

王效瑾, 高巍, 赵鹏, 等. 小麦幼苗根系形态对镉胁迫的响应[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6): 1218–1225.

WANG Xiao-jin, GAO Wei, ZHAO Peng, et al. Changes to wheat seedling root morphology in response to cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6): 1218–1225.

## 小麦幼苗根系形态对镉胁迫的响应

王效瑾, 高巍\*, 赵鹏\*, 于冲冲, 刘红恩, 聂兆君, 秦世玉, 李畅

(河南农业大学资源与环境学院, 河南省土壤污染防治与修复重点实验室, 郑州 450002)

**摘要:**为了研究镉(Cd)在小麦体内的吸收、转运过程,以及Cd对小麦根系形态的影响,本文通过水培试验分析了小麦在5种Cd水平下(0、0.5、5、50、200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )处理3、6、11、17 d和23 d后各项生长指标的变化,并用荧光显微镜观察了Cd处理17 d后小麦根系形态的变化情况。结果表明,小麦幼苗对Cd的吸收能力与Cd浓度成反比关系,且在Cd0.5处理下,小麦对Cd的吸收和转运的能力显著高于其他处理。随着Cd处理浓度的增加,小麦幼苗的生物量、株高、总根长、根体积、总根尖数目逐渐减小,根系平均直径逐渐增加。相关性分析结果表明,小麦幼苗对Cd的吸收能力与平均直径呈显著正相关,对Cd的转运能力仅与平均直径呈显著负相关。进一步通过荧光显微镜观察,结果显示Cd处理可诱导小麦幼苗根系皮层细胞增多、薄壁细胞增大以及内皮层细胞壁木质素的沉积。Cd诱导的根系直径增粗对小麦Cd的吸收及转运都起着非常重要的作用。

**关键词:**重金属;小麦;Cd吸收;Cd转运;根系形态;根直径

中图分类号:S512 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)06-1218-08 doi:10.11654/jaes.2018-1407

### Changes to wheat seedling root morphology in response to cadmium stress

WANG Xiao-jin, GAO Wei\*, ZHAO Peng\*, YU Chong-chong, LIU Hong-en, NIE Zhao-jun, QIN Shi-yu, LI Chang

(College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Key Laboratory of Soil Pollution Prevention and Control and Remediation in Henan Province, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** The current study is aimed at investigating the absorption and transport processes of cadmium (Cd) in wheat, and changes in wheat root morphology, in response to Cd treatment. A hydroponic experiment was conducted to investigate the effect of different Cd concentrations (0, 0.5, 5, 50, and 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) on wheat seedling growth and root morphology. Wheat growth was measured after 3, 6, 11, 17, and 23 d of Cd treatment, and root morphology was determined after 17 d of treatment. The results demonstrated the presence of a negative correlation between Cd uptake ability and the Cd concentration in wheat, and that maximum absorption and transport abilities were found under Cd 0.5 treatment. With increased Cd treatment concentration, wheat seedling biomass, plant height, total root length, root volume, and numbers of total root tips decreased gradually, while root average diameter increased significantly. Correlation analysis showed that seedling Cd uptake ability was positively correlated, while transport capacity was negatively related, with average root diameter. Further observation by fluorescence microscopy showed that Cd treatment could induce increased root cortical cell numbers, enlargement of parenchyma cells, and deposition of lignin in endodermal cell walls. Cd-induced increase in average root diameter may play an important role in Cd absorption and transportation in wheat.

**Keywords:** heavy metal; wheat; cadmium uptake; cadmium transport; root morphology; root average diameter

收稿日期:2018-11-08 录用日期:2019-01-29

作者简介:王效瑾(1994—),女,河南驻马店人,硕士研究生,主要从事小麦吸收和运输重金属镉的机制研究。E-mail:1963739740@qq.com

\*通信作者:高巍 E-mail:gaowei\_1126@163.com;赵鹏 E-mail:zhpdyy@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(U1504313)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(U1504313)

镉(Cadmium, Cd)作为人体非必需元素,是毒性最强的重金属元素之一。当土壤受到Cd污染后, Cd会在生物体内富集,并通过食物链进入人体从而引起慢性中毒<sup>[1]</sup>。因此,目前Cd引起的环境污染问题已经受到了广大学者的普遍关注<sup>[2]</sup>。

Cd在土壤-植物-人中的迁移是目前环境Cd污染及人类健康风险研究的重点和热点问题之一,植物对Cd的吸收与转运则是解决问题的基础和关键环节。目前已有研究表明,植物对Cd的吸收、转运和分布积累是一个动态的过程,包括根系的活化和吸收、木质部的装载和运输以及韧皮部装载和向籽粒中的进一步转运<sup>[3]</sup>。目前国内外有关Cd对植物影响的研究多数集中在研究Cd对植物地上部分的影响方面,如抑制蒸腾作用,使叶片失绿,损坏光合系统,最终导致光合效率下降,影响作物的产量与品质等<sup>[4-5]</sup>。而根系是植物的主要吸收器官<sup>[6]</sup>,其形态、生长和空间分布直接决定着植物对重金属的吸收能力和吸收效率。研究表明,过量的Cd积累会抑制根系生长,从而降低Cd的吸收能力。因此,研究根系对重金属胁迫的响应对于揭示植物抵抗重金属胁迫的机理具有重要意义。而小麦是我国主要的粮食作物,也是世界上覆盖最广的粮食作物,研究Cd在小麦体内吸收和运转机制,对于保障食品安全、实现粮食作物可持续生产具有重要的现实意义。因此,本文研究了在不同浓度的Cd胁迫下小麦幼苗根系形态的变化和Cd吸收动力学,以期了解Cd在小麦体内吸收和转运的过程。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试小麦品种为河南省广泛种植的百农207。

