



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

不同茶树品种吸收累积镉的差异研究

杨柳, 陈钰佩, 方丽, 石元值

引用本文:

杨柳, 陈钰佩, 方丽, 等. 不同茶树品种吸收累积镉的差异研究[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 401–410.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0336>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

7种紫花苜蓿对云南某铅锌矿区土壤镉铅的累积特征及品种差异

杨姝, 贾乐, 毕玉芬, 湛方栋, 陈建军, 李博, 祖艳群, 李元

农业资源与环境学报. 2018, 35(3): 222–228 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0334>

基于多目标元素的重金属低累积水稻品种筛选及其吸收转运特征

冯爱煊, 贺红周, 李娜, 李伟, 魏世强, 蒋珍茂

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 988–1000 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0617>

环丙沙星和镉复合污染土壤中镉的生物可给性及其动态变化

郭剑波, 常旭卉, 陈龙, 刘小荷, 王淑平

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 185–190 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0174>

小麦秸秆生物质炭对碱性土壤中油菜生长和镉吸收的影响

任心豪, 陈乔, 李锦, 贺飞, 吴思沛, 郭军康

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 119–126 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0012>

叶面阻隔联合土壤钝化对水稻镉吸收转运的影响

谭骏, 潘丽萍, 黄雁飞, 邢颖, 陈锦平, 刘永贤, 张超兰

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 981–987 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0629>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨柳, 陈钰佩, 方丽, 等. 不同茶树品种吸收累积镉的差异研究[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 401–410.

YANG Liu, CHEN Yu-pei, FANG Li, et al. Study on the difference between cadmium absorption and accumulation in different tea varieties [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(3): 401–410.



开放科学 OSID

不同茶树品种吸收累积镉的差异研究

杨柳^{1,2}, 陈钰佩¹, 方丽¹, 石元值^{1*}

(1. 中国农业科学院茶叶研究所, 农业农村部茶树生物学与资源利用重点实验室, 杭州 310008; 2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081)

摘要: 为了解不同品种茶树对镉的响应差异, 比较了9个当前主栽茶树品种对Cd吸收累积的差异特征。采用盆栽试验方法研究了不同品种茶树在对照、Cd处理(土壤Cd含量 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)条件下, 茶树地上部分干物质质量、Cd在茶树各部位的含量、富集转运系数以及茶树根部镉相关转运蛋白基因的表达。结果表明, Cd处理下不同茶树品种地上部分干物质质量出现不同程度增加。两种处理下, Cd在茶树中的分布趋势均表现为根>枝干>成熟叶>新梢, Cd处理下, 这四个部位平均Cd含量分别为 32.79 、 0.293 、 0.112 、 $0.044\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Cd处理下, 土-根的富集系数和根-枝干、根-成熟叶、根-新梢的转移系数范围依次为 $7.17\sim 30.12$ 、 $0.017\sim 0.078$ 、 $0.002\sim 0.007$ 、 $0.000\ 3\sim 0.006$ 。CsZIP1、CsZIP2、CsHMA2、CsCAX2在紫鹃中表达量最高, CsHMA1在中茶108、乌牛早、紫鹃、浙农117表达差异不显著。综上, 当茶园土壤 $0.3\leq\text{Cd}\leq 1.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 不同品种茶树的新梢Cd含量都远低于国家标准限值($\text{Cd}\leq 1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 处于安全范围内。

关键词: 茶树品种; 镉; 吸收; 累积; 镉相关转运蛋白

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2021)03-0401-10

doi: 10.13254/j.jare.2020.0336

Study on the difference between cadmium absorption and accumulation in different tea varieties

YANG Liu^{1,2}, CHEN Yu-pei¹, FANG Li¹, SHI Yuan-zhi^{1*}

(1. Tea Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory for Tea Plant Biology and Resource Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310008, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to understand the mechanisms of cadmium absorption and accumulation in different tea varieties, pot experiments were conducted to investigate dry weight in aboveground part of different tea plant varieties, Cd content, accumulation and translocation of Cd from soil to different parts of tea plant, and gene expression of Cd-related transport proteins in roots with and without Cd treatment. Results showed that dry weight of aboveground part of different tea plant varieties increased with Cd content. The Cd content in different tea varieties was in order of roots>branches>mature leaves>young leaves. The bioaccumulation factor of Cd in roots of plants treated with Cd ranged from 7.17 to 30.12. The biological transfer factor of Cd from roots to branches, mature leaves, and young leaves in Cd-treated plants ranged from 0.017~0.078, 0.002~0.007, and 0.000 3~0.006 1, respectively. Results showed that the expression of CsZIP1, CsZIP2, CsHMA2, and CsCAX2 was increased in Zijuan, whereas the difference in the expression of CsHMA1 among the four tea varieties (Zhongcha108, Wuniuzao, Zijuan, and Zhenong117) was not significant. In conclusion, when Cd content in soil is more than $0.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and less than $1.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, we may consider young leaves as safe.

Keywords: tea varieties; cadmium; absorption; accumulation; Cd-related transport protein

收稿日期: 2020-06-24 录用日期: 2020-07-22

作者简介: 杨柳(1995—), 女, 河南周口人, 硕士研究生, 主要从事茶树生理与营养方面的研究。E-mail: 18737683559@163.com

*通信作者: 石元值 E-mail: shiyz@tricaas.com

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-19); 中国农业科学院科技创新工程(CAAS-ASTIP-2016-TRICAAS)

Project supported: The Fund for China Agriculture Research System (CARS-19); Agricultural Sciences Innovation Project of the Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS-ASTIP-2016-TRICAAS)

根据原国家环境保护部和国土资源部2014年公布的《全国土壤污染状况调查公报》,我国耕地土壤质量不容乐观,耕地土壤点位超标率为19.4%,其中Cd点位超标率位居无机污染物首位^[1]。随着环境重金属污染日趋加重,茶叶重金属污染问题不容忽视。茶树是我国重要的经济作物之一,截至2018年,全国茶叶种植面积约为289.9万hm²,干毛茶总产量为264万t^[2],茶叶种植面积与产量位居世界第一。茶叶质量安全问题是影响茶产业可持续发展的重要因素。

