

张大众, 杨海川, 菅明阳, 等. Cd胁迫下小麦的形态生理响应及Cd积累分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9): 2031–2040.

ZHANG Da-zhong, YANG Hai-chuan, JIAN Ming-yang, et al. Physiological response and Cd accumulation and distribution characteristics of wheat under Cd stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(9): 2031–2040.

Cd胁迫下小麦的形态生理响应及Cd积累分布特征

张大众¹, 杨海川³, 菅明阳¹, 隗书伟¹, 赵越¹, 张一阳¹, 丁勤^{2*}, 马翎健^{1*}

(1. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学园艺学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 河北省石家庄市藁城区农业科学研究所, 石家庄 052160)

摘要:以Cd抗性不同的四个小麦品种为试验材料, 设置0、25 mg·kg⁻¹和50 mg·kg⁻¹三个CdCl₂添加浓度进行盆栽试验。通过小麦成熟期形态指标、多个生育时期生理指标、成熟期各器官中总Cd含量及各化学结合形态Cd占比的研究, 旨在探讨小麦对Cd胁迫的形态和生理响应、小麦Cd吸收积累特性以及抗Cd机理。结果表明, 株高、叶面积对Cd胁迫敏感程度低, 25 mg·kg⁻¹ Cd处理下对M1019的株高和西农20、许农186和M1019叶面积有促进作用; 而同化物质的积累对Cd胁迫敏感, 叶片干质量最为敏感, 50 mg·kg⁻¹ Cd处理下下降20%以上; 高浓度Cd处理对小麦各生长指标均表现为抑制。25 mg·kg⁻¹ Cd胁迫下能提高叶片POD酶活性, 而50 mg·kg⁻¹ Cd胁迫下POD酶活性降低, 随胁迫时间增加POD酶活性降低; 叶片SOD酶活性随着胁迫浓度和时间的增加而降低; 脯氨酸含量则随着胁迫浓度和时间的增加而升高; 叶绿素含量随胁迫浓度的增加而降低。随Cd处理浓度的增加小麦各器官Cd含量增加, 各器官积累量表现为: 根>叶片>茎秆>籽粒, 许农186和M1019整株Cd含量低于西农20和漯麦0603。50 mg·kg⁻¹ Cd处理下漯麦0603叶片和籽粒的Cd转运系数最低, 分别是21.2%和2.2%; 叶片Cd转运系数最高的品种是西农20, 系数为26.4%; 籽粒Cd转运系数最高的是许农186, 转运系数为3.0%。各化学结合形态中以氯化钠提取态和醋酸提取态占比最大, 随Cd处理浓度增加而增加, 活跃态Cd含量占比以许农186和M1019较低。结果表明不同形态和生理指标对Cd胁迫的响应不同, 不同小麦对Cd的吸收积累特征有共性也存在品种间的差异, 抗性品种与敏感型品种相比Cd的吸收积累量较低, 活性高的Cd占比较少。

关键词:小麦; Cd; 生理响应; 积累; 化学结合形态

中图分类号: X503.231 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)09-2031-10 doi:10.11654/jaes.2018-1612

Physiological response and Cd accumulation and distribution characteristics of wheat under Cd stress

ZHANG Da-zhong¹, YANG Hai-chuan³, JIAN Ming-yang¹, WEI Shu-wei¹, ZHAO Yue¹, ZHANG Yi-yang¹, DING Qin^{2*}, MA Ling-jian^{1*}

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Agricultural Science Research Institute of Gaocheng District, Shijiazhuang City, Hebei Province, Shijiazhuang 052160, China)

Abstract: Our investigation aimed to determine the morphological and physiological responses of wheat to Cd stress. We studied the morphological indexes, physiological indexes at multiple growth stages, total Cd content in various organs at maturity, and the proportion of Cd in each chemical form in order to characterize Cd absorption and accumulation, and determine the mechanism of Cd stress resistance in wheat. Potted experiments were carried out using four wheat cultivars with different Cd resistance. Three concentrations of CdCl₂ (0 mg·kg⁻¹, 25 mg·kg⁻¹, and 50 mg·kg⁻¹) were applied to the potted plants. Our results showed that the plant height and leaf area were less sensitive to Cd stress. The plant height of M1019 and the leaf area of Xinong 20, Xunong 186, and M1019 were enhanced by the 25 mg·kg⁻¹ Cd treatment. The accumulation of absorbed substances was sensitive to Cd stress, and the dry weight of leaves decreased by more than 20%

收稿日期: 2018-12-21 录用日期: 2019-04-10

作者简介: 张大众(1992—), 男, 河南周口人, 博士研究生, 从事小麦重金属耐性机理研究。E-mail: 1727697945@qq.com

杨海川与张大众同等贡献

*通信作者: 马翎健 E-mail: mlingjian@126.com; 丁勤 E-mail: dingqin@nwfau.edu.cn

基金项目: 国家十三五重点研发项目(2016YFD0101602)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2016YFD0101602)

under treatment with $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd. The high concentration Cd treatment showed an inhibition of the growth indices of wheat. Under a stress of $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd, the activity of the POD enzyme in leaves increased, while under a stress of $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd, the activity of the enzyme decreased. The activity of POD decreased with duration of stress. The activity of SOD in leaves decreased with increase in Cd concentration and time. The content of proline increased with increase in Cd concentration and time. The chlorophyll content decreased with increase in Cd concentration. With increase in Cd concentration, the Cd content of wheat increased, and its accumulation in each organ was found to be in the order root>leaf>stalk>seed. The Cd contents of Xunong 186 and M1019 were lower than those of Xinong 20 and Luomai 0603, and the Cd transport coefficients of the leaves and kernels of Luomai 0603 were the lowest at 21.0% and 2.2%, respectively. The highest Cd transport coefficient was for Xinong 20 (26.4%). The lowest Cd transport coefficient was found in Xunong 186 (3.0%). An analysis of the chemical composition showed that the sodium chloride and acetic acid extraction states accounted for the largest proportion of stress-related compounds, and this proportion increased with Cd concentration. The active Cd content ratio was lowest for Xunong and M1019. The results showed that various morphological and physiological indexes had different responses to Cd stress. Compared with sensitive cultivars, Cd absorption and accumulation in resistant cultivars were low and the proportion of Cd with higher activity in resistant cultivars was low. The mechanistic reasons for the differences in the response patterns of different wheat varieties to Cd stress require further study.

