

苗期甜高粱和玉米对土壤 Pb 胁迫的响应及抗性评价

陈梦妮¹ 杜天庆^{1*} 张泽宇² 薛建福¹ 崔福柱¹ 杨珍平¹ 崔振魁¹ 祁剑英¹

(1. 山西农业大学 农学院, 山西 太谷 030801;

2. 山西农业大学 信息学院, 山西 太谷 030801)

摘要 为研究甜高粱和玉米受土壤 Pb 胁迫后植株生长状况和生理指标变化的规律,采用盆栽毒理试验方法,并运用隶属函数值法对其抗性进行了综合评定。结果表明:土壤 Pb 胁迫下,甜高粱和玉米的株高、生物量和叶绿素含量下降,而叶绿素 a/b 的值升高,MDA 和脯氨酸的含量增多,细胞膜透性增加,各指标变化幅度不同,单一指标难以评判作物的抗性。而利用隶属函数值法综合评价,晋甜杂 1 号、晋甜杂 2 号、晋甜杂 3 号和大丰 30 的隶属函数综合评价值依次为 0.327 2、0.287 0、0.885 8 和 0.274 8,则对铅的抗性能力综合评定结果为:晋甜杂 3 号>晋甜杂 1 号>晋甜杂 2 号>大丰 30。因此,甜高粱晋甜杂 3 号抗性最强,更适宜在 Pb 污染土壤上种植。

关键词 甜高粱;玉米;铅;耐性系数;隶属函数值

中图分类号 S 51

文章编号 1007-4333(2016)11-0017-07

文献标志码 A

Resistance evaluation and response of sweet sorghum and corn during seedling stage under Pb stress

CHEN Meng-ni¹, DU Tian-qing^{1*}, ZHANG Ze-yu², XUE Jian-fu¹, CUI Fu-zhu¹,
YANG Zhen-ping¹, CUI Zhen-kui¹, QI Jian-ying¹

(1. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

2. College of Information, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract Based on toxicology, pot experiment was conducted to analyze the changes in growth status and physiologic indexes of sweet sorghum and corn under Pb stress. The subordinate function was used to make comprehensive evaluation. The results showed that: Under Pb stress, plant height, biomass and chlorophyll content were decreased, chlorophyll a/b, the content of MDA, the content of proline and permeance of cell membrane were increased. Different indicators showed different amplitude of variation. Single indicator failed to evaluate the resistance of crop. However, by using the method of subordinate function to evaluate plant's resistance, the value of Jintianza 1, Jintianza 2, Jintianza 3 and Dafeng 30 were 0.327 2, 0.287 0, 0.885 8 and 0.274 8, respectively. The comprehensive evaluations of resistance showed that Jintianza 3 > Jintianza 1 > Jintianza 2 > Dafeng 30. The results indicated that Jintianza 3, the strongest resistance variety, was suitable to be cultivated at Pb contaminated soil.

Keywords sweet sorghum; corn; Pb; tolerance coefficient; subordinate function value method

中国耕地中有约 2 000 万 hm² 受到重金属的污染,占到耕地面积的 20%,不适宜种植进入食物链的作物,但在此土壤上种植能源作物,可以解决生物能源原料、缓解能源危机,同时还是对重金属污染土壤进行修复的一条有效途径。目前,能源作物中甜

高粱和玉米由于其具有生物量大、生长速度快等特征极具开发价值而备受关注。如 Soudek 等^[1]采用水培的方法分析了苗期高粱对 Cd 和 Zn 胁迫的响应及其富集;Meers 等^[2]研究了能源玉米对重金属污染土壤的修复;Angelova 等^[3]研究了 4 种高粱对

收稿日期:2016-02-26

基金项目:山西省自然科学基金(2014011031-1);公益性行业(农业)科研专项(201503121-07);科技支撑计划(2015BAD23B04-02)

