

DOI:10.16861/j.cnki.zggc.202423.0574

钾肥种类对缓解马铃薯镉胁迫的影响

丁仁¹, 曾祥飞¹, 贡丹敏¹, 杨明愈¹, 熊兴耀², 胡新喜¹

(1. 湖南省马铃薯工程技术研究中心·蔬菜生物学湖南省重点实验室·湖南农业大学园艺学院 长沙 410128;
2. 中国农业科学院深圳农业基因组研究所 广东深圳 440307)

摘要:为了探讨钾肥种类对缓解马铃薯镉胁迫的作用,明确钾肥种类影响马铃薯在镉胁迫下的生长生理机制,采用盆栽试验研究了硫酸钾(S)、氯化钾(Cl)及其等量配比处理(SCI)等钾肥处理和镉胁迫对马铃薯生长及生理的影响。结果表明,植株受到镉胁迫($25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)时,S处理的株高、SPAD、生物量、块茎质量、根系活力等指标显著高于SCI处理和Cl处理,S处理的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率等光合指标显著高于SCI处理和Cl处理。与未加镉相比,镉胁迫会显著提高马铃薯叶片中超氧化物歧化酶(SOD)活性、脯氨酸(Pro)和丙二醛(MDA)含量。镉胁迫下S处理的马铃薯叶片中的GSH、NPT、PCs、Pro含量和SOD活性均显著高于Cl处理,MDA含量显著低于Cl处理。S处理的根系镉含量显著低于Cl处理,镉转运系数显著高于Cl处理,但茎叶中的镉含量差异不显著。总体来说,与氯化钾相比,硫酸钾能促进马铃薯植株的生长,缓解镉胁迫对马铃薯的影响,抑制马铃薯对土壤中镉的吸收,促进镉从马铃薯根系中向地上部迁移。

关键词:马铃薯;钾肥种类;镉;生长;抗氧化系统

中图分类号:S532

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2024)06-147-07

Effect of potassium fertilizer types on alleviating cadmium stress in potatoes

DING Ren¹, ZENG Xiangfei¹, GONG Danmin¹, YANG Mingyu¹, XIONG Xingyao², HU Xinxi¹

(1. Hunan Potato Engineering Technology Research Center/Key Laboratory for Vegetable Biology of Hunan Province/College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan, China; 2. Shenzhen Institute of Agricultural Genomics, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Shenzhen 440307, Guangdong, China)

Abstract: In order to explore the effect of potassium fertilizer types on alleviating cadmium stress in potatoes and clarify the physiological mechanism of potassium fertilizer types on potato growth under cadmium stress, a pot experiment was conducted to study the effects of potassium sulfate (S), potassium chloride (Cl), their equal ratio treatments (SCI) and cadmium stress on potato growth and physiology. The results showed that when plants were subjected to cadmium stress ($25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), the plant height, SPAD, biomass, root vitality, and tuber mass were significantly higher than those of the SCL and Cl treatments, and the net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate of the S treatment were significantly higher than those of the SCL and Cl treatments. Compared with the absence of cadmium, cadmium stress significantly increases the activity of superoxide dismutase (SOD), proline (Pro), and malondialdehyde (MDA) content of potato leaves, and the impacts on the content of reduced glutathione (GSH), complex elements (PCs), and non protein thiol (NPT) were significantly related to the type of potassium fertilizer. Under cadmium stress, the GSH, NPT, PCs, Pro content, and SOD activity in potato leaves S treatment were significantly higher than those of Cl treatment, while the MDA content was significantly lower than that of Cl treatment. The cadmium content in the roots of S treatment was significantly lower than that of Cl treatment, and the transport coefficient of cadmium in the stems and leaves of S treatment were significantly higher than that of Cl treatment, while the difference in cadmium content in the stems and leaves was not significant. Overall, compared to potassium chloride, potassium sulfate can promote the growth of potato plants, alleviate the impact of cadmium stress on potatoes, reduce the absorption of cadmium by potatoes in the soil, and promote the migration of cadmium from potato roots to above ground parts.

Key words: Potato; Type of potassium fertilizer; Cadmium; Growth; Antioxidant system

收稿日期:2023-09-04;修回日期:2024-03-18

基金项目:广东省基础与应用基础研究重大项目(2021B0301030004);财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系(CARS-09-ES16)

作者简介:丁仁,男,在读硕士研究生,主要从事马铃薯栽培生理研究。E-mail:1498166110@qq.com

通信作者:胡新喜,男,教授,主要从事马铃薯栽培生理研究。E-mail:huxinxi163@163.com

马铃薯为茄科茄属作物,原产于南美,在全球范围内广泛种植。马铃薯块茎富含碳水化合物、蛋白质、膳食纤维、维生素等,具有较高的营养价值,享有“地下苹果”的美誉,是我国主要的蔬菜和粮食作物^[1-2]。马铃薯在我国的种植面积逐年增加,优化马铃薯栽培技术以确保增加产量和提高品质的措施越来越受到重视。马铃薯为喜钾作物。钾肥种类会影响植株的生长和品质,硫酸钾有助于促进植株对氮和磷的吸收^[3]、增加块茎产量、提高块茎可溶性蛋白质和维生素C含量^[4],而氯化钾则有助于减少块茎褐变、提高商品薯率^[5]。

