

不同品种燕麦对镉胁迫响应的差异性研究

王丽香^{1,2}, 范仲学^{2*}, 张欣², 魏爱丽³

(1.青岛农业大学生命科学院, 山东 青岛 266109; 2.山东省农业科学院高新技术研究中心/山东省作物遗传改良与生物技术重点实验室, 济南 250100; 3.太原师范学院生物系, 太原 030031)

摘要:利用实验室水培模拟试验,研究了轻度镉胁迫条件下 10 个燕麦品种生长及吸收积累镉的差异性。结果表明,经 $5\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的镉处理后,供试燕麦品种的株高、根长、地上部与地下部生物量、叶绿素含量、类胡萝卜素含量均出现不同程度的下降,不同品种间存在明显的差异,有的甚至达到极显著水平;不同品种燕麦对镉的吸收与积累也存在明显差异;燕麦镉的吸收转运与耐性没有直接的联系。按照镉胁迫下燕麦耐镉性和镉含量的冠根比进行聚类分析,可将 10 个品种分为 4 类:①镉转运少且耐性强;②转运多但耐性强;③转运多且耐性弱;④转运较少但耐性弱。其中品 5 号地上部生长抑制率最小,并且镉含量、镉转运量较少,表现出较强的耐镉性,在轻度镉污染土壤上种植品 5 号有利于降低镉污染对人类健康的风险。

关键词:燕麦;镉吸收;品种;耐性

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)01-0014-07

Responses of Oat Cultivars to Cadmium Stress

WANG Li-xiang^{1,2}, FAN Zhong-xue^{2*}, ZHANG Xin², WEI Ai-li³

(1.School of Life Science, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 2.High-tech Research Center of Shandong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Genetic Improvement and Biotechnology, Shandong Province, Jinan 250100, China; 3.Department of Biology, Taiyuan Normal University, Taiyuan 030031, China)

Abstract: A hydroponic experiment was conducted to investigate absorption and accumulation of cadmium as well as its effects on the growth of ten oat cultivars. Our results showed that shoot and root length, biomass, chlorophyll and carotenoid contents of the oat cultivars significantly decreased after cadmium treatment. The toxicity of cadmium was different among oat cultivars. There were significant differences in both Cd content and accumulation. There were no direct relationships between absorption, translocation and tolerance related to cadmium. A clustering analysis was made according to the tolerance index of oat and the shoot to root Cd content ratio(S/R). Based on our results, oat cultivars could be classified into 4 groups: group 1(low translocation /high tolerance), group 2(high translocation /high tolerance), group 3(high translocation/low tolerance), group 4(low translocation /low tolerance). Interestingly the growth inhibition ratio of the oat cultivar Pin-5 was found to be minimum. Pin-5 had lower Cd content and translation and showed a higher Cd tolerance index, suggesting that this particular cultivar grows in polluted soil and poses little risk to food chain.

Keywords: oat; absorption of cadmium; cultivars; tolerance

近年来,人类活动(如工业生产、开矿、汽车排放尾气等)使水体、土壤、空气受到严重污染,也使自然及农业环境中镉(Cd)的含量明显增加。Cd 不是植物生长必需元素,对植物有较强的毒性,是目前已知的危害最严重的农田污染类型之一^[1]。当植物受 Cd 毒

害达到一定程度,就会表现出生长迟缓、植株矮小、叶片黄化等毒害症状,更为严重的是 Cd 在作物中特别是在可食部位的大量积累,可以通过食物链危及人类的健康^[2-3]。

植物种间对 Cd 的耐性表现出明显的差异,如杨居荣等^[4]发现,禾谷类作物对 Cd 的耐性普遍高于蔬菜类;种内不同品种间对 Cd 的耐性差异的研究也有报道,有关研究集中在玉米^[5]、水稻^[6-7]、小麦^[8]、花生^[9-10]等作物中。燕麦是粮食、饲料两用作物,并且是谷类食

收稿日期:2010-06-23

基金项目:农业部公益性行业(农业)科研专项(nyhyzx07-009-15)

作者简介:王丽香(1984—),女,山西太原人,硕士研究生,主要从事植物逆境生理生化研究。E-mail:juzilovetree@163.com

* 通讯作者:范仲学 E-mail:fzhongxue@163.com

品中最好的全价营养食品之一^[1],但有关燕麦 Cd 积累和耐性的品种差异迄今未见报道。本研究旨在明确 Cd 对燕麦生长的影响及其品种间差异,为培育对低浓度 Cd 反应不敏感且在可食部位 Cd 含量低的燕麦品种提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试品种

裸燕麦 10 份:坝莜 1 号、坝莜 3 号、坝莜 5 号、坝莜 6 号、品 5 号由河北省张家口市高寒作物研究所提供;白燕 2 号由吉林省白城农业科学院提供;蒙燕 8474、晋燕、燕科 1 号、保罗由内蒙古农业大学提供。