第一作者:陈梦妮,硕士研究生,E-mail:hongzhuangximeng@sina.com

通讯作者:杜天庆,教授,硕士生导师,主要从事作物土壤生态研究,E-mail:tgdtq1968@sina.com

Pb、Cu、Zn 和 Cd 的选择性积累差异;曹莹等^[4]研究了玉米在铅胁迫下发生的生理变化;贺玉姣^[5]研究了能源植物甜高粱和玉米在土壤外源 Pb、Zn 和 Cu 胁迫下的生理适应性,结果表明,甜高粱对 Cu 的耐受性大于玉米,Pb 和 Zn 处理时甜高粱体内积累的重金属量较玉米多。这些研究仅局限于对高粱或玉米遭受重金属胁迫时生长状况、生理生化变化及在植株内的蓄积单一方面进行研究,缺乏在相同重金属胁迫条件下不同作物或品种之间抗性的比较,尤其是对不同作物或品种综合形态和生理响应机制的研究以及筛选高抗重金属胁迫的优质能源品种资源鲜有报道。本研究以重金属铅(Pb)胁迫为例,在作物对重金属胁迫最为敏感的苗期进行试验,从生长和生理的角度比较目前山西种植面积较大的3个甜高粱和1个主推玉米品种对Pb胁迫的耐受性,以期筛选耐重金属Pb的能源作物,旨在为利用能源作物对山西Pb污染土壤的大规模修复提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验地点:山西农业大学校内试验站,该地区属于温带大陆性气候,年平均降雨量 462.9 mm,年平均气温为 9.9 °C,全年无霜期 176 d。

供试土壤:盆栽用土取自山西农业大学试验田表层土壤(0~20 cm),其基本肥力为有机质 19.23 g/kg,全氮 1.012 g/kg,速效氮 46.75 mg/kg,速效磷 10.95 mg/kg,速效钾 208.6 mg/kg,土壤 Pb 含量本底值为 21.8 mg/kg。土壤经自然风干,过 5 mm 筛,以复合肥(有效成分质量比 N:P₂O₅:K₂O=20:10:18)为肥源,按比例与土壤混匀备用。

施加的外源重金属为分析纯 Pb(CH₃COO)₂·3H₂O。

试验材料:“晋甜杂 1 号”、“晋甜杂 2 号”和“晋甜杂 3 号”3 个甜高粱品种均由山西省农科院高粱所提供;其具有茎秆产量高、含糖量多、生长速度快、抗性强等优势,均为生产乙醇较理想的能源作物。

“大丰 30”玉米由大丰种业供种。该品种与目前我国主推的品种美国“先玉 335”相比,在品质、产量、抗性和适应性方面有较大的突破,具有高产优质、抗病强、生育期适中、出籽率高的特点,其综合性能居国内领先水平。

1.2 试验设计

采用盆栽毒理试验方法。先将内径 30 cm、高 38 cm 的塑料盆埋入大田,盆口略高于地面,然后将供试土壤装盆,每盆装土 12.5 kg。

在 2015 年 5 月 1 日装盆完成后进行 Pb 胁迫。参照 GB15618—1995 我国土壤环境质量的三级标准确定 Pb 浓度(该浓度为植物正常生长和保障农林业生产的土壤临界值,Pb 含量:500 mg/kg)。换算出每盆 Pb(CH₃COO)₂·3H₂O 的用量,将每盆量配成 1 000 mL 的溶液,沿表面均匀地渗入土壤,每种作物的对照均加入同等体积的蒸馏水。每个处理重复 6 盆,3 盆用于株高和生物量的测量,3 盆用于生理指标测量。加入醋酸平衡各处理的 pH,平衡 2 周。

于 5 月 15 日播种,每盆播 30 粒种子,3~5 叶时进行定苗,每盆留苗 10 株,胁迫期间进行正常管理,定期定量浇水。6 月中旬生长处于幼苗期,取样测量,并观察其生长状况。

1.3 测量指标及方法

农艺性状的测量:每个处理取样 3 盆,每盆选择 3 株具有代表性的植株,测量其株高,求出平均值为每盆的株高;再用蒸馏水洗净植株,105 °C 杀青 30 min,75 °C 烘干后用分析天平称量干物质重量,求出每盆单株生物量。

生理指标的测定:每个处理取样 3 盆,每盆选取具有代表性的新鲜倒三片功能叶进行各项生理指标测定。叶绿素含量采用丙酮-乙醇浸泡提取法,663 nm 和 645 nm 处测定吸光值^[6],计算叶绿素总量和叶绿素 a/b;丙二醛(MDA)的含量采用硫代巴比妥酸法测定^[7];脯氨酸含量^[7]采用茚三酮显色法测定;细胞膜透性用相对电导率(%)表示,电导率用 DS-11 电导仪测定。

1.4 数据处理

1.4.1 做图及制表

选用 Excel 对试验数据进行处理。

1.4.2 统一不同指标的量纲

参考严明建等^[8]方法,用式(1)将平均值以相对指标为单位进行标准化转换,求得各性状的耐性系数(K)。利用 K 值大小比较可以消除不同作物的差异,生物量、株高、叶绿素含量、MDA 含量、相对电导率和脯氨酸含量的耐性系数依次表示为:K₁、K₂、K₃、K₄、K₅ 和 K₆。计算公式为:

$$K = \frac{\text{处理测定值}}{\text{对照测定值}} \times 100\% \quad (1)$$

1.4.3 综合评定

逆境下植株的形态和生理均发生适应性变化,单从某一方面分析植株的抗性较为局限,需要选用多种指标全面准确的评价植株抗性,隶属函数综合评估方法较一般的加权评分法更具有合理性。采用隶属函数值法^[9-10],对各指标耐性系数用模糊数学隶属度公式进行定量转换,分别用模糊数学隶属度公式求出不同作物各指标的具体函数值,株高、生物量、叶绿素和脯氨酸含量的 K 值越大抗性越强, K 值与抗性正相关,采用隶属函数的公式为:

$$U(X_{ij}) = \frac{X_{ij} - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}} \quad (2)$$

