

污泥的处置及利用技术探讨

查甫生¹, 崔可锐¹, 席培胜²

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽建筑工业学院 土木工程学院, 合肥 230022)

摘 要: 污泥是污水处理厂污水处理的 2 次产物, 如处理不当将会造成 2 次污染。随着人们环保意识的不断增强与环保力度的加大, 如何有效地进行污泥的处治与处置已成为国内外环境岩土工程界函待解决的主要热点问题之一。在总结国内外相关文献资料的基础上, 对国内外常用的污泥处置及利用技术进行总结与归纳, 包括污泥的填埋、焚烧、农业利用、固化以及生物修复技术等, 并对各种处置方法的适用性与优、缺点作出科学的分析与评价, 可为污泥及污染土的处置及利用提供一定的参考作用。

关 键 词: 污泥; 处置; 固化; 生物修复

中图分类号: X 53

文献标识码: A

Discussion on disposal and utilization technologies of sludge

ZHA Fu-sheng¹, CUI Ke-rui¹, XI Pei-sheng²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Civil Engineering, Anhui University of Architecture, Hefei 230022, China)

Abstract: Sludge is an important process of sewage treatment plant. Unsuitable disposal of sludge may induce secondary pollution. With the enhancement of the consciousness and intensity of environmental protection, many geoenvironmental engineers at home and abroad focus on the studying the disposal and utilization technologies of sludge. Based on the summarization of published literatures, the paper discusses the disposal and utilization technologies of sludge are discussed. The commonly using methods of sludge treatment are summarized, including common landfill, sludge incineration, agriculture utilization, solidification and stabilization, and bioremediation. The advantages and disadvantages of various methods are analyzed and evaluated

Key words: sludge; disposal; solidification and stabilization; bioremediation

1 引 言

污泥是污水处理厂污水处理的 2 次产物, 其成分复杂, 含有大量的微生物、病原体、重金属以及有机污染物等, 如处理不当, 将会造成 2 次污染。如何对污泥经济、有效的处置一直是国内外环境工程及环境岩土工程界所关注的一个重要课题^[1]。国际上污泥处置的方式有填埋、排海、焚烧和土地利用等多种方式, 由于污泥排海对海洋造成的污染严重, 现已基本废除。填埋、焚烧和土地利用是 3 种最常用的污泥处置方式。据 2003 年资料统计, 在欧洲, 各种污泥处置方式所占比例如图 1 所示, 但是,

由于污泥本身存在含水量高、工程性质差并含有多种污染物 (包括有机污染物与重金属污染物等) 的特点, 上述污泥处置手段受到了不同程度的限制。

根据估算, 我国目前每年排放干污泥约为 300×10^4 t, 且呈不断增加地趋势^[2]。长期以来, 受我国污水处理界“重水轻泥”倾向的影响, 污泥的卫生化、无害化处理处置问题一直未得到重视与解决。目前我国的污泥主要以农用和简易填埋为主, 由于大多达到有关环保排放标准的污泥在农用过程中可能会引发 2 次污染和新的环境问题, 其填埋又需占用大量土地, 随着人们环保意识的不断增强, 污泥处理与处置问题日益突出^[1]。

考虑到我国污泥的处理、处置技术研究还处于发展阶段，还没有制定出统一的规范的研究与应用现状。本文在总结国内外相关文献资料的基础上，对国内外常用的污泥处置及利用技术进行总结与归纳，并对各种处置方法的适用性与优、缺点作出科学的分析与评价，为污泥的处置及利用提供一定的参考作用。污染土的许多污染物与污泥所含污染物是一致的，因此，本文所总结的污泥的处置与利用技术对污染土的处置及利用亦可起到一定的借鉴作用。

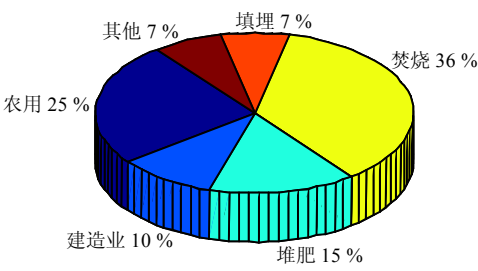


图 1 欧洲污泥处置方式所占比例 (2003 年)^[2]
Fig.1 Slurry remediation technologies applied in Europe

