

镉胁迫对不同品种菠菜苗期生理特性的影响

熊婷婷

(信阳农林学院园艺学院, 河南信阳 464000)

摘要:【目的】明确镉胁迫对菠菜品种间的差异和影响, 为耐镉品种的选育提供理论依据。【方法】选用“伏播611”和“夏波王”两个菠菜品种作为试验材料, 待幼苗长到三叶一心时用不同浓度的氯化镉溶液(0mg/L、5mg/L、10mg/L、20mg/L、40mg/L)浇灌7天后, 测定菠菜幼苗生长(株高、茎粗、根长、叶面积、鲜重)和生理特性(叶绿素、过氧化物酶、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和丙二醛)的变化。【结果】试验结果表明, 在氯化镉浓度为5mg/L时两个菠菜品种的株高、茎粗、根长、鲜重与CK相比都明显升高, 说明低浓度的镉胁迫对菠菜幼苗具有促进作用, 但是当镉浓度大于5mg/L时菠菜生长受到抑制。菠菜的株高、茎粗、根长、鲜重逐渐降低且叶绿素a、叶绿素b和叶绿素的总体含量都显著降低。“夏波王”和“伏播611”的SOD、POD、CAT含量均呈现先上升后下降的趋势, “夏波王”的SOD、POD、CAT在镉浓度为5mg/L时出现峰值后开始下降, “伏播611”在镉浓度为10mg/L出现峰值之后开始下降, 表明“伏播611”产生抗氧化酶来抵御镉胁迫的能力高于“夏波王”。当氯化镉浓度不断增加时两种菠菜的MDA含量不断上升, 但是“伏播611”MDA的增长量比“夏波王”低。【结论】综上所述, 低浓度的镉胁迫对菠菜幼苗的生长具有促进作用, 高浓度的镉胁迫会抑制菠菜幼苗的生长, 且“伏播611”的耐镉能力大于“夏波王”。

关键词: 镉; 胁迫; 菠菜; 生理特性

前言

近年来, 我国工业不断发展, 工矿废水的不断排放和无机化肥的过量使用, 使重金属对土壤和水的污染程度加重。镉作为生物毒性最强的重金属之一, 易被植物吸收, 具有很强的生物毒性和化学活性, 可以通过多种途径对植物产生毒害^[1]。镉对植物的危害, 在形态上表现为生长缓慢、叶片失绿, 在生理上表现为光合作用和蒸腾作用受抑制、引起氧化胁迫以及养分的吸收和同化受阻等^[2]。这不仅严重污染环境, 而且对人类健康造成巨大威胁^[3]。

菠菜(*Spinacia oleracea* L.), 属于苋科菠菜属植物, 又被称为菠苋、红根菜等。菠菜含有丰富维生素C、胡萝卜素、蛋白质等营养物质, 是人们经常栽种和食用的一种蔬菜^[4]。菠菜不仅吃起来美味, 而且具有较高的食用价值和营养价值, 因此人们对菠菜的需求量巨大。菠菜对自然环境具有很强的适应能力, 在我国南北方的设施农业中广泛种植, 是一种世界性蔬菜。

张永平等^[5]的研究发现, 用低浓度的镉处理甜瓜, 对甜瓜生长影响不大, 但是随着镉浓度的增加, 抑制作用会增强, 表明镉对甜瓜生长的影响存在剂量效应。欧丽等^[6]的研究表明, 当镉浓度小于5mg/L时会促进野苘蒿种子萌发, 但当镉浓度大于10mg/L时会抑制野苘蒿种子产生毒害, 抑制种子的萌发。杨学乐等^[7]

的研究表明在镉胁迫下, 植物的形态特征和生理生化特征会发生一些改变, 这说明镉胁迫对植物的生长发育有一定的影响, 而且不同植物对镉胁迫的响应存在着差异。然而, 对于镉胁迫对植物的影响大多集中在对植物种子萌发及其生长情况等方面的研究, 对于镉胁迫对同种植物不同品种的影响研究甚少。

