

镉浓度对不同玉米品种幼苗生长及生理特性的影响

吴月莹, 邓思情, 刘松芹, 蔡兴菁, 李华欣,
杨雨非, 罗红兵, 邓 敏

(湖南农业大学农学院/湖南省玉米工程技术研究中心, 长沙 410128)

摘 要:以玉米品种郑单 958、豫单 9953、正大 999、京农科 728 为试验材料, 采用实验室水培方式, 设置不同 Cd 浓度(0、3、6、9 mg/L), 研究 Cd 胁迫 9 d 后 4 个玉米品种苗期生长指标及相关生理指标的差异, 利用主成分分析和隶属函数法进行耐 Cd 性综合评价。研究结果表明, Cd 对 4 个玉米品种苗期的株高、根长、地上部鲜重、地下部鲜重、地上部干重、地下部干重总体上起抑制作用, 对根数影响较小。随着 Cd 胁迫浓度的升高, 郑单 958、豫单 9953 和京农科 728 的总叶绿素含量呈现下降的趋势, 正大 999 呈先上升后下降的趋势。在 Cd 处理下, 相比郑单 958 和正大 999, 京农科 728 和豫单 9953 的 POD 活性较对照升高更明显, 且 MDA 含量受影响较小。根据主成分分析和隶属函数法得到 4 个玉米品种耐 Cd 能力强弱顺序为京农科 728>豫单 9953>郑单 958>正大 999。

关键词: 玉米; 镉; 生长; 生理; 隶属函数

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

Effects of Cadmium Concentration on Seedling Growth and Physiological Characteristics of Different Maize Varieties

WU Yue-ying, DENG Si-qing, LIU Song-qin, CAI Xing-jing, LI Hua-xin,
YANG Yu-fei, LUO Hong-bing, DENG Min

(College of Agriculture, Hunan Agricultural University/Maize Engineering Technology Research
Center of Hunan Province, Changsha 410128, China)

Abstract: Soil cadmium(Cd) pollution poses a significant threat to crop production. In this study, four maize varieties, Zhengdan958, Yudan9953, Zhengda999 and Jingnongke728 were used as experimental materials, and different Cd concentrations(0 mg/L, 3 mg/L, 6 mg/L, 9 mg/L) were set by laboratory hydroponics to study the differences of seedling growth indexes and related physiological indexes of four maize cultivars after Cd stress for 9d, and the comprehensive evaluation of Cd tolerance was carried out by principal component analysis and membership function method. The results showed that Cd had an inhibiting effect on the plant height, root length, shoot fresh weight, root fresh weight, shoot dry weigh and root dry weight at the seedling stage of the four maize varieties, but had little effect on root number. With the increase of Cd stress concentration, the total chlorophyll content of Zhengdan958, Yudan9953 and Jingnongke728 showed a downward trend, while Zhengda999 showed a trend of first rising and then decreasing. Compared with Zhengdan958 and Zhengda999, the POD activity of Jingnongke728 and Yudan9953 increased significantly compared with the control, and the MDA content was less affected. According to the principal component analysis and membership function method, the order of Cd tolerance of four maize cultivars was as follows: Jingnongke728 > Yudan9953 > Zhengdan958 > Zhengda999.

Key words: Maize; Cadmium; Growth; Physiology; Membership function

录用日期: 2023-01-09

基金项目: 湖南省科技创新计划“省优秀博士后创新人才项目”(2021RC2082)、国家自然科学基金项目(32101700)、中国博士后基金第 71 批面上资助项目(2022M711122)

作者简介: 吴月莹(2000-), 女, 河南新乡人, 本科, 研究方向为作物栽培与耕作。E-mail: wuyueying2022@163.com

邓 敏为本文通信作者。E-mail: hdengmin@163.com

随着工业化、城镇化的不断发展,大量重金属离子向土壤中输入并积累^[1],严重制约着粮食生产的可持续发展。2014年《全国土壤污染状况调查公报》显示,全国耕地类型土壤点位超标率为19.4%,Cd点位超标率达到7.0%,居于无机污染物之首^[2]。Cd是植物生长发育的非必需元素。研究表明,Cd具有非常强的生物毒性^[3],植物受到毒害后其生长发育会发生一系列变化,如矿质元素和水分的吸收运输和代谢受阻,光合作用和呼吸作用中有关酶结构破坏,线粒体结构、叶绿体结构损伤,基粒类囊体排列紊乱等^[4-6]。当Cd在植物体内积累到一定程度时,就会导致植株生长发育缓慢、产量降低和品质变劣,最终通过食物链进入人体体内,威胁人类健康^[7]。

