



# 正确的政策导向是发展可持续污泥处理技术的保障

王维斌 韩育宏 季 民

(天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072)

**摘要** 对污泥厌氧消化技术在国内外的应用及发展情况作了简单介绍。通过与其他污泥处理工艺对比,分析了污泥厌氧消化的优缺点、污泥厌氧消化工艺的费用与收益。指出污泥厌氧消化工艺是一种可持续的实用技术,理应成为城市污水处理厂污泥稳定化处理的首选工艺。认为应对现行的《城市污水处理及污染防治技术政策》进行修改,鼓励有条件的污水处理厂在选择污泥处理工艺时优先考虑厌氧消化技术。

**关键词** 污泥处理 工艺选择 政策导向 稳定化 厌氧消化

## On proper policy guidance for sustainable development of sludge disposal technology

Wang Weibin, Han Yuhong, Ji Min

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The applications of wastewater sludge anaerobic digestion (SAD) domestic and abroad are presented and compared with other methods of sludge disposal to understand the merits and shortcomings, also the expenses and benefits of SAD as well. It is believed that SAD might be a practical and economical sludge disposal technology of sustainable developments. It is a kind of head to choose for stabilizing of wastewater sludge in municipal wastewater treatment plants. The currently available Technical Policy on Urban Wastewater Treatment and Pollution Control issued by the National Environmental Bureau has to be revised to encourage the wastewater treatment plants to adopt this process as priority.

**Keywords:** Sludge treatment; Process choice; Policy guidance; Stabilizing; Anaerobic digestion

长期实践证明,污泥厌氧消化技术是可持续的污泥处理技术,能使污泥稳定化、减量化和资源化,减少二次污染。国外大多数污水处理厂都将厌氧消化技术作为污泥处理的首选工艺。但是我国在污水处理厂建设中,污泥厌氧消化技术应用还不普遍。大型污水处理厂一般建设厌氧消化处理系统,但真正运行的不多。中小型污水处理厂(处理规模小于10万 $\text{m}^3/\text{d}$ )的污泥处理工艺绝大部分都是采用直接机械脱水、外运,很少建设污泥厌氧消化池。笔者认为,造成这种现象的主要原因是因为我国现行的《城市污水处理及污染防治技术政策(城建[2000]124号)》中5.2条“日处理能力在10万立方米以上的污水二级处理设施产生的污泥,宜采取厌氧消化

工艺进行处理,产生的沼气应综合利用。日处理能力在10万立方米以下的污水处理设施产生的污泥,可进行堆肥处理和综合利用”。据此,大部分建设单位和设计院都理解为只有规模大于10万 $\text{m}^3/\text{d}$ 的污水处理厂需要建设厌氧消化池,而10万 $\text{m}^3/\text{d}$ 以下则不必建设厌氧消化池。这条技术政策的导向结果是2000年后建设的中小污水处理厂几乎都不建设污泥厌氧消化池,造成许多城镇污水处理厂污泥处理工艺过于简单,污泥问题逐年加剧。本文从国内外污泥厌氧消化技术发展、厌氧消化特点分析,及其技术经济可行性等方面阐明污泥厌氧消化工艺的技术经济优势。呼吁能够对关于污泥处理的技术政策进行修正,建立正确的政策导向,促进污泥厌氧消化

工艺在我国中小城镇污水处理厂污泥处理、下水道污泥处理、畜禽养殖厂粪便处理、农业加工废弃物处理和其他生物固体处理中的应用,在削减污染的同时,获得更多的生物能。

## 1 污泥厌氧消化技术在国内外应用

### 1.1 国外的应用情况

目前国际上最常用的污泥稳定方法是厌氧消化,尤以中温(33~35℃)厌氧消化最为普遍。经过厌氧消化,污泥中40%~50%的有机物被分解,生污泥变为熟污泥,部分致病菌和寄生虫卵被杀死,消化时产生的沼气也可以利用。