本试验选用“伏播611”和“夏波王”两个菠菜品种作为试验材料, 研究不同浓度的氯化镉对“伏播611”和“夏波王”两个品种的菠菜苗期生长特性和生理特性的影响, 综合评价两个品种菠菜对镉的耐受能力, 旨在明确镉胁迫对菠菜品种间的差异和影响, 为耐镉品种的选育提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

菠菜“伏播611”和“夏波王”种子均由信阳农林学院园艺学院提供。

1.2 试验方法

首先, 挑选两个品种当中长势饱满的种子, 浸泡在35℃的温水中2h, 处理后的菠菜种子种皮变薄, 将种子平铺在放置有纱布的培养皿中, 放置到25℃的恒温催芽箱中, 每天喷施一次水, 催芽3天。等大部分种子露出白色的小芽便进行播种, 将菠菜种子种在50孔的穴盘中, 待菠菜长至三叶一心时, 选取长势一致的幼苗, 配制不同浓度的氯化镉溶液(0mg/L、

5mg/L、10mg/L、20mg/L、40mg/L)，用不同浓度的氯化镉溶液浇灌菠菜幼苗，每个处理50株幼苗，重复3次，每株菠菜幼苗浇灌200ml的氯化镉溶液，每3天浇灌一次，一周后测定2个品种的菠菜幼苗的生长指标和生理指标。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 株高、茎粗、根长、叶面积的测定

选取长势一致的菠菜幼苗，分别测定每株幼苗的根长、株高、茎粗和叶面积，每个处理50株幼苗，取3次重复求平均值。

1.3.2 干重、鲜重的测定方法

取新鲜的菠菜幼苗，清洗干净用滤纸擦干水分，放在分析天平上称量，称得的重量则为其鲜重，称重后的样品于80℃烘至恒重，再次称量得到其干重。每个处理50株幼苗，取3次重复求平均值。

1.3.3 叶绿素、丙二醛、SOD、POD、CAT的测定方法

超氧化物歧化酶（SOD）活性测定：氮蓝四唑法^[8]每个处理50株幼苗，取3次重复求平均值。

叶绿素含量的测定：丙酮提取法^[9]每个处理50株幼苗，取3次重复求平均值。

丙二醛（MDA）含量的测定方法：硫代巴比妥酸法^[10]每个处理50株幼苗，取3次重复求平均值。

过氧化氢酶（CAT）活性测定：高锰酸钾滴定

法^[11]每个处理50株幼苗，取3次重复求平均值。

过氧化物酶（POD）活性的测定：愈创木酚法^[12]每个处理50株幼苗，取3次重复求平均值。

1.4 数据统计

用软件Microsoft Excel 2019和软件SPSS 20.0对试验数据进行统计处理并进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫对菠菜幼苗生长特性的影响

2.1.1 镉胁迫影响下菠菜幼苗的根长和株高

当土壤受到镉污染时，土壤中的镉以镉离子的形式被植物吸收^[13]。由表1得知，不同浓度的镉胁迫对菠菜幼苗的根长和株高都有不同程度的影响。当氯化镉浓度为5mg/L时，“夏波王”与CK相比株高和根长分别上升了14.31%、8.99%，而“伏播611”与CK相比株高和根长分别上升了14.90%、12.27%，说明镉浓度为5mg/L时能促进两个品种的菠菜幼苗的生长。当镉浓度高于5mg/L时，“夏波王”和“伏播611”幼苗的株高和根长与CK相比均呈现不同程度的下降趋势，说明当氯化镉浓度大于5mg/L时对菠菜幼苗的生长具有抑制作用，但是相对而言对“夏波王”根长和株高的抑制作用大于“伏播611”，表明“伏播611”比“夏波王”耐镉能力强。