1.2 处理

试验在山东省农业科学院高新技术研究中心的温室内进行。精选的燕麦种子首先用 1% 的次氯酸钠处理 20 min,再用蒸馏水冲洗 5 次,于 20 °C 恒温箱内砂床发芽,播种后 7 d(2 叶期),选长势一致燕麦苗将其移入用于营养液栽培的容器中。培养容器为 7 L,装入营养液 6.5 L,每个容器有一个工程塑料制作的盖子,盖子上均匀分布 10 个小孔,移栽时每个小孔移入 1 株燕麦幼苗。营养液采用 Hoagland 营养液。燕麦移栽后,用通气泵每日连续 24 h 通气以保证燕麦根系有足够的氧气供应。

根据《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995),本试验设置 Cd $5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 为处理浓度(约相当于土壤 Cd $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),以 CdCl_2 配置,并设 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 为对照。为使幼苗在移栽后有一个短的恢复期,Cd 在燕麦幼苗移栽后 7 d 加入,并且把 Hoagland 营养液中的 Fe-EDTA 用 FeSO_4 代替。Cd 加入后,所有处理每隔 1 d 用 NaOH 或 HCl 调整 1 次,保持 pH 值在 6.5~6.8 之间。营养液每周更换 1 次。试验采用随机设计,重复 3 次。Cd 处理 20 d 后收获植株并测定相关生理指标。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶绿素含量的测定

处理 20 d 后,测定植株倒数第 4 叶的叶绿素含量,叶绿素含量采用 80% 丙酮浸提法^[12]。

1.3.2 茎高和根长的测定

茎高和主根长度用直尺直接测定,每个品种测定 15 株,取平均值。

1.3.3 干重的测定

收获时由基部将燕麦分为地上部和根部两部分,每个植物样品依次用自来水、蒸馏水、去离子水冲洗

干净,放入烘箱,105 °C 杀青 30 min,在 85 °C 下烘干至恒重,然后再称重,记录地上部和地下部干重(DW)。

1.3.4 Cd 含量的测定

测定 Cd 含量的材料烘干粉碎后用 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4$ (2:1)消煮,制成 25 mL 溶液待测定。Cd 含量利用原子吸收光谱仪测定。

1.4 数据的处理

数据的统计、分析、聚类采用 SPSS13.0 软件。

2 结果与分析

2.1 Cd 对不同品种燕麦生长的影响

从表 1 可知,在无 Cd 胁迫下,不同品种燕麦由于遗传特性的差异,茎高、根长和生物量表现一定的差异性。供试燕麦品种茎高的范围为 66.4~76.8 cm,其中品 5 号最低,坝莜 6 号最高;根长的范围为 30.8~45.5 cm,其中坝莜 1 号最短,白燕 2 号最长;地上部干重的范围为 $0.764\sim1.054 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$,其中品 5 号最小,保罗最大;地下部干重的范围为 $0.149\sim0.251 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$,其中坝莜 1 号最小,坝莜 5 号最大。经 $5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Cd 处理后,燕麦各品种的茎高、根长、地上部干重、地下部干重与各自对照相比不同程度的降低,分别平均降低了 15.8%、10.4%、31.1%、10.3%。并且可以看出,Cd 对燕麦地上部和地下部的抑制能力不同,对茎高的抑制作用大于根长,对地上部干重的抑制作用大于地下部。

不同品种燕麦在 Cd 胁迫下,生长特性存在明显差异,有的达到显著或极显著水平。蒙燕 8478 株高最高,与坝莜 1 号、坝莜 3 号、坝莜 5 号、品 5 号、白燕 2 号和燕科 1 号这 6 个品种差异达极显著水平,与其余品种差异不显著。白燕 2 号的根长显著高于其他品种,而保罗的根长显著低于其他品种。地上部干重较大的是坝莜 5 号和晋燕,这两个品种与坝莜 1 号和坝莜 6 号差异显著,与其余品种差异不显著。地下部干重较大的是白燕 2 号,它与坝莜 1 号、坝莜 3 号、坝莜 6 号、品 5 号和晋燕差异显著,与其他品种差异不显著。由表 1 可知,株高下降最多的是白燕 2 号,最小的是晋燕,前者下降幅度约是后者的 4 倍;根长下降最多的是保罗,下降最少的是坝莜 1 号,前者下降幅度约是后者的 18 倍。坝莜 6 号和白燕 2 号地上部干重与对照相比下降最明显,分别下降了 45.0%、38.7%,而品 5 号仅下降了 17.0%,表明品 5 号耐 Cd 性强。坝莜 6 号地下部干重下降最多,为 18.2%,而晋燕却仅下降了 1.1%。

