

施磷对吊兰修复镉污染土壤及土壤酶活性的影响

潘芳慧¹, 张晓玮¹, 王友保^{1,2}

(1. 安徽师范大学生命科学学院, 安徽 芜湖 241000;

2. 安徽师范大学生物环境与生态安全安徽省高校省级重点实验室, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 选用吊兰进行室内盆栽, 研究在 Cd 污染土壤中, 施用不同剂量磷肥对吊兰生理指标、土壤酶活性等的影响, 为合理施用磷肥, 提高 Cd 污染土壤的植物修复效果提供参考依据。结果表明: 吊兰在 100 mg/kg 的 Cd 污染土壤中能正常生长, 施 P 对吊兰的叶绿素、细胞膜透性、抗氧化酶活性影响显著 ($p < 0.01$), 表现为低浓度促进, 高浓度抑制作用。当施磷量为 200 mg/kg 时, 叶绿素含量、CAT 酶活性最大, 外渗电导率和 MDA 含量最低, POD 酶活性开始上升, 说明施磷能使吊兰的细胞膜受害程度最低, 抗氧化作用增强。同时, 施 P 有利于改善 Cd 污染土壤的酶系统, 对过氧化氢酶、脲酶的活性表现为低浓度促进、高浓度抑制, 对蔗糖酶的活性表现相反, 对磷酸酶的活性表现抑制作用; 且 200 mg/kg 的磷处理时, 过氧化氢酶、脲酶的活性最高, 蔗糖酶的活性最低。4 种土壤酶活性均与 P 浓度呈高度相关性 ($p < 0.05$), 相关性为脲酶 > 过氧化氢酶 > 蔗糖酶 > 磷酸酶。

关键词: 磷肥; 镉污染土壤; 吊兰; 土壤酶; 植物修复

中图分类号: X173; X53

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0346-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.03.052

Effects of Phosphate Fertilizer on Phytoremediation of *Chlorophytum comosum* and Soil Enzyme Activity in Cd-contaminated Soils

PAN Fanghui¹, ZHANG Xiaowei¹, WANG Youbao^{1,2}

(1. College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000;

2. Anhui Key Laboratory of Biotic Environment and Ecological Safety, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000)

Abstract: The effect of phosphate fertilization on the growth of *Chlorophytum comosum* and soil enzyme activities in Cd-contaminated soils were investigated. The results showed that *C. comosum* was able to grow well in Cd-contaminated soils contained 100 mg/kg Cd. The appropriate addition of P fertilization was capable of distinctly improving chlorophyll content, cell membrane permeability and antioxidase activities of *C. comosum* ($p < 0.01$). The chlorophyll content, cell membrane permeability and antioxidase activities of *C. comosum* were promoted by low P level fertilization and inhibited by high P level fertilization. Both the chlorophyll content and the CAT activity increased to the maximum at 200 mg/kg of P. Election Conductivity and MDA content dropped to the minimum value at the same time. The POD activity started to rise when the P content were at 200 mg/kg. The results indicated that P addition could reduce the degree of damage to the cell membrane to the lowest level, and significantly enhance antioxidation. Simultaneously, the soil enzyme system in Cd-contaminated soils could also be improved by using phosphate fertilizer. The activities of catalase and urease were enhanced at low P content while they were decreased at high P content. The urease activity showed the opposite trend of the catalase and urease activities. The phosphatase activity was inhibited. Besides, the activities of catalase and urease were elevated to the maximum values while the sucrase activity was decreased to the minimum value at 200 mg/kg of P content. Moreover, the four soil enzyme were highly correlated with P concentration ($p < 0.05$) and the correlation sequence of the four soil enzymes was urease > catalase > sucrose > phosphatase.

Keywords: phosphate fertilization; Cd-contaminated soils; *Chlorophytum comosum*; soil enzyme; phytoremediation

我国及世界土壤 Cd 污染现象突出^[1]。美国宾夕法尼亚州 Palmerton 锌冶炼厂附近部分土壤 Cd 含量达 1 020 mg/kg^[2-3],而在我国辽宁省葫芦岛锌厂、湖南宝山矿厂附近,有些表层土壤 Cd 含量甚至高达 2 587 mg/kg^[4]。土壤 Cd 浓度超标不但危及农作物的生长,而且通过食物链的传递危害人类健康。利用植物修复技术对 Cd 污染土壤的治理已迫在眉睫。近年来,针对磷肥作用植物吸收和富集土壤重金属 Cd 方面的研究引起科学家们浓厚的兴趣^[2-3]。磷肥可以有效提高植物的生物量,促进植物的快速生长。另一方面,磷肥能改变土壤中的离子分布,从而改变土壤微环境,进而改变重金属在土壤中的形态分布,提高植物对重金属污染土壤的修复效果^[5-6]。在 Cd 污染土壤植物修复技术中,外源性磷可活化土壤有效态镉含量,促使植物根系对镉的吸收,减少土壤镉的危害^[1,3]。同时,外源性磷也对土壤酶活性产生重要作用。土壤酶活性是土壤肥力的重要指标,植物吸收营养元素能力受土壤酶活性大小的影响^[7-8]。因此,在受重金属污染的土壤中,适量地施用磷肥以促进植物生长和改善土壤微环境显得十分重要^[4,9]。

