

黄 凯,张杏锋,李 丹.改良剂修复重金属污染土壤的研究进展[J].江苏农业科学,2014,42(1):292-296.

# 改良剂修复重金属污染土壤的研究进展

黄 凯,张杏锋,李 丹

(桂林理工大学环境科学与工程学院/广西环境工程与保护评价重点实验室,广西桂林 541004)

**摘要:**土壤重金属污染形势十分严峻,使用改良剂治理土壤重金属污染是一种易实施、成本低的方法;但受到一些因素的影响,将改良剂用于重金属污染土壤的修复还存在一些局限性。因地制宜使用改良剂是重金属污染土壤修复的关键。本文综述了国内外常用土壤重金属污染改良剂的研究进展,并对其未来的研究趋势作出展望。

**关键词:**土壤;重金属污染;改良剂;土壤修复

**中图分类号:** X53      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-1302(2014)01-0292-05

土壤是人类生存与发展的基础。随着工农业迅速发展,受到重金属污染的土壤面积不断扩大<sup>[1-2]</sup>,据统计全世界大约年均排放 Hg 1.5 万 t、Cu 340 万 t、Pb 500 万 t、Mn 1 500 万 t、Ni 100 万 t<sup>[3]</sup>,由此土壤受到不同程度的重金属污染。美国的国土污染优先治理项目清单(National Priority List,NPL)显示,在 1200 个土壤调查样点中,有 63%左右的样点受到重金属污染,其中受 Pb、Cr、Cd、Cu 污染的样点分别占 15%、11%、8%、7%<sup>[4]</sup>。在日本,约有 47.2 万 hm<sup>2</sup> 农田受到 Cd 污染,约占重金属污染农田总面积的 82%<sup>[5]</sup>。1998 年我国受到 Cd、As、Cr、Pb 等重金属污染的耕地面积将近 2 000 万 hm<sup>2</sup>,约占总耕地面积的 1/5,其中工业“三废”污染耕地约 1 000 万 hm<sup>2</sup>,污水灌溉的农田面积达 330 万 hm<sup>2</sup> 以上<sup>[6-7]</sup>。由此,我国每年受重金属污染的粮食多达 1 200 万 t,因重金属污染而导致粮食减产达 1 000 万 t 以上,累计经济损失至少 200 亿元<sup>[8]</sup>。

土壤中重金属污染来源比较广泛,如制造加工业、家庭生活、农业活动、工业产生废弃物的堆放等相关人类活动,是土壤重金属污染的主要来源<sup>[9-10]</sup>。在发达国家或发展中国家,人类无节制地使用含铅汽油会造成大气污染,空气中的重金属经过自然沉降和雨淋作用后进入土壤<sup>[11]</sup>。虽然施用化肥、有机肥、有机改良剂能够提供作物生长必需的养分,但也会成为土壤重金属污染的来源之一<sup>[12]</sup>。

土壤重金属污染不仅会严重抑制农作物生长,对经济造成巨大损失,还会导致农作物中重金属含量超标,通过食物链作用,重金属进入人体后常会诱发各种疾病,严重危害人类的健康和生命<sup>[13-15]</sup>。另外,受重金属污染的土壤可经过一系列环境作用和自然作用进入到大气和水体中,导致大气污染、水

污染和其他生态环境问题<sup>[16]</sup>。因此,修复和治理重金属污染土壤是人类面临的一项艰巨任务。本文综述了国内外常用土壤重金属污染改良剂的研究进展,并对其未来的研究趋势作出展望,以期为推动农业可持续发展、保护环境提供依据。

## 1 重金属污染土壤改良剂修复法

目前有许多修复和治理重金属污染土壤的方法,如客土法、土壤淋洗法、化学修复法、植物修复技术、微生物修复技术等<sup>[17]</sup>。近年来,对重金属污染土壤施用土壤改良剂的修复方法得到了国内外学者的广泛关注,其实际应用也比较广泛。施用土壤改良剂的方法实际上是化学修复法中的原位化学修复。原位化学修复主要是基于污染物的土壤化学行为的改良措施,施入 1 种或多种改良剂、抑制剂等化学物质,通过调节土壤理化性质以及对重金属的吸附、沉淀、络合、氧化还原等一系列物理化学作用,改变重金属在土壤中的存在形态,降低其生物有效性和迁移性,从而降低重金属污染物对环境动植物、植物的毒性,达到修复重金属污染土壤的目的<sup>[18-20]</sup>。原位化学修复是在土壤原位上开展,具有成本低廉、操作简单、对土壤本身结构扰动小、改良剂来源广泛等优点,具有潜在的经济价值,能用于大面积重金属污染土壤的治理,但由于受到一些环境因素制约,如何根据当地土壤条件因地制宜地选择合适的改良剂是该技术的关键<sup>[21-22]</sup>。总之,通过施用改良剂改变重金属离子在土壤中的存在形态,降低重金属污染物的生物可利用性,从而实现污染土壤的治理,是目前一条行之有效的途径。

