

薛勇刚,吴芳芳,刘旭军,等.磷回收技术及其在污泥资源化领域的研究进展[J].环境科学与技术,2014,37(120):247-251. Xue Yonggang, Wu Fangfang, Liu Xujun, et al. A review on phosphorus recovery technology and its application in the sewage sludge recycling [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(120): 247-251.

磷回收技术及其在污泥资源化领域的研究进展

薛勇刚^{1,2}, 吴芳芳², 刘旭军¹, 戴晓虎^{1*}

(1. 污染控制与资源化研究国家重点实验室 同济大学, 上海 200092; 2. 同济大学苏州研究院 江苏 苏州 215100)

摘要 磷回收是废弃物资源化的重要选择之一,各类水处理技术、资源化技术的不断发展,对磷回收技术也有很大的促进作用。磷回收技术在多个国家取得突破性研究进展,为磷资源的回收利用提供了新的思路和解决方法。

关键词 磷回收; 鸟粪石; 污泥; 沼液; 飞灰

中图分类号 X703 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2014.120.047 文章编号 1003-6504(2014)120-0247-05

A Review on Phosphorus Recovery Technology and Its Application in the Sewage Sludge Recycling

XUE Yonggang^{1,2}, WU Fangfang², LIU Xujun¹, DAI Xiaohu^{1*}

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Suzhou Institute of Tongji University, Suzhou 215100, China)

Abstract: Phosphorus (P) recovery is an important choice in wastes recycling technology. The development of wastewater treatment technology and the wastes recycling technology have promoted the P recovery technology. And many new P recovery technologies were developed in some countries, which offer a new way for recycling of phosphorus resources.

Key words: phosphorus recovery; struvite; sewage sludge; biogas liquid; SSA

磷存在于人体所有细胞中,是维持骨骼和牙齿的必要物质,是维持人体代谢的重要元素,是植物生长发育必须的营养物。全球的磷矿资源分布极不平衡,主要分布于摩洛哥(42%)、中国(26%)、美国(7%)、南非(5%)^[1],其他缺乏磷矿资源的国家主要依赖于进口磷资源来满足本国生产需要。磷在自然界中的循环是一种单向循环,它并不能像氮一样进入空气,再从空气进入生物体内,而是从“磷矿—海底沉积物”这样一种逐渐流失的过程,是一种珍贵的不可再生资源。据美国地质调查局的统计数据可知,世界磷矿石经济储量为 180 亿 t,基础储量为 500 亿 t。当前世界磷矿石的年开采量为 1.4 亿 t 左右,预计到 2030 年世界磷矿石的年开采速度将超过 1.87 亿 t^[2]。以目前消耗速度计算,全球磷矿将会在 100~250 年内消耗殆尽^[3]。因此,目前磷矿资源已经作为一种稀缺性战略资源得到

越来越多的关注和研究。

被人类开采利用的磷资源大部分流入污水进入污水处理厂,而在污水处理过程中,磷最终又被截留在剩余污泥中,富含氮磷等营养元素的剩余污泥可以称之为“放错位置的资源”,为此,从污泥中回收磷,一方面降低磷进入水体产生富营养化的风险,另一方面也是发掘第二磷矿解决世界磷资源短缺问题的重要构想。本文主要总结归纳了国内外磷回收技术的研究现状,重点介绍了从污泥中回收磷的研究现状和存在问题。

1 磷回收技术的发展现状

磷回收方法有纯粹的化学法或者生物化学相结合的方法。化学沉淀法是一种简便、高效的磷回收技术,而前提是有含磷浓度较高的回收对象,以及适宜的沉淀环境。相应于不同回收对象的性质,以及一些

《环境科学与技术》编辑部 (网址)http://jstj.chinajournal.net.cn (电话)027-87643502 (电子信箱)hjkxyjs@126.com

