

刘鑫尧. 植物对城市污泥改良土壤中重金属的富集[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(12): 425–428.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.12.128

植物对城市污泥改良土壤中重金属的富集

刘鑫尧

(福建省 197 地质大队地质环境研究院, 福建泉州 362000)

摘要:通过室内盆栽试验、现场小区试验, 研究利用城市污泥改良土壤后, 油麦菜、黄婵 2 种植物的生长状况及它们对土壤中重金属元素的富集作用。结果表明: 利用污泥改良土壤后, 试验组植株的各项生长指标均优于对照, 盆栽试验中土壤与污泥混合比为 5 : 2.5 : 3 (干质量比) 时试验组植株长势较好, 小区试验中土壤与污泥混合比为 8 : 2、7 : 3 (干质量比) 时试验组植物长势较佳; 2 组试验中重金属元素在植物中均有不同程度累积, 黄婵中重金属元素累积量高于油麦菜, 且大部分重金属含量已经超过食品中重金属含量标准值。因此在利用污泥改良红壤时, 要控制污泥施用量, 避免对土壤环境及种植作物造成重金属污染。

关键词:城市污泥; 土壤; 植物富集; 重金属

中图分类号: S156.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)12-0425-03

红壤是我国重要的土壤资源, 主要分布于长江以南地区。红壤耕地以占全国耕地面积 36% 的比例生产出占全国一半以上的粮食。由于近些年对红壤资源的不合理利用, 导致我国红壤资源出现一系列严重的生态问题, 如水土流失、养分贫瘠化、土壤酸化以及环境污染等。因此, 如何合理开发、利用、治理红壤资源已成为当前亟待解决的问题^[1-4]。城市污泥是污水处理厂在净化污水过程中产生的废弃物, 随着我国污水处理技术的提高, 污泥产生量越来越多。目前对城市污泥的处理方式主要有投海、填埋、焚烧、农用等, 但投海、填埋、焚烧方式均存在较大的限制性, 且城市污泥中含有丰富的有机质及氮、磷、钾(N、P、K)等营养成分, 可以促进农作物生长, 因此农用成为城市污泥利用最广的处理方式^[5-10]。用城市污泥改良土壤后, 显著提高了作物的生物量、产量, 但城市污泥中同时含有较多的铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、砷(As)、汞(Hg)、镉(Cd)、铬(Cr)、镍(Ni)等重金属元素, 施入土壤中会造成混合土壤重金属含量增加, 进而导致农作物中重金属元素累积, 这种累积会通过食物链进入人体, 危害人体健康^[11-13]。本研究探讨了不同土壤与污泥配比混合后植株生长状况以及重金属在植株中的富集, 以期寻求利用污泥改良土壤的最佳混合比例提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物为黄婵(*Allemanda nerifolia* Hook.), 取自泉州花圃园的同一批黄婵花苗; 油麦菜(*Lactuca sativa* var. *longifolia* f. *Lam*), 种子购自当地市场。

供试土壤是福建省永春县的山地红壤, 污泥来自永春县某污水处理厂。供试土壤与污泥理化性质见表 1。对照为

GB 4284—1984《农用污泥中污染物控制标准》, 可见供试污泥的有机质含量及 pH 值均在污泥农用标准值范围内, 而总氮、碱解氮、总磷、有效磷、总钾含量高于 GB 4284—1984《农用污泥中污染物控制标准》。除 As 外, 污泥各重金属含量均远高于土壤中重金属含量。小区试验前对各项生物指标及其重金属含量进行测试, 测试结果: 生物指标, 株高 33.76 cm、叶数 18.71 张、叶面积 71.29 cm²、根生物量 1.53 g、茎叶生物量 6.26 g; 重金属含量(mg/kg), Cu 19.41、Pb 3.55、Zn 8.26、As 0.25、Hg 0.03、Cd 0.313、Cr 63.18、Ni 50.9。