MDA 的含量和电导率的 K 值越大抗性越弱,与抗性呈负相关,用反隶属函数计算其隶属函数值,计算公式为:

$$U(X_{ij}) = 1 - \frac{X_{ij} - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}} \quad (3)$$

式(2)和(3)中: $U(X_{ij})$ 为各指标的隶属函数值, $U(X_{ij}) \in [0, 1]$; X_{ij} 为 i 品种植物第 j 个指标的 K 值; $X_{j\max}$ 和 $X_{j\min}$ 分别为不同植物第 j 项指标 K 值的最大值和最小值。参考张美俊等^[11]计算不同作物的隶属函数法综合评价值,计算公式为:

$$V_j = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X})^2}}{\bar{X}_j} \quad (4)$$

$$W_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^m V_j} \quad (5)$$

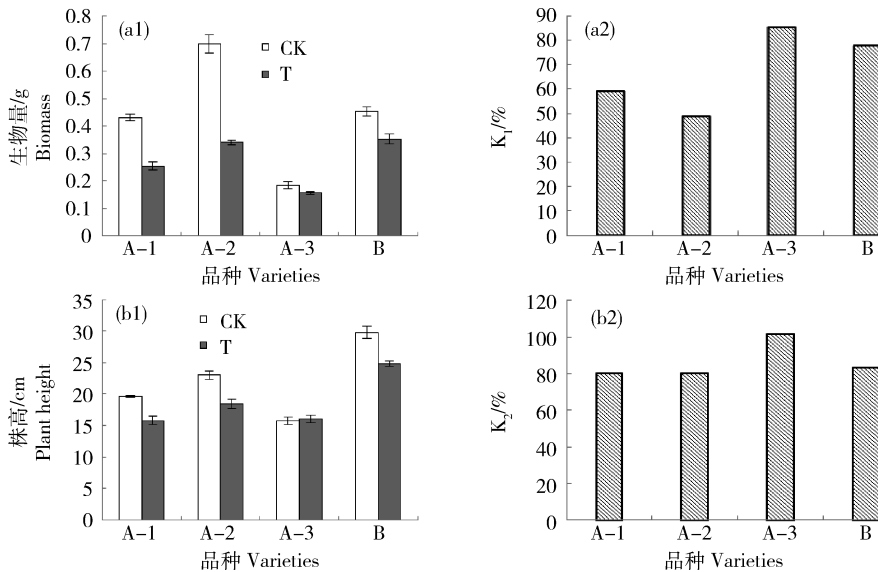
$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_{ij}) \times W_j] \quad (6)$$

式中: \bar{X}_j 表示全部品种第 j 项指标的平均值, V_j 表示第 j 项指标标准差系数, W_j 表示第 j 项指标权重, D 表示各作物的抗性综合评价值, D 值越大,抗性越强。

2 结果与分析

2.1 土壤 Pb 胁迫对甜高粱及玉米生物量的影响

图 1(a1)表明,与对照相比,Pb 胁迫下 4 个作物品种的生物量均表现出了明显的下降趋势,但递减的幅度不同。进一步对图 1(a2)进行分析,比较 K 值的大小可以看出^[12],对 Pb 胁迫的敏感性大小顺序为:晋甜杂 2 号>晋甜杂 1 号>大丰 30>晋甜杂 3 号,说明 Pb 胁迫对苗期晋甜杂 3 号生物量的抑制作用最小。



CK 对照组 Control, T 铅胁迫处理组 Under Pb stress. 下同。The same below.

A-1、A-2、A-3、B 依次代表晋甜杂 1 号、晋甜杂 2 号、晋甜杂 3 号、大丰 30, 下同。

A-1、A-2、A-3、B Represent Jintianza 1, Jintianza 2, Jintianza 3, Dafeng 30 respectively. The same below.