2.1.2 镉胁迫影响下菠菜幼苗茎粗和叶面积

表1 镉胁迫影响下菠菜幼苗的根长和株高

Cd ²⁺ 浓度/(mg·L ⁻¹)	根长/cm		株高/cm	
	“夏波王”	“伏播611”	“夏波王”	“伏播611”
0	2.67 ± 0.21 ^b	2.77 ± 0.040 ^b	9.78 ± 0.025 ^b	10.07 ± 0.15 ^b
5	2.91 ± 0.21 ^a	3.11 ± 0.040 ^a	11.18 ± 0.025 ^a	11.57 ± 0.03 ^a
10	2.07 ± 0.21 ^c	2.23 ± 0.119 ^c	8.36 ± 0.025 ^c	9.24 ± 0.11 ^c
20	0.96 ± 0.26 ^d	1.23 ± 0.119 ^d	7.74 ± 0.243 ^d	8.54 ± 0.11 ^d
40	0.67 ± 0.21 ^e	0.87 ± 0.010 ^e	6.87 ± 0.580 ^e	6.96 ± 0.072 ^e

注：表中同列不同字母表示在P=0.05水平上差异显著，下同。

由表2得知，当氯化镉的浓度为5mg/L时，“夏波王”与CK相比茎粗和叶面积分别上升9.09%、5.58%，而“伏播611”与CK相比茎粗和叶面积分别上升18.18%、7.58%。说明当镉浓度为5mg/L时会促使两个品种的菠菜幼苗的生长。当氯化镉浓度大于5mg/L时，“夏波王”和“伏播611”幼苗的茎粗和叶面积与CK相比均呈现不同程度的下降趋势，且“夏波王”茎粗和叶面积的下降程度大于“伏播611”，

说明当镉浓度大于5mg/L时已经超出了菠菜的耐受能力范围，开始对菠菜产生毒害作用抑制菠菜幼苗的生长发育，但是相比较而言，对“夏波王”幼苗茎粗和叶面积的抑制作用大于“伏播611”，表明“伏播611”比“夏波王”耐镉能力强。

2.1.3 镉胁迫影响下菠菜幼苗的鲜重

由表3得知，当镉浓度为5mg/L时，两个品种菠菜幼苗的地上鲜重和地下鲜重均高于CK。当镉浓度

表2 镉胁迫影响下菠菜幼苗的茎粗和叶面积

Cd ²⁺ 浓度 (mg/L)	茎粗 (cm)		叶面积 (cm ²)	
	“夏波王”	“伏播611”	“夏波王”	“伏播611”
0	0.11 ± 0.0058 ^b	0.11 ± 0.0058 ^b	3.58 ± 0.010 ^b	3.69 ± 0.153 ^b
5	0.13 ± 0.0058 ^a	0.12 ± 0.01 ^a	3.78 ± 0.010 ^a	3.97 ± 0.203 ^a
10	0.097 ± 0.0058 ^c	0.097 ± 0.0058 ^b	3.2 ± 0.055 ^c	3.41 ± 0.351 ^c
20	0.083 ± 0.0058 ^d	0.083 ± 0.0058 ^c	2.94 ± 0.047 ^d	3.14 ± 0.100 ^d
40	0.073 ± 0.0058 ^d	0.078 ± 0.0058 ^c	2.34 ± 0.047 ^d	2.94 ± 0.100 ^d

表3 镉胁迫影响下菠菜幼苗的鲜重

Cd ²⁺ 浓度 (mg/L)	地上鲜重 (g)		地下鲜重 (g)		总鲜重 (g)	
	“夏波王”	“伏播611”	“夏波王”	“伏播611”	“夏波王”	“伏播611”
0	0.52 ± 0.100 ^b	0.55 ± 0.377 ^b	0.067 ± 0.0015 ^b	0.077 ± 0.0021 ^b	0.59 ± 0.11 ^b	0.630.037 ^b
5	0.6 ± 0.300 ^a	0.7 ± 0.208 ^a	0.089 ± 0.0015 ^a	0.126 ± 0.0257 ^a	0.69 ± 0.12 ^a	0.83 ± 0.22 ^a
10	0.41 ± 0.057 ^c	0.47 ± 0.100 ^c	0.048 ± 0.0026 ^c	0.062 ± 0.0010 ^b	0.47 ± 0.11 ^c	0.53 ± 0.11 ^b
20	0.32 ± 0.012 ^d	0.350.100 ^d	0.035 ± 0.0058 ^d	0.052 ± 0.0005 ^d	0.38 ± 0.12 ^d	0.4 ± 0.10 ^c
40	0.18 ± 0.012 ^e	0.22 ± 0.100 ^e	0.24 ± 0.0021 ^e	0.038 ± 0.0025 ^b	0.2 ± 0.11 ^e	0.26 ± 0.10 ^e