1.2 试验设计

1.2.1 小区试验 共设计 5 组小区试验处理: 对照(SCK), 不混掺污泥; 处理 1(ST₁), 土壤与污泥混掺比例为 9 : 1 (干质量比, 下同); 处理 2(ST₂), 土壤与污泥混掺比例为 8 : 2; 处理 3(ST₃), 土壤与污泥混掺比例为 7 : 3; 处理 4(ST₄), 土壤与污泥混掺比例为 6 : 4。每个处理 2 次重复。每个小区面积为 1 m × 2 m, 试验小区周围用隔离砖或隔离板隔离, 避免相互影响。每块试验田一端布置展示板, 另一端留有观测坑。观测坑中靠近小区剖面一侧用透明有机玻璃围挡, 便于观测土壤剖面。每个小区重构土壤剖面高 50 cm, 其中底部充填 20cm 厚的矿渣或废石块, 上部充填土壤或土壤与污泥的混掺物。上部土壤按原状土壤的初始容重和含水量, 分层均匀充填压实。小区高出原地平面 20 cm。在试验小区栽种黄婵, 定期养护和田间管理, 并观测植物生长情况。2015 年 6 月最后 1 次监测植物生长情况, 采集植物样品, 分析其生长状况及重金属含量。

1.2.2 盆栽试验 试验用塑料盆高 30 cm, 上底直径 20 cm, 下底直径 15 cm。底部装填 10 cm 矿渣, 上部覆 20 cm 土壤或土壤与污泥混掺物料。装填时, 按照现场监测的土壤含水量、容重, 将物料分层充填压实(5 cm 为 1 层)。共设 5 个处理: 对照(PCK), 不混掺污泥; 盆栽处理 1(PT₁), 土壤与污泥混掺比例为 5 : 1; 盆栽处理 2(PT₂), 土壤与污泥混掺比例为 5 : 2; 盆栽处理 3(PT₃), 土壤与污泥混掺比例为 5 : 3; 盆栽处理 4(PT₄), 土壤与污泥混掺比例为 5 : 4。每个处理 5 次重复。

收稿日期: 2015-11-10

基金项目: 福建省科技计划社会发展重点项目(编号: 2013Y0006)。

作者简介: 刘鑫尧(1984—), 男, 福建泉州人, 硕士, 工程师, 主要从事地质环境研究。E-mail: rollkey@163.com。

表 1 供试土壤与污泥理化性质

来源	有机质含量 (g/kg)	pH 值	总氮含量 (g/kg)	速效氮含量 (mg/kg)	总磷含量 (g/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	总钾含量 (g/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
土壤	12.69	6.49	11.39	59.63	10.74	52.18	6.23	24.89
污泥	226.31	6.25	213.98	493.30	137.55	112.45	66.19	25.03
GB 4284—1984《农用污 泥中污染物控制标准》								
	≥200.00	5.5~9.0	总氮 + 总磷 + 总钾含量 ≥30 g/kg					
来源	Cu 含量 (mg/kg)	Pb 含量 (mg/kg)	Zn 含量 (mg/kg)	As 含量 (mg/kg)	Hg 含量 (mg/kg)	Cd 含量 (mg/kg)	Cr ⁶⁺ 含量 (mg/kg)	Ni 含量 (mg/kg)
土壤	35.83	54.77	81.32	7.25	0.16	—	30.89	21.93
污泥	602.20	83.44	2 817.00	7.33	1.60	1.39	69.36	45.90

注：“—”表示检出值在检出限以下。下同。

1.2.3 植物监测 对于小区试验,监测移栽前及试验结束后黄婵的各项生物指标(株高、根深、叶数、叶面积、根生物量、茎叶生物量)及各重金属含量,并对试验过程中黄婵生长状况进行统计描述。对于盆栽试验,监测试验过程中油麦菜的出芽率和生长状况;试验结束后监测油麦菜的株高、叶面积、茎叶生物量,并分析各重金属元素在油麦菜中的富集情况。应用统计方法计算植物出芽率,用直接测量法测量株高及根深,采用 80 ℃烘干称质量法获得生物量,采用直接测量计算法测定叶面积。应用原子吸收分光光度计测定植物中 Cd、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 含量,应用原子荧光分光光度计测定植物中 Hg、As 含量。

1.2.4 数据处理 应用 Excel 2007 软件对试验数据进行统计分析及处理。

2 结果与分析

2.1 植物生长描述

2.1.1 植物生长外观描述 观察小区试验植物生长状况发现,6 月份对照田块植株矮小,叶片呈浅绿至微黄色,叶面积较小,植株长势较差,而试验组田块植株叶片呈深绿色,叶面积较大,长势较旺盛,但 ST₄ 组植株叶片呈深绿色甚至有些发黑,田块植株长势不均匀,边角长势较差,中间较好。第 1 组试验小区中,ST₃、ST₄ 田块长势最好,SCK 田块长势最差。第 2 组试验小区中,ST₂ 田块长势最好,SCK 田块长势最差。

