

不同生物预处理方式对污泥厌氧消化过程性能的影响*

李雪¹ 林聪¹ 沙军冬^{1,2} 李想^{1,3} 王飞³

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 北京盈和瑞环保工程有限公司, 北京 100043;
3. 农业部农业生态与资源保护总站, 北京 100125)

摘要: 利用微生物处理技术对经聚丙烯酰胺脱水后的污泥进行不同方式微生物预处理, 研究进料总固体(TS)质量分数为3%、发酵温度为35℃时厌氧消化过程中累积产气量与产甲烷含量、pH值、氨氮和化学需氧量(TCOD)等参数的变化趋势, 探索真菌宛氏拟青霉不同预处理方式对脱水污泥厌氧消化过程特性的影响。试验结果表明: 微生物预处理脱水污泥厌氧消化技术具有较好的可行性。直接添加宛氏拟青霉和添加宛氏拟青霉预处理2 d的污泥进行厌氧消化反应能够有效提高产气量和产甲烷量, 加快水解速率, 促进污泥中有机物的有效降解, 使产甲烷过程顺利进行。直接添加宛氏拟青霉处理的产甲烷效果最优, 其净累积产气量和产甲烷量较纯污泥分别提高85.79%和42.76%, 且1 kg污泥可产甲烷12.69 L, 较纯污泥提高42.74%。

关键词: 微生物预处理 脱水污泥 厌氧消化 过程性能

中图分类号: X705; TQ920.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)08-0186-06

Effect of Different Biopretreatments on Anaerobic Digestion Process Performance of Sludge

Li Xue¹ Lin Cong¹ Sha Jundong^{1,2} Li Xiang^{1,3} Wang Fei³

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Beijing Yingherui Environmental Engineering Co., Ltd., Beijing 100043, China
3. Rural Energy & Environment Agency, Ministry of Agriculture, Beijing 100125, China)

Abstract: With the rapid development of the sewage treatment, dewatered sludge, as an inevitable byproduct, is increasing its amount. Anaerobic digestion performance of dewatered sludge flocculated by polyacrylamide under different biopretreatments conditions were studied. The feeding concentration was 3% of total solid, and the digestion temperature was 35℃. The cumulative biogas yield, methane content, pH value, ammonia nitrogen content and total chemical oxygen demand (TCOD) were analyzed to explore the effect of fungus—*Paecilomyces variotii* on anaerobic digestion process. The result showed that biopretreatment of dewatered sludge prior to anaerobic digestion was an alternative method. Direct addition and 2 d biopretreatments can both enhance cumulative biogas yield and methane content with faster hydrolysis rate and better organic matter degradation rate. Compared with the pure sludge treatment, direct addition of *Paecilomyces variotii* was optimal, and its cumulative biogas production and methane production were increased by 85.79% and 42.76%, respectively. While 1 kg dewatered sludge can produce 12.69 L methane with an increase of 42.74% of sludge without pretreatment. The result would provide theoretical basis for solving the problem of dewatered sludge resourceful treatment.

Key words: Biopretreatment Dewatered sludge Anaerobic digestion Process performance

收稿日期: 2014-10-28 修回日期: 2014-12-04

* 公益性行业(农业)科研专项资助项目(201303101-03)

作者简介: 李雪, 博士生, 主要从事农业生物环境与能源工程研究, E-mail: lixue17@cau.edu.cn

通讯作者: 林聪, 教授, 博士生导师, 主要从事农业生物环境与能源工程研究, E-mail: lincong@cau.edu.cn

引言

据住房和城乡建设部报告,截至 2014 年 3 月底,全国累计建成城镇污水处理厂 3 622 座,污水处理能力约 1.53 亿 m^3/d ,较 2013 年底增加约 430 万 m^3/d ^[1]。污泥作为污水处理副产物,其产量也逐年攀升。据报道,2010 年我国污泥(含水率 80%)产生量约 2 076 万 t,2011 年超过 3 000 万 t,其中 75% ~ 85% 未被妥善处理^[2-5],而污泥中含有蛋白质、碳水化合物和脂肪以及金属元素,适宜被资源化利用^[6-10]。