玉米(*Zea mays* L.)属禾本科植物,是我国重要的粮食作物,其播种面积居于我国粮食作物之首。苗期抗逆性是玉米育种的一个重要性状^[8]。玉米在苗期时对外界环境非常敏感,生长发育受逆境胁迫的影响比较大,在Cd胁迫下玉米幼苗会出现矿质元素吸收受阻^[9]、根系生长受到抑制^[10]、叶片失绿发黄、卷曲、生物量显著降低^[11-13]等现象,严重时会影响玉米后期生长状况,最终影响产量。因此,评价和筛选苗期耐镉的玉米品种对保证玉米产量具有重要意义。另外,苗期进行耐Cd性评价,耗费时间短、操作简单、可重复性强、对环境的影响小^[14]。

前人研究表明,玉米具有丰富的遗传多样性,不同基因型玉米对Cd的耐受性存在较大差异,并且不同Cd胁迫浓度、胁迫时期和胁迫时间对玉米生长影响不同。基于此,本研究以4个玉米品种为试验材料,研究重金属Cd在不同胁迫浓度下对不同玉米品种幼苗生长及生理特性的影响,并通过主成分分析和隶属函数法对4个玉米品种的耐Cd性进行综合评价,筛选出苗期耐Cd性较强的玉米品种,为选育镉胁迫下苗势强、苗壮、苗齐的玉米新品种提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验玉米品种为玉米杂交种郑单958、豫单9953、正大999、京农科728。

1.2 试验设计

发芽:选取饱满一致且无虫害的玉米种子,将选好的种子浸泡在10% H₂O₂中,浸泡15 min后,用去离子水冲洗数次,再将玉米种子均匀摆放在铺有3层湿润滤纸的培养皿中,将其放在人工气候箱

中。温度设置为25℃,暗培养。

水培:在玉米种子的芽伸长至1 cm时,选出生长状况一致的种子,将其转移到玉米幼苗生长专用培养盒中。用去离子水培养1 d后,再用1/4浓度的Hoagland营养液(由去离子水配制得到)培养幼苗,溶液没过滤纸下边缘即可,1个培养盒定苗100株。在此期间,每隔3 d更换1次营养液,设置昼夜温度为(22±1)/(20±1)℃,光强为20 000 Lx,光照与黑暗时间分别为14 h和10 h。

胁迫:待其进入一叶一心期后进行Cd胁迫,Cd²⁺供体为氯化镉(CdCl₂·2.5H₂O,国产分析纯)。该试验共4个玉米品种,设置4个Cd处理水平(0、3、6、9 mg/L)氯化镉(CdCl₂),分别用CK、T1、T2、T3表示,共16个处理,每个处理3次重复。胁迫期间设置昼夜温度为(22±1)/(20±1)℃。

测定:在胁迫9 d后,从对照及每个处理组中进行取样,测定各项指标。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生长指标的测定

Cd胁迫处理9 d后,随机选取对照及每个处理组各5株幼苗,用清水冲洗掉根部滤纸,之后再用去离子水反复冲洗。去掉玉米种子,用剪刀将玉米幼苗从基部剪开,分为地上地下两部分,分别用刻度尺测其长度,并记录根数,再分别放置在天平上称其鲜重,将鲜样放置于105℃烘箱中杀青30 min后设置75℃烘至恒重,称其干重。

1.3.2 生理指标的测定

Cd胁迫处理9 d后,从对照及每个处理组中选取3株幼苗,摘取其上部叶片,测定叶绿素含量;其余幼苗在清洗后立刻放入液氮中,经过冷冻后贮藏在-80℃超低温冰箱中,测定过氧化物酶(POD)活性和丙二醛(MDA)含量。采用丙酮浸提法测定叶绿素含量^[15];采用愈创木酚法测定POD活性;采用硫代巴比妥酸法测定MDA含量^[16]。

1.4 耐Cd性综合评价

植物对Cd胁迫的抗性往往受到多个因素的共同调控。张珂等^[17]研究表明,用不同指标评价同种在重金属胁迫下的植物,得到的结果并不完全一致,单一指标评价往往容易造成“以偏概全”,以至于不能准确全面地反映植物的抗逆能力,所以通常使用多个指标进行综合评价。本试验参照刘梦霜等^[18]和姜昊梁等计算方法,综合评价4个玉米品种的耐Cd性。

1.4.1 单项指标耐Cd系数

与耐Cd性呈正相关的指标,采用公式(1)计算,

呈负相关的,采用公式(2)计算。

$$\alpha=(\text{处理组平均值}/\text{对照组平均值})\times 100\% \quad (1)$$

$$\alpha=(\text{对照组平均值}/\text{处理组平均值})\times 100\% \quad (2)$$

1.4.2 综合指标值

$$CI(m)=\sum_{j=1}^n[B_j\times P(m)_j], \quad (m=1,2,3; j=1,2,3,\cdots,n)$$

式中, B_j 为单项指标耐Cd系数进行标准化的值; $P(m)_j$ 为综合指标的系数。

1.4.3 隶属函数值

$$\mu(x_j)=(X_j-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min}), \quad (j=1,2,3,\cdots,n)$$

式中, X_j 为某品种第j个综合指标, $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 为所有品种中该综合指标的最大值和最小值。