当然,化学改良剂法也存在一定局限性,即施用改良剂后土壤中金属离子仍然存留在环境中,如果环境因素发生改变,重金属离子的生物有效性也可能变化,被暂时钝化的重金属离子又会被重新激活<sup>[23]</sup>。

## 2 常用重金属污染土壤改良剂

不同类型改良剂修复重金属污染土壤的作用机理有所不同,其修复机理主要包括吸附作用、沉淀作用、离子交换、表面沉淀、络合作用、氧化还原作用等<sup>[24]</sup>。目前常用重金属污染土壤改良剂按性质可分为无机改良剂和有机改良剂,其中无机改良剂主要有石灰、钙镁磷肥以及天然、天然改性或人工合成沸石、膨润土等黏土矿物;有机改良剂包括禽畜粪便、污泥

收稿日期:2013-05-18

基金项目:广西自然科学基金创新团队项目(编号:2011GXNSFF018003);广西自然科学基金(编号:2012GXNSFBA239001);广西重点实验室基金(编号:桂科能 1201Z024)。

作者简介:黄 凯(1988—),男,广西桂林人,硕士研究生,主要从事重金属污染土壤的植物修复技术研究。E-mail:huangkai2600813@163.com。

通信作者:张杏锋,博士,讲师,主要从事环境污染治理研究。Tel:(0773)2537332;E-mail:zhangxf@glut.edu.cn。

堆肥、泥炭等有机物料。

## 2.1 无机改良剂

2.1.1 石灰 石灰是最有效的重金属钝化剂之一<sup>[25]</sup>。研究人员很早就发现石灰具有改良酸性土壤的作用,施用石灰后能提高土壤 pH 值和改善土壤结构,从而降低酸性土壤对农作物的危害<sup>[26]</sup>。石灰对土壤中重金属的钝化修复机理主要包括沉淀、吸附、火山灰反应、胶结作用<sup>[27]</sup>。

石灰也具有提高土壤对重金属吸附能力的作用。研究表明,施用石灰后土壤 pH 值升高,土壤表面负电荷增加,从而使土壤对重金属的亲性和增加,有利于  $\text{MOH}^+$  的存在,从而提高土壤对 Cd 等重金属离子的吸附量,而且  $\text{OH}^-$  会与  $\text{CO}_2$  反应生成  $\text{CO}_3^{2-}$ ,而  $\text{CO}_3^{2-}$  可与  $\text{Cd}^{2+}$  生成难溶的  $\text{CdCO}_3$ <sup>[28-29]</sup>。土壤施用石灰后,不仅有 pH 值效应,其中  $\text{Ca}^{2+}$  的作用也不可忽视,因为  $\text{Ca}^{2+}$  价态高,离子半径与  $\text{Cd}^{2+}$  接近,因而  $\text{Ca}^{2+}$  对  $\text{Cd}^{2+}$  在土壤中的化学行为有很大影响<sup>[30]</sup>。所以,施用石灰可降低土壤中 Cu、Zn、As、Hg、Cd、Pb 的生物可利用性<sup>[31-32]</sup>。Castaldi 等发现,施用石灰可以显著提高豌豆和小麦的生物量,降低植株根和地上部 Cd、Pb 含量<sup>[33]</sup>。杜志敏等研究表明,石灰高施用量(石灰重量占污染土壤耕作层的 0.4%)处理显著提高了土壤 pH 值,显著降低了污染土壤交换态 Cu 含量和土壤中 Cu、Cd 含量,从而显著降低了土壤中重金属毒性,而且该土壤种植的黑麦草体内 Cu、Cd 浓度降低,黑麦草生物量得到明显增加<sup>[34]</sup>。有研究表明,施用石灰不仅提高了土壤 pH 值,降低了 0.05 mol/L  $\text{CaCl}_2$  提取的活性 Cd,而且还一定程度上影响了 Cd 在植物体内的分配,使 Cd 在根系的累积量增加,导致植物根系和地上部分含 Cd 量比例显著上升<sup>[35]</sup>。汤民等采用土壤改良剂及其组合,研究了重庆市金果园 2 个园区土壤中 Cd 的原位钝化效果,结果显示,单施生石灰可使枇杷、桃子中 Cd 含量分别下降 30.91%、24.62%<sup>[36]</sup>。