大于5mg/L时, 镉胁迫对两个品种的菠菜幼苗均产生抑制作用, 两个菠菜幼苗的地上鲜重和地下鲜重均降低, 但相比较而言, “夏波王”幼苗的地上鲜重、地下鲜重的下降更为显著。综上所述, “伏播611”具有更强的耐镉能力。

2.2 镉胁迫对菠菜幼苗生理特性的影响

2.2.1 镉胁迫影响下菠菜幼苗的叶绿素含量

叶绿素是植物进行光合作用不可或缺的物质, 植物所含叶绿素的多少在一定程度上反映了该植物同化能力的大小^[14]。因此, 可通过对比两种菠菜在镉胁迫作用下叶绿素含量的变化, 从而比较两种菠菜耐镉能力的大小。由表4得知, 当镉浓度为5mg/L时, “夏波王”和“伏播611”与CK相比叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素的含量都上升, 说明镉浓度为5mg/L时有利于促进菠菜体内叶绿素的合成。但是“夏波王”叶绿素的上升幅度小于“伏播611”且当镉浓度大于5mg/L

时, “夏波王”的叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量的下降幅度大于“伏播611”, 说明镉浓度大于5mg/L时已经对“伏播611”产生了毒害作用, 阻止了菠菜幼苗体内叶绿素的合成。综上所述, “伏播611”的耐镉能力大于“夏波王”。

2.2.2 镉胁迫影响下菠菜幼苗的SOD含量

超氧化物歧化酶SOD可以将超氧阴离子自由基(O₂⁻)歧化为H₂O₂和O₂, 是植物清除体内自由基的关键酶之一^[15]。由图1得知, 当镉浓度为5mg/L时, “夏波王”和“伏播611”的SOD活性都开始增加, 分别为70.35和82.53U/g FW, 说明此时镉胁迫已经导致植物体内的生理机制不平衡, 促使植物体内的SOD增加来调节机体平衡。当镉浓度为20mg/L时, “夏波王”的SOD活性为58.95U/g FW, 与CK相比SOD下降了14.46%, 而“伏播611”的SOD活性为71.95 U/g FW, 与CK相比上升了4.21%, 说明此时的镉胁迫已

表4 镉胁迫影响下菠菜幼苗的叶绿素含量

Cd ²⁺ 浓度/(mg · L ⁻¹)	叶绿素a (mg/g · FW)		叶绿素b (mg/g · FW)		总叶绿素 (mg/g · FW)	
	“夏波王”	“伏播611”	“夏波王”	“伏播611”	“夏波王”	“伏播611”
0	0.86 ± 0.006 ^b	0.89 ± 0.020 ^b	0.57 ± 0.021 ^b	0.62 ± 0.025 ^b	1.43 ± 0.020 ^b	1.51 ± 0.040 ^a
5	0.91 ± 0.017 ^a	1.06 ± 0.058 ^a	0.61 ± 0.010 ^a	0.71 ± 0.025 ^a	1.58 ± 0.026 ^a	1.77 ± 0.083 ^b
10	0.63 ± 0.015 ^c	0.81 ± 0.015 ^c	0.41 ± 0.005 ^c	0.55 ± 0.025 ^c	1.04 ± 0.015 ^c	1.37 ± 0.023 ^c
20	0.43 ± 0.010 ^d	0.86 ± 0.010 ^d	0.29 ± 0.012 ^d	0.45 ± 0.025 ^d	0.72 ± 0.006 ^d	1.14 ± 0.012 ^d
40	0.34 ± 0.015 ^e	0.52 ± 0.013 ^e	0.21 ± 0.012 ^e	0.37 ± 0.025 ^e	0.56 ± 0.026 ^e	0.9 ± 0.090 ^e

