

凤尾蕨对铅污染土壤的修复机理研究

徐晨茗¹, 鲍立宁^{1,2*}, 张瑾^{1,2}, 姜宇¹

(1. 安徽建筑大学环境与能源工程学院, 合肥 230601;

2. 安徽建筑大学水污染控制与废水资源化安徽省重点实验室, 合肥 230601)

摘要:以景观植物凤尾蕨作为供试植物, 研究其对土壤铅污染的修复效果, 并通过分析凤尾蕨植物酶、土壤酶活性的变化, 铅积累量的变化等探讨其可能的修复机理。结果表明: 叶绿素、植物 POD 酶(过氧化物酶)、植物 CAT 酶(过氧化氢酶)一系列指标, 在 0~500 mg·L⁻¹ 时随着铅浓度的增加而上升, 植物 SOD 酶(超氧化物歧化酶)在铅胁迫下呈下降趋势, 表明凤尾蕨具有一定的耐铅性能; 凤尾蕨可以吸收高浓度 Pb, 其地下部分与地上部分的铅积累量均随土壤铅浓度的升高而增加, 地下部铅最大富集量 82.578 mg·kg⁻¹、地上部铅最大富集量 16.153 mg·kg⁻¹, 且地下部分和地上部分的富集系数均大于 1, 其中地下部最大富集系数达 10.819, 表明凤尾蕨具有将土壤中重金属富集在植物体内的能力; 在低浓度 Pb (0~500 mg·L⁻¹) 处理时, 蔗糖酶、脲酶、磷酸酶三种酶活性相对于对照组有所增加, 表明凤尾蕨根际微生物在低浓度铅污染情况下, 可协同植株强化对重金属污染土壤的修复作用。

关键词: 铅污染; 植物修复; 凤尾蕨; 超积累植物

中图分类号: X173

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2020)02-0260-07

Study on the rehabilitation mechanism of *Pteris crassipes* on lead contaminated soil

XU Chenming¹, BAO Lining^{1,2}, ZHANG Jing^{1,2}, JIANG Yu¹

(1. School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601;

2. Key Laboratory of Water Pollution Control and Wastewater Reuse in Anhui Province, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601)

Abstract: In this study, the landscape plant *Pteris crassipes* was used as the experimental plant to study its remediation effect on soil lead pollution, and the possible remediation mechanism was explored by analyzing the changes of plant enzymes, soil enzyme activities and lead accumulation in *Pteris crassipes*. The results showed that chlorophyll, plant POD enzyme and plant CAT enzyme increased with the increase of lead concentration in the range of 0-500 mg·L⁻¹, while plant SOD enzyme showed a downward trend under lead stress, indicating that *Pteris crassipes* had a certain lead tolerance. *Pteridoptera crassifolia* can absorb high concentration of lead. The accumulation of lead in underground and above ground parts increases with the increase of soil lead concentration. The maximum concentration of lead in underground part is 82.578 mg·kg⁻¹, and that in aboveground part is 16.153 mg·kg⁻¹. The enrichment coefficients of underground part and aboveground part are all greater than 1, and the maximum concentration in underground part is 82.578 mg·kg⁻¹. The coefficient is 10.819, which indicates that *Pteris crassipes* has the ability to enrich heavy metals in soil in plants. The activities of sucrase, urease and phosphatase increased in low concentration of Pb (0-500 mg·L⁻¹) treatment compared with the control group, The results showed that rhizosphere microorganisms of *Pteridoptera crassifolia* could cooperate with plants to strengthen the remediation of heavy metal contaminated soil under the condition of low concentration of lead pollution.

Key words: lead pollution; phytoremediation; *Pteris*; hyperaccumulator

铅在工业生产中用途广、污染来源广泛, 使其成为我国土壤环境污染中的主要重金属污染物, 部分地区甚至出现重度污染^[1]。由于铅易于被土壤吸收、不易被降解, 导致土壤中重金属铅的含量超过

收稿日期: 2019-08-19

基金项目: 安徽省自然科学基金(1708085MB50), 安徽省科技重大专项(18030801106), 安徽省高校自然科学研究重大项目(KJ2016SD14), 安徽省重点研究与开发计划(1704a0902006)和安徽省科技重大专项(17030801028)共同资助。

作者简介: 徐晨茗, 硕士研究生。E-mail: 649406712@qq.com

* 通信作者: 鲍立宁, 博士, 副教授。E-mail: baolining@ahjzu.edu.cn

土壤背景值。土壤中重金属铅的累积浓度超过一定范围时,一方面可对植物和农作物产生直接影响,阻碍其生长发育、降低作物的产量与品质^[2];另一方面,可通过土壤-农作物-人等食物链形式对人类健康产生影响^[3]。常用的土壤重金属处理方法有:物理修复、化学修复、植物修复等。其中植物修复法具有成本低、产生的二次污染小等优点,而植物修复技术关键在于寻找可将土壤中超过其自身需求的重金属吸收并转移到其地上部分的超积累植物^[4-5]。

