

镉锌交互作用及生态学效应研究进展

王吉秀, 祖艳群, 李 元

(云南农业大学资源与环境学院, 云南 昆明 650201)

摘 要: 镉是环境中毒性、迁移性最强的重金属元素之一, 锌是植物生长必需元素, 近年来镉锌交互作用受到国内外土壤学和植物营养学界的关注。为探明 Cd 和 Zn 共存条件下的相互作用机制及影响因子, 综述 Cd 与 Zn 在土壤中、植物吸收运输过程以及 Cd 与 Zn 在植物生长、生理代谢过程中的交互作用, 并提出今后研究的方向, 旨在为 Cd、Zn 复合污染土壤的治理提供科学依据。

关键词: 镉; 锌; 交互作用; 生态学效应

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2010)增刊-0256-05

The Interaction of Cadmium and Zinc and Its Ecological Effects

WANG Ji-xiu, ZU Yan-qun, LI Yuan

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: Cadmium is a toxicity element and transfer easily in soil and from soil to plant. Zinc is one of the essential elements for plant growth. The chemical properties of Cd and Zn are similar. The interaction of Cd and Zn includes antagonistic, synergistic and non-directly relationship. In this paper, the interaction of Cd and Zn was concern about their relationship in soil, absorption and transport in plant, and effects on plant growth and plant metabolism. Some further studies about the interaction of Cd and Zn were put forward.

Keywords: cadmium; zinc; interaction; ecological effects

重金属污染常常造成生态破坏和环境质量恶化, 并通过食物链给人类健康带来巨大的危害。镉是环境中毒性、迁移性最强的重金属元素之一, 锌是植物生长必需元素, 在理论上, Cd^{2+} 与 Zn^{2+} 有相同的离子半径, 且有相似的化学性质, 易竞争植物体内相同的吸附位点。已有研究表明镉能与许多营养元素包括锌、硒、铜、锰、铁、钙、钾、磷、氮等产生交互作用^[1], 近几年 Cd、Zn 交互作用一直受到国内外土壤学和植物营养学界的关注, 它们之间的作用可以是协同、拮抗或无直接相关。事实上, 锌与镉的交互作用可能因土壤理化性质、植物种类、组织部位、镉与锌的浓度而异。目前国内外对镉、锌单因素在植物体内的吸收运

输以及对植物生理生化方面的研究报道较多, 但对锌和镉双因素在土壤及植物体内的吸收运输以及对植物生理生化方面的研究报道较少。

本文综述近年来 Cd、Zn 复合污染条件下, Cd、Zn 离子在土壤中的相互影响, 植物吸收运输过程中 Cd、Zn 交互作用, Cd、Zn 交互作用对植物生长、生理代谢过程的毒害作用。旨在探明 Cd 和 Zn 共存条件下的相互作用机制及影响因子, 为 Cd、Zn 复合污染土壤的治理提供科学依据。

1 土壤中 Cd 和 Zn 的交互作用

当土壤被重金属 Cd、Zn 复合污染后, 必将导致土壤生态系统正常结构和功能遭到破坏, 产生各种不良的生态效应。在土壤生态系统中, Cd、Zn 表现出一定的交互作用, 影响 Cd、Zn 在土壤中的交互作用及生物效应的因素较多, 包括胶体对重金属的吸附、各种无机及有机配体的配合或螯合作用、土壤的氧化还原状态、土壤的酸碱性及其他共存离子的作用, 还有土

收稿日期: 2009-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(30560034); 云南省学术带头人后备人才项目(2006 PY01-34)

作者简介: 王吉秀(1975—), 女, 云南陆良人, 在读硕士, 主要从事土壤污染和环境生态学研究。

通讯作者: 祖艳群 E-mail: zuyanqun@yahoo.com.cn

壤微生物的作用等,但重金属自身化学行为之间交互作用的影响十分明显。

1.1 土壤中 Cd 的存在对 Zn 的影响

在土壤中,锌与镉作为同族元素,竞争土壤中粘土矿物、氧化物及有机质上的阳离子交换吸附位点^[2]。朱波等(2005)研究表明,添加 Cd 使 Zn 吸附速率常数下降,Zn 的吸附减慢,而尤以对慢阶段的影响更显著,添加 Cd $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 可使 Zn 吸附量降至 $38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[3];Cd 与吸附于土壤胶体上的 Zn 进行离子交换,Cd 易于吸附在土壤胶体上,从而降低了土壤中 Cd 的有效性,增加了土壤中可溶性 Zn 的含量^[4]。土壤中 Cd 的存在,有利于 Zn 从土壤中的解吸,两者之间存在拮抗作用。