经超出了“夏波王”的耐受范围，因此导致“夏波王”的SOD含量低于CK。当镉浓度为40mg/L时，“夏波王”的SOD活性为45.32 U/g FW，“伏播611”的SOD活性为58.65 U/g FW，此时“伏播611”SOD活性已经低于CK，说明当镉浓度为40mg/L时，已经超出“伏播611”的耐受范围。综上所述，“伏播611”的耐镉能力大于“夏波王”。

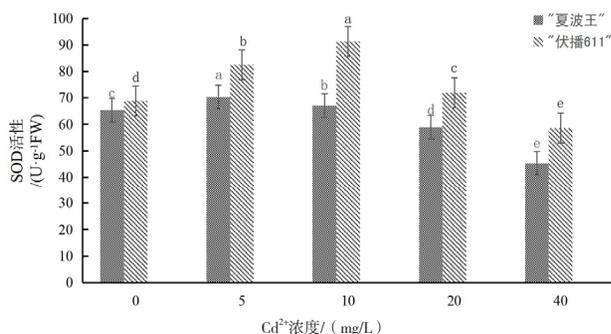


图1 镉胁迫影响下菠菜幼苗的SOD含量

2.2.3 镉胁迫影响下菠菜幼苗的POD含量

过氧化物酶POD，是广泛存在于植物体内的一种氧化酶，它能消除植物体内的自由基，从而提高植物的抗逆性^[16]，因此植物体内POD含量的变化可表现出植物的抗逆能力。由图2可以看出，当镉浓度为5mg/L时，“夏波王”的POD活性表现为0.156，与CK相比上升了92.6%，“伏播611”的POD活性表现为0.234，与CK相比上升175.3%，两种菠菜均提高POD的含量来对抗外界镉胁迫产生的影响。当镉浓度为20mg/L时，“夏波王”的POD含量为0.071，与CK相比下降了12.34%，说明此时镉浓度已经超出了“夏波王”的耐受能力，对“夏波王”幼苗产生毒害作用，导致体内的POD活性急剧下降。当镉浓度为40mg/L时，此时“伏播611”的POD表现为0.069低于CK，说明此时的镉浓度超出了“伏播611”幼苗的耐受范围。综上所述，“伏播611”的耐镉能力大于“夏波王”。

2.2.4 镉胁迫影响下菠菜幼苗的CAT含量

过氧化氢酶作为过氧化氢专一清除剂，在植物抗逆上起重要作用^[17]。图3可以看出，当氯化镉浓度不断增加时，两种菠菜幼苗的CAT活性均先上升后下降。当镉浓度为5mg/L时，“夏波王”的CAT活性为0.95，而“伏播611”幼苗CAT的活性为0.96，与CK

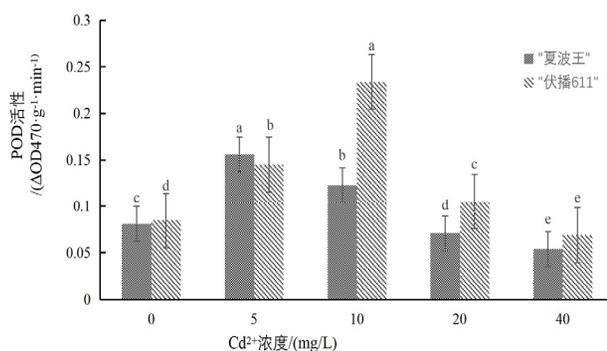


图2 镉胁迫影响下菠菜幼苗的POD含量

相比分别上升79.24%和62.71%，说明此时的镉浓度刺激了植物体内生理机制，通过增加CAT活性含量来调节体内机制的平衡。当镉浓度为20mg/L时，“夏波王”的CAT活性继续下降，此时“夏波王”的活性为0.45，与CK相比下降了15.09%，说明此时的镉浓度已经彻底超出“夏波王”的耐受范围，不能再通过产生CAT来调节体内生理机制，而“伏播611”的CAT活性也开始有所下降，当镉胁迫浓度为40mg/L时，“伏播611”的CAT活性降至0.42，此时与CK相比降低了27.58%，说明此时已经达到了“伏播611”最大的耐镉范围，而此时“夏波王”的CAT活性继续下降，已降至0.32。由此可见“夏波王”的耐镉能力不如“伏播611”。