目前,研究者们针对蕨类植物在重金属土壤修复中的应用进行了一系列研究。李影等探究 3 种蕨类植物对镉积累特性的影响^[6],孙歆对凤尾蕨富集砷与矿物元素关系的研究^[7],葛绪广等通过研究黄石国家矿山公园发现,凤尾蕨、蜈蚣草等蕨类植物对 Zn 具有很好的富集作用^[8]。以上研究主要集中在凤尾蕨对重金属砷、镉等的研究,而对常见的重金属元素铅的研究并未涉及。

在本研究中,通过将凤尾蕨培养在不同铅污染浓度的土壤中,测定在不同培养时间,植物体内的 POD、CAT、SOD 三种酶活性、叶绿素含量和土壤蔗糖酶、土壤过氧化氢酶、土壤磷酸酶、土壤脲酶四种土壤酶活性的变化,分析土壤中铅积累对凤尾蕨的生理影响和对土壤酶活的影响,以此来判断凤尾蕨是否可以作为修复重金属铅污染土壤的超积累植物,同时为植物修复铅污染土壤机理的研究提供理论与现实依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试植物为凤尾蕨科凤尾蕨 (*Pteris*),购于合肥市花鸟大市场,试验前稳定一周;供试土壤采自安徽建筑大学南校区的绿化土,风干后过 20 目筛,分别加入不同含量的溶液态 Pb (分析纯硝酸铅),浓度为 0、200、400、800、1 500、2 000 mg·L⁻¹,铅液每 3 d 浇灌一次,分 10 次完成整个浇灌过程。各浓度试供土壤均充分混合后老化 30 d。

1.2 仪器

电子天平 (ESJ182-4)、紫外分光光度计 (UV-5100)、冷冻干燥离心机 (ZX-LGJ-18 普通型)、光照培养箱 (BS-2H)、水浴锅 (HH-3)、电感耦合等离子体发射光谱仪 (Optima8000)。

1.3 植物生理指标的测定

在 25 cm×25 cm 的花盆中分别装入均含不同浓度重金属处理的土样,经过一周稳定后,每盆中种植生长状况相近的凤尾蕨 10 株,设 2 个重复。每

3 d 分别以加入 Pb 浓度 (分析纯硝酸铅) 为 0、200、400、800、1 500、2 000 mg·L⁻¹ 的 Hoagland 营养液进行浇灌。分别在 30、60、90 d 下测定植物与土壤中重金属含量 (文中所有铅浓度均为铅离子浓度)

1.3.1 植物生长状况的测定 将凤尾蕨在不同铅含量土壤中驯化后,分别测量 30、60、90 d 的植物株高。观察并记录植物的生长状况。

1.3.2 植物叶绿素含量的测定 取新鲜叶片,剪去粗大的叶脉并剪成碎块,称取 0.5 g 叶片,加丙酮 5 mL 和少许碳酸钙、石英砂研磨后,离心取上清液定容后,分别在 663、645 nm 处测定光密度,经计算得到叶绿素含量^[9]。

1.3.3 植物酶活的测定 (1) 植物过氧化氢酶 (CAT) 活性的测定。称取叶片 0.25 g,加入 5 倍量 (*m*:*V*) 的 pH7.0 PBS (磷酸盐缓冲液) 后冰浴研磨,经 15 000 r·min⁻¹ 离心 15 min,取部分上清液经适当稀释后用于酶活性测定^[10]。

(2) 植物超氧化物歧化酶 (SOD) 活性的测定。称取植物组织 0.5 g,先加入 2.5 mL PBS 研磨匀浆后,再加入 2.5 mL PBS 混匀,4℃ 下 10 000 r·min⁻¹ 离心 15 min,取部分上清液经适当稀释后用于酶活性测定^[11]。

(3) 植物过氧化物酶 (POD) 活性的测定。取叶片 0.25 g,加入 5 倍量 (*m*:*V*) 的 pH7.0 PBS,冰浴研磨,15 000 r·min⁻¹ 离心 15 min,取部分上清液经适当稀释后用于酶活性测定^[12]。

