

施用钾肥抑制岗梅镉吸收积累效应研究

麦晋贤, 李韵雪, 黄晓莉, 闵远洋, 廖沛然*, 杨全*

广东药科大学中药学院/国家中医药管理局岭南药材生产与开发重点研究室/国家中药材产业技术体系广州综合试验站/广东省南药规范化种植与综合开发工程技术研究中心, 广东广州 510006

摘要: 重金属污染已成为影响作物品质的重要因素之一。通过土壤镉 (Cd) 胁迫下施加 0.75、1.50、3.00 g/kg 三种浓度硫酸钾, 研究硫酸钾对岗梅根际土壤理化性质和岗梅植株中镉积累的影响。结果表明, 施用高浓度硫酸钾肥会使土壤 pH 下降, 降低幅度最高达 8.09%。镉胁迫会使土壤有机质含量降低, 施用中 (1.50 g/kg)、高 (3.00 g/kg) 浓度硫酸钾肥可以提高土壤有机质含量、全钾含量和速效钾含量。施用硫酸钾普遍提高了土壤中生物有效态镉含量, 只有施用低浓度硫酸钾 (0.75 g/kg) 第 30 天, 土壤中的生物有效态镉含量相比 Cd 处理组降低 1.94%。在镉胁迫下, 施加硫酸钾可以提高岗梅叶的 SOD 活性, 进而提升对镉胁迫的耐受性。低浓度硫酸钾 (0.75 g/kg) 可以抑制岗梅植株内的镉从根和茎向叶片转运, 且可以有效地减少镉在岗梅根和茎中的积累。因此, 施用高浓度钾肥会使土壤 pH 下降; 施用中 (1.50 g/kg)、高 (3.00 g/kg) 浓度硫酸钾肥可以提高土壤有机质含量、全钾含量和速效钾含量, 从而提高土壤肥力; 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, 且可以较好地减少镉在岗梅根和茎中的积累。

关键词: 硫酸钾; 有机质; 抗氧化酶活性; 土壤镉形态; 岗梅; 镉吸收

中图分类号: S158 文献标识码: A

Study on the Inhibitory Effect of Potassium Fertilizer on the Absorption and Accumulation of Cadmium in *Ilex asprella*.

MAI Jinxian, LI Yunxue, HUANG Xiaoli, MIN Yuanyang, LIAO Peiran*, YANG Quan*

School of Traditional Chinese Medicine, Guangdong Pharmaceutical University / Key Laboratory of Lingnan Medicinal Materials Production and Development, National Administration of Traditional Chinese Medicine / Guangzhou Comprehensive Experimental Station Chinese Materia Medica Industry Technology System / Guangdong Provincial Research Center on Good Agricultural Practice & Comprehensive Agricultural Development Engineering Technology of Cantonese Medicinal Materials, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract: The problem of heavy metal pollution of crops occurs frequently, and heavy metal pollution has become one of the important factors affecting crop quality. By applying 0.75, 1.50 and 3.00 g/kg potassium sulfate into soil under cadmium (Cd) stress, the effects of potassium fertilizer on the physical and chemical properties of rhizosphere soil and cadmium accumulation in plants of *Ilex asprella* were studied. This study is expected to lay a foundation for the development of cadmium excess reduction technology in *Ilex asprella*. The result shows that, the application of high amount of potassium sulfate fertilizer could reduce the soil pH by 1.72% to 8.09%. Cadmium stress can reduce the content of soil organic matter, and the application of medium (1.50 g/kg) and high (3.00 g/kg) amount of potassium sulfate can increase the content of soil organic matter, total potassium and available potassium. In addition, the application of potassium sulfate generally increased the content of biologically available cadmium in the soil, only on the 30th day after the application of low concentration of potassium sulfate (0.75 g/kg), the content of bioavailable cadmium in the soil decreased by 1.94% compared with the Cd treatment group. Under cadmium stress, the application of potassium sulfate could increase the SOD activity in leaves of *Ilex asprella*, and then enhance the tolerance to cadmium stress. Low

收稿日期 2022-07-27; 修回日期 2022-12-29

基金项目 国家中药材产业技术体系建设专项 (No. CARS-21); 广州市科技局基础与应用基础项目 (No. 202102020394)。

作者简介 麦晋贤 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 岗梅重金属消减。*通信作者 (Corresponding author): 廖沛然 (LIAO Peiran), E-mail: westpp@126.com; 杨全 (YANG Quan), E-mail: yangquan7208@vip.163.com。

could increase the SOD activity in leaves of *Ilex asprella*, and then enhance the tolerance to cadmium stress. Low concentration of potassium sulfate (0.75 g/kg) inhibited the transport of cadmium from rhizome to leaf and effectively reduce the accumulation of cadmium in the root and stem of *Ilex asprella*. To sum up, the application of high amount of potassium fertilizer decreased the soil pH, and the application of medium (1.50 g/kg) and high (3.00 g/kg) amount of potassium sulfate could increase the content of soil organic matter, total potassium and available potassium, thus improved soil fertility. The results also showed that low concentration of potassium sulfate could reduce the content of bioavailable cadmium in soil, inhibit the transport of cadmium from roots and stems to leaves, and reduce the accumulation of cadmium in roots and stems of *Ilex asprella*.

Keywords: potassium sulfate; organic matter; antioxidant enzyme activity; soil cadmium speciation; *Ilex asprella*; cadmium uptake

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.06.012

岗梅 [*Ilex asprella* (Hook. et Arn.) Champ. ex Benth.] 属冬青科冬青属植物, 主要分布于广东、广西、湖南等岭南地区。岗梅在南方地区应用广泛, 其根、茎、叶均可入药, 具有清热解毒、生津、利咽、散瘀止痛等功效, 是感冒中成药的重要原料之一, 也是多种凉茶配方中的主要药味^[1]。目前, 野生岗梅已不能满足市场需求, 为保证感冒中成药的生产, 现企业已经开始大面积种植岗梅。有研究表明, 岗梅根、茎、叶中的镉含量超出正常值, 岗梅具有富集重金属镉的可能^[2-3], 因此, 如何消减岗梅体内的重金属迫在眉睫。

镉对全球土壤的污染日益普遍, 每年约 3 万 t 来自工农业生产活动所产生的镉进入生物圈, 导致土壤镉污染形势日益严峻^[4]。重金属镉由于具有很高的流动性, 可被植物吸收, 然后顺着食物链进入人体内损害人体的肾脏、肝脏等器官, 从而导致人体器官受损, 甚至出现癌症^[5], 威胁人类健康。而受镉胁迫的药用植物通常表现出生理代谢失调、生长发育受阻、药材品质下降等现象, 如镉胁迫能显著降低石竹幼苗生物量累积^[6], 导致三七中皂苷的积累减少, 影响三七药材的质量^[7]。植物为了抵抗镉污染的环境, 会通过调节自身抗氧化酶系统包括超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 等来提高对镉的耐受性^[8], 以应对不良环境对其生长的影响, 如 ZHANG 等^[9]研究发现植物一年蓬根中 SOD、CAT 最大活性出现在 Cd 胁迫浓度为 50 $\mu\text{mol/L}$ 时, 之后随着 Cd 浓度的增加而降低, DAUD 等^[10]研究表明, 在 Cd 胁迫浓度为 1000 $\mu\text{mol/L}$ 下, 2 种不同品种转基因棉花叶片中 SOD 活性相比对照组显著增加。