污泥消化是德国污泥处理的基本步骤,几乎每个污水处理厂都有厌氧消化设施,除了污水污泥普遍采用厌氧消化工艺外,德国还有大约1900个农业生物固体厌氧消化厂。沼气用于发电是在德国最常见的应用途径,75%的污水处理厂采用沼气发电。

日本大多数污水处理厂采用厌氧消化来处理污泥。最近日本的污泥消化技术有进一步改善,如机械浓缩和高浓度消化的有机结合、搅拌和热效率的改善。为减少消化时间,采用高温厌氧消化的污水处理厂目前亦较多。另外,为了提高消化率,还在探讨热碱处理和两段消化方式的适用性。日本污泥处理处置的主要工艺有:浓缩—厌氧消化—脱水;浓缩—厌氧消化—脱水—复合肥;浓缩—厌氧消化—脱水—干燥;浓缩—厌氧消化—脱水—焚烧;浓缩—厌氧消化—脱水—熔融。可见不管最终采取何种处置方法,厌氧消化是必不可少的。

20世纪90年代中期,英国的统计资料表明(见表1),厌氧消化处理是绝大多数污水处理厂污泥处理的主要方法。由表1可以看出英国污水处理厂污泥仍有相当部分未得到妥善处理,未来英国污泥处理发展趋势,仍将以厌氧消化方法为主。其处理方

表1 英国污泥处理方法及处理量

处理方法	处理量/万t干泥/a	所占比例/%
厌氧处理	60.3	54.5
好氧处理	2.1	1.9
石灰处理	1.4	1.3
堆肥	0.55	0.5
其他	1.7	1.5
未经处理	44.6	40.3

式是兴建大型污泥处理中心,将若干污水处理厂的污泥输送至污泥处理中心集中处理。

据美国环保局1998年的调查,厌氧消化是污水处理厂最普遍的污泥稳定方法,占63%;采用污泥直接浓缩处理方法的占15%,污泥好氧消化占8%,其他方法占9%。

丹麦非常重视可再生能源的开发利用,厌氧消化不仅在污水处理厂污泥处理中普遍应用,在农村也建设了大量的小型生物固体(畜禽粪便、农业加工废弃物等)厌氧消化池,基本都配套沼气发电设施。

### 1.2 我国污泥处理的现状

污泥处理和处置技术在我国还刚起步,与发达国家相比差距很大。在我国现有的污水处理设施中,有污泥稳定处理设施的还不到25%,处理工艺和配套设备完善的不到10%。由于污泥排放不像污水排放那样有非常严格的要求,环保检测部门也经常是只抓水,放过泥。污水处理厂建设者和设计者又得到技术政策的允许,加之考虑到厌氧消化池工艺复杂,建消化池会加大污水处理厂投资和运行管理复杂性。建成消化系统,并配套沼气发电,而国家又没有鼓励污泥生物能利用的相关政策,有电也上不了网,用不了。自2000年《城市污水处理及污染防治技术政策》颁布以后,新设计的10万m<sup>3</sup>/d以下的污水处理厂几乎都不建污泥厌氧消化池,近年来一些10万~20万m<sup>3</sup>/d的污水处理厂也不建污泥厌氧消化设施。在为数不多的建设污泥消化池的大型污水处理厂,能够正常运行的也很少,有些根本就没有运行。多数污水处理厂只是将污泥送往垃圾填埋厂填埋或直接堆放,造成二次污染。

北京高碑店污水处理厂的污泥处理系统是目前我国运转比较成功的大型污泥处理设施之一。该厂的污泥处理部分采用的是两级中温厌氧消化工艺,污泥消化产生的沼气,主要用于发电,来驱动鼓风机和进水泵。沼气发电机的热水作消化污泥加热的热源,实现热电联供和资源的综合利用。但是北京的大部分中小污水处理厂中仅有个别厂有污泥消化和稳定设施。