1.2 土壤中 Zn 的存在对 Cd 的影响

土壤中 Zn 对 Cd 的吸附也具有一定的影响,当添加 Zn $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,Cd 的吸附表观速率常数由 1.36×10^{-3} 降至 1.04×10^{-3} ,吸附速度明显下降,当溶液中 Zn 浓度为 Cd 浓度 10 倍时,Cd 吸附量降低 50%,表明 Zn 在竞争中占有有利地位,高浓度 Zn 明显抑制紫色土对 Cd 的吸附^[3];锌离子在土壤中的存在降低赤红壤对镉的吸附量,在吸附平衡液质量浓度为 $13.3 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,锌体系镉的吸附量约为 $1.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,吸附量下降 96.9%^[5];Zn 存在的条件下,Cd-Zn 复合老化效应的稳态时间延长。随着 Zn 浓度的增加,Cd 的有效态浓度相对显著增加,未加入 Zn 时,Cd 的平衡浓度为 $1.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而加入 $1250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Zn 时,Cd 的平衡浓度为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明 Zn 与 Cd 在配合物上的吸附发生显著的竞争,这种竞争使 Cd 的吸附显著减小,即有效态的 Cd 显著增加^[6];Cd 和 Zn 污染土壤,Zn 的存在可增加水溶态 Cd 的含量^[7]。

进入土壤中的重金属的归宿将由一系列复杂的化学反应和物理与生物过程所控制。Cd 和 Zn 物理化学性质相近,某些作用方式和途径相似,在土壤中 Zn、Cd 的形态转化主要是黏土矿物对它们的吸附,Zn、Cd 在土壤中吸附强度并无本质差异 ($K_{\text{Zn}} = 0.79$, $K_{\text{Cd}} = 0.72$),二者共存于土壤溶液中,必然因相互竞争结合位点使吸附受到彼此的牵制^[3],因而在底物水平即生态介质(土体、水体)代谢系统上存在吸附位点的竞争,最终导致一种重金属从结合位点上取代另一种处于竞争弱势的重金属。这种竞争的结果在很大程度上取决于参与竞争的重金属的种类、浓度比和各自的吸附特性,即不同重金属之间某些物理化学行为有相似之处,但它们并不存在完全的一致性。当

它们加入土壤后,最初的可动性将在很大程度上依赖于添加重金属的形态,由于形态不同,直接影响了重金属在土体中的迁移、转化及植物效应。土壤吸附重金属离子具有特定的顺序,由于某些金属的存在可能增加了毒性更大的金属的可溶性,产生的联合毒性更大^[8]。