7 月份对照植株长势均匀,植株矮小、稀疏;ST₁ 组植株长势较均匀,植株高大,植物叶片面积大,茂密,呈深绿色,少部分叶片变黄变黑;ST₂ 组植株长势较均匀,植株高大,叶片面积大,茂密,呈深绿色,少部分叶变黑;ST₃ 组植株高大,最旺盛但不均一,靠路或墙的一侧植株矮小,植物叶片面积大,茂密,呈深绿色;ST₄ 组植株长势较均匀,植株高大、茂密、旺盛,植物叶子叶片面积大,茂密,深绿色,少部分叶片变黄。对于植物枝、茎而言,对照的植物枝、茎短且细;而不同土壤与污泥配比处理下的植物枝、茎粗且长,且 ST₃ 组中植物长势更好。通过测量各处理试验小区收获后的植物根深发现,ST₃、ST₄ 处理植物根深略小于对照,3 组小区植物根深均小于 20 cm;而 ST₁、ST₂ 处理植物根深明显大于对照,2 组小区植物根深均大于 20 cm,其中 ST₁ 处理植物根深平均达 23 cm。与植物长势、茎叶等表现特征基本一致。这表明城市污泥的施用对植物生长有明显促进作用;但城市污泥施用量过多时,将会降低土壤透气性等,限制植物生长。

盆栽试验中,在油麦菜种子播种 5 d 后,试验组 and 对照组均有出芽迹象,但相对试验组而言,对照组油麦菜出芽率很低。在出芽期,对照组 5 个重复油麦菜的出芽率均较低,PT₁ 组出芽率情况稍好。播种 15 d 后,油麦菜植株株高 3~4 cm,部分盆中的油麦菜出现死苗现象。

2.1.2 植物生长指标描述 利用城市污泥改良土壤后,红壤养分含量必然发生变化,其养分含量变化会影响植物出芽与生长状况^[14]。但是污泥施用量的多少对植物生长的影响存在差异,本研究通过盆栽试验和小区试验对其进行研究。

由表 2 可见,试验组油麦菜出芽率、平均株高、叶面积均高于对照,且当土壤与污泥的配比小于 5:3 时,油麦菜的出芽率、平均株高、叶面积随污泥施用量的增加而增加,这说明土壤与污泥配比小于 5:3 的处理中重金属等有害物质并没有使植物生长发育受到抑制,反而土壤与污泥配比的增加使混合样中的有机质含量增加,促进了植物的发芽和生长。但当土壤与污泥配比大于 5:3 时,随着污泥施加量的继续增加,植物的出芽率、平均株高、叶面积会出现降低,这说明污泥施用量的增加导致混杂物中 toxic、有害物质含量超标,阻碍了植物发芽和生长。在 PT₂ 组,茎叶生物量达到最大值,其后随污泥施用量的增加开始下降,这表明在利用污泥改良土壤时,并不是污泥施用量越多,植物长势就越强,而是存在一定限值。因此,土壤与污泥配比 5:3 有利于植物的发芽和生长。

表 2 油麦菜生长状况

处理	出芽率 (%)	平均株高 (cm)	叶面积 (cm ²)	茎叶生物量 (g)
PCK	35.54	5.34	1.05	0.33
PT ₁	56.12	7.42	1.25	0.48
PT ₂	75.96	9.64	1.61	0.68
PT ₃	84.38	13.93	1.99	0.65
PT ₄	72.78	10.97	1.69	0.54

城市污泥密度较小,有机质含量高,将污泥施入到土壤后,会因为土壤孔隙度增加而降低土壤容重,容重的降低为植物生长提供更多的孔隙水分和空气,有利于植物生长^[15]。由表 3 可见,与对照相比,施用污泥的处理组植株株高、叶片数、叶面积、根生物量、茎叶生物量均有所提高,但不同处理组及植株不同生物指标提高的幅度存在差异。黄婵的株高在 ST₁ 组中出现最大值,为 53.90 cm,随着污泥施用量增加,黄婵株高开始出现下降趋势,在 ST₄ 组出现最小值,仅为 46.50 cm,接近对照。有研究认为,将污泥掺入土壤后会导致土壤团聚