1.4.4 权重

$$W_j=P_j/\sum_{j=1}^n P_j, \quad (j=1,2,3,\cdots,n)$$

式中, W_j 为第j个综合指标的权重, P_j 为第j个综合指标的贡献率。

1.4.5 综合评价值D

$$D=\sum_{j=1}^n[\mu(x_j)\times W_j]$$

1.5 数据处理与分析

所有数据为3次重复所得。利用Excel和SPSS 26.0进行数据分析。采用GraphPad Prism 9.3.1绘

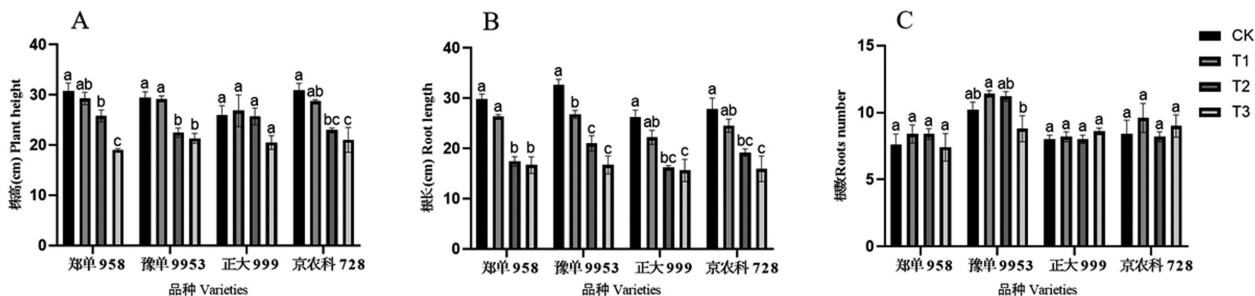
图。通过Tukey检验方法进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 Cd胁迫对玉米苗期株高、根长和根数的影响

随着Cd胁迫浓度的升高,各玉米品种苗期株高和根长总体上呈下降趋势,而各玉米品种根数呈现的趋势并不相同(图1)。图1中,T1处理即在3 mg/L Cd浓度下,4个品种的株高与CK相比,没有显著性差异。T2、T3处理即在6 mg/L Cd和9 mg/L Cd浓度下,郑单958、豫单9953和京农科728与CK相比显著降低,分别是正常植株的84.0%、76.4%、74.4%和62.0%、72.5%、68.2%;正大999与CK相比,没有显著性差异。

在3 mg/L Cd浓度下,仅豫单9953的根长与CK相比,显著降低,是正常植株的81.9%,随着Cd浓度的增加,4个品种均显著降低,其中在9 mg/L Cd浓度下,郑单958、豫单9953、正大999和京农科728的根长分别是正常植株的56.0%、51.2%、59.7%、57.2%。图1C中,4个品种各处理组的根数与CK相比,无显著性差异,郑单958和豫单9953在6 mg/L Cd、9 mg/L Cd浓度下的根数与对照相比有所增加。



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下图同。

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

图1 Cd胁迫对4个玉米品种株高、根长和根数的影响

Fig.1 Effects of Cd stress on plant height, root length and root number of four maize varieties

2.2 Cd胁迫对玉米干鲜重的影响

由图2可知,随着Cd胁迫浓度的升高,各玉米品种的地上部干鲜重和地下部干鲜重整体呈下降趋势。在3 mg/L Cd浓度下,各品种的地上部鲜重与CK相比,没有显著性差异;在6 mg/L Cd浓度下,仅京农科728与CK相比,显著降低,为正常植株的66.7%;在9 mg/L Cd浓度下,郑单958下降幅度最大,为正常植株的36.5%。在3 mg/L Cd浓度下,豫单9953和京农科728的地下部鲜重与CK相比有所增加,而郑单958和正大999与此相反,在9 mg/L Cd浓度下,郑单958下降幅度最大,为正常植株的

71.5%,各品种的处理组和对照组之间均没有显著性差异。随着Cd浓度的增加,豫单9953和正大999地上部干重的下降趋势不明显,京农科728在6 mg/L Cd浓度下显著下降,为正常植株的70.4%,郑单958在9 mg/L Cd浓度下显著下降,为正常植株的49.6%。在3 mg/L Cd浓度下,各品种的地下部干重与CK相比,没有显著性差异;在6 mg/L Cd浓度下,豫单9953与CK相比,显著降低,为正常植株的83.1%;在9 mg/L Cd浓度下,仅郑单958与CK相比,显著降低,为正常植株的68.7%。