吊兰(*Chlorophytum comosum*)属于百合科吊兰属,是重要的观赏植物,对重金属 Cd 具有很好的耐性与积累特性^[3,10-11]。它作为修复土壤重金属 Cd 的物种,不会造成土壤的二次污染,也不会进入食物链威胁人类健康。因此,本研究选用吊兰进行室内盆栽,探讨在 Cd 污染土壤中,施用不同剂量磷肥对吊兰生理生态指标、土壤酶活性等的影响,为合理施用磷肥,提高植物对 Cd 污染土壤修复效果提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自安徽师范大学后山山坡,土壤为黄棕壤,pH 5.33,磷、氮、钾、有机质含量分别为 2.06, 1.55, 9.69, 25.55 g/kg,镉含量 0.68 mg/kg。土壤采回后风干,过 3 mm 筛后充分混匀备用。

供试吊兰幼苗取自相同母本培育的同一批植物。这些均带有气生根的幼苗土培 2 周,待生根稳定后取生长情况相近的幼苗进行试验。

以供试土壤为栽培土,一次性加入磷酸氢二铵,使土壤含 P 含量(以 P_2O_5 计)分别为 50, 100, 200, 400, 600, 800 mg/kg(所有处理用 NH_4Cl 补足 N 含量,避免 N 对试验的影响)^[3],并以不添加 P 处理的供试土壤为对照(CK),进行盆栽试验,每花盆(直径 10 cm)装土 300 g。

考虑吊兰在高浓度 Cd 污染土壤中可生长,满足高浓度 Cd 污染土壤植物修复的要求^[10-11],向供试土

壤中添加乙酸镉(以 Cd 计),使土壤含 Cd 浓度 100 mg/kg。添加乙酸镉的土壤稳定 15 d 后,每盆种植吊兰 2 株。以不添加 Cd 的土壤为对照,另设不栽培吊兰的空白。以上所有处理均设 3 个重复。处理期间观察植物的长势和症状,60 d 后采样分析。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤背景值测定 土壤 N、P、K 含量参照文献^[10-12]进行测定;有机质含量采用油浴加热— $K_2Cr_2O_7$ 容量法测定;Cd 含量采用 $HNO_3-H_2SO_4-HClO_4$ (8:1:1)消化后火焰原子吸收分光光度计(AA6800 型,日本岛津)。

1.2.2 吊兰长势观测和叶片叶绿素含量测定 试验中对吊兰的长势进行观测,取各处理相同功能区有代表性叶片 0.2 g,研磨匀浆,用 755B 型分光光度计测定 663, 645 nm 处的光密度,计算叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a+b 含量(mg/g FW)^[1,10-13]。

1.2.3 吊兰叶片细胞膜透性、MDA 含量及抗氧化酶活性测定 叶片细胞膜透性通过 DDS-11A 型电导仪测定其相对电导率($\mu S/cm$)^[1,12-13];丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比脱酸法^[1,11-13];过氧化物酶(POD)活性采用愈伤木酚法测定^[1,4,11];过氧化物酶(CAT)采用紫外分光光度法测定^[1,4,11]。

1.2.4 土壤酶活性测定 将吊兰从各处理土壤中连根取出,取吊兰根部表面的土壤,去掉土样中残余根系,风干,磨细,过 0.1 mm 筛后保存。过氧化物酶用滴定法测定,以 1 g 土壤培养 20 min 后所消耗 0.1 mol/L $KMnO_4$ 体积(mL)表示其活性;蔗糖酶采用 0.1 mol/L Na_2SO_3 滴定,其活性用 0.1 mol/L Na_2SO_3 滴定体积(mL)之差表示;脲酶用苯酚钠比色法测定,活性以 24 h 内 1 g 土壤中 NH_3^+-N 的质量(mg)表示;酸性磷酸酶用磷酸苯二钠比色法测定,其活性以 2 h 内 100 g 土壤中 P_2O_5 的质量(mg)表示^[1,4,13]。

1.2.5 数据分析 使用 Excel 2003 软件进行平均值和标准差计算,根据公式计算叶绿素 a、叶绿素 b 含量,酶活性。使用 SPSS 19.0 软件进行方差估计、多重比较、相关分析和曲线估计等。所有数据均为 3 次重复的均值。