我国大多数污水处理厂利用絮凝剂降低污泥含水率实现初步减容但未实现稳定化,“重水轻泥”现象严重,对环境造成二次污染^[6,11]。聚丙烯酰胺是常用的絮凝剂和土壤改良剂^[12-15],为无毒、稳定高分子聚合物,作絮凝剂时可使污泥黏度增高分子结构稳定性增加,但又加大污泥处理难度,资源化利用受到抑制,且降解过程中间产物及衍生物和丙烯酰胺单体有危害^[16-17]。利用微生物代谢和各种酶降解高分子聚合物是一种经济有效的手段^[18]。微生物对聚丙烯酰胺降解效果研究^[19-22]大部分集中于细菌。王磊^[23]筛选出可降解聚丙烯酰胺的微生物,其 18S rDNA 序列与宛氏拟青霉相似度为 100%。推测宛氏拟青霉可能对聚丙烯酰胺有生物适应性。针对脱水污泥的研究国外相对较少,国内主要有冻融法、与其他废弃物联合厌氧消化方法^[24-26]。本文利用宛氏拟青霉对脱水污泥进行不同方式预处理,研究其厌氧消化过程性能。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料性质

试验采用的脱水污泥取自北京市海淀区排水管理所温泉再生水厂,该厂采用聚丙烯酰胺絮凝剂对污泥进行脱水,脱水后污泥含水率约为 87.3%。接种物取自本实验室正常厌氧发酵沼气罐的排料。试验材料的基本理化特性如表 1 所示。试验选取处理污泥的微生物为宛氏拟青霉,购买于中国普通微生物菌种保藏管理中心。利用适宜的培养基进行菌种扩繁。经过约 5 d 培养,取培养基清液进行微生物计数,菌数可达 10^9 个/mL。培养基为:马铃薯浸出液 1.0 L,葡萄糖 20.0 g,自然 pH 值(不需调节),培养温度为 30℃。

污泥物化学成分复杂,其中含有一定量的重金属,如铜、铅、锌、镉等。因此重金属污染问题一直以来都是人们担心污泥农用环境风险的焦点之一,重金属超标会对生态环境乃至人类健康造成不可弥补的损失^[27-28]。本试验对所用脱水污泥原料的几

表 1 消化原料的基本特性

Tab. 1 Basic properties of anaerobic digestion

项目	raw materials			
	总固体质量 分数/%	挥发性有机物质 量分数/%	pH 值	碳氮 质量比
脱水污泥	12.70	53.53	6.0 ~ 6.5	6
接种物	1.72	41.21	7.15	

种常见重金属元素进行了检测,如表 2 所示。结果表明,锌含量相对较高,这可能是由于我国城市大量使用镀锌管道运输所致。其次是铜的含量,镉、铬和铅的含量相对较低,与陈同斌等的研究结果相似^[27]。本试验所测重金属指标均低于 CJ/T 309—2009《城镇污水处理厂污泥处置 农用泥质》中 A 类标准,满足种植蔬菜肥料重金属含量要求。本研究所取污泥原料的重金属处于相对安全的范围。

表 2 污泥重金属含量(以干基计算)

Tab. 2 Heavy metal content of sludge(calculated

项目	on dry basis)					mg/kg
	锌	铜	铬	铅	镉	
脱水污泥	714.00	153.00	72.00	29.50	0.94	

1.2 试验装置

试验装置主要包括恒温水浴装置、厌氧消化装置和集气装置,如图 1 所示。厌氧消化瓶、集气排水瓶均为 2 000 mL 锥形瓶,集水瓶容积为 1 500 mL。采用排水集气法每日定时记录产气量,每日搅拌 2 次,持续时间 0.5 min。

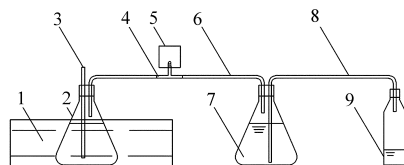


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Diagram of anaerobic digestion reactor system

1. 恒温水浴锅
2. 厌氧消化器
3. 取样管
4. 三通连接器
5. 采气袋
6. 导气管
7. 集气瓶
8. 导水管
9. 集水瓶

1.3 试验方案

采取全进全出批式进料方式,厌氧消化温度控制在 $(35 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。设计进料 TS 质量分数为 3%,消化时间持续 18 d。按宛氏拟青霉最佳培养方式进行驯化扩繁,试验添加总菌数均为 1.3×10^{11} 个,每克污泥接触菌数平均为 2.95×10^8 个。试验设置 4 个处理,分别为宛氏拟青霉直接添加在纯污泥中和宛氏拟青霉添加在纯污泥中预处理 2 d 2 个不同处理,添加顺序均为向脱水污泥中先加入菌液、后加入接种物;纯污泥(对照 1)以及沼液接种物(对照 2),进行厌氧消化过程对比分析,各处理进料 TS 质量均为 55.87 g。具体试验方案如表 3 所示。