收稿日期 2014-03-24;修回日期 2014-08-10

基金项目 城市污水高含固污泥高效厌氧消化装备开发与工程示范课题 (2013ZX07315-001) 苏州市科技基础设施建设计划 苏州市膜污染控制重点实验室(SZSD201111)

作者简介 薛勇刚(1982-),男,博士研究生,研究方向为污水污泥资源化利用技术 (电话)0512-66016536 (电子信箱)xue.tongji@gmail.com; * 通讯作者(电话)0512-66016535(电子信箱)wffrebel@126.com。

新技术(如离子交换、膜技术、新的生物技术等)的出现,其它磷回收途径与形式也在不断地应运而生。

1.1 磷酸盐沉淀法

磷酸盐沉淀法是最常用的磷回收技术之一,因其能够通过迅速的化学反应生成鸟粪石(磷酸铵镁/MAP)、磷酸钙、磷酸铝、磷酸铁等磷酸盐沉淀,从而将磷从废水中分离。

Ganrot Z 等^[4]在瑞典建立了原位回收并浓缩磷以及其他营养元素的工艺,从家庭废水中回收鸟粪石。

在日本 Hiagari 污水处理厂,Driver J 等^[5]建立了一个中试流化床鸟粪石沉淀反应器,用来处理污泥脱水上清液。

加拿大的 Ostara 公司建立了 Pearl[®] Process 技术,得到的鸟粪石产品 Crystal Green 可以作为一个商业肥料直接销售^[6]。

1.2 生物富集法

聚磷菌是传统活性污泥工艺中一类特殊的兼性细菌,能够在不同的条件下进行磷的吸收和释放。因此能够通过控制条件,使聚磷菌将废水中的磷先富集后释放,得到浓缩的含磷溶液。

Yuan Z 等^[7]采用了强化生物除磷技术(EBPR),利用聚磷菌(PAOs)来从废水中吸收磷,以此来将磷集中于生物质内,富含磷的生物固体溶解之后回收为鸟粪石产物。

Wong 等^[8]研究表明,EBPR-r 工艺能够使含磷 7 mg/L 的废水浓缩至 4 倍以上,达到 28 mg/L。减少了四倍的废水体积而获得了高浓度的含磷废水。之后再采用 PAO 生物膜(通过 P 吸收和释放的循环)获得了更高浓度(~100 mg/L)的废液。再通过鸟粪石等沉淀法回收浓缩废液中的磷。

1.3 离子交换法

离子交换法磷回收是利用离子交换树脂的交换基团与溶液中的磷酸根进行置换反应,将溶液中的磷酸根富集到树脂上,再通过树脂的再生获得含磷的溶液。

Petruzzelli 等^[9]研究的 REM NUT 工艺,采用阴床去除等量磷酸根离子,以 3~20 BV/h 的流速进行吸附,达到 P 穿透点(0.1 mg/L)时,穿透体积可达 400 BV 以上。

Bottini A 等^[10]通过离子交换工艺,选取阴离子交换树脂采用批处理和填充床,吸附磷酸根,通过树脂再生获得含磷溶液,该溶液可以通过鸟粪石沉淀法来回收其中的磷。

Sendrowski A 等^[11]研究了用混合型阴离子交换树脂(HAIX)去除尿液中的磷的技术。HAIX 树脂是一种

浸渍了水合氧化铁纳米颗粒的强碱性阴离子交换树脂,结果表明采用该树脂在 5 min 内磷的去除率达到 97%。

1.4 膜分离技术法

膜分离技术根据孔径大小分类,依次为微滤、超滤、纳滤和反渗透。纳滤和反渗透是深度处理的有效手段,可解决化学污染和有机污染问题。沼液成分复杂,一般处理技术效果不佳,膜分离技术是有效的处理手段。

Cathie W P 等^[12]研究了 NF 和 NF90 纳滤膜的横流过滤工艺对水体中的磷的去除效果。研究表明 NF90 膜能够去除 99.9%的磷,而 NF 能够去除 99.2%的磷,pH 对其影响程度最大。