2 结果与分析

2.1 不同 P 浓度对吊兰叶绿素含量的影响

叶绿素在植物的光合作用中发挥着重要的作用,其含量越高,越有利于植物的光合作用,反之光合作用减弱,不利于植物生长^[13]。添加 100 mg/kg Cd 处理吊兰长势为优,无任何不良症状,与未添加处理无明显差别。由表 1 可知,吊兰在 100 mg/kg Cd 的污染土壤中仍能正常生长。随着 P 浓度提高,叶绿素 a 含量表现出先增加后降低的趋势,但这种变化不显著

($p=0.062$),而叶绿素 b 含量先增加后降低,变化极显著($p<0.01$)。当 P 含量达到 200 mg/kg 时,所有处理叶绿素 a、叶绿素 b 含量均达到最大。这说明添加适量的磷对吊兰的生长有利。

表 1 施加 P 和 Cd 对吊兰叶绿素含量的影响

Cd 浓度/ (mg · kg ⁻¹)	P 浓度/ (mg · kg ⁻¹)	叶绿素 a/ (mg · g ⁻¹ FW)	叶绿素 b/ (mg · g ⁻¹ FW)	叶绿素(a+b)/ (mg · g ⁻¹ FW)
0	CK	2.79±0.56abc	1.21±0.22c	4.00±0.78c
0	50	2.86±0.12abc	1.46±0.02bc	4.32±0.14bc
0	100	3.20±0.31ab	1.60±0.25b	4.80±0.13ab
0	200	3.55±0.06a	1.99±0.16a	5.54±0.15a
0	400	3.27±0.50ab	2.05±0.24a	5.31±0.26a
0	600	2.56±0.44bc	1.59±0.14b	4.15±0.47bc
0	800	2.29±0.48c	1.48±0.22bc	3.77±0.55c
100	CK	3.16±0.32a	1.90±0.21b	5.05±0.14bc
100	50	3.42±0.53a	2.33±0.44ab	5.75±0.47ab
100	100	3.64±0.49a	2.38±0.16a	6.03±0.60c
100	200	3.68±0.22a	2.51±0.08a	6.19±0.23a
100	400	3.68±0.31a	2.37±0.23a	6.05±0.18a
100	600	2.73±0.23a	2.28±0.23ab	6.01±0.46a
100	800	3.23±0.13a	1.32±0.23c	4.55±0.11c

注:表中数据为平均值±标准误差;同列不同字母用表示同一个指标在不同处理条件下差异性显著($p>0.05$)。下同。

2.2 施 P 对吊兰抗氧化系统的影响

2.2.1 施 P 对吊兰叶片细胞膜透性的影响 细胞膜透性的大小可间接用组织的相对电导率来衡量。组

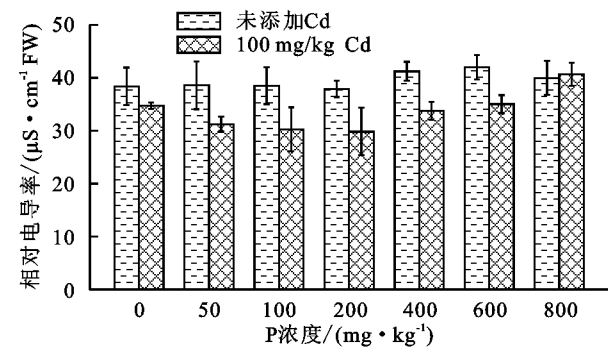


图 1 不同浓度 P 对吊兰叶片组织电导率和 MDA 含量的影响

2.2.2 施 P 对吊兰抗氧化酶活性的影响 由图 2 可知,随着 P 浓度增加,对照组中 POD 活性先升后降,当 P 浓度为 200 mg/kg 时达到最大,符合低浓度促进,高浓度抑制的趋势。而添加 100 mg/kg Cd 处理中 POD 活性在低 P 浓度下变化不明显,当磷浓度增加至 200 mg/kg 时开始增加,说明吊兰的抗氧化作用从磷浓度为 200 mg/kg 开始变得明显,据此推测吊兰对重金属的吸收也将显著提升。