图 1 铅胁迫对甜高粱和玉米生物量、株高的影响及耐性系数的比较

Fig. 1 The responses of biomass and height of sweet sorghum and corn under Pb stress and the comparison of tolerance coefficient

2.2 土壤 Pb 胁迫对甜高粱及玉米株高的影响

利用高等植物生长状况评价土壤污染程度,是

土壤生态风险评价的重要方法之一,其中株高常作为评价植物生长状况的重要指标。图 1(b1)可以看

出,与对照相比,晋甜杂1号、晋甜杂2号高粱和大丰30玉米在Pb胁迫下,株高均有不同程度的下降,而晋甜杂3号高粱的株高却略有增高。结合图1(b2)来看,晋甜杂3号的株高K值为101.91%,接近于1,表明Pb胁迫未对晋甜杂3号产生抑制,而对其他2个甜高粱和玉米有不同程度的抑制。单从株高指标对Pb敏感性考虑,晋甜杂3号对苗期土壤Pb胁迫的抗性最强,其次是大丰30,而晋甜杂2号和

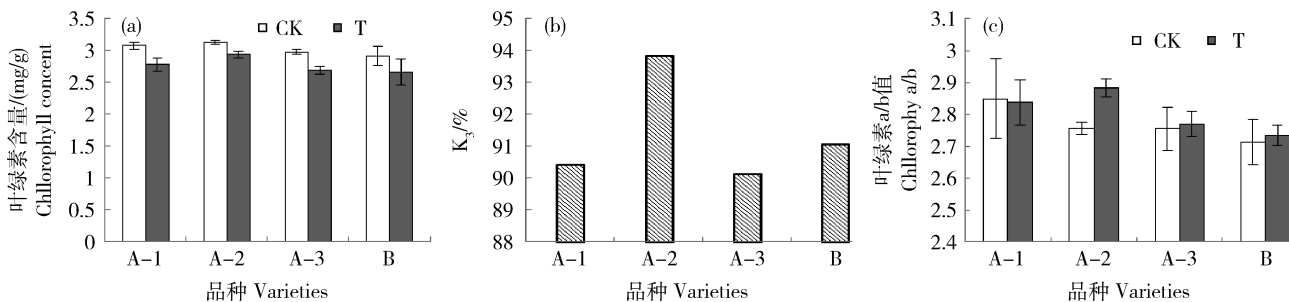


图2 铅胁迫对甜高粱和玉米叶绿素含量的影响及耐性系数比较

Fig. 2 Chlorophyll content of sweet sorghum and corn under Pb stress and the comparison of tolerance coefficient

2.4 土壤 Pb 胁迫对甜高粱及玉米 MDA 含量的影响

图3(a1)表明,4个品种作物在同等条件土壤Pb胁迫下,MDA含量均不同程度地高于对照,说明4个品种作物在逆境条件下均发生了膜脂过氧化作用。比较图3(a2)K值的大小和变化趋势可以看出,4个品种作物在同一逆境下,MDA含量变化不同,对Pb胁迫的敏感性大小排序为:大丰30>晋甜杂2号>晋甜杂1号>晋甜杂3号。晋甜杂3号MDA含量变化幅度最小,反映该品种遭受膜脂伤害最轻。

2.5 土壤 Pb 胁迫对甜高粱及玉米细胞膜透性的影响

逆境胁迫会造成细胞膜受损,细胞膜透性增大,离子外渗,引起电导率增大,被认为是逆境下对植株伤害的直观表现。图3(b1)和图3(b2)中可以看出,Pb胁迫后电导率均增大,大丰30和晋甜杂1号升高幅度较大。结合 K_5 值的大小,对铅胁迫的敏感性大小为:大丰30>晋甜杂1号>晋甜杂3号>晋甜杂2号。

2.6 土壤 Pb 胁迫对甜高粱及玉米脯氨酸含量的影响

植物在逆境下,游离脯氨酸的含量在体内增多,常以游离脯氨酸含量作为植物抗逆性的指示性指标。从图3(c1)和图3(c2)中可以看出玉米叶片的脯氨酸高于甜高粱,Pb胁迫后均呈上升趋势,上升

晋甜杂1号抗性较弱。

2.3 土壤 Pb 胁迫对甜高粱及玉米叶绿素含量的影响

从图2来看,甜高粱和玉米的叶绿素含量相近,在Pb胁迫后均有下降,下降幅度较小。K值介于90%~94%,表明Pb胁迫对叶绿素的影响较小。图2(c)反映叶绿素a/b的值处理组高于对照组。