天津市的大型污水处理厂,如纪庄子污水处理厂(52万m<sup>3</sup>/d),东郊污水处理厂(40万m<sup>3</sup>/d),咸阳路污水处理厂(45万m<sup>3</sup>/d)都建有完善的污泥厌

氧消化与沼气发电设施,但厌氧消化池的稳定运行和沼气利用问题还没有得到完全解决。天津市郊县以及滨海新区近年新建的 10 万  $\text{m}^3/\text{d}$  以下的污水处理厂,几乎全都没有污泥消化设施。

## 2 污泥的厌氧消化与其他处理方式的比较

### 2.1 污泥厌氧消化工艺的优点

厌氧消化主要是通过厌氧微生物的作用使污泥中有机物分解,污泥达到稳定状态,同时产生生物气。污泥厌氧消化是一种低能耗或者可输出能量的工艺,对应对全球性能源紧张问题有积极的作用。污泥厌氧消化可使污泥中有机物浓度降低 40%,使污泥达到稳定化,消化后的污泥臭味减少。污泥厌氧消化可减少污泥中挥发性悬浮固体(VSS)含量 30%~50%,有利于污泥的脱水处理。厌氧消化后的污泥中仍然含有丰富的有机肥效成分,适用于土地利用。中温厌氧消化可以减少污泥中病原微生物,高温消化能够大幅度杀灭污泥中病原微生物。

面对城镇与乡村每天产生的大量污水处理厂污泥、下水道污泥、生活垃圾、畜禽粪便和其他生物固体,给社会生态环境、人类和动物的健康造成极大的威胁,我们可以选择各种不同的处理处置方法。衡量一种污染治理方法最重要的标准应该是它的环境效益,既能达到高效去除污染物,又不会造成过多的二次污染,即高效、低能耗。并尽可能做到处理后废物有使用价值,最终产物能够循环利用。厌氧消化技术正是能够满足上述目的要求,符合可持续发展,建设资源节约型、环境友好型社会国家发展战略的重要技术。

### 2.2 与其他处理方式的比较

污泥浓缩脱水后外运填埋是一种最简单最省钱的污泥处理处置方法,脱水方法常有自然干化和机械脱水两种。但是从目前的技术水平看,板框、带式压滤机及离心脱水机等机械脱水成本比较高;自然脱水成本虽低但时间长,占地大,适用于蒸发率相对较高的地区,而且在晾晒期间污染周围空气。污泥直接浓缩脱水外运最主要的缺点是没有使污泥稳定化就运出厂外,带来的二次污染问题较大。另外生污泥直接脱水的性能不如消化污泥。

污泥加碱稳定化是在污泥中加入石灰、水泥窑灰或飞灰等碱性物质,使污泥  $\text{pH}>12$ ,并保持一段

时间,利用强碱性材料或石灰放出大量的热杀灭病原体、降低恶臭和钝化重金属,处理后污泥可直接施用于农地。其优点是可以消除病原体,加碱稳定后的产物可以进行堆肥处理,含固率 60%的产品可以用于农业、园艺业、改良土壤、修筑堤坝、斜坡等。缺点是不但不会减少污泥量,而且还会增加污泥量,并且需要的药剂量大,费用很高。

以焚烧为核心的处理办法是最彻底的处理方法,污泥焚烧后的残渣无菌、无臭,可以迅速和较大程度地使污泥达到减量化,使运输和最后处置大为简化。焚烧后产生的热量也可以充分利用,具有应用前景。污泥在焚烧前必须脱水,污泥焚烧时会产生有害气体,其中的重金属也会随着烟尘的扩散而污染空气,焚烧后仍存在有 1/3 左右固体质量的废弃物,以灰分的形式存留下来。此外,焚烧法的处理成本十分昂贵,美国大约处理每吨污泥要消耗 300 美元(主要是燃料费用)。在日本,一套处理量在 50  $\text{m}^3/\text{d}$  左右的焚烧设备(包括土建、配套)成本高达 28 亿日元。在国内由于其一次性投资和成本大,焚烧烟气需进一步处理等问题很难在中小城镇广泛应用。有学者提出在焚烧前先进行厌氧消化的稳定化处理,可减少污泥的体积,但消化后污泥热值减少,经济效益具体怎样还有待于进一步深入研究。