2 污泥的填埋处置技术

填埋是一种较为经济且简便的处置方式，达到基本条件后就可以填埋。在我国，填埋方式也是最主要的污泥处置方法之一。污泥的填埋分为单独填埋何混合填埋，在欧洲，脱水污泥与城市那几混合填埋技术应用较为广泛，而美国多数采用单独填埋处理。我国目前采用的污泥填埋一般都是与城市垃圾一起处置。

污泥填埋技术成功与否的关键在于 2 点：一是污泥本身的性质，主要是土力学性质。由于污泥一般含水率很高、抗剪强度低、承载能力差，填埋后填埋场的稳定性难以得到保证，因而在污泥填埋前应先对污泥进行脱水处理，脱水后的污泥抗剪强度会有较大幅度的增加，但仍难达到填埋所要求的强度。此时还必须通过掺入添加剂（石灰是最常用的添加剂）或其他降低含水量的方法来进一步提高其强度，以满足填埋要求。二是填埋后对环境可能造成的不良影响。需要用于污泥填埋的填埋场地基进行防渗处理，以免污泥填埋后对地下水产生严重污染和散逸出臭味而影响周围环境。表 1 列出了填埋处置各种类型污泥的适宜程度。

污泥的填埋处理周期长，且需要占用大量的土地资源。随着人口的增加和城市化的进程，可利用

的土地资源越来越匮乏，可供污泥填埋处理的场地已非常有限，很难找到合适的地点^[3]，因而欧美一些发达国家已经开始限制这种技术的广泛应用，如通过收费制度，关闭填埋场的措施等。

表 1 填埋处置各种污泥的适宜性^[4]
Table 1 The feasibility of different slurry treated with landfill method^[3]

污泥类型	单独填埋		混合填埋	
	适宜性	原因	适宜性	原因
未稳定的浓缩初沉污泥、废活性污泥与初沉污泥的混合污泥，废活性污泥	否	气味，操作	否	气味，操作
絮凝浓缩的初沉污泥和废活性污泥，不加添加剂的废活性污泥	否	气味，操作	否	气味，操作
化学絮凝浓缩的活性污泥	否	操作	否	气味，操作
热调理的初沉或者剩余污泥	否	气味，操作	勉强可以	气味，操作
初沉污泥或初沉剩余污泥的混合污泥+厌氧消化+浓缩	否	操作	勉强可以	操作
初沉污泥或初沉剩余污泥的混合污泥+好氧消化+浓缩	否	操作	勉强可以	操作
初沉污泥或初沉剩余污泥的混合污泥+石灰稳定+浓缩	否	操作	勉强可以	操作
消化污泥+脱水+石灰稳定	可		可	
未稳定的初沉污泥+石灰调理+真空过滤脱水	可		可	

3 污泥的焚烧处置技术

城市污泥中一般含有大量的有机物和一定量的纤维木质素，脱水后的污泥发热量高，可进行焚烧。

焚烧技术是一种高运行成本的污泥处置技术。当污泥不符合卫生要求、有毒有害物质含量较高、不适宜于资源化利用和缺少填埋场时可以采用焚烧技术来处置污泥，以焚烧为核心的处理方法是比较彻底地处置污泥的方法^[4-5]。污泥焚烧处理可以达到最大限度减量的目的，焚烧可破坏全部有机质，杀死一切病原体。

如果城市卫生要求高或污泥有毒物质含量高使污泥无法再利用，污泥自身的燃烧热值较大时可采用焚烧方法进行处理。但污泥焚烧后的灰粉目前还没有合理的处理方法。另外，焚烧的成本通常是其他处理工艺的 2~4 倍，在污泥中掺入适量的引燃剂、催化剂、疏松剂和固硫剂等添加剂，可以配置成“合成燃料”，可以作为锅炉等辅助燃料，以达到综合利用的目的。

在对污泥进行焚烧时，应对污泥焚烧的准入条件、大气污染物排放指标、恶臭以及炉渣等作相应规定，以保障污泥的安全焚烧。焚烧法处理污泥过程中，对其所产生的烟尘也需做相应的处理，收集固体颗粒的烟尘，防止 2 次大气污染。焚烧的有时在于可以迅速和较大程度地使污泥达到减量化，焚烧后的灰，体积大为减小，便于进行填埋和烧结等处理。