表 1 Cd 对不同品种燕麦生长的影响

Table 1 Effects of cadmium on the growth of different oat cultivars

品种 Cultivars	茎高 Shoot length/cm		根长 Root length/cm		地上部干重 Shoot DW/g·株 ⁻¹		地下部干重 Root DW/g·株 ⁻¹	
	0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$
坝蓂 1 号 Bayou-1	72.1±5.39 bcd	59.4±3.58 cd	30.8±2.12 c	30.3±2.25 d	0.768±0.03 b	0.504±0.08 b	0.149±0.03 d	0.145±0.08 d
坝蓂 3 号 Bayou-3	70.3±3.05 de	58.8±5.76 d	38.6±3.33 b	33.2±1.91 c	0.779±0.03 b	0.572±0.04 ab	0.210±0.03 abc	0.174±0.04 cd
坝蓂 5 号 Bayou-5	73.9±4.28 bc	60.7±3.63 bcd	37.2±4.13 b	34.4±3.50 bc	0.953±0.16 ab	0.744±0.09 a	0.251±0.16 a	0.213±0.09 ab
坝蓂 6 号 Bayou-6	76.8±3.03 a	62.9±4.77 ab	39.1±3.00 b	33.6±3.45 c	0.905±0.11 ab	0.498±0.20 b	0.197±0.11 bc	0.161±0.20 cd
品 5 号 Pin-5	66.4±3.75 f	54.1±2.57 e	31.7±3.25 c	30.0±2.50 d	0.764±0.05 b	0.634±0.08 ab	0.163±0.05 cd	0.150±0.09 cd
白燕 2 号 Baiyan-2	70.1±4.25 de	52.9±5.15 e	45.5±2.88 a	41.2±2.97 a	0.895±0.05 ab	0.548±0.12 b	0.238±0.05 ab	0.217±0.12 a
蒙燕 8478 Mengyan-8478	74.6±4.80 ab	65.5±3.48 a	38.4±4.91 b	33.2±3.72 c	0.885±0.14 ab	0.586±0.01 ab	0.205±0.14 abc	0.185±0.01 abcd
晋燕 Jinyan	67.9±4.95 ef	63.5±3.47 ab	36.7±4.88 b	34.1±4.25 bc	1.002±0.10 ab	0.754±0.18 a	0.205±0.10 abc	0.203±0.18a bcd
燕科 1 号 Yanke-1	72.6±3.86 bcd	62.0±6.61 bc	36.9±4.80 b	36.1±4.59 b	0.957±0.30 ab	0.612±0.17 ab	0.203±0.30 abc	0.186±0.17 abc
保罗 Baoluo-1	71.5±3.01 cd	63.1±2.59 ab	36.8±3.65 b	26.9±3.67 e	1.054±0.16 a	0.708±0.02 ab	0.212±0.16 abc	0.180±0.02 abcd
平均 Mean	71.6	60.3	37.2	33.3	0.896	0.616	0.203	0.181

注:同一列中无相同字母者表示经 Duncan 法统计检验差异达显著水平($P<0.05$)。下表同。

Note: Bars marked by the same letter(s) are not significantly different at $P<0.05$ according to Duncan's Multiple Range Test. The same below.

2.2 Cd 对不同品种燕麦叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

叶绿素和类胡萝卜素在光合作用中起到很重要的作用。从表 2 可以看出,在无 Cd 胁迫下,供试燕麦品种的光合色素存在差异。叶绿素含量的范围为 2.07~2.79 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ FW, 叶绿素 a 含量的范围为 1.58~2.08 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ FW; 叶绿素 b 含量的范围为 0.43~0.71 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ FW; 类胡萝卜素含量的范围为 0.33~0.47 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ FW,各项指标均以燕科 1 号为最大。经 5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Cd 处理后,不同品种燕麦的叶绿素含量、叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量与各自对照相比都显著降低,平均分别下降了 14.3%、14.5%、15.4%、15.1%。Cd 胁迫后,不同品种燕麦的叶绿素含量、类胡萝卜素含量存在差异,有的达到显著或极显著水平。叶绿素含量最高的是燕科 1 号,它与晋燕差异不显著,与其余品种差异极显著。类胡萝卜素含量最多的是晋燕,它与燕科 1 号和保罗差异不显著,与其他品种差异显著。并且由表 2 可知,Cd 处理后,叶绿素含量下降最多的是坝蓂 3 号(下降 30.9%),最小的是燕科 1 号(下降 5.4%),前者下降幅度是后者的 5.7 倍。类胡萝卜素下降最多的也是坝蓂 3 号(下降 30.0%),最小的是保罗(下降 1.9%),前者下降幅度是后者的 16.0 倍。表明不同品种燕麦在 Cd 处理下受害程度不同。

