology of heavy metal contaminated soil: A review[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2019, 26(1): 62-67, 80.
- [10] 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.
- [11] Eglantina L E, Michal S, Shinjini M, et al. Bacterial succession in oil-contaminated soil under phytoremediation with poplars[J]. *Chemosphere*, 2020, 243: 125242.
- [12] 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):66-74.
LI Wen-lue, 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): 66-74.
- [13] 王路为,田旭,温玉环,等.栽培技术对红麻生长及吸收镉的影响[J].西南农业学报,2019,32(5):995-1003.

- WANG Lu-wei, TIAN Xu, WEN Yu-huan, et al. Effects of cultivation techniques on kenaf growth and absorption of cadmium[J]. *South-west China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(5):995-1003.
- [14] 蔡秋玲, 林大松, 王果, 等. 不同类型水稻镉富集与转运能力的差异分析[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(6):1028-1033.
- CAI Qiu-ling, LIN Da-song, WANG Guo, et al. Differences in cadmium accumulation and transfer capacity among different types of rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6):1028-1033.
- [15] Wassenaar P N H, Verbruggen E M J, Cieraad E, et al. Variability in fish bioconcentration factors: Influences of study design and consequences for regulation[J]. *Chemosphere*, 2020, 239:124731.
- [16] 姚运法, 赖正锋, 林碧珍, 等. 耐镉黄、红麻品种筛选试验[J]. *福建热作科技*, 2018, 43(3):5-8.
- YAO Yun-fa, LAI Zheng-feng, LIN Bi-zhen, et al. Choice test of cadmium proof vute, kenaf[J]. *Fujian Science & Technology of Tropical Crops*, 2018, 43(3):5-8.
- [17] 董双快, 徐万里, 吴福飞, 等. 铁改性生物炭促进土壤砷形态转化抑制植物砷吸收[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(15):204-212.
- DONG Shuang-kui, XU Wan-li, WU Fu-fei, et al. Fe-modified biochar improving transformation of arsenic form in soil and inhibiting its absorption of plant[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(15):204-212.
- [18] 罗英舰. 贵州春玉米耐密植宜机收品种生态适应性研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- LUO Ying-jian. Study on ecological adaptability of Guizhou spring maize variety resistant to high density suitable machine[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [19] 王振龙, 顾南, 吕海深, 等. 基于温度效应的作物系数及蒸散量计算方法[J]. *水利学报*, 2019, 50(2):242-251.
- WANG Zhen-long, GU Nan, LÜ Hai-shen, et al. Calculation of crop coefficient and evapotranspiration based on temperature effect[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(2):242-251.
- [20] 王晓娟, 王文斌, 杨龙, 等. 重金属镉(Cd)在植物体内的转运途径及其调控机制[J]. *生态学报*, 2015, 35(23):7921-7929.
- WANG Xiao-juan, WANG Wen-bin, YANG Long, et al. Transport pathways of cadmium(Cd) and its regulatory mechanisms in plant[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(23):7921-7929.
- [21] Zhong R, Wang Y, Gai R, et al. Rice SnRK protein kinase OsSAPK8 acts as a positive regulator in abiotic stress responses[J]. *Plant Science*, 2020, 292:110373.
- [22] Susanne H K, Dündar I E, Hassen K B, et al. Impact of light quality (white, red, blue light and UV-C irradiation) on changes in anthocyanin content and dynamics of PAL and POD activities in apical and basal spear sections of white asparagus after harvest[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 161:111069.
- [23] Pan C L, Lu H L, Liu J C, et al. SODs involved in the hormone mediated regulation of H₂O₂ content in *Kandelia obovata* root tissues under cadmium stress[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 256:113272.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 饲料卫生标准: GB 13078—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Management Committee. Hygienical standard for feeds: GB 13078—2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 绿色产品评价 纺织产品: GB/T 35611—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Green product assessment—Textile products: GB/T 35611—2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 室内装饰装修材料 木家具中有害物质限量: GB 18584—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Indoor decorating and refurbishing materials. Limit of harmful substances of wood based furniture: GB/T 35611—2017[S]. Beijing: China Standards Press, 2001.
- [27] 符慧琴, 揭红东, 揭雨成, 等. 不同纤维细度苧麻种质镉富集与转运和积累能力比较[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 43(4):359-365.
- FU Hui-qin, JIE Hong-dong, JIE Yu-cheng, et al. Comparison of accumulation, transfer and enrichment to cadmium of ramie germplasm with different fiber fineness[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2017, 43(4):359-365.
- [28] 谷雨, 蒋平, 谭丽, 等. 6种植物对土壤中镉的富集特性研究[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(30):119-123.
- GU Yu, JIANG Ping, TAN Li, et al. Enrichment characteristics of cadmium by six plants in soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(30):119-123.
- [29] 邓婷, 吴家龙, 卢维盛, 等. 不同玉米品种对土壤镉富集和转运的差异性[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(6):1265-1271.
- DENG Ting, WU Jia-long, LU Wei-sheng, et al. Differences in cadmium accumulation and translocation in different *Zea mays* cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6):1265-1271.
- [30] 柳影. 不同污染源水稻土 Cd 生物有效性及其影响因素[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- LIU Ying. Influencing factors of cadmium bio-availability in soils contaminated by different pollution sources[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [31] 王珂, 徐春丽, 张宇亭, 等. 长期不同施肥下紫色土-作物体系镉累积及安全评估[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(18):113-121.
- WANG Ke, XU Chun-li, ZHANG Yu-ting, et al. Cd accumulation and safety assessment of soil-crop system induced by long-term different fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(18):113-121.