目前,我国镉污染耕地范围涉及25个省份,严重威胁农业生产^[6]。养分管理措施会影响植物对重金属的吸收与分配,通过养分运筹降低土壤镉有效性和减少作物镉积累。有研究表明,土壤对钾有很强的选择吸附性,土壤溶液中钾离子可以与镉竞争吸附位点和提高土壤溶液中的离子强度,抑制土壤对镉的吸附,进而使土壤溶液中的镉含量增加^[7]。王小晶^[8]研究表明,在镉污染土壤中施加氯化钾、硫酸钾2种钾肥可以提高白菜产量,其中,氯化钾比硫酸钾效果更好,但施用硫酸钾抑制白菜叶片重金属镉积累效果最优。用硫酸钾能使可溶性镉和可交换镉含量显著下降,减轻土壤镉污染程度^[9];低浓度硫酸钾可以降低土壤中生物有效态镉含量,可以较好地抑制岗梅植株内的镉从根、茎向叶片转运,也可以较好地减少镉在岗梅根和茎中的积累^[10]。Wang等^[11]研究了氯化钾、硫酸钾和硝酸钾等不同钾肥对水稻、小麦和小白菜中的Cd积累特点,结果表明,氯化钾、硝酸钾处理增强了作物的Cd含量,其中Cl比SO₄²⁻或NO₃⁻更有效地增强了作物对Cd的吸收。但是,王吉秀等^[12]研究表明,在一定浓度范围内的Cl(0~200 mg·kg⁻¹)与镉配合作用,可以抑制玉米对镉的吸收。另外,Cl对不同土壤Cd²⁺的吸附解吸的影响也会有较大的差异^[13]。镉胁迫下的灯盏花施用硫肥后能显著提高其光合速率、蒸腾速率、细胞间CO₂浓度、叶绿素含量和叶片宽度^[14],硫肥能提高植物的可溶性蛋白质含量和抗氧化酶活性,从而减轻镉的毒害;外源硫可以有效提高甜高粱幼苗的抗氧化酶活性和抗氧化物含量,缓解镉胁迫对甜高粱幼苗生长的抑制作用^[15]。笔者所在的湖南省马铃薯工程技术研究中心前期研究表明,硫酸钾肥能促进镉污染稻田中马铃薯的生长,减少镉的吸收^[4],但是,有关钾肥种类对镉胁迫下马铃薯的生长、镉积累及其生理机制的研究较少。

笔者研究了不同种类钾肥对镉胁迫下马铃薯生长和生理的影响,初步明确钾肥种类影响马铃薯在镉胁迫下的生长生理机制,以期为镉污染耕地的马铃薯安全生产提供理论依据和参考。

1 材料与方 法

1.1 材 料

以鄂薯10号(镉低积累型品种)为试验材料,种薯由湖南省马铃薯工程技术研究中心提供。供试肥料硫酸钾[K₂O含量(w,后同)≥52.0%、硫含量≥17%]由湖北省华强化工集团股份有限公司生产;氯化钾(K₂O含量≥40.0%)由深圳德钾盐贸易有限公司生产;含腐殖酸尿素(总氮含量≥45.0%)由新疆心连心能源化工有限公司生产;钙镁磷肥[总磷含量≥16%,pH值7~9,(CaO+MgO+SiO₂+S)含量≥26%],盆栽试验的营养钵规格为35L。

1.2 试验地概况

试验在湖南省长沙市湖南农业大学金山试验基地进行,所用基质为无肥力基质土,前茬作物为南瓜。

1.3 试验设计

参照Ye等^[16]的方法,采用完全随机试验设计,栽培基质镉含量(w,后同)设0和25 mg·kg⁻¹ Cd含量水平(以CdCl₂溶液形式处理土壤,在栽种前2个月施入),钾肥种类设硫酸钾(S)、氯化钾(Cl)及2种钾肥的等量配比(SCl)处理3个水平,具体施肥量见表1,每个处理16盆,每盆栽2株马铃薯。2022年2月16日播种马铃薯,2022年3月14日移栽至营养钵,2022年5月16日收获。

