

史 弋,王宇翔,夏 瑜,等. 污泥改良沙质土壤合适配比及对白菜生长的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(5):136-139.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.05.034

# 污泥改良沙质土壤合适配比及对白菜生长的影响

史 弋,王宇翔,夏 瑜,何绪文

[中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083]

**摘要:**沙质土壤涵水性能差,营养基质缺乏,探索城市污泥改良沙质土壤的可行性及合适配比具有重要实际意义。通过室内盆栽试验,研究在沙质土壤中施入不同比例的城市污泥对土壤营养状况及白菜(*Brassica chinensis* L.)生长的影响,并对改良后土壤中重金属含量作出评价。试验结果表明,当污泥添加量在 3%~10% 时,可以明显促进白菜的发芽与生长,其中添加量为 5% 时效果最好,当污泥添加量达到 20% 时就会产生强烈的抑制作用,白菜的发芽率和长势均比对照组差。城市污泥的添加可促进植株生长基质中氮、磷、钾和有机质养分的提高,大幅度改善土壤营养状况,但对钾含量的提升效果不明显。污泥质量分数在 20% 以下时,复合基质中重金属含量均未超过 GB15618—1995《土壤环境质量标准》中二级标准 pH 值大于 7.5 时的限值。由此可见,城市污泥改良沙质土壤具有一定的可行性和前景。

**关键词:**沙质土壤;城市污泥;白菜;重金属

**中图分类号:** X703;S634.06 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)05-0136-04

土地沙漠化严重制约了农林业的发展,我国沙漠化问题严重,每年因此造成的经济损失巨大,形势十分严峻<sup>[1]</sup>。沙质土壤具有持水能力差、营养基质缺乏、生产力低下的特点。如何改良沙质土壤,以适应作物或防护林的生长是亟待解决的问题<sup>[2-3]</sup>。近年来,随着城市污水处理力度和处理率不断提高,城市污泥的产生量也急剧增加。目前城市污泥的处理方式主要有卫生填埋、焚烧、建材利用等,而污泥的资源化利用,尤其是农用资源化可以最大程度地利用其丰富的有机质和养分条件,对于改善土壤结构和营养状况具有潜在的应用价值<sup>[4-5]</sup>。由于连续施用污泥会显著增加土壤-植物系统中的重金属含量,所以重金属是限制污泥农用的主要因素之一<sup>[6-7]</sup>。一些研究表明,污泥土地利用时重金属含量并未超过《农用污泥中污染物控制标准》的限值,所以污泥农用资源化具有一定的可能<sup>[8-9]</sup>。

基于上述背景,本试验选取了生长周期较短、适应性强、

对重金属较为敏感的白菜(*Brassica chinensis* L.)<sup>[10-11]</sup>在污泥改良沙质土壤的复合基质上进行盆栽试验,分析污泥添加比例对其生长状况、基质中养分和重金属含量的影响,以此探究城市污泥改良沙质土壤的可行性和找寻最佳改良方案。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤 供试土壤取自北京市潮白河流域河床附近,土壤多细沙。试验前风干、过 10 mm 筛并剔除根系石块等杂物。供试土壤的基本理化性质见表 1。

1.1.2 供试污泥 供试污泥取自北京市某污水处理厂脱水车间,按季度同期采集,每次连续取样 7 d。将采集好的污泥样品混合后风干、压散,然后置于烘箱中,在(100±5)℃条件下烘干至恒质量,最后研磨装袋备用。供试污泥的基本理化性质见表 2。

表 1 供试土壤理化性质

pH 值	有机质含量 (g/kg)	总磷含量 (mg/kg)	全氮含量 (g/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	团粒结构(%)					
					>4.75 mm	3.35 mm	1.7 mm	0.425 mm	0.23 mm	<0.23 mm
8.37	2.59	0.56	0.17	45.80	0	0.35	0.45	1.02	43.12	55.06

表 2 供试污泥理化性质

pH 值	含水率 (%)	有机质含量 (g/kg)	总磷含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	速效钾含量 (g/kg)	重金属含量(mg/kg)					
						镉(Cd)	铬(Cr)	铜(Cu)	镍(Ni)	铅(Pb)	锌(Zn)
6.69	81.72	358.12	38.3	37.97	0.73	1.93	192.5	281.79	41.85	100.34	930.08