近年来,茶叶重金属含量超标时有报道^[3-5],茶叶中的重金属污染主要来源于土壤污染^[5-6]。目前茶园土壤重金属污染的研究主要基于野外调查采样和盆栽试验。野外调查结果显示,我国部分茶园出现了土壤重金属污染的情况,其中Cd污染较为严重^[7-15]。盆栽试验所开展的茶园土壤重金属污染研究主要以Pb为主^[4-5,15],对Cd的研究较为匮乏,少部分涉及Cd的研究主要关注Cd对茶树生理指标、耐受性的影响以及茶园土壤Cd有效性的变化^[6,13,16-18]。如吕亚敏等^[16]研究不同种类磷肥对茶园土壤中Cd有效性的影响,发现土壤pH与有效态Cd呈正相关;刘东娜^[17]基于水培试验研究茶树吸收累积Cd的特性,发现叶面施氮、根部施磷钾可抑制茶树吸收累积Cd,一定浓度的钙、铝离子可抑制茶树各器官对Cd的积累。目前茶树吸收累积Cd的机理研究较少,也鲜见有关不同品种茶树吸收富集镉的差异比较。本研究从不同茶树品种着手,分析茶树各部位Cd含量的变化、Cd的富集转运系数以及Cd相关转运蛋白的基因表达,了解不同品种茶树对Cd的响应差异,为进一步揭示茶树吸收累积Cd的机理奠定基础,旨在从源头控制茶树Cd污染,保障茶叶质量安全。

1 材料与方法

1.1 试验设计

选取适制绿茶、红茶、乌龙茶的9个主栽茶树品种,以盆栽的方式种植于中国农业科学院茶叶研究所嵊州综合实验基地盆栽场,茶树的树龄均为四龄。9个茶树品种分别是:黄金芽、安吉白茶(白叶1号)、中茶108、乌牛早(嘉茗1号)、浙农117、福鼎大白茶、紫娟、丹桂、铁观音,供试品种基本特征及适制性如表1所示。

每盆盆栽含土20 kg,土壤基本理化性状:pH 4.19、有机质含量17.14 g·kg⁻¹、总氮1.72 g·kg⁻¹、有效磷56.3 mg·kg⁻¹、速效钾167.7 mg·kg⁻¹、Cd含量0.142 mg·kg⁻¹。每盆种植茶树3株,试验处理前一周对茶树

表1 供试品种基本特性及适制性

Table 1 Basic information of the tested tea varieties

品种 Varieties	基本特性 Characteristics	适制性 Processing suitability
黄金芽	无性系、灌木、中叶类、中生种、特异品种	绿茶
白叶1号	无性系、灌木、中叶类、中(偏晚)生种、特异品种	绿茶
中茶108	无性系、灌木、中叶类、特早生种	绿茶
嘉茗1号	无性系、灌木、中叶类、特早生种	绿茶、红茶
浙农117	无性系、小乔木型、中叶类、早生种	红茶、绿茶
福鼎大白茶	无性系、小乔木型、中叶类、早生种	红茶、绿茶、白茶
紫娟	无性系、小乔木型、大叶类、中芽种、特异品种	红茶、绿茶
丹桂	无性系、灌木、中叶类、早生种	乌龙茶、红茶、绿茶
铁观音	无性系、灌木、中叶类、晚生种	乌龙茶、红茶、绿茶

进行等高度(40 cm)修剪,每盆施茶树专用肥2 g(N:P₂O₅:K₂O=22:8:12)。设置两个处理:对照(CK)和Cd处理,其中Cd处理外源添加Cd(NO₃)₂溶液至土壤Cd含量为1 mg·kg⁻¹,均设三次重复,共54盆。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,施肥,保证每盆茶树培养条件一致。

1.2 样品的制备及测定

茶树种植三个月后,按照新梢(一芽三叶)、成熟叶、枝干、根系四个部位分开取样,同时取茶树根际土壤。植物样品经自来水清洗三次,再用去离子水清洗三次,之后用滤纸吸干表面水分计鲜质量,用微波炉快速杀青后置于烘箱中80℃烘干至恒质量,称取并记录各部位干物质质量。植物样品用植物粉碎机粉碎后,装入密封袋保存待用。土壤样品摊放风干,除去砾石等杂质,磨碎过100目筛装入密封袋保存待用。

称取(0.200 0±0.001)g植物样品于聚四氟乙烯管中,加入4 mL HNO₃和4 mL HF,放入微波消解仪(MARS6,美国CEM公司),设定程序使植物样品在25 min内升温至180℃,并在180℃保持20 min。冷却至室温于通风橱取出,赶酸仪150℃赶酸至仅剩1 mL液体,用3%硝酸溶液(V/V)定容至50 mL容量瓶中,50 mL离心管保存待测。称取(0.200 0±0.001)g土壤样品于聚四氟乙烯管中,加入6 mL HNO₃、2 mL HCl和1 mL HF,放入微波消解仪,设定程序使土壤样品在30 min内升温至190℃,并在190℃保持30 min,其余步骤同上。使用高分辨电感耦合等离子体质谱仪(HR-ICP-MS, ELEMENT II, 美国热电)测量样品中Cd含量。所用酸试剂均为色谱纯,塑料器皿及微波消解所用的聚四氟乙烯管使用之前均用10%硝酸

溶液浸泡24 h,经自来水清洗三次,去离子水清洗三次后待干使用。

1.3 仪器工作条件

使用 $1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Ba、B、Co、Fe、Ga、In、K、Li、Lu、Na、Rh、Sc、Tl、U、Y 调谐溶液对仪器条件进行最优化选择,使 $1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Li 计数大于 10^6 cps。MoO/O $\leq$ 0.2%,具体 ICP-MS 工作参数:RF 功率 1 245 W,冷却气流速 $15.99 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,辅助气流速 $0.99 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,载气流速 $0.971 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,采样深度-2.40 mm,采集时间 20 s,扫描次数 9 次。

1.4 指标定义与计算公式

重金属富集系数(Bioconcentration factor, BCF)是指植物某一部位的重金属元素浓度与其所在土壤中同一种重金属元素浓度的比值,BCF>1,说明植物具有较强富集能力。

重金属转移系数(Biological transfer factor, BTF)是指植物的地上部位中重金属浓度与地下部位相应重金属的浓度之比,BTF>1,说明植物在体内运输重金属的能力较强^[9]。

重金属累积量是指单位质量的干物质试样中所含重金属的质量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

重金属分布率是指茶树某部位的重金属累积量占整个茶树植株总累积量的百分比值^[17]。

计算公式如下:

$\text{BCF} = \text{茶树体内某一部位重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) / \text{土壤中重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$

$\text{BTF} = \text{茶树地上部位重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) / \text{地下部分重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$

$\text{重金属累积量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = \text{消解液中重金属浓度}(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) \times \text{消解液体积}(\text{mL}) / \text{干物质质量}(\text{g})$

$\text{重金属分布率} = \text{茶树某部位的重金属累积量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) / \text{茶树植株的重金属总累积量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) \times 100\%$

1.5 重金属污染评价标准

茶叶中重金属污染评价标准:《茶叶中铬、镉、汞、

砷及氟化物限量》(NY 659—2003)。

土壤中重金属污染评价标准:《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)。

1.6 茶树根部总 RNA 提取与 cDNA 合成

取 0.1 g 茶树根部冷冻样采用 RNAprep pure 多糖多酚植物总 RNA 提取试剂盒(Tiangen, 北京)进行总 RNA 的提取, NanoDrop 2000 微量核酸蛋白测定仪测定所提取 RNA 质量及浓度,同时用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测总 RNA 完整性。采用 Prime Script RT reagent Kit(TaKaRa, 大连)将所提取的根部总 RNA 反转录成 cDNA,用于基因表达分析。