### 1.2 试验设计

本试验于2017年12月在河南农业大学资源与环境学院楼光照培养室进行。试验选择大小一致、圆润饱满的小麦种子,用自来水冲洗数次后,用蒸馏水冲洗3次,去离子水冲洗3次,之后再用去离子水浸泡12 h,将吸胀后的种子摆放于塑料盆中的尼龙网上,每盆约300粒,置于光照培养室中培养(温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,湿度 $75\%\pm 1\%$ ,光照时间12 h),待小麦幼苗长至一叶一心时,选择长势一致的幼苗移入2 L含有 $2.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $3.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ KNO}_3$ ,  $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaH}_2\text{PO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $50\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ EDTA-Fe}$ ,  $23\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ H}_3\text{BO}_3$ ,  $4.5\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $0.15\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $0.4\text{ }\mu\text{mol}\cdot$

$\text{L}^{-1}\text{ ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 $0.045\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的营养液的塑料盆中培养。第一周使用半强度的营养液,之后用全强度的营养液培养。待小麦幼苗长至2叶1心时(移苗后一周左右),添加不同的Cd处理。

本试验Cd<sup>2+</sup>处理浓度为0.5、5、50、200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , Cd源为 $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ ,以Cd<sup>2+</sup>处理浓度 $0\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 为对照。每个处理重复3次,每3 d更换1次营养液。

### 1.3 测定方法

#### 1.3.1 生长指标的测定

在Cd处理0、3、6、11、17、23 d,分别收获植株,将根系和地上部分分开,用刻度尺(最小分度单位为mm)测定株高和根长。用刻度尺测量根颈部至幼苗顶端叶尖,即为株高;测量根尖到幼苗茎基部的长度,即为根长<sup>[7]</sup>。

#### 1.3.2 根系形态的测定

在Cd处理后第3、6、11、17、23 d后,分别收获植株,将根系和地上部分分开,根系用EPSON全自动扫描仪扫描记录小麦的根系形态并获取根系图像,然后采用WinRHIZO 2009根系扫描分析系统(加拿大)分析得出小麦幼苗的总根长、根总表面积、根体积、平均直径和根尖数等。

#### 1.3.3 根系横切面解剖结构的观察

在Cd处理后第17 d时,取距根尖10 cm处的2 cm长度的主根,置于装有FAA固定液(40%甲醛:冰乙酸:70%酒精=1:1:18)的2 mL离心管中固定过夜,之后用OCT包埋剂包埋24 h,然后在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境下利用冷冻切片对根尖进行横向切片,切片厚度为 $35\text{ }\mu\text{m}$ ,切片后将其附在载玻片上,放在玻片盒中。在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下冷冻干燥3 d,样品冻干后,用荧光显微镜对根尖切片进行观察。

#### 1.3.4 干质量、Cd含量的测定

在Cd处理后第0、3、6、11、17、23 d每盆取3株样品,将其地上部分和根分开,根系用 $20\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Na}_2\text{-EDTA}$ 浸泡15 min,以除去表面吸附的Cd<sup>2+</sup><sup>[8]</sup>,然后用去离子水漂洗、沥干后,和地上部分放在烘箱中 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青30 min, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒质量,然后称量,记录地上部分和根系的干质量(DW),并进行Cd含量的测定。

干质量的测定:将根系和地上部洗净擦干后分别装入纸袋中,用烘箱烘干至恒质量,在万分之一的电子天平上测定干质量。

Cd含量测定:参照Zhao等<sup>[9]</sup>的方法。称取适量干样,用硝酸-高氯酸混合酸(体积比为4:1)消煮完全,

用体积分数为0.5%的 $\text{HNO}_3$ 定容到25 mL容量瓶中,用火焰原子吸收分光光度计(ZEEnit 700; Analytik Jena AG, 德国)测定Cd含量。

Cd在植物体内由根系向地上部分转运的转运系数(TF)、富集系数(BCF)及根冠比按下列公式计算:

富集系数=植株Cd含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )/溶液中Cd含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

转运系数=植株地上部Cd含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )/植株地下部Cd含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

根冠比=根部干质量/地上部干质量

#### 1.4 数据分析

采用Excel 2010进行数据处理,利用DPS进行方

差分析(ANOVA),使用Sigmaplot 10.0进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 Cd处理对小麦幼苗生长指标的影响

株高、根长、干物质质量等指标是衡量小麦幼苗生长的重要指标。为了解不同Cd浓度处理对小麦幼苗生长的影响,在试验中测定了小麦幼苗的株高、根长和干物质质量(图1)。

由图1可以看出,在低浓度( $0.5\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )Cd处理条件下,与0 d时相比,小麦幼苗在6 d时的根长增加了59.48%和51.22%,与6 d时相比,23 d的根长增加了136.43%和138%。低浓度Cd处理

