

典型黑土环境下的高、低镉积累白菜品种筛选及耐性比较

陈辰, 朱园辰, 喇乐鹏, 张思佳, 丁工尧, 闫雷

引用本文:

陈辰, 朱园辰, 喇乐鹏, 等. 典型黑土环境下的高、低镉积累白菜品种筛选及耐性比较[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 462–472.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1069>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同烟草材料镉积累差异评价

刘登璐, 李廷轩, 余海英, 张路, 王勇

农业环境科学学报. 2016, 35(11): 2067–2076 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0646>

不同品种芥菜对镉胁迫的敏感性分布及抗氧化特征

郭瞻宇, 张子杨, 蒋亚辉, Altaf Hussain Lahori, 张增强, 李荣华

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2660–2668 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0202>

镉低积累青菜品种筛选及硫对镉胁迫下青菜镉含量和品质影响

杜小平, 康靖全, 吕金印

农业环境科学学报. 2018, 37(8): 1592–1601 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1661>

辽宁省种不同基因型水稻对镉吸收差异的研究

张儒德, 李军, 秦利, 韩颖, 孟博, 黄元财

农业环境科学学报. 2016, 35(5): 842–849 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.05.004>

不同玉米(Zeamays)品种对镉锌积累与转运的差异研究

杜彩艳, 张乃明, 雷宝坤, 胡万里, 付斌, 陈安强, 毛妍婷, 木霖, 王红华, 严婷婷, 段宗颜, 雷梅

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 16–23 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0872>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈辰, 朱园辰, 喇乐鹏, 等. 典型黑土环境下的高、低镉积累白菜品种筛选及耐性比较[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 462–472.

CHEN Chen, ZHU Yuan-chen, LA Yue-peng, et al. Screening and tolerance comparison of high and low cadmium accumulating cabbage cultivars in a typical black soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(3): 462–472.

典型黑土环境下的高、低镉积累白菜品种筛选及耐性比较

陈辰, 朱园辰, 喇乐鹏, 张思佳, 丁工尧, 闫雷*

(东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘要:为探究不同白菜(*Brassica pekinensis* L.)品种在典型黑土环境中的镉敏感程度和镉积累特性,筛选出具备高镉、低镉积累特征的耐镉品种。试验以东北地区20种主栽白菜品种为材料进行盆栽模拟试验,研究基于不同白菜品种镉胁迫下的剂量-效应、镉积累特征,对得到的高、低镉积累品种浓度积累效应及氧化损伤程度进行评估。结果显示:供试品种间剂量-效应差异明显,JF和BCCRQJ为镉耐性最强两个品种,耐受阈值分别为 $1.204\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.036\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。高镉浓度下($\geq 0.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)JF叶镉含量最低,根向叶迁移系数(TF)、叶富集系数(BCF)均小于1;BCCRQJ净化率最高。土壤镉含量与两者根、叶积累量、过氧化氢(H_2O_2)、超氧阴离子(O_2^-)、丙二醛(MDA)、游离脯氨酸(FPRO)均呈正相关,与净化率呈负相关($P<0.05$),此外高浓度下BCCRQJ氧化损伤程度较JF更高。综合试验结果表明,JF是镉耐性极高的低积累品种,而BCCRQJ为镉耐受力略逊于JF的高积累品种。

关键词:黑土;镉;高积累品种;低积累品种;白菜;镉耐受力

中图分类号:S32 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)03-0462-11 doi:10.11654/jaes.2019-1069

Screening and tolerance comparison of high and low cadmium accumulating cabbage cultivars in a typical black soil

CHEN Chen, ZHU Yuan-chen, LA Yue-peng, ZHANG Si-jia, DING Gong-yao, YAN Lei*

(School of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: To investigate cadmium (Cd) sensitivity and Cd accumulation characteristics of different cabbage (*Brassica pekinensis* L.) cultivars in a typical black soil environment, Cd-tolerant cultivars characteristics of high and low Cd accumulation were selected. In this study, pot experiments were conducted on 20 common cabbage cultivars from Northeast China to study the dose-effect and Cd accumulation characteristics of different cabbage cultivars under Cd stress. In addition, the effects of Cd concentration and oxidative damage on cultivars with high and low Cd accumulation were assessed. The results showed that the dose-effect differences among the tested cultivars were significant. JF and BCCRQJ were the two cultivars with the strongest Cd tolerance, with tolerance thresholds of $1.204\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $1.036\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. At high Cd concentrations ($\geq 0.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), the Cd content in the leaves of JF was the lowest, with root-to-leaf translocation factor (TF) and bioconcentration factor (BCF) of less than 1. Meanwhile, BCCRQJ had the highest extraction rate. The Cd content in the soil was positively correlated with root and leaf accumulation of Cd, and hydrogen peroxide (H_2O_2), superoxide anion (O_2^-), malondialdehyde (MDA), and free proline (FPRO) levels in JF and BCCRQJ, and it was negatively correlated with the extraction rate ($P<0.05$) of the two cultivars. Moreover, the degree of oxidative damage in BCCRQJ was higher than that in JF at high Cd concentrations. In conclusion, JF is a low-accumulation cultivar with extremely high Cd tolerance, while BCCRQJ is a high-accumulation cultivar with slightly lower Cd tolerance than that of JF.

Keywords: black soil; cadmium (Cd); high-accumulation cultivar; low-accumulation cultivar; cabbage; Cd tolerance

收稿日期:2019-09-26 录用日期:2019-12-25

作者简介:陈辰(1994—),男,黑龙江省哈尔滨人,硕士研究生,从事土壤重金属研究。E-mail: chen041x@outlook.com

*通信作者:闫雷 E-mail: 1071913992@qq.com

基金项目:国家重点基础研究发展计划课题(973计划)(2017YFD0801104-4)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2017YFD0801104-4)

近年来,由于设施农业的不合理开展以及工业化程度的逐步加深^[1],致使农业土壤镉(Cd)污染问题日趋严重,许多农用地无法安全利用^[2]。据全国土壤污染调查公报显示^[3],我国土壤中Cd的点位超标率为7.0%,农田Cd污染面积高达 2×10^4 hm²,已被确定为全国土壤污染首要污染物,而国务院颁布《土壤污染防治行动计划》中要求:到2020年,我国污染地块安全利用率需达到90%以上,因此Cd污染区农用土壤的安全利用已迫在眉睫^[4]。Cd在农业环境中具有极高的生物累积性、毒性、环境移动性及持久性。因而极易危害土壤-植物系统,继而威胁食品安全及人类健康。据不完全统计,我国每年生产的Cd含量超标的农产品达“ 1.46×10^6 t,且呈逐年增长趋势^[5]”。