1.7 荧光定量 PCR

以试验处理每个样品 RNA 反转录成的 cDNA 为模板,采用 qRT-PCR 对不同茶树品种根部的镉转运蛋白进行表达分析。荧光定量 qRT-PCR 特异引物见表 2,内参基因为 GAPDH。按照 SYBR Green I Master (TaKaRa, 大连)的操作说明来进行实时荧光定量 PCR (Quantitative real time RT-PCR),反应体系为: SYBR Green I Master 5 μL , 上、下游引物(10 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)各 0.1 μL , cDNA 2 μL , 加 ddH₂O 至终体积 10 μL 。Roche Light Cycler 480 作为 qRT-PCR 的平台,反应程序:95 $^{\circ}\text{C}$ 预变性 30 s, 95 $^{\circ}\text{C}$ 变性 5 s, 60 $^{\circ}\text{C}$ 退火延伸 34 s, 40 个循环;每个样品技术学重复 2 次,结果采用 $2^{-\Delta\text{C}_t}$ 算法来计算。

1.8 数据处理

采用 Excel 2013 进行数据处理, SigmaPlot 12.5 绘图,利用 SAS 9.4 统计分析软件对数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA)、 $\alpha=0.05$ 水平下的 LSD 检验。

2 结果与讨论

2.1 Cd 对不同茶树品种地上部分干物质质量的影响

Cd 处理下的生物量大小是植物对重金属耐受性大小的直接表现。不同品种茶树地上部分的干物质质

表 2 荧光定量 PCR 引物序列

Table 2 Quantitative PCR primer sequences

基因名称 Gene name	功能 Function	上游引物 Sense primer(5'~3')	下游引物 Anti-sense primer(5'~3')
GAPDH	内参	TTGGCATCGTTGAGGGTCT	CAGTGGGAACACGGAAGC
CsZIP1	调控重金属向细胞内转运	TCTCCCGTTTCAGTCCT	ATCCACCATCATCGTCCC
CsZIP2	调控重金属向细胞内转运	ATGCTTGGTGATTGTGTGG	CTGCTGAGCCTTGAGTTG
CsHMA1	调控重金属在细胞内储存	AATGTTGGTGACGGTAT	AGGGAAGTGTGTTGATGAG
CsHMA2	调控重金属在细胞内储存	CCGCTATACTGCGTTGG	CTTTGCTCTTTTTCCTGAT
CsCAX2	调控重金属在细胞内储存	GGGGGATAAAAAATCACC	GGAACCTCTTCTCAGGAG

量如图1所示,在未添加Cd的土壤上种植时,福鼎大白干物质质量最小,丹桂最大,其他品种之间差异不显著;在添加镉的土壤上种植时,与对照相比,大部分品种的干物质质量都不同程度地增加,其中安吉白茶干物质质量最小,浙农117最大。研究表明低镉浓度可以促进植物的生长,刘志华等^[20]发现低浓度Cd对耐性强的大白菜品种的生长有促进作用;Zhi等^[21]发现低镉浓度能够促进大豆的生长;刘周莉等^[22]发现低浓度Cd($2.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)对忍冬的生长具有一定促进作用,表现出一定程度的毒物兴奋效应。

2.2 不同茶树品种各部位的镉含量差异

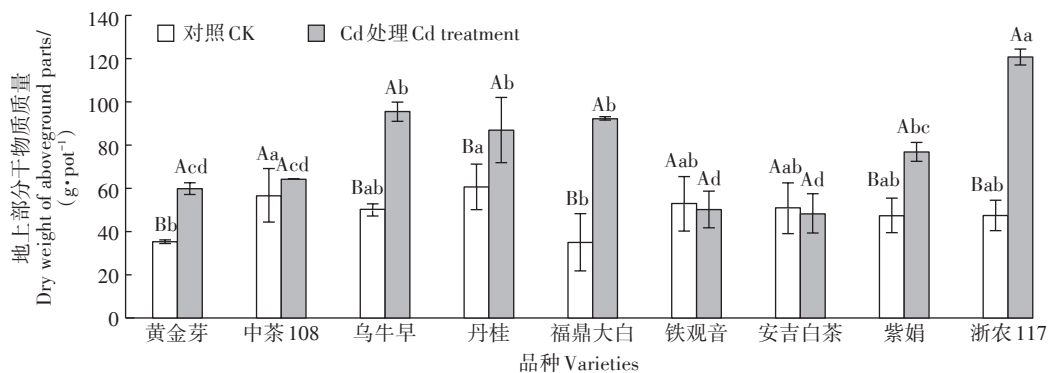
不同茶树品种各部位的镉含量与分布如图2所示。从图2a可知,对照处理、Cd处理下茶树新梢Cd含量之间差异显著,Cd处理下茶树新梢的Cd含量显著高于对照,对照、Cd处理下茶树新梢Cd含量范围依次为 $0.010\sim0.085$ 、 $0.013\sim0.094\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值分别为 0.033 、 $0.044\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。《茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量》(NY 659—2003)规定茶叶中 $\text{Cd}\leq 1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,因此两个处理中茶树新梢Cd含量远远低于标准限值。对照处理下,不同茶树品种的Cd含量排序依次为浙农117>紫鹃>黄金芽>丹桂>福鼎大白>安吉白茶>中茶108>铁观音>乌牛早;对于Cd处理而言,不同茶树品种的Cd含量排序依次为浙农117>紫鹃>黄金芽>铁观音>安吉白茶>丹桂>福鼎大白>中茶108>乌牛早。两个处理下,浙农117新梢中的Cd含量都较高,乌牛早新梢中的Cd含量最少。

从图2b可以看到,对照、Cd处理下茶树成熟叶Cd含量范围依次为 $0.079\sim0.110$ 、 $0.092\sim0.133\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值分别为 0.090 、 $0.112\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Cd处理下茶

树成熟叶的Cd含量显著高于对照。对照处理下,不同茶树品种成熟叶的Cd含量排序依次为黄金芽>安吉白茶>紫鹃>中茶108>福鼎大白>铁观音>乌牛早>浙农117>丹桂;对于Cd处理而言,不同茶树品种成熟叶的Cd含量排序依次为黄金芽>安吉白茶>浙农117>丹桂>铁观音>乌牛早>福鼎大白>紫鹃>中茶108,其中黄金芽与安吉白茶、浙农117差异不显著。两种处理下,成熟叶Cd含量最高的茶树品种都是黄金芽,而成熟叶Cd含量最低的品种在对照、Cd处理下分别为丹桂、中茶108。

