



李金龙,贾云鹤,李岩,等.土壤含水量对镉胁迫下油豆角生长发育及镉积累的影响[J].黑龙江农业科学,2022(5):54-59.

# 土壤含水量对镉胁迫下油豆角生长发育及镉积累的影响

李金龙,贾云鹤,李岩,许春梅,刘思宇

(黑龙江省农业科学院 园艺分院,黑龙江 哈尔滨 150069)

**摘要:**为改善镉胁迫下保护地油豆角品质,降低重金属镉在油豆角内的积累量,以黑龙江省主栽油豆角品种“将军”为供试材料,采用盆栽试验方式,模拟在  $1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  镉胁迫下,调查不同土壤含水量对油豆角植株高度、主茎粗度、单株产量、可溶性糖含量、维生素 C 含量,叶片中超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性,丙二醛(MDA)含量、脯氨酸(Pro)含量、可溶性蛋白质(Pr)含量,以及植株各部分镉含量等指标的影响。结果表明:土壤含水量在  $80\% \sim 90\%$  时,以上各指标均优于其他处理,可溶性糖、维生素 C、可溶性蛋白质含量增加,丙二醛、脯氨酸含量降低,抗氧化酶活性均显著低于对照和其他处理,且叶片、果实、根部的镉含量均最低。表明,适当漫灌能够改善镉胁迫下油豆角的生长发育。

**关键词:**土壤含水量;镉胁迫;油豆角;生长发育;镉积累

油豆角是东北地区特有的蔬菜作物,其中蛋白质含量高达  $4\%$  以上,是市场其他蔬菜作物中蛋白质含量的 20 倍以上,且秋延后保护地种植,收益远高于其他蔬菜<sup>[1]</sup>。镉(Cd)作为重金属元素,极易通过食物链传递给人,在土壤中的危害已远超其他重金属元素<sup>[2]</sup>,已被联合国和世界卫生组织认定为首位研究的环境和食物污染物<sup>[3]</sup>。目前黑龙江省耕地面积全国第一,但我国耕地中镉超标面积占总耕地面积的  $7\%$  以上<sup>[4]</sup>,所以土壤问题亟待解决。

水是植物物质代谢的重要原料,同时土壤水分的变化也影响根系对矿质元素的吸收<sup>[5]</sup>,赵全志等<sup>[6]</sup>研究得出旱稻在不同水分处理下,矿质元素吸收随着土壤含水量的提高而增加;张曼义等<sup>[7]</sup>研究发现,土壤水分能够影响黄瓜的物质代谢和抗氧化酶含量的变化;张永平等<sup>[8]</sup>指出,镉能够诱导细胞内产生大量活性氧,引起细胞内超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)的活性变化。目前镉胁迫在茄子<sup>[9]</sup>、白菜<sup>[10]</sup>、南瓜<sup>[11]</sup>等植物上已有报道,但土壤水分

对镉胁迫下油豆角生长发育的影响报道较少。本试验,通过对土壤中含水量的控制,探究镉胁迫对油豆角生长势、营养物质含量、抗氧化酶活性与镉积累量的影响,以期对东北油豆角绿色优质化生产,提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试油豆角“将军”种子为黑龙江省农业科学院园艺分院品种资源研究室提供;供试土壤选择前茬种植过葱蒜的优质黑土,质地疏松,且未喷施过含有镉的农药化肥,pH 为 6.4;试剂  $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$  来自上海展云化工有限公司;土壤水分测量仪型号为亿拓 YT-DY-0101。

### 1.2 方法

1.2.1 种子处理和土壤配制 试验于 2020 年 10 月中旬,在黑龙江省农业科学院园艺分院品种资源节能日光温室内进行。选择种皮光滑完整,大小均匀的油豆角种子,温水浸种 30 min 后,装于纱网袋中,用湿毛巾包裹放置  $30^\circ\text{C}$  的恒温箱内,催芽 2~3 d,每天根据毛巾干湿度,适当补水。