幅度差异不明显,说明Pb胁迫促进叶片内脯氨酸增多,根据 K_5 值的大小判断对铅的敏感性依次为:晋甜杂3号>晋甜杂1号>晋甜杂2号>大丰30。

2.7 甜高粱及玉米对土壤 Pb 抗性能力大小的综合评定

逆境下植物发生错综复杂的生理变化,孤立地用某一个指标评价植物的抗性能力,很难反映其抗性本质^[13]。同时,同一指标针对不同作物的自身存在差异,利用处理值和对照值的相对关系耐性系数分析,能更为清楚地描述不同植物对铅胁迫的抗性。因此,为综合评价苗期甜高粱和玉米对Pb的抗性能力大小,采用隶属函数值法,也就是用模糊数学隶属度公式对处理组各项指标耐性系数K值进行定量转换,再根据各指标的权重计算隶属综合评价值。

由表1可以看出,综合评定晋甜杂1号、晋甜杂2号、晋甜杂3号和大丰30的隶属函数综合评价值依次为0.3272、0.2870、0.8858和0.2748。则对铅的抗性能力综合评定结果为:晋甜杂3号>晋甜杂1号>晋甜杂2号>大丰30。

3 讨论与结论

3.1 甜高粱及玉米对铅胁迫的响应

目前关于植株生长状况研究报道,如杜天庆等^[14]在对小麦幼苗期研究发现,株高和地上部分干重都与Pb胁迫浓度呈负相关,与本研究变化整体

趋势一致。但试验中不同品种间敏感性存在差异，从生物量和株高两个指标的 K 值来看，铅胁迫的敏感性大小为：晋甜杂 2 号 > 晋甜杂 1 号 > 大丰 30 > 晋甜杂 3 号。造成植株生长抑制的原因，在土壤外源铜镍对玉米生长毒害的敏感性比较研究^[15]中，提到由于根系是植物吸收营养元素和水分的主要位

点，根系受损直接影响植物的生长和发育，导致叶面积变小。而叶片又是植物进行光合作用和蒸腾作用的主要器官，叶面积减小，光合作用势必减弱，将导致植物生长的能量供给能力下降，从而导致植株矮小。从试验来看，Pb 胁迫对植株产生了毒害，导致植株的矮小。

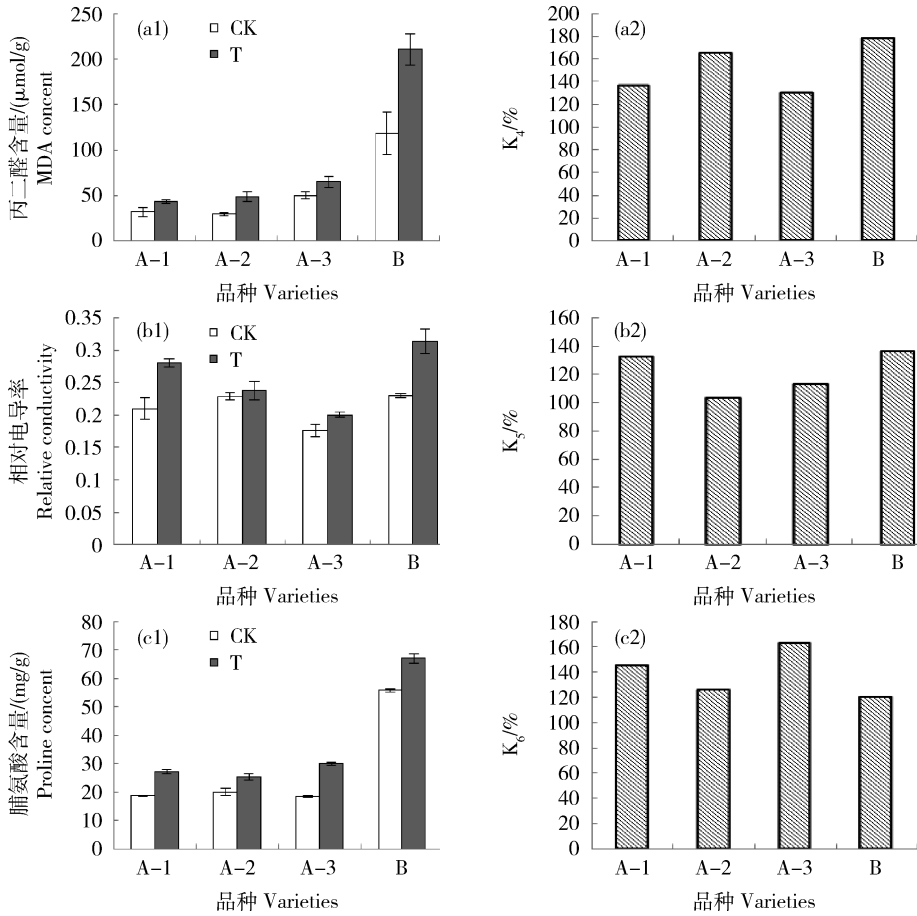


图 3 铅胁迫对甜高粱和玉米丙二醛含量、脯氨酸含量、相对电导率的影响及耐性系数比较

Fig. 3 MDA content, proline content and relative conductivity of sweet sorghum and corn under Pb stress and the comparison of tolerance coefficient