表1 不同处理单盆肥料施用量

Table 1 Fertilizer application table for each pot of different treatments

w(Cd)	代号 Code	m(K ₂ SO ₄)(g)/ m(K ₂ O)(g)	m(KCl)(g)/ m(K ₂ O)(g)	m(N)/ g	m(P ₂ O ₅)/ g
0	S	8.2/4.26	0.00	4.26	4.26
	SCl	4.1/2.13	5.33/2.13		
	Cl	0.00	10.66/4.26		
25	S	8.2/4.26	0.00		
	SCl	4.1/2.13	5.33/2.13		
	Cl	0.00	10.66/4.26		

1.4 测定项目与方法

生长指标:在播种后65d马铃薯块茎形成期每个处理随机选取10株,使用直尺测定株高,使用手持式叶绿素测定仪测定第4片完全展开叶片顶小叶SPAD值;将植株分为块茎和茎叶两部分,测定

块茎质量,分别于 105 °C 杀青 30 min 后,65 °C 烘干,测定总生物量。

光合参数:在播种后 60 d 马铃薯块茎形成期每个处理随机选取 15 株使用 LI-6400XT 便携式光合作用仪测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)。

生理指标:在播种后 60 d 每个处理随机选取 3 株,采用 O^2 还原氮蓝四唑法测定马铃薯叶片中超氧化物歧化酶(SOD)活性、TBA 法测定丙二醛(MDA)含量、磺基水杨酸法测定脯氨酸(Pro)含量、DTNB 法测定还原型谷胱甘肽(GSH)含量和非蛋白巯基(NPT)、HPLC 法测定植物螯合素(PCs)含量,采用 TTC 法测定马铃薯根系活力。

镉含量与转运系数:在播种后 60 d 每个处理随机选取 3 株,采用干灰化法消解测定马铃薯根系和

茎叶中的镉含量,Cd 转运系数(TF)=植物茎叶 Cd 含量/植物根系 Cd 含量。

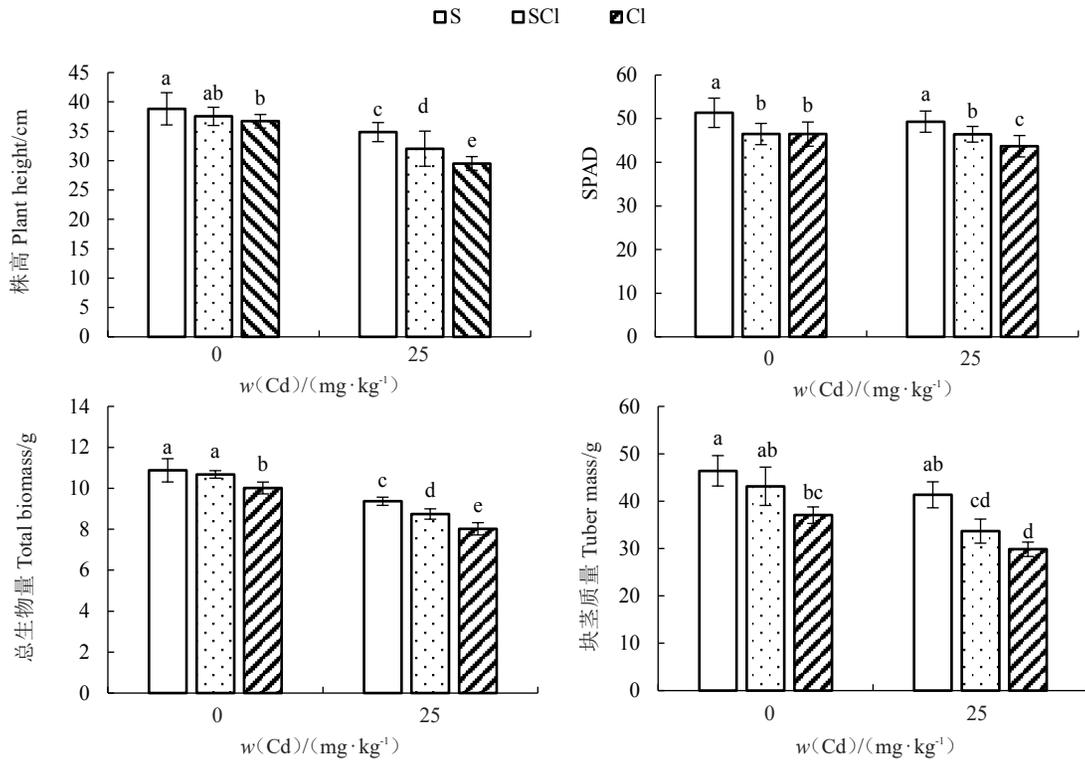
1.5 数据处理

采用 SPSS 23.0 软件进行 ANOVA 单因素方差分析,采用 Duncan's 检验法进行多重比较分析,相关性分析为一般线性分析。

2 结果与分析

2.1 钾肥种类对镉胁迫下马铃薯植株生长的影响

由图 1 可知,播种后 65 d,2 个镉含量水平下,S 处理植株的株高、生物量、叶片 SPAD 值、块茎质量均显著高于 CI 处理,且均为 S 处理>SCI 处理>CI 处理;在植株的株高、总生物量、块茎质量上,S 处理与 SCI 处理在未加镉时差异不显著,在 $25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 镉胁迫时差异显著。



注:小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level. The same below.