钾作为一种药用植物必需的大量元素之一, 在药用植物的生长发育过程中起着不可替代的作

用。除了土壤中自然存在的钾素外, 人们还可以通过追施钾肥为药用植物补充钾素。据研究表明, 施加钾素可以降低植物体内的重金属镉积累, 王小晶^[11]研究发现, 在镉污染土壤中施加钾肥可以提高白菜产量, 其中, 氯化钾比硫酸钾效果更好, 但硫酸钾肥降低白菜叶片重金属镉积累效果最优。石玥^[7]研究发现, 在盆栽条件下, 钾肥可以显著降低三七主根、剪口、筋条中重金属镉积累。本研究采用盆栽实验, 在镉胁迫下施用不同浓度的硫酸钾, 测定不同浓度的硫酸钾处理下岗梅根、茎和叶中镉含量和抗氧化酶活性以及根际土壤的理化特征指标, 探究硫酸钾对岗梅镉吸收转运抑制活性的作用机制, 为开发岗梅药材生产中的重金属镉消减技术奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究所用岗梅苗为一年生岗梅, 株高约 60 cm, 经广东药科大学杨全教授鉴定为梅叶冬青。水培试验和土培试验均于 2021 年在广东药科大学中药学院实验楼一楼盆栽场进行 (23°3'32"N, 113°24'24"E)。供试土壤采自广东药科大学后山土壤, 质地为黄泥土, 土壤除去树根、树叶和石块等杂质后自然晒干过筛备用。供试硫酸钾、氯化钾为分析纯。土壤基本理化性状为: 水解性氮 193.10 mg/kg, 有效磷 32.75 mg/kg, 速效钾 198.35 mg/kg, 交换性钙 1013.42 mg/kg, 全氮 0.09%, 全磷 0.13%, 全钾 1.23%, 全钙 0.45%, 有机质 4.57%, 总镉含量 0.10 mg/kg。

1.2 方法

1.2.1 钾肥种类筛选 设置 Cd 浓度水平为 50 $\mu\text{mol/L}$, 设置 3 个氯化钾浓度: 3.00 (KCl 1)、6.00 (KCl 2)、12.00 (KCl 3) mmol/L; 3 个硫酸

钾浓度: 1.50 (K_2SO_4 1)、3.00 (K_2SO_4 2)、6.00 (K_2SO_4 3) mmol/L。处理如下: CK (不加 Cd, 不施肥)、Cd+KCl 1、Cd+KCl 2、Cd+KCl 3、Cd+ K_2SO_4 1、Cd+ K_2SO_4 2、Cd+ K_2SO_4 3, 共 7 个处理组, 每个处理组 6 个重复。按照以上处理分别配制培养液于规格 70 cm×26 cm×40 cm 的花盆中, 将岗梅实生苗置于培养液中, 培养至第 3 天和第 5 天各收取岗梅苗样品 6 株, 清洗根部后置于 20 mmol/L 乙二胺四乙酸二钠溶液中浸泡 20 min, 剪取岗梅苗根部, 放置 60 °C 烘箱烘干 5 d, 最后测定根部镉含量。

1.2.2 土培 Cd 胁迫水平确定 设置 Cd 浓度: 0、50、100 mg/kg, 共 3 个处理组, 每个处理组重复 6 次, 每个花盆移栽 12 株岗梅实生苗。花盆规格为 70 cm×26 cm×40 cm, 每个花盆装干燥土壤 26.0 kg, 除 CK 外, 添加 Cd 处理组土壤加入一定浓度的 $CdCl_2$ 溶液并搅拌均匀, 所有土壤处理后晒干, 统一装盆后, 每盆加入等量去离子水, 保持土壤 80% 田间持水量, 在移栽岗梅苗入盆后称重, 每 3 d 称重 1 次, 补足水分。自移栽开始, 于第 15、30 天分别采收 1 次样品, 采收后岗梅苗样品处理方法同 1.2.1, 最后测定根部镉含量。

1.2.3 硫酸钾盆栽试验 本研究采用盆栽试验, 由 1.2.1 和 1.2.2 结果得知, 较合适 Cd 胁迫浓度为 50 mg/kg, 较适合钾肥种类为硫酸钾。硫酸钾肥浓度设置为: 0.75 (K1)、1.50 (K2)、3.00 (K3) g/kg 土。处理如下: CK、Cd、Cd+K1、Cd+K2、Cd+K3, 每个处理组 6 个重复。每盆种 11 株一年生岗梅实生苗。花盆规格为 70 cm×26 cm×40 cm, 每个花盆装干燥土壤 26.0 kg, 除 CK 外, 镉胁迫处理组土壤加入 $CdCl_2$ 溶液并搅拌均匀, 钾肥处理组将不同浓度的硫酸钾拌入土壤中, 所有土壤处理后晒干, 统一装盆后, 每盆加入等量去离子水, 保持土壤 80% 田间持水量, 再移栽岗梅苗入盆后称重, 每 3 d 称重 1 次, 补足水分。自移栽开始, 于第 15、30、45 天分别采收 1 次样品, 每次采收每个处理组岗梅植株 6 株, 并把岗梅植株根部附着土壤抖进袋子作为根际土壤用。采收后的植株用去离子水冲洗根部剩余泥土, 然后置于 20 mmol/L 乙二胺四乙酸二钠溶液中浸泡 20 min, 随后把岗梅植株分成根、茎、叶 3 部分进行编号和保存, 部分用作干燥样品, 需放置 60 °C 烘箱烘干 5 d, 新鲜样品则不需烘干。

1.2.4 根际土壤理化特征指标测定 每次采收样

品后, 每个处理组的根际土壤在室内 25 °C 阴干, 碾碎后过 60 目筛后用于各项指标测定。

(1) 根际土壤 pH 测定。土壤 pH 测定方法: 将风干土样过筛后, 称取 10 g 于 100 mL 烧杯内, 往烧杯内加入 25 mL 去离子水, 持续搅拌 5 min, 静置 1 h 后, 过滤取上清液测定溶液 pH。

(2) 根际土壤有机质、全钾、速效钾测定。根际土壤有机质、全钾、速效钾含量按照林业行业标准《森林生态系统长期定位观测方法》(LY/T 1952—2011) 测定。有机质采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法; 全钾采用氢氧化钠熔融-火焰原子吸收分光光度法; 速效钾采用乙酸铵提取-火焰原子吸收分光光度法。

(3) 土壤中重金属镉不同赋存形态提取液的制备。土壤不同赋存形态采用 Tessier 连续提取法^[12]。1.2.5 岗梅生理指标测定 超氧化物歧化酶采用氮蓝四唑法测定; 过氧化物酶采用愈创木酚法测定; 过氧化氢酶活性采用紫外吸收法测定^[13]。