4 污泥的农业利用

污泥中含有丰富的有机质和 N、P、K 等养分以及大量的微量元素，如 Ca^{2+} 、Mg、Zn、Cu、Fe 等，将其用于农田能够改良土壤结构、增加土壤肥力、促进农作物生长等。但污泥中同时也含有大量的有毒有害物质、病原微生物以及重金属污染物等，可对土壤造成严重的污染。因而，污泥的农业利用应慎重，并采取严格的控制措施。主要包括以下几点^[6]：（1）严格控制污泥中的有毒有害物质与病原微生物，使其达到国家标准；（2）应特别注意污泥中重金属的含量，根据其土壤背景值等情况，严格按照计算得到的污泥施用量进行施用；（3）农田施用应在安全施用量的条件下控制使用，同时整个利用区应该建立严密的使用、管理、监测和监控体系，关注区域内的土壤、地下水、地表水、作物等相关因子的状态和变化，并根据发生的变化做出相应的调整，使得污泥的农业利用更加安全可靠，促进农业的可持续发展。

5 污泥的固化技术研究

固化的定义实际包含着 2 层含义：固化和稳定化，在习惯中因为叙述方便往往统称为固化。US EPA 对固化/稳定化的概念解释如下^[1, 7]：固化（solidification）是指添加固化剂于废弃物中，使其变为不可流动性或形成固体的过程，而不管废弃物与固化剂间是否产生化学结合；稳定化（stabilization）是指将有害污染物转变成低溶解性、低毒性及低移动性的物质，以减少有害物污染潜力的技术。

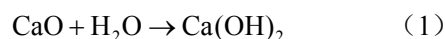
污泥的固化一般采用添加剂，如石灰、水泥等，通过污泥与添加剂之间一系列物理化学反应，以达到固化污染物与提高强度等作用。

污染土的固化机理可以从物理改性和化学加固两个方面进行解释，基本原理是基于以下 4 个方

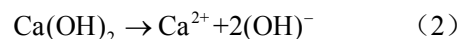
面^[1]：原状土自身具有的强度；水泥自身水化反应产生的胶凝性物质胶结土颗粒使其连接成一体；黏土颗粒的团粒化运动；水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与土颗粒中活性矿物成分生成的胶凝性物质进一步胶结土颗粒。

污染土中掺入石灰或水泥固化剂后，灰、水、土体之间会发生一系列的化学反应，形成伊利石、硅灰石膏与此生矿物等，其具体的化学反应过程如下所述^[8]：

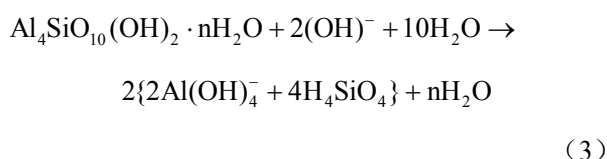
石灰的消化反应：



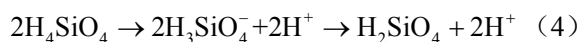
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的离解反应，会导致土体 pH 的增加，可达到 12.3，



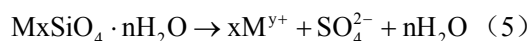
在 pH 值高于 10.5 的碱性环境下硅酸盐黏土矿物发生分解反应：



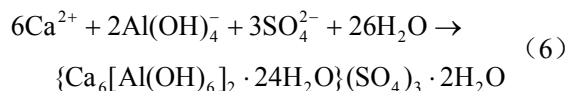
硅酸的分解反应：



硫酸盐矿物的分解反应， $x=1$ ， $y=2$ 或者 $x=2$ ， $y=1$ ：



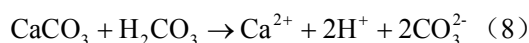
土或孔隙液中的硫酸盐与黏土中的铝以及石灰中的钙发生化学反应，生成伊利石：



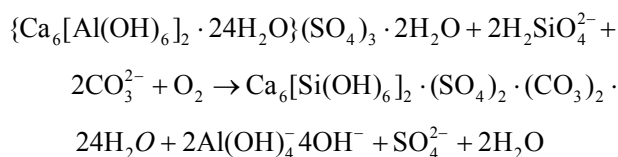
生成碳酸：



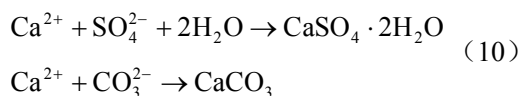
碳酸钙遇碳酸后分解：



伊利石发生同构置换反应：



(9)
生成次生石膏和碳酸钙:



污泥(污染土)的固化技术研究与应用中,不仅需要合理地选择固化剂,也要进一步对固化机理进行分析,深入认识不同固化材料对污泥的固化效果和物理化学反应过程。此外,从目前的文献资料分析来看,由于废物所处环境的复杂以及多变性,有关固化污泥长期稳定性方面的研究存在明显的不足,应当进一步加强这一方面的研究工作^[9-10]。笔者在分析现有文献资料的基础上,对这一研究方面进行了总结,特别是重金属污染污泥或污染土,主要研究内容有:(1)有关污染物的浓度对于处理后的土的力学特性(强度特征,固结特性以及渗透特征)的影响方面的研究不够深入,影响机理也不够明确;研究所用的污染物大多为单一的物质,如单一的铅离子溶液、铬离子溶液、铁离子溶液或者铜离子溶液等,而对于在多种污染物成分混合条件下,混合污染物成分和混合污染物浓度对石灰或水泥处理加固重金属污染土的效果方面还缺少相应的研究;(2)对于处理后的重金属污染土在长期外界环境作用下,其力学性能的稳定特征,包括强度参数 c 和 ϕ , 渗透系数 k 的变化,缺少试验研究和理论分析;(3)对处理后的重金属污染土在长期外界环境下,其原有重金属是否再溶出渗漏,以及再溶出渗漏的机理还不明确;(4)有关研究开发新型固化剂来提高污染土的处理效果方面,还缺少试验研究开发以及理论方面的深入探讨。

6 污泥的生物修复技术研究

6.1 有机污染物的微生物修复技术

自然界中广泛存在着丰富的微生物种群,可在环境污染净化中起到重要的作用。微生物由于自身独特的生理特性,可以通过遗传、变异等生物过程来适应环境的变化,使之能以各种污染物,尤其以有机污染物为营养源,通过吸收、代谢等一系列反应,将环境中的污染物转化为稳定无害的无机物。微生物修复有机物污染的污泥(或污染土)正是利用微生物的这一功能,营造出适宜微生物生长、繁殖的环境,使之充分发挥其降解功能,处理环境污染物,达到修复环境污染土的目的。

微生物降解有机污染物的途径主要包括好氧降解与厌氧降解 2 种主要类型。微生物的好氧降解是

利用好氧微生物在有氧条件下将复杂的有机物分解成 CO_2 和水。这一过程需要在一定的处理构筑物内完成,其重要条件是保证充足的氧气供应、稳定的温度和水质。厌氧降解是降复杂的有机物首先降解成游离糖、乙醇、挥发性脂肪酸、 H_2 和 CO_2 , 然后,乙醇和挥发性脂肪酸被氧化成一算和 H_2 , 最后乙酸和 H_2 被转化成 CH_4 , 这 3 步之间有着严格的相互协调作用^[11]。

6.2 污染土的植物修复技术

植物修复是指利用绿色植物从环境中吸收带走重金属或将它们无害化而达到治理污染的目的,是目前发展最快的环境友好、经济、高效的治理技术,是备受当今媒介关注和科学家感兴趣的研究热点,也是最近许多论文和综述文献的焦点^[12]。植物修复依其过程及修复机制可分成植物去除过程和植物稳定过程两大过程,而植物去除过程又可分为五种不同类型,如图 2 所示。

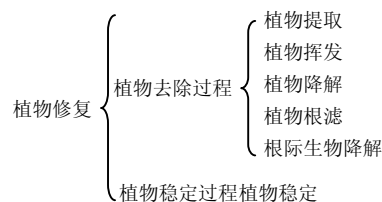


图 2 植物修复的两大过程分类^[11]

Fig.2 Classification of plant

7 结 语

污泥是污水处理厂污水处理的 2 次产物,如处理不当将会造成 2 次污染。随着人们环保意识的不断增强与环保力度的加大,如何有效地进行污泥的处治与处置已成为国内外环境岩土工程界函待解决的主要热点问题之一。考虑到我国污泥的处理、处置技术研究还处于发展阶段,还没有制定出统一的规范的研究与应用现状。本文在总结国内外相关文献资料的基础上,对国内外常用的污泥处置及利用技术进行总结与归纳,并对各种处置方法的适用性与优、缺点作出科学的评价,为污泥的处置及利用提供一定的参考作用。污染土的许多污染物与污泥所含污染物是一致的,本文所总结的污泥的处置与利用技术对污染土的处置及利用亦可起到一定的借鉴作用。