图2c显示,对照、Cd处理下茶树枝干Cd含量范围依次为 $0.116\sim0.242$ 、 $0.134\sim0.412\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值分别为 0.185 、 $0.293\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。对照处理下,不同茶树品种枝干的Cd含量排序依次为黄金芽>浙农117>中茶108>丹桂>铁观音>安吉白茶>紫鹃>乌牛早>福鼎大白,其中黄金芽与浙农117差异不显著;Cd处理下,不同茶树品种枝干的Cd含量排序依次为黄金芽>铁观音>安吉白茶>浙农117>丹桂>紫鹃>中茶108>乌牛早>福鼎大白。

图2d显示,对照、Cd处理下茶树根部Cd含量范围依次为 $0.814\sim1.88$ 、 $19.26\sim42.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值分别为 1.44 、 $32.79\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。可以看出,茶树体内镉含量最高的部位是根部,茶树各部位镉含量呈现出自下而上递减的规律。对照处理下,不同茶树品种根的Cd含量排序依次为浙农117>丹桂>黄金芽>安吉白茶>铁观音>乌牛早>中茶108>紫鹃>福鼎大白;Cd处理下,不同茶树品种根部的Cd含量排序依次为安吉白茶>乌牛早>铁观音>紫鹃>黄金芽>丹桂>福鼎大白>中茶108>浙农117。综上,Cd处理下浙农117新梢中Cd含量最高,而根部Cd含量最低。



不同大写字母表示CK、Cd处理间差异显著,不同小写字母表示不同茶树品种间差异显著($P<0.05$)。下同
Different uppercase letters indicate significant differences between CK and Cd treatments, and different lowercase letters indicate significant differences among tea plant varieties ($P<0.05$). The same below

图1 不同品种茶树地上部分干物质质量

Figure 1 Dry weight in aboveground part of different tea plant varieties

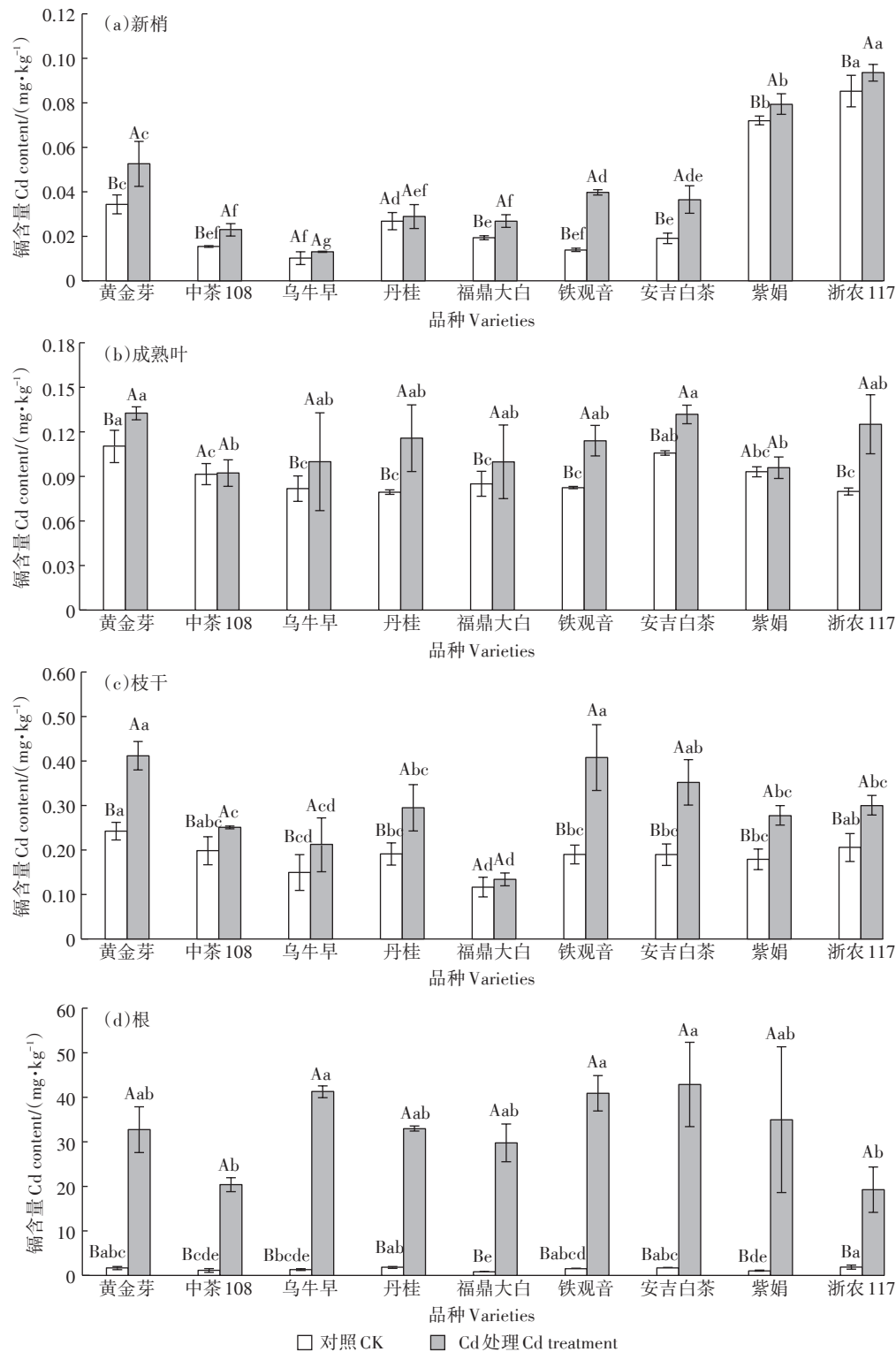


图2 不同茶树品种各部位的Cd含量

Figure 2 Content of Cd in different parts of tea plant varieties

2.3 不同茶树品种土壤的镉含量

从图3可以看到,对照、Cd处理下不同茶树品种土壤Cd含量范围依次为0.185~0.215、0.338~0.761 mg·kg⁻¹,平均值分别为0.194、0.448 mg·kg⁻¹。对照处理

下,不同茶树品种土壤的Cd含量排序依次为安吉白茶>铁观音>浙农117>黄金芽>福鼎大白>丹桂>乌牛早>中茶108>紫鹃;Cd处理下,不同茶树品种根际土壤的Cd含量排序依次为安吉白茶>中茶108>浙农