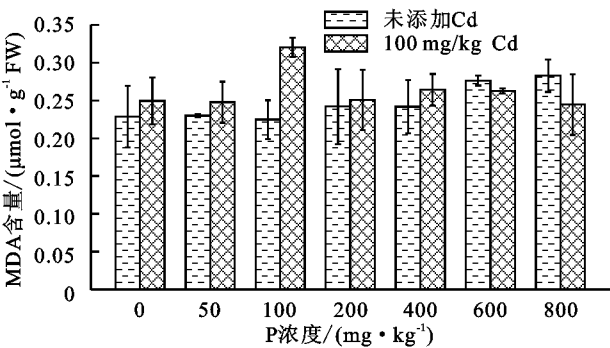
所有处理 CAT 酶活性随着磷浓度增加均先升后降(图 2),但是 0~200 mg/kg 的磷浓度下,添加 100 mg/kg Cd 处理的 CAT 酶活性变化更加显著,说明在此浓度范围内添加 P 能显著促进吊兰对 Cd 的吸收。

织相对电导率越高,细胞膜完整性遭到破坏的程度越大。通过测定外渗电导率,可以间接反映质膜受伤害的程度^[10-13]。

由图 1 可知,在不添加 Cd 的处理中,添加 P 对叶片组织相对电导率的影响不显著,推测添加的磷肥对细胞膜透性影响不大;而添加 100 mg/kg Cd 处理中外渗电导率随着 P 浓度的升高,先降低后增加(在低磷下变化不明显,而 P 达到 200 mg/kg 时开始增加),说明当 P 浓度超过 200 mg/kg 时,吊兰吸收的重金属转运到叶片中达到一定阈值,对细胞膜造成一定的伤害。

丙二醛(MDA)作为质膜过氧化作用的重要产物之一,可以与蛋白质、核酸、氨基酸等活性物质交联,形成脂褐素(一种不溶于水的沉积化合物),从而干扰细胞的正常生命活动。在衰老或逆境等条件下,植物器官会产生过多的自由基,这些自由基会促进植物体内膜脂的过氧化作用,对植物产生毒害作用,其产物 MDA 含量常作为植物受伤害程度的重要标志^[14]。

由图 1 可知,在对照组中,MDA 的含量变化不明显,通过 SPSS 的单因素方差分析,添加 P 对于 MDA 的含量影响不显著($p>0.05$)。而在添加 100 mg/kg Cd 处理中 P 浓度达到 100 mg/kg,MDA 的含量明显高出很多,可能与根部吸收来的 Cd 引起叶片组织质膜过氧化作用增强有关。



逆境条件的胁迫会使植物直接或间接地形成过量的活性氧自由基(ROS),而 ROS 对细胞内的膜系统、脂类、蛋白质和核酸等大分子具有强烈的破坏作用^[14]。Ferrer-Sueta 等^[15]认为,逆境条件下,植物体细胞膜内存在抗氧化的保护系统,能够清除体内多余的自由基,其活性氧自由基代谢是一个动态的变化过程,这一保护酶系统实际上是一个抗氧化系统,它是由许多酶和还原型物质组成,其中 SOD、POD、CAT 是主要的抗氧化酶,它们协同起来可清除有害的体内活性氧,保护植物细胞免受活性氧的损伤,从而保护植物的膜系统。在植物受到重金属胁迫时,POD 和 CAT 酶活性会改变,从而间接反映植物受伤害的程度。

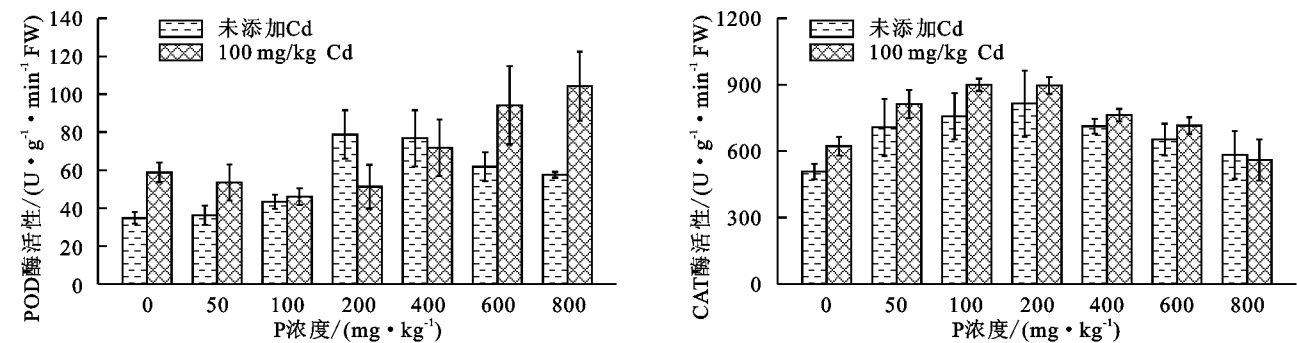


图 2 不同浓度 P 作用下吊兰的 POD 酶活性和 CAT 酶活性

2.3 施 P 对吊兰修复 Cd 污染土壤酶的影响

2.3.1 栽培吊兰对 Cd 污染土壤酶活性的影响 土壤酶作为生物活性物质,几乎催化土壤中所有的生化反应和物质循环,其酶活性是土壤肥力的重要指标^[7-8]。由表 2 可知,100 mg/kg Cd 的无吊兰空白处理与不添加 Cd 的无吊兰空白处理对比,其过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶的活性显著降低,说明重金属 Cd 对土壤中这 3 种酶有明显的抑制作用,可能与酶活性分子中的活性部位和配