Keywords: wheat; Cd; physiological response; accumulation; chemical form

镉(Cd)在土壤中有高度的迁移性,是最具有危害性的重金属元素之一^[1]。Cd可通过食物链传递进而危害人的身体健康。小麦是我国主要粮食作物之一,且属于抗Cd能力较强和易积累作物^[2]。Cd胁迫会导致小麦株高、穗长和产量等生长指标降低以及品质的下降。大量试验表明^[3-4]小麦Cd抗性存在较大的品种间差异。小麦Cd抗性又可以分为耐性(高浓度Cd条件下减小其毒害)和避性(减少吸收量)两个途径。早期研究也多是围绕这两个途径展开,一方面研究Cd胁迫对小麦形态生理指标的影响^[5-7]和Cd积累分布特征,研究表明SOD、POD、CAT等保护性酶及脯氨酸、可溶性糖等渗透调节物质与小麦Cd耐受能力相关,Cd在根部等器官和组织的特异积累能提高小麦Cd耐受能力;另一方面是低积累品种的筛选^[8-9]。近年通过调控环境因素来降低Cd胁迫对小麦毒害作用的相关的研究逐渐增多^[10-12]。从小麦自身Cd抗性出发并系统研究小麦在Cd胁迫下的形态生理响应,Cd的吸收、积累分布特征以及不同抗性品种之间响应方式差异的报道很少,单一水平揭示小麦Cd胁迫的响应机制,不利于小麦Cd抗性的深入研究及相关性状的改良。本研究通过比较不同浓度Cd处理及不同Cd抗性小麦品种间对Cd胁迫的形态、生理响应以及Cd的积累、转运和化学形态分布,试图初步探讨小麦的Cd抗性机制,为小麦高抗和低积累Cd性状的遗传改良提供参考。

1 材料方法

1.1 试验材料

盆栽试验用土取自西北农林科技大学试验田,风

干后过筛并与营养土按一定比例混匀。土壤理化性质:pH 8.0,速效氮 $112.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $38.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $87.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cd $0.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

试验所选用小麦品种为课题组前期通过发芽试验筛选出的Cd抗性不同但生育期基本一致的黄淮海区小麦品种(系),发芽率和发芽势显示其抗性水平为:许农 186 较高,M1019 和漯麦 0603 中等,西农 20 较低。

1.2 试验处理

外源Cd含量设置0、25、 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 3个水平,按照相应处理浓度及土壤质量称取 $\text{CdCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 溶于水中喷于土壤表面并不断搅拌混匀。将处理后的土壤装入塑料盆中,每盆装土8 kg,浇足水稳定30 d备用。各品种种子用30% H_2O_2 消毒20 min后再用蒸馏水多次冲洗。将消毒后的种子种于装满相应浓度Cd处理土壤的营养钵($10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$)中,每盒种60粒,每个处理2盒,共24盒。于恒温 25°C 、光照12 h的培养箱进行培养,长至一叶一心转移到 $3\sim 4^\circ\text{C}$ 的培养箱春化一个月。苗期移苗到对应Cd浓度的塑料盆中,每盆10株,每处理5盆,共60盆,在日光温室培养至成熟。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 形态指标调查

于成熟期测量株高,顶三叶面积(长 $\times$ 宽 $\times 0.75$),茎、叶、穗干质量(10株)和千粒重(500粒)。

生长抑制率=(1-处理/对照) $\times 100\%$

1.3.2 生理指标测定

(1)分别于苗期(苗期移苗时)、拔节期、灌浆期和蜡熟期取小麦顶部三片叶,存放于 -80°C 冰箱,测定

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性及脯氨酸含量。因种子数量的原因,苗期所取样品量较少,未进行该时期SOD酶活性测定。

(2)分别于拔节期、开花期、灌浆期用叶绿素仪(SPAD502)测量小麦顶三叶叶绿素相对含量。

1.3.3 Cd的积累分布测定

(1)小麦各器官Cd积累量

于成熟期按处理取样,用自来水冲洗干净,再用蒸馏水冲洗三次,吸水纸吸干表面水分,根部在 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 溶液浸泡 15 min 除去表面的 Cd。按根、茎、叶、籽粒分解,并于 75°C 烘干至恒质量,籽粒阴干,各处理样品粉碎过 100 目筛并称取 1 g 用石墨消解仪消解,消解试剂为 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4(3:1, V/V)$, 用火焰石墨炉原子吸收光谱仪(Z-2000)测定 Cd 含量。

(2)小麦体内Cd化学形态分析

于小麦灌浆期取各处理根和叶片用于化学形态分布测定。Cd 化学形态分析采用化学试剂连续提取的方法^[13]。

1.4 数据处理分析

本试验的所有数据均使用 Excel 2007 和 SPSS 19 软件进行处理分析。

2 结果与分析

2.1 Cd处理对小麦表型性状的影响

不同浓度 Cd 处理下各小麦品种的表现性状如表

1 所示。许农 186 和西农 20 株高未随 Cd 处理浓度的增加而显著变化, M1019 在 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理下株高有所增加, 而漯麦 0603 在 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理下与对照相比株高显著降低。各品种茎、叶、穗干质量和千粒重随 Cd 处理浓度的增加而降低, 其中对叶片干质量影响最大, $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理下降 20% 以上; $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理下许农 186、西农 20 和 M1019 的顶三叶叶面积分别增大了 8.6%、2.9% 和 7.21%, $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理下叶面积均显著减小, 其中漯麦 0603 降低最多为 11.9%。各品种受抑制程度随处理 Cd 浓度增加而增加, 在 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 两个处理下许农 186 平均抑制率最低, 漯麦 0603 最高, 西农 20 和 M1019 抑制率居中。

2.2 Cd处理下小麦的生理响应

2.2.1 POD酶活性

由图 1 可以看出各处理下小麦叶片 POD 酶活性随处理时间的延长整体上呈降低趋势。苗期各品种小麦叶片 POD 酶活性整体呈现随 Cd 处理浓度升高而增加的趋势, 其中许农 186 叶片 POD 酶活性最高, M1019 最低。拔节期各处理叶片 POD 酶活性在各时期中最低, 西农 20 和 M1019 叶片 POD 酶活性仍随 Cd 浓度的上升而显著增加, 且西农 20 的 POD 酶活性在 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下在同时期所有处理中最高; 许农 186 和漯麦 0603 的叶片 POD 酶活性随 Cd 浓度的上升而显著降低, 且漯麦 0603 在同时期所有处理中酶活性处于较低水平, 在 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下达到最低。灌浆期和蜡熟期各处理叶片 POD 酶活性在 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

