

王仲瑀. 城市污泥用于矿山废弃地生态修复污染控制与应用管理探讨[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(24): 1-8.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.24.001

城市污泥用于矿山废弃地生态修复 污染控制与应用管理探讨

王仲瑀

(北京大学政府管理学院, 北京 100871)

摘要:污泥是城镇污水处理厂的副产物, 是一类可利用性较高的二次资源。随着污泥的土地利用方式越来越受到各国的普遍重视, 污泥在矿山废弃地修复方面表现出良好的废物协同利用与发展前景。污泥不但含有改良土壤结构、肥力的有机质和促进植物生长的氮、磷等养分, 而且含有病原菌、寄生虫、重金属、有机污染物等有害成分。总结了污泥土地利用的研究与应用现状, 针对污泥土地利用的环境安全性问题, 对污泥堆肥后重金属等有毒有害成分在土壤中释放潜能、浸出行为变化、迁移能力等方面进行了较详细的综述与分析, 指出污泥稳定化或堆肥处理可降低污泥矿山废弃地生态修复的环境风险, 并对我国污泥用于矿区生态修复的管理提出了一些建议。

关键词:污泥; 矿山废弃地; 生态修复; 污染控制; 管理

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)24-0001-08

随着我国城镇化快速发展、城镇排水管道网络的日益完善, 城镇污水处理在污水治理方面取得了巨大成果, 大量污泥产生量也十分迅速, 2015 年我国污水排放量已达到 400 亿 m^3 , 污泥产生量约为 3 560 万 $\text{t}^{[1]}$, 未来 10 年我国城市污水量仍会有较大增长。随着城镇污水处理总量和处理程度的不断提高, 污泥产生量也将日益增加, 大量的污泥处理处置已成为污水厂亟待解决的问题。简单填埋将会引起严重二次污染, 如何将数量巨大、含水率高、成分复杂且含有毒有害成分的污泥妥善安全地处理, 实现无害化、减量化和资源化已成为重大课题^[2]。

发达国家经过几十年的发展, 污泥处理处置技术已逐渐成熟, 欧洲污泥主要利用方式见图 1。欧洲污泥处置的主要方式最初是填埋和土地利用, 在 20 世纪 90 年代, 欧洲推行污泥干化焚烧工艺, 由于投资和运行费用较高, 以及污泥中有害成分又逐渐减少, 使得污泥土地利用重新受到重视, 成为污泥处置方案的首要途径, 欧洲国家越来越支持污泥的土地利用。

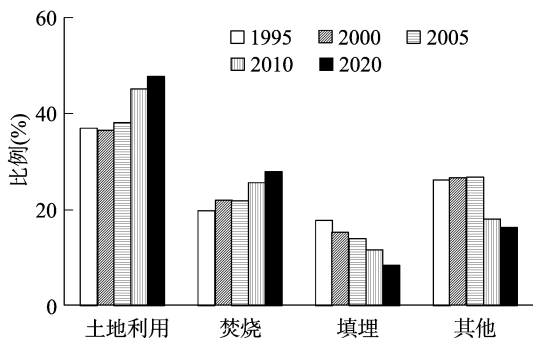


图1 欧洲污泥利用方式

美国污泥产生量及土地利用比例见图 2。美国污泥卫生填埋比例较低, 一直以农用为主, 在 2010 年, 污泥土地利用比例已接近 50%。日本由于土地资源限制, 最初的处理处置技术主要是焚烧后建材化利用, 农用与填埋为辅。近年来, 日本注重污泥生物质利用, 着手调整技术路线, 逐步减少焚烧和填埋的比例。韩国也将处理后的污泥进行多种资源化作为今后污泥处置的主要推进方向。

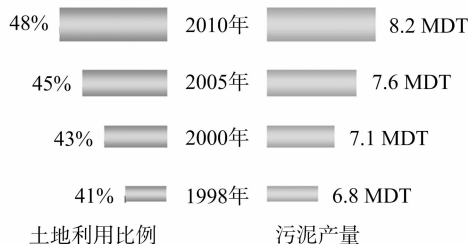


图2 美国污泥产量及土地利用

目前, 我国城镇污水处理厂污泥大部分未进行规范化的处理处置, 只有小部分进行卫生填埋、土地利用、焚烧和建材利用, 其中土地利用的比例仅有 10% ~ 15%^[3], 距发达国家土地利用率 60% ~ 70% 相差甚远。从自然的观点以及土壤学和植物学的角度, 回归土壤应该是污泥的最佳处置路线。由于发展经济的需要, 长期忽视采矿对生态环境的影响, 我国土地资源正遭受着巨大的破坏。据统计, 我国矿山破坏土地累计面积已达到 288 万 hm^2 , 并且每年以约 46 700 hm^2 的速度增加。

矿山废弃地生态修复最大的难点在于废弃地土壤基质有机质含量低, 不具备植被生长基本条件^[4]。城镇污水厂污泥虽是一种废弃物, 但富含有机质 (>40%) 和 N、P、K 等营养物质 (>5%), 远高于一般农家肥 (猪厩肥干物质平均含 N 为 1.63%, 含 P 为 0.30%; 牛厩肥平均含 N 为 1.51%, 含 P 为 0.31%^[5])。利用污泥作为矿山废弃地复垦及生态恢复的土

收稿日期: 2016-07-09

基金项目: 国家科技支撑计划 (编号: 2014BAC24B01)。

作者简介: 王仲瑀 (1980—), 男, 北京人, 博士, 北京大学博士后, 主要从事环境与宏观经济学研究。E-mail: 18810111600@163.com。

壤基质,不但可以消纳大量的污泥,还可以利用污泥中含有的大量植物必需营养元素,同时污泥具有较高的腐殖质含量和较强的持水保水性,施用于矿山废弃地可以有效改善土壤结构,增加土壤肥力,从而加速废弃植被恢复,重构废弃地土壤生态系统,改善区域环境质量和景观,并进一步通过林木种植带来一定的经济效益。

然而,污泥中含有高盐分、重金属、持久性有机物和病原体等有毒有害物质,如未经处理直接利用或排放,在废弃地土地利用时极易对土壤、地下水等造成二次污染,直接威胁环境安全和公众健康。因此,污泥安全地用于矿山废弃地利用及生态修复必须有科学指导。本研究旨在通过对污泥理化特征及污染特性的分析,对现阶段污泥用于废弃地生态修复可靠

技术进行回顾与总结,同时着重分析了污染物控制途径及处理后污泥的环境安全性,破除污泥应用于矿山废弃地环境安全隐患,通过理论与实践研究强化污泥土地利用的环境安全性,为污泥找到可靠的资源化出路的同时,实现矿山废弃地土壤改良和生态修复。