体等结合产生了与底物的竞争性抑制作用有关^[1,16];磷酸酶的活性却增高,说明 100 mg/kg Cd 对土壤磷酸酶活性有一定的促进作用。100 mg/kgCd 的吊兰栽培组与 100 mg/kg Cd 的无吊兰空白组相比,过氧化氢酶活性变化不明显,蔗糖酶、脲酶、磷酸酶活性增高,说明栽培吊兰在 100 mg/kg Cd 污染的土壤中能有效地增加土壤酶活性,对 Cd 污染的土壤起到修复作用。这和王友保等^[4]的研究结果一致。

表 2 不添加 P 吊兰的栽培组与不栽培吊兰的空白组土壤酶活性

Cd 浓度/ (mg·kg ⁻¹)	吊兰栽培	过氧化氢酶/ (mL·g ⁻¹)	蔗糖酶/ (mL·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	脲酶/ (mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	磷酸酶/ (10 ³ mg·100 g ⁻¹ ·2 h ⁻¹)
0	无吊兰	0.47±0.032	2.002±0.248	14.3±0.3	7.293±0.165
100	无吊兰	0.36±0.044	1.430±0.143	11.4±0.6	11.959±0.675
100	有吊兰	0.32±0.025	1.573±0.000	19.2±1.4	14.337±0.604

注:表中数据为平均值±标准误差。

2.3.2 施 P 对 Cd 污染土壤酶活性的影响 由表 3 可知,在不添加 Cd 的处理中,随着 P 浓度增加,过氧化氢酶、蔗糖酶活性都表现出先降后升的趋势,而脲酶活性变化趋势正好相反,在 200 mg/kg P 浓度时它们都达到极值;磷酸酶的活性一直呈现降低趋势。结果表明,施加磷肥能够刺激土壤酶活性,且对它们的活化产生显著影响^[8,17]。

解,从而降低毒性^[18],有利吊兰的良好生长。蔗糖酶的活性先降低后增加,200 mg/kg 的磷浓度处理时,蔗糖酶的活性降到最低,这可能是由于吊兰生长旺盛,吸收大量的有机物,出现无底物活性降低的现象^[16,19]。脲酶的活性先上升后下降,200 mg/kg 的 P 处理时,脲酶的活性达到最高,说明低浓度 P 对脲酶有促进作用,高浓度 P 反而起抑制作用,土壤脲酶是具有氨化作用的高度专一性的一类好气性水解酶^[20],脲酶活性增强后会加快氨化作用,改变 N 循环,进而影响土壤环境质量^[17]。磷酸酶的活性一直下降,可能是因为当土壤中施加磷肥时,植物对于无机磷的需求相对减少,向土壤中释放的磷酸酶也随之减少^[7]。故而,磷酸酶不能作为反映施 P 强化吊兰修复 Cd 污染土壤效果的指标。

由表 3 可知,添加 100 mg/kg Cd 处理,随着 P 浓度的增加,过氧化氢酶活性呈现先增后降趋势,而蔗糖酶活性变化趋势恰好相反,且 P 浓度为 200 mg/kg 时它们的活性达到极值,脲酶的活性呈增加趋势,磷酸酶的活性表现降低趋势,前两种酶活性的均值比不添加 Cd 的处理相应的酶活性均值低(差异显著性分别为 0.038,0.051),而后 2 种酶活性的均值要高于不添加 Cd 的处理土壤中相应的酶活性(差异显著性分别为 0.055,0.041)。结果表明,100 mg/kg Cd 土壤中酶活性因受 Cd 污染有所抑制,施加 P 后,可改善土壤理化性质,土壤酶活性得到一定程度的活化^[17-18]。

将过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶及磷酸酶的活性与 P 浓度作曲线估计。由表 4 可知,4 种土壤酶均与 P 浓度呈高度相关性($p<0.05$),且相关性大小为脲酶>过氧化氢酶>蔗糖酶>磷酸酶,说明脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶的活性可成为施 P 对土壤变化的重要指标。并且根据理论计算得到土壤中过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶活性达到最值时,需要施加的最适 P 浓度分别为 269,243,315 mg/kg。通过测定土壤酶活性,可实现对施 P 修复土壤 Cd 污染的效果进行监测。