表 1 甜高粱和玉米对铅抗性的综合评定

Table 1 Comprehensive evaluation to the resistance of sweet sorghum and corn under Pb stress

指标 Index	隶属函数值 Value of subordinate function			
	晋甜杂 1 号 Jintianza 1	晋甜杂 2 号 Jintianza 2	晋甜杂 3 号 Jintianza 3	大丰 30 Dafeng 30
株高 Plant height	0.081 6	0.000 0	0.291 6	0.231 9
生物量 Biomass	0.002 7	0.000 0	0.179 3	0.026 3
叶绿素含量 Chlorophyll content	0.005 4	0.066 6	0.000 0	0.016 7
丙二醛含量 MDA content	0.133 1	0.041 7	0.151 8	0.000 0
脯氨酸含量 Proline content	0.015 2	0.156 0	0.110 2	0.000 0
相对电导率 Relative conductivity	0.089 3	0.022 7	0.152 8	0.000 0
综合评价值 Comprehensive comparison value	0.327 2	0.287 0	0.885 8	0.274 8

植物的生物量积累依赖于光合作用,光合能力的强弱直接受到叶绿素含量多少的影响^[16]。叶绿素包括叶绿素 a 和叶绿素 b,是光合作用的主要捕光色素,能够清除胁迫下光合膜形成的具有潜在破坏性的氧自由基,进而避免对光合作用 PSII 反应中心的破坏^[17-19]。所以叶绿素含量的变化,既可反映植物叶片光合作用功能的强弱,也可用以表征逆境胁迫下植物器官、组织的衰老状况^[20],对叶绿素变化的研究十分重要。本研究中,Pb 抑制了甜高粱和玉米叶绿素的合成,但影响较小,且从试验过程观察处理组叶片生长状态良好呈绿色。图 2 中所有作物的叶绿素 a/b 值均增大。一些研究中曾对叶绿素 a/b 值做了分析,如 Zengin 等^[21]和 Gomes^[22]在关于叶绿素 a/b 的报道中,提出在高浓度的重金属胁迫下,叶绿素 b 可以转化为叶绿素 a,且使叶绿素 a/b 增大。Soudek 等^[1]研究也表明高浓度重金属会使叶绿素 a/b 增大,与本结果一致。说明重金属对叶绿素 a 和叶绿素 b 的影响不同,对于其影响机制需要进一步系统分析可作为逆境的判断指标。

植株在逆境下,除叶绿素的变化,MDA、细胞膜透性和脯氨酸含量也常作为判定抗性的重要生理指标。有研究结果证明,植物重金属胁迫下产生更多的氧自由基,加剧膜脂过氧化,从而破坏膜系统^[23]。试验中,Pb 胁迫后电导率增大,使电解质的外渗量增大,表明细胞膜透性增大。膜脂氧化的另一个重要标志就是 MDA 含量的变化,MDA 含量的增加在一定程度上也能够反映植株体内的自由基的量,MDA 含量的高低可体现植株内部自由基 $\text{OH}^{\cdot-}$ 、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的量。因此,MDA 含量的高低可以反映细胞膜脂过氧化作用的强弱。本研究中甜高粱和玉米 MDA 的含量处理组均高于对照组,从敏感性来看玉米植株体内积累的自由基量最大。本研究中脯氨酸含量在 Pb 胁迫下增加,和以往逆境研究相同,植物在逆境下,脯氨酸增多可以使植物组织维持一定的渗透压。就目前对脯氨酸的研究来看,多数研究将其作为逆境指标,是植物在逆境下组织渗透压调节的重要物质,脯氨酸含量的变化是对逆境的适应性强弱的体现。

3.2 隶属函数法综合评定甜高粱及玉米对土壤 Pb 胁迫的抗性

作物不同指标对重金属胁迫的效应存在差异,单一指标难以评判作物的抗性,而将不同指标结合起来进行综合评价较单一指标变化更为可靠。陈德

明等^[9]对小麦的抗盐性研究也表明运用苗期综合指标即隶属度综合值可正确评价作物的抗盐性。徐学华等^[13]将隶属函数法用于综合评定同一树种不同年龄时期的抗重金属能力。本研究同样采用模糊数学隶属函数法,综合评价了甜高粱和玉米在试验 Pb 浓度下的响应变化,不同的甜高粱品种间存在差异,玉米大丰 30 的抗性与晋甜杂 2 号的相近抗性较弱,其中甜高粱晋甜杂 3 号抗性最强,更适宜在 Pb 污染土壤上种植。从甜高粱品种间抗性存在差异,看出选用多个品种进行比较更为准确,在未来研究中将利用更多的作物来评价其重金属抗性。本研究针对 Pb 胁迫进行分析,可推广应用于其他重金属胁迫抗性分析。同时,植物的整个生育期生理生化变化较为复杂,应进一步对多个生育时期进行分析。