2 Cd 和 Zn 在植物吸收过程中的交互作用

植物根系存在吸收 Cd、Zn 相同的位点,在植物吸收 Cd 和 Zn 的过程中存在交互作用。

2.1 Cd 的存在对植物吸收 Zn 的影响

研究认为,对于能同时吸收 Cd 和 Zn 的 *Thlaspi. caerulescens* 具有发达的根系和稠密的根毛,主动向土壤中的 Cd、Zn 区伸展,具有主动搜索土壤中的 Cd、Zn,将根系分配到富含 Cd、Zn 的地方的能力^[9]。Cd 的存在对植物吸收 Zn 的影响,因植物种类、组织部位和浓度而不同。加入 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 与 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 于 Zn 污染土壤上,能够降低小麦籽粒中 Zn 含量^[10,12],说明高浓度 Cd 对小麦吸收 Zn 具有拮抗效应。添加镉对苗期龙葵地上部锌积累也有显著的影响,当镉浓度达 $50 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,根、茎、叶中锌积累量均达到最高值,当镉浓度为 $200 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,各处理单株地上部锌积累量最低^[11];但是,当 Zn、Cd 混施时,Cd 的存在促进了大豆叶片中 Zn 的积累^[13]。也有研究表明植物 Cd 添加量、土壤 Cd 含量与 Zn 吸收量之间没有显著相关性,认为 Cd 对 Zn 的吸收并未产生抑制或促进作用,可能是由于 Cd 含量远远低于 Zn 含量,Zn 是植物的微量营养元素之一^[14]。Cd 对 Zn 的拮抗机制可能是因为增加土壤中 Cd 离子浓度,植物根系周围的 Cd 离子浓度也会随之增加,相对降低了根系周围的 Zn 离子浓度,也就降低了植物对 Zn 的吸收机率,减少了植物体内 Zn 含量。另外,还可能和 Cd 进入细胞后,与 Zn 竞争 Zn 酶中 Zn 的结合部位等生理机制有关。

2.2 Zn 的存在对植物吸收 Cd 的影响

大量实验研究证明,向土壤中施锌可抑制植物对镉的吸收,Zn 对 Cd 在植物的吸收过程表现为拮抗作用。在亚麻培育中,当土壤中 Zn 的浓度为 $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,能够抑制亚麻种子对 Cd 的吸收;用 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd + $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn 处理与用 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 单独处理相比较,新生根和茎的镉含量分别减少 32.7%,58.3%^[15]。用低剂量 Zn 处理缺 Zn 的小麦,发现施用锌肥可以使小麦中 Cd 的含量减

少约2倍^[16];当锌浓度增加到 $500\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,植株体内镉积累量呈下降趋势^[11];施Zn可降低烟草、白菜、莴苣和菠菜根部对Cd的吸收^[17-18];添加锌对苗期龙葵地上部镉积累也有显著的影响。可见植物Cd吸收量与土壤Zn添加量达到了显著的负相关。李森林等^[39]研究表明,Zn可使凤眼莲、烟草、甘蓝、玉米对Cd的吸收减弱,说明Cd、Zn复合污染中Zn对Cd的植物吸收可能有拮抗作用,产生了抑制Cd吸收的复合效应^[14],表明Zn的存在与Cd一起竞争植物表面的吸收位点,从而影响植物组织对Cd的吸收^[19]。此外,也有不同的报道,在镉锌污染土壤中施锌,增加春小麦、硬质小麦和玉米中Cd含量^[20-21];田间试验中也发现,向种植莴苣的土壤中施锌,莴苣体内Cd含量并没有减少,而是一种协同作用。不同的研究结果可能因为镉锌含量、土壤的性质、作物的种类等不同而导致的,其中的机理还有待进一步的研究。

3 Cd和Zn在植物运输过程中的交互作用

3.1 Cd的存在对植物运输Zn的影响

植物螯合素(Phytochelatin, PCs)是运输重金属的载体之一。植物螯合素由植物体内一系列低分子量、能够结合金属离子的多肽组成,已有研究表明,PCs-Cd复合物是Cd由细胞质运输到液泡的主要形式,不同金属离子诱导PCs合成的能力有很大差别^[22],一般为 $\text{Cd}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Sb}^{3+} > \text{Ag}^{+} > \text{Hg}^{2+} > \text{As}^{5+} > \text{Cu}^{+} > \text{Sn}^{2+} > \text{Au}^{3+} > \text{Bi}^{3+}$ 。Cd和Zn离子诱导PC合成酶活性的能力与诱导PCs合成的能力稍有不同^[23]: $\text{Cd}^{2+} > \text{Ag}^{+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Cu}^{+} > \text{Hg}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Sn}^{2+} > \text{Au}^{3+} > \text{As}^{5+} > \text{In}^{3+} > \text{Ti}^{3+} > \text{Ge}^{4+} > \text{Bi}^{3+} > \text{Ga}^{3+}$ 。Cd与Zn离子同时存在,Cd首先以PCs-Cd复合物由细胞质运输到液泡,优先占据PCs的活性位点;Cd与酶活性中心或蛋白质中巯基结合,取代金属硫蛋白中的必需元素Zn,借助液泡膜具有PCs-Cd复合物的转运活性以及 $\text{Cd}^{2+}/\text{H}^{+}$ 反向转运活性,抑制 Zn^{2+} 向地上部的长距离运输,并表明这种活性涉及细胞溶质 Cd^{2+} 进入液泡^[24]。