图 1 不同种类钾肥对马铃薯植株生长的影响

Fig. 1 Effects of different types of potassium fertilizers on the growth of potato plants

2.2 钾肥种类对镉胁迫下马铃薯叶片光合作用的影响

由表 2 可知,播种后 60 d,未加镉时 S 处理与 CI 处理的植株叶片净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度差异不显著; $25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 镉胁迫时 S 处理的植株净光合速率、气孔导度、蒸腾速率均显著高于 SCI 处理和 CI 处理。镉胁迫对 S 处理的净光合速

率、气孔导度、蒸腾速率的影响不显著,但显著降低了 CI 处理和 SCI 处理的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率。

2.3 钾肥种类对镉胁迫下马铃薯叶片胁迫相关生理指标的影响

由图 2 可知,未加镉时,S 处理的叶片 SOD 酶活性显著高于 CI 处理,而 S 处理的叶片 MDA 含量

表2 不同种类钾肥对马铃薯光合作用的影响

Table 2 Effects of different types of potassium fertilizers on potato photosynthesis

w(Cd) / (mg·kg ⁻¹)	钾肥种类 K fertilizer	净光合速率 P _n /(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	气孔导度 G _s /(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	胞间 CO ₂ 浓度 C _i /(μmol·mol ⁻¹)	蒸腾速率 T _r /(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)
0	S	15.87±0.69 a	0.31±0.07 ab	186.74±17.68 a	4.21±0.15 b
	SCI	15.36±0.93 a	0.28±0.06 b	176.09±17.30 b	5.08±0.20 a
	CI	15.46±0.71 a	0.33±0.03 a	189.78±5.20 a	5.03±0.17 a
25	S	16.01±0.58 a	0.25±0.03 b	158.77±8.82 c	4.59±0.42 b
	SCI	14.04±0.39 b	0.21±0.01 c	155.96±3.59 c	4.04±0.18 c
	CI	13.67±0.64 b	0.20±0.02 c	155.78±8.78 c	4.01±0.32 c

注:同列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column of indicate significant differences in different kinds of potassium fertilizer ($p < 0.05$). The same below.