### 1.2 试验设计

试验污泥按占干质量 0%(对照)、3%、5%、10%、20% 的比例与沙质土壤在振荡器上充分混合,混合后的土样统称为混合基质,分别记作 G<sub>0</sub>、G<sub>3</sub>、G<sub>5</sub>、G<sub>10</sub>和 G<sub>20</sub>。其中 G<sub>0</sub> 为未添加污泥的对照组,其余为试验组。将混合基质装于高 15 cm、底部直径 21.8 cm 的栽培盆中,每盆基质总质量为 1 kg。加入 400 mL 蒸馏水稳定 5 d 后取 200 g 装袋备用,其余用作盆栽试验。

收稿日期:2018-04-16  
基金项目:北京市自然科学基金(编号:8152025);河北省科技计划(编号:15274006D)。  
作者简介:史 弋(1993—),女,山西阳泉人,硕士研究生,研究方向为污泥资源化利用及工业水处理。E-mail:378994141@qq.com。  
通信作者:何绪文,博士,教授,主要研究方向为水处理及重金属污染修复。E-mail:810549047@qq.com。

试验选取白菜为供试植物,种子来源于中国农业科学院,品种为速生一号。试验中选取均匀、饱满的种子在 0.05% 高锰酸钾溶液中浸泡 1 h,用蒸馏水冲洗 3 次<sup>[12]</sup>。种子播种深度为 1.5 cm,播种量为 20 粒/盆,每 2 d 浇水 1 次,浇水量约为 100 mL/盆,试验盆栽置于实验室保温保湿棚内种植 50 d。苗期内每天计数发芽率,观察植物长势;生长完成后,将植物从土壤中分离出来,用清水冲洗干净后测量植物株高与根长,再将植物于 80 ℃ 烘干 48 h 后测量其干质量。

1.3 分析方法

1.3.1 试验指标测定方法 污泥中重金属、含水率、有机质、全氮、总磷、速效钾的测定参照 CJ/T 221—2005《城市污水处理厂污泥检验方法》。土壤中重金属的测定参照 NY/T 1613—2008《土壤质量 重金属测定 王水回流消解原子吸收法》;土壤有机质的测定参照 NY/T 1121.6—2006《土壤检测 第 6 部分:土壤有机质的测定》中的重铬酸钾-硫酸油浴法;土壤中全氮的测定参照 NY/T 53—1987《土壤全氮测定法(半微量开氏法)》;土壤中有效磷的测定参照 NY/T 1121.7—2014《土壤检测 第 7 部分:土壤有效磷的测定》中的碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法;土壤中速效钾的测定

采用联合浸提-比色法(NY/T 1849—2010《酸性土壤 铵态氮、有效磷、速效钾的测定 联合浸提-比色法》)。

1.3.2 土壤重金属污染评价方法 土壤重金属评价方法选择单因子指数法和内梅罗指数法<sup>[13]</sup>。

单因子指数法的计算公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中: $P_i$  为土壤中污染物  $i$  的环境质量指数; $C_i$  为污染物  $i$  的实测含量(mg/kg); $S_i$  为污染物  $i$  的环境质量标准(mg/kg)。

内梅罗综合污染指数法的计算公式如下:

$$P = \sqrt{\frac{(p_{\max})^2 + (p_{\text{ave}})^2}{2}} \tag{2}$$

式中: $P$  为监测点的综合污染指数; $p_{\max}$  为  $i$  监测点污染物单污染指数中的最大值; $p_{\text{ave}}$  为  $i$  监测点所有污染物单污染指数平均值。

依据单因子指数法和内梅罗综合污染指数法可将土壤重金属污染划分为 5 个等级,具体如表 3 所示。

GB 15618—1995《土壤环境质量标准》中的部分内容如表 4 所示,本研究选用二级标准 pH 值 > 7.5 为评价标准。

表 3 土壤重金属污染分级标准

等级划分	单项污染指数	综合污染指数	污染等级	污染水平
1	$P_i \leq 0.7$	$P \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_i \leq 1.0$	$0.7 < P \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
3	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$1.0 < P \leq 2.0$	轻污染	土壤开始受到污染
4	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$2.0 < P \leq 3.0$	中污染	土壤受到中度污染
5	$P_i > 3.0$	$P > 3.0$	重污染	土壤受到严重污染