3.2 Zn的存在对植物运输Cd的影响

重金属Cd作为一种重要的胁迫因子也对植物必需微量重金属元素Zn的运输产生一定的影响。由于Cd与Zn有相同的价态和近似相同的离子半径,在植物细胞表面发生Zn竞争Cd位的协同作用,导致Cd的溶解性增强,促使Cd从根部向顶部转移,也会增加小麦籽粒中的Cd含量^[2]。研究发现, $0.1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$

镉处理,锌含量影响不大,经 $10\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉, $50\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 锌处理的菜豆*Phaseolus vulgaris* cv. 幼苗,增加了镉的地上部运输,而锌的地上部运输则降低^[25];Zn的存在增加莴苣根部Cd的运输^[26],但又有报道菠菜施锌可阻止Cd从根系的木质部运输到茎叶部^[18]。进行同位素示踪研究,认为Cd与Zn的吸收和运输过程中可能共用细胞质上的同一个转运子,两者同时存在时,竞争转运子的结合位点,故高质量分数的Zn可能在与Cd竞争结合位点中占优势,阻止了Cd向韧皮部的转运,提高了Zn的运输量^[27]。

4 Cd和Zn在植物生长、生理代谢过程中的交互作用

Zn作为植物所必需的微量营养元素,在植物体内渗透压的调节、代谢平衡的维持、物质的合成中都有着不可或缺的作用,而重金属Cd的胁迫作用,常会导致它们参与代谢过程的紊乱、功能的失调。

4.1 Cd的存在对植物生长、生理代谢中Zn的影响

Zn是植物生长必需的微量元素,受植物生理生化代谢控制,而Cd是酶促反应的强抑制元素之一,主要是通过酶的活性中心或蛋白质中调节点的-SH基结合,取代金属蛋白中Zn元素,导致生物大分子构象改变,从而引起酶的不可逆失活性来表现其毒性的,最终导致植物的生理生化代谢过程紊乱^[28]。从生理学角度研究认为,Cd进入细胞后,与Zn竞争含Zn酶中Zn的结合部位,进而取代Zn,使含Zn酶的活性降低、甚至完全丧失^[29];Cd除了能与酶分子中芳香族的氨基酸结合外,还能通过诱导产生羟基或超氧化物等的活性氧的产生,对蛋白质的氧化性造成损害,高浓度镉、锌胁迫使苗期龙葵植株、东南景天生长受到严重抑制,但低浓度镉锌复合处理的部分植株生物量甚至超过了对照^[11,30]。但是在 $1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn处理条件下,适当地提高镉浓度能缓解高Zn处理对植物生长的抑制^[30]。

4.2 植物生长、生理代谢中Zn的存在对Cd的影响

镉胁迫条件下,水车前体内的SOD、POD、CAT 3种防御酶活性增加,施Zn能使水车前体内的SOD、POD、CAT 3种防御酶活性降低,随锌浓度增大,防御酶的防御能力降低,使得镉的毒害增强^[31];Cd处理浓度为 $1\times 10^{-5}\sim 1\times 10^{-3}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,大麦细胞分裂出现障碍或不正常分裂,表现为细胞周期延长,产生C-有丝分裂,染色体断裂,畸变,粘连和液化等,但加入 $1\times 10^{-2}\sim 1\times 10^{-6}\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Zn时,对细胞分