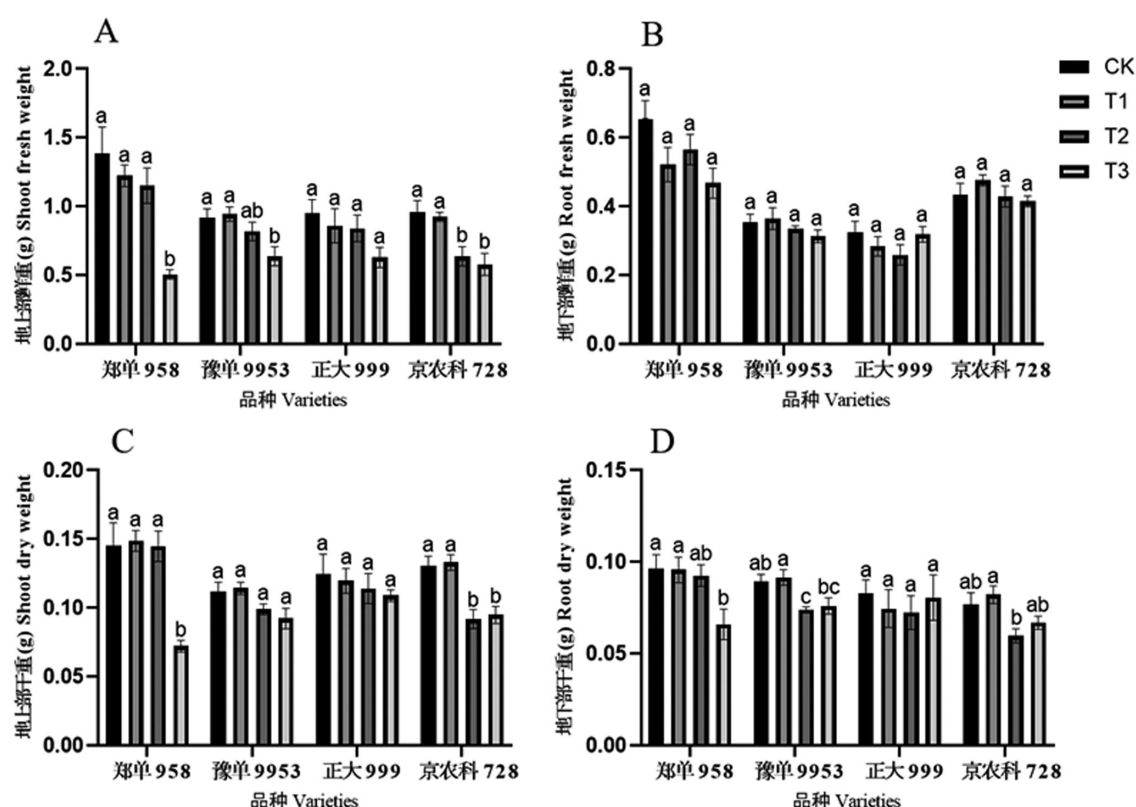


图2 Cd胁迫对4个玉米品种干鲜重的影响

Fig.2 Effects of Cd stress on dry and fresh weight of four maize varieties

2.3 Cd胁迫对玉米叶片叶绿素含量的影响

由图3可知,随着Cd胁迫浓度的升高,郑单958、豫单9953和京农科728的总叶绿素含量呈现下降的趋势,正大999总叶绿素含量呈先上升后下降的趋势。在3 mg/L Cd浓度下,正大999的总叶绿素含量与CK相比,显著增加,是正常植株的1.26倍,其余

3个品种与CK相比,没有显著性差异;在6 mg/L Cd浓度下,仅京农科728与CK相比,显著降低,为正常植株的64.6%;在9 mg/L Cd浓度下,郑单958、豫单9953和京农科728与CK相比,显著降低,分别是正常植株的71.4%、69.5%、62.4%。

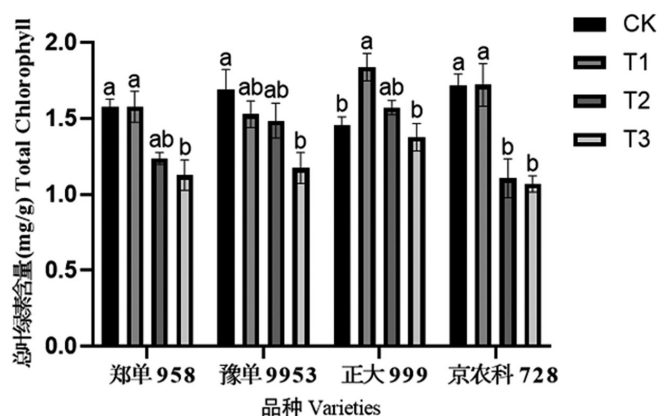


图3 Cd胁迫对4个玉米品种叶片叶绿素含量的影响

Fig.3 Effects of Cd stress on chlorophyll content in leaves of four maize varieties

2.4 Cd胁迫对玉米POD活性的影响

由图4可知,随着Cd胁迫浓度的升高,不同品种的POD活性均呈先上升后下降的趋势。豫单9953

的叶片POD活性变化幅度最大,正大999变化幅度最小,均在6 mg/L Cd浓度时达到峰值,分别为正常植株的4.0倍、1.4倍。郑单958和京农科728的根部

POD活性在3 mg/L Cd浓度时达到峰值,分别为正常植株的1.3倍、1.8倍,豫单9953和正大999在6 mg/L Cd浓度时达到峰值,分别为正常植株的1.4倍、1.3倍。