117>黄金芽>福鼎大白>乌牛早>紫鹃>丹桂>铁观音。

《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)规定 $\text{pH} \leq 5.5$ 时, Cd 的农用地土壤污染风险筛选值为 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 风险管制值为 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。对照处理下, 各个品种土壤 Cd 含量低于风险筛选值; Cd 处理下各个品种土壤 Cd 含量介于风险筛选值与风险管制值之间, 总体低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 说明茶树在生长过程中会从土壤中吸收 Cd 运输到体内。

2.4 Cd 在茶树-土壤系统的富集和转运

从图 4a 可以看到, 对照、Cd 处理下不同茶树品种根部对 Cd 的富集系数范围为 1.19~2.83、7.17~30.12, 平均值分别为 1.96、17.94, 说明无论土壤是否被 Cd 污染, 茶树根部对 Cd 的富集能力均较强, Cd 处理下, 茶树根部对 Cd 的富集能力表现更强。对照处理下, 不同茶树品种根部富集能力依次为丹桂>黄金芽>浙农 117>乌牛早>安吉白茶>铁观音>中茶 108>紫鹃>福鼎大白; Cd 处理下, 不同茶树品种根部富集能力依次为铁观音>丹桂>紫鹃>乌牛早>黄金芽>福鼎大白>安吉白茶>中茶 108>浙农 117。

图 4b 显示对照、Cd 处理下根-枝干的转运系数范围分别是 0.413~0.760、0.017~0.078, 平均值分别为 0.55、0.041。对照处理的转运系数大于 Cd 处理, 原因是对照处理下不同茶树品种根部 Cd 含量较高, 而枝干的 Cd 含量较低, 因此计算得出对照处理的转运系数较大。从图 4b 可以看到, 对照处理下不同茶树品种根-枝干的转运能力依次为中茶 108>紫鹃>福鼎大白>黄金芽>铁观音>乌牛早>安吉白茶>丹桂>浙农 117; Cd 处理下, 不同茶树品种根-枝干的转运能力依次为浙农 117>中茶 108>黄金芽>铁观音>丹桂>安吉白茶>紫鹃>福鼎大白>乌牛早。

图 4c 显示对照、Cd 处理下根-成熟叶的转运系数

范围分别是 0.043~0.105、0.002~0.007, 平均值分别为 0.066、0.004。对照处理下不同茶树品种根-成熟叶的转运能力依次为福鼎大白>紫鹃>中茶 108>乌牛早>黄金芽>安吉白茶>铁观音>浙农 117>丹桂; Cd 处理下不同茶树品种根-成熟叶的转运能力依次为浙农 117>中茶 108>黄金芽>丹桂>福鼎大白>紫鹃>安吉白茶>乌牛早>铁观音。

从图 4d 可以看到, 对照、Cd 处理下根-新梢的转运系数范围分别是 0.006~0.073、0.000 3~0.006 1, 平均值分别为 0.024、0.002。对照处理下不同茶树品种根-新梢的转运能力依次为紫鹃>浙农 117>福鼎大白>黄金芽>丹桂>安吉白茶>中茶 108>铁观音>乌牛早; Cd 处理下不同茶树品种根-新梢的转运能力依次为浙农 117>紫鹃>黄金芽>中茶 108>福鼎大白>丹桂>铁观音>安吉白茶>乌牛早。

以上研究结果表明, Cd 在茶树体内的分布趋势表现为根>枝干>成熟叶>新梢, 茶树吸收 Cd 之后主要富集在根部, 这与前人的研究结果相同^[16-18]。

2.5 Cd 处理下不同茶树品种根部镉相关转运蛋白编码基因的表达

一般认为镉没有特异的转运蛋白, 其通常借助锌、铁、钙、锰等二价阳离子的转运体系^[23], 包括调控重金属向细胞内转运能力的主要基因: 锌铁调控蛋白 (Zinc-iron regulatory proteins, ZIP 家族)、黄色条纹样蛋白 (Yellow stripe-like, YSL 家族)、天然抗性相关巨噬细胞蛋白 (Natural-resistance-associated macrophage protein, Nramp) 等; 调控重金属在细胞内储存能力的主要基因: ATP 结合盒 (ABC) 转运器 (ATP-binding cassette transporter)、阳离子交换体 (Cation exchange, CAX) 和 $\text{P}_{1\text{B}}$ 型 ATPases ($\text{P}_{1\text{B}}$ type ATPase, HMA)^[24-25]。