样品制备: 称取新鲜岗梅根、茎、叶组织 0.5 g, 加少量 0.05 mol/L pH=7.8 的磷酸盐缓冲液(含 1% PVPP, 去除酚类物质), 于球磨仪在 4 °C 下研磨至匀浆状, 用磷酸盐缓冲液定容至 10 mL, 最后置冷冻离心机在 4 °C、12 000 r/min 下离心 30 min, 去上清液即为粗酶液。

1.2.6 重金属 Cd 测定 土壤不同赋存形态(水溶态 WAT、可交换态 EXC、碳酸盐结合态 Carb、铁锰氧化结合态 Fe-MnOX、有机物结合态 OM、残渣态 RES) 提取液、岗梅药材根、茎、叶(干燥样品) 镉含量均采用《中国药典》(2020 年版)^[14] 镉测定法进行测定。

1.3 数据处理

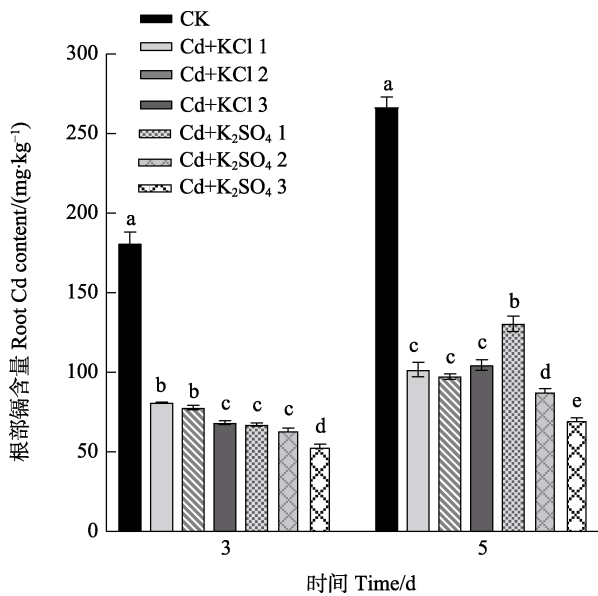
采用 Excel 2016 软件整理试验数据, 采用 SPSS 26.0 软件进行差异显著性分析, 采用 Graph-Pad Prism 8.0.1、AI 2021 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同钾肥种类筛选

如图 1, 在岗梅水培第 3 天时, 与 CK 组相比, 施加氯化钾与硫酸钾处理组的岗梅根部镉含量均大幅度下降, 其中 Cd+ K_2SO_4 3 处理组镉含量最低。在岗梅水培至第 5 天时, 不同处理组之间镉含量表现为: CK>Cd+ K_2SO_4 1>Cd+KCl 3、Cd+KCl 1、Cd+KCl 2>Cd+ K_2SO_4 2>Cd+ K_2SO_4 3。随着施加硫酸钾浓度升高, 岗梅根部镉含量逐渐

降低。整体来看，施加硫酸钾抑制岗梅根部吸收积累镉的效果更优，因此，选用硫酸钾肥进行后续的盆栽试验。



不同小写字母表示同一时间内处理间差异显著 ($P<0.05$)。 Different lowercase letters indicate significant difference among treatments at the same time ($P<0.05$).

图 1 不同钾肥处理岗梅根部 Cd 含量

Fig. 1 Content of Cadmium in roots of *I. asprella* treated with different kinds of potassium

2.2 土培镉胁迫水平确定

如表 1，当 Cd 胁迫浓度为 50 mg/kg 时，岗梅在移栽第 15 天和第 30 天时根部镉含量分别为 38.5 mg/kg、116.9 mg/kg，在该胁迫浓度下已远远超过《中国药典》2020 年版^[14]中药材重金属的限度 ($Cd \leq 1$ mg/kg)，因实验设计应遵循绿色化学原则，所以选取 50 mg/kg 作为 Cd 胁迫浓度来进行后续硫酸钾肥盆栽试验。

表 1 不同 Cd 胁迫浓度处理岗梅根部 Cd 含量

Tab. 1 Cadmium content in roots of *I. asprella* treated with different concentrations of Cadmium stress

Cd 胁迫浓度 Cd stress concentration/(mg·kg ⁻¹)	根部镉含量 Root Cd content/(mg·kg ⁻¹)	
	15 d	30 d
0	1.20±0.01 ^c	1.50±0.02 ^c
50	38.50±0.75 ^b	116.90±1.10 ^b
100	162.00±2.10 ^a	352.00±1.50 ^a

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

2.3 硫酸钾盆栽试验

2.3.1 不同处理对岗梅根际土壤 pH 的影响 如

图 2A 所示，在岗梅移栽第 15 天，与 Cd 处理相比较，Cd+K1、Cd+K2、Cd+K3 处理的土壤 pH 分别降低了 1.72%、4.96%、5.60%，Cd+K2 和 Cd+K3 组 pH 显著低于 Cd+K1 组 ($P<0.05$)，但 Cd+K2 组和 Cd+K3 组之间无显著性差异 ($P>0.05$)。第 30 天，与 Cd 处理相比较，Cd+K2、Cd+K3 处理的土壤 pH 分别降低了 3.67%、4.59%，Cd+K2 和 Cd+K3 组 pH 显著低于 Cd+K1 组，但 Cd+K2 组和 Cd+K3 组之间无明显差异。第 45 天时，与 Cd 处理相比较，Cd+K1、Cd+K2、Cd+K3 处理的土壤 pH 分别降低了 4.88%、5.99%、8.09%，Cd+K1、Cd+K2 和 Cd+K3 三个处理组之间未达到显著性水平。可见，施加高浓度硫酸钾可以使土壤 pH 显著降低。