1.4 植物与土壤重金属含量的测定

将采集的植物样品分为地下部和地上部,冲洗干净后在 105℃ 下杀青 30 min,然后在 70℃ 下于烘箱中烘至恒重并称重,采用硝酸-氢氟酸-高氯酸消解法测定样品中重金属含量^[13]。采集的土壤样品采用硝酸-氢氟酸-高氯酸 (10:5:1, v:v) 消解法在 160℃ 温度下用密闭的聚四氟乙烯罐消煮至澄清。消煮后的溶液用稀硝酸洗至 100 mL 容量瓶中,用高纯水定容。样品待测液分别用电感耦合等离子体发射光谱仪测定铅含量。计算植物某一部分重金属含量和土壤中重金属含量的比值,得到富集系数,分析植物的 Pb 积累特性。

1.5 土壤酶活性的测定

土壤磷酸酶活性的测定采用磷酸苯二钠比色法,磷酸酶活性以 24 h 每克土壤释放出酚的毫克数表示,操作方法参照文献^[14];

土壤蔗糖酶活性的测定采用 3,5-二硝基水杨酸比色法,蔗糖酶活性以 24 h 后 1 g 土壤葡萄糖的毫克数表示^[15];

土壤脲酶活性的测定采用苯酚钠-次氯酸钠比

色法,脲酶活性以24 h后1 g土壤中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的毫克数表示^[13,16];

土壤过氧化氢酶活性的测定采用紫外分光光度法,过氧化氢酶活性以每20 min内每克土壤分解的过氧化氢数表示酶活性^[14]。

1.6 数据处理

使用 Microsoft Excel2016 软件、Origin2016、SPSS 25.0 对数据进行处理、作图及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤中铅污染浓度对凤尾蕨生长的影响

2.1.1 对植物生长状况的影响 将凤尾蕨在不同铅含量土壤中驯化后,分别测量30、60、90 d的植物株高。测定结果表明,因所选凤尾蕨品种本身植株矮小,株高在15~20 cm范围内,生长较慢,因此不同铅胁迫下的植株株高,无明显差异。此外,当土壤添加Pb浓度大于 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,观察到部分植株出现叶片发黄、叶片脱落等现象,但并未出现植物死亡。

2.1.2 对凤尾蕨叶片中叶绿素含量的影响 土壤中铅污染浓度对凤尾蕨叶片中叶绿素含量的影响见图1。

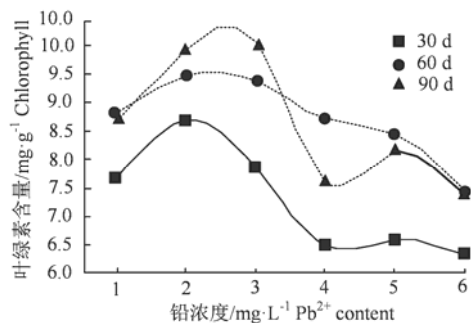


图1 不同浓度铅胁迫下凤尾蕨叶绿素含量变化

Figure 1 Changes of chlorophyll content in *Pith fern* under different concentrations of lead stress

由图1可知,在低浓度($200\sim 400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)Pb处理时,凤尾蕨叶片中叶绿素含量相对于对照组有增加;当Pb胁迫浓度超过 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,叶绿素含量出现较为显著的下降趋势,且随着Pb处理水平的增大,叶绿素含量持续下降。当铅胁迫浓度达到 $2000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,凤尾蕨叶片中的叶绿素含量在培养30、60、90 d后,分别比对照降低了17.01%、15.50%和15.05%。表明在高浓度Pb胁迫下,凤尾蕨的叶绿素小部分被破坏,但对植物的光合作用没有很大影响。

图1还可以得出,随着凤尾蕨在铅污染土壤中

生长时间的延长,叶绿素含量呈现上升的趋势,在90 d下叶绿素最大值分别比30 d和60 d增加了17.4%和7.5%。且培养30 d时,叶绿素最大值出现在 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Pb}^{2+}$ 浓度时,而在60~90 d生长时,叶绿素最大值提高至 $300\sim 400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Pb}^{2+}$ 浓度,表明一定时间的驯化可增加凤尾蕨的铅耐受性。经相关性分析后,叶绿素含量与 Pb^{2+} 浓度呈现负相关性,其中在60 d时 r (相关系数) $= -0.865^*$,为显著负相关。