从表 2 还可以看出,Cd 处理不但影响了叶绿素含量,还改变了叶绿素 a/b 的比值。Cd 胁迫下 10 个品种燕麦叶绿素 a/b 的比值的差异不显著,但与对照相比,坝蓂 3 号、坝蓂 5 号、白燕 2 号、晋燕、保罗的叶

绿素 a/b 的比值降低,其余品种比值增加。可能叶绿素 a/b 的变化与燕麦耐镉性有一定的联系。

2.3 Cd 对不同品种燕麦吸收积累 Cd 的影响

植物地上部和地下部 Cd 含量和累积量可反映植物吸收和积累 Cd 能力的大小。从表 3 可以看出,对照地上部 Cd 含量从 0.47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 到 1.42 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其 Cd 吸收变化的幅度最大达 3.0 倍左右;同时,地下部 Cd 的含量从 4.75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 到 17.96 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变化幅度在 3.8 倍左右,说明在极低浓度 Cd 污染下,地下部 Cd 浓度的变化能够更敏感地反映品种间抗 Cd 特性的差异。对照地上部 Cd 积累量的范围为 0.43~1.36 $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$,其中最小的是坝蓂 6 号,最大的是燕科 1 号;地下部 Cd 积累量的范围为 0.97~3.65 $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$,其中最小的是蒙燕 8478,最大的是燕科 1 号。

经 5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Cd 处理 20 d 后,不同品种燕麦 Cd 含量和累积量存在差异,有的品种达到显著或极显著水平。地上部 Cd 含量较高的是燕科 1 号,达 14.02 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,除了蒙燕 8478,极显著高于其他品种,且是地上部 Cd 含量最低的坝蓂 1 号的 1.7 倍;地下部 Cd 含量最高的是坝蓂 6 号,除了蒙燕 8478,极显著高于其他品种,且是地下部 Cd 含量最低的燕科 1 号的 1.7 倍。地上部 Cd 累积量最大是坝蓂 5 号,它与蒙燕 8478、晋燕、燕科 1 号、保罗这 4 个品种差异不显著,与其他品种差异极显著,比地上部 Cd 累积量最小的坝蓂 1 号高出 50.5%;地下部 Cd 累积量最大的是蒙燕 8478,除坝蓂 6 号,与其他品种差异极显著,比地下部 Cd 累积量最小的坝蓂 1 号高出 48.9%。

另外,地上部与地下部重金属含量的比值(S/R)比较能反映出重金属在植物体内的运输和分配情况^[13],从表 3 可以看出,在 10 个燕麦品种中,无论是对照组,还是 Cd 处理组,S/R 的值都远远小于 100%,尤其是在 Cd 处理组,燕麦各品种地下部平均 Cd 含量(317.40 mg·kg⁻¹)是地上部平均 Cd 含量(10.94 mg·

表 2 Cd 对不同品种燕麦叶绿素与类胡萝卜素含量的影响
Table 2 Effects of Cd on chlorophyll and carotenoid contents in different oat cultivars

品种 Cultivars	叶绿素/g·kg ⁻¹ FW Chlorophyll		叶绿素 a/g·kg ⁻¹ FW Chlorophyll a		叶绿素 b/g·kg ⁻¹ FW Chlorophyll b		类胡萝卜素/g·kg ⁻¹ FW Carotenoid		叶绿素 a/b Chlorophyll a/b	
	0 μmol·L ⁻¹	5 μmol·L ⁻¹	0 μmol·L ⁻¹	5 μmol·L ⁻¹	0 μmol·L ⁻¹	5 μmol·L ⁻¹	0 μmol·L ⁻¹	5 μmol·L ⁻¹	0 μmol·L ⁻¹	5 μmol·L ⁻¹
坝蓼 1 号 Bayou-1	2.43±0.07b	1.78±0.05de	1.88±0.05 ab	1.40±0.05d	0.55±0.02bc	0.38±0.01bc	0.38±0.01bc	0.28±0.01cd	3.42±0.06bc	3.75±0.03a
坝蓼 3 号 Bayou-3	2.21±0.13c	1.53±0.05ef	1.73±0.10 bc	1.19±0.05e	0.49±0.03bcd	0.34±0.01c	0.36±0.03bcd	0.25±0.02d	3.56±0.04ab	3.70±0.07a
坝蓼 5 号 Bayou-5	2.18±0.10cd	1.93±0.01cd	1.71±0.08 bc	1.50±0.01cd	0.47±0.02bcd	0.43±0.01bc	0.35±0.01cd	0.31±0.00bc	3.64±0.05ab	3.48±0.06a
坝蓼 6 号 Bayou-6	2.46±0.09b	2.19±0.12bc	1.93±0.07 a	1.73±0.10b	0.52±0.02bcd	0.46±0.02bc	0.38±0.02bc	0.36±0.02a	3.69±0.05ab	3.51±0.03a
品 5 号 Pin-5	2.07±0.09cd	1.91±0.12bc	1.58±0.06 c	1.48±0.09cd	0.49±0.02bcd	0.43±0.03bc	0.33±0.01d	0.32±0.01b	3.25±0.04bc	3.49±0.08a
白燕 2 号 Baiyan-2	2.04±0.15d	1.45±0.05f	1.58±0.12 c	1.11±0.04e	0.46±0.04cd	0.34±0.01c	0.35±0.03cd	0.27±0.01d	3.41±0.07bc	3.32±0.06a
蒙燕 8478 Mengyan-8478	2.56±0.05b	2.03±0.01cd	1.99±0.05 a	1.58±0.00c	0.57±0.01b	0.45±0.01bc	0.40±0.00b	0.32±0.00bc	3.50±0.04bc	3.50±0.07a
晋燕 Jinyan	2.54±0.06b	2.48±0.20ab	1.98±0.05 a	1.91±0.15a	0.57±0.01bc	0.57±0.05ab	0.37±0.02bcd	0.37±0.03a	3.50±0.02bc	3.36±0.01a
燕科 1 号 Yanke-1	2.79±0.07a	2.64±0.49a	2.08±0.11 a	1.93±0.15a	0.71±0.16a	0.71±0.34a	0.47±0.05a	0.36±0.04a	3.04±0.81c	3.29±0.76a
保罗 Baoluo-1	2.12±0.02cd	1.99±0.03cd	1.70±0.02 bc	1.56±0.02c	0.43±0.01d	0.42±0.02bc	0.34±0.00d	0.34±0.01ab	4.00±0.18a	3.65±0.06a