2.5 Cd胁迫对玉米丙二醛含量的影响

由图5可知,随着Cd胁迫浓度的升高,各品种的MDA含量的变化趋势并不完全相同。随着Cd胁迫浓度的升高,正大999的叶片MDA含量呈上升趋势

势,在9 mg/L Cd浓度时达到最大值,为正常植株的3.1倍,其他3个品种呈先上升后下降的趋势,郑单958在3 mg/L Cd浓度时达到峰值,豫单9953和京农科728在6 mg/L Cd浓度时达到峰值。随着Cd胁迫浓度的升高,郑单958的根部MDA含量依次上升,其他3个品种呈先上升后下降的趋势,其中正大999的变化幅度最大。

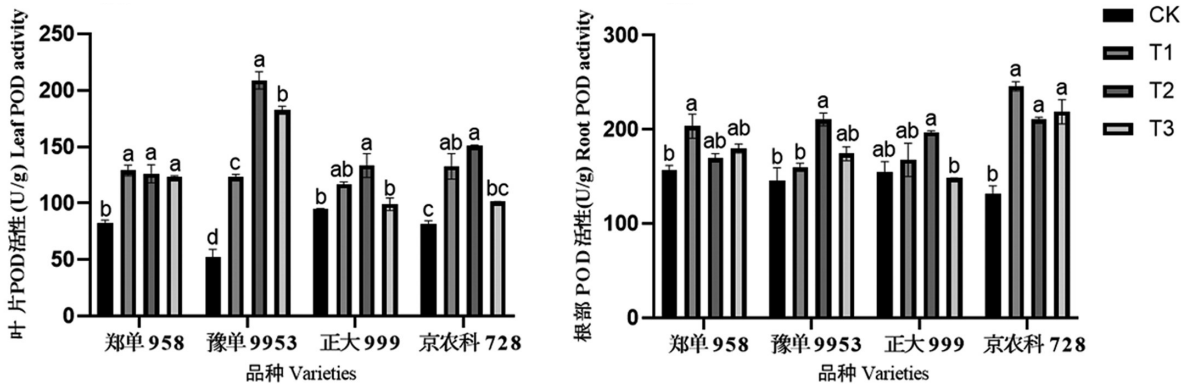


图4 Cd胁迫对4个玉米品种叶片和根部POD活性的影响

Fig.4 Effects of Cd stress on POD activity in leaves and roots of four maize varieties

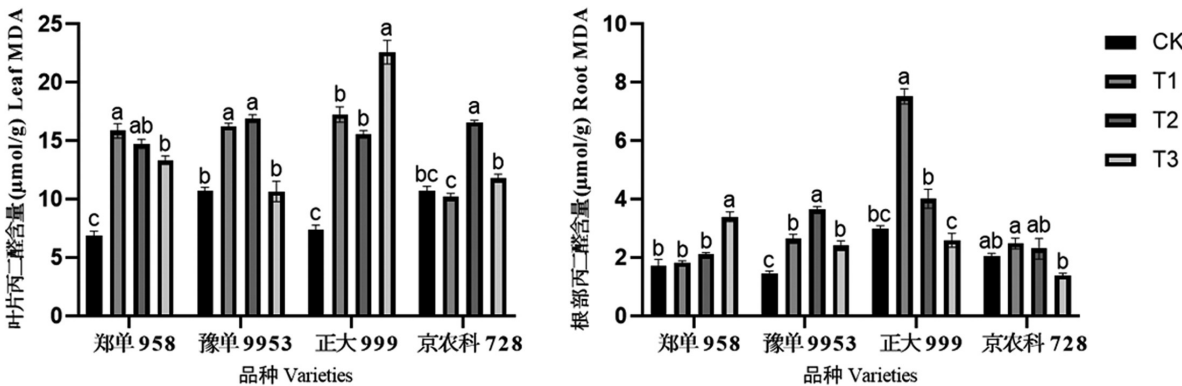


图5 Cd胁迫对4个玉米品种叶片和根部MDA含量的影响

Fig.5 Effects of Cd stress on MDA content in leaves and roots of four maize varieties

2.6 不同品种玉米耐Cd性综合评价

表1 各项指标的耐Cd系数

Table 1 The cadmium resistance coefficient of each index

品 种 Variety	耐Cd系数(%) Cadmium resistance coefficient											
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
郑单958	0.805	0.675	0.692	0.793	0.838	0.881	1.061	0.832	1.524	1.179	0.469	0.695
豫单9953	0.827	0.658	0.871	0.953	0.913	0.903	1.026	0.826	3.295	1.244	0.732	0.503
正大999	0.940	0.688	0.818	0.886	0.918	0.917	1.033	1.096	1.230	1.106	0.400	0.638
京农科728	0.786	0.714	0.747	1.011	0.817	0.904	1.063	0.758	1.569	1.711	0.837	0.999

注:R1为株高;R2为根长;R3为地上部鲜重;R4为地下部鲜重;R5为地上部干重;R6为地下部干重;R7为根数;R8为总叶绿素含量;R9为叶片POD活性;R10为根部POD活性;R11为叶片MDA含量;R12为根部MDA含量。下表同。

Note: R1, plant height; R2, root length; R3, shoot fresh weight; R4, root fresh weight; R5, shoot dry weight; R6, root dry weigh; R7, number of roots; R8, total chlorophyll; R9, leaf POD activity; R10, root POD activity; R11, leaf MDA content; R12, root MDA content. The same below.

