

杨晓磊,陆萍,张蓉,等.蔬菜大棚土壤重金属有效态几种修复方法[J].江苏农业科学,2018,46(2):239-242.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.02.060

# 蔬菜大棚土壤重金属有效态几种修复方法

杨晓磊<sup>1</sup>,陆萍<sup>2</sup>,张蓉<sup>2</sup>,朱恩<sup>1</sup>,饶燕敏<sup>2</sup>

(1.上海市农业技术推广服务中心,上海 201103; 2.上海市嘉定区农业技术推广服务中心,上海 201822)

**摘要:**目前土壤重金属污染已成为广受关注的环境问题,探讨对田间土壤重金属污染有效的修复方法成为热点工作。采用深翻闷棚措施并选用海泡石、木霉菌、竹炭、石灰+钙镁磷肥、有机肥 5 类不同钝化剂两大类方法对土壤进行处理,降低土壤中重金属镉(Cd)、铜(Cu)、锌(Zn)的有效态含量,从而达到修复重金属污染土壤的效果。结果表明,深翻闷棚对土壤中 Zn 钝化效果为极显著,钝化剂处理对土壤中 Cd 钝化效果不明显。种植 1 茬白菜后对土壤重金属有效态分析表明,深耕闷棚对土壤中 3 种重金属的钝化效果极显著。添加钝化剂没有降低土壤中 Cd 的有效态含量。木霉菌和海泡石处理对土壤中 Cu 有效态含量降低效果显著,木霉菌、竹炭、海泡石处理对土壤中 Zn 有效态含量降低效果显著。通过深耕闷棚的方法能对 Cd、Cu、Zn 污染土壤进行有效修复,木霉菌和海泡石是较好的土壤重金属修复钝化剂。

**关键词:**重金属;有效态;修复;大棚土壤

**中图分类号:** X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)02-0239-04

随着工业和城市化发展,重金属污染日趋严重,土壤中重金属进入农田后被植物吸收,通过食物链进入人体,会对人体健康产生危害<sup>[1]</sup>,因此对污染土壤防治修复已成为研究重点和热点。土壤中重金属对生物的毒害和环境的影响程度除了与土壤中重金属含量有关以外,还与重金属元素在土壤中的存在形态有关。土壤重金属生物有效性主要取决于土壤重金属有效态的含量<sup>[2]</sup>。目前,国内外治理土壤重金属污染的途径主要是将重金属从土壤中去除,以及改变重金属在土壤中的

的形态和价态,降低其在环境中的迁移及生物有效性<sup>[3]</sup>,前者主要适用于重金属污染严重的土壤,后者主要适用于轻、中度重金属污染的土壤。治理和修复方法有化学修复法、固化修复技术、生物修复技术、农业生态修复技术、联合修复技术等<sup>[4]</sup>。深耕、深翻措施是指利用旋耕机等机械,对污染耕地进行深翻和混匀,降低土壤重金属浓度的措施,它适用于土壤重金属背景值较低或土壤底层重金属浓度较低的污染耕地<sup>[5]</sup>。这类方法涉及工程操作并结合闷棚和秸秆还田等技术,因此多见于联合修复技术,目前研究较少。化学钝化是国内外普遍使用的土壤重金属污染治理方法之一<sup>[6]</sup>。通过向污染土壤中添加钝化剂,经过吸附、沉淀、络合等一系列反应使重金属向稳定态转化,以降低其迁移能力及植物有效性。常用化学钝化剂主要有无机类、有机类、微生物类及新型复合材料。无机类钝化剂包括黏土矿物(海泡石等)、工业副产品(石灰)、磷酸盐类、金属氧化物(钙镁磷肥等)及其他一些工

收稿日期:2016-08-19

基金项目:上海市农业委员会科技兴农项目[编号:沪农科攻字(2014)第5-2号]。

作者简介:杨晓磊(1982—),女,上海人,硕士,高级农艺师,主要从事农业环境保护和土壤肥料研究。E-mail: shth12345678@126.com。

dairy farms[J]. Netherlands Journal of Agricultural Science,1994,42(1):11-19.

[5] Burton C, Martinez T. Contrasting the management of livestock manures in Europe with the practice in Asia; what lessons can be learnt? [J]. Outlook on Agriculture,2008,37(3):195-201.