表 3 Cd 胁迫对不同燕麦品种 Cd 含量、Cd 积累量及地上部/地下部 Cd 含量比的影响
Table 3 Effect of Cd treatments on Cd content,accumulation and shoot to root Cd content ratio(S/R) of different oat cultivars

品种 Cultivars	地上部 Cd 含量/mg·kg ⁻¹ Cd contents in shoot		地下部 Cd 含量/mg·kg ⁻¹ Cd contents in root		地上部 Cd 积累量/μg·株 ⁻¹ Accumulation of shoot		地下部 Cd 积累量/μg·株 ⁻¹ Accumulation of root		S/R(%)	
	0 μmol·L ⁻¹	5 μmol·L ⁻¹	0 μmol·L ⁻¹	5 μmol·L ⁻¹	0 μmol·L ⁻¹	5 μmol·L ⁻¹	0 μmol·L ⁻¹	5 μmol·L ⁻¹	0 μmol·L ⁻¹	5 μmol·L ⁻¹
坝蓼 1 号 Bayou-1	0.95±0.00d	8.44±0.05d	14.37±0.47c	286.34±8.48bc	0.73±0.03bcd	4.25±0.68c	2.14±0.04bc	41.40±3.87e	6.61±0.19d	2.95±0.07cd
坝蓼 3 号 Bayou-3	0.76±0.01f	8.97±0.41d	8.53±0.32e	279.47±3.31c	0.59±0.02cde	5.13±0.34c	1.79±0.02bcd	48.67±3.03de	8.94±0.19c	3.21±0.11bc
坝蓼 5 号 Bayou-5	0.73±0.00f	11.54±0.42b	8.21±0.21e	316.72±1.56b	0.70±0.12bcd	8.59±1.10a	2.06±0.18bcd	67.31±10.62bc	8.94±0.22c	3.64±0.15b
坝蓼 6 号 Bayou-6	0.47±0.01h	11.89±0.15b	7.20±0.46f	448.78±21.17a	0.43±0.05e	5.92±2.36bc	1.42±0.02cde	72.44±4.28ab	6.57±0.56d	2.65±0.09d
品 5 号 Pin-5	1.22±0.05b	8.87±0.45d	15.69±0.87b	279.42±15.26c	0.93±0.06b	5.00±0.83c	2.56±0.38b	41.99±1.86e	7.77±0.75cd	3.18±0.34bc
白燕 2 号 Baiyan-2	1.01±0.02c	9.92±0.09c	6.05±0.17g	270.05±16.56c	0.90±0.05b	4.93±1.18c	1.44±0.10cde	58.68±5.74cd	16.66±0.89a	3.68±0.26b
蒙燕 8478 Mengyan-8478	0.65±0.00g	13.97±0.24a	4.75±0.31h	436.91±22.10a	0.58±0.09cde	8.19±0.16ab	0.97±0.11e	81.03±11.99a	13.65±1.00b	3.20±0.22bc
晋燕 Jinyan	0.85±0.02e	10.45±0.03c	10.78±0.20d	280.49±18.47c	0.85±0.09bc	7.88±1.85ab	2.21±0.11bc	56.95±9.19cd	7.88±0.31cd	3.73±0.26b
燕科 1 号 Yanke-1	1.42±0.05a	14.02±0.01a	17.96±0.36a	258.28±13.89c	1.36±0.43a	8.58±2.35a	3.65±1.24a	48.09±6.56de	7.93±0.44cd	5.43±0.29a
保罗 Baoluo-1	0.50±0.00h	11.29±0.73b	6.03±0.24g	317.61±3.97b	0.53±0.01de	8.00±0.20ab	1.28±0.08de	57.08±2.14cd	8.25±0.41c	3.56±0.27b
平均 Mean	0.86±0.02	10.94±0.26	9.96±0.36	317.40±12.48	0.76±0.10	6.65±1.10	1.95±0.23	57.36±5.90	3.52±0.21	9.32±0.05