1 污泥基本理化特征及污染特性

1.1 污泥理化特性

污泥是城镇污水厂处理后的副产物,是由有机残片、细菌菌体、有机颗粒及胶体等组成的极其复杂的非均质体^[6]。污泥的基本理化特征包括含水率、有机质、pH 值、电导率、全量养分、N、P、K 含量等,不同地区污泥基本理化特性见表 1。

表 1 我国部分城镇污泥基本理化特性

地区	有机质 (g/kg)	pH 值	电导率 (μ S/cm)	TN (%)	TP (g/kg)	TK (g/kg)	来源文献
北京	223	7.5	5 700	7.80	6.4	14.6	[6]
天津	414	7.8	—	32.60	14.0	9.1	[7]
广州	303	7.6	—	25.00	11.6	16.1	[8]
苏州	379	6.6	8 300	32.60	13.9	11.5	[6]
杭州	313	7.2	3 400	15.70	14.7	10.0	[6]
太原	281	7.3	—	14.20	2.1	2.8	[9]
合肥	381	7.5	—	48.00	12.0	—	[7]
昆明	567	7.4	—	48.80	62.6	5.1	[10]
CJ/T 309	≥ 200	5.5~9.0	—		总量 ≥ 30		
CJ/T 291	≥ 100	6.5~10.0	—		总量 ≥ 10		
GB/T23486	≥ 250	6.5~8.5 ^a 或5.5~7.8 ^b	—		总量 ≥ 30		
全国平均值	372	—	—	2.53	13.2	6.9	[11]

注:a为酸性土壤;b为中性和碱性土壤。

污泥中有机质含量较高,我国城市污泥有机质含量最高达 696 g/kg,平均值为 372 g/kg,82% 的污泥有机质含量超过猪厩肥^[12]。污泥中含有植物不可缺少的 N、P、K 等有效成分,1 t 干污泥养分含量相当于 100 kg 硫酸铵、100 kg 过磷酸钙和 16 kg 硫酸钾^[13]。

1.2 污泥污染特性

污泥的污染特性主要由于污泥中含有重金属、有机污染物和病原菌等有毒有害物质。表 2 为我国部分城市污泥中污染物含量。污泥中含有多种重金属,主要有 As、Cd、Cr、Pb 和 Zn 等,是污泥资源化利用的主要障碍^[14-16]。由于重金属具有易累积、难迁移、危害大等特点已经成为制约污泥农业利用的最主要因素^[14],也是限制其土地利用的主要因素之一。

表 2 我国部分城镇污泥中污染物含量

地区	主要重金属含量(mg/kg)					苯并(a)芘 (mg/kg)	多环芳烃 (mg/kg)	粪大肠菌群值 (g或mL)	来源文献
	As	Cd	Cr	Pb	Zn				
北京	17.0	2.9	82.0	105	1 010.7	—	—	—	[17]
广州	—	1.3	1 151.3	82.5	2 138.0	—	—	—	[8]
上海	5.7	0.8	15.8	9.9	3 740.0	—	—	—	[18]
天津	89.0	0.7	728.0	15.0	1 095.0	—	—	—	[18]
昆明	14.2	3.4	133	72.4	533	<0.25	<0.005	—	[10]
沈阳	8.7	5.0	219.0	253.6	292.5	—	—	—	[13]
宁波	—	1.9	111.4	58.9	1 652.4	0.93	—	—	[19]
CJ/T 309 ¹	<75	<15	<1 000	<1 000	<3 000	<3	<6	≥ 0.01	
CJ/T 291	75 ^a	5 ^a	600 ^a	300 ^a	2 000 ^a	<3 ^a	<0.2 ^a	>0.01 ^a	
GB/T 23486	75 ^b	20 ^b	1 000 ^b	1 000 ^b	4 000 ^b	<3 ^b	<0.2 ^b	>0.01 ^b	

注:1为《CJ/T309—2009 城镇污水处理厂污泥处置农用泥质》B 级标准;a 为酸性土壤;b 为中性和碱性土壤。

污泥因其来源于各种污水,不可避免含有多种有机污染物^[20],如氯酚(CPs)、苯氯(CBs)、多氯联苯(PCBs)、硝基苯(NBs)、邻苯二甲酸酯(PEs)、多氯代二苯并二噁英/呋喃

(PCDD/Fs)、多环芳烃(PAHs)和有机氯农药(OCPs)等^[14,21-22]。污泥土地利用会增加土壤中 PAHs 的浓度,从而可能引发严重的食物链污染事件,PAHs 已被列为污泥中重

要有机污染物的检测目标。莫测辉等测定了我国内地和香港地区共 11 个污泥样品中的 PAHs 含量,范围在 2.27 ~ 143.80 mg/kg 之间,其含量已高于香港及国外一些污泥,部分污泥中苯并(a)芘含量超过了我国农用污泥标准^[23]。PAHs 单体以 3、4 环的检出率和含量较高,2、5、6 环则较低^[14,23]。污泥施用后,PAHs 会被土壤吸附,在大多数植物器官中检测到 PAHs,从而一部分进入食物链^[24-25],PAHs 的去向和转化表明其对生物及人类存在潜在危害。

污泥中一般都能检测病原物(主要包括细菌、病菌、病毒、原生动物和寄生虫)。USEPA 及其他组织对污泥中存在的病原物进行统计,发现污泥中至少有 24 种细菌、7 种病毒、5 种原生动物和 6 种寄生虫^[26]。对长江三角洲地区 15 个城市的 45 个污水处理厂污泥的检测表明,污泥中粪大肠菌群检出率达到 89.6%,平均值为 3.79×10^5 MPN/g(干基)^[27]。以生活污水和混流污水为主的污泥中粪大肠菌群数量最高^[28]。当污泥未经处理便施用于土地时,污泥中病原菌会同污泥一起进入土壤环境,增加土壤中病原菌的含量,从而极可能会造成周围环境污染,威胁人类健康。

2 矿山废弃地生态环境问题及修复现状

2.1 矿山废弃地生态环境问题

矿山废弃地是一类特殊的退化的生态系统,由于受到人为的巨大干扰,超出了原有生态系统的修复容限^[29]。矿山废弃地分为精矿筛选后剩余岩石碎块和低品味矿石堆积而成的废石堆、尾矿砂形成的尾矿库、矸石堆积的矸石山和剥离物压占陡坡排岩场/排土场^[29-31]。矿山废弃地生态环境问题主要表现为:(1)土壤基质物理结构不良,持水保肥能力差,导致缺乏植物能够自然生根和伸展的介质^[29];(2)N、P、K 及有机质等营养物质不足^[29,31-33];(3)存在重金属、高盐分等有毒有害物质限制植物生长^[29,34-35];(4)地表土极端 pH 值或盐碱化等环境条件使得植被难以生长^[31,36]。