由于石灰对土壤重金属污染的修复主要是依靠提高土壤 pH 值,因此一旦土壤 pH 值、竞争离子、氧化还原环境等发生改变时,暂时被钝化的重金属离子就可能被重新激活成生物可以利用的形态,继续对环境 and 人类健康造成危害<sup>[24]</sup>。

2.1.2 钙镁磷肥 钙镁磷肥是一种土壤改良剂,常被用于治理重金属污染的土壤。钙镁磷肥不仅能为植物提供生长所需要的养分,也可以提高土壤 pH 值,降低重金属在土壤中的活性。有研究证明,钙镁磷肥所含的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  对重金属离子具有拮抗作用,参与竞争植物根系上的吸收位点,从而抑制植物对重金属的吸收<sup>[37]</sup>。麻万诸等认为,钙镁磷肥可降低水溶性重金属含量,有效降低 Cd、Zn 的重金属有效性<sup>[38]</sup>。研究者含有 Cd、Pb、Zn 重金属污染的土壤上施用钙镁磷肥后,显著促进了白菜生长,抑制了重金属对白菜的毒害和向地上部的迁移<sup>[39]</sup>。袁敏等采用盆栽试验研究改良剂对铅、镉尾矿污染土壤中龙须草生长和叶片叶绿素含量的影响,结果表明各钙镁磷肥处理均使龙须草增产超过 200%<sup>[40]</sup>。肖细元等研究显示,钙镁磷肥明显抑制番茄茎、叶对 As、Cd、Pb 的吸收,钙镁磷肥处理的番茄茎、叶生物量比对照增加 82.3%<sup>[41]</sup>。钙镁磷肥与其他改良剂同时施用,对改良重金属污染土壤有十分显著的效果。钙镁磷肥 + 泥炭和钙镁磷肥 + 猪粪等处理能提高土壤 pH 值,对提高作物产量有显著效果,能有效抑制水稻、花生对 Cd、Pb 的吸收<sup>[42]</sup>。Cheng 等通过在 Cd、Pb、Zn 污

染的酸性土壤上进行小区试验,发现施用石灰和钙镁磷肥能消除白菜重金属毒害的生物学性状,显著地降低了白菜体内 Cd、Pb、Cu、Zn 含量<sup>[43]</sup>。

一般来讲,改良重金属污染土壤时施用的磷肥量要远高于土壤正常需磷肥量,才能达到理想的重金属离子钝化效果,但是过量施用磷肥会引发土壤中磷元素的大量淋失和浪费,还可能间接诱发水体富营养化。而且有研究表明,过量施用磷肥会导致土壤中 Cd、As 的生物可利用性增加<sup>[44-45]</sup>。

2.1.3 天然、天然改性和人工合成黏土矿物 沸石是碱金属或碱土金属的水化铝硅酸盐晶体,含有大量的三维晶体结构,具有独特的分子结构和很强的离子交换能力,从而通过离子交换吸附降低土壤中重金属的有效性。有研究表明,沸石能提高土壤 pH 值,增加土壤养分,提高养分利用率,增加农作物产量<sup>[46-47]</sup>。人造沸石性质与天然沸石相似,将人造沸石施到 Cd 污染土壤中,可显著降低多种农作物中的 Cd 浓度。以土壤重量的 1% 比例向土壤中施入人造沸石,盆栽莴苣叶中 Cd 浓度下降达 85% 以上<sup>[48]</sup>。马玮艺等通过添加不同改良剂对 Cd 污染土壤中各形态 Cd 含量及化学固定修复状况进行研究,结果发现其中生物可利用态包括水溶态、交换态、碳酸盐结合态的 Cd,随着沸石、纳米沸石用量的增加,其占 Cd 总量的比例降低,部分 Cd 转化为其他形态,其中以纳米沸石固定 Cd 的效果最好<sup>[49]</sup>。

膨润土等工业矿物具有较大的内表面、外表面和较强的吸附能力,可与土壤中重金属离子发生交换,钝化土壤中重金属,降低重金属的迁移性。在重金属污染土壤中施用膨润土可有效降低油菜中 Pb 浓度,使油菜生物量大大提高<sup>[50]</sup>。吕高明等研究表明,膨润土可以降低土壤中交换态 Pb、交换态 Cd 含量,交换态 Pb、交换态 Cd 分别比对照降低了 0.48%、7.75%<sup>[51]</sup>。