有研究表明,因地制宜地开展农作物高、低积累品种筛选可使轻度Cd污染农用地得到安全有效的利用,如污灌区小麦品种筛选^[6]及高Cd积累水稻品种筛选^[7]等,现均已证实其应用可行性。高、低积累作物品种的筛选工作我国早有开展^[8],受试品种应具备优秀环境适应能力和稳定传代的积累特征^[9]。叶菜类蔬菜种类多样,品种丰富,在我国广泛栽培。目前已知不同种类、不同品种叶菜类蔬菜对重金属胁迫存在明显不同的抗性和积累,如大白菜^[10]、青菜^[11]和菠菜^[12]等蔬菜对重金属的吸收与积累存在物种、品种和同一作物不同器官间的显著差异,而普遍的叶菜类蔬菜特别是白菜(*Brassica pekinensis* L.)品种更易吸收Cd并受其影响^[12]。因此,Cd耐受力强,明确积累能力的白菜品种更应适宜在轻度污染的中国北方推广。然而,黑土中较高的有机质和pH虽然能够限制Cd在环境中的迁移能力,但区域性积累却已然威胁到了食品安全^[13]。由于黑土的这一特点,Cd在其中的威胁性常受忽视,目前尚缺乏针对北方典型黑土Cd污染环境中高、低Cd积累叶菜类蔬菜的研究。故本研究通过盆栽试验模拟典型黑土区温室栽培条件,针对20种东北地区主栽白菜品种的Cd耐受力及积累特征进行筛选。以期为轻度Cd污染农用地的安全利用及黑土资源保护提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤类型系典型黑土,于2018年5月取自东北农业大学向阳实验基地试验温室区(44°04'N,125°42'E)0~20 cm耕层,过2 mm筛除去砾石等杂质,装袋、烘干、杀菌备用。同时取少量土壤用于土壤常规分析^[14]及Cd含量测定^[15],其土壤理化性质见表1。

1.2 试验设计

本试验于2018年5—8月在东北农业大学向阳实验基地温室区10号大棚内进行。为保证各处理间养分含量相同且满足植物生长需要,预先向供试土壤施入尿素、磷酸氢钙和氯化钾作为底肥(N:100 mg·kg⁻¹、P:120 mg·kg⁻¹、K:350 mg·kg⁻¹),使各处理养分水平一致。供试土壤装于聚乙烯塑料盆(20 cm×15 cm×5 cm),每盆装土1.5 kg。共设7组Cd处理:0、0.05、0.1、0.15、0.3、0.6、1.2 mg·kg⁻¹,向土壤中喷施外源Cd溶液(CdCl₂·2.5H₂O),待其风干后摊开混匀以加速其均质化进程,均质期40 d,期满后播种。供试品种信息见表2。

将供试白菜种子用10% H₂O₂消毒15 min,后用去离子水冲净,挑选籽粒饱满的种子播种,每盆播种20粒,待植株长至3片真叶时,间苗至每盆6株,期间将土壤含水量保持在田间持水量的65%~70%,及时去除虫害、杂草(整个栽培过程仿照当地习惯栽培模式进行)。每品种、每处理均重复3次,种植30 d后取每品种、每处理长势一致的3株用于Cd剂量-效应分析,40 d后收获余下植株进行Cd积累量及氧化损伤等指标测定,收获时先用自来水将完整的白菜植株冲洗干净,再用EDTA-2Na浸泡植株根系30 min,以去除根系表面有效态Cd,并经去离子水冲洗后用吸水纸擦干,将白菜分为根和可食用部分(叶)分置于-80℃冰箱保存。

1.3 指标测定

收获的白菜样品清理完毕后直接称质量,生物量以鲜质量计。土壤样品处置及Cd含量测定参照《土壤质

表1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soil

土壤有机质 Soil organic matter/g·kg ⁻¹	速效磷 Available phosphorus/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Available potassium/ mg·kg ⁻¹	速效氮 Available nitrogen/ mg·kg ⁻¹	全氮 Total nitrogen/ g·kg ⁻¹	含水量 Moisture content/%	pH	Cd含量 Total Cd/ mg·kg ⁻¹	有效态Cd含量 Available Cd/ mg·kg ⁻¹
28	63	139.8	54.39	1.03	36.3	7.4	0.204	0.093

表2 供试白菜编号、品种及原产地
Table 2 The code, cultivar and origin of the tested cabbages

编号 Code	品种名 Cultivar	缩写 Abbreviation	原产地 Origin	编号 Code	品种名 Cultivar	缩写 Abbreviation	原产地 Origin
1	CR帝王3号	CRDW3	山东	11	富贵快菜	FGKC	江苏
2	改良东白	GLDB	黑龙江	12	冬储十八斤	DC18J	河北
3	雪峰	XF	河南	13	北辰CR-强颈	BCCRQJ	山东
4	586刘氏凯丰2号	586LSKF2	山东	14	黄心65	HX65	河北
5	中白61	ZB61	河南	15	大黄丰65	DHF65	山东
6	京研快菜	JYKC	北京	16	东农909	DN909	黑龙江
7	京研快菜4号	JYKC4	北京	17	福归村80F1	FGC80F1	山东
8	吉青富士山	JQFSS	福建	18	金峰白菜	JF	河南
9	双抗	SK	天津	19	喜涪秋宝白菜	XFQB	辽宁
10	金碧春	JBC	天津	20	秋田	QT	福建

量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T 17141—1997)^[15],植物根际土壤样品以抖落法收集 500 g,四分法缩分至 100 g 风干,过 2 mm 筛除去砾石等杂质,研磨使其全部通过 0.15 mm 筛备用,其中 5 g 用于水分含量 f 的测定,另取待测土样 0.2 g 采用湿式消解法处理,利用石墨炉原子吸收分光光度计(Persee General, TAS-GF 990 super, 中国)测定 Cd 含量 W_{Cd} ,其中 f 及 W_{Cd} 按下式计算:

$$f = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\%$$

$$W_{Cd} = \frac{c \cdot V}{m(1-f)}$$

式中: f 为土壤水分含量,%; W_1 为烘干前土壤质量, g; W_2 为烘干后土壤质量, g; W_{Cd} 为土壤 Cd 含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; c 为试液吸光度减去空白试验的吸光度,然后在校准曲线上查得 Cd 的含量, $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; V 为试液定容体积, mL; m 为称取试样质量, g。

植物样品 Cd 含量测定参照《食品安全国家标准 食品中镉的测定》(GB 5009.15—2014)^[16],植物各部分样品称质量后冷冻研磨,取 0.50 g 经湿式消解法处理,消解完成用 1% HNO_3 定容至 25 mL 容量瓶中并做试剂空白,试液经 $12\,000\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min 后取 20 μL 上清液于石墨炉原子吸收分光光度计进行测定,同时以国家标准物质 (GSB 04-1721-2004 188038-4, GBW 08502) 进行分析质量控制,所有植物样品 Cd 回收率均大于 95%。按下列公式计算白菜可食用部分(叶)及根中 Cd 含量 W 、植株相对生物量 RFBs、可食用部分(叶)富集系数 BCFs、迁移系数 TFs 及全株净化率 ERs:

$$W = \frac{(c_1 - c_0) \times V}{m \times 1000}$$

$$\text{RFBs} = \frac{b_T - b_{CK}}{b_{CK}} \times 100\%$$

$$\text{BCFs} = \frac{W_{\text{Leaf}}}{W_{\text{Cd}}}$$

$$\text{TFs} = \frac{W_{\text{Leaf}}}{W_{\text{Root}}}$$

$$\text{ERs} = \frac{(W_{\text{Leaf}} \times b_1 + W_{\text{Root}} \times b_2)}{W_{\text{Cd}} \times m_s} \times 100\%$$

式中: W 为植物样品 Cd 含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; c_1 为试样消化液 Cd 含量, $\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$; c_0 为空白液 Cd 含量, $\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$; V 为消化液定容总体积, mL; m 为称取试样质量, g; b_T 为处理组生物量, g; b_{CK} 为对照组生物量, g; W_{Leaf} 为可食用部分 Cd 含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; W_{Root} 为根部 Cd 含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; b_1 为可食用部分鲜质量, g; b_2 为根部鲜质量, g; m_s 为根际土壤总质量, g。