表 4 土壤环境质量标准

类别	pH 值	重金属含量(mg/kg)						
		镉	砷	铜	铅	铬	锌	镍
一级(自然背景)		0.2	15	35	35	90	100	40
二级	< 6.5	0.3	40	50	250	150	200	40
	6.5 ~ 7.5	0.3	30	100	300	200	250	50
	> 7.5	0.6	25	100	350	250	300	60
三级	> 6.5	1.0	40	400	500	300	500	200

2 结果与分析

2.1 污泥改良沙质土壤对植物生长状况的影响

2.1.1 不同污泥配比对植物发芽的影响 苗期内白菜种子的发芽率随时间的变化结果如图 1 所示。可以看出,白菜种子从播后 3 d 开始发芽,播后 12 d 时发芽完毕,发芽率排序: $G_3、G_5 > G_{10} > G_0 > G_{20}$ ,最终只有  $G_3$  和  $G_5$  的发芽率达到 100%,其中  $G_5$  发芽较快,在播后 7 d 就全部发芽, $G_3$  在播后 12 d 全部发芽,由此可见,污泥施用量在 3% ~ 5% 时可以明显促进种子发芽。而添加 20% 污泥的混合基质中,白菜的发芽率仅为 5%,故当污泥施用量达到 20% 时就会抑制白菜种子的发芽,这可能是由于污泥施入量高时,土壤板结,透气性差,对作物萌芽产生不利影响,也有研究表明,植物的胚根在突破种皮萌芽过程中,根系会大量吸水使重金属在根系中大量积累,重金属会对植物产生胁迫作用<sup>[14-15]</sup>,此外污泥中其他有害元素的浓度过高也会影响植物的萌芽。

2.1.2 不同污泥配比对植物长势的影响 从图 2 可以看出,

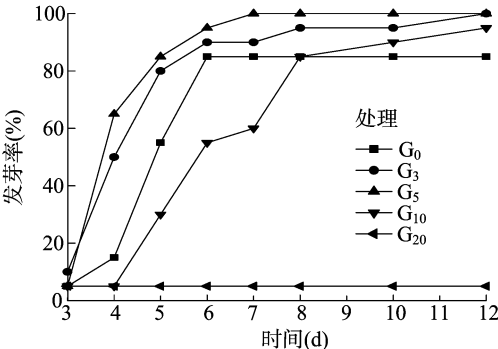


图1 白菜种子发芽率随时间的变化

植物的株高、根长随污泥添加量的增加呈先增加后降低的趋势。试验组  $G_3、G_5、G_{10}$  的株高、根长均明显高于对照组,表明污泥为沙质土壤提供了养分,有利于植物积累有机质而快速生长,其中  $G_5$  基质促进作用最明显,白菜的株高和根长分别比对照组高 24.1% 和 55.0%,而  $G_{20}$  基质中白菜的生长明显受到了抑制,长势情况均比对照组差,说明过量的污泥影响植

物的生长。植物的干质量与有机物累计量呈正相关关系,反映了光合作用强度。由表 5 可知,添加 3% ~ 10% 的污泥均能明显提高植物干质量,其中 G<sub>3</sub> 基质植物干质量最高,比对照组高了 61.1%,这说明合理施用污泥可以改良土壤的物理性质,增加土壤营养物质含量,促进植物积累有机物。而当污泥浓度高达 20% 时,植物干质量明显下降,分析发现可能是由于植物对高浓度的污泥产生的胁迫作用有一种自我保护机制<sup>[16-17]</sup>,植物可以通过调节光合作用细胞内胞间 CO<sub>2</sub> 浓度来对抗高浓度污泥产生的不利影响,从而影响光合作用效率以及干质量的积累。