表3 厌氧消化试验方案

Tab.3 Experiment design of anaerobic digestion

处理编号	处理	微生物 添加方式	脱水污泥 质量/g	接种物 质量/g	菌液 体积/mL	总菌数/个	总固体 质量/g	设计总固体 质量分数/%
R1	脱水污泥	不添加	440	1 422.67			55.87	3
R2	脱水污泥 + 真菌	直接添加	440	1 422.67	30	1.3×10^{11}	55.87	3
R3	脱水污泥 + 真菌	预处理 2 d	440	1 422.67	30	1.3×10^{11}	55.87	3
R4	沼液			1 422.67			55.87	

1.4 检测指标分析方法

TS 采用 103 ~ 105℃ 干燥称量法。VS 采用 550℃ 焚烧称量。pH 值采用 Mettler Toledo pH 计。氨氮浓度采用纳氏试剂原理利用哈纳单离子测定仪测试。TCOD 采用重铬酸钾法测定。采用安捷伦 1490 型气相色谱仪分析甲烷成分,采用 TCD 热导检测器,顶空进样器(HSJ-05A型),空气泵(GCB2000型),载气为氮气。采用排水集气法计量产气量,采用恒温水浴摇床培养微生物,采用细胞板计数法计数。

2 结果与讨论

2.1 污泥厌氧消化产气量变化

各处理日产气量变化如图2所示,在18d的厌氧消化周期内,4个处理的日产气量随时间变化总趋势基本一致,主要产气时间发生在13~15d。R1、R2和R3的产气高峰分别出现在第8、8、9天,产气峰值分别为724、1 041、820 mL。污泥中直接添加宛氏拟青霉处理R2与纯污泥厌氧发酵产气高峰出现的时间相同,但最大产气量较纯污泥处理提高43.78%,污泥经宛氏拟青霉预处理2d后处理R3产气高峰最大产气量较纯污泥提高13.26%,说明微生物的作用大大提高了污泥的分解能力。直接添加处理较预处理2d处理污泥产气高峰值提高26.95%,说明宛氏拟青霉的添加时间对污泥的分解有影响。消化进行至15d后,R1、R2、R3和R4产气基本结束,15d累积产气量达到总产气量的98%以上,说明污泥厌氧消化周期较短,约为13~15d。

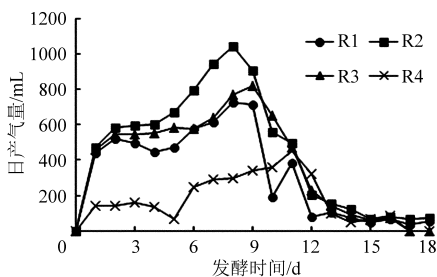


图2 不同处理厌氧消化日产气量变化

Fig.2 Daily biogas production of different treatments

厌氧消化周期内累积产气量如图3所示。从图

中可以看出,R1~R4处理的总累积产气量由高到低排序为R2>R3>R1>R4。R4作为沼液接种物对照组其产气量均在各试验组中扣除。R2净累积产气量为5 176 mL,R3净累积产气量为3 952 mL,R1净累积产气量为2 786 mL。结果表明,当每克污泥接触菌数平均为 2.95×10^8 个时,经过宛氏拟青霉处理的污泥比纯污泥厌氧消化具有更多的累积产气量,R2的总产气量和净累积产气量较纯污泥分别提高了39.56%和85.79%,R3的总产气量和净累积产气量较纯污泥分别提高19.30%和41.85%,证明添加宛氏拟青霉可以有效促进污泥的消化降解过程,使得被聚丙烯酰胺包裹的污泥中的有机物能与产酸菌和产甲烷菌充分接触,达到充分降解,提高产气效果。另外,R2的净累积产气量较R3提高了30.97%,说明直接添加微生物对产气量有明显促进作用。