2.1.3 土壤中铅污染浓度对凤尾蕨CAT、POD、SOD酶活性的影响 植物CAT、POD、SOD被称作植物酶的保护系统,能够帮助植物抵抗各种恶劣环境的胁迫作用。当植物受到环境威胁时,可以协助来清理植物体内的自由基,起到保护植物膜系统的作用^[17-18]。SOD相对于植物或其他植物组织内是唯一能把 O_2 还原为 H_2O_2 ,同时将其氧化为 O_2 的抗氧化酶,在恶劣环境下SOD活性有所上升,以此来增加植物抗逆能力^[19]。在植物的抗性机理研究中通常把CAT、POD和SOD等酶活性的变化作为植物抵抗恶劣环境伤害的指标^[20]。在不同铅浓度处理下,凤尾蕨植株内CAT、POD、SOD酶活性的变化测定结果见图2—图4。

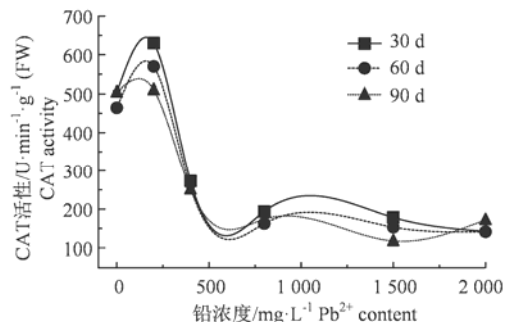


图2 土壤中铅污染浓度对凤尾蕨CAT酶活的影响

Figure 2 Effect of lead concentration in soil on CAT activity of *Pith fern*

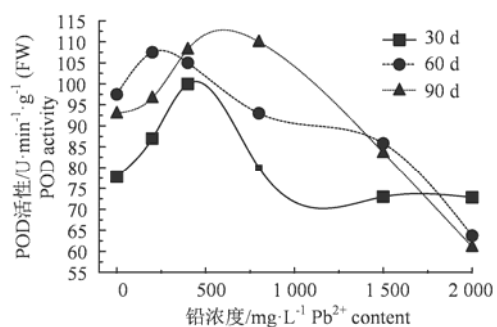


图3 土壤中铅污染浓度对凤尾蕨POD酶活的影响

Figure 3 Effect of lead concentration in soil on POD activity of *Pith fern*

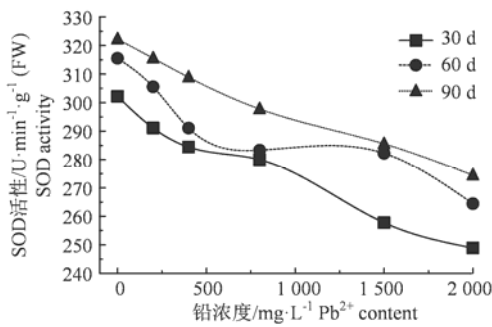


图 4 土壤中铅污染浓度对凤尾蕨 SOD 酶活的影响

Figure 4 Effects of lead concentration in soil on SOD activity of *Pith fern*

由图 2—图 4 可知, 在本实验设定的铅胁迫浓度下, 低浓度的铅胁迫激活了植物体内的活性氧清除系统。具体表现为: POD 和 CAT 在低浓度铅胁迫下, 酶活都较空白有所提高; 随着胁迫强度的加强, 酶活开始呈现持续下降的趋势。表明两者在一定浓度的 Pb 胁迫下具有协同功能, 共同组成防御过氧化系统, 清除凤尾蕨体内的自由基, 以此来抵抗恶劣环境下对植物机体的破坏, 保证植物正常生长^[21]。经相关性分析, 3 种酶中, SOD 酶与 Pb²⁺浓度分别在 30、60、90 d 3 个时间梯度下皆呈现极其显著负相关, r 分别为 -0.989^* 、 -0.929^* 、 -0.993^* , 而 SOD 随着铅胁迫的加强, 一直呈现下降趋势且下降速度最快, 表明 SOD 对 Pb 具有很强的敏感性, 酶活最易受到影响。从胁迫时间与各酶活性关系看, 随着胁迫时间的延长, POD 和 SOD 酶活增大, 表明这两种酶适应环境中重金属铅污染的能力较强。

2.2 凤尾蕨的铅积累特性研究

2.2.1 不同浓度铅浓度胁迫下凤尾蕨各部分重金属含量 超积累植物, 是指能超量吸收重金属并将其运移到地上部积累的植物。目前被广泛接受的认定标准为: ①超积累植物地上部分重金属含量是正常植物体内的 100 倍左右, 且对不同的重金属元素有不同的临界值。②植物地上部分重金属含量高于根系周围的土壤, 即富集系数 (BCF1) > 1 (富集系数 = 地上部植物中元素质量分数/土壤中元素质量分数)^[22]。