白菜叶中的氧化损伤通过单位叶片鲜质量的过氧化氢(H_2O_2)、超氧阴离子(O_2^-)、丙二醛(MDA)、游离脯氨酸(FPRO)含量来评估,均需取 0.5 g 新鲜、清洁的叶片样品,在冷冻条件下制备成匀浆待测。过氧化氢含量测定采用硫酸钛-可见分光光度法^[17],超氧阴离子含量测定采用盐酸羟胺-可见分光光度法^[18],丙二醛含量测定采用硫代巴比妥酸(TBA)-可见分光光度法^[19],游离脯氨酸含量测定采用酸性茚三酮-可见分光光度法^[20]。

1.4 数据处理及分析

1.4.1 白菜品种 Cd 剂量效应分析

有研究表明^[21],逻辑斯蒂分布模型(Log-logistic distribution)可较好地拟合重金属对植物的剂量-效应关系,由此推知诸如植物的半数有效量(ED_{50})等剂量参数,且适用于单一物种的生物敏感性分布(Species sensitivity distributions, SSD),故本研究采用其对

不同品种白菜镉胁迫剂量-效应曲线进行拟合,并对拟合结果进行外推,以评估供试白菜品种的Cd耐受力。Log-logistic模型如下:

$$y = \frac{a}{1 + \exp[-k(x - x_c)]}$$

式中: y 为各Cd处理水平白菜相对生物量,%; a 、 k 为拟合参数; x 为各个Cd处理的浓度值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; x_c 为 EC_{50} 的自然对数值。

1.4.2 数据处理

采用Excel 2016进行数据处理,Origin 2018软件进行绘图,应用SPSS 23.0统计分析软件对数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和 $P < 0.05$ 水平下的LSD检验、Tamhane检验。

2 结果与讨论

2.1 不同品种白菜Cd胁迫剂量-效应

不同品种会因Cd剂量不同而产生生物效应上的差异。就白菜而言最直观的剂量-效应便是生物量的变化。如图1,低Cd浓度下($0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),除品种4、6、11、12、16、17、20外的13种白菜生长均表现出一定毒性刺激(Hormesis)效应,较对照生物量增幅

0.57%~4.51%,这与Sidhu等^[22]研究中发现低浓度Cd促使臭芥(*Coronopus didymus* L.)生物量增加的情况相似,这或许是植物在低Cd胁迫时的一种保护性“稀释”机制;而随浓度上升,各品种相对生物量均开始降低,此时Cd的毒性抑制对白菜生长产生影响;而土壤Cd浓度达到最大($1.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)时,Cd生物量抑制作用最明显。通过剂量效应曲线,可推算出供试白菜Cd的 EC_{50} 及其95%置信区间,如表3。Cd胁迫下20种白菜 EC_{50} 的变化范围为 $0.469 \sim 1.204 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且 r^2 最低为0.983,优于Wang等^[23]以印度芥菜亚细胞积累表征的研究结果。其中品种18(JF) EC_{50} 值最高,为 $1.204 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;品种20(QT) EC_{50} 值最低,为 $0.469 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,二者相差2.57倍。

由于盆栽试验环境较为恒定,可排除多数干扰因素,如pH、盐效应等的干扰,因此可通过Log-logistic模型拟合白菜品种生物量,衡量不同品种Cd耐受能力^[24]。基于不同品种白菜生物量进行拟合的半数抑制浓度结果可知,黑土栽培过程中供试白菜Cd耐受能力由高到低依次为:JF、BCCRQJ、XF、HX65、XFQB、DHF65、586LSKF2、JYKC、SK、JYKC4、ZB61、FGKC、DN909、CRDW3、JQFSS、JBC、GLDB、DC18J、

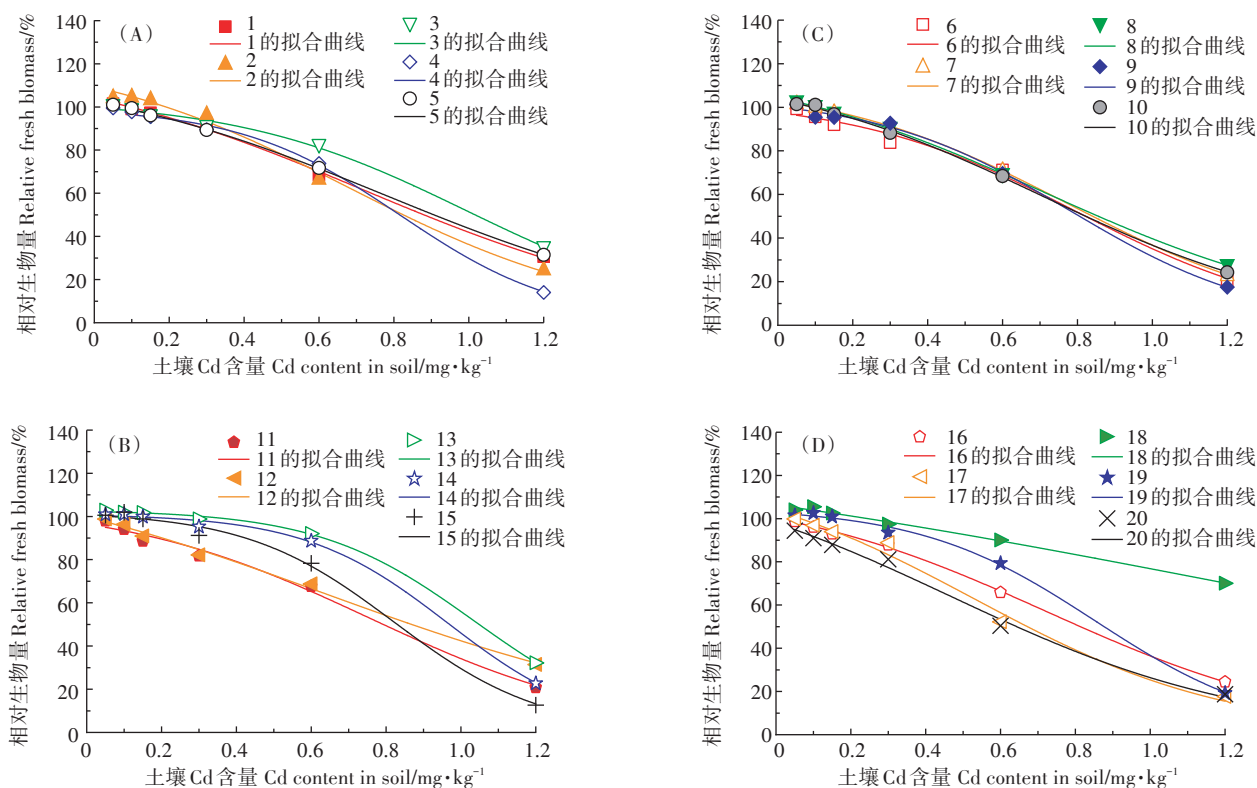


图1 不同品种白菜Cd胁迫-剂量效应曲线

Figure 1 Dose-effect curves of different cabbage cultivars under Cd stress

表3 白菜Cd半抑制毒性阈值浓度(EC_{50} , $mg \cdot kg^{-1}$)及其95%置信区间

Table 3 Toxicity thresholds of Cd to cabbage cultivars (EC_{50} , $mg \cdot kg^{-1}$) and their 95% confidence intervals