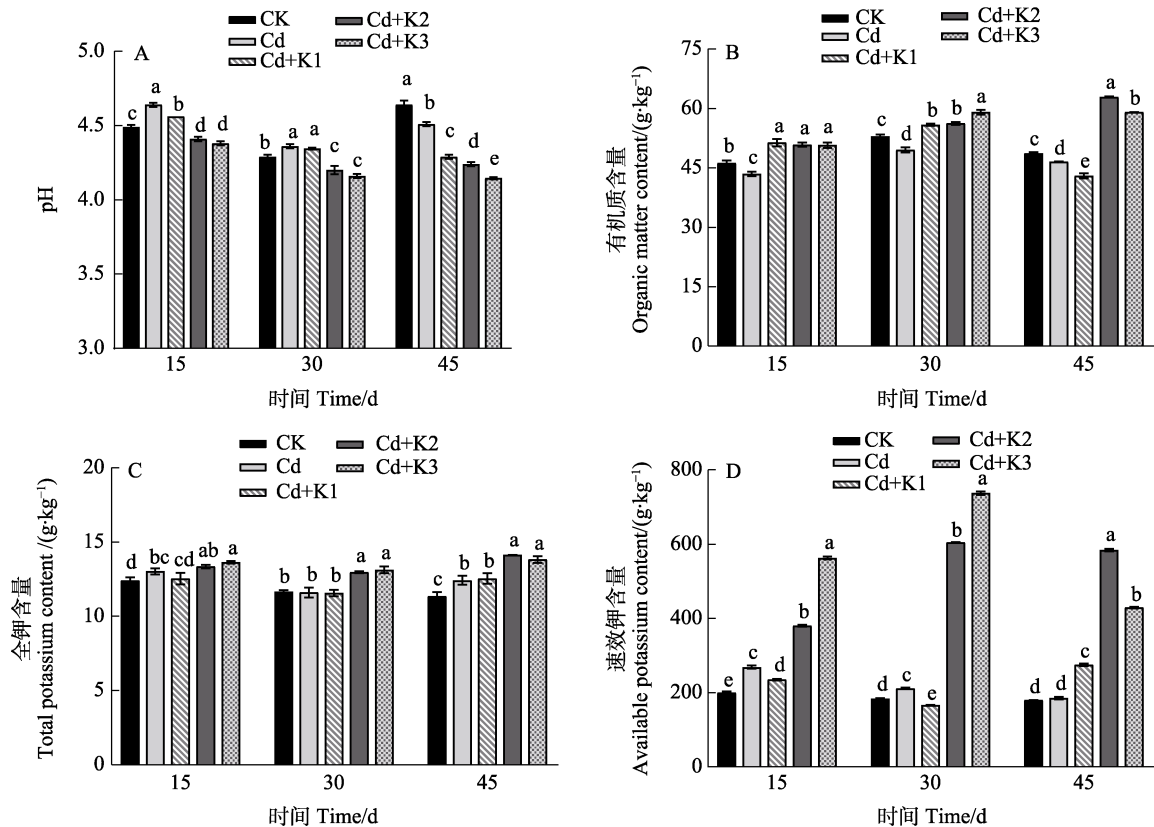
2.3.2 不同处理对岗梅根际土壤有机质的影响 如图 2B 所示，在岗梅移栽第 15 天，Cd 处理土壤的有机质含量最低，显著低于其他处理 ($P<0.05$)。Cd+K1、Cd+K2、Cd+K3 三种处理土壤有机质含量均显著高于 Cd 处理，分别提高了 18.25%、17.04%、16.77%。岗梅移栽第 30 天，Cd 处理土壤的有机质含量最低，Cd+K1、Cd+K2、Cd+K3 三种处理土壤的有机质含量较 Cd 处理分别提高了 12.89%、13.57%、19.24%。第 45 天时，Cd+K2 处理土壤的有机质含量最高，Cd+K3 次之；与 Cd 处理组相比，Cd+K1、Cd+K2、Cd+K3 三种处理土壤的有机质含量分别提高了 -11.77%、29.20%、21.35%。可见，Cd 处理可使土壤的有机质含量显著降低，施加中 (K2)、高 (K3) 浓度硫酸钾肥后土壤有机质含量较 Cd 处理有显著提高，且显著高于 CK。

2.3.3 不同处理对根际土壤全钾含量的影响 如图 2C 所示，岗梅移栽第 15 天，与 Cd 处理对比，Cd+K3 处理土壤的全钾含量提高了 4.69%。第 30 天时，与 Cd 处理对比，Cd+K2、Cd+K3 处理土壤的全钾含量分别提高了 11.91%、13.24%，Cd+K1 和 Cd 处理的土壤的全钾含量未达到显著性水平 ($P>0.05$)。第 45 天时，与 Cd 处理对比，Cd+K2、Cd+K3 处理土壤的全钾含量分别提高了 13.85%、11.36%。可见，施加中浓度 (K2) 和高浓度 (K3) 硫酸钾肥的土壤的全钾含量较 Cd、CK 处理有显著提高 ($P<0.05$)。

2.3.4 不同处理对根际土壤速效钾含量的影响 如图 2D 所示，在第 15 天时，各处理岗梅根际土

壤的速效钾含量表现为 $Cd+K3 > Cd+K2 > Cd > Cd+K1 > CK$ 。与 Cd 处理相比较, $Cd+K2$ 、 $Cd+K3$ 处理土壤的速效钾含量分别提高了 41.57%、109.48%, $Cd+K1$ 处理土壤的速效钾含量则降低了 12.57%。第 30 天时, 与 Cd 处理相比较, $Cd+K2$ 、

$Cd+K3$ 处理土壤的速效钾含量分别提高了 185.81%、248.76%, $Cd+K1$ 处理土壤的速效钾含量则降低了 21.42%。第 45 天时, 与 Cd 处理相比较, $Cd+K1$ 、 $Cd+K2$ 、 $Cd+K3$ 处理土壤速效钾含量分别提高了 48.68%、215.70%、132.05%。



不同小写字母表示同一时间内处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments at the same time ($P < 0.05$).

图 2 不同处理土壤的 pH、有机质含量、全钾含量、速效钾含量

Fig. 2 Soil pH, organic matter content, total potassium content and available potassium content in different treatments

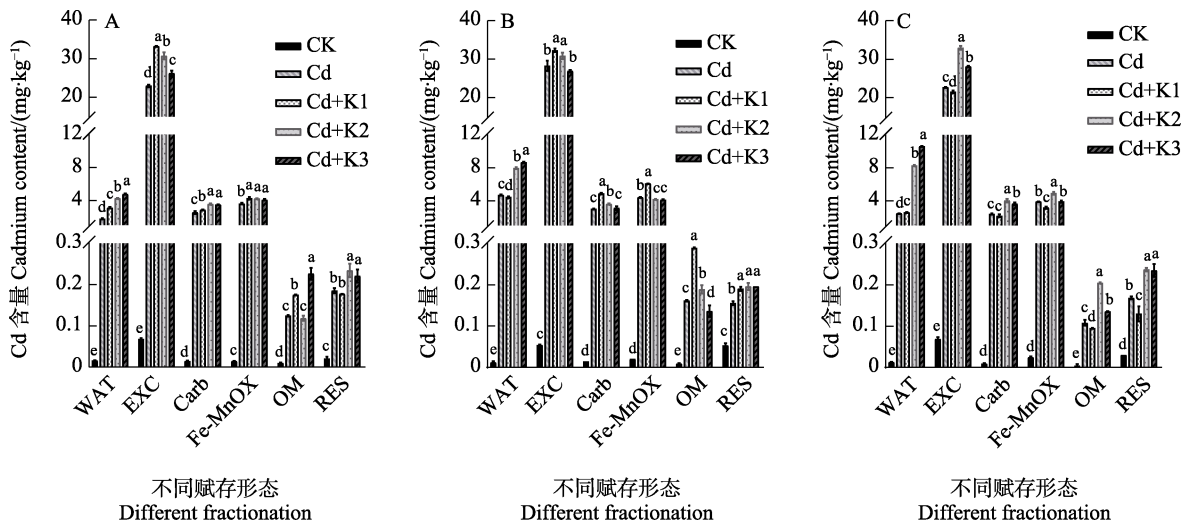
2.3.5 不同处理对根际土壤镉含量以及镉形态的影响 由图 3A 所示, 岗梅移栽第 15 天, 随着施加硫酸钾肥浓度增大, 土壤水溶态的 Cd 含量逐渐升高, 可交换态的 Cd 含量逐渐降低。CK、Cd、 $Cd+K1$ 、 $Cd+K2$ 、 $Cd+K3$ 处理土壤的生物有效态 (WAT+ EXC+ Carb) 的 Cd 含量占土壤总 Cd 含量的百分比分别为 68.63%、87.37%、89.44%、89.35%、88.34%, 与 Cd 处理相比较, 施用低、中、高浓度硫酸钾肥处理的土壤中有有效态 Cd 含量分别提高了 2.07%、1.98%、0.97%。