污泥根据处理的方法不同可制成各种不同用途的建筑材料,污泥材料利用的真正对象是其所含的无机矿物组分,污水处理厂污泥和下水道污泥的性质类似,不仅有有机物组分高于无机物组分,且其无机物组成也与黏土在矿物结构上有较大差异,因此作为建材原料替代品需进行大量预处理。因此直接的经济效益不大,但考虑到综合处置等因素,具有显著的生态环境价值。在用于建材前,先将污泥进行厌氧消化,能够大幅度减少污泥中有机物成分并获得生物能,有助于的污泥烧结制造各种建筑材料。

好氧消化是在不投加底物的条件下,对污泥进行较长时间的曝气,使污泥中的微生物处于内源呼吸阶段进行自身氧化。好氧消化主要应用于小型污水处理厂,该工艺初期投资较低,但需要靠充氧来维持,动力消耗较大,运行费用高,是个耗能的工艺。好氧消化不加热,污泥有机物分解程度随温度波动较大,消化后的污泥进行重力浓缩时上清液的悬浮

固体浓度高。在污水处理厂中,好氧消化不一定是一种单独的污泥处理工艺,例如采用了泥龄很长的延时曝气法(如氧化沟)时,微生物利用内源呼吸进行好氧消化,此时污泥可部分达到稳定。

近年来国内在中小型(甚至大型)污水处理厂大多数采用国外引进的延时曝气氧化沟工艺,以增长泥龄,满足除磷脱氮的要求。首先,低负荷曝气池的池容和设备是中、高负荷活性污泥工艺的几倍,相应的投资要高几倍;其次,延时曝气对污泥采用好氧稳定,能耗比中、高负荷活性污泥工艺要高40%~50%。延时曝气增加了能耗,一方面带来了直接运行费的增加,另一方面还要增加间接投资。据资料报道,目前每千瓦发电能力所需脱硫投资1 000美元,则每万吨延时曝气污水处理系统,增加电耗所需的脱硫投资要70万元。从可持续发展角度讲,大规模地采用延时曝气的低负荷工艺不适合我国国情。

污泥热干燥法是利用热和压力破坏污泥的胶凝结构,并对污泥进行消毒杀菌。这种方法大大减少了污泥的体积,而且干燥后的剩余污泥能够成为一种有价值的农用肥料。热干燥法最大的缺点是初期投资费用和每日所需能量的费用过高。如果将厌氧消化与热干燥法结合起来,在干燥之前先对部分污泥进行厌氧消化,并将厌氧消化产生的过热蒸汽(SHS)用来干燥污泥,则投资和用于污泥干燥的费用都将大大减少。从热能的角度分析,厌氧消化和过热蒸汽干燥的结合完全能够实现能量的平衡。一般来讲,通过冷却SHS所获得的能量大于厌氧消化所需的能量,但由于厌氧消化受环境温度影响较大,所以在较寒冷的气候条件下,使用厌氧消化和过热蒸汽干燥相结合的方法处理污泥表现出更大的优势。这两种方法的有效结合充分发挥了厌氧消化和热干燥法各自的特点,实现了能源互补,但是整个系统设备复杂,初期投资大。

### 3 高速污泥厌氧消化技术的发展

由于污泥固体的生物可降解性低,完全的厌氧消化需要相当长的时间,即使停留时间为20~30 d也只能达到中等程度的降解,仅能去除30%~50%的VSS。提高厌氧消化效率的一个主要途径是促进污泥细胞的分解及胞内有机物的释放,增强其生物可降解性。