表 1 不同浓度 Cd 处理下各小麦品种农艺性状

Table 1 Agronomic traits of wheat varieties under different concentrations of Cd

品种 Varieties	Cd 含量 Cd content	株高 Plant height/ cm	干质量 Dry weight/g				叶面积均值 Leaf area/cm ²	抑制率均值 Inhibition ratio/%
			茎 Stem	叶 Leaf	穗 Spike	千粒重 1000-grain weight		
许农 186 Xunong186	0	53.9±0.58a	7.38±0.15a	5.65±0.37a	15.57±0.34a	16.39±0.28a	53.7±2.2b	0
	25	53.6±1.35a	7.03±0.11ab	5.27±0.26a	15.09±0.27ab	16.16±0.12ab	58.3±3.4a	1.3
	50	53.2±1.62a	6.84±0.08b	4.66±0.28b	14.60±0.34b	15.97±0.08b	51.7±2.3b	6.4
西农 20 Xinong20	0	53.6±1.62a	6.85±0.12a	6.08±0.25a	16.70±0.19a	16.65±0.08a	55.1±2.2a	0
	25	52.8±0.40a	6.36±0.07b	5.29±0.29b	15.90±0.18b	15.84±0.12b	56.7±2.9a	4.73
	50	52.4±0.75a	6.33±0.10b	4.75±0.31c	15.36±0.28c	15.07±0.07c	52.9±2.8b	8.5
M1019	0	51.2±1.75 b	5.78±0.10a	5.51±0.23a	15.34±0.25a	14.79±0.07a	55.2±1.2b	0
	25	53.6±1.02 a	5.64±0.08a	5.03±0.19a	14.78±0.27b	13.94±0.02b	57.3±3.3a	2
	50	51.6±1.50ab	5.37±0.05b	4.32±0.23b	14.23±0.28c	13.43±0.05c	50.5±1.5c	8.8
漯麦 0603 Luomai0603	0	49.8±2.32a	5.82±0.09a	4.90±0.28a	14.68±0.28a	17.71±0.24a	53.7±2.1a	0
	25	47.8±0.75ab	5.61±0.05b	4.14±0.30b	13.64±0.13b	16.79±0.09b	50.5±1.4b	6.9
	50	47.3±2.25b	5.10±0.09c	3.58±0.14c	12.83±0.27c	15.93±0.12c	47.3±1.0c	13.1

注: 数字后字母相同表示不显著, 不同表示显著($P<0.05$)。下同。

Note: The values followed by same letter are not significantly different, significant at 5% level with different letters. The same below.

条件下最高, $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下酶活性则显著低于 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下的水平, 这两个时期各品种在对应 Cd 胁迫条件下 POD 酶活性以西农 20 最高, 漯麦 0603 最低。

2.2.2 SOD 酶活性

如图 2 所示, 除漯麦 0603 拔节期和灌浆期叶片 SOD 酶活性随 Cd 处理浓度增加而增加外, 其余各处理 SOD 酶活性均随 Cd 处理浓度增加而降低, 但较多处理间 SOD 酶活性差异不显著。蜡熟期 SOD 酶活性低于灌浆期。

2.2.3 脯氨酸含量

由图 3 可知, 脯氨酸含量整体上随 Cd 处理时间和处理浓度的增加呈上升趋势, 但增加幅度较小, 多数处理之间差异不显著。

2.2.4 叶绿素含量

各处理下不同时期顶三叶叶绿素含量的平均值如图 4 所示。许农 186、西农 20 和 M1019 顶三叶叶绿素含量随生育进程的推进而升高并趋于稳定, 而漯麦 0603 在灌浆期叶绿素含量显著下降。小麦各品种各时期叶绿素含量均随 Cd 处理浓度的增加而降低。灌浆期 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理条件下各

品种叶绿素含量显著低于对照, 且漯麦 0603 各处理间差异显著。

2.3 各品种小麦 Cd 积累特征

图 5 表明, Cd 在四个品种小麦各器官中的含量随 Cd 处理浓度的增加而升高, 不同器官中 Cd 含量表现为: 根 > 叶片 > 茎秆 > 籽粒, 且地上各部位远低于根, 籽粒中的 Cd 含量远低于其他部位, $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下籽粒中的 Cd 含量只占根部的 2.2%~3%。西农 20 和漯麦 0603 各器官 Cd 积累量均显著高于许农 186 和 M1019。品种间不同部位 Cd 含量比值也表现出明显差异, $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理下漯麦 0603 Cd 的叶片和籽粒转运系数最低, 分别为 21.2% 和 2.2%, 西农 20 叶片转运系数最高, 分别为 26.4%, 西农 20 和许农 186 籽粒转运系数较高, 分别为 3.02% 和 3.04%。

2.4 各品种小麦 Cd 化学结合形态

小麦叶片各提取态 Cd 含量如图 6 所示。未处理条件下 Cd 各提取态间的分布相对均匀, 随 Cd 处理浓度的增加氯化钠提取态和醋酸提取态占比增大, 其余结合形态占比逐渐减小。未处理条件下氯化钠提取态和醋酸提取态占比 20% 左右, 其余化合态略低于