土壤选用孔径 0.5 cm 的筛网过筛,分别加入 100,10 和  $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的 N、P、K,使用恶霉灵 1 000 倍液对土壤消毒,每个花盆装土 5 kg,用  $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$  试剂调配土壤镉含量为  $1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2.2 试验设计 试验设 4 个处理,每个处理 10 株,随机区组,3 次重复。每个处理土壤含水量分别为土壤水饱和量的  $50\% \sim 60\%$ 、 $60\% \sim 70\%$ 、 $70\% \sim 80\%$  和  $80\% \sim 90\%$ ,以土壤含水量

收稿日期:2022-01-14

基金项目:黑龙江省农业科学院“农业科技创新跨越工程”专项(HNK2019CX10-12)。

第一作者:李金龙(1986—),男,硕士,助理研究员,从事蔬菜种质资源收集、保存及利用研究。E-mail:lijinlong537@126.com。

通信作者:刘思宇(1983—),女,硕士,副研究员,从事蔬菜品种资源以及油豆角新品种选育研究。E-mail:liusiyu79@163.com。

60%~70%作对照,分别记为处理1、处理2(CK)、处理3、处理4。选择芽势接近的种子,每个花盆播2~3粒种子,各区组按照株行距40 cm×66 cm,常规管理,待幼苗长至两叶一心时定苗,每盆保留长势健壮幼苗一株。

1.2.3 测定项目及方法 使用土壤水分测量仪检测土壤含水量,待土壤含水量低于处理下限后,使用压力喷壶调节土壤含水量,待长出4片真叶后,分别在10,20,30,40和50 d,测定叶片中SOD、POD、CAT酶活性,可溶性糖、维生素C含量,丙二醛、脯氨酸、可溶性蛋白质含量;在采收期测定油豆角株高、茎粗、单株产量,以及叶片、根、果实中的镉含量,具体方法详见表1。

表1 各指标测定方法

测定指标	试验方法
土壤水饱和量	环刀法 <sup>[12]</sup>
土壤含水量	土壤水分测量仪
SOD活性	邻三苯酚法 <sup>[13]</sup>
POD活性	愈创木酚法 <sup>[13]</sup>
CAT活性	紫外吸收法 <sup>[13]</sup>
丙二醛含量	TCA+TBA方法 <sup>[14]</sup>
脯氨酸含量	紫外分光光度计 <sup>[15]</sup>
可溶性蛋白质含量	考马斯亮蓝G-250法 <sup>[14]</sup>
镉含量	原子吸收分光光度计法 <sup>[16]</sup>
可溶性糖含量	蒽酮法 <sup>[17]</sup>
维生素C含量	2,6-二氯酚靛酚法 <sup>[18]</sup>

1.2.4 数据分析 采用SPSS 23.0和Excel 2003软件进行主要统计数据的相关性及显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土壤含水量处理对镉胁迫下保护地油豆角生长指标的影响

由表2可知,镉胁迫下株高与单株产量随着土壤含水量的增加而增高,其中处理4的株高显著高于处理2(CK),增长6.62%;处理4的单株产量显著高于其他处理,达到492.75 g,相较处理1、处理2和处理3,分别增长了36.37%、28.03%和12.33%;处理2的茎粗与处理3之间差异不显著,但处理4显著高于处理2,达到6.23 mm。

表2 不同土壤含水量处理对镉胁迫下油豆角生长指标的影响

处理	株高/cm	茎粗/mm	单株产量/g
1	219.16±2.11 c	4.81±0.16 c	361.32±8.11 c
2(CK)	226.42±2.47 b	5.82±0.17 b	384.88±6.62 bc
3	232.52±1.35 b	6.17±0.13 b	438.66±5.36 b
4	241.41±3.11 a	6.23±0.22 a	492.75±4.33 a

注:同列数据后不同小写字母代表处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

### 2.2 不同土壤含水量处理对镉胁迫下油豆角生理生化指标的影响

2.2.1 可溶性糖含量 由图1可知,各处理可溶性糖含量均呈现先增加后降低的变化,且处理1的可溶性糖含量在各时间点均显著低于其他处理。各处理的可溶性糖含量在第30天时达到顶峰,其中处理4的可溶性糖含量最高,达到3.22%,30~50 d时,各处理的可溶性糖含量逐渐降低。在第50天时,各处理可溶性糖含量达到最低值,处理2、处理3和处理4之间可溶性糖含量差异不显著。