[6] 仇焕广,严健标,蔡亚庆,等.我国专业畜禽养殖的污染排放与治理对策分析——基于五省调查的实证研究[J].农业技术经济,2012(5):29-35.

[7] 吴昊,管永祥,梁永红,等.江苏省太湖流域畜禽养殖污染治理现状及政策建议[J].江苏农业科学,2014,42(12):401-403.

[8] 李飞,董锁成.西部地区畜禽养殖污染负荷与资源化路径研究[J].资源科学,2011,33(11):2204-2211.

[9] 杨修,李文华.农业生态系统种养结合优化结构模式的研究[J].自然资源学报,1998,13(4):57-64.

[10] 应珊珊.农村基础设施的多中心治理模式[J].浙江经济,2008(24):58-59.

[11] 姜海,雷昊,白璐,等.不同类型地区畜禽养殖废弃物资源化利用管理模式选择——以江苏省太湖地区为例[J].资源科学,2015,37(12):2430-2440.

[12] 埃莉诺·奥斯特罗姆.公共事物的治理之道[M].上海:三联书店,2000.

[13] 诸培新,朱洪蕊.基于江苏省村庄调研实证的农村生活垃圾处理服务现状与对策研究[J].江苏农业科学,2010(6):497-500.

[14] 迈克尔·麦金尼斯.多中心体制与地方公共经济[M].毛寿龙,译.上海:上海三联书店,2000.

[15] Inaba R, Furuichi T, Komatsu T, et al. Centralization of dairy farming facilities for improved economics and environmental quality [J]. Waste Management,2009,29(1):214-223.

[16] 郑卫东.农村社区政府购买公共服务研究初探——以上海松江为中心[J].中国农业大学学报(社会科学版),2011(4):130-141.

农业废弃物(泥炭等);有机类钝化剂主要包括动物粪便、秸秆、生物炭等;微生物钝化剂主要包括菌根等<sup>[7]</sup>。有研究表明,有机肥、熟石灰及磷酸盐等在土壤重金属修复中有显著效果<sup>[8-10]</sup>。由于土壤固有基质的复杂性和多种重金属共存形成复合污染,不同类型土壤中的重金属选择不同钝化剂进行修复效果不同。很多研究只是针对某一种重金属进行修复,且大多只是在盆栽试验进行,对农田野外修复效果的报道较少。本试验主要在田间野外条件下,研究深耕闷棚、5 种钝化剂方法进行多组试验,对土壤中 Cd、Cu、Zn 复合污染进行修复效果研究,从而找到最适合降低蔬菜大棚土壤中重金属有效态含量的方法,为田间 Cd、Cu、Zn 复合污染土壤修复提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验基地

试验地点位于上海市嘉定区外冈镇蔬菜种植合作社内,土壤类型为菜园土。在同一地块选择 3 个试验大棚 A、B、C 进行试验,其中 A 棚作为高温闷棚深耕试验,B、C 棚作为不同钝化剂试验。对开展试验的大棚基础土样采样分析(表 1)。

1.2 试验材料

试验共设置 5 个处理:(1)对照组(CK)。(2)添加海泡石,海泡石与供试土壤按质量比 6% 比例添加到试验田块中<sup>[11]</sup>。(3)添加木霉菌,颗粒状木霉菌(选购自上海大井生

表 1 基础土壤理化性状

指标	含量
有机质(g/kg)	41.390
全氮(%)	0.295
速效钾(mg/kg)	181.350
有效磷(mg/kg)	145.900
Cd(mg/kg)	0.090
Zn(mg/kg)	5.660
Cu(mg/kg)	5.240
pH 值	7.500

物工程有限公司的哈茨木霉菌)75 kg/hm<sup>2</sup> 先与复合肥一起混合后,翻地,浸透水,并使其土壤保持 5 d 湿润状态,起垄后移栽蔬菜苗,再用粉剂木霉菌 15 kg/hm<sup>2</sup> 兑水灌根;直播的作物进行撒施即可。(4)添加竹炭,购自上海时科生物有限公司,根据以往的试验经验,用 15 t/hm<sup>2</sup> 为宜。(5)添加有机肥料。在供试土壤中加入熟石灰(施加量为 0.52 kg/m<sup>2</sup>) + 钙镁磷肥(施加量为 1.3 kg/m<sup>2</sup>)<sup>[12]</sup>。使用畜禽粪便进行发酵加工的商品有机肥按照 15 t/hm<sup>2</sup> 的投入量施入供试土壤中。每个处理进行 3 次重复,每个处理约 10 m<sup>2</sup>。将钝化剂按以下比例添加到试验田块中,添加后翻地混匀,并浇水,含水量约为 40%。待 20 d 后取土样检测重金属有效态。随后移栽白菜苗,待白菜成熟采摘时再取土样检测重金属有效态。对所购试验材料重金属检测结果见表 2。