Blöcher C 等^[13]结合了污泥的低压湿式氧化法和磷的溶解以及纳滤工艺来将磷和重金属分离,以此来获得一个干净稀释的磷酸溶液,该溶液又可以用来制备干净的肥料。

韩瑾^[14]采用截留液全部循环的操作模式在操作压力为 1.0 MPa,温度为 25 °C 的条件下对超滤透过液进行纳滤浓缩实验,获得的浓缩液再根据 NY1107-2006 大量元素水溶肥料标准和 NY1106-2006 含腐殖酸水溶肥料标准配制出了大量元素水溶肥料和腐殖酸水溶肥料。

1.5 源分离技术

目前,全球通过源分离技术获得的尿液和排泄物中的磷元素大约有 168 万 t,如果能够有效收集这些磷,可以满足全球磷需求的 22%。到 2050 年,随着源分离技术的普及应用,该数值将增到 216 万 t。因此从尿液中回收磷也是目前的研究热点之一^[15]。

Kemacheevakul P 等^[16]研究了仅通过调节 pH 从人类尿液和猪粪厌氧消化出水中回收磷的可行性。实验数据表明,尿液磷回收的最佳 pH 值为 11,回收率为 106 mg/L。

Antonini S 等^[17]采用太阳能蒸发技术回收源分离尿液中的氮磷元素。50 L 尿液经过太阳照射 26 d,获得了 36 g 固体肥料。这种尿液衍生出的肥料主要由 NaCl 构成,氮磷含量在 2%左右,用玉米和黑麦草测试了这种肥料的肥效,表明其与商业矿物肥料的肥效相近。

1.6 其他新型磷回收技术

其他新型磷回收技术包括生物燃料电池、采用不同的沉淀工艺等方法回收磷资源。

Ichihashi O 等^[18]采用空气阴极单室微生物燃料电池处理猪场废水,一方面去除 COD 并产生电能,另一方面有效的回收了磷资源。

Yilmazel Y D 等^[19]针对沼气发电厂联合发酵家禽粪肥和玉米饲料的两相流出液进行营养回收。液相部分采用鸟粪石沉淀法,去除了 72.1% $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 95.1%的正磷酸盐。

Okano K 等^[20]研究了一种新的从水溶液中回收磷的技术:利用无定型水化硅酸钙(A-CSHs)来回收污泥厌氧消化液和综合模拟废水中的磷,表明 A-CSHs 可以作为一个新型、有效的磷回收材料。

总体来说,这些新的磷回收技术主要采取不同工艺来进行磷溶出和磷浓缩,获得富磷上清液,而最终的回收形式采用的方式以化学沉淀法为主。

2 磷回收技术在污泥资源化中的应用现状

在城市污泥处置过程中,污泥厌氧消化会产生大量沼液,污泥焚烧会产生大量残渣。我国大中型沼气工程沼液产生量巨大,性质复杂。而剩余污泥由于其性质无法广泛实施还田农用,据估计,目前全世界平均每年产出 170 万 t 的污泥焚烧灰(SA),并且还会不断增加^[21],这两者均承载了废水处理过程中大量的磷元素,由于磷资源的有限性以及我国可持续发展要求,应该寻找和发展能够从中回收资源的途径。

2.1 沼液磷回收技术的发展现状

沼液磷回收技术主要有离子交换法、膜分离技术并结合 MAP 沉淀的形式回收磷元素。

邢贻^[22]选用天然沸石(TRF)、微波氯化钠联合改性沸石(WLF)、十六烷基溴化吡啶改性沸石(CPBF)、粉煤灰合成微米级沸石(WF)及亚微米级沸石(YWF)通过吸附-解吸试验和吸附柱试验,研究不同沸石对沼液中氮、磷、COD 的吸附-解吸特征,优化吸附工作参数。