kg⁻¹)的 29 倍左右,说明 Cd 主要积累在燕麦根部。Cd 处理后,燕科 1 号的 S/R 值显著大于其他品种,说明该品种对 Cd 的转运能力最强;而坝苽 6 号的 S/R 值最小,说明这个品种把大量的 Cd 钝化在植株根部。

2.4 不同品种燕麦耐 Cd 性与 Cd 吸收转运的关系

在作物育种工作中,从安全高效考虑,总是希望选育一种耐 Cd 性强(地上生长抑制率低),但 Cd 的吸收积累少且 Cd 从地下向地上转移率小的品种,为此依据地上部抑制率和地上部与地下部 Cd 含量的比值对不同品种燕麦进行聚类分析。从表 4 可以看出,不同品种的燕麦对 Cd 的耐性和体内分布是不同的,大致分为 4 种类型。品 5 号地上部干重下降最小,向地上部转运的 Cd 也较少,具有转移率低但耐性较强的特点;坝苽 3 号、坝苽 5 号、晋燕生长抑制率较小而 S/R 较大,说明它们在 10 个品种里耐性较强、转运较多;坝苽 6 号生长抑制率最大,S/R 值最小,属于转运少、耐性弱一类;其余品种地上部干重下降较大,且 S/R 值也最大,说明这几个品种 Cd 转运多且耐性弱。

表 4 不同燕麦品种地上部生长抑制率与冠根比的聚类分析
Table 4 Cluster analysis based on shoot inhibition percentage and S/R of different oat cultivars

聚类 Cluster	品种 Cultivars	生长抑制率/% Shoot inhibition percentage	S/R %
1	品 5 号	17.00	3.17
2	坝苽 3 号、坝苽 5 号、晋燕	24.42	3.53
3	坝苽 1 号、白燕 2 号、蒙燕 8478、燕科 1 号、保罗	35.15	3.76
4	坝苽 6 号	45.02	2.65

3 结论与讨论

Cd 是农作物的非必需元素,当环境中的 Cd 浓度过高时,就会对农作物产生毒害作用,影响农作物正常的生长发育。本试验通过研究了轻度 Cd 污染对 10 个燕麦品种生长的影响,发现经 5 μmol·L⁻¹ Cd 处理后,供试 10 个燕麦品种的株高、根长、地上部与地下部生物量不同程度的下降。杨居荣等^[4]发现地上部干重的减少量可以作为判断植物耐性的指标。本研究表明,不同燕麦品种耐 Cd 性存在明显差异,其中品 5 号生长抑制率最小,为 17.0%,可见其受 Cd 毒害最小,属于相对耐 Cd 品种;相反坝苽 6 号、白燕 2 号生长抑制率较大,分别为 45.0%、38.7%,属于相对 Cd 敏感品种,其他品种耐 Cd 性介于它们之间。本试验还得出 Cd 对燕麦地上部干重的抑制作用大于地下部,

这与 Cd 对小麦^[14]、甘蓝^[15]生长的结果一致,说明植物根系更能耐受 Cd 的毒害。

叶绿体色素是植物进行光合作用的重要物质。经镉处理后,燕麦叶绿素含量显著减少。Cd 导致叶绿素含量下降,可能是由于 Cd 与相关酶作用,抑制叶绿素前体的合成,促进叶绿素分解,或直接破坏叶绿体微结构,从而降低叶绿素的含量^[16]。Cd 处理不但影响了燕麦叶绿素含量,还改变了叶绿素 a/b 的比值。由表 2 可知坝苽 3 号、坝苽 5 号、白燕 2 号、晋燕、保罗的叶绿素 a/b 的比值降低,说明叶绿素 a 对重金属污染比叶绿素 b 更敏感,这可能是因为重金属 Cd 对光合反应作用中心——叶绿素 a 的光反应过程中铁氧还原蛋白的影响。这与刘志华^[17]、惠俊爱等^[18]的研究结果一致。而其余品种叶绿素 a/b 的比值增加,可能叶绿素 a/b 的比值与植物耐 Cd 性强弱有关,有待进一步研究。