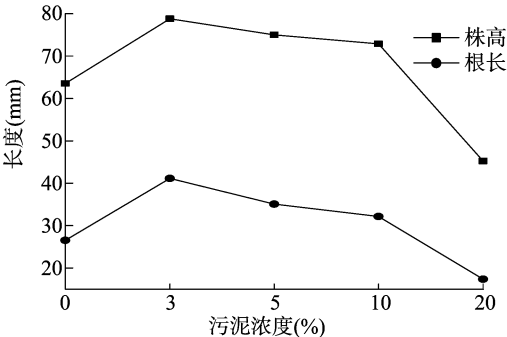


图2 不同污泥比对白菜植株株高和根长的影响

表 5 不同污泥比对白菜植株干重的影响

组别	干质量 (mg)	相比于对照组的增加量 (mg)
G <sub>0</sub> (对照组)	3.60	—
G <sub>3</sub>	5.00	1.40
G <sub>5</sub>	5.80	2.20
G <sub>10</sub>	4.90	1.30
G <sub>20</sub>	2.10	-1.50

2.2 不同污泥比对土壤环境的影响

2.2.1 不同污泥比对基质 pH 值的影响 表 6 为种植前复合基质 pH 值的情况,可以看出,未添加污泥时,沙质土壤 pH 值为 8.33,属于弱碱性。研究表明,碱性过高对作物的生长不利<sup>[18]</sup>,主要由于碱性环境会影响磷及其他元素的生物有效性,并且碱性土壤胶团上大量附着的钠离子 (Na<sup>+</sup>) 会使土壤环境恶化,耕性不良,降低作物产量。从表 6 还可以看出,

随着污泥施入量的增加,复合基质 pH 值逐渐降低,G<sub>20</sub> 基质 pH 值比对照组降低了 0.8,这说明呈酸性的污泥 (pH 值 = 6.69) 可以改变沙质土壤的碱性环境,有利于作物对营养元素的吸收。

表 6 复合基质 pH 值

试验组	pH 值
G <sub>0</sub>	8.33
G <sub>3</sub>	7.85
G <sub>5</sub>	7.72
G <sub>10</sub>	7.65
G <sub>20</sub>	7.53

2.2.2 不同污泥比对基质养分变化的影响 有机质、全氮、有效磷、速效钾都是反映土壤肥力高低的重要指标。表 7 为土壤营养等级的划分标准,表 8 是不同基质中这 4 种指标的含量情况以及各指标等级情况。可以看出,复合基质中有有机质、全氮、有效磷和速效钾的含量随污泥添加量的增加而增加,从 G<sub>0</sub> 到 G<sub>20</sub>,分别增长了 12.9、16.8、46.6 和 2.7 倍。G<sub>0</sub> 基质的有机质和全氮含量均未达到土壤营养等级标准的五级标准,有效磷和速效钾含量只达到五级标准。但当分别添加 3%、5%、10%、20% 污泥后,其有机质含量分别可达到四级、四级、二级、一级标准;全氮含量除 G<sub>3</sub> 基质为二级标准外,其余为一级标准;有效磷含量均可达到一级标准;速效钾含量分别可达到四级、四级、三级、二级标准,与其他指标相比,污泥对土壤速效钾含量的提升效果不明显,这与城市污泥中钾含量不高有关。所以,城市污泥是一种富含氮、磷和有机质而钾含量有限的肥料,施用时可依据实际情况适当补充钾肥。

表 7 土壤营养等级标准

分级	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	营养等级
一级	>40	>2	>40	>200	丰富
二级	>30 ~ 40	>1.5 ~ 2	>20 ~ 40	>150 ~ 200	较丰富
三级	>20 ~ 30	>1 ~ 1.5	>10 ~ 20	>100 ~ 150	中等
四级	>10 ~ 20	>0.75 ~ 1	>5 ~ 10	>50 ~ 100	较缺
五级	6 ~ 10	0.5 ~ 0.75	3 ~ 5	30 ~ 50	缺
低于五级	≤6.00	≤0.50	≤3.00	≤30.00	缺