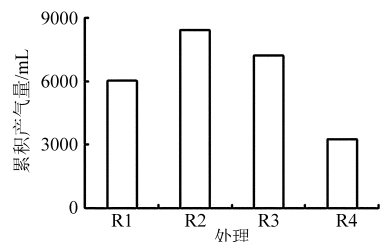


图3 不同处理累积产气量对比

Fig.3 Total cumulative biogas production of different treatments

发酵周期内产甲烷含量变化与累积产甲烷量如图4、5所示。从图4可以看出,厌氧消化第2天,R1、R2、R3的产甲烷含量均超过50%,说明污泥的厌氧消化水解酸化阶段时间短,消化接种过程启动快,从第2~13天,R1、R2、R3处理甲烷含量均在

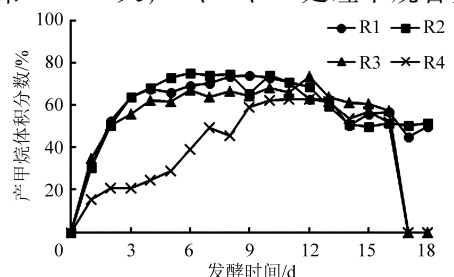


图4 不同处理产甲烷含量

Fig.4 Methane content of different treatments

60% 以上,说明污泥厌氧消化所产沼气中的甲烷含量相对较高,其沼气中的利用热值也较高。

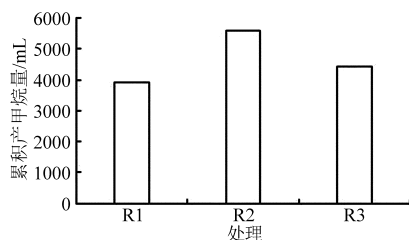


图 5 不同处理累积产甲烷量

Fig. 5 Methane production of different treatments

发酵周期内甲烷总产量由高到低排序为 $R2 > R3 > R1$, R2 累计甲烷产量为 5 582 mL, R3 累计甲烷产量为 4 434 mL, R1 累计甲烷产量为 3 910 mL, 可以看出 R2 累积产甲烷总量较 R1 提高了 42.76%, R3 较 R1 提高了 13.40%。说明添加宛氏拟青霉可以有效提高污泥的产甲烷量,且直接添加比预处理 2 d 效果更明显,由此推断,宛氏拟青霉可与接种物中的产酸菌和产甲烷菌相互配合,加速污泥中有机物的降解,促进产甲烷过程的进行。

预处理 2 d 处理甲烷产气量和净累积产气量均低于直接添加处理组,推测是由于在污泥中添加宛氏拟青霉预处理 2 d 时,宛氏拟青霉作用于经聚丙烯酰胺絮凝脱水的污泥,破坏了污泥稳定分子结构,使其中包裹的有机物质溶出,但此时未添加接种物且部分有机物质还可能被其他微生物新陈代谢所利用如宛氏拟青霉。当直接添加宛氏拟青霉时在消化系统反应初期,宛氏拟青霉的作用破坏了污泥分子结构,其中有机物质溶出的同时充分与接种物中的产酸菌和产甲烷菌接触并及时分解产生沼气,因此直接添加处理的甲烷产气量和净累积产气量均高于预处理 2 d 处理。经计算,1 kg 纯污泥可产甲烷 8.89 L,直接添加宛氏拟青霉的 1 kg 污泥可产甲烷 12.69 L,较纯污泥提高了 42.74%;经宛氏拟青霉预处理 2 d 的 1 kg 污泥可产甲烷 10.08 L,较纯污泥提高了 13.39%。

2.2 pH 值变化

在整个厌氧消化过程中 pH 值变化如图 6 所示。各处理组均未出现酸化抑制现象,pH 值均在 6.9 以上。第 2 天各处理 pH 值均有所降低,之后迅速回升至适宜范围,说明添加宛氏拟青霉预处理能够缓冲料液酸化,加速污泥水解速率,使厌氧消化过程顺利进入产甲烷阶段。冻融预处理脱水污泥消化过程 pH 值在 6.7~8.2 之间,且先升高后下降^[25];而微生物预处理脱水污泥的 pH 值基本维持在 6.9~7.6 之间,且先下降后升高,变化过程更为平缓,更适宜厌氧消化处理。