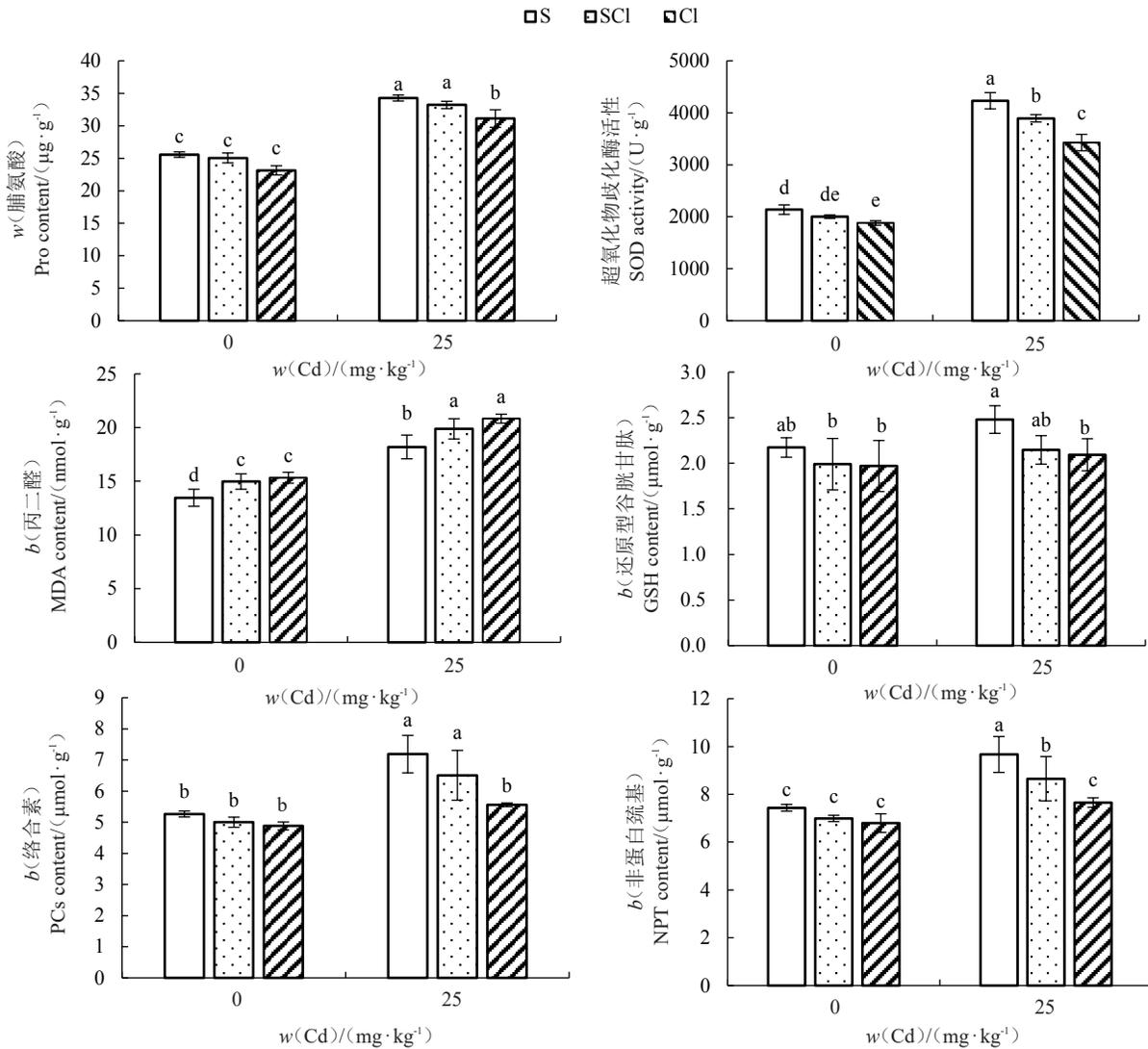


图2 马铃薯叶片 Pro、MDA、GSH、PCs、NPT 含量及 SOD 活性
Fig. 2 The content of Pro, MDA, GSH, PCs and NPT in potato leaves, SOD activity

显著低于 SCI 处理、CI 处理,叶片 Pro、GSH、NPT、PCs 含量各处理间无显著差异。25 mg·kg⁻¹ 镉胁迫时,与 CI 处理相比,S 处理的叶片 SOD 酶活性、Pro、

GSH、PCs、NPT 含量分别显著提高了 19.02%、9.20%、15.60%、22.70%、20.80%,与 SCI 处理相比分别提高了 10.5%、13.0%、9.5%、8.0%、3.0%;而 S 处理

的叶片MDA含量相较于Cl处理显著降低了12.6%。

2.4 钾肥种类对镉胁迫下马铃薯根系活力的影响

由图3可知,播种后60d,未加镉时各钾肥处理马铃薯根系活力在144.15~181.07 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,S处理显著高于Cl处理;镉胁迫时各处理根系活力在110.95~168.07 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,S处理显著高于SCL处理、Cl处理。

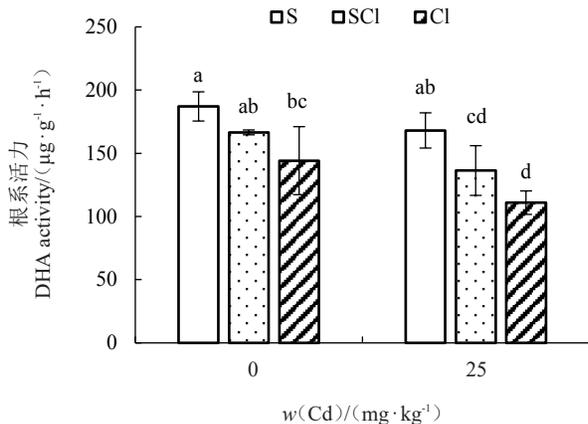


图3 不同种类钾肥对马铃薯根系活力的影响

Fig. 3 Effect of different kinds of potassium fertilizer on potato root vigor

2.5 钾肥种类对镉胁迫下植株镉吸收和转运的影响

由表3可知,在镉胁迫下植株茎叶镉含量为14.50~15.60 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,各处理间无显著差异;植株根系镉含量为55.97~71.73 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,S处理的根系镉含量显著低于SCL处理和Cl处理;S处理的镉转运系数显著高于Cl处理。

表3 镉胁迫下不同种类钾肥处理的植株镉含量及转运系数

钾肥种类 K fertilizer	w(茎叶镉) Cd content in shoot/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	w(根系镉) Cd content in root/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	镉转运系数 (茎叶/根) Cd transport coefficient (shoot/root)
S	14.50±1.73 a	55.97±2.84 b	0.259±0.020 a
SCL	15.23±1.45 a	66.50±5.01 a	0.229±0.005 ab
Cl	15.60±1.54 a	71.73±1.06 a	0.217±0.020 b

3 讨论

3.1 钾肥种类对马铃薯生长的影响

马铃薯属于典型的喜钾作物,钾肥的合理施加是促进马铃薯增产提质的重要技术措施^[17]。一方面,硫素通过促进叶片叶绿素和叶绿体的形成,增强作物叶片中光合作用相关酶的活性,能作为一些