2.2 矿山废弃地生态修复现状

矿山废弃地生态修复首要问题是改良矿山废弃地的基质,主要有表土覆盖技术、物理化学基质改良技术、生物改良技术。

表土覆盖技术能够为植被恢复提供良好的土壤结构、水分以及较高的养分,同时表土中包含了当地植被的种源,是常用且较为有效的修复措施。卞正富等以开滦矿区废弃地为试验区,通过条带式或全面覆土较好地控制了煤矸石的酸性^[37]。Holmes 等研究表明,10 cm 覆土能使植物的覆盖度上升至 75%,30 cm 覆土植物覆盖度达到 90%^[38]。在超过覆土厚度一定范围后,修复效果增长反而不显著^[29]。尽管表土覆盖修复效果显著,但是也存在着费用成本较高等问题,主要由于涉及大量工程作业,覆土厚度越厚,工程量越大,费用越高。

物理化学基质改良技术是针对矿山废弃地主要问题,通过添加某种物质,改变矿山废弃地基本理化性质,使其满足土壤恢复的基本条件。若矿山废弃地 pH 值过高,可加入硫磺、石膏、硫酸亚铁等;在 pH 值较低的废弃地,施用石灰、石灰石、粉煤灰可以有效提高 pH 值。矿山废弃地还缺少有机质、N、P 等养分,需要在废弃地中加入肥料。在矿山废弃地修复的初期,施肥能显著提高植被的覆盖度,尤其是在无表土覆盖

的矿山^[29]。然而,化肥的肥效较短,暂停施肥后,植被覆盖度、物种数和生物量都会显著下降。因此,物理化学基质改良需要长期的人力、物力投入才能保持修复效果^[29,39]。

生物改良技术是在废弃地中加入一些生物和微生物(蚯蚓、鼠类、假单胞菌属、藻类等)^[40-41]。蚯蚓和鼠类对土壤的机械翻动对土壤起到疏松、搅拌的效果,改善土壤的结构;同时排出的粪便,含有丰富的有机质和微生物群落,改善土壤肥力;另外,蚯蚓能吸收土壤中的重金属,对锌和镉有良好的富集作用^[42],待其富集后,再对蚯蚓集中处理,对重金属污染有一定的治理效果^[40]。复垦时种植一些根系发达、耐旱的植物如草木樨、薰衣草、紫花苜蓿等可以改良熟化土壤,绿肥植物的根部有根瘤菌,根系腐烂后可提高土壤的团聚、胶结性能,改善矿区废弃地基质的结构和肥力,改良黄土地地区土质^[43-45]。接种菌技术也应用于矿地基质改良中。由于根部真菌的活动显著增加了微生物菌群的活性,改善了植物根部周围的微生态环境,显著提高了复垦植被及造林的成活率^[46]。虽然,生物措施可改善矿山废弃地土壤的有效环境,但是这种效果缓慢,且易收到外界环境的干扰,在极端贫瘠、环境恶劣的矿区很难适用。

3 污泥用于矿山废弃地生态修复技术研究

3.1 直接施用

直接施用是将未经处理的污泥直接施用在土地上,这曾经是美国及大多数欧洲国家普遍采用的处理方法。污泥也可施用于各种人为活动严重扰动的土地,如采煤矿、尾矿坑以及已退化的土地、垦荒地、滑坡与其他因自然灾害而需要恢复植被的土地^[47]。通过对煤矿废弃地上施用污泥,提供了植被生长所需的有效养分,改善了土壤耕种性,增加了土壤的透水性^[48]。另外,有学者对污泥直接施用于农田、林地、退化土地的修复开展了很多积极的研究。污泥直接施用于农田,虽改善了农田土壤物理性质、增加了土壤有机质和氮磷水平,但是污泥中重金属以及病原菌仍可能对人体造成间接危害,以及污泥中硝酸盐可能会污染地下水^[49-50]。污泥直接施用于林地可促进花卉、草坪和树木的生长,并不易构成食物链污染,但随施用次数以及施用量的增加,污泥中硝态氮和重金属含量有所增加^[51]。污泥直接施用于退化土地也取得了良好效果。污泥对于防治土壤沙漠化、整治沙丘以及被酸雨破坏地区的植被恢复均为一种优质材料^[52-53]。

3.2 间接施用

由于污泥的含水率较高、易腐烂,含有病原菌、重金属及有机污染物等毒性有机物,在土地利用之前进行稳定化处理是十分必要的。

3.2.1 污泥稳定化 污泥稳定化是在堆肥原料中添加稳定剂,通过改变 pH 值、吸附等,与重金属反应形成稳定结构等一系列作用,使污泥中的重金属由生物可利用态向生物不易利用态转化,达到降低堆肥产物土地施用后产生深度毒性的目的^[54]。常用的稳定剂包括:粉煤灰、磷矿粉、草炭、沸石、黏土、植物多酚等。国内外学者对重金属稳定剂的种类和添加量、稳定化效果都做了积极探索,在实际生产及应用中筛选稳定剂,除了考虑处理效果因素外,还必须考虑作物增产、稳定剂来源、价格等问题。

3.2.2 污泥消化后农用于近年来,随着污泥消化技术的进一步提高,如机械浓缩和高浓度消化的结合、搅拌和热效的改善,完全的厌氧二项消化法使消化发酵时间大大缩短,甲烷发生量和消化效率提高。消化后污泥中的部分有害病原菌大大减少,增加了污泥的稳定性^[47]。王才对消化后污泥中的重金属进行了分析和检测,结果表明,消化后的污泥均符合《农用于污泥中污染物控制标准》(GB 4284—1984)要求。

3.2.3 污泥堆肥后土地利用 污泥堆肥是依靠自然界中微生物,人为控制可被生物降解的有机物向稳定的腐殖质转化的生物学过程^[55]。污泥堆肥化的 2 个目的是灭菌和稳定化,影响污泥堆肥的因素较多,主要包括初始含水率、通风条件、温度、C/N、pH 值和外界微生物菌剂,主要工艺参数和范围见表 3。

表 3 污泥堆肥工艺主要参数和范围^[55,58]