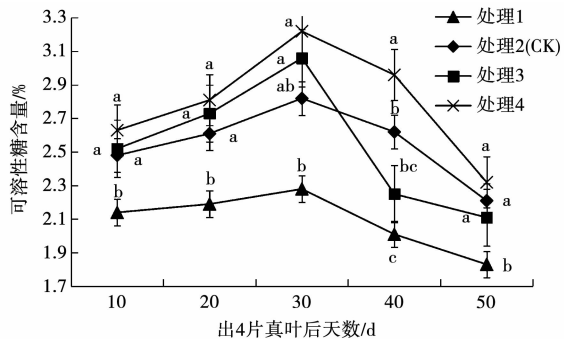


图1 不同土壤含水量处理对镉胁迫下油豆角可溶性糖含量的影响

注:不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著。下同。

2.2.2 维生素C含量 由图2可知,维生素C含量呈现先增加后降低的变化,在第20天时,处理2维生素C含量达到最高值,且与处理3的维生素C含量差异不显著。在第30天时,处理2的维生素C含量开始降低,其他处理的维生素C含量继续升高,且处理4的维生素C含量最高,为66.93 mg·kg<sup>-1</sup>,显著高于其他处理。在30 d后,各处理维生素C含量均逐渐降低,在50 d时达到最低值,其中处理1的维生素C含量最低,且显著低于其他处理,仅为36.39 mg·kg<sup>-1</sup>。

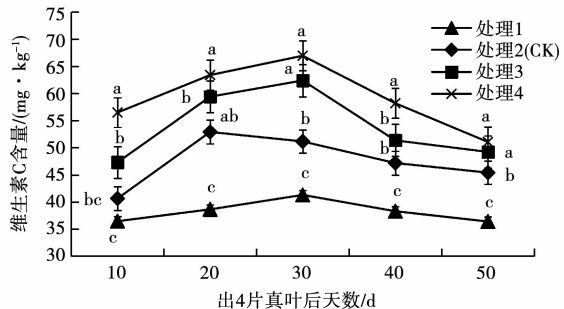


图2 不同土壤含水量处理对镉胁迫下油豆角维生素C含量的影响

2.2.3 SOD活性 由图3可知,SOD活性随着处理天数的增加,呈现先增高后降低的变化趋势。

10~50 d时,处理1的SOD活性显著高于其他处理。第20天时,处理1的SOD活性达到最大值,到达 $276.13 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。20~50 d时,各处理SOD活性逐渐降低。在第50天时,各处理SOD活性达到最低值,处理2、处理3、处理4的SOD活性显著低于处理1,其中处理4的SOD活性最低,仅为 $152.37 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。

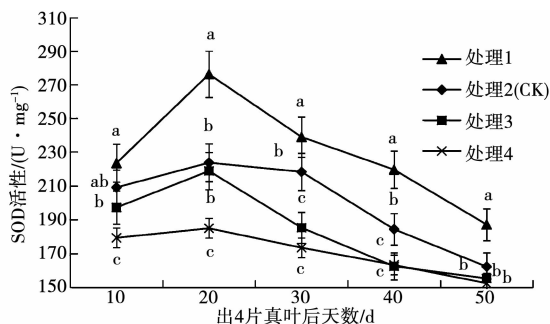


图3 不同土壤含水量处理对镉胁迫下油豆角SOD活性的影响

2.2.4 POD活性 由图4可知,过氧化物酶(POD)活性随着天数的增加呈现先增高后降低的变化趋势。第10天时,处理2与处理3的POD活性差异不显著。20~30 d时,处理1、处理2、处理4的POD活性逐渐增加到最高值,而处理3酶活性逐渐降低。第30天时,处理1的POD活性达到最大值,为 $1020.79 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。第40天时,处理3与处理4的POD活性差异不显著。第50天时,处理4的POD活性显著低于其他处理,达到最低值,仅为 $323.52 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

