

# 城市污水污泥中有机质的资源化技术综述

王志玉 金宜英 王兴润 聂永丰

(清华大学环境科学与工程系,北京 100084)

**摘要** 针对城市污水污泥中有机质的特性,介绍了污泥有机质的肥效利用、热能利用、有机质中碳的转化和生物利用等资源化技术。指出我国城市污泥中有机质资源化利用研究中存在的问题,并就相关问题对今后我国污泥中有机质的资源化利用提出了建议。

**关键词** 城市污水污泥 有机质 资源化利用

## 0 前言

污水处理厂污泥是污水处理的副产物,其含水量高,成分复杂,不仅含有大量的有机质、N、P、K等营养元素,还含有大量的病原微生物,并伴有恶臭,受工业废水影响,往往还有较多的重金属等有毒、有害物质,处理不当极易造成严重的二次污染。目前我国城市污水处理厂每年排放干污泥量约为130万t,而且还以每年大约10%的速度增长<sup>[1]</sup>。如何合理地处置污水处理厂污泥,解决大量污泥的出路已成为关系人类生态环境安全的一个重要问题。污泥中有机质的资源化技术是研究污泥处理处置技术的重要部分,即利用物理、化学、生化等手段,将污泥中有机质资源化加以利用,同时最终达到使污泥稳定化、减量化和无害化的目的,因此受到越来越广泛的重视。

### 1 污水污泥中有机质的特性

#### 1.1 污水污泥中有机质的组成

污水污泥中含有大量的有机质,其含量及成分因污水的来源、处理工艺、城市居民的生活水平和饮食结构的不同而不同。我国干污泥中有机质含量平均值为38.4%,而美国城市污泥中的有机质含量平均值为53.4%<sup>[2]</sup>。Bo等用阳离子交换树脂提取污泥中有机质,测得其中蛋白质占46%~52%,腐殖酸占18%~23%,碳水化合物占17%,其余为尿酸和核酸<sup>[3]</sup>。

#### 1.2 污水污泥中有机质的营养作用

污泥中含有的有机质可对植物的生长提供N、P等营养物质,具有良好促进其生长的作用<sup>[4]</sup>。污

泥对土壤具有改良作用,可以加快土壤中腐殖质的形成,提高土壤的肥效;通过降低土壤的密度,促进土壤微团聚体的形成,从而提高土壤的空隙度和土壤导水率,改良土壤的结构<sup>[5]</sup>。

#### 1.3 污泥中有机质的热值

污泥所含的有机质可燃,其燃烧热值的计算式可表示为<sup>[6]</sup>:

$$Q=2.3a\left(\frac{100P_v}{100-G}-b\right)\left(\frac{100-G}{100}\right) \quad (1)$$

式中Q——污泥的燃烧热值,kJ/kg干污泥;

$P_v$ ——有机物质(即挥发性固体)含量,%;

G——机械脱水时,所加污泥混凝剂量(占干污泥固体质量百分数),当用有机高分子混凝剂或未投加混凝剂时, $G=0$ ;

$a$ 、 $b$ ——经验系数,与污泥性质有关。

## 2 污泥有机质资源化技术及其比较

### 2.1 有机质的肥效利用

由于污泥中有机质具有营养植物、微生物和改良土壤的作用,通常将其堆制成肥料或直接施于土壤中。

#### 2.1.1 污泥堆肥技术

污泥堆肥一般采用好氧条件下,利用微生物将污泥中的有机质分解、转化成类腐殖质的过程,并灭杀其中的传染病菌、寄生虫卵与病毒。堆肥时可用稻草、木屑或城市垃圾等作膨胀剂,以增加污泥堆肥的孔隙率,改善通风以及调节污泥含水率与碳氮比。

20世纪70年代,人们开始利用堆肥技术处理污泥,如今美国每年约有49%的污泥用于堆肥。国内污泥堆肥的商品化生产也在发展中<sup>[7]</sup>。

国家高技术研究发展(863)项目(2002AA644010)。

根据堆肥化物料的发酵方式、流动过程、发酵状况及提供空气的方法可将堆肥化系统区分为无发酵装置系统和发酵仓系统。无发酵装置系统包括条垛式系统和通气式固定垛系统,前者是通过定期翻垛来通气,它的生产效率高、成本低,缺点是占地面积大、有臭味;后者采用机械通风,机械化程度较高,成本较低,臭气较小。发酵仓系统是在工厂内以机械化与自动化来完成的,其类型可分为两大类:即推流式和动态式。发酵仓系统有下列优点:占地面积小;过程历时较短;人工费少;天气影响小;臭气控制较好,气体易于收集处理;易于管理,便于强化过程控制;公众容易接受。缺点是投资、操作和维护等费用较高。