2.3.3 施 P 对吊兰修复土壤酶活性的影响 由图 3 可知,与不添加 Cd 处理相比,添加 100 mg/kg Cd 处理中过氧化氢酶的活性表现先升后降的趋势,200 mg/kg 的磷浓度处理时,其活性达到最大,这可能与土壤的氧化强度有关,加速土壤中过氧化氢酶对过氧化氢的分

表 3 无吊兰的空白组土壤酶活性

Cd 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	P 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	过氧化氢酶/ ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	蔗糖酶/ ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	脲酶/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	磷酸酶/ ($10^3 \text{mg} \cdot 100\text{g}^{-1} \cdot 2\text{h}^{-1}$)
0	CK	$0.47 \pm 0.032\text{a}$	$2.002 \pm 0.248\text{a}$	$14.3 \pm 0.3\text{d}$	$7.293 \pm 0.165\text{a}$
0	50	$0.38 \pm 0.023\text{bc}$	$2.145 \pm 0.286\text{ab}$	$15.2 \pm 0.6\text{cd}$	$7.167 \pm 0.219\text{ab}$
0	100	$0.36 \pm 0.078\text{bc}$	$1.478 \pm 0.330\text{abc}$	$17.0 \pm 0.5\text{bc}$	$7.076 \pm 0.118\text{ab}$
0	200	$0.34 \pm 0.021\text{c}$	$1.239 \pm 0.165\text{c}$	$22.2 \pm 0.6\text{a}$	$6.859 \pm 0.165\text{bc}$
0	400	$0.38 \pm 0.055\text{bc}$	$1.430 \pm 0.248\text{bc}$	$21.8 \pm 3.0\text{a}$	$6.805 \pm 0.124\text{bc}$
0	600	$0.43 \pm 0.040\text{ab}$	$1.811 \pm 0.541\text{abc}$	$18.2 \pm 0.3\text{b}$	$6.534 \pm 0.377\text{c}$
0	800	$0.48 \pm 0.025\text{a}$	$2.097 \pm 0.541\text{ab}$	$16.1 \pm 0.9\text{bcd}$	$6.488 \pm 0.122\text{c}$
100	CK	$0.36 \pm 0.044\text{ab}$	$1.430 \pm 0.143\text{bc}$	$11.4 \pm 0.6\text{e}$	$11.959 \pm 0.675\text{a}$
100	50	$0.37 \pm 0.060\text{ab}$	$1.430 \pm 0.000\text{bc}$	$21.1 \pm 0.9\text{d}$	$9.518 \pm 0.685\text{b}$
100	100	$0.38 \pm 0.074\text{ab}$	$1.287 \pm 0.000\text{cd}$	$20.2 \pm 0.9\text{d}$	$8.704 \pm 1.449\text{b}$
100	200	$0.40 \pm 0.035\text{a}$	$1.192 \pm 0.083\text{d}$	$25.7 \pm 0.8\text{c}$	$8.442 \pm 0.596\text{bc}$
100	400	$0.31 \pm 0.020\text{abc}$	$1.287 \pm 0.000\text{cd}$	$31.6 \pm 1.4\text{b}$	$8.161 \pm 0.587\text{bc}$
100	600	$0.29 \pm 0.050\text{bc}$	$1.478 \pm 0.083\text{b}$	$35.6 \pm 1.8\text{b}$	$7.076 \pm 0.346\text{cd}$
100	800	$0.24 \pm 0.052\text{c}$	$1.764 \pm 0.083\text{a}$	$46.7 \pm 5.4\text{a}$	$5.991 \pm 0.591\text{d}$