主要参数	范围
初始含水率	45% ~ 70%
通气量	含氧量为 5% ~ 15%
温度	45 ~ 70 ℃, 55 ℃ 以上至少保持 3 d
C/N 比	20 ~ 35
pH 值	6 ~ 9 (一般不需要控制)
外加微生物菌剂	复合菌剂、VT 菌剂、维生素分解菌剂等

除污泥作为堆肥基质之外,还应加入调理剂和膨胀剂,目的是保证堆肥过程对碳源和氧气的需求。常用调理剂包括稻草、秸秆、树叶、木片、锯末和回流堆肥等^[56];常用膨胀剂包括轮胎碎块、花生壳、玉米芯、截断的玉米秸秆等^[57]。一般认为,污泥堆肥要求物料初始含水率应控制在 50% ~ 65%,脱水污泥含水率为 80% 左右,须通过添加辅料或污泥干化来降低初始物料的含水率。另外,堆肥的自动化控制系统极大地提高了污泥堆肥的效率与成功率,缩短堆肥周期且堆肥产品稳定性更佳。堆肥后的污泥比较疏松,无明显恶臭,有机质含量在 250 g/kg 以上,pH 值在 6.5 ~ 8.0 之间,重金属、病原菌含量均大幅度降低,基本符合园林绿化介质土的准入^[2]。

污泥还可与城市垃圾、粉煤灰混合堆肥。污泥与城市垃圾混合高温堆肥的工艺(两者体积比为 4 : 7^[59])分为预处理、一次堆肥、二次堆肥和后处理 4 个阶段^[60]。一次堆肥在发酵仓内进行,混合料含水率 50% ~ 60%,污泥与垃圾混合质量比 1 : (2.8 ~ 3.5),C/N 比为 30 ~ 40。二次堆肥是从发酵仓取出的混合料自然堆成 1 ~ 2 m 高的堆垛进行二次发酵,温度稳定在约 40 ℃ 即可腐熟。腐熟后,混合料呈黑褐色,无臭味,手感松散,颗粒均匀^[47]。污泥与粉煤灰混合堆肥可降低混合料含水率(降至 20% 作用),污泥与粉煤灰质量比为 1 : 0.6,加入锯末、秸秆作为膨胀剂进行自然堆肥发酵,堆肥结束后施用在大葱、芥菜等蔬菜田地,施用效果显著^[47]。

3.2.4 污泥制复混肥 将干化后的污泥按照体积比 1.5 : 4 与氯化铵、过磷酸钙、氯化钾等单项养分较低的化肥混合,经破碎、过筛、称质量、混匀、造粒等步骤,挤压成 5 mm 长的圆柱状颗粒,总浓度为约 25% 的低浓度三元复混肥。在桑树、水稻和小麦的田间小区试验中,在养分提供数量和配比相同的情况下,污泥复混肥与单体化肥、化肥复混肥均具有相同的增产效果^[60]。周立祥等研究认为,应尽量使污泥卫生无害化,不宜直接施用在菜地,并控制适当施用量,污泥经过堆肥

后,再与化肥制成复混肥,经济效益高且对环境的影响小^[61]。

4 污泥用于矿山废弃地生态修复技术的环境安全性分析

污泥用于矿山废弃地生态修复主要障碍在于污泥中的重金属元素,施用后在土壤中积累,在特定环境条件下可能造成土壤和地下水污染,重金属被植物吸收与富集造成环境风险问题。世界各国均高度关注污泥土地利用中重金属的环境安全性问题,我国在此方面开展污泥土地利用环境安全性的长期系统研究较为薄弱,但是已开展了相关研究工作,主要围绕污泥堆肥重金属的释放潜能、重金属浸出特性与形态分析、重金属向植物及土壤深处迁移能力等的研究。

4.1 污泥堆肥重金属释放潜能

通过动态淋滤试验可以更好地模拟在动态降雨条件下重金属的释放情况,采用动态淋滤柱收集不同累积固液比下的淋滤液,测定溶液中重金属浓度。

刘文杰对昆明污泥堆肥产品土地利用研究发现,在模拟自然降雨渗流的试验中,在污泥堆肥存在于土壤中的 2.5 年内,其中所含重金属的累积释放量相比其总量而言还是非常低^[62]。在模拟连续 1 年酸雨渗流的极端不利条件下,Cu 和 Ni 浸出浓度随酸雨淋洗时间的延长而下降,而 As、Pb、Cd 和 Cr 的浸出浓度随酸雨淋洗时间的延长先升高后降低,具有一定的滞后性,各污泥堆肥施用量条件下的浸出液中的其他重金属含量均符合地下水Ⅲ类水标准,即可以用于集中式生活饮用水水源和工、农业用水。与模拟自然降雨渗流的试验结果相比,污泥直接用作培育基质具有较大的重金属释放潜力,而与土壤混掺并借助下部土壤对重金属的吸附阻隔作用,对地下水水质不构成威胁。

4.2 污泥堆肥重金属的浸出特性及形态变化

对于污泥堆肥重金属浸出特性及形态变化研究较多,主要是反映形态含量变化,缺少不同 pH 值条件下重金属形态变化及释放形态研究。Fang 等基于污泥堆肥、土壤以及混掺基质重金属浸出随 pH 值变化的试验结果,结合所含的控制重金属沉淀-溶解平衡的矿物含量、溶解性有机质含量、腐殖质含量等基本信息,使用 LeachXSTM 软件对污泥堆肥、土壤、掺混基质中的重金属以及浸出液中的重金属形态进行了分析,模拟分析结果见图 3^[63]。

在酸性 pH 值条件下,Ni 和 Pb 主要以颗粒有机物键合态吸附于土壤颗粒表面;碱性条件下,伴随有机质的溶出,铁、锰氧化物结合态是重金属存在于固相的主要形态。尽管污泥堆肥与土壤的重金属形态分布比例存在差异,但污泥堆肥在 48 t/hm² 施用量的前提下并未改变混掺基质中的重金属形态分布,污泥堆肥带来的活性吸附表面(颗粒态有机物、铁锰氧化物)以及硅酸盐等的含量增加并不显著,不稳定的吸附态重金属含量增幅可以忽略,由此带来的重金属浸出风险不高。污泥堆肥浸出的重金属形态与土壤类似,主要是溶解性有机物结合态(DOM-bound)和游离态,表明污泥中的重金属和土壤重金属主要通过有机物络合和离子交换过程进行迁移释放^[63]。