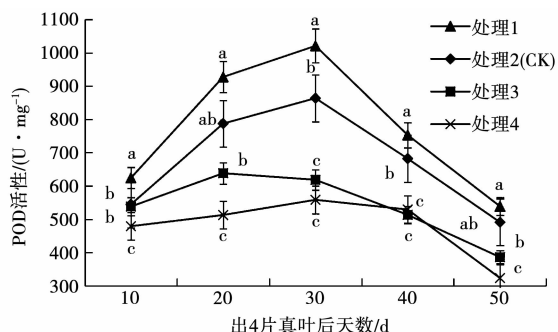


图4 不同土壤含水量处理对镉胁迫下油豆角POD活性的影响

2.2.5 CAT活性 由图5可知,过氧化氢酶(CAT)活性呈现先增高后降低的变化趋势。10~30 d时,各个处理CAT酶活性依次为处理1>处理2>处理3>处理4。第20天时,处理3的CAT活性达到最大值,为 $26.45 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。第30天时,处理1、处理2和处理4的CAT活性

达到最大值。第40天时,处理4的CAT活性高于处理3,但二者差异不显著。30~50 d时,各处理的CAT活性迅速降低,处理4的CAT活性达到最低值,仅为 $8.30 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

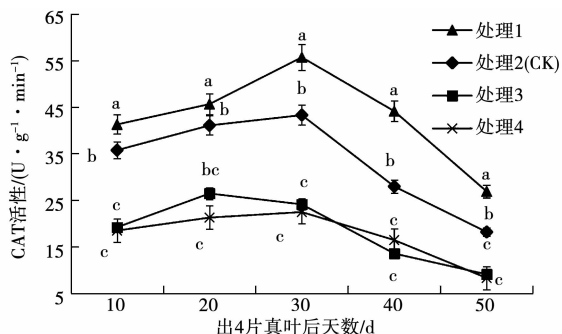


图5 不同土壤含水量处理对镉胁迫下油豆角CAT活性的影响

2.2.6 MDA含量 由图6可知,10~20 d时,各处理丙二醛(MDA)含量迅速增长。20~30 d时,处理1与处理2的MDA含量持续增加,处理3和处理4的MDA含量降低。在30 d时,处理1的MDA含量显著高于其他处理,达到最大值 $9.82 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。30~50 d时,各处理MDA含量均开始降低。第50天时,处理3和处理4的MDA含量差异不显著,且处理4的MDA含量最低,为 $2.94 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

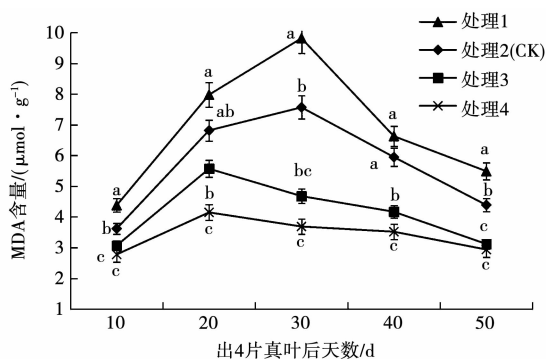


图6 不同土壤含水量处理对镉胁迫下油豆角MDA含量的影响

2.2.7 脯氨酸含量 由图7可知,10~50 d时,处理1的脯氨酸(Pro)含量显著高于其他处理,且处理4的Pro含量最低。第10天时,处理3和处理4的Pro含量差异不显著。20~30 d时,处理1的Pro含量显著高于其他处理,且处理2的Pro含量增长速率最快。30~40 d时,处理1的Pro含量增长速率高于其他处理。第40天时,各处理的Pro含量达到最大值,其中处理1的Pro含量最高,为 $248.19 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。40~50 d时,各处

理的Pro含量降低,第50天,处理4的Pro含量显著低于其他处理,为 $179.31\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