在 Cd 的吸收积累方面,供试的 10 个燕麦品种存在明显差异。经 Cd 处理后,各燕麦品种 S/R 的值都远远小于 100%。说明 Cd 主要积累在燕麦根部,向地上迁移的只是一小部分,而且存在品种间差异,这与肖美秀等^[19]的研究结果一致。在对照组和处理组中,白燕 2 号 S/R 都显著大于品 5 号,说明白燕 2 号根系对重金属 Cd 的阻截能力比品 5 号弱,而体内运输 Cd 的能力要比品 5 号强。Cd 主要积累在根部的原因,王焕校^[20]经研究认为,可能与 Cd 进入根的皮层细胞后和根内蛋白质、多肽、多糖类、核糖类、核酸等化合物形成稳定的大分子络合物或不溶性有机大分子而沉积下来有关。

一般地说,植物对重金属离子的抗性机制包括排斥和积累^[21]。在排斥机制中,植物具有限制根系吸收和从根系向地上部运输、或主动向细胞外运输有毒离子的能力。经镉处理后,镉主要集中在燕麦根部,各品种地下部平均 Cd 含量(317.40 mg·kg⁻¹)是地上部平均 Cd 含量(10.94 mg·kg⁻¹)的 29 倍左右,表明燕麦植株通过限制 Cd 向地上部的运输来缓解 Cd 的毒害,属于排斥机制。而在积累机制中,当 Cd 转移至地上部时,细胞内的一些金属结合蛋白诸如 PC、MT 等可有效地络合 Cd 离子,并以 Cd-PC 或 CdS 微晶体等形态贮存在特定的器官、组织或细胞器中,形成难溶性化合物或合成特定的有机化合物^[22-24],减少细胞质的 Cd²⁺,减轻植物的 Cd 毒害。通过聚类分析可知,在耐性较强的品种中,品 5 号从地下部向地上部转运的 Cd 较少,而坝苽 3 号、坝苽 5 号、晋燕转运的 Cd 较

多,由此可知燕麦耐性与Cd的吸收转运之间没有直接的联系,这和居婷^[25]、杨居荣等^[26]的结论一致。该结果也意味着不同燕麦品种存在不同的耐性机制,除了排斥机制外,还有积累机制。这些发现为进一步研究燕麦的耐Cd机制奠定了基础。

试验还发现,品5号不仅耐Cd性强,并且地上部Cd含量与地下部Cd含量的比值也较小,每株地上Cd累积量也最小,属于Cd转运少、积累少的耐Cd品种。在轻度Cd污染土壤上种植此品种有利于降低Cd污染的人类健康风险。了解同种类不同品种作物的吸收积累Cd的差异,在Cd污染土壤上选择合适的作物品种种植,是生产符合食品安全标准粮食的重要途径。

参考文献:

- [1] 李兆君, 马国瑞, 徐建民, 等. 植物适应重金属镉胁迫的生理及分子生物学机理[J]. 土壤通报, 2004, 35(2): 234-238.
LI Zhao-jun, MA Guo-rui, XU Jian-min, et al. Physiological and biological mechanism of plant for adapting the stress by cadmium[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(2): 234-238.
- [2] Wagner G J, Donald L S. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health[J]. *Advances in Agronomy*, 1993, 51: 173-212.
- [3] 陈怀满, 郑春荣, 周东美. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 95-102.
CHEN Huai-man, ZHENG Chun-rong, ZHOU Dong-mei. Chemical substantial activity and environment quality in soil[M]. Beijing: Science Publishing House, 2002: 95-102.
- [4] 杨居荣, 贺建群, 黄 翌. 农作物镉耐性的种内和种间差异 I. 种间差异[J]. 应用生态学报, 1994, 5(2): 192-196.
YANG Ju-rong, HE Jian-qun, HUANG Yi. Inter- and intra-specific differences of crops in cadmium tolerance I. Inter-specific difference [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1994, 5(2): 192-196.
- [5] Florijn P J, VAN Beusichem M L. Uptake and distribution of cadmium in maize inbred lines[J]. *Plant Soil*, 1993, 150: 25-32.
- [6] 王凯荣, 郭 焱, 何电源, 等. 重金属污染对糙米品质的影响[J]. 农业环境保护, 1993, 12(6): 254-257.
WANG Kai-rong, GUO Yan, HE Dian-yuan, et al. Studies on the influences of heavy metal pollution on the qualities of brown rice[J]. *Agro-environmental Protection*, 1993, 12(6): 254-257.
- [7] 吴启堂, 陈 卢, 王广寿. 水稻不同品种对镉吸收累积的差异和机理研究[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 104-107.
WU Qi-tang, CHEN Lu, WANG Guo-shou. Differences on Cd uptake and accumulation among rice cultivars and its mechanism[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1): 104-107.
- [8] Zhang G P, Fukami M, Sekimoto H. Genotypic differences in effects of cadmium on growth and nutrient compositions in wheat[J]. *Plant Nutri*, 2000, 23: 1337-1350.
- [9] 刘文龙, 王凯荣, 王铭伦. 花生对镉胁迫的生理响应及品种间差异[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 451-459.
LIU Wen-long, WANG Kai-rong, WANG Ming-lun. Physiological responses of different peanut (*Arachis hypogaea* L.) varieties to cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2): 451-459.
- [10] Bell M J, McLaughlin M J, Wright G C, et al. Inter- and intra-specific variation in accumulation of cadmium by peanut, soybean, and navybean [J]. *Australian Journal of Agriculture Research*, 1997, 48: 1151-1160.
- [11] 胡新中. 燕麦食品加工及功能特性研究进展[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(5): 122-124.
HU Xin-zhong. Food processing and functional character of oats[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2005, 25(5): 122-124.
- [12] 赵世杰, 刘华山, 董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998: 23.
ZHAO Shi-jie, LIU Hua-shan, DONG Xin-chun. Experiment directions of plant physiology[M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 1998: 23.
- [13] 刘秀梅, 聂俊华, 王庆仁. 六种植物对 Pb 的吸收与耐性研究 [J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 533-537.
LIU Xiu-mei, NIE Jun-hua, WANG Qing-ren. Research on lead uptake and tolerance in six plants[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(5): 533-537.
- [14] 蔡保松, 曹林奎. 镉对小麦生长发育的影响及其基因型间差异[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(1): 62-66.
CAI Bao-song, CAO Lin-kui. Effect of cadmium on growth and the tolerance among wheat genotype[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2003, 31(1): 62-66.
- [15] 孙建云, 王桂萍, 沈振国. 不同基因型甘蓝对镉胁迫的响应[J]. 南京农业大学学报, 2005, 28(4): 40-44.
SUN Jian-yun, WANG Gui-ping, SHEN Zhen-guo. Response of different genotypes of cabbages to cadmium stress[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2005, 28(4): 40-44.
- [16] Liang Peng, Arthur B. Pardee. Differential display of eukaryotic messenger RNA by means of the polymerase chain reaction[J]. *Science*, 1992, 257: 967-971.
- [17] 刘志华, 伊晓云, 王火焰, 等. 不同品种大白菜苗期吸收积累镉的差异研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 987-993.
LIU Zhi-hua, YI Xiao-yun, WANG Huo-yan, et al. Cd accumulation in different Chinese cabbage seedlings under Cd stress[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 987-993.
- [18] 惠俊爱, 党 志, 叶庆生. 镉胁迫对玉米光合特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2): 205-210.
HUI Jun-ai, DANG Zhi, YE Qing-sheng. Influence of cadmium stress on photosynthetic characteristics of Maize[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2): 205-210.
- [19] 肖美秀, 林文雄, 陈祥旭, 等. 镉在水稻体内的分布规律与水稻耐镉性的规律[J]. 中国农学通报, 2006, 22(2): 379-381.
XIAO Mei-xiu, LIN Wen-xiong, CHENG Xiang-xu, et al. The relation between the law of Cd distribution in rice and the Cd tolerance[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(2): 379-381.
- [20] 王焕校. 污染生态学基础[M]. 昆明: 云南大学出版社, 1990: 71-

148.
WANG Huan-xiao. Pollution ecology[M]. Kunming: Yunnan University Press, 1990: 71-148.
- [21] Baker A T M. Metal tolerance[J]. *Neco Phenol*, 1987(suppl), 106: 93-111.
- [22] Hall J L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53: 1-11.
- [23] Vogeli Lange, Wagner G J. Sub cellular localization of cadmium and binding peptides in tobacco leaves [J]. *Plant Physiol*, 1990, 92: 1086-1093.
- [24] Reese R N, White C A, Winge D R. Cadmium-sulfide crystallites in Cd-(TEC)G peptide complexes from tomato[J]. *Plant Physiol*, 1992, 9: 225-229.
- [25] 居 婷, 张春华, 胡延玲, 等. 水稻对镉的吸收转运与耐性的关系研究[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(9): 3506-3508.
- JU Ting, ZHANG Chun-hua, HU Yan-ling, et al. Studies on the relationship among cadmium absorption, translocation and tolerance in rice [J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2008, 36(9): 3506-3508.
- [26] 杨居荣, 贺建群, 黄 翌, 等. 农作物镉耐性的种内和种间差异 II. 种内差异[J]. *应用生态学报*, 1995(6): 132-136.
- YANG Ju-rong, HE Jian-qun, HUANG Yi, et al. Inter-and intra-specific differences of crops in cadmium tolerance I. Intra-specific difference[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995(6): 132-136.