各项指标的耐Cd系数、各综合指标的系数和贡献率如表1、表2所示,通过对耐Cd系数进行主成分分析,最终从12个单项指标提取出3个主成分,其贡献率分别为51.16%、27.52%、21.32%,可以解释Cd

胁迫下12个单项指标100%的变化。D值越大。说明该品种耐Cd性越强。由表3可知,各品种耐Cd性由强到弱依次为京农科728>豫单9953>郑单958>正大999。

表2 各综合指标的系数和贡献率
Table 2 Coefficients and contribution rates of various comprehensive indicators

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	贡献率(%) Contribution rate
P(1)	-0.32	0.27	-0.28	0.12	-0.39	-0.18	0.36	-0.31	-0.11	0.34	0.23	0.36	51.16
P(2)	-0.14	-0.05	0.38	0.47	0.12	0.22	-0.24	-0.21	0.42	0.25	0.45	-0.03	27.52
P(3)	0.34	0.46	0.08	0.26	0.05	0.50	-0.01	0.33	-0.37	0.17	-0.04	0.28	21.32

表3 Cd胁迫下各品种综合指标值、隶属函数值、综合评价及排序
Table 3 Comprehensive index value, membership function value, comprehensive evaluation value and ranking of various varieties under Cd stress

品 种 Variety	CI(1)	CI(2)	CI(3)	μ(1)	μ(2)	μ(3)	D 值 D value	排 序 Rank
郑单958	0.83	-2.05	-1.49	0.58	0.00	0.00	0.30	3
豫单9953	-1.59	2.03	-1.24	0.14	1.00	0.08	0.36	2
正大999	-2.35	-0.89	1.69	0.00	0.28	1.00	0.29	4
京农科728	3.11	0.91	1.04	1.00	0.73	0.80	0.88	1
权 重				0.51	0.28	0.21		

3 结论与讨论

不同玉米品种对Cd的耐受性存在差异。在本研究中,随着Cd胁迫浓度的增加,玉米幼苗的根长和株高受到的抑制作用显著增加,其中根长变化地更早更显著^[19]。徐天成、王艳芳等^[20]研究发现,Cd对玉米幼苗具有“低浓度促进,高浓度抑制”现象。本研究中,豫单9953也表现出相同趋势。本试验中4个品种的Cd处理组的根数与CK相比无显著性差异,可能是因为Cd对根的影响更偏向于根长和生物量,而对根数的影响较小。

Cd胁迫会使植物生理机制发生变化。Vaculík等^[21]发现,Cd会破坏光合器官结构,影响叶绿素的合成。徐天成等发现,敏感型甜玉米品种幼苗受Cd胁迫影响大,叶绿素相对含量显著降低。本研究显示,随着Cd胁迫浓度的升高,郑单958、豫单9953和京农科728的总叶绿素含量呈现下降的趋势。正大999的总叶绿素含量随着Cd胁迫浓度的升高呈先上升后下降的趋势^[22],可能是因为低浓度Cd的络合物促进植物对必需元素的吸收,促进合成卟啉环,从而增加了叶绿素的含量。抗氧化系统是植物重要保护机制,可以清除植物体过量的活性氧(ROS)

以降低对植物的伤害,而活性氧最终可通过POD分解为H₂O和O₂^[23]。本试验结果显示,随着Cd浓度的增加,4个玉米品种POD活性整体上呈先上升后下降的趋势。本研究中,根部POD的活性在一定范围内随着Cd浓度的增加而增加,超过一定值就会降低^[24,25],这可能是因为Cd浓度较低时,植株通过增加抗氧化酶活性来减轻Cd产生的毒害作用,随着Cd浓度的增加,抗氧化酶的最适环境遭到破坏,从而导致其合成受阻、活性降低。Cd胁迫会破坏细胞膜的完整性,导致膜脂过氧化,从而产生丙二醛,因此其含量可以反应细胞膜受损程度^[26]。本研究中,随着Cd浓度的升高,正大999叶片MDA含量和郑单958根部MDA含量增加,此外均呈先上升后下降的趋势。吕冬梅等^[27]均发现,随着镉浓度的升高,植株体内MDA含量上升,本研究与其他研究结果不一致的原因可能是Cd胁迫时间、胁迫时期、胁迫浓度不一致。

植物苗期对Cd胁迫极其敏感,Cd毒害植物以及植物抵抗Cd胁迫是一个复杂的生理过程。目前,关于耐Cd性玉米品种并没有统一的筛选指标。前人研究发现,各筛选指标间存在一定的相关性^[28-31]。因此,本研究先用主成分分析法将12个指