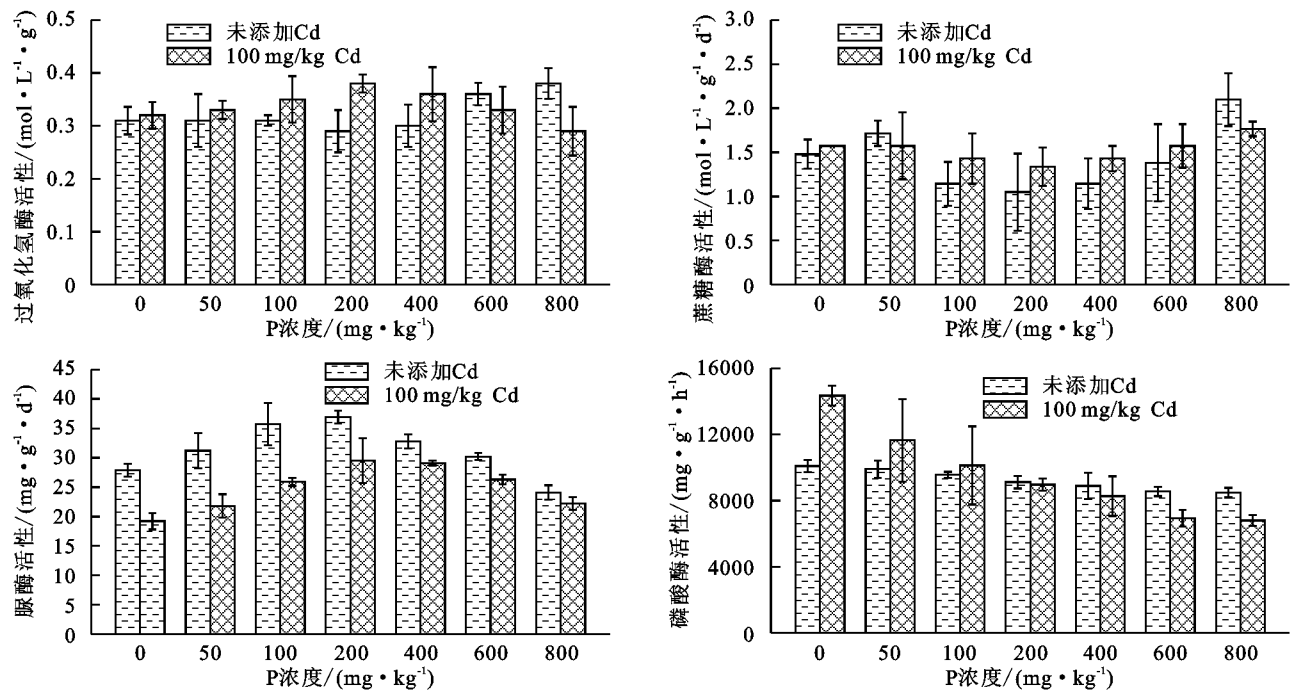


图 3 不同 P 浓度对吊兰栽培组中过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶以及磷酸酶活性的影响

表 4 土壤酶活性(y)与 P 浓度(x)的曲线估计

测定指标	曲线估计方程	R^2	p	峰值 P 浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
过氧化氢酶	$y=0.315+4.877 \times 10^{-4} x-1.167 \times 10^{-6} x^2+6.480 \times 10^{-10} x^3$	0.964	0.011	269
蔗糖酶	$y=1.604-0.002 x+5.145 \times 10^{-6} x^2-2.847 \times 10^{-9} x^3$	0.944	0.002	243
脲酶	$y=18.945+0.082 x-1.774 \times 10^{-4} x^2+1.003 \times 10^{-7} x^3$	0.981	0.004	315
磷酸酶	$y=11976.3-7.799 x$	0.763	0.010	—

3 结论

(1)施加适量的磷肥有利于吊兰的生长。在 100 mg/kg Cd 污染土壤中,施加 P 对吊兰的叶绿素含量、细胞膜透性、抗氧酶活性影响显著,表现为低浓度促进,高浓度抑制作用。当 P 浓度为 200 mg/kg 时,叶绿素含量、CAT 酶活性达到最大,POD 酶活性开始增加,即吊兰细胞膜的破坏程度最小,吊兰的抗氧化作用增加明显。

(2)施加 P 有助于改善 Cd 污染土壤中的酶活

性。尤其当施 P 量为 200 mg/kg 时,过氧化氢酶、脲酶的活性升至最高。4 种土壤酶活性均与 P 浓度显著相关 ($p<0.05$),依次为脲酶>过氧化氢酶>蔗糖酶>磷酸酶,表明前 3 种酶更能较好地反映施 P 对吊兰植物修复所起的作用。

参考文献:

[1] 吴丹,王友保,李伟,等. 镉胁迫对吊兰生长与土壤酶活性的影响[J]. 环境化学,2012,31(10):1562-1569.
[2] 王伯仁,蔡泽江,李冬初. 长期不同施肥对土壤旱地肥力