编号 Code	Cd半抑制毒性阈值浓度 EC_{50}	95%置信区间 95% confidence interval	编号 Code	Cd半抑制毒性阈值浓度 EC_{50}	95%置信区间 95% confidence interval
1	0.719±0.075	0.480~0.957	11	0.754±0.072	0.525~0.982
2	0.676±0.077	0.430~0.921	12	0.634±0.157	0.133~1.135
3	0.995±0.034	0.885~1.104	13	1.036±0.010	1.005~1.067
4	0.807±0.022	0.739~0.876	14	0.965±0.020	0.901~1.030
5	0.770±0.021	0.703~0.837	15	0.821±0.030	0.725~0.918
6	0.797±0.057	0.616~0.978	16	0.723±0.030	0.629~0.817
7	0.771±0.009	0.740~0.802	17	0.531±0.128	0.123~0.939
8	0.713±0.015	0.667~0.760	18	1.204±0.342	0.114~2.294
9	0.781±0.031	0.681~0.880	19	0.853±0.022	0.783~0.923
10	0.705±0.030	0.611~0.799	20	0.469±0.137	0.033~0.904

FGC80F1、QT,品种Cd耐性差异明显,将半数抑制浓度进行对数变换后,继续采用Log-logistic模型对其进行物种敏感性分析(SSD),分布曲线如图2,基于半数抑制浓度的拟合结果较好, $r^2=0.982$ 1,大部分品种的实际值大于或接近预测值,但耐性最佳品种JF和最差品种QT有较高预测值,这同Ding等^[25]在白菜-土壤系统上建立SSD以评价土壤Cd阈值的结果类似,或许说明其可能在其他环境下具备较高耐Cd潜力。

2.2 不同白菜品种的Cd积累特征分析

土壤中Cd污染程度不同会造成白菜的积累差异,而白菜可食部分(叶)中的Cd积累是评定其食用安全性的重要参数^[10]。不同程度Cd污染土壤中供试品种叶积累量分布如图3,对于同一程度Cd污染,20种白菜品种叶中Cd积累量符合正态分布,品种间差异明显,按Cd积累量离散程度由小到大分别为0.1、0.05、0.15、0.3、0.6、1.2 $mg \cdot kg^{-1}$,其中Cd投加浓度为

0.6 $mg \cdot kg^{-1}$ 和1.2 $mg \cdot kg^{-1}$ 的土壤中有过半数的供试品种超过或接近《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中叶菜类农产品Cd检出限0.2 $mg \cdot kg^{-1}$ ^[26],而其他投加浓度下叶Cd积累量较小,难以作为特征积累品种的筛选依据,且0.6 $mg \cdot kg^{-1}$ 和1.2 $mg \cdot kg^{-1}$ 的土壤Cd添加浓度为《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中^[27]推荐农用地土壤Cd污染风险筛选值(0.6 $mg \cdot kg^{-1}$,pH>7.5)的1倍和2倍,可供指导实际筛选工作。因此,为准确切合东北典型黑土耕作环境,筛选出安全可靠的白菜品种,本试验确定以土壤Cd投加浓度0.6 $mg \cdot kg^{-1}$ 和1.2 $mg \cdot kg^{-1}$ 作为筛选浓度,测定供试品种各部位Cd积累量,以鉴定高、低Cd积累白菜品种。

白菜品种间各部位Cd积累能力也存在差异,而不同部位Cd积累量差异决定了品种独特的积累特征

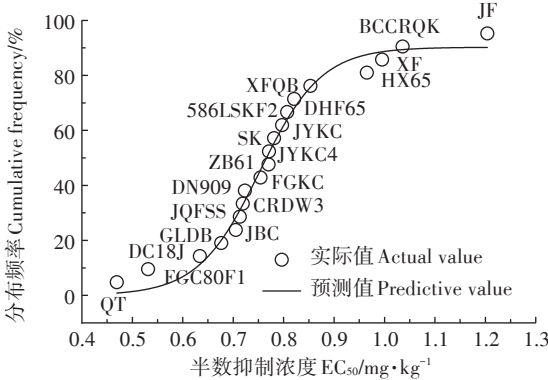


图2 不同白菜品种基于半数抑制浓度的物种敏感性分布曲线
Figure 2 Cumulative frequencies of species sensitivity distributions(SSD) of the different cabbage cultivars based on EC_{50}

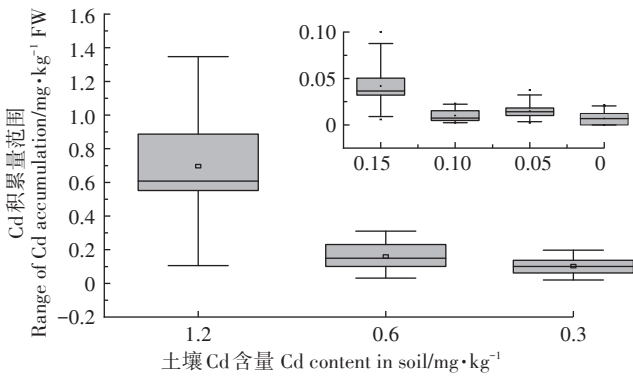
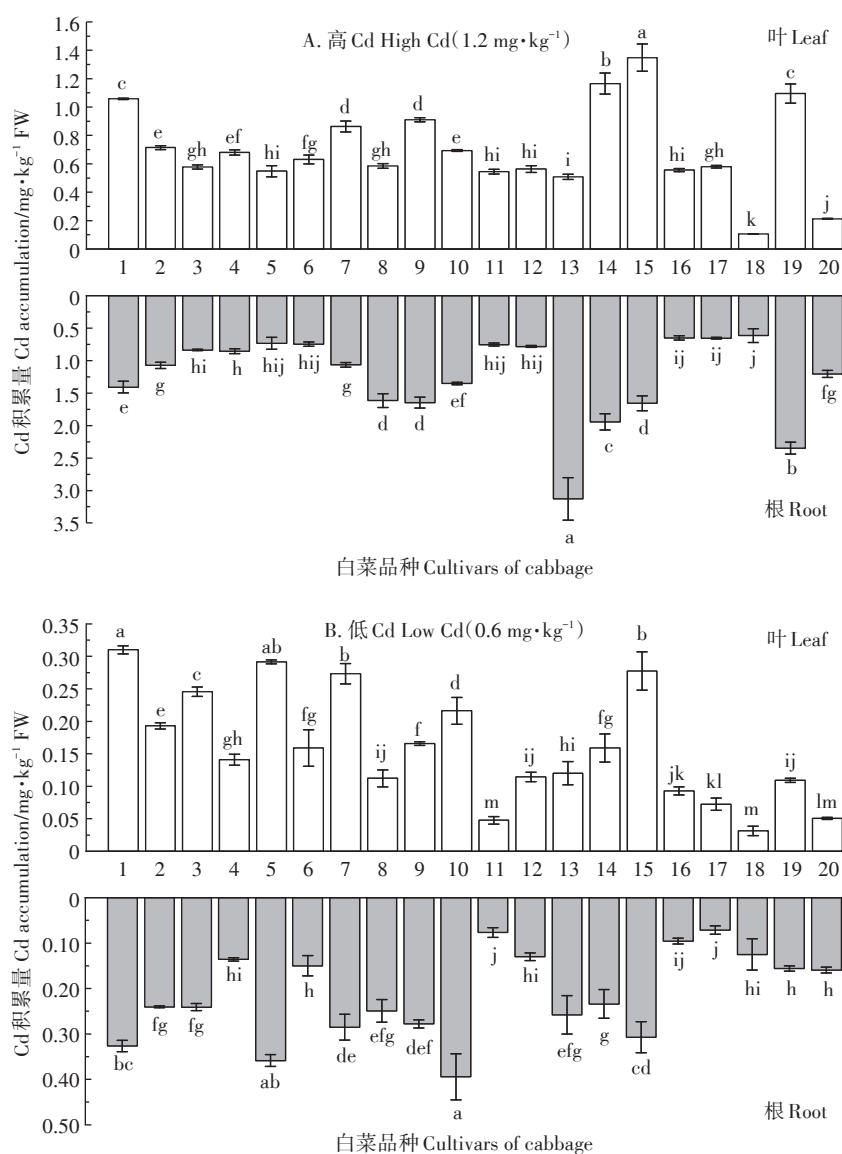