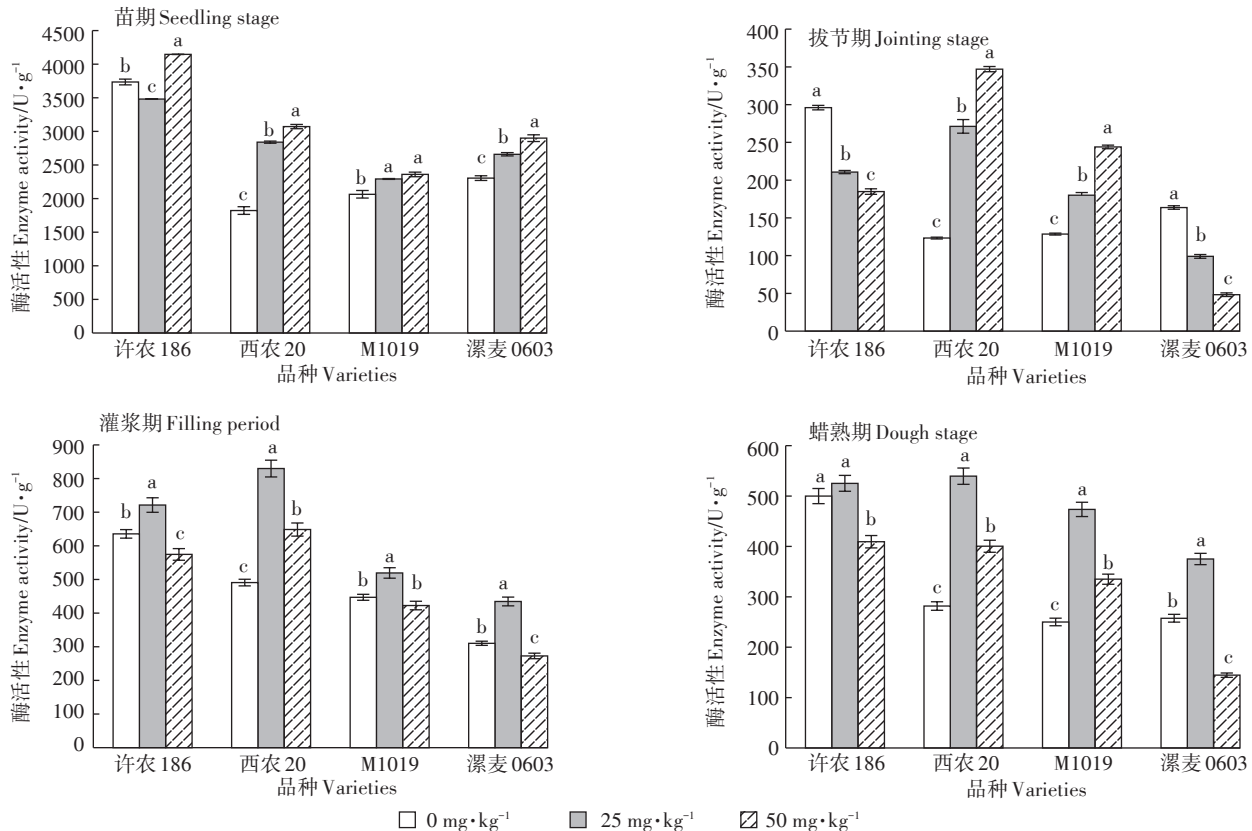


图 1 各处理下不同生育时期小麦叶片 POD 酶活性

Figure 1 POD enzyme activity of wheat leaves at different growth stages under different treatments

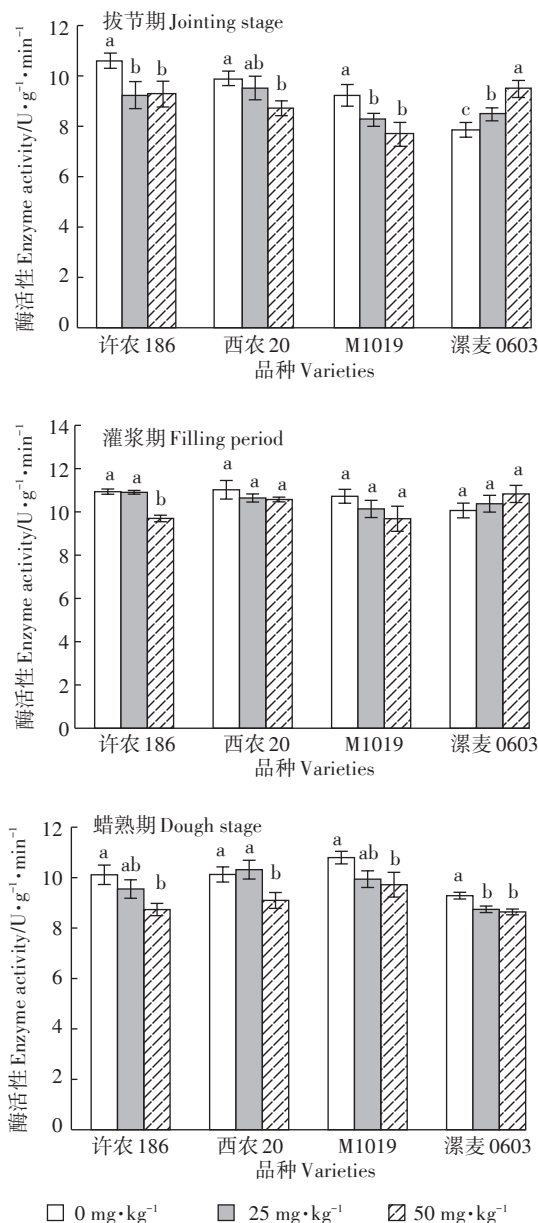


图2 各处理下不同生育时期小麦叶片SOD酶活性

Figure 2 SOD enzyme activity of wheat leaves at different growth stages under different treatments

上述两种状态。25 mg·kg⁻¹胁迫条件下氯化钠提取态和醋酸提取态分别占40%和30%左右,其余形式各占10%左右。50 mg·kg⁻¹胁迫条件下氯化钠提取态和醋酸提取态分别占50%和30%左右,其余形式都在10%以下。各品种的活跃态(乙醇、去离子水和氯化钠提取态)Cd的比例有所差异,各处理条件下西农20和漯麦0603相近且活跃态Cd占比较高,许农186活跃态Cd占比最低。