- 的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 85-88.
- [3] Wang Y B, Zhu C F, Yang H F, et al. Phosphate fertilizer affected rhizospheric soils: Speciation of cadmium and phytoremediation by *Chlorophytum comosum* [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2017, 24(4): 3934-3939.
- [4] 王友保, 燕傲雷, 张旭情, 等. 吊兰生长对土壤镉形态分布与含量的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 163-166.
- [5] 廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰, 等. 提高植物修复效率的技术途径与强化措施[J]. 环境科学学报, 2007, 27(6): 881-893.
- [6] Gao X P, Flaten D N, Tenuta M, et al. Soil solution dynamics and plant uptake of cadmium and zinc by durum wheat following phosphate fertilization [J]. Plant and Soil, 2011, 338(1): 423-434.
- [7] 马亚娟, 徐福利, 王渭玲, 等. 氮磷提高华北落叶松人工林地土壤养分和酶活性的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 664-674.
- [8] 陈波浪, 蒋平安, 盛建东. 磷肥对棉田土壤有效磷及土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 185-188.
- [9] 曾鹏, 曹霞, 郭朝辉, 等. 珊瑚树 (*Viburnum odoratissimum*) 对污染土壤中镉的耐受和富集特征[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 1-8.
- [10] Wang Y B, Yan A, Wu T T, et al. Accumulation and remediation of cadmium-polluted soil by a potential cadmium-hyperaccumulator *Chlorophytum comosum* [J]. Energy Sources Part A, 2012, 34(16): 1523-1533.
- [11] Wang Y B, Yan A L, Dai J, et al. Accumulation and tolerance characteristics of cadmium in *Chlorophytum comosum*: A popular ornamental plant and potential Cd hyperaccumulator [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(2): 927-937.
- [12] Wang Y B, Liu D L, Zhang L, et al. Patterns of vegetation succession in the process of ecological restoration on the deserted land of Shizishan copper tailings in Tongling City [J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(7): 780-787.
- [13] 燕傲雷, 吴亭亭, 王友保, 等. 3种观赏植物对重金属镉的耐性与积累特性[J]. 生态学报, 2010, 30(9): 2491-2498.
- [14] 郑荣梁, 黄中洋. 自由基生物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [15] Ferrer-Sueta G, Vitturi D, Batinic-Haberle I, et al. Reactions of manganese porphyrins with peroxynitrite and carbonate radical anion [J]. Journal of Biological Chemistry, 2003, 278(30): 27432-27438.
- [16] 王友保, 刘登义. 污灌对作为生长及其活性氧清除系统的影响[J]. 环境科学学报, 2003, 23(4): 555-557.
- [17] 孙锋, 赵灿灿, 李江涛, 等. 与碳氮循环相关的土壤酶活性对施用氮磷肥的响应[J]. 环境科学学报, 2014, 34(4): 1016-1023.
- [18] 李江遐, 光强, 黄伏森, 等. 不同改良剂对矿区土壤重金属有效性及土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 211-215.
- [19] 陈红军, 孟虎, 陈钧鸿. 2种生物农药对土壤蔗糖酶活性的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 584-588.
- [20] 王天元, 宋雅君, 滕鹏起. 土壤脲酶及脲酶抑制剂[J]. 化学工程师, 2004, 8(2): 22-24.
- (上接第345页)
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 3版. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [14] Bunluesin S, Pokethitiyook P, Lanza G R, et al. Influences of cadmium and zinc interaction and humic acid on metal accumulation in *Ceratophyllum Demersum* [J]. Water Air and Soil Pollution, 2007, 180(1/4): 225-235.
- [15] Wu Y J, Zhou H, Zou Z J, et al. A three-year in-situ study on the persistence of a combined amendment (limestone+sepiolite) for remedying paddy soil polluted with heavy metals [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 130: 163-170.
- [16] Zhou H, Zeng M, Zhou X, et al. Heavy metal translocation and accumulation in iron Plaques and plant tissues for 32 hybrid rice (*Oryza sativa* L.) cultivars [J]. Plant and Soil, 2015, 386(1): 317-329.
- [17] 陈新红, 叶玉秀, 潘国庆, 等. 杂交水稻不同器官重金属铅浓度与累积量[J]. 中国水稻科学, 2014, 28(1): 57-64.
- [18] Gomes D S, Fragoso L C, Riger C J, et al. Regulation of cadmium uptake by *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects, 2002, 1573(1): 21-25.
- [19] Jan Stomph T, Jiang W, Struik P C. Zinc biofortification of cereals: Rice differs from wheat and barley [J]. Trends in Plant Science, 2009, 14(3): 123-124.
- [20] Hall J L, Williams L E. Transition metal transporters in plants [J]. Journal of Experimental Botany, 2003, 54(393): 2601-2613.
- [21] Satoh-Nagasawa N, Mori M, Nakazawa N, et al. Mutations in rice (*Oryza sativa*) heavy metal ATPase 2 (*OsHMA2*) restrict the translocation of zinc and cadmium [J]. Plant and Cell Physiology, 2015, 53(1): 213-224.
- [22] Hart J J, Welch R M, Novell W A, et al. Zinc effects on cadmium accumulation and partitioning in near-isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium concentration [J]. New phytologist, 2005, 167(2): 391-401.
- [23] Chang H B, Lin C W, Huang H J. Zinc-induced cell death in rice (*Oryza sativa* L.) roots [J]. Plant Growth Regulation, 2005, 46(3): 261-266.