茶树为叶用植物, 生产中主要采食新梢部分。由

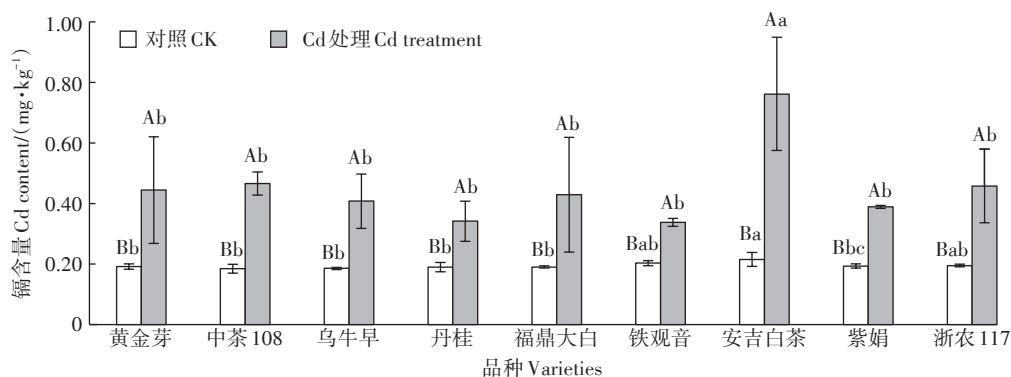


图 3 不同茶树品种土壤的 Cd 含量

Figure 3 Content of Cd in soil of tea plant varieties

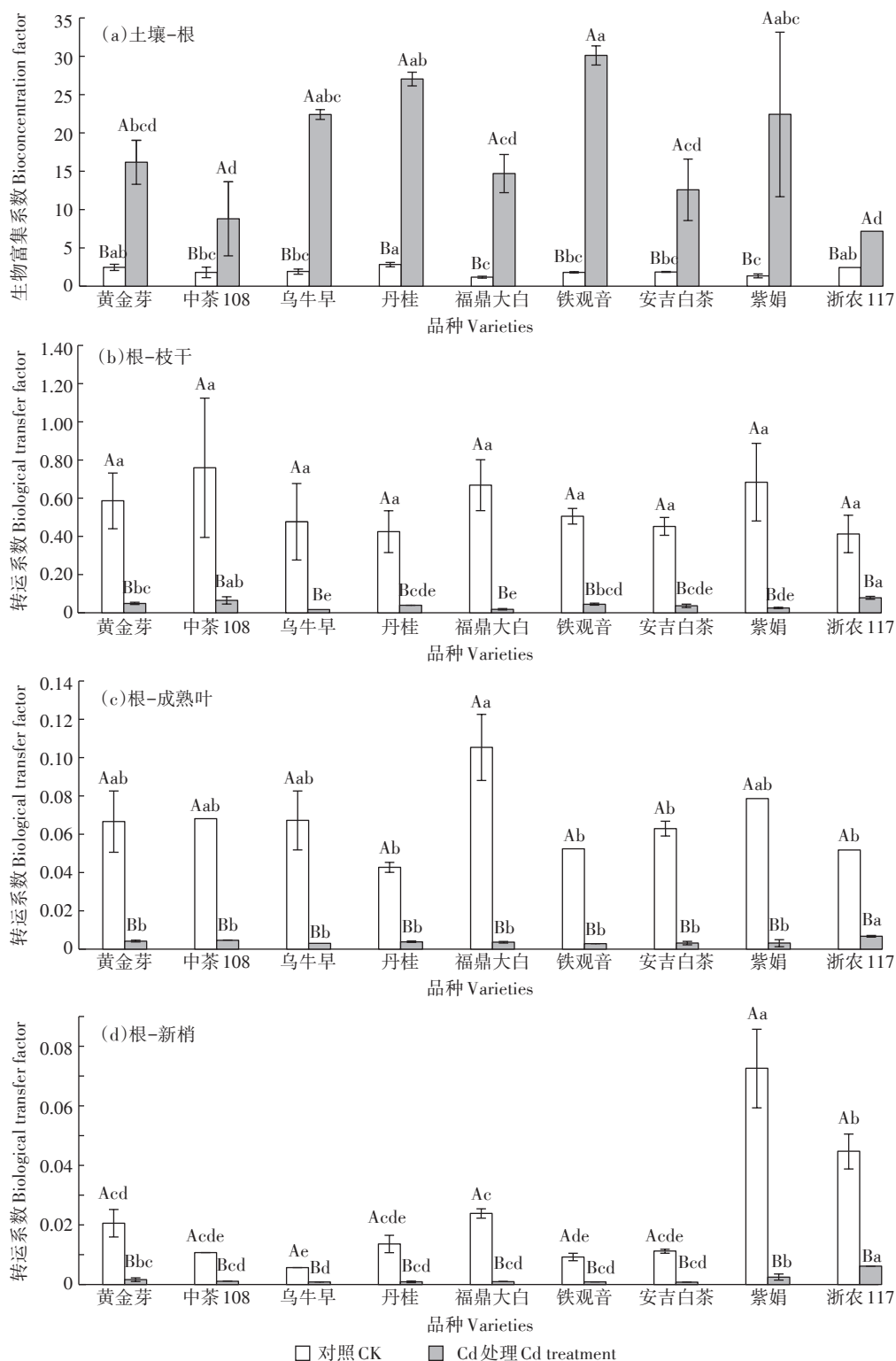


图4 不同茶树品种对Cd的富集及新梢、成熟叶、枝干对Cd的转运

Figure 4 Cd accumulation in roots and translocation to young leaves, mature leaves and branches in different tea plant varieties

以上研究结果可以得出,新梢中Cd含量从高到低依次为浙农117>紫鹃>黄金芽>铁观音>安吉白茶>丹桂>福鼎大白>中茶108>乌牛早,因此挑选新梢Cd含量最高的两个品种(浙农117和紫鹃)和Cd含量最低

的两个品种(中茶108和乌牛早)测定镉相关转运蛋白的基因表达。从浙农117、紫鹃、中茶108和乌牛早在不同部位的镉分布率(图5b)来看,镉主要分布在茶树的根部。因此,重点分析茶树根部镉相关转运蛋

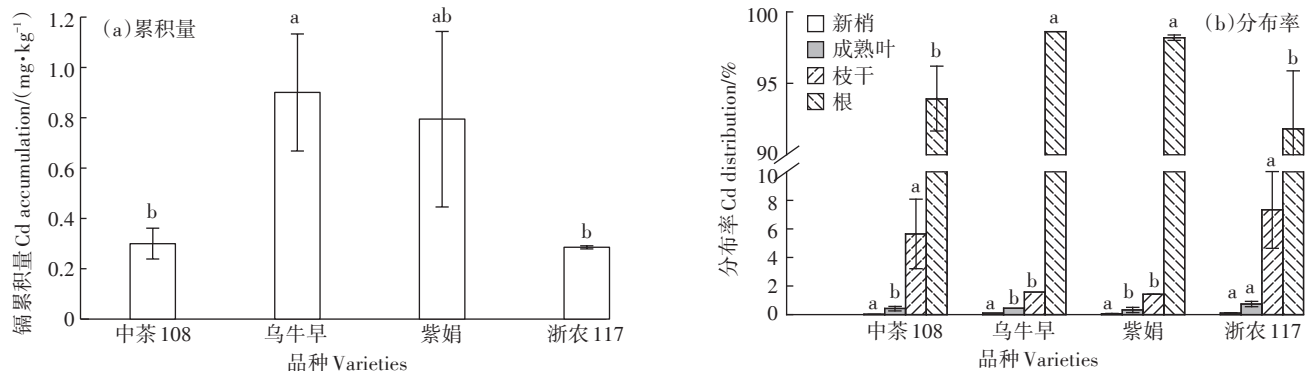


图5 中茶108、乌牛早、浙农117和紫鹃镉的总累积量与分布率

Figure 5 Cd total accumulation and distribution in Zhongcha108, Wuniuzao, Zhenong117 and Zijuan

白编码基因的表达情况,测定的基因有 *CsZIP1*、*CsZIP2*、*CsHMA1*、*CsHMA2* 和 *CsCAX2*。

图5a为浙农117、紫鹃、中茶108和乌牛早镉的总累积量,从中可以看出紫鹃与乌牛早镉的总累积量高于中茶108和浙农117。图6为Cd处理下不同茶树品种根部镉相关转运蛋白编码基因的表达情况,由图6a、图6b可知, *CsZIP1*、*CsZIP2*在紫鹃中表达量最高,图6c中 *CsHMA1*在这四个品种的表达无显著差异,从图6d、图6e中可以看出 *CsHMA2* 和 *CsCAX2*在紫鹃中表达量最高。由此可知, *CsZIP1*、*CsZIP2*、*CsHMA2* 和 *CsCAX2*在茶树根部的表达量与品种间镉总累积量的差异相一致,推测 *CsZIP1*、*CsZIP2*、*CsHMA2* 和 *CsCAX2*在茶树吸收累积镉的过程中起主要作用,但其相关机理需要进一步研究。