生理活性物质的组成成分参与调节植物的生长发育进程并提高对不良环境的抵御能力等来使马铃薯提质增产^[3]。另一方面,土壤中氯浓度升高会影响根部吸收的磷转运到叶片,进而影响光合作用,同时氯浓度过高也会影响光合产物转运到块茎等器官中,进一步导致减产^[18]。本试验结果表明,马铃薯无论在正常生长下还是镉胁迫下,在硫酸钾处理下,马铃薯的植株株高、叶片SPAD值、生物量、块茎质量、净光合速率、根系活力均高于氯化钾处理。与前人研究结果基本一致^[4]。

3.2 钾肥种类对镉胁迫下马铃薯生长生理的影响

在本试验中,与未加镉处理相比,镉胁迫能显著降低各处理马铃薯的株高和生物量。在硫酸钾处理下,镉胁迫并不能显著降低植株的SPAD值、块茎质量、净光合速率和根系活力;而在氯化钾处理下镉胁迫显著降低了这些生理生长指标。硫素有助于维持叶片中细胞结构的完整性,积极参与含硫蛋白质合成、形成多糖、羧酸盐等物质,巯基-二硫键氧化还原调节促进了植株的新陈代谢^[19]。在钾肥中添加硫能在一定程度上提高作物对镉胁迫的耐受能力,特别是在光合能力方面。Shah K等^[20]研究表明,镉胁迫产生的活性氧(ROS)会破坏叶绿体色素蛋白复合体,影响叶绿体合成酶的活性。而巯基在氧化还原过程中能调节植物体内的ROS水平^[21],进而有效缓解镉胁迫对植物光合作用的影响。

硫是植物体内谷胱甘肽(GSH)、络合素(PCs)、非蛋白巯基(NPT)等合成所必需的基本元素。谷胱甘肽(GSH)在维持氧化还原状态平衡方面起着非常重要的作用^[22],同时它在植物络合素合成中也起着重要作用,在镉解毒中已被证实有作用^[23]。PCs是植物中作用最强的重金属螯合剂之一,它可将细胞质中Cd螯合,然后转运至液泡聚合形成性状稳定的高分子量复合物,从而缓解Cd毒害^[24]。此外,NPT也能参与植物体内的重金属解毒^[25]。本试验结果表明,在镉胁迫下,硫酸钾处理的叶片GSH、NPT、PCs含量均显著高于氯化钾处理,硫酸钾能提高马铃薯植株的抗氧化活性,促进植株体内形成螯合镉,缓解镉污染对马铃薯植株的毒害作用。在环境胁迫下,植株自身会形成ROS清除系统,其中抗氧化酶(SOD、POD、CAT、APX酶等)有助于帮助植物体恢复活性氧代谢平衡^[26]。本试验结果表明,镉胁迫时,硫酸钾处理下的植株叶片SOD酶活性、Pro含量均显著高于氯化钾处理。刘娟等^[27]研究也表明,硫酸钾能通过抗氧化物质非酶促反应清除马铃

薯中 Cd 胁迫诱导产生的 ROS, 缓解镉胁迫对植株的毒害。植物在遭受镉胁迫时会诱导细胞膜脂质过氧化, 而 MDA 是细胞膜脂质过氧化的最终产物。硫能降低植物体内的 MDA 含量, 从而缓解镉胁迫对植株的毒害^[28]。本研究结果表明, 镉胁迫时, 硫酸钾处理下马铃薯植株叶片的 MDA 含量显著低于氯化钾处理, 与刘娟等^[27]的研究结果一致。因此, 施用硫酸钾有助于增强马铃薯对镉胁迫的耐受性, 其可能的机制是刺激植物抗氧化防御系统, 将镉整合转化为代谢无活性成分, 降低 ROS 和 MDA 等对植株有毒害作用的过氧化产物含量。