矿物凹凸棒石是一种具有层链状晶体结构的含水富镁硅酸盐晶体。这种晶体的颗粒十分细小(0.01 ~ 1  $\mu\text{m}$ ),并具有针棒状不对称外形,表现出良好的胶体性能,可以起到吸附重金属的作用。研究表明,凹凸棒石能有效提高土壤 pH 值,降低 Cu 的生物可利用性<sup>[52]</sup>。杨秀敏等通过等温吸附试验和盆栽试验,研究了凹凸棒石对 Cd 的吸附及对 Cd 污染土壤玉米生长的影响,结果表明,凹凸棒石对 Cd 有很好的吸附作用,在 Cd 污染土壤中施用适量的凹凸棒石能降低 Cd 对玉米毒害程度,促进玉米生长<sup>[53]</sup>。

海泡石是一种具层链状结构的含水富镁硅酸盐黏土矿物,具有很强的吸附能力,目前已有很多将海泡石用于降低重金属有效性的报道<sup>[54-55]</sup>。林大松等研究显示,在海泡石施用量为 4% 时,水溶性 Cd、Zn 含量分别降低了 57.3%、41.4%,同时提取态 Cd、Zn 含量也分别下降了 42.8%、24.7%<sup>[56]</sup>。梁学峰等研究表明,在同时施用海泡石和磷肥时,莴苣中 Cd、Pb 含量分别比对照下降了 51.9%、55.3%<sup>[57]</sup>。

黏土矿物的施用量、施用方式、施用时间和对养分的释放特性及影响因素等一系列问题还有待进一步研究,而且天然矿物的储量有限使其很难在大面积重金属污染土壤修复中得到推广和应用<sup>[58]</sup>。

## 2.2 有机改良剂

2.2.1 污泥和污泥堆肥 污泥是在污水处理过程中产生的

固体沉淀物质。污泥中含有大量养分如 N、P、K、有机物等, 所以将污泥作为重金属污染土壤的改良剂是污泥资源化的一种可行途径<sup>[59]</sup>。施用污泥堆肥可以提高土壤对 Cu 的吸附能力, 虽然会降低土壤对 Cd 的吸附能力, 但是 Cd 的生物有效性却并没有随之增加<sup>[60]</sup>。造纸污泥与土壤相互作用能形成新的吸附位点, 使土壤对 Cd 的吸附量增加, 降低其生物有效性<sup>[61]</sup>。施用不同含量的污泥会影响重金属污染土壤中豇豆的生长发育、产量、营养价值、重金属吸收<sup>[62]</sup>。欧根能等研究了污泥改良土壤对白菜生长的影响, 结果表明, 污泥能显著提高土壤 pH 值和养分含量, 当施用污泥量为 5% ~ 10% 时能明显促进白菜生长, 施用污泥处理的白菜产量比对照最高增加 10 倍, 污泥与石灰或粉煤灰混合施用可有效降低白菜对 Cu、Zn、Pb、Cr 的吸收量<sup>[63]</sup>。苏德纯等研究表明, 施用经粉煤灰钝化后的污水污泥能降低土壤重金属的有效性<sup>[64]</sup>。Wu 等研究表明, 施用污泥堆肥后, 水稻糙米、秸秆和油菜籽粒、秸秆中 Cd、Pb 含量明显下降, 且土壤中有效态 Cd、Pb 含量也降低<sup>[65]</sup>。

污泥中污染物含量普遍很高, 其中 Cu、Zn、Cd、Hg 等重金属含量大大超过 2 级土壤标准, 因此作为土壤改良剂施用时必须控制好污泥用量, 以免对土壤造成二次污染<sup>[66]</sup>。

**2.2.2 有机肥** 有机肥等有机物料也是常用的重金属污染土壤有机改良剂之一, 其主要来源于牲畜或家禽粪便, 使用禽畜粪便作为改良剂可有效降低其对环境的污染<sup>[12]</sup>。李正强等研究表明, 施用猪粪能提高土壤 pH 值, 明显抑制 Cd、Pb、Cu、Zn 向紫花苜蓿地上部转移, 紫花苜蓿的生物量和叶绿素含量均有提高, 当猪粪施用量为 10 g/kg 时, 其改良土壤的效果最明显<sup>[67]</sup>。有机肥施用在不同类型土壤中对重金属的钝化效果也有所差别。有研究表明, 有机肥能使红壤和潮土中二乙烯三胺五乙酸提取态 Cd、Pb 含量有不同程度地减少, 同时有机肥抑制了烟草对 Cd、Pb 的吸收, 降低了叶片中 Cd、Pb 含量, 随着有机肥施用量增加, 表现出的正面效益越明显; 但是, 有机肥对水稻土中烟草根、叶的 Cd、Pb 含量影响趋势与红壤、潮土不同, 随着有机肥施用量继续增加, 水稻土中烟草根、叶的 Cd、Pb 含量反而增加<sup>[68]</sup>。土壤水分条件对有机物料修复土壤重金属污染也有一定影响。依艳丽等指出, 淹水 (1 cm 水层)、田间持水量 (含水量 27%) 和 65% 相对含水量 (含水量 18%) 条件下施用有机物料均有利于污染土壤中可交换态 Zn 含量降低, 以及铁锰氧化物及有机结合态 Zn 含量增加; 3 种水分条件培养土壤中, 以淹水条件下麦苗体内 Zn 含量最低, 麦苗生长发育最好<sup>[69]</sup>。