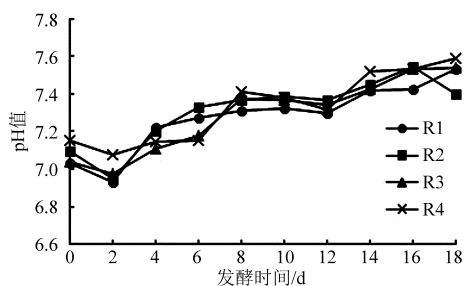


图 6 不同处理 pH 值变化

Fig. 6 pH value variation of different treatments

2.3 氨氮质量浓度变化

厌氧消化时大量含氮有机物经水解产生氨氮使料液中氨氮质量浓度升高^[29]。本试验表明,虽然污泥碳氮质量比较低约为 6,氨氮随着各类含氮有机物分解而积累,使质量浓度呈现波动性增加,但均未超过 1 100 mg/L,如图 7 所示。在冻融预处理脱水污泥厌氧消化研究中有相似结果^[25]。说明微生物预处理污泥后发酵过程中各类菌群相互配合作用使消化系统未出现氨氮抑制现象,发酵过程顺利进行。

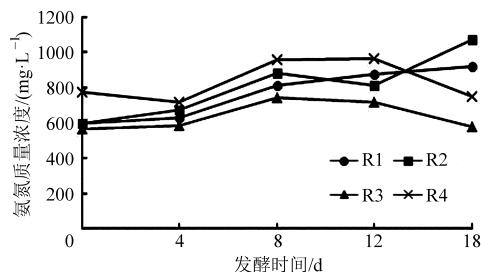


图 7 不同处理氨氮质量浓度变化

Fig. 7 Ammonia concentration of different treatments

2.4 TCOD 变化

各处理厌氧消化过程 TCOD 变化如图 8 所示,变化趋势基本一致。随着厌氧发酵的进行,TCOD 含量有所增高,表明通过宛氏拟青霉的作用,聚丙烯酰胺由大分子聚合物断裂成较小分子量的物质,由其包裹的有机物不断溶出,被产酸菌和产甲烷分解利用 TCOD 不断降低。TCOD 再次升高是由于污泥中有机物溶出有一定延迟性,随着有机物的溶出和

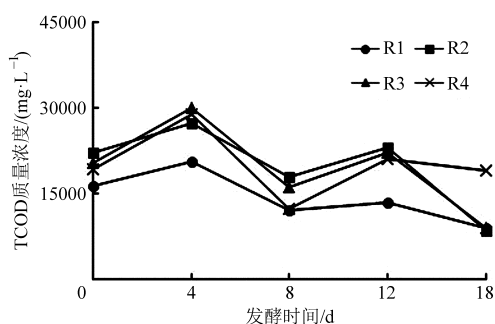


图 8 不同处理 TCOD 质量浓度变化

Fig. 8 TCOD concentration of different treatments

降解,TCOD进一步降低。此外,经过微生物处理过的处理发酵过程变化程度较剧烈且降解效果较好,而纯污泥处理变化较为平缓。

2.5 TS产气量

R1~R3处理的TS产气量如图9所示。在发酵料液进料TS量相同的条件下,R2和R3的TS产气量分别为150.92、129.01 mL/g,较纯污泥分别提高了约39.56%和19.30%,均优于纯污泥发酵效果。通过不同微生物预处理方式可看出,直接添加处理TS产气量较预处理2 d处理提高了16.98%。一般污水处理厂二沉池排出的剩余污泥更适宜厌氧消化,据报道高碑店污水处理厂一级消化池设计产气量为 $7\text{ m}^3/\text{m}^3$,进泥含水率94%^[30],若将剩余污泥密度近似按 $1\ 000\text{ kg}/\text{m}^3$ 计,剩余污泥TS产气量为116.67 mL/g,对比本研究取纯污泥的TS产气量低于剩余污泥理论TS产气量,而经真菌宛氏拟青

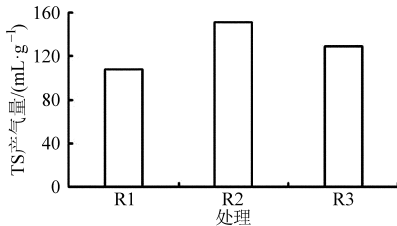


图9 各处理厌氧消化TS产气量

Fig. 9 Biogas production based on TS loaded of different treatments

霉不同作用方式处理后的TS产气量较剩余污泥分别提高了29.36%和10.58%,说明宛氏拟青霉预处理脱水污泥能有效提高污泥TS产气量。

3 结论

(1)利用微生物预处理脱水污泥进行厌氧消化是可行的。在添加宛氏拟青霉菌数为 1.3×10^{11} 个,每克污泥接触菌数平均为 2.95×10^8 个条件下,可有效促进污泥中有机物降解,提高产气量和产甲烷量,加快污泥水解速率,促进污泥中有机物的溶出和降解,提高TCOD去除效果,使产甲烷过程顺利进行。