标转化为3个相互独立的综合指标,再利用隶属函数法求出隶属函数值、权重和综合耐镉能力,最终得到4个玉米品种的耐Cd性强弱排序京农科728>豫单9953>郑单958>正大999,玉米品种京农科728可作为耐Cd性玉米培育优选品种。

参考文献:

- [1] YANG Q, LI Z, LU X, et al. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 690–700.
- [2] 全国土壤污染状况调查公报(2014年4月17日)[J]. *环境教育*, 2014(6): 8–10.
National soil pollution investigation bulletin(April 17, 2014)[J]. *Environmental Education*, 2014(6): 8–10. (in Chinese)
- [3] HE Z, LI F, DOMINECH S, et al. Heavy metals of surface sediments in the Changjiang (Yangtze River) Estuary: distribution, speciation and environmental risks[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, 198: 18–28.
- [4] 樊金娟, 刘宇, 曹樱迪, 等. 玉米对镉胁迫的响应及其耐镉机制研究进展[J]. *沈阳农业大学学报*, 2018, 49(5): 633–640.
FAN J J, LIU Y, CAO Y D, et al. Responses of maize to cadmium stress and mechanisms of cadmium tolerance[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2018, 49(5): 633–640. (in Chinese)
- [5] 宇克莉, 孟庆敏, 邹金华. 镉对玉米幼苗生长、叶绿素含量及细胞超微结构的影响[J]. *华北农学报*, 2010, 25(3): 118–123.
YU K L, MENG Q M, ZOU J H. Effects of Cd^{2+} on seedling growth, chlorophyll contents and Ultrastructures in maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2010, 25(3): 118–123. (in Chinese)
- [6] HE C, DING Z, MUBEEN S, et al. Evaluation of three wheat(*Triticum aestivum* L.) cultivars as sensitive Cd biomarkers during the seedling stage[J]. *PeerJ*, 2020, 8: e8478.
- [7] HE J, ZHU C, REN Y, et al. Genotypic variation in grain cadmium concentration of lowland rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, 169(5): 711–716.
- [8] 周卫霞. 弱光胁迫对不同基因型玉米果穗生长发育的影响[D]. 河南农业大学, 2013.
- [9] TANWIR K, AKRAM M S, MASOOD S, et al. Cadmium-induced rhizospheric pH dynamics modulated nutrient acquisition and physiological attributes of maize(*Zea mays* L.)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(12): 9193–9203.
- [10] 曲梦雪, 宋杰, 孙菁, 等. 镉胁迫对不同耐镉型玉米品种苗期根系生长的影响[J]. *作物学报*, 2022, 48(11): 2945–2952.
QU M X, SONG J, SUN J, et al. Effects of cadmium stress on root growth of maize(*Zea mays* L.) varieties with different cadmium-tolerant at seedling stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(11): 2945–2952. (in Chinese)
- [11] 刘丽珍, 戎婷婷, 高昆. 镉对玉米幼苗生长的影响[J]. *农业与技术*, 2016, 36(3): 3–5, 19.
LIU L Z, RONG T T, GAO K. Effect of cadmium on the growth of maize seedlings[J]. *Agriculture and Technology*, 2016, 36(3): 3–5, 19. (in Chinese)
- [12] 姜昊梁, 黄允, 梁绍芳, 等. 镉胁迫对不同甜玉米自交系幼苗生长的影响及其相关简单重复序列分子标记初筛[J]. *浙江农业学报*, 2022, 34(8): 1582–1590.
JIANG H L, HUANG Y, LIANG S F, et al. Influences of cadmium stress on seedling growth of different sweet corn inbred lines and screening of associated molecular markers via simple sequence repeats[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2022, 34(8): 1582–1590. (in Chinese)
- [13] 魏畅, 焦秋娟, 柳海涛, 等. 镉暴露条件下玉米生长及根系构型分级特征研究[J]. *草业学报*, 2022, 31(3): 101–113.
WEI C, JIAO Q J, LIU H T, et al. Physiological effects of different Cd concentrations on maize root architecture and classification[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(3): 101–113. (in Chinese)
- [14] 徐天成, 宿惠渊, 黄允, 等. 不同甜玉米品种苗期耐镉胁迫响应分析[J]. *分子植物育种*, 2022, 20(1): 276–284.
XU T C, SU H Y, HUANG Y, et al. Analysis of sweet corn varieties in response to cadmium stress at seedling stage[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2022, 20(1): 276–284. (in Chinese)
- [15] 萧浪涛, 王三根. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [16] 张蜀秋. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [17] 张珂, 高楠, 张凌基, 等. 镉对不同品种小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *轻工学报*, 2022, 37(1): 118–126.
ZHANG K, GAO N, ZHANG L J, et al. Effects of cadmium on seed germination and seedling growth of different wheat varieties[J]. *Journal of Light Industry*, 2022, 37(1): 118–126. (in Chinese)
- [18] 刘梦霜, 郭海峰, 陈观秀, 等. 不同水稻品种对NaCl胁迫的生理响应及耐盐性评价[J]. *热带作物学报*, 2023, 44(2): 326–336.
LIU M S, GUO H F, CHEN G X, et al. Physiological response and salt tolerance evaluation of different rice(*Oryza sativa* L.) cultivars under NaCl Stress[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2023, 44(2): 326–336. (in Chinese)
- [19] 杜乔娣, 黄占斌, 沈忱, 等. 环境材料对铅、镉、砷胁迫下玉米种子萌发的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(5): 874–879.
DU Q D, HUANG Z B, SHEN C, et al. Effect of environmental materials on germination of maize seed under stress of lead, cadmium and arsenic[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5): 874–879. (in Chinese)
- [20] 王艳芳, 悦飞雪, 李冬, 等. 镉胁迫对不同基因型玉米生长和镉吸收分配的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(7): 1440–1447.
WANG Y F, YUE F X, LI D, et al. Effects of cadmium stress on plant growth, cadmium absorption and distribution of different genotypes of maize[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(7): 1440–1447. (in Chinese)
- [21] VACULÍK M, PAVLOVIČ A, LUX A. Silicon alleviates cadmium toxicity by enhanced photosynthetic rate and modified bundle sheath's cell chloroplasts ultrastructure in maize[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 120: 66–73.
- [22] 陈瑶, 李凌, 周强英, 等. 楝和梧桐对镉胁迫的生理响应及富集特性[J]. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 2020, 45(9): 66–70.
CHEN Y, LI L, ZHOU Q Y, et al. On Physiological responses and accumulation characteristics of *Melia azedarach* and *Firmiana Plat-anifolia* under stress of Cd^{2+} [J]. *Journal of Southwest China Normal*