裂的影响显著性降低,如产生C-有丝分裂减少,染色体断裂减少等。在 $400\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd处理下,提高Zn浓度能缓解Cd毒害,使东南景天根和茎受抑制的症状减轻^[30],其他植物如水稻、玉米、土豆、萝卜、番茄等也存在Zn对Cd的拮抗作用,加Zn可减少其对Cd的吸收积累以及其生理特性的影响。这可能由于加入锌后,镉含量相对减少,锌含量增加,镉的竞争能力减弱,锌的竞争能力增强,更多的锌仍能与Zn酶结合而使Zn酶保持原有的活性,使其免遭Cd毒害;另外锌能使镉复合物的合成加快,解毒能力增强。镉复合物能够借助丰富的巯基(-SH)把进入细胞中的镉络合起来,使之处于“非活性”状态,从而消除镉对植物的毒害作用^[29]。

锌营养可明显提高小麦在镉污染时的光合作用,增强质膜的稳定性及过氧化氢酶活性,明显降低其体内脯氨酸含量,通过调控植物营养,提高植物对Cd污染胁迫的抵御能力^[32];相反地研究结果,植物体内一定浓度Zn的存在,阻断了Cd对金属硫蛋白等Cd结合蛋白的诱导表达的信息传导途径,抑制了镉结合蛋白生物合成的过程,因而使Cd毒害加快加重^[31]。

5 小结

Cd与Zn之间存在交互作用主要表现为:在土壤溶液中,Cd与Zn竞争土壤胶体表面吸附位点,存在拮抗作用;在植物体内的吸收运输及对植物生长、生理代谢的影响过程中既有协同作用,也有拮抗作用。

重金属复合污染已越来越受到国内外学者的关注,应用植物修复复合污染的土壤,涉及到植物学、植物生理学、植物生态学、土壤化学、生物化学等多门科学。目前,用来解释重金属离子相互作用对重金属离子在植物体内的吸收积累,常用竞争位点理论和金属硫蛋白假说,研究Cd与Zn的交互作用主要关注焦点:

(1)植物根部识别Cd、Zn的信号及其应答反应。

(2)Cd、Zn跨细胞质膜和液泡膜运输的方式、形态及其在液泡中储藏形态。

(3)运输Cd、Zn的载体、通道和先后顺序。

(4)Cd、Zn在植物细胞中的结合物质及其结合位点。

参考文献:

[1] Brzoska M M, Moniuszko - Jakoniuk J. Interaction between cadmium and zinc in the organism[J]. *Food*, 2001, 39: 967 - 980.

[2] 华 璐, 白铃玉, 韦东普, 等. 镉锌复合污染对小麦籽粒镉累积的影响和有机肥调控作用[J]. *农业环境保护*, 2002, 21 (5): 393 - 398.

[3] 朱 波, 汪 涛, 王艳强, 等. 锌、镉在紫色土中的竞争吸附[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(Suppl): 73 - 77.

[4] 宋 菲, 郭玉文, 刘孝义, 等. 镉、锌、铅复合污染对菠菜的影响[J]. *农业环境保护*, 1996, 15(1): 9 - 14.

[5] 宋正国, 徐明岗, 刘 平, 等. 钙钾钾共存对赤红壤镉吸附的影响[J]. *生态环境*, 2006, 15 (5): 993 - 996.

[6] 田 园, 王晓蓉, 林仁漳, 等. 土壤中镉铅锌单一和复合老化效应的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(1): 156 - 159.

[7] Van Gestel C A M, Hensbergen P J. Interaction of Cd and Zn toxicity for *Folsomia candida* Wilem (Colembola: Isotomidae) in relation to bio-availability in soil[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1997, 16 (6): 1177 - 1186.

[8] Posthuma L, Baerselman R, Veen RPMV. Single and joint toxic effects sorption of metals in soils[J]. *Environ Toxicol Chem*, 1999, 18(3): 436 - 447.

[9] Whiting S N. Positive responses to Zn and Cd by roots of the Zn and Cd hyperaccumulator *T. caerulescens* [J]. *New Phytologist*, 2000, 145(2): 199 - 210.

[10] 陈世宝, 华 璐, 白铃玉, 等. 小麦籽粒中镉对锌的拮抗作用与有机肥的调控[J]. *生态环境*, 2003, 12 (1): 15 - 18.

[11] 裴 昕, 郭 智, 奥岩松. 镉锌复合污染对龙葵苗期生长和镉锌累积特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2008, 28(7): 1377 - 1383.