3 结论

(1)土壤外源添加Cd含量 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理下,各品种茶树新梢Cd含量依次为浙农117>紫鹃>黄金芽>铁观音>安吉白茶>丹桂>福鼎大白>中茶108>乌牛早;成熟叶Cd含量依次为黄金芽>安吉白茶>浙农117>丹桂>铁观音>乌牛早>福鼎大白>紫鹃>中茶108;枝干Cd含量依次为黄金芽>铁观音>安吉白茶>浙农117>丹桂>紫鹃>中茶108>乌牛早>福鼎大白;根中Cd含量依次为安吉白茶>乌牛早>铁观音>紫鹃>黄金芽>丹桂>福鼎大白>中茶108>浙农117。综上,Cd处理下,浙农117新梢中Cd含量最高,而根部Cd含量最低。

(2)不同Cd处理对茶树各部分Cd含量影响不同,对照处理下,不同品种茶树新梢、成熟叶、枝干、根的平均Cd含量为0.033、0.090、0.185、 $1.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著低于这四个部位Cd处理下的平均Cd含量0.044、

0.112、0.293、 $32.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。可以看出,茶树体内镉含量最高的部位是根部,茶树各部位镉含量呈现出自下而上递减的规律。

(3)本研究中9种茶树品种新梢的Cd含量都远低于国家标准限值($\text{Cd} \leq 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),说明当茶园土壤Cd含量介于风险筛选值($0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)与风险管控值($1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)之间时,茶叶是可以放心采摘的。

(4)从茶树根部镉相关转运蛋白编码基因的表达情况来看,推测 *CsZIP1*、*CsZIP2*、*CsHMA2* 和 *CsCAX2*在茶树吸收累积镉的过程中起主要作用,但其相关机理需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17). http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm. Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. Report on the national general survey of soil contamination[EB/OL]. (2014-04-17). http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm.
- [2] 国家茶叶产业技术体系产业经济研究室. 2018年我国茶叶产销形势分析[J]. 中国茶叶, 2019, 41(4): 28-29. Industrial Economy Research Office of National Tea Industry Technology system. Analysis of China's tea production and marketing situation in 2018[J]. *China Tea*, 2019, 41(4): 28-29.
- [3] Karak T, Bhagat R M. Trace elements in tea leaves, made tea and tea infusion: A review[J]. *Food Research International*, 2010, 43(9): 2234-2252.
- [4] Han W Y, Zhao F J, Shi Y Z, et al. Scale and causes of lead contamination in Chinese tea[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 139(1): 125-132.
- [5] 石元值,马立峰,韩文炎,等. 浙江省茶园中铅元素含量现状研究[J]. 茶叶科学, 2003(2): 163-166. SHI Yuan-zhi, MA Li-feng, HAN Wen-yan, et al. Study on the status of lead content in tea gardens of Zhejiang Province[J]. *Journal of Tea Science*, 2003(2): 163-166.

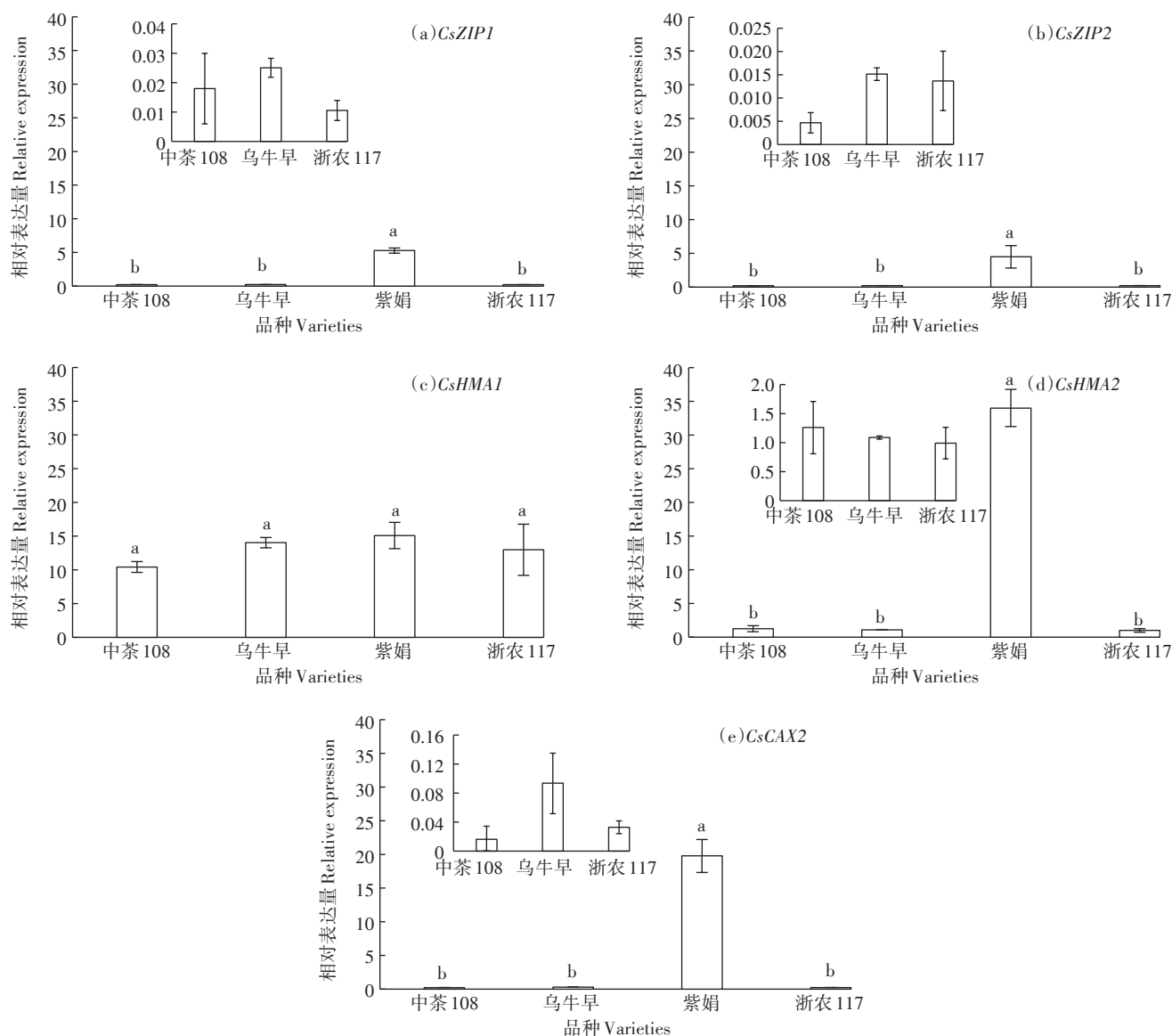


图6 Cd处理下不同茶树品种根部镉相关转运蛋白编码基因的表达情况

Figure 6 Effect of Cd on gene expression of Cd transporter in different tea varieties