表 2 试验材料重金属含量

材料名称		重金属含量(mg/kg)		
		Cd	Zn	Cu
竹炭	毛竹高温碳化产物,碳>75%	0.03	38.78	22.95
有机肥	总养分(N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +K <sub>2</sub> O)=5.2%;有机质=56.0%	0.10	98.14	44.26
钙镁磷肥	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> 、CaSiO <sub>3</sub> 、MgSiO <sub>3</sub> ,有效P 12%~18%	0.13	94.22	48.05
海泡石	Si <sub>12</sub> O <sub>30</sub> Mg <sub>8</sub> (OH) <sub>4</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>4</sub> ·8H <sub>2</sub> O,CaCO <sub>3</sub> >65%、CaMgSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> 10%~12%	0.06	3.98	2.89
木霉菌	Trichoderma 活菌数≥2 亿 CFU/g	0.01	10.36	12.47

1.3 测定指标的方法与标准

土壤有效态重金属含量采用确定土壤有效态重金属检测方法<sup>[13-14]</sup>:(1)重金属 Cd 有效态含量。称取土样 5.00 g,用 DTPA 提取剂(0.005 mol/L DTPA,0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub>,0.1 mol/L TEA,pH 值 7.3)25.00 mL 提取,常温放入以 180 r/min 水平式往返振荡器上,2 h 后过滤,滤液使用火焰原子吸收法或石墨炉原子吸收法,测定重金属 Cd 有效态含量。(2)重金属 Cu、Zn 有效态含量。称取土样 10.00 g,用 DTPA 提取剂 20.00 mL 提取,常温放入以 180 r/min 水平式往返振荡器上,2 h 后过滤,滤液用原子吸收分光光度法测定重金属 Cu、Zn 有效态含量。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 统计软件进行分析。

1.5 试验方法

深耕和闷棚为工程联合钝化手段,设计 60 cm 翻耕深度,将土壤充分混匀,混入玉米秸秆 75 t/hm<sup>2</sup>,然后高温闷棚 20 d,对大棚 0~20 cm 的耕层按斜线取土样。

在供试土壤中分别加入有机肥(OF)、竹炭(ZT)、海泡石

(HP)、石灰+钙镁磷肥(SHGM)、木霉菌(MMJ)等 5 种钝化剂,并设置 1 个 CK 空白,3 次重复,每个处理约 10 m<sup>2</sup>。使用钝化剂后按照斜线各处理取土样;种植 1 茬白菜,在白菜采收期按照斜线各处理取土样。

2 结果与分析

2.1 不同修复方法对重金属有效态钝化效果分析  
钝化剂效果=(x<sub>1</sub>-x<sub>2</sub>)/x<sub>1</sub>×100%,其中 x<sub>1</sub> 表示未加入钝化剂处理土壤中重金属的含量,x<sub>2</sub> 表示添加各种钝化剂处理后重金属的有效态含量。由图 1 可知,经过不同修复方法进行处理土壤并种植 1 茬白菜,且不同方法对土壤重金属钝化效果以及不同类型重金属的钝化效果有所不同。土壤中 3 种重金属钝化效果最好的是深耕闷棚方法,且土壤重金属 Cd 和 Zn 钝化效果均能达到 20%。通过使用各类钝化剂的 5 组处理中,竹炭处理对 3 种土壤重金属皆有钝化效果;海泡石和木霉菌对土壤重金属 Cu 和 Zn 有钝化效果,对 Cd 没有钝化效果;木霉菌对土壤重金属 Zn 的钝化效果显著,达 35.69%。施用有机肥不能对任何土壤中重金属起到钝化作用,可能与有机肥中重金属含量较高有关。