[13] 薛 艳, 沈振国, 周东美. 蔬菜对土壤重金属吸收的差异与机理[J]. *土壤*, 2005, 37 (1): 32 - 36.

[14] 李博文, 杨志新, 谢建治. 土壤Cd Zn Pb复合污染对植物吸收重金属的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(5): 908 - 911.

[15] Bipasha C, Sheela S. Effect of cadmium and zinc interaction on metal uptake and regeneration of tolerant plants in linseed [J]. *Ecosystems and Environment*, 1997, 61: 45 - 50.

[16] Oliver D P, Hannam R, Tiller K G, et al. The effects of zinc fertilization on cadmium concentration in wheat grain [J]. *Environ Qual*, 1994, 23: 705 - 711.

[17] 夏增禄, 穆从如, 孟维奇, 等. Cd、Pb、Zn及其相互作用对烟草、小麦的影响[J]. *生态学报*, 1984, 4(3): 231 - 235.

[18] McKenna I M, Chaney R L, Williams F M. The effect of cadmium and zinc interactions on the accumulation and tissue distribution of zinc and cadmium in lettuce and pinach [J]. *Environmental Pollution*, 1993, 79: 113 - 120.

[19] Stewart A R, Malley D F. Effect of metal mixture (Cu, Zn, Pb and Ni) on cadmium partitioning in littoral sediments and its accumulation by the freshwater macrophyte *Eriocaulon septangulare* [J]. *Environ Toxicol Chem*, 1999, 18(3): 436 - 447.

[20] Nan Z R, Li J, Zhang J M, et al. Cadmium and Zinc interactions and their transfer in soil - system under actual field conditions [J]. *The Science and the Total Environment*, 2002, 285: 187 - 195.

[21] Nurcan K, Selim E, Ismail C. Effect of Zinc fertilization on cadmium toxicity in durum and bread wheat grown in zinc - deficient soil [J]. *Environment Pollution*, 2004, 131: 453 - 459.

- [22] Grill E, Winnacker E L, Zenk M H. Phytochelatins, a class of heavy metal binding peptides from plants, are functionally analogous to metallothioneins[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1987, 84: 439 - 443.
- [23] Zenk M H. Heavy metal detoxification in higher plants - a review[J]. *Gene*, 1996, 179: 21 - 30.
- [24] Ortiz D F, Kreppel L, Speiser D M, et al. Heavy - metal tolerance in the fission yeast requires an ATP - binding cassette - type vacuolar membrane transporter[J]. *EMBO*, 1992, 11: 3491 - 349.
- [25] Chaoui A, Ghorbal M H, Elferjani E. Effects of cadmium zinc interactions on hydroponically grown bean (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. *Plant Science Limerick*, 1997, 126(1): 21 - 28.
- [26] Kuo S, Huang B, Bembenek R. The availability to lettuce of zinc and cadmium in a zinc fertilizer [J]. *Soil Science*, 2004, 169(5): 363 - 373.
- [27] Hart J J, Weich R M, Norvell W A, et al. Transport interaction between Ca and Zn in roots of bread wheat and durum wheat seedlings [J]. *Physiologia Plantarum*, 2002, 116(1): 73 - 78.
- [28] Falih M A. Influence of heavy - metals toxicity on the growth of *Phanerochaete chrysosporium* [J]. *Bioresource Technology*, 1997, 60: 87 - 90.
- [29] 李森林, 王焕校, 吴玉树. 凤眼莲中锌对镉的拮抗作用[J]. 环境科学学报, 1990, 10(2): 249 - 254.
- [30] 叶海波, 杨肖娥, 何冰, 等. 东南景天对锌镉复合污染的反应及其对锌镉吸收和积累特性的研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 513 - 518.
- [31] 徐勤松, 施国新, 周红卫, 等. Cd、Zn 复合污染对水车前叶绿素含量和活性氧清除系统的影响[J]. 生态学杂志, 2003, 22(1): 5 - 8.
- [32] 付宝荣, 李法云, 臧树良. 锌营养条件下镉污染对小麦生理特性的影响[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2000, 27(4): 366 - 369.