图3 不同程度Cd污染土壤中白菜品种的积累量范围
Figure 3 Accumulation range of cabbage cultivars in soil of different Cd level

和植物-土壤效应^[28],供试白菜各部分Cd积累量如图4,当土壤外源Cd含量为 $1.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时(图4A),叶Cd积累最高品种为DHF65(品种15),积累量达 $1.348\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$;最低为JF(品种18),积累量仅 $0.106\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$,也是试验中唯一一种在 $1.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 筛选浓度下Cd积累量低于 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$ 国家食品安全标准限值的供试品种。根Cd积累最高品种为BCCRQJ(品种13),积累量达 $3.128\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$;最低品种为JF(品种18),积累量为 $0.614\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$ 。大部分叶菜类蔬菜叶Cd积累均保持较高水平,这与张泽锦等^[29]的研究相似。而当土壤外源Cd含量为 $0.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

kg^{-1} 时(图4B),叶Cd积累从高到低依次为品种1、5、15、7、3、10、2、9、14、6、4、13、12、8、19、16、17、20、11、18,其中30%超出了国家食品安全标准限值。根Cd积累由高到低依次为品种10、5、1、15、7、9、13、8、3、2、14、20、19、6、4、12、18、16、11、17。由于筛选浓度已经接近或降至品种的耐受浓度,同高浓度组相比,一些品种(如FGC80F1)的Cd积累量有了较大变化,相关研究认为^[30]这是由于植物根系在Cd积累中起着主控作用。

植物Cd积累特征可通过富集系数(BCFs)、迁移系数(TFs)来描述,而根际土壤Cd含量和植物净化率



不同小写字母表示不同处理间存在显著差异($P<0.05$)。下同

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below

图4 供试白菜品种不同部位Cd积累量

Figure 4 Cd accumulation in different parts of tested cabbage cultivars

可反映植物-土壤体系中的相互作用,有助于选取适当植物控制土壤污染^[31]。供试品种根际土壤Cd含量、富集系数、迁移系数、净化率如表4,1.2 mg·kg⁻¹筛选浓度下,品种间根际土壤Cd含量差异明显($P<0.05$),CRDW3(品种1)具有最强的叶Cd富集能力,是最弱品种QT(品种20)的10.8倍,FGC80F1(品种17)根叶间Cd迁移最强,为最弱品种JF(品种18)和QT(品种20)的5.0倍,BCCRQJ(品种13)单株净化能力最佳,是最低品种XFQB(品种19)的11.7倍;0.6 mg·kg⁻¹筛选浓度下的品种间根际土壤Cd含量差异也十分明显($P<0.05$),但品种积累特征并不同于高浓度(1.2 mg·kg⁻¹),BCCRQJ(品种13)叶Cd富集能力最高,是最低品种JF(品种18)的5.7倍,JYKC(品种6)根叶间Cd迁移能力最高,为最低品种JF(品种18)的4.2倍,BCCRQJ(品种13)在0.6 mg·kg⁻¹筛选浓度下也具有最高Cd净化率,为14.28%,最低的QT(品种20)与之相差5.6倍。相关研究认为^[32]低积累植物可食用部分迁移系数和富集系数应小于1,且系数越小越说

明污染物难向可食用部分积累,而高积累植物迁移系数和富集系数则越大越好,也有学者^[33]发现青苣(*Celosia argentea* Linn.)等Cd超积累植物叶积累能力高于根系。不仅如此高积累植物更看重对污染物的净化率,净化率越高,单株净化能力越强,吴志超^[34]也据此完成对高、低Cd积累油菜的筛选。

2.3 高、低Cd积累品种浓度积累效应

可投入实际生产的高、低Cd积累品种需具备耐受力强,积累特征稳定且显著的特点,而其积累量也与生物量存在联系^[35]。由于95%的供试品种在1.2 mg·kg⁻¹筛选下生长不良,仅JF在此浓度下有较高生物量,结合各品种半数抑制浓度(表3),BCCRQJ(品种13)Cd耐受力仅次于JF,且净化率最高,仅根部积累量就达3.128 mg·kg⁻¹ FW,可作为高Cd积累品种适用于≤0.6 mg·kg⁻¹ Cd污染地区,而JF(品种18)叶Cd积累量低,Cd富集、迁移因子均小于1,0.6 mg·kg⁻¹筛选条件下JF叶仅含Cd 0.031 mg·kg⁻¹ FW,可保证食用安全,可作为低Cd积累品种应用于≤0.6 mg·kg⁻¹ Cd污染

表4 供试白菜品种根际土Cd含量、富集系数、迁移系数及净化率

Table 4 Cd content in rhizosphere, bioconcentration factors (BCFs), translocation factors (TFs), and extraction rates (ERs) of tested cabbage cultivars

品种 Cultivars	根际土Cd含量 Cd content in rhizosphere/mg·kg ⁻¹		富集系数 BCFs		迁移系数 TFs		净化率 ERs	
	1.2 mg·kg ⁻¹	0.6 mg·kg ⁻¹	1.2 mg·kg ⁻¹	0.6 mg·kg ⁻¹	1.2 mg·kg ⁻¹	0.6 mg·kg ⁻¹	1.2 mg·kg ⁻¹	0.6 mg·kg ⁻¹
1	0.323±0.005hi	0.087±0.006b	3.28	3.57	0.75	0.95	2.62%	6.15%
2	0.290±0.017hi	0.049±0.002de	2.47	3.94	0.67	0.80	2.82%	11.22%
3	0.250±0.019ij	0.063±0.003c	2.32	3.91	0.69	1.02	3.06%	11.35%
4	0.322±0.017hi	0.051±0.001de	2.11	2.77	0.80	1.04	2.12%	13.97%
5	0.188±0.013j	0.085±0.001b	2.92	3.42	0.75	0.81	3.62%	9.54%
6	0.497±0.033g	0.053±0.008cd	1.27	2.97	0.84	1.06	1.44%	11.11%
7	0.329±0.019hi	0.090±0.005b	2.62	3.05	0.81	0.96	2.41%	8.20%
8	0.887±0.030bc	0.045±0.005def	0.66	2.48	0.36	0.45	1.00%	7.59%
9	0.898±0.018b	0.046±0.002def	1.01	3.63	0.55	0.60	0.79%	9.84%
10	0.792±0.066def	0.124±0.015a	0.88	1.74	0.51	0.55	0.82%	4.06%
11	0.940±0.056b	0.036±0.003fgh	0.58	1.33	0.72	0.62	0.64%	4.51%
12	0.745±0.052ef	0.047±0.001def	0.76	2.43	0.72	0.88	0.71%	4.63%
13	0.353±0.014h	0.029±0.004hi	1.44	4.16	0.16	0.47	3.75%	14.28%
14	0.487±0.039g	0.040±0.005efg	2.39	3.97	0.60	0.68	1.31%	7.31%
15	0.871±0.027bcd	0.118±0.014a	1.55	2.36	0.81	0.90	0.45%	3.93%
16	0.741±0.090ef	0.034±0.002ghi	0.76	2.76	0.86	0.97	0.85%	8.02%
17	0.807±0.118cde	0.024±0.003i	0.73	3.00	0.88	1.02	0.79%	9.24%
18	0.199±0.048j	0.043±0.011defg	0.56	0.73	0.18	0.25	2.11%	2.60%
19	2.017±0.099a	0.041±0.001efg	0.54	2.64	0.47	0.70	0.32%	4.90%
20	0.702±0.036f	0.063±0.002c	0.30	0.81	0.18	0.32	0.69%	2.57%

注:表中数值为平均值±标准差,n=3;同列不同小写字母表示不同处理间存在显著差异($P<0.05$)。下同。

Note: mean±SD, n=3; Different lowercase letters in the same column indicate that there is significant difference between different treatments ($P<0.05$). The same below.