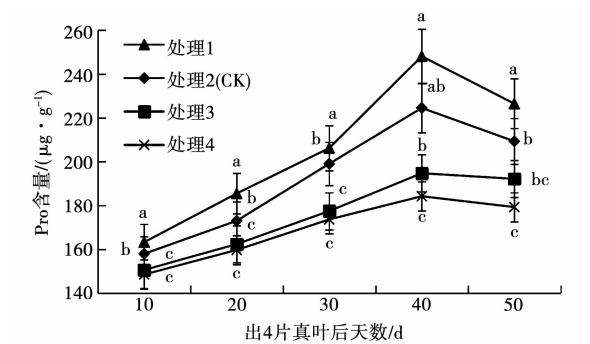


图7 不同土壤含水量处理对镉胁迫下油豆角Pro含量的影响

2.2.8 可溶性蛋白质含量 由图8可知,可溶性蛋白质(Pr)含量随着天数的增加呈先增高后降低的趋势,各时期的Pr含量为处理4>处理3>处理2>处理1。第10天时,处理4的Pr含量显著高于其他处理,处理1的Pr含量最低,仅为 $12.16\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。第20天时,处理3与处理4的Pr含量差异不显著。第30天时,处理4的Pr含量达到最大值,为 $29.52\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。第40天时,处理3的Pr含量达到最大值 $25.85\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。40~50 d时,各处理Pr含量逐渐降低。第50天时,处理3和处理4的Pr含量显著高于其他处理。

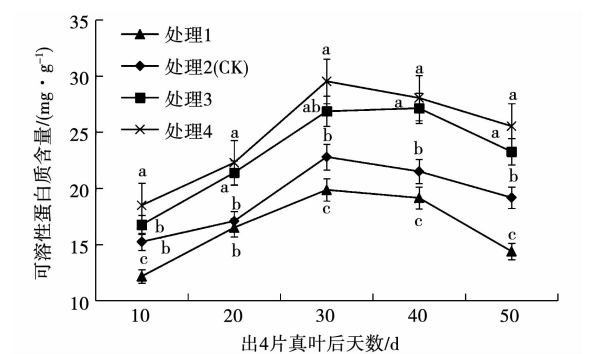


图8 不同土壤含水量处理对镉胁迫下油豆角可溶性蛋白质含量的影响

### 2.3 不同土壤含水量处理对镉胁迫下油豆角植株Cd含量的影响

由表3可知,处理1的根部和果实中镉含量显著高于其他处理,而处理1和处理2叶片中镉含量差异不显著,处理2和处理3果实中镉含量差异不显著。油豆角各组织中镉含量为根部>果实>叶片,其中处理1的植株各部分镉含量最高,处理4的镉含量显著低于其他处理。

表3 油豆角植株各部分镉含量

处理	镉含量/( $\times 10^{-4}\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )		
	根部	叶片	果实
1	$6.48\pm 0.03\text{ a}$	$0.29\pm 0.02\text{ a}$	$0.36\pm 0.02\text{ a}$
2(CK)	$6.19\pm 0.05\text{ b}$	$0.23\pm 0.01\text{ a}$	$0.29\pm 0.01\text{ b}$
3	$5.73\pm 0.05\text{ bc}$	$0.18\pm 0.02\text{ b}$	$0.22\pm 0.01\text{ b}$
4	$5.03\pm 0.02\text{ c}$	$0.09\pm 0.03\text{ c}$	$0.16\pm 0.02\text{ c}$

## 3 讨论

### 3.1 不同土壤含水量处理对镉胁迫下植物生长发育的影响

土壤中镉浓度过高,会导致植物叶片萎焉枯黄、叶绿素分解,有机物合成降低,最终抑制植株生长,致使产量降低<sup>[19-20]</sup>。研究表明,低浓度镉对莴苣的生长有一定促进作用,土壤中镉浓度为 $1\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,莴苣的根长、株高和叶面积均高于对照。当镉含量超过 $5\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,植株生长缓慢,胁迫作用显现<sup>[21]</sup>。说明,土壤含水量低时,金属镉对植株生长起到抑制作用,本研究结果表明,当土壤含水量在80%~90%时,能够减弱金属镉对植物的胁迫作用,但低浓度镉对作物生长是否存在促进作用,将在以后的试验中进一步研究。