- University(Natural Science Edition), 2020, 45(9): 66–70. (in Chinese)
- [23] 吕冬梅,朱广龙,王 玥,等. 苗期重金属胁迫下蓖麻生长、生理和重金属积累效应[J]. 作物学报, 2021, 47(4): 728–737.
- LÜ D M, ZHU G L, WANG Y, et al. Growth, physiological, and heavy metal accumulation traits at seedling stage under heavy metal stress in castor(*Ricinus communis* L.)[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(4): 728–737. (in Chinese)
- [24] 黄 辉,李 升,郭娇丽. 镉胁迫对玉米幼苗抗氧化系统及光合作用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2): 211–215.
- HUANG H, LI S, GUO J L. The influence of Cadmium(Cd^{2+}) to the antioxidant system and photosynthesis of seedling of *Zea mays* L. [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(2): 211–215. (in Chinese)
- [25] JAVED M T, AKRAM M S, TANWIR K, et al. Cadmium spiked soil modulates root organic acids exudation and ionic contents of two differentially Cd tolerant maize(*Zea mays* L.) cultivars[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 141: 216–225.
- [26] 杨家强,刘德承,韦秀媚,等. 红锥幼苗对镉胁迫的光合生理和生化响应[J]. 广西林业科学, 2022, 51(2): 212.
- YANG J Q, LIU D C, WEI X M, et al. Photosynthetic physiological and biochemical responses of castanopsis hystrix seedlings to cadmium stress[J]. Guangxi Forestry Science, 2022, 51(2): 212. (in Chinese)
- [27] 惠俊爱,党 志. 长期镉胁迫对玉米 CT38 生长和生理特性的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1226–1230.
- HUI J A, DANG Z. Long-term effects of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of maize CT38[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7): 1226–1230. (in Chinese)
- [28] 田小霞,李 丽,毛培春,等. 马蔺苗期耐镉性分析及鉴定指标筛选[J]. 核农学报, 2018, 32(3): 591–599.
- TIAN X X, LI L, MAO P C, et al. Analysis of Cd-tolerance and Determination of Cd-tolerance Evaluation Indicators in *Iris lactea* at Seedling Stage[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(3): 591–599. (in Chinese)
- [29] LAPIE C, LEGLIZE P, PARIS C, et al. Profiling of main metabolites in root exudates and mucilage collected from maize submitted to cadmium stress[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(17): 17520–17534.
- [30] 单长卷,徐新娟,孙海丽,等. 茉莉酸对镉胁迫下玉米幼苗叶片生理特性的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(3): 99–102.
- SHAN C J, XU X J, SUN H L, et al. Effects of Jasmonic acid on the leaf physiological characteristics of maize seedlings under cadmium stress[J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 24(3): 99–102. (in Chinese)
- [31] 于子昊,李胜宝,赵晓玲,等. 玉米根系,根鞘性状与镉吸收的品种差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 747–755.
- YU Z H, LI S B, ZHAO X L, et al. Differences in root morphology, rhizosheath traits, and Cd uptake in maize cultivars[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(4): 747–755. (in Chinese)

(责任编辑: 栾天宇)