由图 3B 所示, 岗梅移栽第 30 天, CK、Cd、 $Cd+K1$ 、 $Cd+K2$ 、 $Cd+K3$ 处理土壤的生物有效态的 Cd 含量占土壤总 Cd 含量的百分比分别为

52.68%、88.36%、86.42%、90.34%、89.62%。与 Cd 处理组相比, $Cd+K1$ 处理土壤中有有效态 Cd 含量降低了 1.94%, $Cd+K2$ 、 $Cd+K3$ 处理组则分别提高了 1.98%、1.26%。

如图 3C 所示, 岗梅移栽第 45 天, CK、Cd、 $Cd+K1$ 、 $Cd+K2$ 、 $Cd+K3$ 处理土壤生物有效态 Cd 含量占土壤总 Cd 含量的比例分别为 60.96%、86.86%、88.60%、89.41%、90.87%。与 Cd 组相比较, 施用低、中、高硫酸钾肥处理土壤中有有效态 Cd 含量分别提高了 1.74%、2.55%、4.01%。

2.3.6 不同处理对岗梅抗氧化系统酶活性的影响 由图 4A 所示, 与 Cd 处理组相比, 施用低 ($Cd+K1$)、中 ($Cd+K2$)、高 ($Cd+K3$) 浓度钾肥后,



A: 移栽 15 d; B: 移栽 30 d; C: 移栽 45 d。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。
 A: Transplanting for 15 days; B: Transplanting for 30 days; C: Transplanting for 45 days. Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 3 土壤中不同赋存形态的镉含量

Fig. 3 Contents of different forms of cadmium in soil

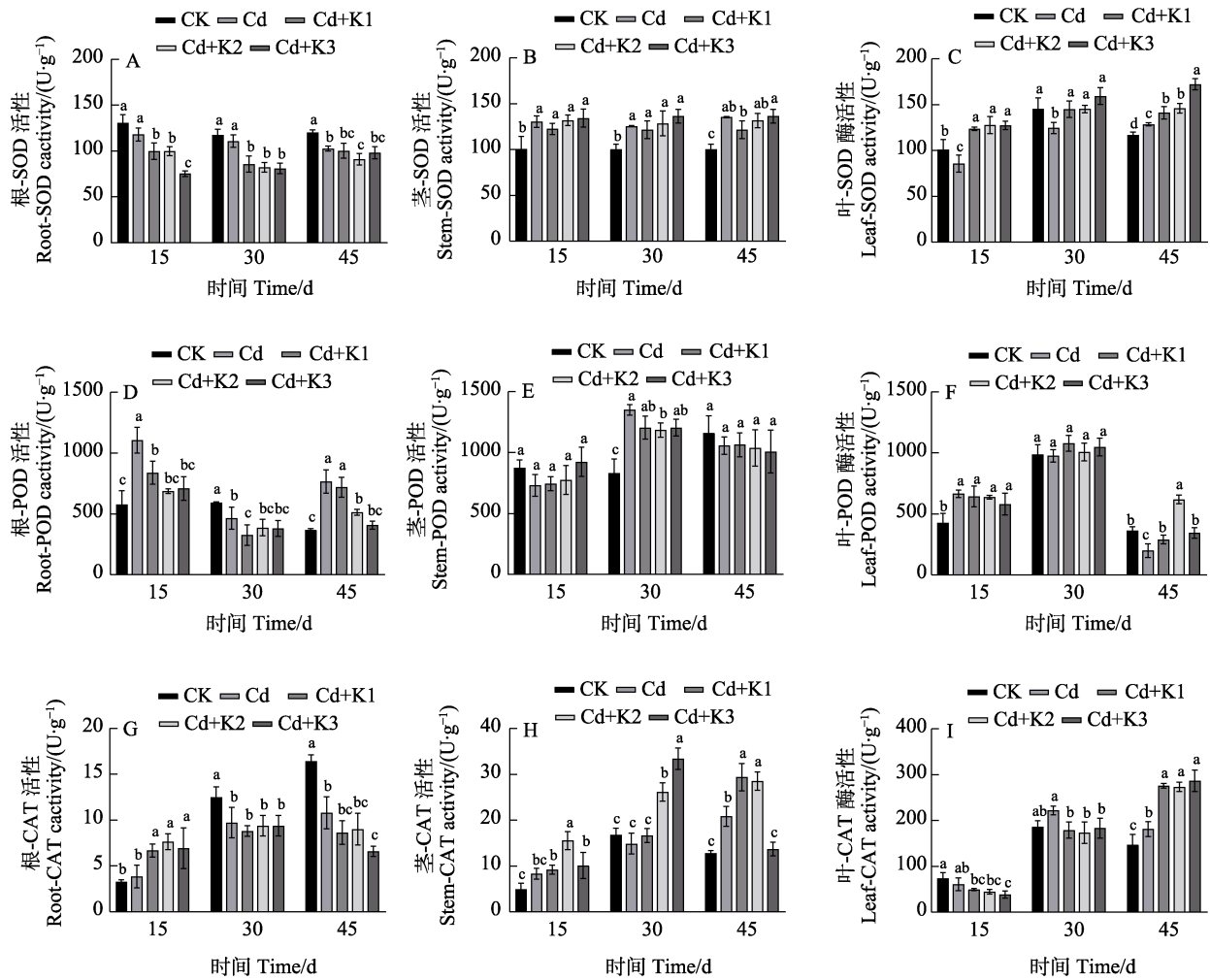
在 30 d 内岗梅根系 SOD 活性明显降低, 在 45 d 时, Cd 处理组 SOD 活性开始明显低于 CK, 下降了 14.56%。由图 4B 所示, CK 处理组岗梅茎的 SOD 活性最低。如图 4C, 与 Cd 处理组相比较, 施用低、中、高浓度钾肥可以显著提高岗梅叶的 SOD 活性。可见, 在镉胁迫下, 岗梅根系 SOD 活性下降, 在施加硫酸钾肥后下降幅度变大。

由图 4D 所示, 15 d 时, Cd 处理组的根系 POD 活性最大, 并显著高于其余处理组。第 30 天时, Cd+K1 处理组下 POD 活性显著低于其余处理组。而第 45 天时, Cd 及 Cd+K1 处理组下 POD 根系酶活性显著高于其余处理组, 二者之间差异不显著。由图 4E 所示, 在第 15、45 天, 各处理组岗梅茎的 POD 活性之间的差异未达到显著性水平。第 30 天时, Cd 处理组和 3 个施肥组 POD 活性均显著高于 CK。由图 4F 所示, 第 15 天时, CK 处理组岗梅叶 POD 活性显著低于其他处理组。第 30 天时, 各处理组之间无显著性差异。第 45 天时, Cd+K2 处理组岗梅叶 POD 活性最高, Cd 处理组 POD 活性最低。岗梅叶片 CAT 活性远远高于岗梅根和茎中的 CAT 活性 (图 4G~图 4I)。