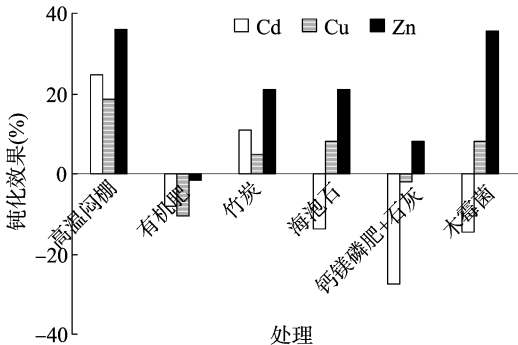


图1 不同修复方法对土壤重金属钝化效果

2.2 不同修复方法对重金属 Cd、Cu、Zn 有效态含量的影响  
深翻闷棚对重金属 Zn 钝化效果为极显著,Zn 有效态含量降低了 22.7%。钝化剂均无降低土壤中有效态镉含量的

明显效果。添加钙镁磷肥 + 石灰的方法土壤中 Cd 有效态含量增加了 68.83% ,Cu 有效态含量增加了 5.15% ,Zn 有效态含量增加了 19.07%。有机肥添加使得土壤中 Cd 有效态含量增加了 11.58% ,Cu 的有效态含量增加了 16.27% ,Zn 的有效态含量增加 27.34%。竹炭和海泡石对土壤中 Cd、Cu、Zn 有效态含量有所升高。木霉菌使用后土壤重金属 Cd 有效态含量增加了 7.44% ,钝化 Zn 效果不显著,但是土壤 Cu 有效态含量降低了 18.51% (表 3)。

2.3 种植作物对土壤重金属有效态影响分析

种植白菜前后土壤中重金属有效态有一定变化。进行农事操作及种植作物对土壤中有有效态变化会产生影响。由表 4 可知,供试土壤种植 1 茬白菜后,CK 处理土壤中镉有效态含量有所增加。高温闷棚对土壤中 3 种重金属的钝化效果极显著,土壤中 Cd 有效态含量降低了 24.65% ,Cu 有效态含量降低了 18.57% ,Zn 有效态含量降低了 35.90%。

表 3 不同修复方法对土壤重金属有效态含量的影响

处理	Cd 含量(mg/kg)		Cu 含量(mg/kg)		Zn 含量(mg/kg)	
	平均值	标准差	平均值	Cu 标准差	平均值	Zn 标准差
CK	0.085b	0.009 5	6.179cd	0.105 5	6.565de	0.393 1
高温闷棚	0.094b	0.001 5	6.295bcd	0.060 3	5.075f	0.003 8
有机肥	0.096b	0.004 6	7.380a	0.048 6	9.035a	0.025 6
竹炭	0.095b	0.490 8	6.669b	0.073 0	8.116ab	0.338 8
海泡石	0.103b	0.001 2	5.981d	0.143 8	6.935cd	0.212 6
钙镁磷肥 + 石灰	0.143a	0.021 5	6.497bc	0.213 4	7.817bc	0.365 1
木霉菌	0.091b	0.018 5	5.882d	0.058 0	5.350f	0.665 9

注:同列不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

表 4 种植作物后各处理对土壤中重金属有效态含量的影响

处理	Cd 含量(mg/kg)		Cu 含量(mg/kg)		Zn 含量(mg/kg)	
	平均值	标准差	平均值	Cu 标准差	平均值	Zn 标准差
CK	0.093cd	0.001 5	6.177b	0.075 4	9.788a	0.651 3
高温闷棚	0.070e	0.002 5	5.030e	0.023 9	6.274d	0.029 9
有机肥	0.101bc	0.003 5	6.819a	0.246 0	9.957a	0.628 7
竹炭	0.083d	0.007 6	5.869bc	0.279 9	7.718c	0.934 7
海泡石	0.106b	0.004 6	5.676cd	0.073 9	7.751bc	0.673 5
钙镁磷肥 + 石灰	0.119a	0.005 6	6.300b	0.140 5	9.007ab	0.352 4
木霉菌	0.107b	0.005 0	5.683cd	0.028 9	6.296d	0.235 5

注:同列不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

添加钝化剂没有降低土壤中 Cd 的有效态含量。使用钙镁磷肥 + 石灰的处理重金属 Cd 有效态含量增加了 27.55% ;有机肥、海泡石、木霉菌处理对土壤中 Cd 有效态含量分别增加了 8.25%、13.61%、14.68%。有机肥施用后土壤中 Cu 有效态含量增加了 10.39% ;木霉菌、竹炭、海泡石处理后土壤中 Cu 有效态含量分别降低了 7.99%、4.99%、8.11%。有机肥使用后土壤中 Zn 有效态含量增加了 1.73% ;木霉菌、竹炭、海泡石、钙镁磷肥 + 石灰处理后土壤中 Zn 有效态含量分别降低了 35.69%、21.15%、20.81%、7.98%。