使用有机肥作为土壤改良剂会在一定程度上增加土壤中重金属总量, 对土壤重金属有效态亦有一定影响。王开峰等认为, 长期施用有机肥会加大稻田土壤受重金属污染的风险, 在高量有机肥处理下重金属含量增幅最大, 土壤 Zn、Cu、Cd 全量分别比对照增加了 6.1%、18.7%、8.3%, 其有效态含量分别比对照增加了 87.3%、65.8%、41.4%, 其活化率分别比对照增加了 77.5%、32.0%、29.8%<sup>[70]</sup>。付天杭等研究表明, 在酸雨多发地区, 长期大量施用猪粪改善土壤养分的同时, 会增加重金属污染风险<sup>[71]</sup>。所以, 合理选择有机改良剂的种类与用量是其应用于重金属污染土壤改良中的关键问题。

### 3 结语

土壤重金属污染不仅会严重危害人类健康, 限制工农业发展, 还会破坏自然环境的和谐关系。土壤重金属污染治理一直都是人们关注的重点问题之一。向重金属污染土壤中施改良剂的方法具有不破坏土壤结构、操作简单、成本低廉等优势, 所以受到了社会广泛关注, 学者也进行了大量相关研究。总的来讲, 理想的重金属污染土壤改良剂应具有以下特点: 具有较高的稳定性, 不易被分解; 对多数重金属离子有较强的钝化作用; 使用操作简单且价格低廉; 对环境友好, 不造成二次污染<sup>[72]</sup>。

改良剂的实际效果往往会受到一些环境因素的影响, 如土壤水分、土壤 pH 值、土壤类别、重金属类型、植物种类等, 因地制宜是施用改良剂修复重金属污染土壤的关键。施用单一改良剂也存在改良效果不全面或有不同程度的负面影响等问题, 所以将不同改良剂配合施用, 特别是无机改良剂和有机改良剂的配合施用是须要研究和关注的重点。

植物修复是一种具有发展潜力的土壤重金属污染修复技术, 目前对植物修复技术的研究也比较多。但是, 由于超富集植物的生物量往往较低、生长缓慢且周期长, 对气候、土壤等环境条件的要求较高, 以致其修复效率较低, 严重制约其大规模推广应用<sup>[73]</sup>。近期, 一些具有修复潜力的能源植物 (如柳枝稷、荻、芦竹、杂交狼尾草等) 被用于重金属污染土壤的植物修复, 其规模化种植后可以达到重金属污染土壤修复与能源植物生物质原料生产双赢的成果<sup>[74-76]</sup>。有研究表明, 在重金属污染土壤中施用改良剂可以有效提高植物修复效率, 从而更好地修复被重金属污染的土壤<sup>[77-79]</sup>。所以, 开展改良剂与具有修复潜力的能源植物联合修复重金属污染土壤的研究, 将会成为今后重金属污染土壤修复研究的一个发展方向。

### 参考文献:

- [1] Adriano D C, Wenzel W W, Blum W H. Role of phytoremediation in the establishment of a global soil remediation network [C]. Tokyo: Proceedings of International Seminar on Use Plants for Environment Remediation, 1997: 3 - 25.
- [2] 陈怀满. 环境土壤学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 4 - 6.
- [3] Zhou Z Y, Fan Y P, Wang M J. Heavy metal contamination in vegetables and their control in China [J]. Food Reviews International, 2000, 16(2): 239 - 255.
- [4] Huang Y, Hu Y, Liu Y. Combined toxicity of copper and cadmium to six rice genotypes (*Oryza sativa* L.) [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(5): 647 - 653.
- [5] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1993: 301 - 303.
- [6] 陈同斌. 我国土壤环境污染问题亟待重视 [N]. 科学日报, 1998 - 12 - 22.
- [7] 杨科壁. 中国农田土壤重金属污染与其植物修复研究 [J]. 世界农业, 2007(8): 58 - 61.
- [8] 骆永明, 滕 应. 中国土壤污染退化状况及防治对策 [J]. 土壤, 2006, 38(5): 505 - 508.
- [9] Adriano D C. Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals [M]. Heidelberg: Springer -