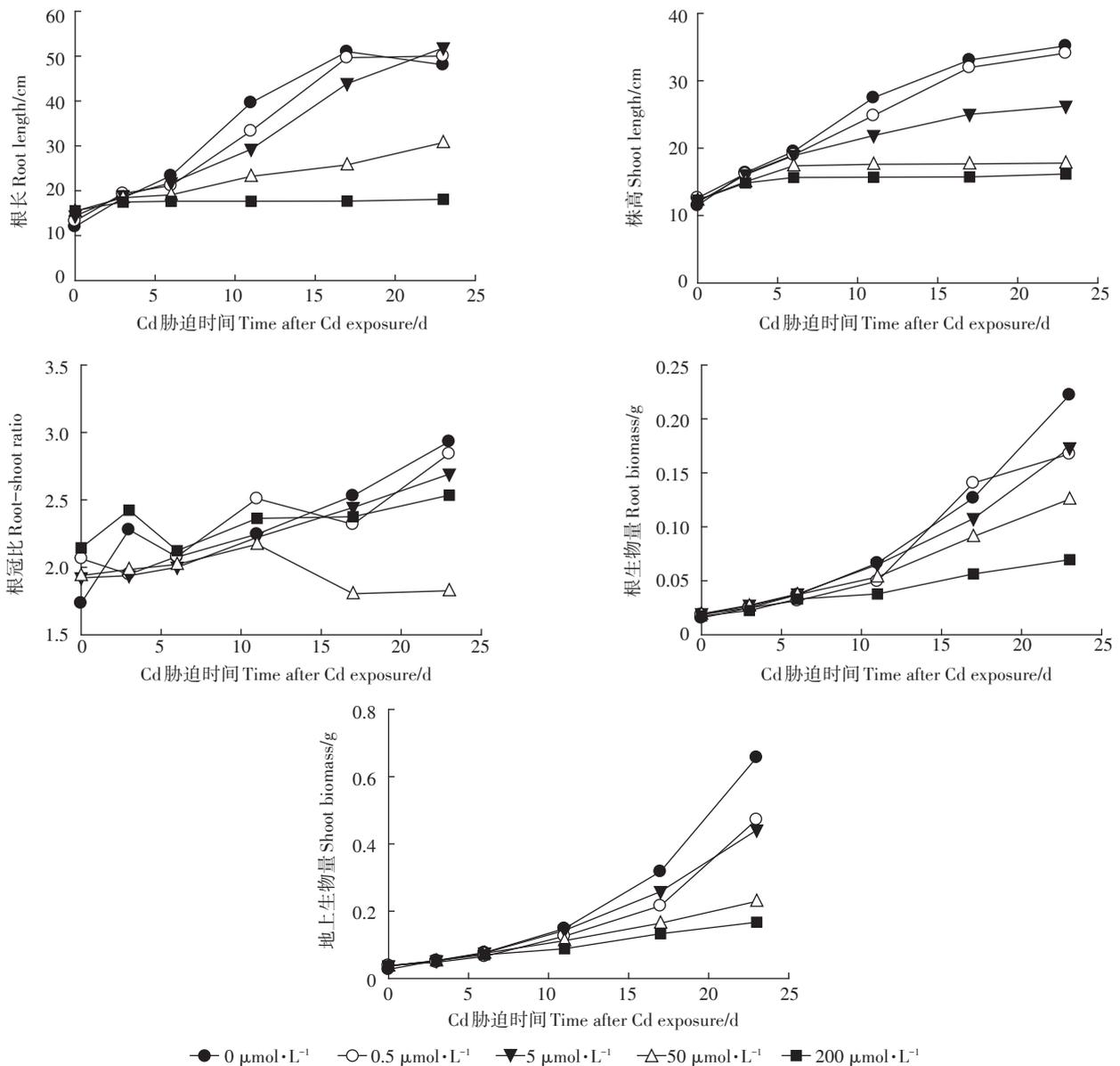


图1 Cd处理对小麦幼苗生长指标的影响

Figure 1 Effect of Cd treatment on growth index of wheat seedling

下,小麦幼苗的根长在0~6 d时的增加速率低于6~23 d。在高浓度(50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )Cd处理下,小麦幼苗根长的增加幅度则与低浓度Cd处理下的增加幅度相反,6~23 d的根长增加幅度(16.46%和2.41%)低于0~6 d(23.7%和13.44%)。各个Cd浓度处理下株高的趋势与根长的相似。出现这种现象的原因可能是因为高浓度的Cd处理使小麦幼苗的株高和根长的生长受到严重的抑制作用。在Cd50水平下,小麦幼苗的根冠比较低,且随着时间的增加呈下降趋势,说明此条件下小麦幼苗的根系生长受到的毒害比地上部严重。

在试验过程中观察发现在受到高浓度(50、200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )Cd处理11 d后,小麦幼苗根系发黑,下部叶片的叶梢开始发黄干枯,生长比较迟缓。幼苗在第11 d开始出现表型差异,表明Cd对植物的危害是一个缓慢的过程,短时间内受到的毒害作用不明显,随着处理时间的增加,毒害作用不断累积增强。在Cd处理后第23 d时,小麦幼苗根系及地上部分生物量均为: Cd0>Cd0.5 $\approx$ Cd5>Cd50>Cd200。