4 结 论

在土壤外源 Pb 的浓度为 500 mg/kg 的胁迫下,从甜高粱和玉米的形态和生理两方面来看,株高、生物量和叶绿素含量下降,而叶绿素 a/b 值均升高,MDA、脯氨酸的含量增多,细胞膜透性增加,且各项指标变化幅度不同。并利用隶属函数法对其耐性系数进行综合评价,其抗性综合评定结果为:晋甜杂 3 号 > 晋甜杂 1 号 > 晋甜杂 2 号 > 大丰 30,则晋甜杂 3 号的抗性最强。不同品种作物对重金属胁迫有不同的适应方式,任何单项指标的研究都不能有效、准确地评价其抗性,可用隶属函数法对其抗性进行综合评价。

参 考 文 献

- [1] Petr Soudek, Šarka Petrová, Radomíra Vaňková, Jing Song, Tomáš Vaněk. Accumulation of heavy metals using sorghum sp [J]. *Chemosphere*, 2014, 104(4): 15-24
- [2] Meers E, Van Slycken, S, Adriaensen, K, Ruttens A, Vangronsveld J, Du Laing G. The use of bio-energy crops (*Zea mays*) for 'phytoattenuation' of heavy metals on moderately contaminated soils: A field experiment [J]. *Chemosphere*, 2010, 78(1): 35-41
- [3] Angelova V R, Ivanova R V, Deliblatova, Ivanov K I. Use of sorghum crops for in situ phytoremediation of polluted soils [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011: 693-702
- [4] 曹莹,黄瑞冬,曹志强. 铅胁迫对玉米生理生化特性的影响 [J]. *玉米科学*, 2005, 13(3): 61-64
- [5] Cao Y, Huang R D, Cao Z Q. Effects of Pb stress on the physiological and biochemical traits of maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2005, 13(3): 61-64 (in Chinese)