污泥堆肥施用时应注意以下事项:

(1) 满足卫生学要求,即不得含有病菌、寄生虫卵与病毒,在传染病流行时应停止施用。

(2) 所含重金属离子浓度必须符合我国农林部制定的《农用污泥标准》。

(3) 总氮含量不能太高,防止作物疯长倒伏而减产。

### 2.1.2 污泥土地利用

污泥土地利用是将污泥作为肥源施用在土地上,如农业用地、林业用地、严重破坏的土地、专用的土地场所,在发达国家已成为一条重要的污泥处置途径,在我国也有广泛的应用和研究。污泥土地利用的主要环境问题有:

(1) 病原菌和寄生虫:污泥中常含有大量的病原微生物和寄生虫,土壤是许多寄生虫的天然发育场所。

(2) 重金属及有毒有机物:重金属是限制污泥土地利用最主要的污染物,且绝大部分在耕层累积<sup>[8]</sup>,随着污泥施入量的增加,将增加其对作物污染的风险。污泥当中常含有多种毒性有机污染物,如聚氯二酚、多环芳烃以及农药的残留物。这些物质在污水污泥的处理中很难完全去除。

(3) 氮、磷过剩和盐分引起的问题:污泥中通常含有丰富的 N、P 等养分,施用后在土壤中参与土壤物质循环,被带到地表水和地下水中,成为污染水体的主要因子<sup>[9]</sup>。另外 N、P 过剩还会引起作物贪青晚熟,不抗病害,不耐储藏等危害。污泥中盐量过

高,会破坏养分之间的平衡,抑制植物对养分的吸收,甚至对根系造成危害。

污泥的土地利用应遵循以下原则:

(1) 尽可能用于林地、园林绿化和用于天然矿场的修复等严重扰动的土地改良,不会威胁人类食物链,增加污泥土地利用的安全性。

(2) 污泥中重金属含量必须符合农用污泥标准以及污泥施用区土壤重金属含量不得超过允许标准<sup>[10]</sup>。

(3) 以作物对氮的需要量作为污泥施用量的限度。

### 2.2 污泥有机质的热能利用

脱水后活性污泥的热值大于 10 MJ/kg<sup>[11]</sup>,可采用焚烧将脱水后活性污泥的热值转化或干燥作固体燃料使用。

#### 2.2.1 污泥焚烧发电、供热

美国污泥的 25%、日本污泥的 75%、欧共体污泥的 25% 进行焚烧处理<sup>[12]</sup>,焚烧后视处理规模大小,可选择性进行供热水、蒸汽或发电。美国 Hyder 环保公司提出了一种将脱水污泥首先进行热干燥,再在沸腾炉中燃烧产生高压蒸汽,推动蒸汽机发电的综合系统。

目前,用得最多的焚烧炉是流化床焚烧炉。与同类技术相比,流化床锅炉对燃料的适应性好,能焚烧高水分、低热值的燃料;燃烧温度低,NO<sub>2</sub> 排放量小;床料中加入石灰石,还可降低 SO<sub>2</sub> 排放量;灰渣易于综合处理。流化床锅炉的这些优点使它特别适宜焚烧污泥。污泥的可燃成分较少,而灰分较高,含水率一般为 80% 左右。为保证燃烧温度,采用燃煤等作为辅助燃料。在炉后烟气净化系统充分考虑污泥灰分高的特点,防止设备磨损。

污泥和垃圾混合焚烧是一种合理的处置途径,垃圾中蕴藏的多余热量可用于蒸发污泥水分,从而节约原能的消耗。在垃圾焚烧厂待焚烧的污泥应预先脱水或先干燥。由于污泥含有不同性质的物质,必须使污泥在垃圾中尽可能均匀分配,因此,需在焚烧前将污泥和垃圾均相混匀。脱水的污泥也可在振荡干燥器中用垃圾燃烧的高温烟气干燥,然后直接鼓进燃烧室焚烧。

污泥焚烧后热能利用,由于采用了合适的预处

理工艺和焚烧手段,达到了污泥热能的自持,并能满足越来越严格的环境要求,且不受天气条件的影响,使污泥焚烧工艺具有日趋重要的意义,但其价格昂贵,也严重影响了在我国的处置使用。

### 2.2.2 干燥后制备固体燃料

污泥中含有大量的有机物和一定量的纤维素木质素,脱水后掺入适量的引燃剂、催化剂、疏松剂和固硫剂等添加物配制成合成燃料<sup>[13]</sup>,可作为工作炉窑或生活锅炉的辅助燃料,燃烧稳定,热工测试和环保测试良好。