Gebrezgabher S A 等^[23]通过超滤与反渗透相结合工艺处理沼液,浓缩回收沼液中的营养物质,浓缩液用于施肥,而透过液则排放至污水管网。

徐国锐^[24]结合沼液特点进行纳滤膜浓缩实验,并且通过沼液浓缩液复配技术和配方筛选,研制出沼液氨基酸水溶性肥料产品,经检测产品符合 NY 1429-2010 标准。

杨雪等^[25]以剩余污泥碱性发酵液为研究对象,考察鸟粪石沉淀法(MAP 法)同时回收氮磷的最佳条件及对发酵液中有机的影响。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的回收率分别为 62.3%和 94.1%。

2.2 SSA 磷回收技术的发展现状

针对 SSA 中的磷回收,主要为湿化学法,通过酸或碱对污泥或者飞灰进行处理,然后将磷和不溶解的重金属进行分离;酸处理能够使 SSA 中的 P 完全溶

解,同样被溶解的重金属可以通过沉淀、纳滤、液液萃取或者离子交换等手段被去除。

在德国,目前 49%的污泥是采用焚烧处理的,其中 50%是单独焚烧的。单独焚烧获得的飞灰包含约 15 180 mg P/a,相当于德国磷进口量的 11%,其中约 30%的磷可以从 SSA(通过铝盐沉淀获)中被碱提取,而在日本 Gifu,75%的磷是通过湿化学法 P 回收装置从 SSA 中回收的^[26]。

SNB(荷兰污泥处置公司)从污泥焚烧飞灰中回收磷,并且将回收产物出售给国际磷酸盐生产厂家——天富国际。SNB 工艺每年产生约 430 kt 泥饼,大约占荷兰污泥产量的 30%。每年大约有 6 000 t 产品(35 gP/kg ash)会送到天富进行进一步纯化。纯化得到的产品可销售给食品生产者(作为添加剂)或者制药公司(作为药品)使用^[27]。

Kalmykova Y 等^[28]研究了从 SSA 中回收磷资源的方法及其效率。采用了 2 种不同工艺回收 SSA 中的磷,分别为酸洗-沉淀以及酸碱浸出,前者获得了 70%的磷回收,但产品中含有的重金属可能使其不能直接应用。后者磷回收率偏低,但是获得了更纯的含磷产物。从 SSA 中回收获得的磷能够满足瑞典 30%、欧盟 10%的磷需求。

2.3 污泥磷回收面临的主要问题

2.3.1 SS 的影响

不管是从沼液还是 SSA 回收磷,液相中都会含有大量的悬浮物 SS,较高的 SS 浓度可能会影响 MAP 的结晶沉淀速度,降低回收率,并且影响回收产物的纯度,使生成的结晶产物与悬浮物结合在一起难以分离。因此必须要进行适当的预处理来去除液相中的悬浮物。

马泉智等^[29]分别选用无机絮凝剂聚合氯化铝(PAC)、硫酸铁($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)、有机絮凝剂非离子聚丙烯酰胺(PAM)、阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)等絮凝剂对禽畜粪便沼液进行预处理考察了各物质投加量对悬浮物 SS 的去除效果。结果表明 CPAM 对 SS 去除效果最好,当沼液中 SS 浓度为 13 500 mg/L 时,投加 1.02 g/L 的 CPAM 絮凝后,沼液中 SS 浓度降为 148 mg/L,SS 去除率达 98.9%。

2.3.2 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的影响

污泥厌氧消化液,尤其是高浓度污泥厌氧消化液中的氨氮含量通常很高,达 1 000~3 000 mg/L,而磷酸根的含量大约为 40~100 mg/L。因此采用 MAP 结晶沉淀工艺,磷的去除率通常在 90%以上,而氨氮的去除率仅为 10%左右^[30]。因此大量氨氮还残留在废水中,而经过厌氧消化阶段,倒置的 C/N 比例使得沼液