### 3.2 不同土壤含水量处理对镉胁迫下植物生理生化指标的影响

可溶性糖是植物体生长发育的重要能源物质,维生素C直接参与物质代谢,其含量能够反映植物体抗逆境能力<sup>[22]</sup>。镉作为重金属离子能够导致细胞膜上运输蛋白变性,破坏细胞膜完整性,阻断植物体内物质代谢<sup>[23]</sup>。在对孔雀草的研究中发现,镉浓度在 $0.01\sim 0.10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,可溶性糖含量升高,当镉浓度超过 $0.10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 后,叶绿素含量降低,光合作用受到抑制,可溶性糖含量随之降低<sup>[24]</sup>,这与本研究结果一致。解静芳等<sup>[25]</sup>研究表明,菠菜在镉含量为 $1\sim 50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间土壤中生长,每100 g样品维生素C含量从45 mg,逐渐递减。镉能够降低细胞内抗氧化酶活性,造成细胞膜损伤,产生活性氧伤害,维生素C本身具有还原性,能够作为保护剂,稳定细胞结构<sup>[26]</sup>。因此低浓度的镉胁迫能够在维生素C的作用下起到适当的缓解作用。本研究表明,土壤含水量在80%~90%之间,能够有效提高植物中维生素C的含量,缓解镉对植物的胁迫作用,有利于油豆角内可溶性糖和可溶性蛋白质含量积累,提高果实品质。

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)是植物体内主要抗氧化酶,能够清除细胞内氧化还原反映产生的自由基,当植物体富集过量的镉,镉进入细胞后会诱导细胞内产生大量自由基,破坏细胞内自由基与抗氧化酶的平衡,因此抗氧化酶活性变化能够反映植物体在过量镉作用下的胁迫程度<sup>[27]</sup>。在对菜豆幼苗的研究中发现,随着镉处理浓度达到  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)的活性显著增高,当镉处理浓度达到  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,抗氧化酶活性较低<sup>[28]</sup>。对黄瓜的研究表明,在镉处理浓度为  $1 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,叶片 SOD 酶活性,呈现先增高后降低的变化趋势<sup>[29]</sup>。而在镉胁迫 50 d 后,抗氧化酶活性下降,这可能是由于膜质过氧化产物的产生抑制了抗氧化酶的活性<sup>[30]</sup>。本研究表明,土壤含水量在  $80\% \sim 90\%$  之间,油豆角内抗氧化酶活性显著低于对照,能够有效降低土壤中镉对油豆角抗氧化酶活性的影响。

丙二醛(MDA)含量是衡量细胞内膜质过氧化程度的重要指标,镉胁迫下会引起细胞过氧化反应,产生大量 MDA,与细胞膜上蛋白质相结合,导致细胞膜透性增强<sup>[31]</sup>。脯氨酸(Pro)能够稳定镉胁迫下细胞内外压力平衡,维持细胞结构的功能,常用作植物体抗逆境指标。可溶性蛋白质(Pr)是植物体内大分子蛋白的重要合成材料,大分子蛋白能够与镉结合形成络合物,降低细胞内游离态镉对细胞的伤害<sup>[32]</sup>。在对芥菜的研究中发现<sup>[33]</sup>,镉浓度在  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,MDA 含量较低,随着镉浓度的增加,MDA 含量逐渐升高,达到  $16 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在对玉米的研究中发现,随着镉处理时间的增加,脯氨酸含量增加,可溶性蛋白质呈现先增后降的变化趋势<sup>[34]</sup>。本研究表明,土壤含水量在  $80\% \sim 90\%$  之间,油豆角生长发育过程中 MDA、Pro 含量最低,Pr 含量最高,说明该土壤含水量下,金属镉对细胞损伤最小,因此适量增加土壤含水量,能够减轻镉对油豆角的胁迫作用。

### 3.3 灌溉对植物镉胁迫的影响

植物根系对金属镉有一定的吸收和固定能力,能够阻隔游离态镉向上运输,从而提高植物对重金属的抗性<sup>[35]</sup>。在对黄瓜的研究中发现,当土壤含水量低于  $65\%$  时,叶、根和果实中镉含量显著高于其他处理,当土壤水含量升高,达到  $80\%$  以上,植株各部分镉含量显著降低。在含水量一