## 2.2 Cd处理对小麦幼苗吸收和转运的影响

小麦幼苗的整株Cd积累量是幼苗的整株干质量与其整株Cd含量的乘积。由图2可以看出,随着Cd

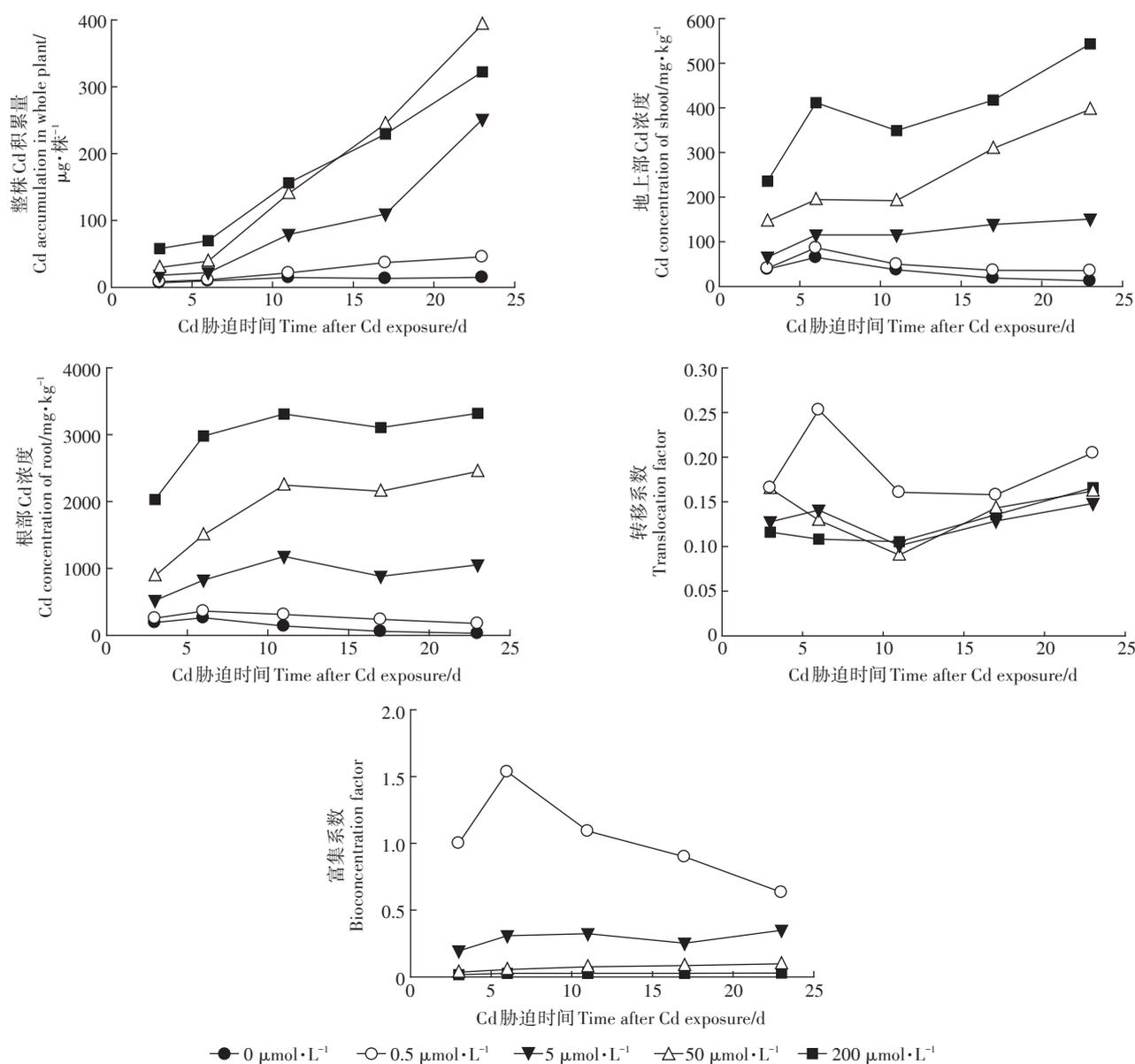


图2 Cd处理对小麦整株Cd积累量、Cd含量、转运系数和富集系数的影响

Figure 2 Effects of cadmium treatment on cadmium accumulation, cadmium content, transport coefficient and enrichment coefficient of wheat

处理时间的增加,小麦幼苗整株的Cd积累量是逐渐增加的。Cd浓度为 $0\sim 0.5\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,小麦幼苗地上部和根部的Cd含量在第6 d时达到峰值。第6 d后,虽然小麦幼苗整株Cd积累量是增加的,但其地上部和根部Cd含量均下降,可能是由于小麦幼苗生物量的增长速度大于体内Cd积累的速度,构成生物稀释效应。小麦幼苗在 $50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd处理11~23 d时,地上部和根部的Cd含量显著高于 $0.5\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd处理( $P<0.05$ )。且在相同Cd水平下,小麦幼苗根部的Cd含量是远高于地上部的,大约为2~17倍。

转运系数是反映植物不同部位间重金属迁移能力大小的指标。Cd处理浓度为 $0.5\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,Cd在小麦中的转移系数为 $0.16\sim 0.25$ ,显著高于其他处理。在Cd处理后11~23 d,Cd在小麦幼苗中的转移系数为 $\text{Cd}0.5>\text{Cd}5\approx\text{Cd}50\approx\text{Cd}200$ ,表明Cd处理会抑制Cd从根系向地上部分的转移,这可能与小麦幼苗的生长在Cd处理下受到抑制,以致减少了随蒸腾流向地上部转运 $\text{Cd}^{2+}$ 的量有关。