德国科学家 Neis 等人进行了利用低频超声波技术处理污泥(53%初沉污泥、47%剩余污泥)及其对中温厌氧消化促进作用的中试研究。结果发现,利用超声波(31 kHz, 3.6 kW)处理污泥64 s后,污泥中溶解性COD<sub>Cr</sub>从630 mg/L提高到2 270 mg/L,温度从15℃上升至45℃。后续的半连续式中温厌氧消化试验表明超声波破解污泥可以使厌氧消化的停留时间从22 d下降至8 d,产气量也有显著提高,破解后污泥的温度对厌氧消化未造成不良影响。

天津大学环境科学与工程学院利用低频超声技术,对污水处理厂剩余污泥进行破解处理试验,研究破解反应对提高厌氧消化反应速率和效率的影响。试验结果表明:与未处理污泥相比,超声破解能够显著提高污泥厌氧消化的生物气产量,缩短厌氧消化时间。试验发现,经破解的污泥,当厌氧消化时间缩短时,单位污泥的产气率反而呈增加趋势。

Weemaes 等人研究了污泥经臭氧氧化预处理后对后续厌氧消化的影响。试验结果表明,臭氧预处理可以对污泥中67%的有机物产生作用,其中(29±3)%被溶解,(38±9)%被去除。厌氧降解试验研究表明,预处理阶段可以提高后续的厌氧消化效率。当1 g COD<sub>Cr</sub>投加0.1 g O<sub>3</sub>时,甲烷的产量增加了1.8倍,产气率较控制组增加了2.2倍,同时还可以缩短污泥的停留时间。更高的臭氧投加量当然也会促进厌氧消化,但效果不是很明显。

在美国1993年颁布503污水污泥生物固体处理处置规则,提倡污泥处置优先土地利用。为提高污泥土地安全利用率,有效杀灭污泥病原菌,高温(55℃)污泥厌氧消化技术得到快速发展。许多原有的中温消化池都相继改造为高温消化池。

有的研究者将不同的强化处理措施进行有效的组合,或将污泥与其他有机废物混合进行厌氧消化,也往往可得到满意的处理效果。随着研究的不断深入,人们关注污泥厌氧工艺的开发,应该将现有的相关成熟技术最大程度的集成和组合,从而实现污泥资源化的思路。研究集中突破整合过程中的技术难点和关键技术,从而提出了多级厌氧处理工艺。

### 4 污泥厌氧消化工艺的产能分析

污泥厌氧消化能够产生大量的沼气。根据经验,消化池加热保温只需要所产沼气的35%~

45%,还有 55%~65%的沼气可作他用。据统计,厌氧处理 1 t COD<sub>Cr</sub>约耗电 75 kW·h,好氧法约为 1 000 kW·h,而且厌氧法去除 1 t COD<sub>Cr</sub>产生 350 m<sup>3</sup> 甲烷,每 m<sup>3</sup> 甲烷约可发电 3 kW·h(不同形式的沼气发电机有不同的效率),则去除 1 t COD<sub>Cr</sub>产生的甲烷气可发电 1 050 kW·h。所以厌氧处理 1 t COD<sub>Cr</sub>的净输出电为 975 kW·h。1 座设计规模为 5 万 m<sup>3</sup>/d 的城镇污水处理厂,大约每天产生污泥 10 t,厌氧消化有机物降解率假如为 50%,则能够发电约 5 250 kW·h。

2000 年日本对全国 305 座污泥厌氧消化处理厂调查统计结果表明,消化池平均容积 7 600 m<sup>3</sup>,消化温度 34 ℃,消化时间 34 d;投入污泥的 TSS 2.65%,厌氧消化 TSS 去除率为 51%,VSS 去除率为 57%,每 m<sup>3</sup> 污泥产 11 m<sup>3</sup> 沼气。1 个消化池平均产气量为 2 300 m<sup>3</sup>/d,日本全国污水污泥消化池总产气量为 264 450 kNm<sup>3</sup>/a,其中 53.4%作为消化池加热保温燃料被利用,发电利用量为 42 420 kNm<sup>3</sup>/a,约占 15.9%。发电量为 83.1 GW·h/a。日本有 19 座污泥处理厂采用沼气发电,发电方法除了传统气体发电机以外,还开发了磷酸态燃料电池以及固体高分子燃料电池。