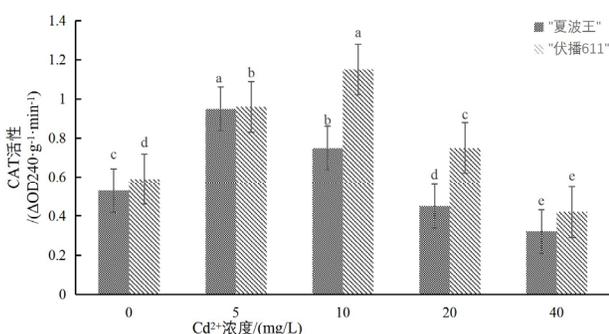


图3 镉胁迫影响下菠菜幼苗的CAT含量

2.2.5 镉胁迫影响下菠菜幼苗的MDA含量

MDA是植物体在逆境条件下，质膜发生过氧化的终产物，其含量反映植物受伤害的程度^[18]。由图4得知，随着镉浓度的增加，两种菠菜幼苗的MDA含量均不断上升。“伏播611”的MDA含量的上升幅度更小，说明“夏波王”受到镉胁迫的伤害程度更大，从而能看出“伏播611”比“夏波王”的耐镉能力更强。

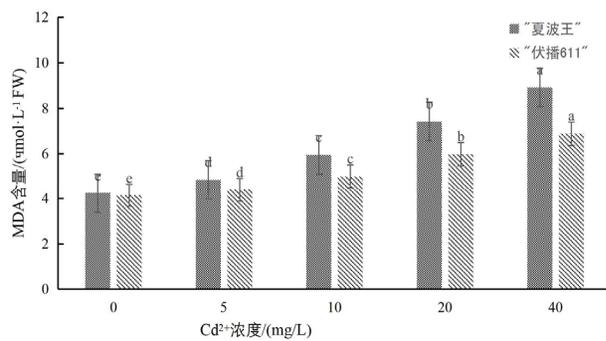


图4 镉胁迫影响下菠菜幼苗的MDA含量

3 讨论与结论

植物处于幼苗期时对外界环境的胁迫比较敏感，因此，我们选择研究在镉胁迫条件下两种菠菜在幼苗时期的生长状况，来比较两种菠菜的耐镉能力。发现低浓度的镉胁迫对两种菠菜幼苗的株高、根长、叶面积、地上鲜重和地下鲜重均有促进作用，高浓度的镉胁迫对两种菠菜幼苗的株高、根长、叶面积、地上鲜重和地下鲜重均有抑制作用，并且镉浓度越高对菠菜幼苗的抑制作用越大，这与任艳芳等^[19]的研究结论一致。低浓度的镉可刺激菠菜幼苗体内的相关抗逆酶活性，可能进而促进菠菜的生长，随着镉浓度的增加，超出了菠菜幼苗自身可承受范围^[20]，则对菠菜生长造成危害，从而导致菠菜幼苗的株高、根长、叶面积、地上鲜重和地下鲜重均下降。不同品种的菠菜对镉的耐受范围也不同。本试验结果表明，当镉浓度大于5mg/L时，对“夏波王”和“伏播611”的生长都具有抑制作用，但“伏播611”的株高、根长、叶面积、地上鲜重和地下鲜重下降程度均低于“夏波王”，由此推断出“伏播611”的耐镉能力更强。