富集系数表示重金属向植物体内迁移的难易程度,是表征植物对重金属吸收能力的一项重要评价指

标。从图2可以看出,不同Cd浓度下,Cd在小麦幼苗中的富集系数为 $\text{Cd}0.5>\text{Cd}5>\text{Cd}50>\text{Cd}200$ ,表明小麦对Cd的吸收能力与Cd处理浓度成反比关系。Cd浓度为 $0.5\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,小麦幼苗富集系数为 $0.63\sim 1.53$ ,在第6 d达到吸收最大值。在所有Cd处理中,小麦在Cd0.5时吸收和转运Cd的能力是最强的。与Cd0.5处理相比,Cd5、Cd50和Cd200处理后吸收能力分别下降了69.56%、92.21%和97.30%,转移能力分别下降了30.18%、24.68%和30.98%。

### 2.3 Cd处理对小麦幼苗根系形态参数的影响

根系直接与土壤接触,是植物与土壤环境接触的重要界面,土壤中Cd对植物的危害首先会表现在根系的变化上。根生长的好坏,直接制约着地上部分的生长和产量的高低。根长是描述根系吸收水分和养分能力的重要参数之一。根体积大小是反映根系生长发育状况的重要指标。根系直径是根系与环境介质直接接触的重要指标。小麦幼苗在重金属Cd处理下的根系形态的变化与超积累植物相比有所不同。

图3结果显示,在各个Cd浓度的处理下小麦幼苗的总根长、根体积和总根尖数在测定的时间段内基本都低于空白组,且在Cd处理后11~23 d,与对照相

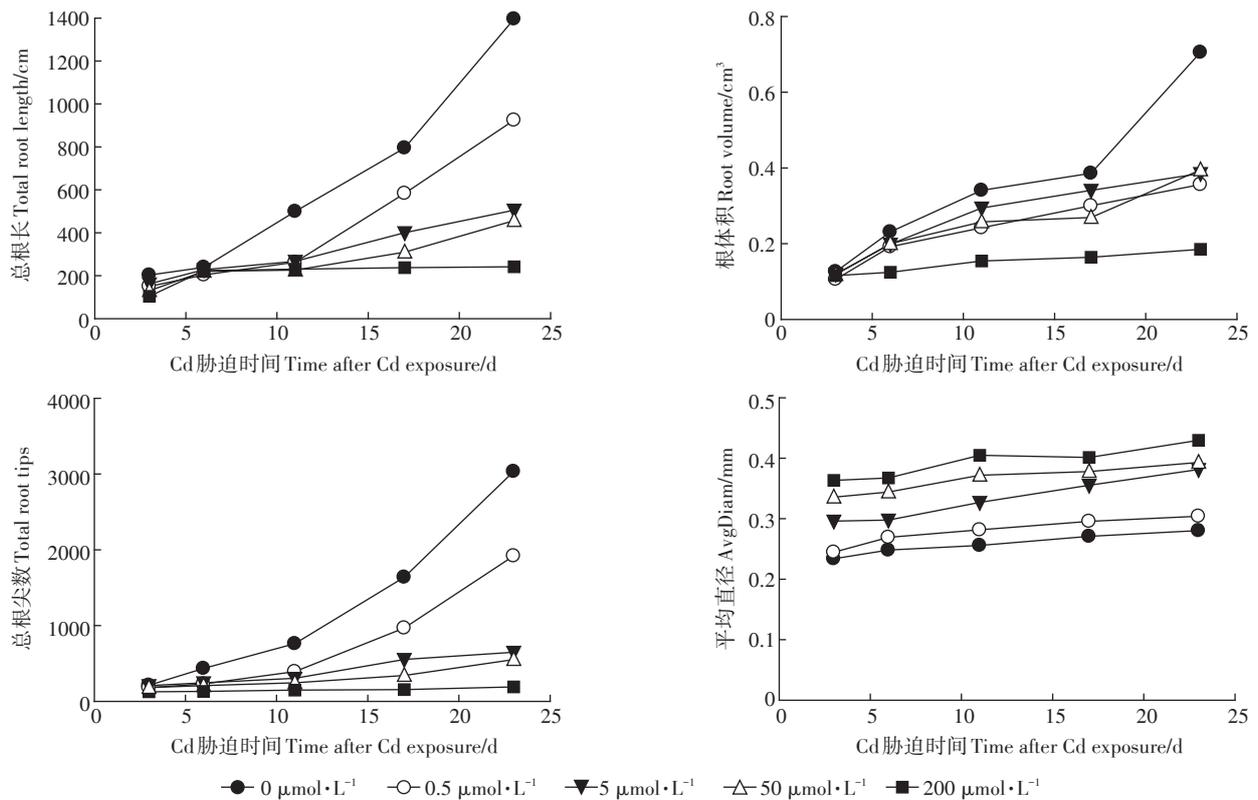


图3 Cd处理对小麦幼苗根系形态参数的影响

Figure 3 Effect of Cd treatment on root morphological parameters of wheat seedling

比,在Cd浓度为5~200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,幼苗的总根长和总根尖数降低显著( $P<0.05$ ),分别降低了46.51%~82.69%和48.52%~93.71%。这说明Cd处理会对小麦幼苗根系的吸收能力产生抑制作用。在Cd处理11 d后,小麦幼苗的根体积随着Cd浓度的增加降低了11.72%~73.74%,说明小麦幼苗的根系生长受到了严重的毒害作用。随着Cd处理时间的增加,各个Cd处理浓度下的小麦幼苗根系的平均直径总体上是增加的,这可能是小麦根系对Cd处理的响应。