表 8 基质营养成分含量

基质处理	有机质		全氮		有效磷		速效钾	
	含量 (g/kg)	营养等级	含量 (g/kg)	营养等级	含量 (mg/kg)	营养等级	含量 (mg/kg)	营养等级
G <sub>0</sub> (对照组)	4.61	低于五级	0.37	低于五级	4.80	五级	43.95	五级
G <sub>3</sub>	15.08	四级	1.73	二级	43.58	一级	64.73	四级
G <sub>5</sub>	19.92	四级	2.87	一级	70.17	一级	79.58	四级
G <sub>10</sub>	36.87	二级	3.67	一级	131.69	一级	108.68	三级
G <sub>20</sub>	64.17	一级	6.57	一级	228.39	一级	163.99	二级

2.2.3 污泥改良沙质土壤的重金属含量评价 表 9 列出了施入不同比例污泥后,复合基质中 6 种重金属的含量,可以看出,随污泥添加量的增加,重金属含量也增加,G<sub>20</sub> 基质中 6 种重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的含量比对照组分别高 0.55、5.15、36.79、5.38、22.11、27.63 mg/kg,Cu 和 Zn 含量的增加明显,这可能是由于污泥中这 2 种金属的含量较多 (表 2)。除 Cd 外其他重金属含量远低于 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》二级 pH 值 >7.5 时的限值,但由于 Cd 含量接近标

表 9 复合基质的重金属含量

试验组	含量 (mg/kg)					
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
G <sub>0</sub>	0.00	1.49	3.48	1.32	5.40	2.57
G <sub>3</sub>	0.36	2.38	8.37	2.18	9.08	7.46
G <sub>5</sub>	0.42	2.59	9.87	1.95	9.74	8.39
G <sub>10</sub>	0.45	4.27	22.09	3.45	16.35	17.19
G <sub>20</sub>	0.55	6.64	40.27	6.70	27.51	30.20

准限值,故必须考虑长期施用污泥带来的重金属污染风险<sup>[19]</sup>。

由于复合基质 pH 值均大于 7.5,故土壤重金属含量的单因子评价和内梅罗评价参照 GB1 5618—1995《土壤环境质量标准》中二级标准 pH 值 >7.5。单因子评价及内梅罗评价方法与公式见“1.3.2”节,评价结果见表 10 和表 11。

表 10 复合基质的重金属评价指数

试验组	综合污染指数 $P$	污染程度	单因子污染指数 $P_i$					
			Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
$G_0$	0.027	清洁	0.000	0.006	0.035	0.022	0.015	0.013
$G_3$	0.434	清洁	0.600	0.010	0.084	0.036	0.026	0.037
$G_5$	0.509	清洁	0.699	0.010	0.099	0.033	0.028	0.042
$G_{10}$	0.548	清洁	0.750	0.017	0.221	0.058	0.047	0.086
$G_{20}$	0.678	清洁	0.917	0.027	0.403	0.112	0.079	0.151

表 11 内梅罗综合污染指数评价标准

综合污染指数	污染程度
$\leq 0.7$	清洁
$>0.7 \sim 1.0$	尚清洁
$>1.0 \sim 2.0$	轻度污染
$>2.0 \sim 3.0$	中度污染
$>3.0$	重污染

表 10 是各基质中 6 种重金属单因子和内梅罗评价的结果,可以看出, $G_0 \sim G_5$  基质单因子污染指数及内梅罗综合污染指数均小于 0.7,属于清洁状态。 $G_{10}$  和  $G_{20}$  基质中 Cd 的单因子污染指数小于 1,属于尚清洁状态,但综合污染指数均小于 0.7,整体可以满足土壤环境质量二级标准 pH 值 >7.5 时的限值。可见污泥含量在 20% 以下时重金属污染的风险是可接受的,这可能是由于城市污泥来源于生活污水处理厂,重金属含量本身较低。但反复使用污泥作为肥料时,重金属的富集和迁移转化问题还有待进一步研究<sup>[20]</sup>。

### 3 结论

城市污泥改良沙质土壤对白菜的发芽与生长存在不同程度的促进或抑制作用,这与污泥的施入量有关。当添加的污泥含量在 3% ~ 10% 时,植株的发芽与生长得到促进;当污泥含量达到 20% 时,种子的发芽受到抑制,长势情况也明显比对照组差;当污泥含量为 5% 时,对白菜的发芽和生长最有利。