地区。对比二者随土壤外源Cd含量变化的积累能力发现(表5),两品种叶、根的Cd积累量均显著增高($P < 0.05$),其中BCCRQJ(品种13)叶、根积累量在 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下最高,分别为JF的4.8倍和5.1倍。而对比二者净化率可发现(表5),土壤外源Cd浓度增加会降低两品种净化效率,但即使在高浓度下($1.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),BCCRQJ净化率也高于唐皓等^[7]研究中高Cd积累品种的净化率。低浓度下($0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)BCCRQJ净化率有所升高,这可能是由于低浓度Cd刺激了BCCRQJ的吸收与体内输送^[36]。不过,虽然BCCRQJ有较高单株净化率,但积累量较低,远不及龙葵^[37]等超积累植物

的净化能力。

2.4 Cd胁迫下两种白菜的氧化损伤

Cd胁迫会导致白菜积累过氧化氢、超氧阴离子等活性氧(ROS),造成氧化损伤产生大量丙二醛和游离脯氨酸^[35],且氧化损伤的程度受Cd浓度影响^[38]。Cd诱导不同品种白菜产生的氧化应激反应与基因型有关,不同外源Cd浓度下,两白菜品种叶中的过氧化氢、超氧阴离子、丙二醛及游离脯氨酸含量如图5所示。

正常植物体内过氧化氢(H_2O_2)、超氧阴离子(O_2^-)等活性氧的产生和清除维持着动态平衡,Cd胁迫会

表5 不同浓度外源Cd胁迫下两种白菜的Cd积累

Table 5 Accumulation of two cabbage cultivars under different exogenous Cd concentrations

处理 Treatments/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	叶Cd积累量 Cd accumulation in leaves/ $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$		根Cd积累量 Cd accumulation in roots/ $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$		净化率 ERs/%	
	BCCRQJ	JF	BCCRQJ	JF	BCCRQJ	JF
0	2.055±0.312e	0.933±0.196d	2.674±0.331d	2.506±0.345c	18.32	4.96
0.15	30.512±1.209d	5.868±0.085d	43.167±0.828c	17.106±0.530c	18.64	3.92
0.3	61.332±4.494c	19.868±3.024c	106.314±4.917b	67.121±10.792bc	17.78	3.17
0.6	120.123±17.860b	31.437±7.168b	257.866±42.318b	125.112±34.561b	14.28	2.60
1.2	507.874±18.097a	105.755±2.320a	3 128.271±327.995a	613.890±107.277a	3.75	2.11

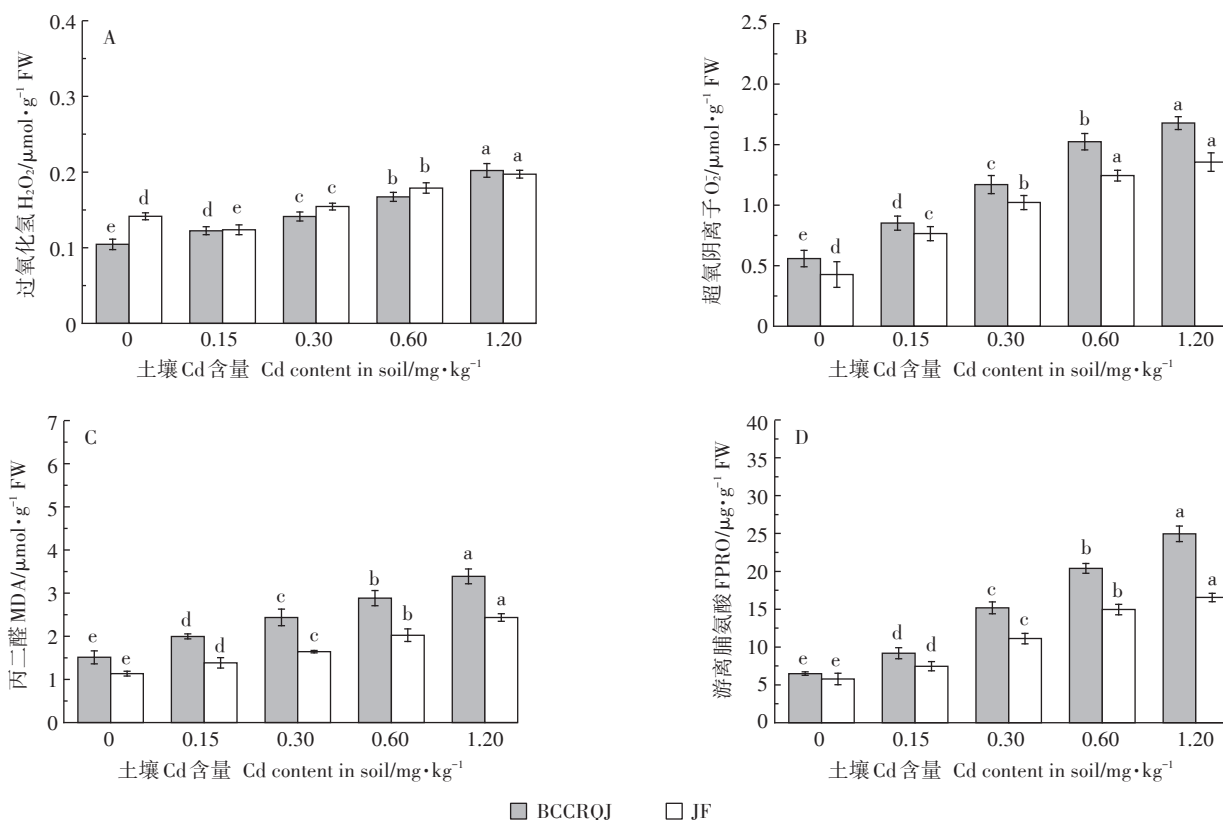


图5 不同浓度外源Cd胁迫下两种白菜氧化损伤指标

Figure 5 Oxidative damage factors of two cabbage cultivars under different exogenous Cd concentrations