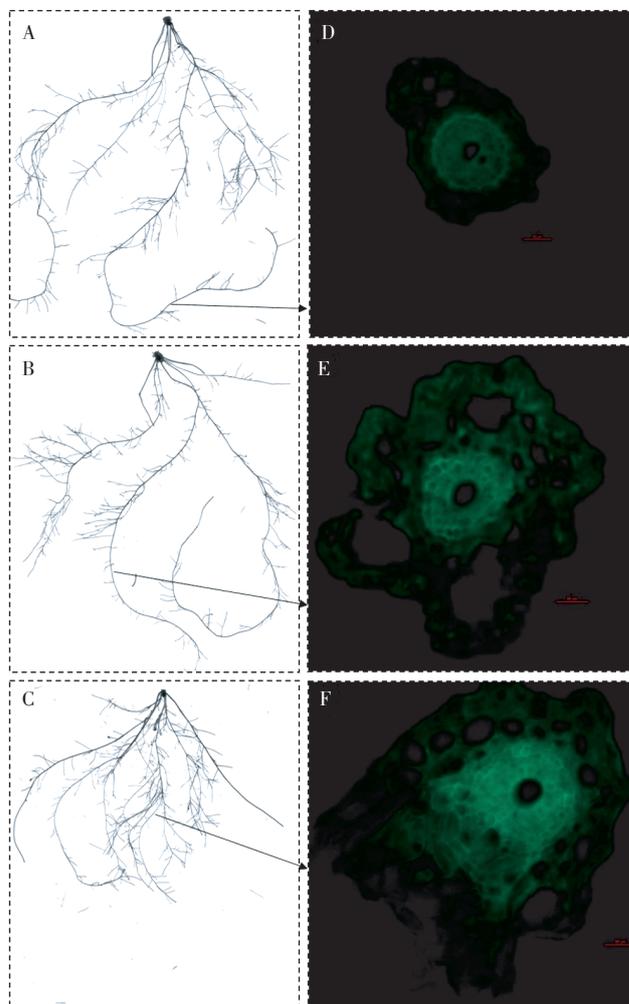
#### 2.4 根系形态参数与小麦幼苗Cd吸收和转运能力的相关性分析

为了研究小麦幼苗根系形态对Cd吸收、转运的影响,本文对测定的小麦幼苗的根系形态参数与转运系数、富集系数进行了相关性分析,见表1。

由表1可知,小麦幼苗的根系形态参数中,仅根平均直径与转运系数、富集系数都具有相关性,且相关性较强。小麦幼苗对Cd的吸收能力(即富集系数)与根平均直径呈显著正相关,且小麦幼苗中Cd向地上部的转移能力与根平均直径呈显著负相关,这说明在根系参数中,根直径对小麦Cd的吸收及转运都起着非常重要的作用。

#### 2.5 Cd处理对小麦幼苗根系的荧光观察

根系扫描图片(图4A至图4C)显示小麦幼苗在5、50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd处理17 d后根系形态与空白对照相比发生显著变化。为了进一步研究根系是如何应对Cd处理的响应,进行了小麦根系横切面的荧光显微镜观察,如图4D至图4F所示。木质素具有自发荧光,在紫外光激发后可发射出较强的荧光信号。从图4D至图4F可以看出,相较于空白对照,Cd处理后可以诱导根直径明显增粗。5  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd处理后,皮层细胞层数增多、细胞增大;内皮层细胞数量、大小无明显



A、B、C分别为Cd浓度为0、5、50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时小麦幼苗的根系扫描图片,D、E、F为荧光显微镜观察的图片,箭头为切片观察的部位  
A, B, and C are the root scan images of wheat seedling with cadmium stress concentrations of 0, 5, and 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , D, E, and F are the pictures observed by fluorescence microscopy, and the arrow is the part of the slice observation

图4 不同Cd处理下小麦根系切片荧光显微镜照片( $\times 200$ 倍)  
Figure 4 Fluorescence microscopy of wheat root sections under different cadmium treatments( $\times 200$  times)

表1 根系形态参数与小麦Cd转运系数和富集系数的相关性

Table 1 Correlation between root morphological parameters and Cd transport coefficient and enrichment coefficient of wheat

因子 Factors	根体积 Root volume	平均直径 Avg diam	根长 Length	总根尖数 Tips	富集系数 Enrichment factor	转运系数 Transport factors
根体积	1					
平均直径	-0.52*	1				
根长	0.04	0.35	1			
总根尖数	0.78**	-0.79**	-0.15	1		
根表面积	0.84**	-0.6*	-0.01	0.9*		
富集系数	0.3	0.83**	-0.54*	0.47	1	
转运系数	0.18	-0.53*	0.01	0.26	0.68**	1

注:\*表示在0.05水平上显著相关,\*\*表示在0.01水平上极显著相关。

Note:\* indicates a significant correlation at the 0.05 level,\*\* indicates a significant correlation at the 0.01 level.