体结构和数量发生变化,改善土壤养分条件,从而促进植物根部生长^[15]。在本试验中,除 ST₁、ST₂ 组植物根深大于对照外,其他 2 组植物根深均低于对照,且 ST₁ 组黄婵根深,为 23.00 cm,随污泥施用量的进一步增加,黄婵根深开始变小,表现出与株高随污泥施用量的变化关系的相似性。这可能是因为当污泥施用量较高时,其中的有毒有害物质也较高,从而限制植物根部生长。

表 3 黄婵生长状况

处理	株高 (cm)	根深 (cm)	单株叶片 数(张)	叶面积 (cm ²)	根生物 量(g)	茎叶生 物量(g)
SCK	43.00	19.00	35.00	163.20	1.44	7.33
ST ₁	53.90	23.00	35.50	644.20	3.91	14.98
ST ₂	53.40	21.60	37.00	583.49	2.06	16.66
ST ₃	50.05	17.35	43.50	445.03	3.38	17.48
ST ₄	46.50	17.05	41.50	558.66	2.08	16.91

2.2 植物对重金属元素的富集

2.2.1 油麦菜对重金属元素的富集 将污泥施入土壤中会造成土壤中重金属累积,从而使植物中重金属含量高于自然土壤种植植物中重金属含量^[16-17]。由表 4 可见,本研究中,并不是所有重金属含量都随着污泥施用量的增加而增加,且单一元素在植被中的累积也不是随污泥施用量的增加一直呈增加趋势。试验组油麦菜中 Cu、Pb、Zn、Ni 含量均高于对照,试验组其他重金属含量有低于对照的现象。Cu、Pb、Zn、Cd 含量在 PT₃ 处理下达到最大值,分别为 3.860、1.796、35.62、0.022mg/kg;之后随污泥施用量的增加出现下降趋势;As、Hg、Ni 含量在 PT₂ 处理下达到最大值,分别为 0.009、0.008、0.23mg/kg,之后随污泥施用量的增加开始下降;Cr⁶⁺ 含量的最大值出现在 PT₁ 处理下,为 0.06mg/kg,之后随污泥施用量的增加,油麦菜中 Cr⁶⁺ 含量基本处于稳定状态。

表 4 试验结束后油麦菜中重金属含量

处理	重金属含量(mg/kg)							
	Cu	Pb	Zn	As	Hg	Cd	Cr ⁶⁺	Ni
PCK	2.154	1.138	13.06	0.003	0.003	0.013	0.03	0.16
PT ₁	2.838	1.264	21.56	0.002	0.005	0.010	0.06	0.21
PT ₂	3.604	1.660	26.78	0.009	0.008	0.016	0.02	0.23
PT ₃	3.860	1.796	35.62	0.007	0.007	0.022	0.02	0.21
PT ₄	2.566	1.270	23.76	0.003	—	0.012	0.03	0.19

2.2.2 黄婵对重金属元素的富集 由表 5 可见,小区试验结束后黄婵中重金属含量与盆栽试验的油麦菜重金属含量存在差异。黄婵为移栽植株,与栽种前黄婵中重金属含量(见“1.1”节)相比,试验结束后黄婵中 Cu、Cr⁶⁺、Ni 含量反而出现下降趋势,且 Cr⁶⁺、Ni 含量下降幅度非常大,栽种前其含量约为栽种后的数十倍,造成这种现象的原因尚待研究。其他几种重金属元素在植株中均不同程度累积,其中以 Zn 元素累积较为严重,在 ST₂ 处理下黄婵中 Zn 含量达到最高值,为 1 008.90 mg/kg,之后在 ST₃ 处理下出现下降趋势,在 ST₄ 处理下又上升。黄婵中 Cu 含量与 Zn 含量表现出相同的变化趋势。黄婵中 Pb 含量在 ST₂ 处理下出现最大值,为 5.87 mg/kg,之后一直下降。除 Zn 含量外,黄婵中其他几种重金属在不同处理下累积量差异较小,且变化趋势波动较小。

表 5 试验结束后黄婵中重金属含量

处理	重金属含量(mg/kg)							
	Cu	Pb	Zn	As	Hg	Cd	Cr ⁶⁺	Ni
SCK	7.77	4.01	73.64	0.37	0.16	0.51	2.45	1.31
ST ₁	12.57	4.95	953.70	0.56	0.60	1.58	2.40	1.30
ST ₂	16.38	5.871	1008.90	0.61	0.22	1.22	1.90	1.38
ST ₃	12.45	4.87	867.32	0.49	0.19	1.31	2.73	1.32
ST ₄	14.58	3.52	967.83	0.41	0.25	1.80	2.13	1.28