4.3 污泥重金属向植物及土壤深处迁移能力

污泥重金属迁移能力研究能够反映同一块土地上反复施用污泥后土壤重金属的转化、积累情况。生骏通过对不同污

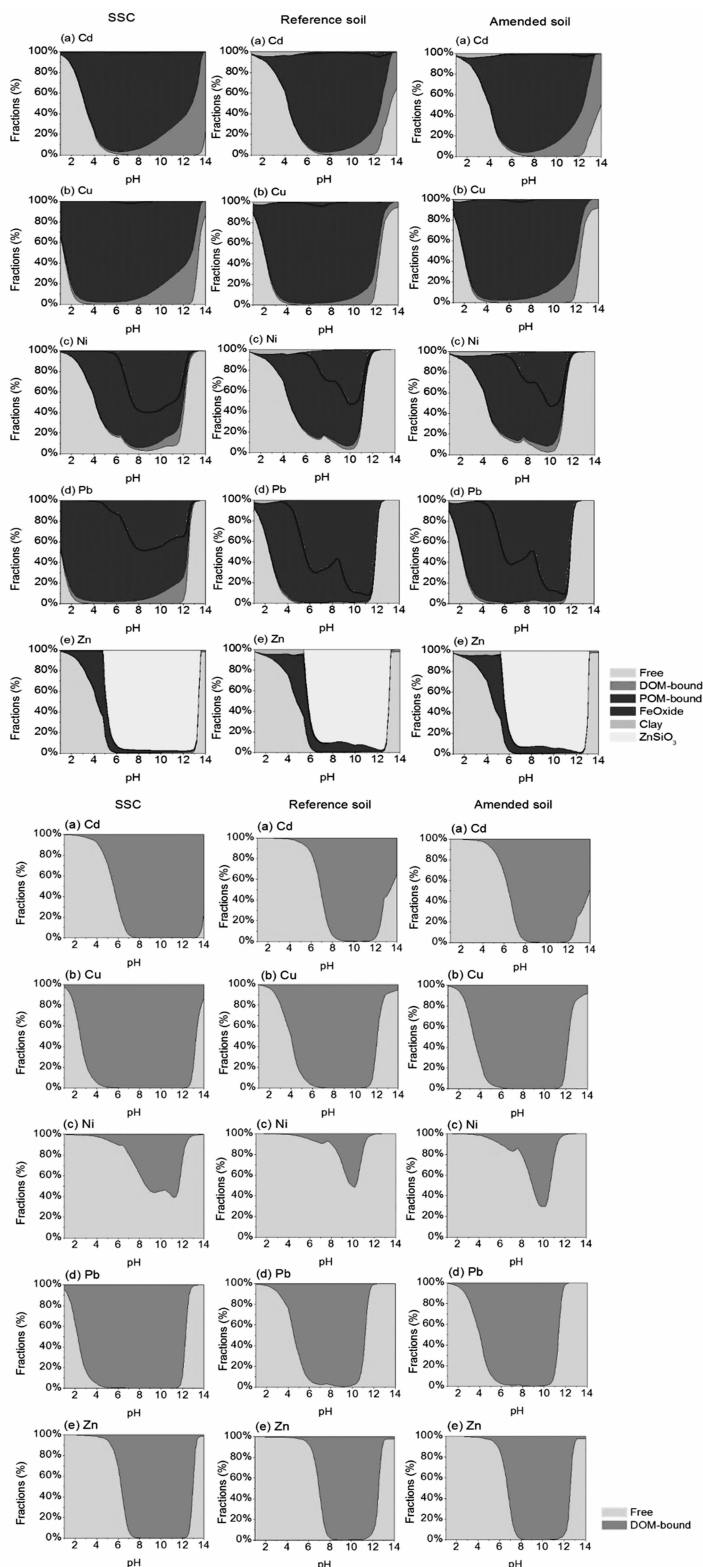


图3 污泥堆肥(SSC)、土壤(reference soil)及混掺基质(amended soil)重金属形态分布(上)与释放重金属形态分布(下)^[63]

泥施用量的土壤上种植苜蓿和黑麦草研究重金属的迁移能力,结果表明,植物体内的重金属含量与土壤中的重金属含量变化趋势相同,重金属危害较大^[54]。采用粉煤灰对污泥进行稳定化,污泥中的 Cd、Pb 以活性弱的有机结合态和残渣态为主,且有效含量较低,这表明污泥稳定化后应用于矿山废弃地

植被恢复过程对植物的毒性作用较小,潜在风险性小^[13]。刘文杰对污泥堆肥产品中重金属对土壤和地下水潜在影响的研究表明,随着污泥堆肥施用量的增加,污泥堆肥产品中残留在土壤中的重金属占土壤含有的重金属总量的比例增加,而被洗出的比例减少;在增加污泥堆肥产品施用量或多年连续施

用污泥堆肥时,淋出液中来自污泥堆肥产品的重金属比例将会增加;重金属在淋洗初期的释放主要由重金属在淋洗液中的溶解度控制,在后期逐渐转化为由土壤-污泥堆肥体系对重金属的吸附作用控制;pH 值不是土壤重金属释放的主要控制因素^[62]。

未施用污泥堆肥的土壤中的重金属主要分布于表层 20 cm 的土层中,重金属浓度随着土层深度增加总体下降。另外,季节性降雨也导致少部分表层重金属向下迁移,但迁移深度有限。土壤施用污泥堆肥后,其重金属含量的空间分布与未施用堆肥相似,施用量并未引起土壤重金属浓度增加,重金属向深层土壤迁移的有效长度不超过 30 cm,由于重金属在 pH 值 6~8 范围内以溶解性有机物结合态为主,它在向下迁移过程中很容易与土壤颗粒表面键合,发生二次修复,从而阻止其向下进一步迁移^[62-63]。

4.4 污泥中其他污染物

污泥堆肥后使用,如果过量施用会使得土壤中 PAHs 残留增加。降低污泥中 PAHs 较有效的方法是好氧堆肥。经过 50 d 的好氧堆肥,16 种美国 EPA 优控的 PAHs 总量减少了 79%,欧盟规定的 Σ 9PAHs 含量降低至 11.5 mg/kg。微生物的降低对 PAHs 的有效去除起到了决定性作用。堆肥后污泥中 3 种主要 PAHs 组分中,菲、二苯并(a)蒽和芘去除率达到了 92.8%、83% 和 30%。污泥堆肥后使用,种植黑麦草较高羊茅,土壤中 PAHs 残留的含量均显著降低^[19],因此,污泥高温堆肥对于提高污泥中有机污染物对施用土壤的环境安全性。