显变化,但是荧光信号显著加强;50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd处理后,中皮层和内皮层的细胞数量有明显增多,荧光信号明显增强。荧光信号的增强,说明Cd诱导木质素沉淀。

### 3 讨论

#### 3.1 Cd处理对小麦幼苗生长指标的影响

Cd污染是植物生长过程遭受逆境胁迫中最普遍的重金属污染之一。Cd离子在土壤中的高度移动性致使其容易进入植物体内,累积到一定程度,会扰乱植物新陈代谢过程,从而对植物产生毒害<sup>[10]</sup>。其中生物量的变化程度可以反映出植物对Cd的耐性情况<sup>[11]</sup>,在本研究中,与对照(CK)相比,不同浓度Cd处理中小麦幼苗生长受到了不同程度的影响。本试验结果表明,在同一Cd处理时间下,施用低浓度(0.5、5  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )Cd对根和地上部生物量以及株高和根长各项生长指标的影响不显著,说明在低浓度Cd处理时,小麦幼苗对其有一定程度的耐性。而在高浓度(50、200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )Cd处理时,随着Cd浓度的增加,根和地上部生物量以及株高和根长均显著降低( $P<0.05$ )。并且随着处理时间延长,抑制程度加重。说明在高Cd浓度处理下,小麦幼苗受Cd毒害严重,生长缓慢。高浓度Cd处理抑制了小麦的生长,而由于植物组织的生长抑制和生物量的下降是细胞死亡的必然结果,因而揭示了Cd对小麦生长和生物量的抑制作用可能和其导致了细胞死亡有关<sup>[12]</sup>。

#### 3.2 Cd处理对小麦幼苗根系形态的影响

根系是植物体进行吸收和代谢的主要器官,在响应环境变化方面表现出高度的发育可塑性<sup>[13]</sup>,植物根系形态可塑性是其在特定环境下生存策略的重要表现<sup>[14]</sup>。重金属胁迫严重影响着植物根系的发育<sup>[15]</sup>,而根系形态和结构的变化反过来会影响根系对Cd吸收和木质部的装载效率,从而影响Cd在植物体内的转运和积累<sup>[16-18]</sup>。

本试验研究结果表明,高浓度Cd处理下,小麦幼苗的根长、根体积和总根尖数是降低的,但是根系的平均直径是逐渐增加的。这些数据与Ostonen等<sup>[19]</sup>的论点基本一致,其研究表明Cd胁迫下花生的根长、根表面积、根体积和总根尖数下降,根系平均直径增加。Cd处理诱导小麦幼苗根尖数量减少,表明侧根的形成可能被Cd抑制<sup>[20]</sup>,这也是植物对重金属胁迫的重要响应。植物的根尖是吸收的重要部位<sup>[21]</sup>,因此在Cd处理条件下根尖的数量减少意味着小麦幼苗吸收

养分的能力下降。Cd处理导致的根表面积减少,也会使小麦根系吸收养分能力减弱,从而对其生长造成影响<sup>[22]</sup>。

本试验相关性分析结果表明,根直径对小麦Cd的吸收及转运都起着非常重要的作用,且根系平均直径与Cd浓度成正比关系。Cd在小麦体内的运输依次经过表皮、皮层,穿过内皮层到达维管组织,小麦的“马蹄形”加厚结构可有效阻止Cd的质外体运输,并使得Cd在穿过加厚结构后,共质体途径成为其主要运输途径<sup>[23]</sup>。目前有研究表明,植物可以将Cd吸持到非活性部位以降低Cd的毒害,通过细胞壁的固持阻挡Cd进一步进入细胞内<sup>[24]</sup>。本试验根系横切面荧光显微镜观察结果显示,5  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd处理可诱导皮层细胞层数增多、薄壁细胞增大,从而使得皮层细胞可容纳更多Cd,减缓Cd的向内运输;50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  Cd处理可诱导皮层和内皮层薄壁细胞数量明显增多,厚壁细胞壁木质素进一步沉积,荧光信号增强<sup>[25]</sup>。木质素的沉淀可提高细胞壁结合重金属离子的能力,避免其过多地进入原生质体,危害细胞的生长发育<sup>[26]</sup>。

### 4 结论

重金属Cd对小麦幼苗生长状况、根系形态和吸收、转运Cd存在较为明显的剂量效应。施用低浓度Cd对小麦幼苗的根和地上部生物量以及株高和根长各项生长指标的影响不显著。本试验中在Cd浓度为0.5  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,小麦幼苗的富集系数和转运系数均为最大,说明此浓度下小麦幼苗对Cd的吸收和转运能力是最强的。高浓度的Cd处理下,小麦幼苗的根长、根体积和总根尖数逐渐降低,而根系平均直径逐渐增加,说明根平均直径的增加可能是小麦根系对Cd处理的响应。且相关性分析结果表明:Cd处理后根系平均直径的增粗对小麦Cd的吸收及转运都起着非常重要的作用。

#### 参考文献:

- [1] Zhang X F, Gao B, Xia H P. Effect of cadmium on growth, photosynthesis, mineral nutrition and metal accumulation of bana grass and vetiver grass[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2014, 106: 102-108.
- [2] Ali H, Khan E, Sajad M A. Phytoremediation of heavy metals: Concepts and applications[J]. *Chemosphere*, 2013, 91(7): 869-881.
- [3] Uraguchi S, Maori 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(9): 2677-2690.
- [4] 滕振宁, 方宝华, 刘洋, 等. 镉对不同品种水稻光合作用的影响