3.3 钾肥种类对镉胁迫下马铃薯镉吸收与积累的影响

在本试验中, 硫酸钾处理的根系镉含量显著低于氯化钾处理和二者混施处理, 说明硫酸钾处理能抑制马铃薯根系对镉的吸收, 与秦梅等^[28]和 Umair 等^[29]的研究结果一致。研究表明, 缺硫会导致植株对 Cd 的敏感性增强, 阻碍 Cd 向地上部运输^[30]。而硫酸钾可促进 GSH 产生, GSH 能作为细胞内的抗氧化剂促进 Cd 的转移^[31]。Mendoza-cózatl 等^[32]的研究结果表明, PCs 和谷胱甘肽可以作为 Cd 的长距离运输载体, 韧皮部是 Cd 以 PCs-Cd 和 GSH-Cd 复合物的形式进行长距离源-汇运输的主要维管系统。本试验结果表明, 硫酸钾处理茎叶对镉的转运系数显著高于氯化钾处理, 但是硫酸钾处理的根系镉含量显著低于氯化钾处理, 各处理之间茎叶的镉含量无显著差异, 茎叶镉含量的高低关系为 CI > SCI > S。试验结果与 Zhang 等^[33]的研究结果一致。硫酸钾相较于氯化钾能抑制马铃薯根系对镉的吸收, 原因可能有四个: 首先, 土壤中的 Cl⁻大部分以游离态存在, 使土壤电导率增加, pH 下降比 SO₄²⁻更为显著^[34], 进而对镉有效性增强更显著^[35]; 其次, 土壤中的硫素能直接和间接增加土壤中的溶解性有机碳(DOC)含量^[36-37], 而 DOC 中所含有的羧基、酚羟基等配体能与 Cd 形成络合物或直接吸附 Cd, 然后与土壤矿物发生反应, 使 Cd 富集在土壤矿物表面或内部, 进而土壤中 Cd 的迁移性减弱^[38]; 再次, 氯离子对金属阳离子有很强的配位能力, 能与土壤溶液游离态 Cd²⁺形成多种配合物, 导致土壤对 Cd 的吸持能力降低, 进而增加植物 Cd 的富集量^[39]; 最后, SO₄²⁻能降低转运蛋白 ZIP4 的转录水平, 抑制作物根系对镉的吸收^[22]。有关硫酸钾缓解马铃薯植株镉胁迫的分子机制还有待进一步研究。

4 结 论

(1) 施用硫酸钾促进了马铃薯植株的生长、增强了马铃薯植株的光合作用。同时, 施用硫酸钾也能很好地缓解镉胁迫对马铃薯植株的光合作用的影响。

(2) 硫酸钾提高了马铃薯植株的 GSH、NPT、PCs、Pro 含量及 SOD 活性, 减少叶片中 MDA 含量, 进而刺激植物抗氧化防御系统、将镉整合转化为代谢无活性成分、降低 ROS 和 MDA 这些过氧化产物的含量来增强马铃薯对镉胁迫的耐受能力。

(3) 硫酸钾一方面能抑制马铃薯根系对土壤中镉的吸收, 另一方面能通过促进巯基分子的合成来促使镉从马铃薯根系向地上部迁移。

参考文献

- [1] 王茜茹, 惠志明, 徐建飞, 等. 马铃薯薯形发育的组织细胞学研究[J]. 中国蔬菜, 2020(4): 67-73.
- [2] 崔勇, 雷雨颜, 王晓媛. 30 多年来世界马铃薯种植及交易情况分析[J]. 中国蔬菜, 2021(6): 1-10.
- [3] 刘坤, 贾立国, 秦永林, 等. 马铃薯硫素营养研究进展[J]. 中国蔬菜, 2021(8): 33-38.
- [4] 贡丹敏, 蔡林志, 丁仁, 等. 钾肥种类对马铃薯生长和镉吸收积累的影响[J]. 园艺学报, 2023, 50(6): 1332-1342.
- [5] PENTANGELO A, RAIMO F, PARISI B, et al. Effects of highly concentrated KCl foliar spray for managing the occurrence of the internal brown spot, a physiological disorder of potato tubers[J]. Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2021, 96(4): 527-537.
- [6] WANG X S, YU G, LIN H, et al. Advances in bioremediation of cadmium-contaminated soils[C]//Proceedings of 2020 6th Proceedings of 2020 6th International Conference on Energy Materials and Environment Engineering. IOP Publishing, 2020, 508: 012006.
- [7] 石玥. 钾降低三七镉积累的机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [8] 王小晶. 钾肥对叶类蔬菜重金属及营养品质的效应研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [9] 张晨. 关于弱碱性土壤镉污染农田关键降镉技术的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.
- [10] 麦晋贤, 李韵雪, 黄晓莉, 等. 施用钾肥抑制岗梅镉吸收积累效应研究[J]. 热带作物学报, 2023, 44(6): 1180-1189.
- [11] WANG K, FU G P, YU Y, et al. Effects of different potassium fertilizers on cadmium uptake by three crops[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26: 27014-27022.
- [12] 王吉秀, 王丹丹, 祖艳群, 等. 氯离子对玉米累积镉的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(15): 4630-4632.
- [13] 蒋凯, 龙坚, 李欣阳, 等. 外源 Cl⁻添加对不同母质土壤溶液 Cd²⁺浓度的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(2): 553-559.
- [14] LIU Y L, LIU Y P, CHEN Y, et al. Sulfur fertiliser enhancement