叶绿素是植物进行光合作用所必须的物质，叶绿素含量的高低会直接影响植物的光合速率，进而影响植物的长势^[21]。本试验结果表明，“夏波王”和“伏播611”两种菠菜幼苗的叶绿素含量均表现为先增加后降低，表明低浓度的镉胁迫有利于菠菜幼苗叶绿素的合成，而高浓度的镉胁迫则会对菠菜叶绿素的合成产生抑制效果。当镉浓度为5mg/L时，“夏波王”和“伏播611”的叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素的含量均上升，但“伏播611”幼苗叶绿素的上升幅度大于“夏波王”。当镉浓度大于5mg/L时，“夏波王”和“伏播611”的叶绿素含量与CK相比均下降，表明此时的镉浓度已经超出其耐受范围。“夏波王”

叶绿素的含量的下降程度大于“伏播611”，表明“夏波王”受到的镉胁迫损害程度更大，耐镉能力更弱。

已有研究表明，镉胁迫会诱导植物体内产生大量的活性氧，从而导致氧化胁迫^[22]。而当植物受到外界环境的毒害时，植物体内的过氧化物酶、超氧化物歧化酶和过氧化氢酶等抗氧化酶可以通过增加酶的含量来调节植物体内生理机制达到平衡。本试验结果表明，随着镉浓度的增加“夏波王”和“伏播611”的SOD、POD、CAT活性均表现为先上升后下降的趋势。当镉浓度为5mg/L时，“夏波王”的SOD、POD、CAT的活性达到最大值，当镉浓度为10mg/L时，“伏播611”的SOD、POD、CAT的活性达到最大值，这表明随着外界环境中镉浓度的增加，菠菜的抗逆性也在不断变强，说明了一定浓度的镉胁迫能刺激菠菜幼苗的抗氧化酶的活性，激发菠菜植株的抵抗逆境的防御机制^[23]，而且浓度越高刺激效应越大，但是这个刺激效应不能无限增加，它是有一定限度的，当超出这个限度时就会导致菠菜的SOD、POD、CAT的活性开始下降。当镉浓度大于5mg/L时，“夏波王”的SOD、POD、CAT活性不断下降，当镉浓度为20mg/L时，“夏波王”的SOD、POD、CAT活性低于CK，说明此时已经达到了“夏波王”的耐受范围。当镉浓度大于10mg/L时，“伏播611”的SOD、POD、CAT活性不断下降，当镉浓度为40mg/L时已超出“伏播611”的耐受范围。但是两种幼苗的升幅不同，“夏波王”的SOD、POD、CAT活性上升程度小于“伏播611”，但是其下降程度却大于“伏播611”。镉胁迫使菠菜幼苗的SOD、POD、CAT活性下降可能与镉胁迫干扰了其分子结构或改变了其空间结构有关^[24]，因此“伏播611”的耐镉能力更强。

MDA的含量可以用来反映植物机体脂质过氧化的程度，从而间接地反映植物细胞的损伤程度^[25]。本研究结果显示，当氯化镉浓度不断增加时，“夏波王”和“伏播611”的MDA均呈现上升趋势，在镉浓度为40mg/L时两种菠菜的MDA含量达到峰值，表明随着镉浓度的增加，膜脂过氧化作用增强，膜受害程度加重，给植物组织细胞带来了极大的损伤。“夏波王”的MDA含量上升幅度大于“伏播611”，表明随着镉浓度的增加，“夏波王”幼苗细胞的损伤程度更大，暗示“伏播611”的耐镉能力更强。