根据 GB 2762—2012《食品中污染物限量》,蔬菜中 Cu、Pb、Zn、As、Hg、Cd、Cr⁶⁺、Ni 含量上限值分别为 10、0.2、20、0.5、0.01、0.05、0.5、1.0 mg/kg。本研究中,所有盆栽试验组油麦菜中 Pb、Zn 含量均超过食品安全国家标准值,其他重金属元素含量均处于标准值以内。与盆栽试验油麦菜中重金属含量相比,小区试验黄婵中重金属含量超标率较高。除对照组 Cu 元素含量外,其他试验组黄婵中重金属含量均超过国家标准。因此,在利用污泥改良土壤时,要控制污泥的施入量,避免造成作物中重金属元素的大量积累。2 组试验中不同植株中重金属含量的变化趋势存在差异,但总体表现为随污泥施用量的增加而呈现出先增加后减少的趋势。造成这种现象的原因可能是当污泥施用量较低时,土壤中有有机质及养分条件得到改善,植株生长茂盛,对重金属元素的吸收也较多;之后当污泥施用量达到一定限值后,土壤中重金属含量超标,反而限制了植物生长,从而导致植物对重金属元素的吸收量也有所下降^[18]。本试验中植物对 Zn 的累积量较高,我国土壤与人体普遍缺锌,表明将污泥施加到土壤中不仅可以改良土壤,还可以通过食物链的方式补给人体所缺元素。

3 结论

本研究通过室内盆栽试验、小区试验研究利用城市污泥改良土壤对植物生长状况的影响,以及植物对城市污泥改良土壤中重金属元素的富集,主要得出以下结论。(1)从植物表现特征来看,施用污泥可以有效促进植物生长,但并不是污泥施用量越大,越能促进植株生长。盆栽试验中,PT₂、PT₃ 处理下植物长势最好;小区试验中,ST₂、ST₃ 处理下植物长势最好。(2)利用污泥改良土壤后,盆栽试验与小区试验中植物生长状况均优于对照。盆栽试验中油麦菜在试验组中的出芽率、平均株高、叶面积、茎叶生物量均高于对照,且当土壤与污泥的配比小于 5:3 时,油麦菜的各项生物指标随着污泥施用量的增加而增加;当土壤与污泥混合比例超过 5:3 时,各项指标出现下降趋势。小区试验中土壤与污泥混合比例为 9:1、8:2 的处理下植物长势较好,植物株高比对照高 10 cm 以上,不同配比中植物叶面积均大于对照,这说明城市污泥改良后的红壤对植物生长有促进作用。(3)城市污泥在改良土壤的同时,也提高了土壤中重金属含量,从而导致重金属元素在植物中的富集。不同重金属元素在不同处理下的油麦菜、黄婵中均不同程度地富集,但黄婵中重金属元素的检出值高于油麦菜。植株中重金属含量并不是随着污泥施用量的增加一直呈增加趋势,而是在污泥施用量达到一定比例后,植株中重金属含量开始减少。这主要是因为土壤中高含量重金属限制了植株生长,从而导致植物对重金属元素的吸收也开始减少。因此在利用城市污泥改良土壤时,要注意控制污泥施用

田洁玫,任 彧,陈 杰. 高标准粮田区耕地动态变化及其驱动力——以河南省鹤壁市为例[J]. 江苏农业科学,2016,44(12):428-431.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.12.129

高标准粮田区耕地动态变化及其驱动力 ——以河南省鹤壁市为例

田洁玫¹,任 彧¹,陈 杰²

(1. 郑州大学公共管理学院,河南郑州 450001; 2. 郑州大学水利与环境学院,河南郑州 450001)

摘要:利用 RS 和 GIS 手段,在对河南省鹤壁市耕地动态变化进行多角度分析的基础上,运用 SPSS 软件,采用主成分分析法与多元回归模型方法,分析影响研究区耕地变化的主要驱动因素。结果表明,鹤壁市过去 20 年耕地面积出现小幅减少,更趋向于集中连片,其中浚县在前 10 年增幅最大且贡献度最高;耕地变化主要受农业发展、经济发展、耕地质量这 3 个主成分的影响,且这种影响在逐年加强,其中农业发展因素驱动作用远大于经济发展因素。因此,今后应继续加大农业科技及农业资金的投入,引导农民减少撂荒行为,调整种植结构,切实保护耕地,同时,应发挥浚县耕地优势,加强高标准粮田建设,实现粮食增产增收。