小麦根系各提取态Cd含量如图7所示。分布情

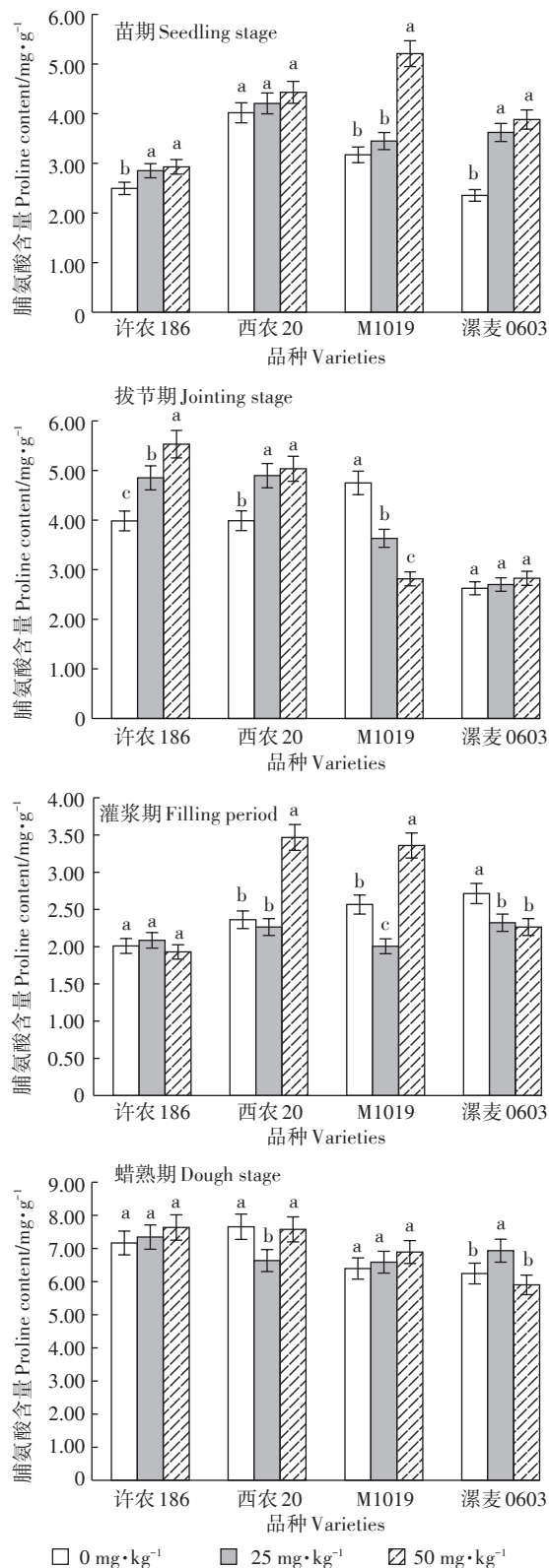


图3 各处理不同生育时期叶片脯氨酸含量

Figure 3 Proline content in leaves of different growth stages

况与叶片中分布情况相似,但各处理下氯化钠提取态和醋酸提取态Cd占比提高。

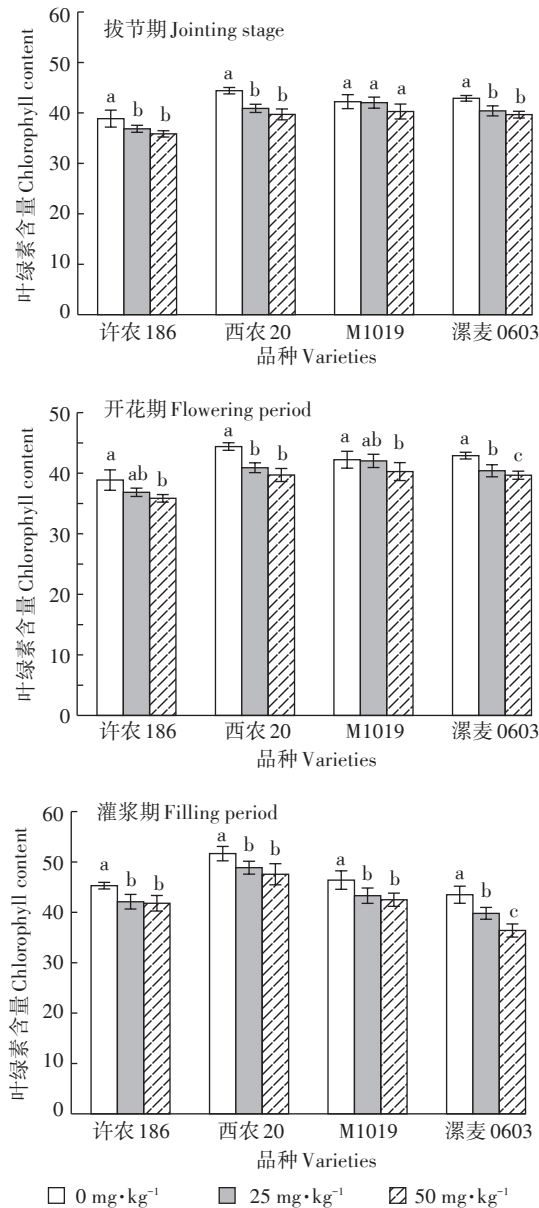


图4 各处理不同时期顶三叶叶绿素含量相对值

Figure 4 Chlorophyll content of top three leaves in different periods of treatment

3 讨论

小麦不同表型性状对Cd胁迫的响应存在差异, 25 mg·kg⁻¹浓度Cd处理下对M1019的株高及西农20、许农186和M1019叶面积有促进作用,即适宜浓度Cd胁迫对部分小麦的株高和叶片的生长有促进作用,这与何俊瑜等^[14]和王丽燕等^[15]在Cd胁迫对小麦种子萌发及幼苗生长实验中的结果相似,与聂胜委等^[16-17]在Cd胁迫对小麦生长及产量研究中的结果基本一致,朱志勇等^[18]的研究也表明50 mg·kg⁻¹ Cd处理下仍能促进抗性小麦品种叶面积指数的增加,本试验中许农