- [5] 贺玉姣. 能源植物甜高粱对重金属 Pb、Zn、Cu 胁迫的生理适应性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008
He Y J. The research of adaptability of energy plant sweet sorghum under excess Pb, Zn and Cu stress [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008 (in Chinese)
- [6] 骆耀平, 康孟利, 任明兴. 铅污染对茶树生育及相关保护酶活性的影响[J]. 茶叶, 2004, 30(4): 213-216
Luo Y P, Kang M L, Ren M X. Effect of lead pollution on tea plant growth and activity of its protective enzymes[J]. *Journal of Tea*, 2004, 30(4): 213-216 (in Chinese)
- [7] 田向荣, 吴昊, 李菁, 李朝阳. Cd、Pb 复合胁迫下湿地匍灯藓 (*Plagiomnium acutum*) 重金属累积效应及抗氧化系统响应[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5): 844-851
Tian X R, Wu H, Li J, Li Z Y. Heavy metal accumulation and antioxidative system responses of *Plagiomnium acutum* under combined cadmium and lead stress [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5): 844-851 (in Chinese)
- [8] 严明建, 黄文章, 胡景涛, 吕直文, 雷树凡, 黄成志. 应用隶属函数法鉴定水稻的抗旱性[J]. 杂交水稻, 2009, 24(5): 76-79
Yan M J, Huang W Z, Hu J T, Lv Z W, Lei S F, Huang C Z. Evaluation of rice drought resistance by subordinate function [J]. *Hybrid Rice*, 2009, 24(5): 76-79 (in Chinese)
- [9] 陈德明, 俞仁培, 杨劲松. 盐渍条件下小麦抗盐性的隶属函数值法评价[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 368-374
Chen D M, Yu R P, Yang J S. Evaluation of salt resistance of wheat with subordinate function value method [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3): 368-374 (in Chinese)
- [10] 李彦慧, 李向应, 白瑞琴, 王文凤, 韩亚琦, 杨建民. 4 种李属彩叶树木对 SO₂ 的抗性[J]. 林业科学, 2008, 44(2): 28-33
Li Y H, Li X Y, Bai R Q, Wang W F, Han Y Q, Yang J M. Resistance to sulfur dioxide of four colored leaf species in *prunus* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(2): 28-33 (in Chinese)
- [11] 张美俊, 杨武德, 乔治军, 冯美臣, 王冠, 段云, 陈凌. 不同糜子品种萌发期对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 草地学报, 2013, 21(2): 302-307
Zhang M J, Yang W D, Qiao Z J, Feng M C, Wang G, Duan Y, Chen L. Resistance evaluation and response of 16 millet varieties at germination stage to drought stress [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2013, 21(2): 302-307 (in Chinese)
- [12] 龚双姣, 马陶武, 姜业芳, 刘应迪, 李菁. 铅胁迫对 3 种藓类植物抗氧化酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2007, 27(10): 2035-2040
Gong S J, Ma T W, Jiang Y F, Liu Y D, Li J. Effects of Pb stress on the activities of antioxidant enzymes in three mosses species [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(10): 2035-2040 (in Chinese)
- [13] 徐学华, 黄大庄, 王圣杰, 王秀彦. 保定市河道公路绿化树种毛白杨的抗重金属能力[J]. 林业科学, 2010, 46(5): 7-13
Xu X H, Huang D Z, Wang S J, Wang X Y. Resistance of heavy metal in *Populus tomentosa* along stream highway [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(5): 7-13 (in Chinese)
- [14] 杜天庆, 杨锦忠, 郝建平, 崔福柱. 小麦不同生育时期 Cd、Cr、Pb 污染监测指标体系[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1845-1852
Du T Q, Yang J Z, Hao J P, Cui F Z. The pollution monitoring index system of wheat at different growth stages under the stress of Cd, Cr and Pb [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1845-1852 (in Chinese)
- [15] 郭雪雁, 左余宝, 陈世宝, 王诗宇, 马义兵. 玉米生长指标对土壤外源铜镍毒害的敏感性比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9): 1777-1783
Guo X Y, Zuo Y B, Chen S B, Wang S Y, Ma Y B. Comparison of sensitive endpoints of maize growth to the toxicity of copper and nickel added to soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9): 1777-1783 (in Chinese)
- [16] 谷绪环, 金春文, 王永章, 刘更森. 重金属 Pb 与 Cd 对苹果幼苗叶绿素含量和光合特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(24): 10328-10331
Gu X H, Jin C W, Wang Y Z, Liu G S. Effects of heavy metal Pb and Cd on chlorophyll contents and photosynthetic characteristics in different apple seedlings [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(24): 10328-10331 (in Chinese)
- [17] Demming-Adams B, Adams III W W. The role of the xanthophylls cycle carotenoids in the protection of photosynthesis [J]. *Trends in Plant Science*, 1996, 1(1): 21-26
- [18] 孙晓娥, 刘兆普, 隆小华. 不同供水水平对两菊芋品种幼苗生物量、光合和叶绿素荧光特性的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(4): 823-829
Sun X E, Liu Z P, Long X H. Effects of different levels of magnesium supply on the seedling's growth, photosynthesis, and chlorophyll fluorescence characteristics of two *Helianthus tuberosus* varieties [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(4): 823-829 (in Chinese)
- [19] 吕德国, 王志鑫, 秦嗣军, 马怀宇. 樱桃属植物叶片浸提液对东北山樱光合及叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(10): 1966-1970
Lv D G, Wang Z X, Qin S J, Ma H Y. Effects of cerasus leaf aqueous extracts on the photosynthesis and chlorophyll fluorescence of *Cerasus sachalinensis* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(10): 1966-1970 (in Chinese)
- [20] 李铮铮, 伍钧, 唐亚, 杨刚. 铅、锌及其交互作用对鱼腥草 (*Houttuynia cordata*) 叶绿素含量及抗氧化酶系统的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5441-5446
Li Z Z, Wu J, Tang Y, Yang G. Effect of Pb, Zn and their interactions on the chlorophyll content and antioxidant enzyme systems of *Houttuynia cordata* thunb [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5441-5446 (in Chinese)
- [21] Zengin F K, Munzuroglu O. Effects of some heavy metals on content of chlorophyll, proline and some antioxidant chemicals in bean (*Phaseolus vulgaris*) seedlings [J]. *International Journal of Radiation Biology & Related Studies in Physics Chemistry & Medicine*, 2005, 47(2): 157-164
- [22] Gomes M P, Marques T, Nogueira, M, de Castro E M, Soares A M. Ecophysiological and anatomical changes due to uptake and accumulation of heavy metal in *Brachiaria decumbens* [J]. *Scientia Agricola*, 2011, 68(5): 566-573
- [23] 吴凤芝, 阎秀峰, 马凤鸣. 苯丙烯酸对黄瓜幼苗膜脂过氧化作用的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(7): 1335-1340
Wu F Z, Yan X F, Ma F M. Effects of cinnamic acid on peroxidization of the plasma membrane of cucumber seedlings [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7): 1335-1340 (in Chinese)