重金属超积累植物能够适应土壤环境中过量的重金属积累, 使其生长发育不受影响。测定凤尾蕨地上与地下部分的铅含量, 是判断凤尾蕨是否可以作为铅超积累植物的重要参照。

将植物洗净分割后, 分别测定不同铅浓度胁迫下植物地上和地下部分铅浓度, 测定结果见图 5—图 6。

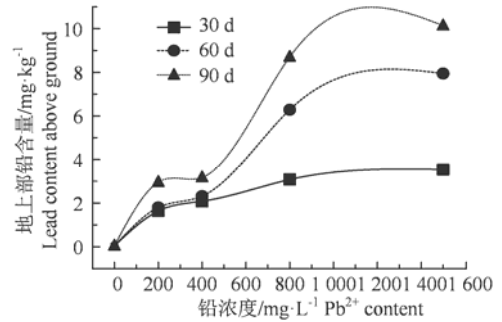


图 5 不同浓度铅胁迫下凤尾蕨地上部分铅含量

Figure 5 Lead content in the ground part of *Pith fern* under different concentrations of lead stress

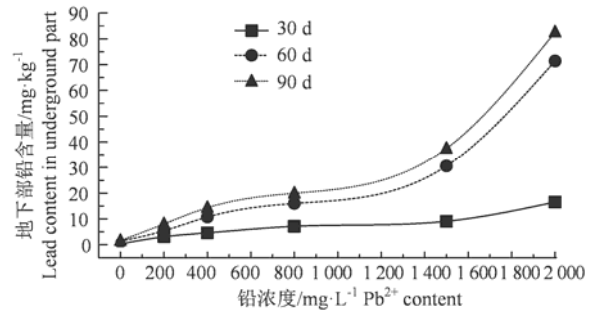


图 6 不同浓度铅胁迫下凤尾蕨地下部分铅含量

Figure 6 The content of lead in underground part of *pith fern* under different concentration of lead

图 5—图 6 可知, 凤尾蕨地上部分和地下部分 Pb 含量均随着 Pb 胁迫水平的提高呈现上升趋势, 且地下部分积累量远大于地上部分。经相关性分析, 凤尾蕨地上、地下部分铅含量皆与 Pb²⁺浓度呈显著或极其显著正相关, 30、60、90 d 下随着铅浓度的增加, 地上部与地下部相关系数分别为: $r=0.9^*$ 、 0.983^{**} 、 0.975^{**} ; $r=0.968^{**}$ 、 0.942^{**} 、 0.949^{**} 。

由此可初步推测出凤尾蕨主要通过根系吸收并贮存 Pb, 吸收能力的大小可能和根系的吸附表面、吸附位点、平衡浓度等有关, 且随着土壤中 Pb²⁺浓度增高, 根系的吸附量也随之增多。随着胁迫时间的延长, 凤尾蕨地上部分和地下部分 Pb 含量均增加, 表明驯化可以提高植物积累铅的能力。

2.2.2 不同浓度铅胁迫下凤尾蕨对重金属的富集能力 植物对重金属的富集系数 (植物某一部分重金属含量和土壤中重金属含量比值) 是表示植物对土壤中重金属富集能力的重要参照指标^[23], 该数值越大说明重金属越容易从土壤进入植物体内。图 7—图 8 为不同铅处理浓度下对凤尾蕨地下、地上部分富集系数的影响。

由图 7—图 8 可知, 在各铅胁迫浓度下, 凤尾蕨地下部分和地上部分的富集系数均大于 1, 且地下部分的富集系数远大于地上部分, 表明该植物地

下部分相对于地上部分可高效富集土壤中的重金属铅。在培养时间为 30 d、铅胁迫浓度为 200 mg·L⁻¹ 时，凤尾蕨地下部分对铅的富集能力最好，富集系数为 10.819。

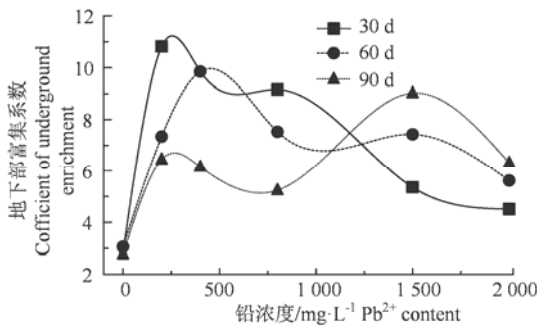


图 7 不同浓度铅胁迫下凤尾蕨地下部分富集系数变化
Figure 7 The variation of the enrichment coefficient of underground part of *Pith fern* under different concentration of lead