- [6] 冯雪. 陕西茶园土壤重金属铜、镉、铅对茶树生长影响的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2010. FENG Xue. Study on the effect of copper, cadmium and lead in soils on the growth of tea plant in Shaanxi Province[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010.
- [7] 王京文, 李丹, 杨文叶, 等. 杭州典型茶园土壤肥力及环境质量现状分析[J]. 中国农学通报, 2017, 33(7): 75-80. WANG Jing-wen, LI dan, YANG Wen-ye, et al. Investigation of nutrient and heavy metals in tea garden soil in Hangzhou[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(7): 75-80.
- [8] 颜明娟, 吴一群, 张辉, 等. 福建茶园土壤及茶叶重金属监测及污染评价[J]. 茶叶学报, 2016, 57(2): 71-75. YAN Ming-juan, WU Yi-qun, ZHANG Hui, et al. Heavy metal contaminations in plantation soils and tea products in Fujian[J]. *Acta Tea Sinica*, 2016, 57(2): 71-75.
- [9] Zhou L Q, Shi Z, Zhu Y W. Assessment and mapping of heavy metals pollution in tea plantation soil of Zhejiang Province based on GIS[C]//

- Computer and Computing Technologies in Agriculture II, Volume 1. Boston: Springer US, 2009: 69-78.
- [10] 张清海, 龙章波, 林绍霞, 等. 贵州云雾茶园土壤高含量重金属和砷在茶叶中的积累与浸出特征[J]. 食品科学, 2013, 34(8): 212-215. ZHANG Qing-hai, LONG Zhang-bo, LIN Shao-xia, et al. Distribution of heavy metals in soil and tea from Yunwu tea area in Guizhou Province and diffusion characteristics[J]. *Food Science*, 2013, 34(8): 212-215.
- [11] 武晨, 王银海, 姬鹏程, 等. 陕西西乡县茶园土壤重金属含量分析及污染评价[J]. 陕西农业科学, 2017, 63(4): 36-39, 43. WU Chen, WANG Yin-hai, JI Peng-cheng, et al. Analysis of heavy metals content and pollution evaluation in tea garden soil of Xixiang County, Shaanxi Province[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 63(4): 36-39, 43.
- [12] 仝丽. 日照绿茶茶园土壤重金属形态分布及生物有效性研究[D].

- 日照:曲阜师范大学, 2018:6-10. QI Li. Speciation distribution and bioavailability of heavy metals in soil of Rizhao green tea garden [D]. Rizhao:Qufu Normal University, 2018:6-10.
- [13] 孔樟良, 谢国雄. 杭州市典型茶园土壤与茶叶中重金属的积累与来源分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(10):226-231. KONG Zhang-liang, XIE Guo-xiong. Accumulation and sources of heavy metals in soil and tea-leaf in typical tea gardens in Hangzhou[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(10):226-231.
- [14] 李云, 张进忠, 童华荣. 重庆市某茶园土壤和茶叶中重金属的监测与污染评价[J]. 中国农学通报, 2007(7):519-524. LI Yun, ZHANG Jin-zhong, TONG Hua-rong. Monitoring of heavy metals in soil of a tea garden and teas in Chongqing and pollution evaluation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007(7):519-524.
- [15] 李品武. 茶树吸收累积四种重金属离子的耐抗特性及超微定位表征[D]. 成都:四川农业大学, 2015. LI Pin-wu. Characteristics of tolerance and resistance of four heavy metal ions uptake/accumulation and the characterization of ultra-structure localization in tea plant (*Camellia sinensis* L.)[D]. Chengdu:Sichuan Agricultural University, 2015.
- [16] 吕亚敏, 杨京平, 赵杏, 等. 磷肥对茶园土壤中镉有效性及其生物累积的影响[J]. 浙江大学学报(理学版), 2015, 42(6):726-731, 754. LÜ Ya-min, YANG Jing-ping, ZHAO Xing, et al. Effects of different phosphate fertilizers on the availability and bioaccumulation of cadmium in the tea garden soil[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2015, 42(6):726-731, 754.
- [17] 刘东娜. 水培茶树吸收铬和镉的累积与耐受特性及初步调控作用研究[D]. 成都:四川农业大学, 2014. LIU Dong-na. The accumulation and distribution characteristics of Cr^{3+} and Cd^{2+} in tea plants cultured in hydroponics and the way of controlling[D]. Chengdu:Sichuan Agricultural University, 2014.
- [18] 赵雅婷. 茶树吸收土壤铅、铜和镉的累积与分布特征[D]. 成都:四川农业大学, 2012. ZHAO Ya-ting. The accumulation and distribution characteristics of Pb, Cu and Cd from soil by tea plant[D]. Chengdu:Sichuan Agricultural University, 2012.
- [19] 李庆华. 人工湿地植物重金属分布规律及富集性研究[D]. 西安:长安大学, 2014. LI Qing-hua. Spatial distribution and accumulation characteristics of heavy metals in constructed wetlands plants[D]. Xi'an:Chang'an University, 2014.
- [20] 刘志华, 伊晓云, 曾其龙, 等. 低浓度镉对大白菜苗期生长及营养元素吸收积累的影响研究[J]. 土壤, 2008, 40(4):630-634. LIU Zhi-hua, YI Xiao-yun, ZENG Qi-long, et al. Study on growth and accumulation of nutrient elements in Chinese cabbage at seedling stage under low Cd stress[J]. *Soil*, 2008, 40(4):630-634.
- [21] Zhi Y, He K X, Sun T et al. Assessment of potential soybean cadmium excluder cultivars at different concentrations of Cd in soils[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 35(9):108-114.
- [22] 刘周莉, 陈玮, 何兴元, 等. 低浓度镉对忍冬生长及光合生理的影响[J]. 环境化学, 2018, 37(2):223-228. LIU Zhou-li, CHEN Wei, HE Xing-yuan, et al. Effects of low concentration cadmium on the growth and photosynthetic physiology of *Lonicera japonica* Thunb[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(2):223-228.
- [23] He J L, Li H, Luo J, et al. A transcriptomic network underlies microstructural and physiological responses to cadmium in *Populus×canescens*[J]. *Plant Physiology*, 2013, 162:424-439.
- [24] 杨茹月, 李彤彤, 杨天华, 等. 植物基因工程修复土壤重金属污染研究进展[J]. 环境科学研究, 2019, 32(8):1294-1303. YANG Ru-yue, LI Tong-tong, YANG Tian-hua, et al. Advances in enhanced phytoremediation by genetic engineering technology for heavy metals pollution in soil[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(8):1294-1303.
- [25] 曹玉巧, 聂庆凯, 高云, 等. 植物中镉及其螯合物相关转运蛋白研究进展[J]. 作物杂志, 2018(3):15-24. CAO Yu-qiao, NIE Qing-kai, GAO Yun, et al. The studies on cadmium and its chelate related transporters in plants[J]. *Crops*, 2018(3):15-24.