(2)直接添加和预处理2 d两种预处理方式下,直接添加宛氏拟青霉时总产气量、净累积产气量和产甲烷量较纯污泥分别提高39.56%、85.79%和42.76%,预处理2 d时总产气量、净累积产气量和产甲烷量较纯污泥分别提高19.30%、41.85%和13.40%。直接添加宛氏拟青霉时1 kg污泥可产甲烷12.69 L,宛氏拟青霉预处理2 d时1 kg污泥可产甲烷10.08 L,较纯污泥组分别提高42.74%和13.39%。

(3)宛氏拟青霉预处理脱水污泥能有效提高污泥TS产气量。直接添加方式下各厌氧消化技术参数优于预处理2 d时的微生物预处理方式。

参 考 文 献

- 1 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房城乡建设部关于全国城镇污水处理设施2014年第一季度建设和运行情况的通报[R]. 北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,2014.
- 2 Zhao P T, Shen Y F, Ge S F, et al. Energy recycling from sewage sludge by producing solid biofuel with hydrothermal carbonization[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 78: 815–821.
- 3 Zhao P T, Ge S F, Yoshikawa K. An orthogonal experimental study on solid fuel production from sewage sludge by employing steam explosion[J]. Applied Energy, 2013, 112: 1213–1221.
- 4 Li W H, Shi Y L, Gao L H, et al. Occurrence, distribution and potential affecting factors of antibiotics in sewage sludge of wastewater treatment plants in China[J]. Science of the Total Environment, 2013, 445–446: 306–313.
- 5 邹宝华,王宏斌. 污水污泥处理处置现状及研究进展[J]. 价值工程,2012,31(13):30–31.
Zou Baohua, Wang Hongbin. Present situation and progress of sewage sludge treatment and disposal[J]. Value Engineering, 2012, 31(13): 30–31. (in Chinese)
- 6 戴晓虎. 我国城镇污泥处理处置现状及思考[J]. 给水排水,2012,38(2):1–5.
- 7 王星,赵天涛,赵由才. 污泥生物处理技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.
- 8 朱开金,马忠亮. 污泥处理技术及资源化利用[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- 9 孟成林,李荣平,李秀金. 用于污泥厌氧消化的温室-太阳能热水器组合增温系统[J]. 农业工程学报,2009,25(9):210–214.
Meng Chenglin, Li Rongping, Li Xiujin. Integrated system of greenhouse and solar heater for anaerobic digestion of excess activated sludge[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 210–214. (in Chinese)
- 10 张增强. 污水处理厂污泥堆肥化处理研究[J]. 农业机械学报,2011,42(7):148–154.
Zhang Zengqiang. Composting sewage sludge of wastewater treatment plant[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 148–154. (in Chinese)
- 11 Xu C Q, Chen W, Hong J L. Life-cycle environmental and economic assessment of sewage sludge treatment in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 67:79–87.