污泥的高盐量会明显提高土壤的导电率,过高的盐分会

破坏养分之间的平衡,抑制植物对养分的吸收,离子之间的拮抗作用也会加剧土壤的 K、NO₃、NH₄ 等有效养分的流失。污泥经过堆肥处理后,盐分会明显下降,污泥可用性提高。研究发现,电导率随污泥堆肥施用量的增加而增加,随着时间的延长而降低,在第 2 个生长季节,大多数植物对土壤的盐分的忍耐性增强^[64-67]。在污泥施用量小于 120 t/hm² 时,随之而带入的盐分对植物不会造成危害,硝酸盐不会对地下水造成污染^[58]。

未经处理的污泥含有较多的病原菌生物和寄生虫,污泥经堆肥化后,病原菌、寄生虫卵、杂草种子等几乎全部被杀死^[68]。辐射处理、巴氏灭菌等也常用于污泥的灭菌处理。厌氧消化、干燥法及超声波处理等虽有一定的杀菌效果,但存在着杀菌不完全或其他缺点^[68]。

5 污泥用于矿山废弃地成本分析与经济效益评价

污泥无害化和稳定化处理成本为 150~250 元/t(含水率 80%),此成本未考虑污泥施用于矿山废弃地后的产品产出收入,同时也不包括因未来物价水平波动可能造成的收支调整。总体而言,在条件许可的情况下,相比于污泥的其他利用方式,土地利用是比较经济可观的途径之一,特别是污泥用作有机肥料、园林与公路绿化、矿山生态修复和林地等途径时,经济效益较为明显(表 4)。若结合区域背景,可作为污泥土地利用的推荐途径。如果将应用面积和规模考虑在内,矿山生态恢复则是合适的污泥土地利用途径,其污泥消耗量大、应用前景更为广泛。

表 4 污泥土地利用方式成本分析与经济效益

用途	成本	节支	效益
有机肥料	包装 20 元,加工 120 元,运费 80 元	替代有机肥 1 t,600 元	380 元
育苗基质	包装 20 元,运费 80 元	替代常规基质 1 t,300 元	200 元
矿山生态恢复	运费 160 元	替代修复材料 2 t,200 元	40~400 元
草坪	运费 80 元	替代土壤或基质 1 t,300 元	220 元
园林与公路绿化	包装 20 元,运费 80 元	替代有机肥 1 t,500 元	400 元
林地	运费 60 元	替代有机肥 1 t,500 元	340 元

根据矿山废弃地形成的原因不同,对于其生态修复必须因地制宜。以贵州磷矿山废弃地为例^[69],其生态修复包括土地平整和植被措施两大部分。土地平整设备采用矿山采运设备组成部分。土地平整先用大型挖土和推土填坑推平,同时修筑道路和田埂。为满足耕地要求,还需要进行多次平整和裂纹处理。边坡土地平整是在坡面上覆土,平均厚度 20~30 cm。根据工程投资概算,土地平整费用所需费用大约 4.0 万元/hm²。植被措施包括挖坑、购苗、培养、栽植和管护(3 年以上)。植被的筛选优先筛选本地性植被,结构上体现出草本、灌木、乔木的符合性搭配,针叶树与阔叶树混交的模式。在磷矿山废弃地可选用的草本有高羊茅、紫羊茅、黑麦草等作为先锋草本植物,采用撒播方式种植。边坡乔木选用杨树、松树等乔木,采用鱼鳞坑布置,选用 I 级乔木树苗带土移栽,1 hm² 土地乔木约 600 株,每株种植成本按照 50 元计算,投资金额为 3 万元/hm²。若矿山每年修复 40 hm² 废弃地,总投资为 280 万元,其中土地平整为 160 万元,占投资的 57%,植被措施占总投资的 43%。

粗略估算,目前我国人为因素破坏的矿山废弃地约为 1 333 万 hm²,这些被破坏的土地多数为基本农田,集中连片,水、电、路等基本条件较好。如果能按照“因地制宜,综合整治”的原则,采用城市污泥用于矿山废弃地的生态修复,则可产生巨大的社会 and 经济效益,约有 60% 以上的废弃地可复垦为耕地,每年新增粮食 270 亿 kg;30% 可恢复为其他农用地,可新增产值 405 亿元;10% 可恢复为建设用地,满足我国 4~5 年的建设需要。

6 我国污泥用于矿山废弃地中应注意的管理问题

发达国家高度关切污泥土地利用的环境安全性问题,特别是污泥用在矿山废弃地生态修复方面,在长期系统研究的基础上和实践过程中出台了相应的管控标准。目前,我国污泥在矿山废弃地生态修复方面还处于起步阶段,虽出台一些规范和标准,但大多数施用者对污泥的施用方法存在着随意性和盲目性,这样势必会造成局部的环境污染、区域经济发展与民生不和谐等问题。根据前人的研究和应用现状,我国在

污泥用于矿山废弃地生态修复管理方面还需要注意几下几个方面:

6.1 注重污泥质量与施用量

污泥土地利用的要求是有害成分尽可能低、有效养分充足。符合这样条件的污泥仍是少数,即使每种污泥经过了稳定化处理后,仍存在一定的环境风险,但经过稳定化处理或者无害化处理后,根据不同土壤条件对污泥污染物的环境容量、不同植物种类对污泥养分需求程度,适当地控制污泥施用量,可极大地发挥污泥对土地利用的积极作用,减少环境风险。

6.2 加强长期环境监测

污泥中的有毒有害物质进入矿区土地后,一般不会立刻表现,如施用 1 次污泥后,土壤中重金属的含量不会增加很多、植被中吸收的重金属含量也较小,N、P 元素短期内土壤迁移面迁移量也较小。如果长期施用或者累积施用,其不利影响可能会逐渐明显地表现出来。因此,应该长期定位检测,不但关注有害成分在土壤中的行为变化和植被中有害成分的富集行为,还应该关注地下水或者附近地表水中有害成分浓度变化,为准确评估污泥的长期环境安全性使用提供技术支撑与数据依据。

6.3 完善修复机制与资金渠道

矿山废弃地生态修复涉及设计、矿山、土地、环境、林业、农业等多方面,单一部门很难协调与管理跨部门矿山废弃地生态恢复工作,在管理中容易出现推诿、拖延等现象,借鉴国外经验建立一个统一权威管理部门,实施统一管理。矿山废弃地修复一般需要较大的资金投入,需健全矿山修复保证金制度,相关部门应该积极鼓励公众参与到修复主体中,引进社会资源参与矿区土地修复,多渠道筹集社会资金,专门用于矿山废弃地修复。发达国家的矿山修复经验表明,这是解决矿山废弃地生态修复最行之有效的方法^[70]。