定的条件下,根系中镉含量高于果实,且叶片中镉含量最低,这可能与水分对土壤理化性质的影响有关,且适宜的土壤环境能够改善根系周围微生物活性,通过改变根系环境,影响金属镉的植物有效性<sup>[36]</sup>。本研究表明,过量或适量灌溉,能够有效缓解镉对油豆角的胁迫作用,其株高、茎粗和单株产量各指标均优于对照,这是由于土壤含水量过低导致土壤中镉离子浓度升高,加重了金属镉对油豆角的胁迫作用,而过量的水分降低了土壤中金属镉离子浓度,削弱了重金属镉对油豆角的胁迫作用。

## 4 结论

本研究表明,土壤含水量在  $80\% \sim 90\%$  之间时,油豆角植株各部分镉含量显著低于对照和其他处理,果实内镉含量仅为  $1.6 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,远低于国家标准  $5.0 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[37]</sup>,且各项生理生化指标也优于对照,使镉胁迫下油豆角抗氧化酶活性降低,丙二醛、脯氨酸含量减少,可溶性蛋白质含量升高,减少植株各部分镉含量积累。因此,土壤含水量在  $80\% \sim 90\%$  之间,为最佳土壤水分含量,从而表明,适当漫灌能够改善镉胁迫下油豆角的生长发育。

### 参考文献:

- [1] 周建军,周桔,冯仁国.我国土壤重金属污染现状及治理战略[J].中国科学院院刊,2014(3):315-320.
- [2] 辛焱,徐鸣雨,田硕,等.东北地区特有蔬菜品种——油豆角[J].经济动植物,2020,23(7):30-32.
- [3] 贾乐,朱俊艳,苏德纯.秸秆还田对镉污染农田土壤中镉生物有效性的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(10):1992-1998.
- [4] 庞雪敏,徐劫,邹圆,等.蔬菜对重金属镉的积累效应研究进展[J].广州化工,2017,45(8):12-14.
- [5] 朱丹.Cd 和水分复合胁迫对牡丹叶片抗氧化酶的活性影响[J].现代中药研究与实践,2013,27(6):10-12.
- [6] 赵志全,高桐梅,宁慧峰,等.分蘖期土壤水分对早稻矿质养分吸收的影响[J].水土保持学报,2005(6):90-93.
- [7] 张曼义,杨再强.土壤水分胁迫对设施黄瓜叶片光合及抗氧化酶系统的影响[J].中国农业气象,2017,38(1):21-30.
- [8] 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.
- [9] 李智荣,鲁荣海,潘绍坤,等.不同茄子材料的镉积累特性研究[J].湖北农业科学,2020,59(14):97-100.
- [10] 陈华,陈永快,王涛,等.水杨酸对镉胁迫下不结球白菜幼苗生长及生理的响应[J].福建农业学报,2020,35(12):1321-1329.
- [11] 陈碧华,郭卫丽,孟凡茹,等.镉胁迫对南瓜植株镉吸收积累及光合特性的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(12):1-6.

[12] 劳同浩,姜俊红,李就好,等. 南雄烟区土壤田间持水量测定对比试验研究[J]. 现代农业科技,2013(1):208-209.

[13] 郝再彬,苍晶,徐仲,等. 植物生理实验[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004:45-89.

[14] 陈彦旭. 水杨酸和吡嗪酰胺对香椿芽采后生理及贮藏品质的影响[D]. 阜阳:阜阳师范大学,2020.

[15] 尚天歌. 柑橘 P5CS1 克隆和鉴定以及脯氨酸代谢基因的表达分析[D]. 武汉:华中农业大学,2020.

[16] 周薇. 柑橘镉胁迫耐受性及其生理研究[D]. 重庆:西南大学,2014.

[17] 张琮. 设施栽培对杨梅果实发育及品质形成影响的研究[D]. 杭州:浙江农林大学,2020.

[18] 闫怡. 鲜切青椒和鲜切油豆角保鲜加工关键技术研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2015.

[19] 周江涛,赵德英,程存刚. 镉对苹果生长发育和矿质元素含量的影响[J]. 中国果树,2021(1):16-21.

[20] 于方明,仇荣亮,汤叶涛,等. Cd 对小白菜生长及氮素代谢的影响研究[J]. 环境科学,2008,29(2):506-511.