2.3.7 不同处理对岗梅不同部位 Cd 含量的影响
 由表 2 可知, 施加硫酸钾对岗梅不同部位的 Cd 分布有明显的影响。岗梅移栽第 15 天, 重金属 Cd 在 Cd 处理组的岗梅植株根、茎、叶中的分布占比分别为 30.8%、19.2%和 50.0%; 在 Cd+K1 中分别为 75.7%、22.7%和 1.6%; 在 Cd+K2 中分

别为 45.7%、15.6%和 38.7%; 在 Cd+K3 中的分布分别为 33.2%、12.4%和 54.4%。Cd+K1 处理组岗梅植株内的 Cd 绝大部分分布在根和茎中, 叶片中的 Cd 含量仅为 1.60 mg/kg, 远远低于 Cd+K2 和 Cd+K3 处理下岗梅叶片中 Cd 含量, 施加低浓度 (K1) 硫酸钾肥可以抑制岗梅植株内的 Cd 从根茎向叶片转运。

移栽第 30 天, 重金属 Cd 在 Cd 处理组的岗梅植株根、茎和叶中的分布占比分别为 51.7%、35.1%和 13.2%, 在 Cd+K1 中分别为 59.7%、36.8%和 3.6%。Cd+K1 处理组的岗梅植株内的 Cd 绝大部分分布在根和茎当中, 叶片中的 Cd 含量仅为 8.60 mg/kg。与 Cd 处理组相比较, Cd+K1 处理组岗梅根、茎和叶中的 Cd 含量分别降低了 19.8%、27.2%和 81.1%, Cd+K2 处理组 Cd 含量分别降低了 0.6%、6.2%和 40.3%, Cd+K3 处理组 Cd 含量分别降低了 29.3%、-37.6%和 10.5%。施加低 (K1)、中 (K2) 浓度钾肥可以较好地抑制 Cd 吸收转运到岗梅叶片中, 其中施加低浓度钾肥还可以有效降低 Cd 在岗梅根和茎的积累。移栽第 45 天, Cd+K3 处理组岗梅根的 Cd 含量最高, Cd、Cd+K1、Cd+K2 处理组的岗梅根和茎中的 Cd 含量无显著性差异。Cd、Cd+K1、Cd+K2、Cd+K3 处理组岗梅茎 Cd 含量无显著性差异。各处理组岗梅叶片中 Cd 含量表现为 Cd+K3>Cd、Cd+K2>Cd+K1>CK。与 Cd 组对比, 施加低浓度钾肥降低了 Cd 在岗梅叶片中积累, 而施加高浓度钾



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 4 岗梅根、茎、叶中的抗氧化酶活性

Fig. 4 Activities of antioxidant enzymes in roots, stems and leaves of *I. asprella*

表 2 不同处理的岗梅根、茎、叶镉含量

Tab. 2 Cadmium content in roots, stems and leaves of *I. asprella* under different treatments

处理 Treatment	Cd 含量 Cd content/(mg·kg ⁻¹)								
	15 d			30 d			45 d		
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
CK	0.39±0.10 ^d	0.28±0.02 ^d	0.65±0.03 ^d	1.15±0.35 ^e	1.22±0.38 ^e	1.45±0.15 ^e	1.45±0.15 ^e	0.87±0.14 ^b	1.40±0.10 ^d
Cd	30.80±3.50 ^e	19.15±2.15 ^b	50.05±1.15 ^b	179.00±7.00 ^a	121.50±11.50 ^b	45.45±0.65 ^a	180.00±11.00 ^b	193.50±18.50 ^a	226.00±11.00 ^b
Cd+K1	78.20±2.1 ^a	23.45±0.85 ^a	1.60±0.00 ^d	143.50±6.50 ^b	88.45±23.55 ^b	8.60±1.50 ^d	212.00±12.00 ^b	222.50±40.50 ^a	118.50±9.50 ^c
Cd+K2	48.05±8.55 ^b	16.40±0.40 ^b	40.70±3.30 ^c	178.00±7.00 ^a	114.00±2.00 ^b	27.15±1.35 ^c	197.50±9.50 ^b	228.50±6.50 ^a	198.00±14.00 ^b
Cd+K3	34.20±4.10 ^b	12.80±0.50 ^c	56.00±0.30 ^a	126.50±9.50 ^b	167.00±6.00 ^a	40.70±1.00 ^b	277.50±16.50 ^a	294.50±57.50 ^a	331.50±9.50 ^a

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P < 0.05$).

肥促进了岗梅根和叶对 Cd 的积累。

3 讨论

钾可以增强作物的抗性, 促进作物的生长,

提高作物产量和品质, 是作物生长发育过程中非常重要的元素之一^[15-18]。研究表明, 在重金属镉胁迫下, 施加钾肥可以缓解重金属镉对植物的毒害, 降低植物对镉的积累^[19]。本研究选择施用低、

中、高 3 个不同浓度硫酸钾，研究不同施用量钾肥对岗梅根际土壤理化性状以及岗梅药材中对镉积累的影响。

本研究中，施加高浓度硫酸钾，土壤 pH 显著降低。施加硫酸钾肥后，土壤 pH 降低，可能是因为硫酸钾肥中的 K^+ 与土壤胶体上的 H^+ 发生了置换^[20]， K^+ 含量越多，更多的 H^+ 从土壤胶体上被置换出来，因此，出现硫酸钾肥施用量越大土壤 pH 降低幅度越大的情况。也有研究表明，钾肥可能促进了岗梅根系分泌物中有机酸等酸性物质增加导致根际土壤 pH 下降，如凌桂芝等^[21]发现钾离子可以诱导黑麦分泌有机酸，RIZWAN 等^[22]发现钾缓解了玉米在盐胁迫下土壤的 pH 升高。因此，土壤 pH 由多种因素影响决定，除了和施钾肥的种类和用量有关，还与土壤理化性质、气候等有关，有待进一步研究。

本研究中，施用低、中、高浓度硫酸钾肥均可以显著提高土壤有机质含量 ($P < 0.05$)。土壤有机质是土壤固相部分的重要组成部分，可以提高土壤的保肥性和保水性，还可以吸附土壤中重金属 Cd，从而降低重金属 Cd 的有效性。此外，施加中、高浓度硫酸钾肥可以大幅提高土壤速效钾含量，土壤供钾能力增强。