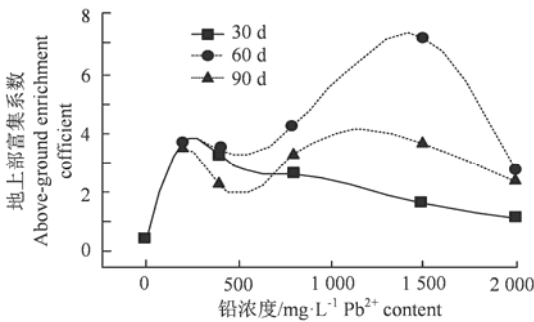


图 8 不同浓度铅胁迫下凤尾蕨地上部分富集系数变化
Figure 8 The variation of the enrichment coefficient of ground part of *Pith fern* under different concentration of lead

凤尾蕨地下部分的富集系数随着铅胁迫浓度的加大而逐渐降低。原因是铅胁迫浓度加大，使得植株体内叶绿素含量和酶活均下降，植株生理状况受到了一定影响，因此富集能力也有所降低。

2.3 土壤中铅污染浓度对凤尾蕨根系土壤酶活性的影响

研究表明，不同种类的土壤酶对重金属的敏感性有明显的差异，孟庆峰等通过滩涂盐渍土中土壤酶来表征重金属 Cd、Pb 的污染效应^[24]；陈海燕等通过土壤酶活性等指标说明 4 种植物对不同重金属复合污染土壤的响应^[25]。说明以土壤酶活性作为重金属污染程度的评价指标是可行的，且植物根际微生物的存在，可协同植物修复土壤中的重金属污染。土壤中不同铅处理浓度对凤尾蕨根系土壤酶活性的影响结果，见图 9—图 12。

由图 9—图 12 可知，随着铅处理浓度的增加，在 0~400 mg·L⁻¹ 铅浓度范围内，脲酶、磷酸酶和蔗

糖酶活性均随铅浓度增大而增大。在 400~2 000 mg·L⁻¹ 浓度范围内，随铅胁迫浓度增大而降低。表明这 3 种酶在一定程度上，可以适应土壤中铅浓度的变化；但过氧化氢酶活性随着铅浓度增加，呈持续下降趋势。表明土壤中铅污染，对土壤中的氧化还原环境影响较大。此外，随着胁迫时间的延长，土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶的酶活分别在 30、60、90 d 下逐渐降低，且表现出相似的变化规律。而土壤磷酸酶在 90 d 时，酶活较 60 d 有所提高，分析可能是磷酸酶经长期驯化后，对土壤环境具有一定的适应性^[26]。

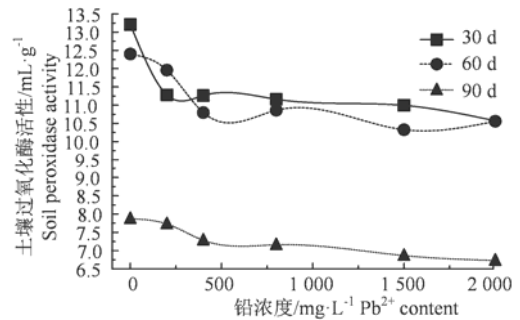


图 9 凤尾蕨根系土壤过氧化氢酶活性变化
Figure 9 Changes of catalase activity in root soil of *Pith fern*

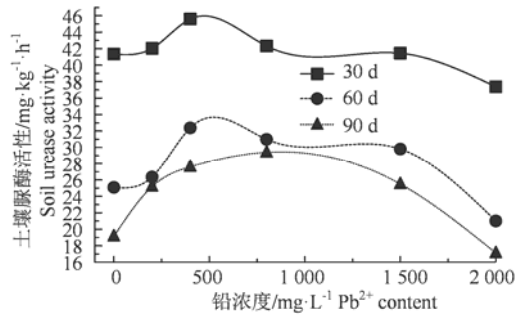


图 10 凤尾蕨根系土壤脲酶活性变化
Figure 10 Changes of soil urease activity in root soil of *Pith fern*

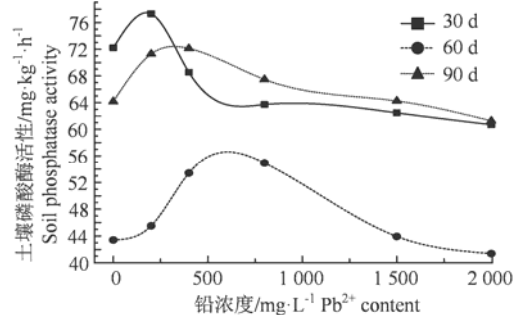


图 11 凤尾蕨根系土壤磷酸酶活性变化
Figure 11 Changes of phosphatase activity in root soil of *Pith fern*