### 2.3 污泥有机质中碳的转化利用技术

McCarty 提出污泥细胞质(原生质)的分子式是  $C_5H_7NO_3$ <sup>[6]</sup>,其中含碳量 46.5%,可作为碳转化利用的资源。

#### 2.3.1 厌氧消化制沼气

沼气是厌氧消化池中污泥稳定化后的最终产品,沼气的主要成分是甲烷( $CH_4$ ),其中常混有  $H_2$ 、 $CO_2$  和  $H_2S$ 。一般污水处理厂消化气中甲烷的含量约为 60%~70%, $CO_2$  含量约为 20%~25%,产生的沼气热值通常在 4 500~6 200 kcal/ $m^3$ ,按我国目前的技术水平,利用沼气可解决污水处理厂 30% 的能源需求。另外将污泥厌氧消化气净化,除去  $CO_2$ ,即可得到  $CH_4$ ,以  $CH_4$  为原料可以制成多种化学品<sup>[14]</sup>。

对处理能力在 10 万  $m^3/d$  以上的大型二级处理设施产生的污泥,宜采用厌氧消化制沼气,不仅可以解决污泥出路问题,而且对节能和降低运行费用都有很大意义。

#### 2.3.2 污泥制油技术

将污泥在热环境下进行分解,从而制得油、可燃气体等物质,是近年来国内外发展较快的污泥热处理技术。

目前,污泥制油技术主要有低温热解、直接热化学液化处理和微波高压热化学转化等<sup>[15]</sup>。低温热解是将污泥在 250~500  $^{\circ}C$  下加热裂解,其中有机质转化为油、炭和可燃气体。直接液化是将污泥在高温高压、加氢下裂解,转化为燃烧油。二者均有较高的转化率,是能量自给的过程,但后者的操作温度与压力对设备的要求较高。微波转化制油是利用微波在 5 MPa 或更高的压力下加热污泥,使其脱水,可

获得较高的油品收率<sup>[16]</sup>。但该研究还处于研究探索阶段。

#### 2.3.3 污泥衍生制活性炭技术

污泥经过干燥、热解产生焦炭,然后活化提高其吸附能力,再经过后处理,即可得到活性炭。1960 年 Razouk 首先开始污泥衍生制活性炭的研究<sup>[17]</sup>,但该技术目前还仅限于实验室研究。

### 2.4 污泥有机质中生物质的利用技术

污泥实质是由直径 2~5 mm 的胞外生物高聚物将微生物埋在一起形成的絮状体,外排剩余污泥的主要组成是微生物细胞间的胞间凝胶和一些老化的微生物细胞壳体。其中粗蛋白占 28.7%~40.9%、灰分占 26.4%~46.0%、纤维素占 26.6%~44.0%、脂肪酸占 0~3.7%,具有广泛的利用价值。

#### 2.4.1 制造可生物降解塑料

聚羟基脂肪酸(PHA)是一类可完全生物降解、具有良好加工性能的新型热塑材料。1974 年有人从活性污泥中提取到 PHA,为污泥制备可降解塑料奠定了基础<sup>[18]</sup>。此后的 30 年间,不断有人尝试用新的方法从活性污泥中提取 PHA,并得到很大的进展<sup>[19,20]</sup>。

#### 2.4.2 生产生化纤维板

在碱性条件下将污泥加热、干燥、加压,其所含蛋白质发生变性,制成污泥树脂(又称蛋白胶),再以污泥的泥渣为填料,掺入少量废纤维压制成型,即成为污泥生化纤维板<sup>[21]</sup>。

#### 2.4.3 制作动物饲料

污泥中 70% 的粗蛋白以氨基酸形式存在,包括蛋氨酸、胱氨酸、苏氨酸等。污泥粗蛋白中含有几乎所有家畜饲料所需的氨基酸,且各种氨基酸之间相对平衡,是一种很好的动物饲料蛋白,德国、美国等曾有学者研究利用污泥制作动物饲料<sup>[22]</sup>。以污泥作为动物饲料,具有一定的经济效益,但成本也较高,饲料的可靠性、有效性与安全性有待于进一步研究验证。

#### 2.4.4 用于造纸

中国环境科学研究院与中国制浆造纸工业研究所合作,对污水污泥替代部分纸浆用于造纸的可行性进行了探讨<sup>[23]</sup>。以活性污泥替代 5%~20% 的纸浆用于纸板的抄造过程,结果基本是可行的。