3 讨论

深翻闷棚是通过旋耕机等机械对污染耕地进行深翻和混匀,可使聚积在表层的重金属分散到深层土壤,达到稀释的目的,从而能降低土壤重金属浓度,这是一种较为直观且有效的

农艺修复措施,由于深翻闷棚还能有效杀死虫卵等病原微生物,所以适合在土壤重金属背景值较低或土壤底层重金属浓度较低的污染耕地上广泛使用。本研究发现通过深翻闷棚处理后,同时显著钝化了 Cd、Cu、Zn 等 3 种重金属,且有效态含量降幅达 20%,这对多金属复合污染土壤的钝化修复有一定的参考价值。生物炭具有较大的比表面积和较高的表面能,能有机结合重金属离子,因此能较好地去除土壤中重金属离子<sup>[15]</sup>。通过竹炭处理与对照比较发现,对土壤重金属 Cu 有效态含量均有减少,对 Zn 有效态含量减少显著。竹炭对土壤的孔隙度和容重有所影响,能改善一定的土壤板结情况。海泡石属于黏土矿物,通过离子交换吸附或配合作用将水体和土壤中重金属吸附在其表面<sup>[16]</sup>。海泡石处理对土壤重金属 Cu 和 Zn 有钝化效果,对 Cd 的钝化效果不明显。海泡石对土壤中重金属发生了阳离子吸附作用,同时对土壤性质没有改

变,也是适合蔬菜大棚土壤的钝化剂之一。石灰是碱性材料,通过提高土壤 pH 值促使土壤中重金属元素形成氢氧化物或碳酸盐结合态盐类沉淀,降低土壤中重金属迁移性和生物有害性<sup>[17]</sup>。研究还发现石灰和钙镁磷肥复合处理土壤时,土壤 pH 值有所升高,但是对钝化土壤重金属没有作用,反而增加了土壤中 Cu 的有效态含量。可能是石灰添加量也有所影响,李翔等认为,石灰用量过大会导致土壤中重金属活化,可能是石灰施用过量导致土壤板结、碱化所导致<sup>[18]</sup>。生物有机肥中富含有机质,可以改善土壤的理化性状,增加土壤的肥力,且有机质对重金属离子有很强的吸附和螯合作用<sup>[19]</sup>,可以提高土壤对重金属的缓冲性,减少植物对其的吸收<sup>[20]</sup>。但是本试验中有机肥对土壤重金属没有钝化效果,反而土壤中重金属 Zn 有效态含量有所升高,这可能与使用的有机肥本身含有的 Zn 含量较高有关,须要进一步选择含重金属低的有机肥再作研究。

#### 4 结论

本研究通过农艺措施和物理方法的联合修复技术,即深翻闷棚,土壤中重金属 Cd、Cu、Zn 的有效态含量降低显著,且基本都能达到 20% 的降幅。

##### 4.1 钝化剂对土壤重金属钝化效果

由于是大田野外试验,且对 3 种重金属污染进行钝化研究,情况较复杂,通过使用 5 类不同钝化剂的处理,不同重金属有效态含量变化不尽相同。降低土壤重金属 Cd 有效态含量效果依次为木霉菌 > 竹炭 > 有机肥 > 海泡石 > 钙镁磷肥 + 石灰。使用钝化剂降低重金属 Cd 的有效态含量均有显著效果。对降低土壤中重金属 Cu 有效态效果依次为木霉菌 > 海泡石 > 钙镁磷肥 + 石灰 > 竹炭 > 有机肥。木霉菌对 Cu 有效态含量的降低有显著效果,此外,竹炭和海泡石都有钝化效果,但不显著。添加有机肥和钙镁磷肥 + 石灰的方法反而增加了 Cu 的有效态含量。降低土壤中重金属 Zn 有效态效果依次为木霉菌 > 海泡石 > 钙镁磷肥 + 石灰 > 竹炭 > 有机肥。使用钝化剂对降低土壤中 Zn 有效态含量无显著效果。使用竹炭、海泡石、钙镁磷肥 + 石灰以及施用有机肥不但没有降低重金属有效态含量,反而略有升高。