综上所述, 5mg/L的低浓度镉胁迫能够促进菠菜幼苗的生长, 镉浓度高于5mg/L则会抑制菠菜幼苗生长, “伏播611”比“夏波王”的耐镉能力更强。

参考文献

- [1] 李静如, 胡志程, 张爱爱, 等. 镉铜胁迫对甜瓜种子萌发及幼苗生长和生理的影响[C]. 中国园艺学会2019年学术年会暨成立90周年纪念大会论文摘要集, 2019:214.
- [2] 鲜靖苹, 柴澍杰, 王勇, 等. 镉胁迫对草地早熟禾生长与生理代谢的影响[J]. 核农学报, 2019, 33 (1): 176-186.
- [3] 冯建鹏, 史庆华, 王秀峰, 等. 镉对黄瓜幼苗光合作用、抗氧化酶和氮代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (4): 970-974.
- [4] 江苏省植物研究所. 江苏植物志(下) [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1982:117.
- [5] 张永平, 沈若刚, 姚雪琴, 等. 镉胁迫对甜瓜幼苗抗氧化酶活性和光合作用的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31 (34): 82-88.
- [6] 欧丽, 刘足根, 方红亚, 等. Cd对野苘蒿种子发芽的影响[J]. 生态毒理学报, 2011, 6 (4): 441-444.
- [7] 杨学乐, 何录秋, 刘寿明, 等. 向日葵、油菜对镉胁迫反应及对镉污染土地修复作用研究进展[J]. 作物研究, 2017, 31 (1): 93-98.
- [8] 王华芳, 展海军. 过氧化氢酶活性测定方法的研究进展[J]. 科技创新导报, 2009 (19): 7-8.
- [9] 何启平, 陈莹. 校园常见植物叶绿素提取方法比较及其含量测定[J]. 黑龙江农业科学, 2015 (10): 117-120.
- [10] 李子芳, 吴锡冬. 植物丙二醛含量测定试验设计方案[J]. 天津农业科学, 2016, 22 (9): 49-51.
- [11] 王小平. 盐胁迫对菠菜幼苗抗性生理的研究[J]. 安徽农学通报, 2010, 16 (23): 36-38.
- [12] 刘用璋, 许广涛. 愈创木酚法测定甲状腺过氧化物酶活性的实验研究[J]. 锦州医学院学报, 1981 (Z1): 44-49.
- [13] 周子欢. 拟南芥LSU1/2调控镉抗性和镉积累的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- [14] 张妙娟, 吴琼, 张引弟. NaCl胁迫对油菜幼苗生长的影响研究[J]. 种子科技, 2020, 38 (23): 11-14.
- [15] 湛润生, 王莉, 岳新丽, 等. 镉胁迫对芥菜型油菜幼苗生理特性的影响[J]. 种子, 2020, 39 (10): 109-112.
- [16] 武玉珍, 闫芳. Cu²⁺胁迫对生菜种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 山西农业科学, 2018, 46 (12): 2005-2009.
- [17] 马艳丽. 水分胁迫对3个枣品种过氧化氢酶含量的影响[J]. 林业科技, 2020, 45 (2): 21-22.
- [18] 刘吉, 黄梦桑, 赵敏华, 等. NaCl胁迫对菠菜萌发和苗期生理特性的影响[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2022, 51 (1): 1-8.
- [19] 任艳芳, 何俊瑜, 周国强, 等. 镉对镉胁迫下水稻幼苗根系生长和根系形态的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19 (01): 102-107.
- [20] 张朋飞, 武军艳, 孙万仓, 等. 干旱胁迫对白菜型冬油菜苗期生理特性的影响[J]. 西北农业学报, 2015, 24 (2): 84-90.
- [21] Zhang D, Wu X X, Ding A F, et al. Effects of hydrated lime and biochar on the bioavailability of Cd and Pb and microbial activity in a contaminated soil[J]. Ecology and Environmental Chemistry, 2019, 38 (11): 2526-2534.
- [22] Zhang D, Ding A F. Effects of passivating agents on the availability of Cd and Pb and microbial community function in a contaminated acidic soil[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2019, 103 (1): 98-105.
- [23] 刘文英, 张东旭, 张永芳, 等. 不同浓度镉胁迫对3种芥菜型油菜幼苗生理特性的影响[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2014, 30 (4): 45-48.
- [24] 许耀照, 曾秀存, 王振朝, 等. NaCl胁迫对冬油菜种子萌发和生理特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2023, 35 (3): 499-508.
- [25] Xu J L, Cai Q Y, Wang H X, et al. Study of the potential of barnyard grass for the remediation of Cd- and Pb-contaminated soil[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189 (5): 224.