研究结果表明，施用硫酸钾肥普遍提高了土壤中生物有效态 Cd 含量，与施用低浓度硫酸钾处理组对比，中、高浓度硫酸钾处理组土壤中生物有效态 Cd 含量的涨幅更大，这与邹嘉成等^[23]的研究结果一致，其中，只有低浓度硫酸钾处理第 30 天的土壤出现了生物有效态 Cd 含量降低的情况。施用硫酸钾肥提高土壤中生物有效态 Cd 含量，其原因可能有：(1) 土壤胶体表面对 K^+ 的吸附亲和力较大， K^+ 容易被吸附到土壤胶体表面，所以 K^+ 能使土壤 Zeta 电位有所增加，土壤 Zeta 电位增加降低了 Cd 在土壤胶体表面的吸附，被解吸附的这部分 Cd 转移到土壤溶液当中，增大了土壤有效态 Cd 的含量^[23-24]；(2) 土壤 pH 与土壤重金属 Cd 含量呈负相关，降低土壤 pH 可使土壤中 Cd 向有效态转换，从而提高土壤有效 Cd 含量^[25-26]。然而，也有研究表明施用硫酸钾肥可以降低土壤中生物有效性 Cd 含量。陈苏等^[27]研究发现，硫酸钾肥中的 SO_4^{2-} 可以与 Cd^{2+} 形成 CdS 沉淀，减少土壤中 Cd 的有效性，从而减少水稻对 Cd 的吸收。王小晶等^[28]研究发现，增施钾肥

后， SO_4^{2-} 的加入增加了可变电荷土壤对 Cd 的吸附，主要因为其增加了土壤负电荷密度和负电势，从而影响大白菜对土壤中重金属的吸收。土壤中重金属 Cd 形态受多个因素影响，重金属 Cd 发生从某一个形态向另一个形态的转移往往是多个因素综合影响的结果。因此，施肥对土壤重金属 Cd 形态的影响，不仅与施肥的种类有关，还与土壤的理化性质有关。

有研究表明，Cd 可以诱导植物组织产生活性氧，从而导致植物细胞生理功能紊乱^[29]。SOD 是一种抗性酶，在植物体内有氧代谢过程中产生的氧自由基可使脂质过氧化并导致膜伤害，而 SOD 酶有清除氧自由基的作用。因此植物体内 SOD 活性的下降即是其受镉毒害的生理变化之一。在本研究中，与 Cd 处理组相比，施用低、中、高浓度钾肥后，在 30 d 内出现岗梅根系 SOD 活性明显降低的现象，造成这一现象的原因可能与岗梅根部在短时间内超量积累了重金属 Cd 有关。镉胁迫 45 d 时，与 CK 相比较，Cd 处理组岗梅根系的 SOD 活性开始出现明显下降，降幅为 14.56%，可能是由于镉已经在岗梅根部大量积累，Cd 开始直接作用在 SOD 酶合成的代谢通路上，进而岗梅根系 SOD 活性开始下降。POD 在植物呼吸作用中起着重要的作用。呼吸作用的实质是植物体内进行一系列氧化还原反应，POD 是这些反应不可缺少的。本研究中岗梅根系 POD 活性变化比较剧烈，茎、叶则较平缓。CAT 是一种植物重要保护酶之一，可以清除植物体内因遭受胁迫而产生的 ROS，从而使 ROS 保持在一定的范围^[30]。本研究表明，岗梅叶部位 CAT 活性远远高于根和茎，推测岗梅叶是岗梅植株内发挥清除 ROS 功能的重要部位。

本研究表明，相比中、高浓度的硫酸钾肥，施用低浓度的硫酸钾可以比较理想地抑制岗梅对 Cd 的吸收并向地上部分转运。特别是在施用低浓度硫酸钾肥 30 d 时，与 Cd 处理岗梅相比，Cd+K1 处理组岗梅根、茎和叶中的 Cd 含量分别降低 19.8%、27.2% 和 81.1%。这可能是因为：一方面施用低浓度硫酸钾肥降低了土壤中生物有效态 Cd 含量，减少了 Cd 在岗梅根、茎、叶中的积累；另一方面，施钾可以提高岗梅的抗性，促进岗梅的生长，增加岗梅的干重，从而降低岗梅植株内重金属 Cd 的含量^[27]。

参考文献

- [1] 陈彩英, 黄永秋, 贺小英, 韩正洲, 邢建永, 詹若挺. 南药岗梅本草溯源[J]. 辽宁中医药大学学报, 2017, 19(9): 117-121.
CHEN C Y, HUANG Y Q, HE X Y, HAN Z Z, XING J Y, ZHAN R T. Species source tracing of *Ilex asprella* (Hook. et Arn.) Champ. ex Benth. from south of five ridges[J]. Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, 2017, 19(9): 117-121. (in Chinese)
- [2] 高晓玲, 陈丰连, 曾元儿, 黄锦茶, 徐鸿华. 微波消解—原子吸收光谱法测定岗梅根茎中铅、镉的含量[J]. 广州中医药大学学报, 2011, 28(6): 639-642.
GAO X L, CHEN F L, ZENG Y E, HUANG J C, XU H H. Determination of plumbum, cadmium in roots and stems of *Ilex asprella* (Hook. et Arn.) Champ. ex Benth. by atomic absorption spectrometry with microwave digestion[J]. Journal of Guangzhou University of Traditional Chinese Medicine, 2011, 28(6): 639-642. (in Chinese)
- [3] 李韵雪, 闵远洋, 麦晋贤, 韩正洲, 马庆, 黄煜权, 廖沛然, 杨全. 岗梅药材重金属生物可给性及其人体健康风险评估[J]. 生态毒理学报, 2021: 1-14.
LI Y X, MIN Y Y, MAI J X, HAN Z Z, MA Q, HUANG Y Q, LIAO P R, YANG Q. Bioavailability determination and human health risk assessment of heavy metals in *Ilex asprella* medicinal materials[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021: 1-14. (in Chinese)
- [4] MESSAOUDI N E, KHOMRI M E, DBIK A, BENTAHAR S, LACHERAI A, BAKIZ B. Biosorption of congo red in a fixed-bed column from aqueous solution using jujube shell: experimental and mathematical modeling[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2016, 4(4): 3848-3855.
- [5] HAN S J, LI X N, AMOMBO E, FU J M, XIE Y. Cadmium tolerance of perennial ryegrass induced by *Aspergillus aculeatus*[J]. Front Microbiol, 2018, 9: 1579.
- [6] 丁继军, 潘远智, 刘柿良, 何杨, 王力, 李丽. 土壤重金属镉胁迫对石竹幼苗生长的影响及其机理[J]. 草业学报, 2013, 22(6): 77-85.
DING J J, PAN Y Z, LIU S L, HE Y, WANG L, LI L. Effect and mechanism of soil cadmium stress on *Dianthus chinensis* seedlings growth[J]. Acta Prataculae Sinica, 2013, 22(6): 77-85. (in Chinese)
- [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, 2019.
SHI Y. Study on the mechanism of K fertilizer decreasing Cd accumulation of *P. notoginseng* (Burk) F. H. Chen[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [8] 刘颖, 悦飞雪, 李继伟, 李冬, 王艳芳. 镉胁迫下生物炭与锌/钾叶面肥促进烟草生长降低镉富集的协同效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(6): 982-990.
LIU L, YUE F X, LI J W, LI D, WANG Y F. Interaction between biochar and Zn or K foliar fertilizer on the growth and Cd uptake of tobacco under cadmium stress[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2019, 25(6): 982-990. (in Chinese)
- [9] ZHANG H, HEAL K, ZHU X, TIGABU M, XUE Y, ZHOU C. Tolerance and detoxification mechanisms to cadmium stress by hyperaccumulator *Erigeron annuus* include molecule synthesis in root exudate[J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2021, 219: 112359.
- [10] DAUD M K, ALI S, VARIATH M T, ZHU S J. Differential physiological, ultramorphological and metabolic responses of cotton cultivars under cadmium stress[J]. Chemosphere, 2013, 93(10): 2593-2602.
- [11] 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.
WANG X J. Effects of potassium on heavy metals and nutritional quality of leafy vegetables[D]. Chongqing: Master Dissertation of Southwest University, 2011. (in Chinese)
- [12] 董昊辰. 土壤中不同形态汞提取方法的比较研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
DONG H C. Study of extraction methods for different mercury fractionations in soil[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017. (in Chinese)
- [13] 王学奎. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 282-286.
WANG X K. Principles and techniques of plant physiology and biochemistry experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 282-286. (in Chinese)
- [14] 国家药典委员会. 中国药典[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 1088.
National Pharmacopoeia Committee. Chinese Pharmacopoeia[M]. Beijing: China Medical Science and Technology Publishing House, 2020: 1088. (in Chinese)
- [15] 李银水, 鲁剑巍, 廖星, 邹娟, 李小坤, 余常兵, 马常宝, 高祥照. 钾肥用量对油菜产量及钾素利用效率的影响[J]. 中国油料作物学报, 2011, 33(2): 152-156.
LI Y S, LU J W, LIAO X, ZOU J, LI X K, YU C B, MA C B, GAO X Z. Effect of potassium application rate on yield and fertilizer - potassium utilization efficiency in rapeseed[J]. Chinese Journal of Oil Crops Sciences, 2011, 33(2): 152-156. (in Chinese)
- [16] 闫春娟, 韩晓增, 王文斌, 宋书宏. 水钾耦合对大豆光合