- of *Erigeron breviscapus* (Asteraceae) quality by improving plant physiological responses and reducing soil cadmium bio-availability[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29: 70508-70519.
- [15] 冯晓东,王启,席乾,等.镉胁迫下施硫对甜高粱幼苗生理生化特性的影响[J]. *分子植物育种*: 1-11[2022-03-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220301.1020.010.html>.
- [16] YE Y X, DONG W, LUO Y, et al. Cultivar diversity and organ differences of cadmium accumulation in potato (*Solanum tuberosum* L.) allow the potential for Cd-safe staple food production on contaminated soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 134534.
- [17] 刘寅笃,姚攀锋,杨志坚,等.马铃薯钾素营养研究进展[J]. *植物生理学报*, 2023, 59(8): 1505-1516.
- [18] 许世豪,赵春波,皇甫丽云,等.不同钾源对马铃薯钾营养积累转运及产量因子的影响[J]. *作物杂志*, 2023(6): 202-208.
- [19] DELORME-HINOUX V, BANGASH S A K, MEYER A J, et al. Nuclear thiol redox systems in plants[J]. *Plant Science*, 2016, 243: 84-95.
- [20] SHAH K, KUMAR R G, VERMA S, et al. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings[J]. *Plant Science*, 2001, 161(6): 1135-1144.
- [21] TENG Y, YU A, TANG Y M, et al. Visualization and quantification of cadmium accumulation, chelation and antioxidation during the process of vacuolar compartmentalization in the hyperaccumulator plant *Solanum nigrum* L.[J]. *Plant Science*, 2021, 310: 110961.
- [22] ADHIKARI S, GHOSH S, AZAHAR I, et al. Sulfate improves cadmium tolerance by limiting cadmium accumulation, modulation of sulfur metabolism and antioxidant defense system in maize[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 153: 143-162.
- [23] 王晓莹.还原型谷胱甘肽(GSH)缓解小麦幼苗镉胁迫机理研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2021.
- [24] MENDOZA-COZATL D G, MORENO-SANCHEZ R. Control of glutathione and phytochelatin synthesis under cadmium stress: Pathway modeling for plants[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2006, 238(4): 919-936.
- [25] 侯明,霍岩,张志专,等.土壤外源钒施加对玉米中钒积累、亚细胞分布和非蛋白巯基含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(5): 964-972.
- [26] TAIZ L, ZEIGER E. *植物生理学*[M]. 5版.宋纯鹏,王学路,周云,等译.北京:科学出版社, 2015.
- [27] 刘娟,赵欢蕊,刘永华,等.外源硫诱导玉米镉胁迫耐性的生理机制研究[J]. *玉米科学*, 2019, 27(5): 101-108.
- [28] 秦梅,韩燕,乔枫,等.硫肥对春油菜幼苗生理指标和土壤酶活性的影响[J]. *广西植物*, 2019, 39(6): 761-767.
- [29] UMAIR M, ZAFAR S H, CHEEMA M, et al. Unraveling the effects of zinc sulfate nanoparticles and potassium fertilizers on quality of maize and associated health risks in Cd contaminated soils under different moisture regimes[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 896: 165147.
- [30] 孙新,杨志敏,徐朗莱.缺硫条件下油菜对镉毒害的敏感性[J]. *南京农业大学学报*, 2003, 26(4): 56-59.
- [31] KONTNY A, SCHNEIDER M, EICHE E, et al. Iron mineral transformations and their impact on As (im) mobilization at redox interfaces in As-contaminated aquifers[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, 296: 189-209.
- [32] MENDOZA-CÓZATL D G, BUTKO E, SPRINGER F, et al. Identification of high levels of phytochelatin, glutathione and cadmium in the phloem sap of *Brassica napus*. A role for thiol-peptides in the long - distance transport of cadmium and the effect of cadmium on iron translocation[J]. *Plant Journal*, 2008, 54(2): 249-259.
- [33] ZHANG W, LIN K F, ZHOU J, et al. Cadmium accumulation, sub-cellular distribution and chemical forms in rice seedling in the presence of sulfur[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2014, 37(1): 348-353.
- [34] 欧阳晴雯,龙坚,郝汉驰,等.氨基和硫基肥对土壤镉水稻生物有效性的影响[J]. *环境科学*, 2023, 44(10): 5737-5745.
- [35] SHI G L, LU H Y, LIU H, et al. Sulfate application decreases translocation of arsenic and cadmium within wheat (*Triticum aestivum* L.) plant[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 136665.
- [36] VIVES-PERIS V, DE-OLLAS C, GÓMEZ-CADENAS A, et al. Root exudates: From plant to rhizosphere and beyond[J]. *Plant Cell Reports*, 2020, 39(1): 3-17.
- [37] 闫帅成,张克峰,刘雷,等.土壤中镉的形态及其影响因素研究进展[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(增刊 2): 354-358.
- [38] 张敏,胡学玉,胡晓晓,等.硫对地球表层生态系统中镉迁移转化影响的研究进展:以土壤-植物系统为例[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(3): 236-245.
- [39] 唐盛爽.外源氯对土壤-水稻系统 Cd 迁移转化的影响[D].长沙:中南林业科技大学, 2021.