- [J]. 中国农业气象, 2016, 37(5):538-544.  
TENG Zhen-ning, FANG Bao-hua, LIU Yang, et al. Effect of cadmium on photosynthesis of different rice varieties[J]. *Chinese Journal of Agro-meteorology*, 2016, 37(5):538-544.
- [5] 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.
- [6] 邓 丹. 根系结构对水稻吸收砷的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.  
DENG Dan. Effect of root structure on absorption of arsenic in rice[D]. Shanghai: East China Normal University, 2009.
- [7] 李天哲, 陈爱婷, 李 彩, 等. 镉胁迫下硅对水稻幼苗生长与生理响应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6):1072-1078.  
LI Tian-zhe, CHEN Ai-ting, LI Cai, et al. Effects of silicon on the growth and physiological responses of rice seedlings under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6):1072-1078.
- [8] 李 君, 葛 跃, 王明新, 等. 镉对蓖麻耐性生理及营养元素吸收转运的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(8):3081-3087.  
LI Jun, GE Yue, WANG Ming-xin, et al. Effects of cadmium on the physiological and nutrient elements absorption and translocation of ramie[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(8):3081-3087.
- [9] Zhao F Y, Han M M, Zhang S Y, et al. Hydrogen peroxide-mediated growth of the root system occurs via auxin signaling modification and variations in the expression of cell-cycle genes in rice seedlings exposed to cadmium stress[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2012, 54(12):991-1006.
- [10] 张 欣, 王华忠, 王 利, 等. 不同品种小麦幼苗耐镉差异[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(7):61-65.  
ZHANG Xin, WANG Hua-zhong, WANG Li, et al. Differences in cadmium tolerance between different wheat varieties[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(7):61-65.
- [11] Zhang X F, Zhang X H, Gao B, et al. Effect of cadmium on growth, photosynthesis, mineral nutrition and metal accumulation of an energy crop, king grass (*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*) [J]. *Biomass & Bioenergy*, 2014, 67:179-187.
- [12] 冯汉青, 杜变变, 王庆文, 等. 镉胁迫下活性炭对小麦幼根的保护作用[J]. 生态学报, 2016, 36(10):2962-2968.  
FENG Han-qing, DU Bian-bian, WANG Qing-wen, et al. Protective effect of activated carbon on young roots of wheat under cadmium stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(10):2962-2968.
- [13] Malamy J. Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2005, 28:67-77.
- [14] 王艺霖, 周 玫, 李 苹, 等. 根系形态可塑性决定黄栌幼苗在瘠薄土壤中的适应对策[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(6):60-69.  
WANG Yi-lin, ZHOU Mei, LI Ping, et al. Root morphological plasticity determines the adaptation strategies of *Astragalus* seedlings in infertile soil[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(6):60-69.
- [15] 陈 杰, 许长征, 曹颖倩, 等. 不同重金属对拟南芥根系特征的影响比较[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(6):1122-1128.  
CHEN Jie, XU Chang-zheng, CAO Ying-qian, et al. Comparison of the effects of different heavy metals on the root characteristics of *Arabidopsis thaliana* [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2017, 23(6):1122-1128.
- [16] Lux A, Martinka M, Vaculik M, et al. Root responses to cadmium in the rhizosphere: A review[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(1):21-37.
- [17] Vaculik M, Konlechner C, Langer I, et al. Root anatomy and element distribution vary between two *Salix caprea* isolates with different Cd accumulation capacities[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 163(1):117-126.
- [18] Lux A, Sotniková A, Opatrná J, et al. Differences in structure of adventitious roots in *Salix* clones with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity[J]. *Physiol Plant*, 2010, 120(4):537-545.
- [19] Ostonen I, Püttsepp Ü, Biel C, et al. Specific root length as an indicator of environmental change[J]. *Giornale Botanico Italiano*, 2007, 141(3):426-442.
- [20] Lu Z, Zhang Z, Su Y, et al. Cultivar variation in morphological response of peanut roots to cadmium stress and its relation to cadmium accumulation[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2013, 91(4):147-155.
- [21] 姜 涛. 铝胁迫对饭豆根尖营养元素吸收的影响及可能的调控机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.  
JIANG Tao. Effects of aluminum stress on nutrient absorption of root tips of rice bean and its possible regulation mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [22] 张苏波. 不同水稻品种吸收重金属特点研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.  
ZHANG Su-bo. Characteristics of absorption of heavy metals in different rice varieties[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.
- [23] Gao W, Nan T, Tan G, et al. Cellular and subcellular immunohistochemical localization and quantification of cadmium ions in wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *PLoS One*, 2015, 10(5):e0123779.
- [24] 贾月慧, 韩莹琰, 刘 杰, 等. 生菜对镉胁迫的生理响应及体内镉的累积分布[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8):1610-1618.  
JIA Yue-hui, HAN Ying-yan, LIU Jie, et al. Physiological responses of vegetables to cadmium stress and cucumber accumulation and distribution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8):1610-1618.
- [25] Tu-Sekine B, Raben D M. Characterization of a cinnamoyl-CoA reductase 1 (CCR1) mutant in maize: Effects on lignification, fibre development, and global gene expression[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(11):3837-3848.
- [26] 刘清泉, 陈亚华, 沈振国, 等. 细胞壁在植物重金属耐性中的作用[J]. 植物生理学报, 2014(5):605-611.  
LIU Qing-quan, CHEN Ya-hua, SHEN Zhen-guo, et al. The role of cell wall in plant heavy metal tolerance[J]. *Plant Physiology Journal*, 2014(5):605-611.