德国的污水处理厂大多配备热、电、机械能联产沼气发动机,有沼气-汽油发动机或沼气-柴油发动机。在德国其污泥的平均沼气单位产量大约在 17 L/(人·d)。由于采用高效率的热、电、机械能联产沼气发动机,沼气利用可大约满足污水处理厂的总能量需求的 70%。一年内沼气发动机的运行时间越长,单位成本越低。根据德国的经验,6 万当量人口以上的污水处理厂(处理规模约为 1 万 m<sup>3</sup>/d),使用沼气发电是经济可行的。

北京高碑店污水处理厂的污泥消化系统运行 6 年以来的数据统计分析<sup>[7]</sup>,有机物分解率较好,基本维持在 20%~60%,平均有机物分解率在 36%左右。沼气的成分一直比较稳定,其中 CH<sub>4</sub> 60%~70%,CO<sub>2</sub> 25%~35%,H<sub>2</sub>S 0.5%~0.7%。经过几年运行摸索,沼气的利用量和发电量逐年上升。2003 年全年,沼气利用量近 528 万 m<sup>3</sup>,累计发电量 1 088 万 kW·h,占全厂发电消耗的 23.4%。2004 年上半年,沼气利用量近 210 万 m<sup>3</sup>,累计发电量 528 万

kW·h,占全厂电量消耗的 22.6%。

天津市东郊污水处理厂污泥产量 2 460 m<sup>3</sup>/d(含水率 96%),产生沼气 1.33 万 m<sup>3</sup>/d,供 4 台 248 kW 的发电机发电,发电量为 2.7 万 kW·h/d。

## 5 结语

(1) 污泥厌氧消化是一种实用的污泥稳定化、减量化、资源化技术。面对全球环境污染、能源危机等严峻形势,这种可同时削减污染和产生生物能的经济实用技术,符合可持续发展、建设资源节约型、环境友好型社会的国家发展战略。应该对现行的关于污泥处理处置技术政策条文进行修改,鼓励在有条件的污水处理厂优先考虑建设污泥厌氧消化设施。从开发利用可再生能源角度,国家应该制定相关政策,对污泥以及其他生物固体的沼气发电给予适当的政策补贴,电力部门应该支持生物能的利用。

(2) 在选用污泥处理处置方法时,要考虑生态环境效益、社会效益、经济效益、节约能源多方面的平衡。衡量一种污染治理方法最重要的标准应该是其环境效益,既能达到高效的污染物去除,又不会造成过多的二次污染,并尽可能做到处理后废物有使用价值,最终产物能够循环利用。厌氧消化技术正是能够满足上述多目标要求的技术。

(3) 鼓励研究开发新型高效的污泥厌氧消化工艺以及消化池的自动控制成套设备,提高甲烷气产量和污泥中有机物去除率,降低污泥消化时间,减少投资费用,提高运行稳定性。严格控制工业废水中重金属以及有毒有害持久性有机物的排放标准,使消化后的污泥能够安全利用。

(4) 引进先进高效的热、电、机械能联产沼气发动机,使沼气能量得到充分利用。随着能源费用的不断上涨,沼气利用对污水处理厂经济性可起到至关重要的作用。

(5) 推广厌氧消化池的市场化、专业化运营管理,提高运行稳定性。

## 参考文献

- 1 柯建明,王凯军,田宁宁.北京市城市污水污泥的处理和处置问题研究.中国沼气,2000,18(3):35~381
- 2 姚刚.德国的污泥利用和处置(I).城市环境与城市生态,2000,13(1):43~47

# 应强化政府与社会对水行业的监管力度

涂 兆 林

(北京城市排水集团有限责任公司,北京 100038)