磷酸酶是土壤中最重要酶之一，Huang 等人研究表明，土壤磷酸酶在土壤中主要以无机磷形式存在^[27]，土壤磷酸酶的酶活能够表征土壤的肥力水平；脲酶能为植物生长提供必需的 N^[28-29]；过氧

化氢酶则能表征土壤呼吸作用的强度, 促进过氧化氢的分解, 防止对植物产生危害, 在一定条件下也可作为表征土壤肥力的指标^[28]; 蔗糖酶的活性则与土壤有机质等营养元素有关^[30]。但从实验结果可以看出, 蔗糖酶随铅浓度变化最为敏感, 且在不同时间下活性基本都大于空白对照组, 而其余三种土壤酶活性均不同程度低于空白对照, 因此可以用蔗糖酶活性作为评价土壤重金属铅污染的指标。

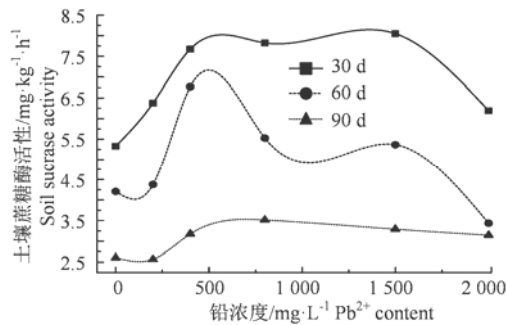


图 12 凤尾蕨根系土壤蔗糖酶活性变化

Figure 12 Changes of invertase activity in root soil of *Pith fern*

3 结论

凤尾蕨在不同铅污染土壤中, 经 30、60、90 d 的生长, 植物株高差别不大。凤尾蕨叶片中叶绿素含量在低浓度 ($0\sim 200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) Pb 处理时, 相对于对照组有所增加; 当 Pb 胁迫浓度超过 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 叶绿素含量出现较为显著的下降趋势, 并观察到部分植株出现叶片发黄、叶片脱落等现象, 但并没有出现死亡现象。此外, 当铅胁迫浓度达到 $2000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 凤尾蕨叶片中的叶绿素比对照降低也较少, 不足 20%。表明在高浓度 Pb 胁迫下, 凤尾蕨的叶绿素小部分被破坏, 但对植物的光合作用没有很大影响, 该植株可在铅污染土壤中正常生长。

持续的铅胁迫后, 凤尾蕨植株内 CAT、POD、SOD 三种酶活性都有上升的趋势, 随着铅胁迫强度的增大以及培养时间的延长, 酶活性表现出下降趋势。说明它们具备一定的抗铅胁迫的协同作用, 共同组成防御过氧化体系, 来抵抗生长环境中恶劣因素对植物机体的破坏。

凤尾蕨可以吸收高浓度 Pb, 其地下部分与地上部分的铅积累量均随土壤铅浓度的升高而增加, 且地下部分和地上部分的富集系数均大于 1, 且凤尾蕨地下部的铅富集量和富集系数都远大于地上部分, 表明凤尾蕨将从土壤中吸收的铅主要集中于根部。

凤尾蕨根部土壤酶活会受到铅污染浓度的影响。在低浓度 ($0\sim 400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) Pb 处理时, 土壤过

氧化氢酶等 4 种土壤酶活性相对于对照组有增加; 当 Pb 胁迫浓度超过 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 酶活开始下降。表明凤尾蕨根际微生物的种类和数量会受到铅污染浓度的影响, 在低浓度铅污染情况下, 可协同植株发挥作用, 提高土壤酶活, 促进植物对土壤重金属污染的修复作用。

综上所述, 凤尾蕨可以将土壤中重金属污染物铅富集在体内, 有效降低污染土壤的铅含量, 且在低浓度铅污染土壤中, 其植物生长状况、叶绿素含量、植物体内酶活均较正常有提高, 对根系周边土壤的酶活也有提高, 可改善土壤状况。凤尾蕨相较于一般植物具有生物量大、生长快速, 且具有一定的观赏价值等优点。因此, 凤尾蕨在土壤重金属铅污染的植物修复技术上具有较大的发展前景。

参考文献:

- [1] WOLFF E W, SUTTIE E D. Antarctic snow record of southern hemisphere lead pollution[J]. *Geophys Res Lett*, 1994, 21(9): 781-784.
- [2] 徐芹磊, 陈炎辉, 谢团辉, 等. 铅锌矿区农田土壤重金属污染现状与评价[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(2): 176-182.
- [3] 陆轶明. 食品中重金属铅污染状况和检测技术[J]. *食品安全导刊*, 2018(12): 58.
- [4] 李方洲, 滕玉婷, 张亚平, 等. 土壤重金属修复植物处置技术研究现状与展望[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(S2): 213-220.
- [5] RASCIO N, NAVARI-IZZO F. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting?[J]. *Plant Sci*, 2011, 180(2): 169-181.
- [6] 李影, 刘鹏. Cd 胁迫对 3 种蕨类植物生理代谢及镉累积特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 128-133.
- [7] 孙歆. 凤尾蕨富集砷与矿质元素的关系[D]. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所, 2006.
- [8] 葛绪广, 张欢欢, 陈琳, 等. 矿区蕨类植物重金属富集性调查研究: 以黄石国家矿山公园为例[J]. *湖北师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(1): 8-11.
- [9] 严衍禄, 刘心生. 叶绿素测定方法的研究[J]. *北京农业大学学报*, 1982(2): 53-67.
- [10] 杨兰芳, 庞静, 彭小兰, 等. 紫外分光光度法测定植物过氧化氢酶活性[J]. *现代农业科技*, 2009(20): 364-366.
- [11] 史竞艳, 罗辛茹, 鲍江鸿, 等. 超氧化物歧化酶活性的测定[J]. *湖北大学学报(自然科学版)*, 2012, 34(4): 373-377.
- [12] 王尚堃. 多胺及其合成抑制剂对干旱胁迫下李苗叶片 SOD、POD 和 CAT 活性的影响[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(3): 388-392.
- [13] 朱兰保, 盛蒂, 许晖. 蔬菜地土壤重金属酸消解测定方

- 法研究初探[J]. 中国农学通报, 2007, 23(3): 420-423.
- [14] 石春芳, 王志勇, 冷小云, 等. 土壤磷酸酶活性测定方法的改进[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(7): 48-49, 54.
- [15] 周礼恺, 张志明. 土壤酶活性的测定方法[J]. 土壤通报, 1980, 11(5): 37-38.
- [16] 吴云. 土壤酶活测定及土壤微生物总蛋白的提取、纯化与鉴定[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [17] 李二龙. 铅胁迫对 4 种木本植物酶保护系统的影响[J]. 四川林业科技, 2012, 33(6): 50-53.
- [18] WANG M, KAN G F, SHI C J, et al. Heavy metal tolerance of an Antarctic bacterial Strain O5 and its antioxidant enzyme activity changes induced by Cu²⁺[C]//2011 IEEE International Conference on Systems Biology (ISB), September 2-4. Zhuhai: IEEE, 2011.
- [19] ASADA K. The water-water cycle as alternative photon and Electron sinks[J]. Phil Trans R Soc Lond B, 2000, 355(1402): 1419-1431.
- [20] 李佩华, 刘小文. 重金属铅、镉胁迫对马铃薯生长及抗氧化酶系统的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2014, 29(5): 746-751.
- [21] 覃勇荣, 汤丰瑜, 严海杰, 等. 重金属胁迫对任豆种子萌发及幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. 种子, 2017, 36(10): 31-36.
- [22] KOCHIAN L V, PENCE N S, LETHAM D L D, et al. Mechanisms of metal resistance in plants: aluminum and heavy metals[C]//Progress in plant nutrition: plenary lectures of the XIV international plant nutrition colloquium. Springer, Dordrecht, 2002: 109-119.
- [23] 魏树和, 周启星, 王新. 18 种杂草对重金属的超积累特性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2003, 11(2): 152-160.
- [24] 孟庆峰, 杨劲松, 姚荣江, 等. 单一及复合重金属污染对土壤酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(3): 545-550.
- [25] 陈海燕, 樊霆, 张泽, 等. 不同植物修复重金属复合污染土壤对土壤中微生物数量与酶活性的影响[J]. 环境保护, 2018, 46(1): 65-69.
- [26] 陈苏, 孙丽娜, 晁雷, 等. 基于土壤酶活性变化的铅污染土壤修复基准[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1659-1662.
- [27] HUANG Q Y, CHEN W L, GIANFREDA L, et al. Adsorption of acid phosphatase on minerals and soil colloids in presence of citrate and phosphate[J]. Pedosphere, 2002, 12(4): 339-348.
- [28] CHEN S K, EDWARDS C A, SUBLER S. A microcosm approach for evaluating the effects of the fungicides benomyl and captan on soil ecological processes and plant growth[J]. Appl Soil Ecol, 2001, 18(1): 69-82.
- [29] YANG Z L, FENG G Y. Effects of heavy metals on soil urease activity[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(3): 41-43.
- [30] 李文凤, 房翠翠, 牛玉昊, 等. 高原地区不同农作物土壤酶活性与土壤养分关系研究[J]. 北方园艺, 2014(12): 159-161.