- Verlag, 2001: 9–23.
- [10] 周 翠, 杨祥田, 何贤彪. 电子垃圾拆解区周边农田土壤重金属污染评价[J]. 浙江农业学报, 2012, 24(5): 886–890.
  - [11] Mielke H W, Powell E T, Gonzales C R, et al. New Orleans soil Lead (Pb) cleanup using Mississippi River alluvium: need, feasibility, and cost [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(8): 2784–2789.
  - [12] Park J H, Lamb D, Paneerselvam P, et al. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 185 (2/3): 549–574.
  - [13] Xia H P. Ecological rehabilitation and phytoremediation with four grasses in oil shale mined land [J]. Chemosphere, 2004, 54 (3): 345–353.
  - [14] 孙晋伟, 黄益宗, 石孟春, 等. 土壤重金属生物毒性研究进展 [J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2861–2869.
  - [15] 张杏锋, 夏汉平, 李志安, 等. 牧草对重金属污染土壤的植物修复综述 [J]. 生态学杂志, 2009, 28(8): 1640–1646.
  - [16] 杜连柱, 张兰英, 王立东, 等. PRB 技术对地下水中重金属离子的处理研究 [J]. 环境污染与防治, 2007, 29(8): 578–582.
  - [17] 崔 斌, 王 凌, 张国印, 等. 土壤重金属污染现状与危害及修复技术研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2012, 40 (1): 373–375, 447.
  - [18] McGowen S L, Basta N T, Brown G O. Use of diammonium phosphate to reduce heavy metal solubility and transport in smelter – contaminated soil [J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30 (2): 493–500.
  - [19] Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C A, et al. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments – A review [J]. Waste Management, 2008, 28(1): 215–225.
  - [20] 郑爱珍, 宋唯一. 土壤重金属污染的治理方法研究 [J]. 安徽农学通报, 2009, 15(5): 84–87.
  - [21] Cao X, Dermatas D, Xu X, et al. Immobilization of lead in shooting range soils by means of cement, quicklime, and phosphate amendments [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2008, 15 (2): 120–127.
  - [22] Garau G, Castaldi P, Santona L, et al. Influence of red mud, zeolite and lime on heavy metal immobilization, culturable heterotrophic microbial populations and enzyme activities in a contaminated soil [J]. Geoderma, 2007, 142(1/2): 47–57.
  - [23] 可 欣, 张 毓, 李延吉, 等. Cr 污染土壤原位固定化修复技术研究进展 [J]. 沈阳航空工业学院学报, 2010, 27(2): 73–76.
  - [24] 王立群, 罗 磊, 马义兵, 等. 重金属污染土壤原位钝化修复研究进展 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1214–1222.
  - [25] Gray C W, Dunham S J, Dennis P G, et al. Field evaluation of in situ remediation of a heavy metal contaminated soil using lime and red – mud [J]. Environmental Pollution, 2006, 142(3): 530–539.
  - [26] 鲁如坤. 施用石灰的原理浅说 [J]. 农业科学通讯, 1956(11): 684–685.
  - [27] Hale B, Evans L, Lambert R. Effects of cement or lime on Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Sb and Zn mobility in field – contaminated and aged soils [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012(199/200): 119–127.
  - [28] Naidu R, Bolan N S, Kookana R S, et al. Ionic – strength and pH effects on the sorption of cadmium and the surface charge of soils [J]. European Journal of Soil Science, 1994, 45(4): 419–429.