[21] 任艳芳,何俊瑜,刘畅,等. 镉胁迫对苣荬幼苗生长及抗氧化酶系统的影响[J]. 生态环境学报,2009,18(2):494-497.

[22] 郭美玉. 减氮对番茄老株更新套种菜豆产量及土壤化学性状的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2017.

[23] 杜小平,康靖全,吕金印. 镉低积累青菜品种筛选及硫对镉胁迫下青菜镉含量和品质影响[J]. 农业环境科学学报,2018,37(8):1592-1601.

[24] 姜艺,黄琳丽. 镉胁迫对植物的影响探究[J]. 南方农业,2020,14(30):138-139.

[25] 解静芳,郭晓君,杨彪,等. 污水灌溉和镉胁迫对菠菜品质的影响[J]. 华北农学报,2010,25(1):204-207.

[26] 徐佳慧,王萌,张润,等. 土壤镉污染的生物毒性研究进展[J]. 生态毒理学报,2020,15(5):82-91.

[27] 肖旭峰,解庆妮,范淑英,等. 镉、铅胁迫对芹菜生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 江西农业大学学报,2015,37(5):793-797.

[28] 谢佳佳,赛闹汪青,冉瑞兰,等. 镉胁迫对菜豆叶片抗氧呼吸、抗氧化及 PS II 光合特性的影响[J]. 应用与环境生物学报,2019,25(3):510-516.

[29] 李阳,韩涛,常艺红. 南瓜、黄瓜和油菜幼苗对镉胁迫的响应[J]. 中国瓜菜,2020,33(7):28-33.

[30] 殷丽峰. 菜豆和辣椒对干旱胁迫的生理反应[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2003.

[31] 李小红. Cd 胁迫对不同砷穗组合葡萄植株光和作用、膜脂过氧化和抗氧化酶活性的影响[J]. 河南农业科学,2018,47(3):100-104.

[32] 谭万能,李志安,邹碧. 植物对重金属耐性的分子生态机理[J]. 植物生态学报,2006,30(4):703-712.

[33] 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.

[34] 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.

[35] 王菲,肖雨,程小毛,等. 镉胁迫对吊兰及银边吊兰生长及镉富集特性的影响[J]. 应用生态学报,2021(5):1835-1844.

[36] 于锡宏,许铎月,闫雷,等. 镉胁迫下土壤水分对黄瓜生长及镉积累的影响[J]. 北方园艺,2021(1):1-6.

[37] 吴雪. 蔬菜重金属 Cd 污染现状及生理阻隔剂研究进展[J]. 南京农业大学学报,2020(6):988-997.

# Effects of Soil Moisture Content on Growth and Cadmium Accumulation of *Phaseolus vulgaris* Linn Under Cadmium Stress

LI Jin-long, JIA Yun-he, LI Yan, XU Chun-mei, LIU Si-yu

(Horticultural Branch, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150069, China)

**Abstract:** In order to improve the quality of snap beans under cadmium stress and reduce the accumulation of heavy metal cadmium in snap beans, taking the main snap beans variety “General” in Heilongjiang Province as the test material, a pot experiment was conducted to simulate the effects of different soil moisture content on plant height, main stem diameter, single plant yield, soluble sugar content and vitamin C content under cadmium stress of 1.5 mg·kg<sup>-1</sup>, superoxide dismutase (SOD) activity, peroxidase (POD) activity, catalase (CAT) activity, malondialdehyde (MDA) content, proline (Pro) content, soluble protein (Pr) content, and cadmium content in various parts of plants. The results showed that when the soil moisture content was 80%-90%, the above indexes of snap beans were better than other treatments. The contents of soluble sugar, vitamin C and soluble protein increased, the contents of malondialdehyde and proline decreased, the activities of antioxidant enzymes were significantly lower than those of the control and other treatments, and the cadmium content in leaves, fruits and roots were the lowest. Therefore, appropriate flooding can improve the growth and development of snap beans under cadmium stress.

**Keywords:** soil moisture content; cadmium stress; snap beans; growth and development; cadmium accumulation