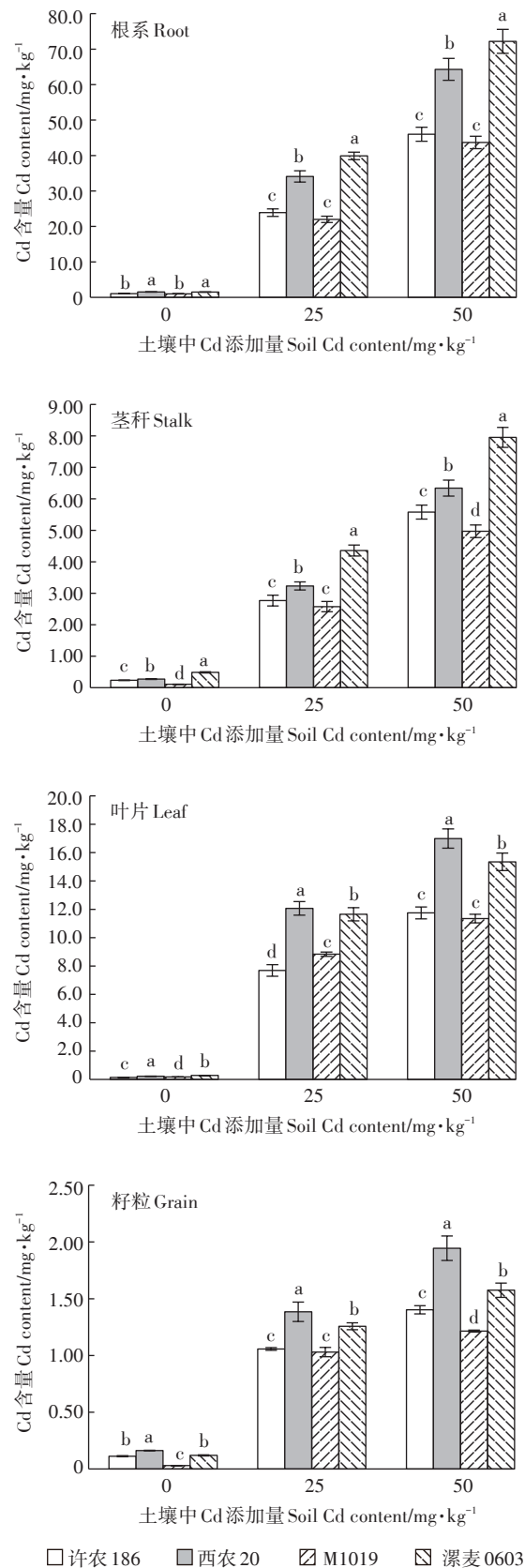


图5 各处理小麦不同器官Cd积累量

Figure 5 Cd accumulation in different parts of wheat under different treatments

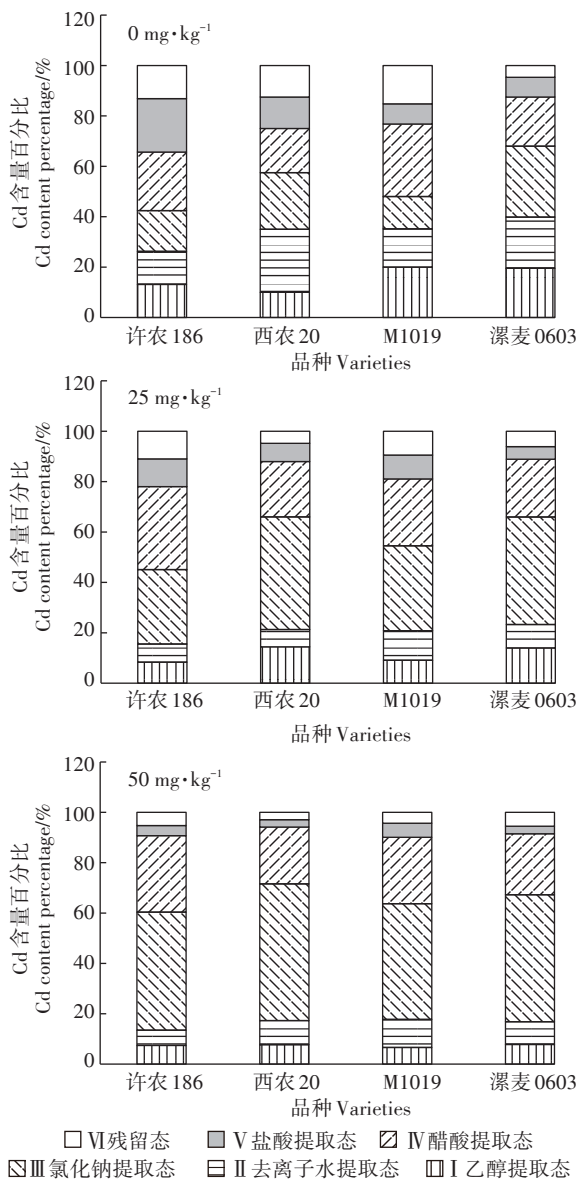


图6 小麦叶片各提取态Cd含量分配比例

Figure 6 The percentage of each extractable forms of Cd in leaves of wheat

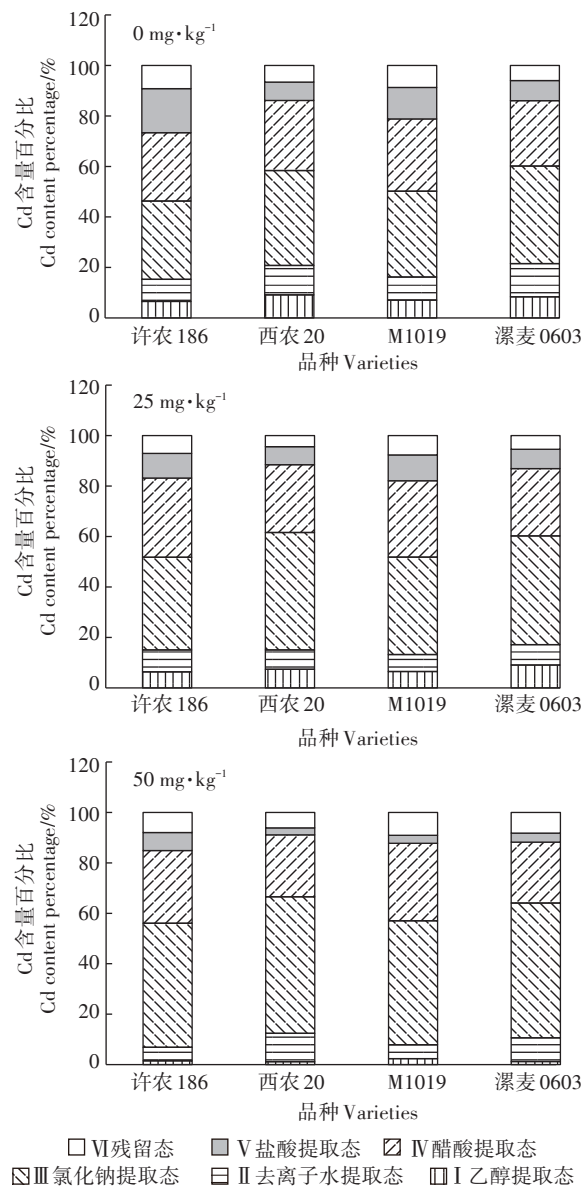


图7 小麦根系各提取态Cd含量分配比例

Figure 7 The percentage of each extractable forms of Cd in roots of wheat

186叶面积在 50 mg·kg⁻¹ Cd 处理下与对照差异不显著。本试验中在叶面积增加的情况下相应处理的小麦各器官干质量仍下降,可能是由于光合机构对 Cd 胁迫更为敏感,致使光合速率显著下降,同化物质减少^[19-20]。Cd 胁迫还能抑制籽粒贮藏物质合成能力和胚乳细胞的分裂能力,导致籽粒库容量减少,千粒重下降^[21]。从表型性状受抑制的程度可以看出四个品种 Cd 抗性表现为许农 186 较强, M1019、西农 20 次之, 漯麦 0603 最弱,这与前期鉴定的结果基本一致。个别品种抗性的变化可能是因为不同生育时期抗性不一致。

Cd 对植物的毒害作用之一是损害生物体内的酶及其化学性质并诱发高活性自由基^[22-23]。SOD、POD 等是活性氧自由基清除系统中的重要保护酶。本试验中,POD 在苗期活性较高,随后活性迅速降低,且随胁迫时间延长呈降低趋势,在灌浆和蜡熟期 25 mg·kg⁻¹ Cd 胁迫下 POD 酶活性最高。许农 186、西农 20 和 M1019 的 SOD 酶活性随 Cd 浓度的增加和胁迫时间的延长不断降低。可能是因为 SOD 和 POD 活性的提高是一种急性解毒措施,其调节能力是临时和有限的,当细胞长时间受到胁迫,细胞内的酶也会受到损伤而使活性下降^[24]。脯氨酸在植物体内含量可以反映植