- 特性及其产物积累运转的影响[J]. 中国油料作物学报, 2012, 34(1): 48-55.
- YAN C J, HAN X Z, WANG W B, SONG S H. Effects of water - potassium coupling on photosynthetic characteristics and photoassimilation in soybean[J]. Chinese Journal of Oil Crops Sciences, 2012, 34(1): 48-55. (in Chinese)
- [17] 张江林. 钾素营养增强水稻抵抗叶鞘腐败病的生理机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
- ZHANG J L. Physiological mechanisms of potassium nutrition enhancing the rice (*Oryza sativa* L.) resistance to sheath rot disease[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [18] 宋聚红, 王海山, 吴然, 刘玉芹. 施肥对黄秋葵生长势、抗病性和产量的影响[J]. 蔬菜, 2019(6): 17-22.
- SONG J H, WANG H S, WU R, LIU Y Q. Effects of different fertilization on growth vigor, disease resistance and yield of okra[J]. Vegetables, 2019(6): 17-22. (in Chinese)
- [19] 贾倩, 胡敏, 张洋洋, 孟远夺, 李小坤, 丛日环, 任涛. 钾硅肥施用对水稻吸收铅、镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(12): 2245-2251.
- JIA Q, HU M, ZHANG Y Y, MENG Y D, LI X K, CONG R H, REN T. Effects of potassium-silicon fertilizer application on lead and cadmium uptake by rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(12): 2245-2251. (in Chinese)
- [20] 赵晶. 不同氮磷钾肥对土壤镉有效性和小麦吸收镉的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2009.
- ZHAO J. Effects of different nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on availability of soil cadmium and cadmium uptake by wheat[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [21] 凌桂芝, 石保峰, 黄永禄, 李耀燕, 王永雄, 黎晓峰. 铝胁迫下黑麦根尖分泌有机酸和钾离子的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 893-898.
- LING G Z, SHI B F, HUANG Y L, LI Y Y, YU Y X, LI X F. Secretion of organic acid anions and potassium from root apices under Al stress in *Secale cereale* L[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2010, 16(4): 893-898. (in Chinese)
- [22] RIZWAN N, KHAN Q U, KHAN A A. Potassium dynamic in the rhizosphere of maize (*Zea mays* L.) grown under induced saline sodic condition[J]. Pakistan Journal of Botany, 2022, 54(1).
- [23] 邹嘉成, 牛莹新, 宋付朋, 邢晓飞, 陈国卫, 诸葛玉平, 娄燕宏. 钾肥强化植物间作修复镉锌污染土壤效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(2): 304-312.
- ZOU J C, NIU Y X, SONG F P, XING X F, CHEN G W, ZHUGE Y P, LOU Y H. Intensification of the intercropping effect of phytoremediation of soil contaminated with cadmium and zinc using potassium fertilizer[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(2): 304-312. (in Chinese)
- [24] 黄荣, 徐应明, 黄青青, 孙国红, 尹秀玲, 梁学峰, 秦旭. 二种钾肥对海泡石钝化修复镉污染土壤效应影响的研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(8): 1249-1257.
- HUANG R, XU Y M, HUANG Q Q, SUN G H, YIN X L, LIANG X F, QIN X. Effect of potassium fertilizers on immobilization remediation of Cd-polluted soils using sepiolite[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(8): 1249-1257. (in Chinese)
- [25] 孙约兵, 王朋超, 徐应明, 孙扬, 秦旭, 赵立杰, 王林, 梁学峰. 海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4720-4726.
- SUN Y B, WANG P C, XU Y M, SUN Y, QIN X, ZHAO L J, WANG L, LIANG X F. Immobilization remediation of Cd and Pb contaminated soil: remediation potential and soil environmental quality[J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4720-4726. (in Chinese)
- [26] SUN Y, XU Y, XU Y, WANG L, LIANG X, LI Y. Reliability and stability of immobilization remediation of Cd polluted soils using sepiolite under pot and field trials[J]. Environmental Pollution, 2016, 208(Pt B): 739-746.
- [27] 陈苏, 孙丽娜, 孙铁珩, 晁雷, 杨春璐. 钾肥对镉的植物有效性的影响[J]. 环境科学, 2007(1): 182-188.
- CHEN S, SUN L N, SUN T H, CHAO L, YANG C L. Influence of potassium fertilizer on the phytoavailability of cadmium[J]. Environmental Science, 2007(1): 182-188. (in Chinese)
- [28] 王小晶, 陈怡, 王菲, 王正银. 钾肥对镉污染土壤大白菜品质的效应研究[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(1): 40-47.
- WANG X J, CHEN Y, WANG F, WANG Z Y. Effects of potash fertilizer on cabbage's quality in cadmium polluted soils[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, 32(1): 40-47. (in Chinese).
- [29] DI TOPPI L S, GABBRIELLI R. Response to cadmium in higher plants[J]. Environmental and Experimental Botany, 1999, 41(2): 105-130.
- [30] 陈金峰, 王宫南, 程素满. 过氧化氢酶在植物胁迫响应中的功能研究进展[J]. 西北植物学报, 2008(1): 188-193.
- CHEN J F, WANG G N, CHENG S M. Progress about catalase function in plant stress reactions[J]. Acta Botanica Bo-reali-Occidentalia Sinica, 2008(1): 188-193. (in Chinese)