## 2.5 其他资源化技术

对于污泥中有机质的资源化利用,国内外均在尝试其他一些新途径,如活性污泥作粘结剂、用于氯化化合物的降解等,但均处于研究开发的阶段。

## 3 小结与讨论

将城市污水污泥中的有机质资源化并加以利用,是解决污泥这一产量多、危害大的城市固体废物的有效途径之一,是污泥综合利用的重要部分。目前针对该技术中存在的不足,如:缺乏规模性;现有技术的不足限制了其实际应用;法律制度不健全导致其成本增加等,应在以下方面给以加强和完善:

(1) 完善现有技术,使其不断走向生产实践,在此基础上,以降低成本、减少二次污染为出发点,进一步开发适合我国国情的资源化利用的新技术。

(2) 完善市政设施建设,使污泥处理、处置达到规模化,并开展规模化后相应设备的研制,使其污泥资源化利用的经济效益显著,从而促进其发展。

(3) 应制定完善标准和法律法规,加强管理,从源头上控制重金属等有害物质含量,降低资源化的成本。

我国是一个发展中国家,污泥的最佳处置途径是综合利用。根据污泥的特性及当地的实际情况,使之资源化,具有明显的环境效益、社会效益和经济效益。

## 参考文献

- 黄雅曦,李季,李国学. 污泥处理与资源化利用现状分析. 农业环境科学学报, 2003, 22(6): 765~768
- 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. 生态学报, 2003, 23(11): 2464~2474
- Bo F, Rikke P, Kristian K, et al. Extraction of extra cellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin. Water Research, 1996, 30(8): 1749~1758
- 程五良,方萍,陈玲,等. 城市污水厂污泥土地利用可靠性探讨. 同济大学学报(自然科学版), 2004, (7): 939~942
- 李海波,李亚东,李克顺. 城市生活污水在矿业废弃地复垦应用中的可行性分析. 湖北大学学报(自然科学版), 2005, (2): 184~187
- 尹军,谭学军. 污水污泥处理处置与资源化利用. 北京: 化学工业出版社, 2005
- 张增强,殷亮强. 污泥土地利用对环境的影响. 农业环境科学学报, 2004, 23(6): 1182~1187
- Chang A C. Accumulation of heavy metals in sewage sludge treated soils. Journal of Environmental Quality, 1984, (13): 87~91
- Medalie L, Bowden W B, Smith C T. Nutrient leaching following land application of aerobic all digested municipal sewage sludge in another hardwood forest. Journal of Environmental Quality, 1994, 23: 130~138
- GB 4284—84 农用污泥中污染物控制标准
- 毛玉如,马晓峰,要建军,等. 流化床垃圾焚烧发电技术. 锅炉制造, 2000, (2): 3~6
- 马士杰,唐建国,陈邦林. 欧盟的污泥处置和利用. 中国给水排水, 2006, 22(4): 102~105
- 胡光坝,洪云希. 城市污泥合成燃料的应用研究. 中国给水排水, 1996, 12(2): 13~15
- 熊帆,黄君涛,钟理. 城市污泥的处理处置与资源化利用. 广东化工, 2005, (1): 87~89, 46
- 张立峰,吕荣湖. 剩余活性污泥的热化学处理技术. 化工环保, 2003, 23(3): 146~149
- Bohlmann J T, Lorth C M, Drews A, et al. Microwave High-Pressure Thermo-chemical conversion of sewage sludge as an alternative to incineration. Chemical Engineering & Technology, 1999, 22(5): 404~409
- Jeyaseelan S, Lu G Q. Development of adsorbent/catalyst from municipal wastewater sludge. Water Science and Technology, 1996, 34(3-4): 499~505
- Satoh H, Iwamoto I, Mino T, et al. Activated sludge as a possible source of biodegradable plastic. Water Science and Technology, 1998, (38): 103~109
- Chua A S M, Takabatake H, Satoh H, et al. Production of polyhydroxyalkanoates (PHA) by activated sludge treating municipal wastewater: effect of pH, sludge retention time (SRT), and acetate concentration in influent. Water Research, 2003, (37): 3602~3611
- Serafim L S, Lemos P C, Oliveira R, et al. Optimization of polyhydroxybutyrate production by mixed cultures submitted to aerobic dynamic feeding conditions. Biotechnology Bioengineering, 2004, (87): 145~160
- 周少奇. 城市污泥处理处置与资源化. 广州: 华南理工大学出版社, 2002
- 林冬,王成端. 变废为宝的污泥资源化技术. 环境导报, 2003, (15): 9
- 侯文华,郑朔方,宋英伟,等. 活性污泥替代部分纸浆用于造纸的初步研究. 环境科学学报, 2000, 20(S1): 154~156

& E-mail: wangzyyk@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2006-11-22

修回日期: 2006-12-20