  - [29] Védry B, Gousailles M, Affholder M, et al. From sewage water treatment to wastewater reuse. One century of Paris sewage farms history [J]. Water Science and Technology, 2001, 43(10): 101–107.
  - [30] 熊礼明. 石灰对土壤吸附镉行为及有效性的影响 [J]. 环境科学研究, 1994, 7(1): 35–38.
  - [31] 陈 宏, 陈玉成, 杨学春. 石灰对土壤中 Hg、Cd、Pb 的植物可利用性的调控研究 [J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 549–552.
  - [32] Bade R, Oh S, Sik Shin W. Assessment of metal bioavailability in smelter – contaminated soil before and after lime amendment [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, 80(1): 299–307.
  - [33] Castaldi P, Melis P, Silveti M, et al. Influence of pea and wheat growth on Pb, Cd, and Zn mobility and soil biological status in a polluted amended soil [J]. Geoderma, 2009, 151(3/4): 241–248.
  - [34] 杜志敏, 郝建设, 周 静, 等. 四种改良剂对铜和镉复合污染土壤的田间原位修复研究 [J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 508–517.
  - [35] 董宇宁, 陈中敏, 宋丽娜, 等. 施用石灰和有机物质对酸性镉污染土壤的改良效果及其影响因素 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 590–595.
  - [36] 汤 民, 张进忠, 张 丹, 等. 土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd [J]. 环境科学, 2012, 33(10): 3569–3576.
  - [37] 汪 洪, 周 卫, 林 葆. 钙对镉胁迫下玉米生长及生理特性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(1): 78–87.
  - [38] 麻万诸, 王 浩, 章明奎. 矿物改良剂对污染土壤中重金属多目标有效性的影响 [J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2012, 38(5): 629–638.
  - [39] 陈晓婷, 王 果, 梁志超, 等. 钙镁磷肥和硅肥对 Cd、Pb、Zn 污染土壤上小白菜生长和元素吸收的影响 [J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2002, 31(1): 109–112.
  - [40] 袁 敏, 铁柏清, 唐美珍, 等. 改良剂对铅锌尾矿污染土壤上龙须草生长和叶片叶绿素含量的影响 [J]. 农村生态环境, 2005, 21(4): 54–57.
  - [41] 肖细元, 杨 森, 郭朝晖, 等. 改良剂对污染土壤上蔬菜生长及吸收重金属的影响 [J]. 环境科学与技术, 2012, 35(8): 41–46.
  - [42] 李瑞美, 王 果, 方 玲. 钙镁磷肥与有机物料配施对作物镉铅吸收的控制效果 [J]. 土壤与环境, 2002, 11(4): 348–351.
  - [43] Cheng X T, Wang G, Liang Z C. Effect of amendments on growth and element uptake of pakchoi in a cadmium, zinc and lead contaminated soil [J]. Pedosphere, 2002, 12(3): 243–250.
  - [44] Jiao Y, Grant C A, Bailey L D. Effects of phosphorus and zinc fertilizer on cadmium uptake and distribution in flax and durum wheat [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2004, 84(8): 777–785.
  - [45] Peryea F J. Phosphate – induced release of arsenic from soils contaminated with lead arsenate [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(5): 1301–1306.
  - [46] 陈燕霞, 唐晓东, 游 媛, 等. 石灰和沸石对酸化菜园土壤改良效应研究 [J]. 广西农业科学, 2009, 40(6): 700–704.
  - [47] Lai T, Cao A, Zucca A, et al. Use of natural zeolites charged with ammonium or carbon dioxide in phytoremediation of lead – and zinc – contaminated soils [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2012, 87(9): 1342–1348.
  - [48] Gworek B. Inactivation of cadmium in contaminated soils using synthetic zeolites [J]. Environmental Pollution, 1992, 75(3): 269–