- 12 赵智,唐泽军,宋满刚,等. 粉煤灰和聚丙烯酰胺对沙质土壤中玉米生长的影响[J]. 农业机械学报,2013,44(6):136-142.
Zhao Zhi, Tang Zejun, Song Mangang, et al. Effect of sandy soils amendment with fly ash and polyacrylamide on corn growth [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 136-142. (in Chinese)
- 13 廖人宽,杨培岭,任树梅,等. PAM和SAP防治库区坡地肥料污染试验[J]. 农业机械学报,2013,44(7):113-120.
Liao Renkuan, Yang Peiling, Ren Shumei, et al. PAM and SAP application for reservoir area slope manure pollution control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 113-120. (in Chinese)
- 14 吕威,李淑芹,雷廷武,等. 聚丙烯酰胺应用对黄土复合坡面降雨产流的影响[J]. 农业工程学报,2014,30(6):71-79.
Lü Wei, Li Shuqin, Lei Tingwu, et al. Effects of polyacrylamide application on rainfall runoff in composite slopes of loessial soil [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(6): 71-79. (in Chinese)
- 15 Sojka R E, Lentz R D, Rose C W, et al. PAM effect on infiltration in irrigated agriculture [J]. Soil Water Conservation, 1998, 53(4): 325-331.
- 16 Rudén C. Acrylamide and cancer risk-expert risk assessments and the public debate [J]. Food Chemical Toxicology, 2004, 42(3): 335-349.
- 17 Luo Y L, Yang Z H, Xu Z Y, et al. Effect of trace amounts of polyacrylamide (PAM) on long-term performance of activated sludge [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 189(1-2): 69-75.
- 18 Dai X H, Luo F, Yi J, et al. Biodegradation of polyacrylamide by anaerobic digestion under mesophilic condition and its performance in actual dewatered sludge system [J]. Bioresource Technology, 2014, 153: 55-61.
- 19 Kumichika N, Shinichi K. Isolation of polyacrylamide-degrading bacteria [J]. Journal Fermentation and Bioengineering, 1995, 80(4): 418-420.
- 20 Chang L L, Raudenbush D L, Dentel S K. Aerobic and anaerobic biodegradability of a flocculant polymer [J]. Water, 2001, 44(2-3): 461-468.
- 21 包木太,王娜,陈庆国,等. 活性污泥中细菌对聚丙烯酰胺的生物降解研究[J]. 农业环境科学学报,2009,28(4):833-838.
Bao Mutai, Wang Na, Chen Qingguo, et al. Research on biodegradation of polyacrylamide by bacteria isolated from sewage sludge [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(4): 833-838. (in Chinese)
- 22 董春娟,吕炳南,马立,等. 微生物群落在难降解物质生物降解中的作用[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(7):893-896.
Dong Chunjuan, Lü Bingnan, Ma Li, et al. Importance of microorganism community for degradation of refractory compounds [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(7): 893-896. (in Chinese)
- 23 王磊. 聚丙烯酰胺降解真菌的筛选及降解特性[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2012.
- 24 Zhang W Q, Wei Q Y, Wu S B, et al. Batch anaerobic co-digestion of pig manure with dewatered sewage sludge under mesophilic conditions [J]. Applied Energy, 2014, 128: 175-183.
- 25 胡凯. 污泥预处理——厌氧消化工艺性能及预处理过程中有机物变化[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- 26 戴晓虎,王凯丽,董滨,等. 黄花和脱水污泥厌氧消化的温室气体减排研究[J]. 中国环境科学,2014,34(4):876-883.
Dai Xiaohu, Wang Kaili, Dong Bin, et al. The greenhouse gases emissions reduction of anaerobic digestion of solidago and dewatered sludge [J]. China Environmental Science, 2014, 34(4): 876-883. (in Chinese)
- 27 陈同斌,黄启飞,高定,等. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势[J]. 环境科学学报,2003,23(5):561-569.
Chen Tongbin, Huang Qifei, Gao Ding, et al. Heavy metal concentrations and their decreasing trends in sewage sludges of China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(5): 561-569. (in Chinese)
- 28 梁丽娜,黄雅曦,杨合法,等. 污泥农用对土壤和作物重金属累积及作物产量的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(6):81-86.
Liang Lina, Huang Yaxi, Yang Hefa, et al. Effect of farmland application of sewage sludge on crop yield and heavy metal accumulation in soil and crop [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 81-86. (in Chinese)
- 29 蒋建国,王岩,隋继超,等. 厨余垃圾高固体厌氧消化处理中氨氮浓度变化及其影响[J]. 中国环境科学,2007,27(6):721-726.
Jiang Jianguo, Wang Yan, Sui Jichao, et al. Variations of the ammonia concentration of high digestion technology solid anaerobic for organic waste [J]. China Environmental Science, 2007, 27(6): 721-726. (in Chinese)
- 30 蒋奇海,葛勇涛,陈靖轩,等. 高碑店污水处理厂污泥厌氧消化系统恢复运行的经验[J]. 中国给水排水,2014,30(2):98-101.
Jiang Qihai, Ge Yongtao, Chen Jingxuan, et al. Recovery operation of sludge anaerobic digestion system at Gaobeidian WWTP [J]. China Water and Wastewater, 2014, 30(2): 98-101. (in Chinese)