##### 4.2 种植作物后对钝化剂钝化效果的影响

在该试验地块种植 1 茬白菜后,降低土壤中重金属 Cd 有效态效果依次为竹炭 > 有机肥 > 海泡石 > 木霉菌 > 钙镁磷肥 + 石灰;降低土壤中重金属 Cu 有效态效果依次为海泡石 > 木霉菌 > 竹炭 > 钙镁磷肥 + 石灰 > 有机肥;降低土壤中重金属 Zn 有效态效果依次为木霉菌 > 竹炭 > 海泡石 > 钙镁磷肥 + 石灰 > 有机肥。种植 1 茬白菜后,添加钝化剂没有降低土壤中 Cd 的有效态含量。施用有机肥使得重金属有效态含量有所升高。木霉菌和海泡石和竹炭对土壤 Cu 和 Zn 有效态含量降低有显著效果。因此,在大田野外环境下对蔬菜大棚土壤重金属修复较有效的措施是深翻闷棚,钝化剂可以根据实际情况选择木霉菌、海泡石和竹炭进行重金属修复。选择钝化剂时,须要特别注意钝化剂本身的重金属含量要低。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [3] 江永红,宇振荣,马永良. 秸秆还田对农田生态系统及作物生长的影响[J]. 土壤通报,2001,32(5):209-213.
- [4] 黄益宗,郝晓伟,雷 鸣,等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报,2013,32(3):409-417.
- [5] 马铁铮,马友华,徐露露,等. 农田土壤重金属污染的农业生态修复技术[J]. 农业资源与环境学报,2013,30(5):39-43.
- [6] Guo G, Zhou Q, Ma L Q. Availability and assessment of fixing additives for the in situ remediation of heavy metal contaminated soil: a review[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 116(3):513-528.
- [7] 殷 飞,王海娟,李燕燕,等. 不同钝化剂对重金属复合污染土壤的修复效应研究[J]. 农业环境科学学报,2015,34(3):438-448.
- [8] 李瑞美,王 果,方 玲. 石灰与有机物料配施对作物镉吸收的控制效果研究[J]. 农业环境科学学报[J],2003,22(3):293-296.
- [9] 胡星明,袁新松,王丽平,等. 磷肥和稻草对土壤重金属形态、微生物活性和植物有效性的影响[J]. 环境科学研究,2012,25(1):77-82.
- [10] 王 林,徐应明,孙国红,等. 海泡石和磷酸盐对镉铅污染稻田土壤的钝化修复效应与机理研究[J]. 生态环境学报,2012,21(2):314-320.
- [11] 王 林,徐应明,孙 扬,等. 海泡石及其复配材料钝化修复镉污染土壤[J]. 环境工程学报,2010,4(9):2093-2098.
- [12] 罗远恒、顾雪元,吴永贵,等. 钝化剂对农田土壤镉污染的原位钝化修复效应研究[J]. 农业环境科学学报,2014,33(5):890-897.
- [13] 土壤质量 有效态铅和镉的测定 原子吸收法:GBT 23739—2009[S].
- [14] 土壤有效态锌、锰、铁、铜含量的测定 二乙三胺五乙酸(DTPA)浸提法:NY/T 890—2004[S].
- [15] 林雪原,荆延德,巩 晨,等. 生物炭吸附重金属的研究进展[J]. 环境污染与防治,2014,36(5):83-87.
- [16] 林大松,徐应明,孙国红,等. 海泡石黏土矿物对 Cu<sup>2+</sup> 的吸附动力学研究[J]. 环境化学,2009,28(1):58-61.
- [17] Lombi E, Zhao F J, Zhang G, et al. In situ fixation of metals in soils using bauxite residue: chemical assessment [J]. Environmental Pollution, 2002, 118(3):435-443.
- [18] 李 翔,刘永兵,宋 云,等. 石灰干化污泥对土壤重金属稳定化处理的效果[J]. 环境工程学报,2014(8):3461-3470.
- [19] Naidu R, Harter R D. Effect of different organic ligands on cadmium sorption by and extractability from soils[J]. Soil Science Society of America, 1998, 62(3):644-650.
- [20] 孙越鸿,吴永胜,干大木,等. 施用蚯蚓粪对草莓果实中重金属残留的影响[J]. 现代农业科技,2011(11):23,29.