**摘要** 近年来,我国水行业建设与改革发展迅速,随之也出现了一些问题。基于水行业公共产品特性分析以及国外水行业建设、监管模式分析,提出应强化政府监管与公众监督、建立行业信息管理机制、适当引入竞争机制、强化从业教育等措施来确保水行业企业提供优质、高效服务。

**关键词** 水行业 改革 政府监管 市场竞争

近年来,我国在城市供水与污水处理基础设施建设和运营领域所取得的成就有目共睹。到2004年底,全国661个城市的供水覆盖率已经从1990年的50%提高到88%,建有708座城市污水处理厂,处理能力达4 912万m<sup>3</sup>/d,加上117座县城污水处理厂273万m<sup>3</sup>/d的处理能力,我国城镇污水处理能力总计达5 185万m<sup>3</sup>/d,是10年前的3倍多。但我国城市水务行业也存在一系列亟待解决的问题。本文在水行业的特点分析的基础上,提出提高水行业效率与服务质量的一些看法。

## 1 水行业特点分析

### 1.1 自然垄断经营和公共产品特性

(1) 水行业服务自然垄断的不可替代性。由于在同一地区重复建设管网及设施的不可行,一旦顾客与一家公司的管网连接就失去了选择其他公司服务的机会,除非资产变更。而且资产庞大、系统复杂、服务不能间断,变更十分困难,频繁变更将严重影响公众的正常生活。

(2) 水行业为资本密集型的产业。遍布全市的管网及厂站设施建设所带来的高资本投入及高成本

- 3 Sugrue K, Kiely G, McKeogh E. Pilot plant study of the anaerobic digestion of a mixture of municipal sewage and industrial sludge. *Wat Sci Tech*, 1992, 26(99): 2465~2468
- 4 尹军, 韩卫. 日本的污泥处理现状及展望. *中国给水排水*, 1995, 11(3): 48~49
- 5 彭武厚. 厌氧消化技术发展前景广阔. *工业微生物*, 1997, 27(3): 32~36
- 6 邱琴忠. 污水处理厂最终处置污泥的方法研究. *甘肃科技*, 2004, 20(3): 127~128
- 7 宋晓雅, 李维, 王洪臣, 等. 高碑店污水处理厂污泥处理系统工艺介绍及运行分析. *给水排水*, 2004, 30(12): 1~5
- 8 扬子江. 城市污泥的综合利用研究. *再生资源研究*, 2004, 1: 32~36
- 9 Fitzpatrick J. Sludge processing by anaerobic digestion and superheated steam drying. *Water Research*, 1998, 32(10): 2897~2902
- 10 Ciwerni J. Development in the thermal drying of sewage sludge. *Water Environment Management*, 1995, 9(3): 306~316
- 11 Lin J G, Chang C N, Chang S C. Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by alkaline solubilization. *Bioresource Technology*, 1997, 62: 85~90
- 12 Tihm A, Nickel K, Neis U. The use of ultrasound to accelerate

the anaerobic digestion of sewage sludge. *Wat Sci Tech*, 1997, 36(11): 121~128

- 13 Weemaes M, Grootaerd H. Anaerobic digestion of ozonized bio-solids. *Water Research*, 2000, 34(8): 2330~2336
- 14 李玉友. 甲烷回收技术的应用现状与展望. *水环境学会志*, 2004, 27(10): 622~626
- 15 赵亚乾, Davis R D. 英国污泥处置现状与发展趋势. *给水排水*, 1998, 24(9): 28~29
- 16 周克钊. 国内外污水污泥处理技术发展趋势. *西南给排水*, 2000, 24(5): 12~18
- 17 杨洁. 剩余污泥超声破解对厌氧消化反应的促进作用研究. [学位论文]. 天津: 天津大学, 2005

✉ 通讯处: 300457 天津经济技术开发区第二大街42号  
滨海新区管委会

电话: (022) 66222871

E-mail: wby1988@sina.com

收稿日期: 2006-12-22

修回日期: 2007-02-08