7 结语

我国矿山废弃地生态修复虽起步较晚,但经过几十年的研究与实践,也取得了一些成果,由于矿山废弃地立地条件的差异性、地带性差异,致使修复中存在着种种难题,修复任务十分艰巨。污泥是一种很有利用价值的潜在资源,利用稳定化后污泥修复矿山废弃地是实现矿山生态修复的有效途径,是解决大量污泥处置问题的一种较有发展前景的途径。然而,目前尚未形成鉴定矿山废弃地生态修复程度的评价体系,对污泥矿山生态修复的环境安全性做出客观、确切的评价和判断。在国内外相关研究成果的基础上,通过污泥土地利用中重金属释放潜能、浸出特征与形态行为研究、释放迁移能力等研究,以及盆栽和大田试验表明,污泥稳定化后应用于矿山生态修复具备技术安全性,可同步实现污泥安全资源化利用和矿山废弃地的快速生态修复。鉴于污泥用于矿山生态修复研究与应用等方面的种种问题,若要实现污泥安全利用的目标,在良好的生态修复管理体制基础上,仍需要科研部门、环保等政府部门、污泥产生与使用者等各个环节通力合作才能真正实现。

参考文献:

[1] 王兴润. 国内外城镇污水厂污泥处理情况及我国有关经济技术

政策[R]. 中国环境科学研究院,2009.

- [2] 张培玉,刘 略. 城市污水处理厂污泥的综合利用与资源化[J]. 环境科学与技术,2009,32(12):109-112.
- [3] 刘洪涛,郑海霞,陈 俊,等. 城镇污水处理厂污泥处理处置工艺生命周期评价[J]. 中国给水排水,2013,29(6):11-13.
- [4] 府灵敏,周艳文. 城市污水处理厂污泥作为矿山废弃地复垦土壤基质的可行性分析[J]. 污染防治技术,2011,24(4):10-12.
- [5] 孙 曦. 农业化学[M]. 北京:农业出版社,1982.
- [6] 黄雅曦,李 季,李国学,等. 污泥资源化处理与利用中控制重金属污染的研究进展[J]. 中国生态农业学报,2006,14(1):156-158.
- [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] 莫测辉,蔡全英,王江海,等. 城市污泥在矿山废弃地复垦的应用探讨[J]. 生态学杂志,2001,20(2):44-47.
- [9] 尹 军,陈 雷,王鹤立. 城市污水的资源再生及热能回收利用[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- [10] 武淑文,胡慧蓉,杨迎冬. 昆明城市污泥性质及土地利用方式探讨[J]. 安徽农业科学,2011,39(15):9379-9381.
- [11] 何志锋. 城市污水污泥应用于废弃地生态恢复研究[D]. 南京:南京林业大学,2008.
- [12] 李红霞,林文波,李玉庆,等. 臭氧作用对污水厂剩余污泥中碳、氮、磷的影响[J]. 环境化学,2011,30(5):1053-1054.
- [13] 江树志. 城市污泥用于矿山废弃地植被恢复的试验研究[D]. 北京:清华大学,2009.
- [14] 申荣艳,骆永明,滕 应,等. 城市污泥的污染现状及其土地利用评价[J]. 土壤,2006,38(5):517-524.
- [15] Goi D, Tubaro F, Dolcetti G. Analysis of metals and EOX in sludge from municipal wastewater treatment plants: a case study[J]. Waste Management, 2006, 26(2):167-175.
- [16] Udom B, Mbagwu J, Adesodun J, et al. Distributions of zinc, copper, cadmium and lead in a tropical ultisol after long-term disposal of sewage sludge[J]. Environment International, 2004, 30(4):467-470.
- [17] 齐洪涛,伏亚萍,李 萍. 北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染[J]. 环境科学,2014,35(12):4648-4654.
- [18] 王敦球. 城市污水污泥重金属去除与污泥农业资源化试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2004.
- [19] 花 莉. 城市污泥堆肥资源化过程与污染物控制机理研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
- [20] McIntyre A, Lester J. Occurrence and distribution of persistent organochlorine compounds in UK sewage sludges[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1984, 23(4):397-415.
- [21] Harrison E Z, Oakes S R, Hysell M, et al. Organic chemicals in sewage sludges[J]. Science of the Total Environment, 2006, 367(2):481-497.
- [22] Webber M, Lesage S. Organic contaminants in Canadian municipal sludges[J]. Waste Management and Research, 1989, 7(1):63-82.
- [23] 莫测辉,蔡全英,吴启堂,等. 城市污泥中有机污染物的研究进展[J]. 农业环境保护,2001,20(4):273-276.
- [24] Wild S, Berrow M, McGrath S, et al. Polynuclear aromatic hydrocarbons in crops from long-term field experiments amended with sewage sludge[J]. Environmental Pollution, 1992, 76(1):25-32.