打破该平衡,致使其瞬时积累继而氧化损伤细胞膜结构,其含量是表征植物氧化损伤程度的重要指标,如图5A、图5B。外源Cd含量与两种白菜叶中 H_2O_2 含量及 O_2^- 含量均呈显著正相关($P<0.05$),但BCCRQJ中 H_2O_2 增长率高于JF,而 O_2^- 增长率则低于JF:当土壤中Cd浓度达到 $1.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,BCCRQJ的 H_2O_2 含量较对照($0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)增长了94.2%,而JF增长了38.7%;BCCRQJ的 O_2^- 含量较对照增长了200.2%,而JF增长了217.8%。当植物遭受Cd胁迫, O_2^- 的动态平衡会率先被打破,大量 O_2^- 的积累会加速细胞衰亡,而 H_2O_2 作为植物自身 O_2^- 清除反应的中间体,也会大量积累^[39]。当低浓度Cd($0.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)胁迫JF时,其 H_2O_2 含量有所降低,这可能是由于JF自身抗氧化能力提高所致,这同Singh等^[40]对于Cd胁迫番茄幼苗的研究结果类似。

丙二醛是脂质过氧化的重要产物,而游离脯氨酸通常伴随植物盐胁迫而激增,正常状况下含量极低,二者均可作为评价Cd诱导植物产生氧化损伤程度的重要指标^[41],如图5C和图5D。两白菜品种MDA、FPRO含量均随土壤Cd含量升高而显著增高($P<0.05$),同对照相比, $1.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土壤Cd浓度下,BCCRQJ的MDA含量增长了124.1%,FPRO含量增长了284.9%,JF则分别增长了114.4%和186.4%。Mzoughi等^[42]也将MDA作为反映植物Cd诱导氧化损伤程度的指标,发现了Cd胁迫菠菜组织MDA大量积累;同样Ozfidan-Konakci等^[43]认为FPRO含量增加可视为胁迫发生标志,观察到Cd处理7d小麦幼苗中FPRO含量显著升高。另外,当外源Cd增至最高($1.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),BCCRQJ中 H_2O_2 、 O_2^- 、MDA、及FPRO含量水平均高于JF,除 O_2^- 外,BCCRQJ各指标增幅也高于JF,孙园园等^[44]对于高Cd积累植物黑麦草的研究中也发现,随Cd含量升高脯氨酸、MDA含量有所上升,细胞质、膜过氧化明显。这意味着在较高的污染水平下高Cd积累白菜品种或许会比低Cd积累白菜品种承受更严重的氧化胁迫。

3 结论

(1)20种白菜对于Cd胁迫的敏感性分布具有显著差异,其中JF具有最强Cd耐性,耐受阈值为 $1.204\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,BCCRQJ次之,为 $1.036\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,QT Cd耐性最差,仅为 $0.469\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

(2)不同土壤Cd浓度下20种白菜可食用部分积累量差异均明显,其中土壤外源Cd含量为 $1.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时种间差异最大, $0.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时次之。此两浓度

下:JF可食用部分Cd积累量均最低,低于国家食品安全标准限值 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (叶菜类产品);迁移、富集系数均小于1,说明其可作为在东北地区安全生产的低Cd积累品种。而BCCRQJ净化率最高,为18.64%,说明其有较好Cd吸收作用,为高Cd积累品种,具有一定植物修复潜力。

(3)JF和BCCRQJ叶、根Cd积累量与土壤Cd含量呈显著正相关,净化率与之显著负相关($P<0.05$)。且随Cd胁迫程度加剧,二者氧化损伤越严重,过氧化氢、超氧阴离子、丙二醛、游离脯氨酸含量均随土壤外源Cd含量上升而显著增加($P<0.05$),但BCCRQT除超氧阴离子外的氧化损伤指标增幅均高于JF,说明高Cd积累品种能承受更高的氧化损伤风险,而低积累Cd品种JF能更好地抵抗Cd诱导的氧化胁迫。

参考文献:

- [1] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2): 750-759.
- [2] Halwani D A, Jurdi M, Abu S F K, et al. Cadmium health risk assessment and anthropogenic sources of pollution in Mount-Lebanon Springs [J]. *Exposure and Health*, 2019(1): 1-16.
- [3] 中华人民共和国生态环境部, 中华人民共和国自然资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 中华人民共和国自然资源部, 2014: 1-5.
Ministry of Ecology and Environment of PRC, Ministry of Natural Resources of PRC. Report on the national general survey of soil contamination[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of PRC, Ministry of Natural Resources of PRC, 2014: 1-5.
- [4] 中华人民共和国国务院. 土壤污染防治行动计划[EL/OL].[2016-5-31]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm
State Council of PRC. Soil pollution prevention and control action plan [EL/OL].[2016-5-31]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm
- [5] 谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 等. 低积累水稻品种联合腐植酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力[J]. *环境科学*, 2018, 39(9): 4348-4358.
XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, et al. Potential to ensure safe production from rice fields polluted with heavy cadmium by combining a rice variety with low cadmium accumulation, humic acid, and sepiolite[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(9): 4348-4358.
- [6] 孟楠, 安平, 王萌, 等. 基于典型污灌区土壤筛选耐盐、Cd低吸收小麦品种[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(3): 409-414.
MENG Nan, AN Ping, WANG Meng, et al. Screening low-Cd wheat cultivars characterized with high salinity tolerance for typical sewage irrigation soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(3): 409-414.