- 271.
- [49] 马玮艺, 张彦峰, 姜英男, 等. 不同改良剂对镉污染土壤的化学固定修复的比较研究[J]. 中国科技博览, 2009(32): 136–137.
- [50] 李丽君, 张强, 白光洁, 等. 3 种改良剂对油菜生物量及其吸收重金属的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 154–159.
- [51] 吕高明, 陈炳睿, 徐超, 等. 两种改良剂对矿区重金属污染土壤中 Pb、Cd、Zn 的固定效果[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(7): 140–144.
- [52] Zhang G, Lin Y, Wang M. Remediation of copper polluted red soils with clay materials[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(3): 461–467.
- [53] 杨秀敏, 胡桂娟. 凹凸棒石修复镉污染的土壤[J]. 黑龙江科技学院学报, 2004, 14(2): 80–82.
- [54] 王林, 徐应明, 梁学峰, 等. 新型杂化材料钝化修复镉铅复合污染土壤的效应与机制研究[J]. 环境科学, 2011, 32(2): 581–588.
- [55] Álvarez – Ayuso eÁ, García – Sánchez A. Sepiolite as a feasible soil additive for the immobilization of cadmium and zinc[J]. Science of the Total Environment, 2003, 305(1/2/3): 1–12.
- [56] 林大松, 刘尧, 徐应明, 等. 海泡石对污染土壤镉、锌有效态的影响及其机制[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 346–350.
- [57] 梁学峰, 徐应明, 王林, 等. 天然黏土联合磷肥对农田土壤镉铅污染原位钝化修复效应研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(5): 1011–1018.
- [58] 陈义群, 董元华. 土壤改良剂的研究与应用进展[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 1282–1289.
- [59] 陈健, 王润锁, 杨尽. 污泥在土壤改良中的作用[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(28): 17258–17260.
- [60] Vaca – Paulín R, Esteller – Alberich M V, Lugo – De L J, et al. Effect of sewage sludge or compost on the sorption and distribution of copper and cadmium in soil[J]. Waste Management, 2006, 26(1): 71–81.
- [61] Battaglia A, Calace N, Nardi E, et al. Paper mill sludge – soil mixture; kinetic and thermodynamic tests of cadmium and lead sorption capability[J]. Microchemical Journal, 2003, 75(2): 97–102.
- [62] Singh R P, Agrawal M. Effect of different sewage sludge applications on growth and yield of *Vigna radiata* L. field crop; Metal uptake by plant[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(7): 969–972.
- [63] 欧根能, 宁平, 杨月红, 等. 污泥、粉煤灰和石灰改良土壤对小白菜的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(8): 84–88.
- [64] 苏德纯, 张福锁, Wong J C W. 粉煤灰钝化污泥对土壤理化性质及玉米重金属累积的影响[J]. 中国环境科学, 1997, 17(4): 34–38.
- [65] Wu F L, Lin D Y, Su D C. The effect of planting oilseed rape and compost application on heavy metal forms in soil and Cd and Pb uptake in rice[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(2): 267–274.
- [66] 张学洪, 陈志强, 吕炳南, 等. 污泥农用的重金属安全性试验研究[J]. 中国给水排水, 2000, 16(12): 18–21.
- [67] 李正强, 熊俊芬, 马琼芳, 等. 猪粪和石灰对铅锌尾矿污染土壤中紫花苜蓿生长及重金属吸收特性的影响[J]. 广西农业科学, 2009, 40(9): 1187–1191.
- [68] 付顺, 王珂清, 胡钟胜. 有机肥对烟草响应土壤重金属的影响[J]. 安徽农学通报, 2010, 16(5): 91–93, 135.
- [69] 依艳丽, 张大庚, 刘珊珊, 等. 水分和有机物料对锌污染土壤改良的耦合效应[J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 437–441.
- [70] 王开峰, 彭娜, 王凯荣, 等. 长期施用有机肥对稻田土壤重金属含量及其有效性的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 105–108.
- [71] 付天杭, 倪丹华, 徐芳杰, 等. 模拟酸雨对施用猪粪的菜园土壤重金属有效性的影响[J]. 浙江农业学报, 2009, 21(6): 593–598.
- [72] 胡克伟, 关连珠. 改良剂原位修复重金属污染土壤研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2007(4): 1–5.
- [73] 朱雅兰. 重金属污染土壤植物修复的研究进展与应用[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(6): 1495–1499.
- [74] 侯新村, 范希峰, 武菊英, 等. 草本能源植物修复重金属污染土壤的潜力[J]. 中国草地学报, 2012, 34(1): 59–64, 76.
- [75] 夏汉平, 孔国辉, 敖惠修, 等. 4 种草本植物对油页岩矿渣土中铅镉的吸收特性比较试验研究[J]. 农村生态环境, 2000, 16(4): 28–32.
- [76] Zhang X, Xia H, Li Z, et al. Potential of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(6): 2063–2066.
- [77] Martínez – Fernández D, Walker D J. The effects of soil amendments on the growth of atriplex halimus and bituminaria bituminosa in heavy metal-contaminated soils[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2012, 223(1): 63–72.
- [78] 李磊, 陈宏, 潘家星, 等. 改良剂对红蛋植物修复污染土壤重金属铅和镉效果的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 822–825.
- [79] 孟桂元, 周静, 邬腊梅, 等. 改良剂对苕麻修复镉、铅污染土壤的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(2): 273–277.
- shrimp *Fenneropenaeus indicus* [J]. Aquaculture, 2009, 287: 248–252.
- [12] Brown M R, Barrett S M, Volkman J K, et al. Biochemical composition of new yeasts and bacteria evaluated as food for bivalve aquaculture[J]. Aquaculture, 1996, 143: 341–360.
- [13] 蔡诗庆, 孙世春. 三株海洋酵母投喂海湾扇贝幼贝效果的研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2005, 35(6): 955–960.
- [14] Rhishipal R, Philip R. Selection of Marine yeasts for the generation of single – cell protein from prawn – shell waste[J]. Bioresource Technology, 1998, 65: 255–256.

(上接第 270 页)

- [8] 刘焕亮. 关于中国水产养殖动物对营养物质需要量的研究[J]. 大连水产学院学报, 2002, 17(3): 187–195.
- [9] 徐琴, 李健, 刘淇, 等. 噬菌弧菌和粘红酵母对中国对虾生长及非特异免疫因子的影响[J]. 海洋水产研究, 2007, 28(5): 42–47.
- [10] Brattgjerd S, Evensen O, Salmon L A, et al. As evaluated by *in vitro* hydrogen peroxide production and phagocytic capacity[J]. Immunology, 1994, 83: 288–294.
- [11] Sajeevan T P, Philip R, Singh I S. Dose/frequency: A critical factor in the administration of glucan as immunostimulant to Indian white