物受胁迫程度的大小^[25],本试验中脯氨酸含量整体上随Cd处理浓度和时间的增加而增加,即随着处理浓度和时间的增加小麦受胁迫的程度也不断增加。本试验中SOD、POD酶活性和脯氨酸含量既表现出了相同的规律性也有品种间的差异,其中许农186和西农20的SOD、POD酶活性各时期都高于漯麦0603,西农20的脯氨酸含量相对较高,而漯麦0603一直处于较低水平,这些抗性生理对Cd胁迫响应程度的差异也是造成品种间Cd抗性差异的重要原因,这与何俊瑜等^[26]的观点一致。Cd胁迫对叶绿素含量和光合作用也有很大程度的影响,叶绿素含量高低也可以用来反映植物逆境下受伤害的程度。本试验中,随Cd处理浓度的增加,叶绿素含量下降。拔节期顶三叶叶绿素含量低是因为顶部新抽出叶片光照时间短,叶绿素含量低。各品种以漯麦0603各处理间叶绿素含量差异最大,说明该品种对Cd胁迫最敏感。

Cd胁迫下小麦各个器官Cd含量随处理浓度的升高而升高,不同器官含量不同^[27-28]。本试验研究结果与文献一致,小麦各器官Cd含量表现为根部>叶片>茎秆>籽粒,与肖昕等^[27]和冯绍元等^[29]研究结果一致。Cd积累量在品种间表现出差异,西农20和漯麦0603显著高于许农186和M1019,说明西农20和漯麦0603应对Cd胁迫的避性要低于许农186和M1019;不同器官间分配比例也不同,根系和茎秆中漯麦0603 Cd含量最高,叶片和籽粒中则是西农20含量最高。减少Cd的吸收,限制向地上部的转运是植物应对Cd胁迫的重要防御方式^[30]。西农20表现出较高的Cd吸收和转运能力,是Cd抗性低的表现。漯麦0603则是高吸收、低转运,但其叶片和籽粒的绝对含量仍处于较高水平。

植物体内的重金属以不同的化学结合形态存在,其中乙醇提取态和水溶态迁移活性最强,氯化钠提取态次之,醋酸和盐酸提取态最弱^[13]。无论在叶片还是根部乙醇提取态和水溶态Cd占比都随处理Cd浓度的增加而降低,氯化钠和醋酸提取态不断增加。在叶片中许农186的乙醇提取态和水溶态占比最少,漯麦0603占比最多,根中的分布情况与叶片相似。说明漯麦0603中活性高的Cd占比较多,在该方面对Cd的抗性较弱。

许农186低吸收Cd,高活性的Cd的组分占比最少,生理响应水平相对高,所以表现出了较高的Cd抗性;漯麦0603高吸收Cd,高活性Cd组分占比多,生理响应水平低,所以表现出了较低的Cd抗性;西农20

和M1019的各个指标响应程度有强有弱,所以其抗性处于中间水平。从以上结果可以看出,小麦响应Cd胁迫的防御方式很多,响应方式也不尽相同,而抗性是所有生理机制作用的综合体现。

4 结论

(1)四个小麦品种成株期Cd抗性表现为:许农186抗性高,西农20和M1019次之,漯麦0603较低。Cd胁迫在各器官中以对叶片干质量的影响最大,一定浓度的Cd胁迫对部分小麦品种的株高和叶面积等有促进作用。

(2)一定程度的Cd胁迫能提高POD酶活性,胁迫程度过高则表现为抑制,敏感型品种酶活性低;长时间Cd胁迫会降低SOD酶活性;脯氨酸含量随Cd处理浓度和时间的增加而增高;叶绿素含量在Cd胁迫下降低。

(3)随Cd处理浓度的增加,小麦通过提高低活性Cd的比例,来提高自身抗Cd胁迫的能力。

(4)不同小麦品种Cd吸收积累和分布的特征不同,对Cd胁迫的响应也不同,但整体上表现为:抗性品种的Cd吸收量小、高活性Cd占比小、生理响应的水平高。

参考文献:

- [1] Satarug S, Baker J R, Urbenjapol S, et al. A global perspective on cadmium pollution and toxicity in non-occupationally exposed population [J]. *Toxicology Letters*, 2003, 137(1): 65-83.
- [2] 杨居荣, 贺建群, 黄 翌, 等. 农作物Cd抗性的种内和种间差异 I. 种间差[J]. *应用生态学报*, 1995(增刊1): 192-196.
YANG Ju-rong, HE Jian-qun, HUANG Yi, et al. Inter- and intraspecific different of crops in cadmium tolerance I. Interspecific difference [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995(Suppl 1): 192-196.
- [3] 杨玉敏, 张庆玉. 小麦基因型间籽粒镉积累差异及低镉积累资源筛选[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(17): 342-346.
YANG Yu-min, ZHANG Qing-yu. Genotypic differences of cadmium accumulation in triticumaestivum and screening of low-accumulation material[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(17): 342-346.
- [4] Zhang G P, Fukami M, Sekimoto H. Influence of cadmium on mineral concentrations and yield components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seedling stage[J]. *Field Crops Research*, 2002, 77(2): 93-98.
- [5] Dudka S, Piotrowska M, Chlopecka A. Effect of elevated concentrations of Cd and Zn in soil on spring wheat yield and the metal contents of the plants[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 1994, 76(3/4): 333-341.
- [6] Van d V L, Peterson C, Hale B. Cd accumulation in roots and shoots of durum wheat: The roles of transpiration rate and apoplastic bypass[J].