城市污泥的施入可以改善沙质土壤的酸碱环境,随着污泥施用比例的增加,土壤逐渐趋于中性,有利于提高其中微量元素的生物有效性。同时污泥富含氮、磷和有机质,合理适量的施用可以增加土壤养分,改善土壤营养状况,从而促进植物生长。由于污泥中钾含量有限,必要时可在施用过程中适当补充钾肥。

各复合基质中 6 种重金属的含量随城市污泥添加量的增高而增高,但内梅罗综合污染指数均满足清洁标准,评价结果表明,各基质均未超出 GB15618 - 1995《土壤环境质量标准》中二级标准 pH 值 >7.5 时的限值。但污泥作为肥料使用的过程中重金属的富集和迁移问题应当引起重视和进一步的研究。

综上所述,城市污泥改良贫瘠的沙质土壤是可行的,按适当比例添加城市污泥可以提高土壤肥力并且明显促进植物的发芽和生长。

### 参考文献:

- [1] 申源源,韦武思,孙荣国,等. 秸秆-膨润土-PAM 改良材料对沙质土壤田间持水量的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013,35(1):43-48.
- [2] 张丽霞. 中国沙漠化土地成因及治理的主要模式[J]. 陕西林业科技,2016(3):77-79.
- [3] 崔湘浩,李秀军. 干旱、半干旱地区沙质土壤的防渗节水技术研究[J]. 中国沙漠,2000,20(4):458-460.
- [4] 丘锦荣,郭晓方,卫泽斌,等. 城市污泥农用资源化研究进展[J]. 农业环境科学学报,2010,29(增刊1):300-304.
- [5] 宋秀兰,李亚新. 污泥资源化技术研究进展[J]. 化工环保, 2006,26(4):291-294.
- [6] Naylor C G, Mieux J P, Adams W J, et al. Biosolids applied to land: advancing standards and practices [M]. Washington D C: National Academy Press,2002:1576.
- [7] Kidd P S, Domínguez-Rodríguez M J, Díez J C, et al. Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge [J]. Chemosphere,2006,66(8):1458-1467.
- [8] 武文飞,南忠仁,王胜利,等. 干旱区绿洲土壤 Cd-Zn 复合污染对胡萝卜的影响及富集迁移规律[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2012,48(2):1-14.
- [9] 杨军,郭广慧,陈同斌,等. 中国城市污泥重金属区域分布特征及变化趋势[J]. 环境科学学报,2014,34(10):2455-2461.
- [10] 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.
- [11] 陆雅婕,吴笛,尹颖,等. 重金属和溴代阻燃剂复合污染对小白菜的生物效应[J]. 南京大学学报(自然科学),2018,54(1):196-204.
- [12] 曾正中,李国梁,苟剑锋,等. 污泥改性黄土合适配比及作物盆栽实验[J]. 环境工程学报,2016,10(8):4473-4479.
- [13] 何绪文,房增强,王宇翔,等. 北京市某污水处理厂污泥重金属污染特征、潜在生态风险及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2016,36(3):1092-1098.
- [14] 梅丽娜,袁庆华,姚拓,等. 不同品种苜蓿芽期对重金属镉的耐性研究[J]. 作物杂志,2010(2):15-18.
- [15] Soumaré M, Tack F M G, Verloo M G. Characterisation of Malian and Belgian solid waste composts with respect to fertility and suitability for land application [J]. Waste Management, 2003, 23(6):517-522.
- [16] 李海华,刘建武,李树人,等. 土壤-植物系统中重金属污染及作物富集研究进展[J]. 河南农业大学学报,2000,34(1):30-34.
- [17] 王晓东,聂剑文,商侃侃. 污泥施用对 4 种绿化植物叶片性状和光合作用的影响[J]. 中国农学通报,2013,29(13):44-50.
- [18] 张浩,王正银,董燕,等. 砂质土壤 pH 对中性缓释复合肥养分释放特性的影响研究[J]. 水土保持学报,2005,19(3):9-12.
- [19] 王学礼,常青山,侯晓龙,等. 三明铅锌矿区植物对重金属的富集特征[J]. 生态环境学报,2010,19(1):108-112.
- [20] 李琼,华路,徐兴华,等. 城市污泥农用的环境效应及控制标准的发展现状[J]. 中国生态农业学报,2011,19(2):468-476.