- [7] 唐 皓,李廷轩,张锡洲,等.水稻镉高积累材料的筛选及其镉积累特征研究[J].生态环境学报,2015,24(11):1910-1916.
TANG Hao, LI Ting-xuan, ZHANG Xi-zhou, et al. Screening of rice cultivars with high cadmium accumulation and its cadmium accumulation characteristics[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(11):1910-1916.
- [8] Sun Y, Zhou Q, Diao C. Effects of cadmium and arsenic on growth and metal accumulation of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(5):1103-1110.
- [9] 唐 琳.设施农业土壤镉-硝酸盐复合污染边生产边修复过程研究[D].杭州:浙江大学,2017.
TANG Lin. Processes of phytoremediation coupled with agro-production of cadmium and nitrate co-contaminated soils[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [10] 杜志鹏,向 丹,苏德纯.不同Cd积累能力大白菜吸收转运Cd的差异性[J].生态环境学报,2018,27(11):2150-2155.
DU Zhi-peng, XIANG Dan, SU De-chun. Difference in absorption and transform of Cd by *Brassica pekinensis* L. with different Cd accumulation ability[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(11):2150-2155.
- [11] 杜小平,康靖全,吕金印.镉低积累青菜品种筛选及硫对镉胁迫下青菜镉含量和品质影响[J].农业环境科学学报,2018,37(8):1592-1601.
DU Xiao-ping, KANG Jing-quan, LÜ Jin-yin. Selection for low-Cd-accumulating cultivars of pakchoi (*Brassica chinensis* L.), effects of sulfur on Cd content, and quality characters under Cd stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8):1592-1601.
- [12] 陈小华,沈根祥,白玉杰,等.不同作物对土壤中Cd的富集特征及低累积品种筛选[J].环境科学,2019(10):1-10.
CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, et al. Accumulation characteristics of Cd in different crops and screening of low-Cd accumulation cultivars[J]. *Environmental Science*, 2019(10):1-10.
- [13] Xia X Q, Yang Z F, Cui Y J, et al. Soil heavy metal concentrations and their typical input and output fluxes on the southern Song-nen Plain, Heilongjiang Province, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 139:85-96.
- [14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2015.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015.
- [15] 中华人民共和国国家卫生健康委员会.土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法(GB/T 17141—1997)[S].北京:中华人民共和国国家卫生健康委员会,1998:1-4.
National Health Commission of PRC. Soil quality—determination of lead, cadmium—graphite furnace atomic absorption spectrophotometry (GB/T 17141—1997) [S]. Beijing: National Health Commission of PRC, 1998:1-4.
- [16] 中华人民共和国国家卫生健康委员会.食品安全国家标准 食品中镉的测定(GB 5009.15—2014)[S].北京:中华人民共和国国家卫生健康委员会,2015:1-4.
National Health Commission of PRC. National food safety standard—determination of cadmium in foods(GB 5009.15—2014)[S]. Beijing: National Health Commission of PRC, 2015:1-4.
- [17] Patterson B D, MacRae E A, Ferguson I B. Estimation of hydrogen peroxide in plant extracts using titanium(IV)[J]. *Analytical Biochemistry*, 1984, 139(2):487-492.
- [18] Wu Q S, Zou Y N, Liu W, et al. Alleviation of salt stress in citrus seedlings inoculated with mycorrhiza: Changes in leaf antioxidant defense systems[J]. *Plant Soil & Environment*, 2010, 56(10):470-475.
- [19] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
LI He-sheng. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [20] He J L, Li H, Luo J, et al. A transcriptomic network underlies microstructural and physiological responses to cadmium in *Populus x canescens*[J]. *Plant Physiology*, 2013, 162(1):424-439.
- [21] 刘 克.我国主要小麦产地土壤镉和铅的安全阈值研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.
LIU Ke. Soil threshold of cadmium and lead in major Chinese wheat-producing areas[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [22] Sidhu G P S, Singh H P, Batish D R, et al. Tolerance and hyperaccumulation of cadmium by a wild, unpalatable herb *Coronopus didymus* (L.) Sm. (Brassicaceae)[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 135:209-215.
- [23] Wang Y P, Huang J, Gao, Y Z. Subcellular accumulation of different concentrations of cadmium, nickel, and copper in Indian mustard and application of a sigmoidal model[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4):1142-1150.
- [24] Haanstra L, Doelman P, Voshaar J. The use of sigmoidal dose response curves in soil ecotoxicological research[J]. *Plant and Soil*, 1985, 84(2):293-297.
- [25] Ding C F, Ma Y B, Li X G, et al. Determination and validation of soil thresholds for cadmium based on food quality standard and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619:700-706.
- [26] 中华人民共和国国家卫生健康委员会.食品安全国家标准 食品中污染物限量(GB 2762—2017)[S].北京:中华人民共和国国家卫生健康委员会,2017:1-17.
National Health Commission of PRC. National food safety standard—quantity of pollutants in food(GB 2762—2017)[S]. Beijing: National Health Commission of PRC, 2017:1-17.
- [27] 中华人民共和国生态环境部,国家市场监督管理总局.土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618—2018)[S].北京:中华人民共和国生态环境部,国家市场监督管理总局,2018:1-4.
Ministry of Ecology and Environment of PRC, State Administration for Market Regulation. Soil environmental quality—risk control standard for soil contamination of agricultural land(GB 15618—2018)[S]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of PRC, State Administration for Market Regulation, 2018:1-4.
- [28] 霍文敏,邹 茸,王 丽,等.间作条件下超积累和非超积累植物对重金属镉的积累研究[J].中国土壤与肥料,2019(3):165-171.
HUO Wen-min, ZOU Rong, WANG Li, et al. Study on the accumulation characteristics of heavy metal cadmium by hyperaccumulator and

- non-hyperaccumulator under intercropping[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(3):165-171.
- [29] 张泽锦, 唐丽, 李跃建, 等. 四川地区低镉富集蔬菜品种分析及安全性评估[J]. 西南农业学报, 2016, 29(10):2483-2487.
- ZHANG Ze-jin, TANG Li, LI Yue-jian, et al. Analysis of low cadmium collection capacity vegetables and food safety assessment of vegetables in Sichuan Province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(10):2483-2487.
- [30] 侯丹迪. 超积累植物东南景天根系对重金属的吸收积累及根际细菌群落特征[D]. 杭州:浙江大学, 2017.
- HOU Dan-di. Root uptake and accumulation of heavy metals and rhizosphere bacteria community of hyperaccumulator *Sedum alfredii* Hance[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [31] 刘勇, 刘燕, 杨丹, 等. 三叶草(*Trifolium repens*)用于土壤镉污染的修复潜力[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11):2226-2232.
- LIU Yong, LIU Yan, YANG Dan, et al. Remediation potential of *Trifolium repens* used in cadmium-contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(11):2226-2232.
- [32] 秦世玉. 甘蓝型油菜镉高低积累品种的筛选及其生理分子机制研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2016.
- QIN Shi-yu. Screening of high/low molybdenum accumulation *Brassica napus* cultivars and research on the physiological and molecular mechanisms[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016.
- [33] 吴惠瑾, 刘杰. 三种富集植物对广西兴源铅锌矿区周边Cd污染农田土壤修复性能研究[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(2):1-4.
- WU Hui-jin, LIU Jie. Study of three accumulators for phytoremediation of paddy soil contaminated by cadmium at Pb-Zn mining district in Guangxi[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2016, 42(2):1-4.
- [34] 吴志超. 高低镉积累油菜品种筛选及其生化机制研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2015.
- WU Zhi-chao. Screening of high/low cadmium accumulation *Brassica napus* cultivars and research on the biochemical mechanisms[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [35] Rizwan M, Ali S, Adrees M, et al. A critical review on effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables[J]. *Chemosphere*, 2017, 182:90-105.
- [36] Uruguchi S, Mori S, Kuramata M, et al. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60:2677-2688.
- [37] 方楚凝, 吴剑, 侯涛. 不同管理模式下龙葵对Cd污染土壤的修复效果试验研究[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(1):47-50.
- FANG Chu-ning, WU Jian, HOU Tao. Phytoremediation efficiency of *Solanum nigrum* for Cd polluted soil with various management methods[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2016, 23(1):47-50.
- [38] Zhang Y R, Jiang C Y, Wang J J, et al. Oxidative stress and mitogen-activated protein kinase pathways involved in cadmium-induced BRL 3A cell apoptosis[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2013:1-12.
- [39] Li Q, Wang G, Wang Y R, et al. Foliar application of salicylic acid alleviate the cadmium toxicity by modulation the reactive oxygen species in potato[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 172:317-325.
- [40] Singh S, Singh A, Srivastava P K, et al. Cadmium toxicity and its amelioration by kinetin in tomato seedlings vis-a-vis ascorbate-glutathione cycle[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2018, 178:76-84.
- [41] Chen W W, Guo C, Hussain S, et al. Role of xylo-oligosaccharides in protection against salinity-induced adversities in Chinese cabbage[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23:1254-1264.
- [42] Mzoughi Z, Souid G, Timoumi R, et al. Partial characterization of the edible *Spinacia oleracea* polysaccharides: Cytoprotective and antioxidant potentials against Cd induced toxicity in HCT116 and HEK293 cells[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 136:332-340.
- [43] Ozfidan-Konakci C, Yildiztugay E, Bahtiyar M, et al. The humic acid-induced changes in the water status, chlorophyll fluorescence and antioxidant defense systems of wheat leaves with cadmium stress[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 155:66-75.
- [44] 孙园园, 关萍, 何杉, 等. 镉胁迫对多花黑麦草镉积累特征、生理抗性及其超微结构的影响[J]. 草业科学, 2016, 33(8):1589-1597.
- SUN Yuan-yuan, GUAN Ping, HE Shan, et al. Effects of Cd stress on Cd accumulation, physiological response and ultrastructure of *Lolium multiflorum*[J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(8):1589-1597.