- Journal of Experimental Botany*, 2006, 58(11):2939.
- [7] 王美娥, 周启星. 重金属Cd、Cu对小麦(*Triticum aestivum*)幼苗生理生化过程的影响及其毒性机理研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(12):2033-2038.
- WANG Mei-e, ZHOU Qi-xing. Effects of Cd and Cu on physiological and biochemical processes of wheat (*Triticum aestivum*) seedlings and their toxic mechanisms[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(12):2033-2038.
- [8] 熊 孜, 李菊梅, 赵会薇, 等. 不同小麦品种对大田中低量镉富集及转运研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1):36-44.
- XIONG Zi, LI Ju-mei, ZHAO Hui-wei, et al. Accumulation and translocation of cadmium in different wheat cultivars in farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1):36-44.
- [9] 孟 楠, 安 平, 王 萌, 等. 基于典型污灌区土壤筛选抗盐、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.
- [10] 王小恒, 李 裕, 王式功. 模拟气候变暖对小麦幼苗亚细胞中Cd的动态累积的影响[J]. 环境化学, 2016, 35(7):1415-1421.
- WANG Xiao-heng, LI Yu, WANG Shi-gong. Influence of simulated climate warming on Cd accumulation dynamics in subcellular compartments of *Triticum aestivum* L.[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(7):1415-1421.
- [11] 周 睿, 魏建宏, 罗 琳, 等. 赤泥添加对石灰性土壤中Pb、Cd形态分布及小麦根系的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(4):2560-2567.
- ZHOU Rui, WEI Jian-hong, LUO Lin, et al. Effects of red mud addition on fractions of Cd, Pb and wheat root growth in calcareous soil[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(4):2560-2567.
- [12] Singh H P, Batish D R, Kaur G, et al. Nitric oxide (as sodium nitroprusside) supplementation ameliorates Cd toxicity in hydroponically grown wheat roots[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2008, 63(1):158-167.
- [13] 许嘉琳, 鲍子平, 杨居荣, 等. 农作物体内铅、镉、铜的化学形态研究[J]. 应用生态学报, 1991(3):244-248.
- XU Jia-lin, BAO Zi-ping, YANG Ju-rong, et al. Chemical forms of Pb, Cd and Cu in crops[J]. *Chin J Appl Ecol*, 1991(3):244-248.
- [14] 何俊瑜, 任艳芳, 王阳阳, 等. 不同品种小麦种子萌发和幼苗生长对镉胁迫的响应[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(6):1048-1054.
- HE Jun-yu, REN Yan-fang, WANG Yang-yang, et al. Response to cadmium stress at seed germination and seedling growth of different wheat varieties[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(6):1048-1054.
- [15] 王丽燕, 郑世英. 镉、铅及其复合污染对小麦种子萌发的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(1):146-148.
- WANG Li-yan, ZHENG Shi-ying. Effect of cadmium, lead and their combined pollution on seed germination of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(1):146-148.
- [16] 聂胜委, 黄绍敏, 张水清, 等. 不同种类重金属胁迫对两种小麦产量及构成因素的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(3):455-463.
- NIE Sheng-wei, HUANG Shao-min, ZHANG Shui-qing, et al. Effects of varieties heavy metals stress on wheat grain yields of two genotypes and the main ingredients[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(3):455-463.
- [17] 聂胜委, 黄绍敏, 张水清, 等. 重金属胁迫对小麦生长的影响及阈值研究[J]. 华北农学报, 2012, 27(6):118-124.
- NIE Sheng-wei, HUANG Shao-min, ZHANG Shui-qing, et al. Effects of heavy metal stress on growth and grain yield of wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2012, 27(6):118-124.
- [18] 朱志勇, 李友军, 郝玉芬, 等. 镉对小麦(*Triticum aestivum*)干物质积累、转移及籽粒产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2):252-258.
- ZHU Zhi-yong, LI You-jun, HAO Yu-fen, et al. Effects of Cd on accumulation and translocation of biomasses and yield of different wheat (*Triticum aestivum*) cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(2):252-258.
- [19] Das P, Samantaray S, Rout G R. Studies on cadmium toxicity in plants: A review[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 98(1):29-36.
- [20] Sarijeva G, Knapp M, Lichtenthaler H K. Differences in photosynthetic activity, chlorophyll and carotenoid levels, and in chlorophyll fluorescence parameters in green sun and shade leaves of Ginkgo and Fagus[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2007, 164(7):950-955.
- [21] 陈 娟, 孙鉴坤, 方元平. 镉胁迫对水稻颖果胚乳细胞增殖和粒重的影响[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(6):1311-1314.
- CHEN Juan, SUN Jian-kun, FANG Yuan-ping. Effects of Cd stress on endosperm cells and grain weight of rice caryopsis[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2009, 48(6):1311-1314.
- [22] 李子芳, 刘惠芬, 熊肖霞, 等. 镉胁迫对小麦种子萌发幼苗生长及生理生化特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊):17-20.
- LI Zi-fang, LIU Hui-fen, XIONG Xiao-xia, et al. Effect of cadmium on seed germination, seedling development and physiological and biochemical characteristics of wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24:17-20.
- [23] Talanova V V, Titov A F, Boeva N P. Effect of increasing concentration of heavy metals on the growth of barley and wheat seedlings[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2001, 48(1):119-123.
- [24] 李 元, 王焕校, 吴玉树. Cd、Fe及其复合污染对烟草生理的影响[J]. 环境科学学报, 1990, 10(4):499-502.
- LI Yuan, WANG Huan-xiao, WU Yu-shu. Effects of Cd, Fe and their compound contamination on tobacco physiology[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1990, 10(4):499-502.
- [25] Fang W C, Chinghui K. Enhanced peroxidase activity in rice leaves in response to excess iron, copper and zinc[J]. *Plant Science*, 2000, 158(1):71-76.
- [26] 何俊瑜, 任艳芳, 王阳阳, 等. 不同抗性水稻幼苗根系对镉胁迫的形态及生理响应[J]. 生态学报, 2009, 31(2):522-528.
- HE Jun-yu, REN Yan-fang, WANG Yang-yang, et al. Root morpho-

- logical and physiological responses of rice seedling with different tolerance to cadmium stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 31(2): 522-528.
- [27] 肖 昕, 冯启言, 季丽英. 重金属 Cd、Cu、Zn 在小麦中富集特征的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1133-1137.
- XIAO Xin, FENG Qi-yan, JI Li-ying. Enrichment character of heavy metals Cd, Cu and Zn in wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1133-1137.
- [28] 姜丽娜, 邵 云, 李春喜, 等. 镉在小麦植株体内的吸收、分配和累积规律研究[J]. 河南农业科学, 2004, 33(7): 13-17.
- JIANG Li-na, SHAO Yun, LI Chun-xi, et al. Studies on uptake, distribution and accumulation of Cd in wheat plant[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2004, 33(7): 13-17.
- [29] 冯绍元, 邵洪波, 黄冠华. 重金属在小麦作物体中残留特征的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 113-115.
- FENG Shao-yuan, SHAO Hong-bo, HUANG Guan-hua. Field experimental study on the residual characteristics of heavy metals in wheat crops[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(4): 113-115.
- [30] Baker A J M, Walker P L. Physiological responses of plants to heavy metals and the quantification of tolerance and toxicity[J]. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 1989, 1(1): 7-17.