- [25] Ryan J, Bell R M, Davidson J, et al. Plant uptake of non – ionic organic chemicals from soils [J]. *Chemosphere*, 1988, 17 (12) : 2299 – 2323.
- [26] Agency U S E P. Biosolids generation, use and disposal in the United States [R]. Washington DC: Office of Solid Waste Response Emergency, 1999.
- [27] 孙玉焕. 长江三角洲地区污水污泥化学组成, 病原生物学特性和土壤利用风险研究 [D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2005.
- [28] 孙玉焕, 骆永明, 吴龙华, 等. 长江三角洲地区污水污泥与健康安全风险研究——I. 粪大肠菌群数及其潜在环境风险 [J]. *土壤学报*, 2005, 42 (3) : 397 – 403.
- [29] 张鸿龄, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 矿山废弃地生态修复过程中基质改良与植被重建研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2012, 31 (2) : 460 – 467.
- [30] 胡振琪, 戚家忠, 司继涛. 不同复垦时间的粉煤灰充填复垦土壤重金属污染与评价 [J]. *农业工程学报*, 2003, 19 (2) : 214 – 218.
- [31] Li M. Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: a review of research and practice [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 357 (1) : 38 – 53.
- [32] 张乃明, 武雪萍. 矿区复垦土壤养分变化趋势研究 [J]. *土壤通报*, 2003, 34 (1) : 58 – 60.
- [33] Cornwell S, Stone E. Availability of nitrogen to plants in acid coal mine spoils [J]. *Nature*, 1968, 217: 768 – 769.
- [34] 崔龙鹏, 白建峰, 史永红, 等. 采矿活动对煤矿区土壤中重金属污染研究 [J]. *土壤学报*, 2004, 41 (6) : 896 – 904.
- [35] 于君宝, 刘景双. 矿山复垦土壤重金属元素时空变化研究 [J]. *水土保持学报*, 2000, 14 (4) : 30 – 33.
- [36] 张 溪, 周爱国, 甘义群, 等. 金属矿山土壤重金属污染生物修复研究进展 [J]. *环境科学与技术*, 2010, 33 (3) : 106 – 112.
- [37] 卞正富, 张国良. 矿山土复垦利用试验 [J]. *中国环境科学*, 1999, 19 (1) : 81 – 84.
- [38] Holmes P M, Richardson D M. Protocols for restoration based on recruitment dynamics, community structure, and ecosystem function: perspectives from South African fynbos [J]. *Restoration Ecology*, 1999, 7 (3) : 215 – 230.
- [39] Ye Z, Yang Z, Chan G, et al. Growth response of *Sesbania rostrata* and *S. cannabina* to sludge – amended lead/zinc mine tailings: a greenhouse study [J]. *Environment International*, 2001, 26 (5) : 449 – 455.
- [40] 林春梅. 重金属污染土壤生物修复技术研究现状 [J]. *环境与健康杂志*, 2008, 25 (3) : 273 – 275.
- [41] Butt K R, Frederickson J, Morris R M. An earthworm cultivation and soil inoculation technique for land restoration [J]. *Ecological Engineering*, 1995, 4 (1) : 1 – 9.
- [42] 于 颖, 周启星. 污染土壤化学修复技术研究与进展 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2005, 6 (7) : 1 – 7.
- [43] 邹晓锦, 仇荣亮, 黄穗虹, 等. 广东大宝山复合污染土壤的改良及植物复垦 [J]. *中国环境科学*, 2008, 28 (9) : 775 – 780.
- [44] 过仕民. 杨山冲尾矿库无土植被及其效果 [J]. *有色金属*, 2004, 56 (41) : 126 – 129.
- [45] 王晓利, 曾正中, 王厚成, 等. 污泥处理处置及资源化方法探讨 [J]. *环境工程*, 2014 (3) : 37 – 41.
- [46] Noyd R K, Pflieger F, Norland M R. Field responses to added organic matter, arbuscular mycorrhizal fungi, and fertilizer in reclamation of taconite iron ore tailing [J]. *Plant and Soil*, 1996, 179 (1) : 89 – 97.
- [47] 黄雅曦, 李 季, 李国学. 污泥处理与资源化利用现状分析 [J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22 (6) : 765 – 768.
- [48] Metropolitan Water Reclamation District of Greater Chicago's experience on beneficial use of sewage sludge – assessing the impacts upon water, soil and crops [C]. *Proceeding of 15th World Congress of Soil Science Symposium*. Mexico: International Society of Soil Science and Mexical Society of Soil Science, 1994: 13 – 19.
- [49] 王敦球, 解庆林. 城市污水污泥农用资源化研究 [J]. *重庆环境科学*, 1999, 21 (6) : 50 – 53.
- [50] 周立祥, 胡霁堂. 城市生活污泥农田利用对土壤肥力性状的影响 [J]. *土壤通报*, 1994, 25 (3) : 126 – 129.
- [51] 张天红, 薛澄泽. 西安市污水污泥林地施用效果的研究 [J]. *西北农业大学学报*, 1994, 22 (2) : 67 – 71.
- [52] 莫测辉, 吴启堂, 蔡全英, 等. 利用城市污泥防治水土流失 [J]. *土壤与环境*, 1999, 8 (1) : 66 – 70.
- [53] Sort X, Aleaniz J. Contribution of sewage sludge to erosion control in the rehabilitation of limestone quarries [J]. *Land degradation & development*, 1996, 7 (1) : 69 – 76.
- [54] 生 骏. 污泥堆肥中重金属稳定化剂堆肥产物在土壤中的行为研究 [D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [55] 竺壮凌. 污水厂污泥用于废弃地植被恢复可行性研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- [56] 张 军, 雷 梅, 高 定, 等. 堆肥调理剂研究进展 [J]. *生态环境*, 2007, 16 (1) : 239 – 247.
- [57] 许 民, 杨建国, 李宇庆, 等. 污泥堆肥影响因素及辅料的探讨 [J]. *环境保护科学*, 2004, 30 (5) : 37 – 40.
- [58] 张增强, 薛澄泽. 城市污水污泥的堆肥化与资源化 [J]. *环境保护*, 1997, (7) : 12 – 15.
- [59] 曲颂华, 陈绍伟. 城市垃圾与污水厂污泥的混合堆肥研究 [J]. *环境保护*, 1998, (10) : 15 – 16.
- [60] 曹洪生. 污泥化肥复混肥加工工艺和肥效研究 [J]. *土壤通报*, 1997, 28 (1) : 41 – 43.
- [61] 周立祥, 胡霁堂, 戈乃盼, 等. 城市污泥土地利用研究 [J]. *生态学报*, 1999, 19 (2) : 185 – 193.
- [62] 刘文杰. 昆明市污泥堆肥产品土地利用中重金属环境安全性研究 [D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [63] Fang W, Wei Y, Liu J. Comparative characterization of sewage sludge compost and soil: Heavy metal leaching characteristics [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 310: 1 – 10.
- [64] Epstein E, Taylor J, Chancy R. Effects of sewage sludge and sludge compost applied to soil on some soil physical and chemical properties [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1976, 5 (4) : 422 – 426.
- [65] Simeoni L, Barbarick K, Sabey B. Effect of small – scale composting of sewage sludge on heavy metal availability to plants [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1984, 13 (2) : 264 – 268.
- [66] 张增强, 薛澄泽. 污泥堆肥对几种木本植物生长响应的研究 [J]. *西北农业大学学报*, 1995, 23 (6) : 47 – 51.
- [67] 张增强, 薛澄泽. 几种草本植物对污泥堆肥的生长响应 [J]. *西北农业大学学报*, 1996, 24 (1) : 65 – 69.
- [68] 乔显亮, 骆永明, 吴胜春. 污泥的土地利用及其环境影响 [J]. *土壤*, 2000, 32 (2) : 79 – 85.
- [69] 罗海波, 黄光柱, 穆 江, 等. 磷矿废弃地土地复垦规划探讨 [J]. *中国农学通报*, 2008, 24 (1) : 406 – 409.
- [70] 魏 远, 顾红波, 薛 亮, 等. 矿山废弃地土地复垦与生态恢复研究进展 [J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10 (2) : 107 – 114.