关键词:高标准粮田区;鹤壁市;耕地;动态变化;驱动力

中图分类号: F301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)12-0428-04

中国政府十分重视粮食安全问题,而河南省作为重要的粮食生产区,肩负着实现耕地保护与农业现代化的重担,在

收稿日期:2016-03-18

基金项目:国家自然科学基金(编号:40971128);农村领域国家科技计划(编号:2012BAD05B02-7)。

作者简介:田洁玫(1988—),女,河南焦作人,博士研究生,主要从事土地可持续利用与信息化管理研究。E-mail:tjm6688@163.com。
通信作者:陈 杰,教授,博士生导师,主要从事土地可持续利用与信息化管理研究。E-mail:jchen@zzu.edu.cn。

量,避免造成土壤及植物中重金属元素累积,进而通过食物链危害人体健康。

参考文献:

- [1] 黄国勤,赵其国. 红壤生态学[J]. 生态学报,2014,34(18): 5173-5181.
- [2] Liu L F. Reason of the ecological degradation and the countermeasure of ecological rehabilitation in red soil mountain area[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2008,36(12):5161-5162.
- [3] 胡月明. 我国红壤资源农业利用研究进展[J]. 土壤与环境, 1999,8(1):53-57.
- [4] 刘 杰,张杨珠. 红壤地区土壤退化及恢复重建研究(I)红壤的退化[J]. 湖南农业科学,2009(4):44-51.
- [5] Yang L A, Shi Z, Wang R C, et al. Red soil resource information system and its preliminary application[J]. Pedosphere, 1998, 8(1):9-14.
- [6] Cao X. Analysis on problems of sludge disposal in waste water treatment plant[J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture,2002,18(1):1-4.
- [7] 李艳霞,陈同斌,罗 维,等. 中国城市污泥有机质及养分含量与土地利用[J]. 生态学报,2003,23(11):2464-2474.
- [8] 周立祥,胡霭堂,戈乃珍. 城市生活污水农田利用对土壤肥力性

2008 年公布的《国家粮食战略工程河南核心区建设规划纲要》中,占鹤壁市总面积约 70% 的浚县、淇县 2 县位列在内,2012 年出台的《河南省人民政府关于建设高标准粮田的指导意见》也将鹤壁市区划入其中^[1],使鹤壁市耕地受到保护。为提升河南省的工业化、城镇化水平,2011 年《国务院关于支持河南省加快建设中原经济区的指导意见》出台,并于 2012 年正式批复,鹤壁市作为中原经济区“一核、四轴、两带”中“沿京广发展轴”上的重要一环,承担着北接京津、沟通南北产业和城镇密集带的重要作用^[2]。中原经济区的建设必然

- 状的影响[J]. 土壤通报,1994,25(3):126-129.
- [9] 陈同斌,黄启飞,高 定,等. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势[J]. 环境科学学报,2003,23(5):561-569.
 - [10] 金儒霖. 中国城市污水厂污泥处理的综述[J]. 土木工程与管理学报,1994,11(2):1-12.
 - [11] 丁 文,王海勤. 城市污泥有机肥对马铃薯产量和品质及重金属吸收的影响[J]. 中国农学通报,2005,21(12):254-256.
 - [12] 陈 曦,杨丽标,王甲辰,等. 施用污泥堆肥对土壤和小麦重金属累积的影响[J]. 中国农学通报,2010,26(8):278-283.
 - [13] 梅 忠,宋晓英,赵 华. 施用污泥堆肥对土壤和小白菜重金属积累的影响[J]. 广东微量元素科学,2009,16(1):31-35.
 - [14] 王 新,陈 涛,梁仁禄,等. 污泥土地利用对农作物及土壤的影响研究[J]. 应用生态学报,2002,13(2):163-166.
 - [15] 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.
 - [16] 康少杰,刘善江,李文庆,等. 污泥肥对油菜品质性状及其重金属累积特征的影响[J]. 水土保持学报,2011,25(1):92-95.
 - [17] 梁丽娜,黄雅曦,杨合法,等. 污泥农用对土壤和作物重金属累积及作物产量的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(6):81-86.
 - [18] 欧根能,宁 平,杨月红,等. 污泥堆肥农用对蔬菜生长状况及重金属吸收的影响[J]. 安徽农业科学,2009,37(5):2159-2162.