的可生物降解性较差,回流至污水厂污水处理工艺前端又会造成后期处理氨氮负荷过高,因此含有高浓度氨氮沼液亟需单独处理。

段金明等^[31]利用镁盐为沉淀剂,以鸟粪石沉淀的形式去除养猪废水中的氮、磷,同时采用天然斜发沸石吸附法来提高氨氮的去除效果。

谢强^[32]等研究了一种新型吸附材料——表面活性剂改性沸石,表明表面活性剂改性沸石是一种很有前途的多功能水处理吸附剂。

可以看出沸石是目前吸附氨氮的研究热点,沸石是一种含水的碱金属或碱土金属的铝硅酸盐矿物。具有吸附性、离子交换性、催化和耐酸耐热等性能,因此被广泛用作吸附剂、离子交换剂和催化剂,也可用于水质净化和污水处理等方面。目前针对沸石在水处理方面的应用主要集中于改性沸石的应用。

2.3.3 晶种的影响

鸟粪石工艺的影响因素复杂,而且通常生成的 MAP 晶体粒径较小,不便于回收。针对此问题,有研究者在溶液中加入晶种材料,如转炉炉渣、方解石和沙子等,使 MAP 在晶种表面生成晶体,不仅减少了结晶时间,而且使晶体易于沉淀分离,进一步提高了磷回收效率^[33]。

Kim E H 等^[34]采用粉状转炉渣作为 MAP 结晶的晶种,回收废水中的磷。最终针对 MAP 结晶的粒度分布分析显示,其大大增加了 MAP 的晶体颗粒粒径,更有利于沉淀的分离回收。

Le Corre 等^[35]以不锈钢材料制成的网筛作为鸟粪石晶种进行磷回收,实验结果表明,反应进行 2 h 磷回收率达 81%,晶体形成速率明显提高。

3 结语

随着人类发展对磷资源的不断增长的需求,回收不可再生资源磷的任务势在必行。磷酸盐沉淀法是磷回收技术的首选方法之一,尤其是能用作缓释肥的鸟粪石结晶法。而生物法(PAOs)、离子交换法、电渗析、纳滤、湿式氧化法等新兴技术的应用会不断促进磷回收技术的发展。城市污水处理厂是氮磷等营养元素流失的一个集合点,污泥厌氧消化沼液和污泥焚烧飞灰都是重点研究对象。国内外对于沼液和 SSA 磷回收的研究有了许多新的突破,使得磷回收技术在未来的实际应用成为可能。

[参考文献]

[1] Liu Y H, Kumar S, Kwag J H, et al. Magnesium ammonium phosphate formation, recovery and its application as valuable resources: a review [J]. *Journal of Chemical Technology and*

Biotechnology, 2013, 88(2): 181–189.

- [2] 郝晓地, 衣兰凯, 王崇臣, 等. 磷回收技术的研发现状及发展趋势[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(5): 897–907.
Hao Xiaodi, Yi Lankai, Wang Congchen, et al. Situation and prospects of phosphorus recovery techniques[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(5): 897–907. (in Chinese)
- [3] European Fertilizer Manufacturers Association. Phosphorus: essential element for food production[J]. *European Fertilizer Manufacturers Association (EFMA)*, Brussels, 2000.
- [4] Ganrot Z, Broberg J, Byden S. Energy Efficient Nutrient Recovery from Household Wastewater Using Struvite Precipitation and Zeolite Adsorption Techniques: A Pilot Plant Study in Sweden [C]//*International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams*. Edited by Ken Ashley, Don Mavinic and Fred Koch. ISBN: 9781843392323. Published by IWA Publishing, London, UK. 2009.
- [5] Driver J. Phosphates recovery for recycling from sewage and animal wastes[J]. *Phosphorus and Potassium*, 1998(216): 17–21.
- [6] Britton A, Prasad R, Balzer B, et al. Pilot Testing and Economic Evaluation of Struvite Recovery from Dewatering Centrate at HRSD's Nansmond WWTP [C]//*Proceedings of the International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams*, 2009: 193–202.
- [7] Yuan Z, Pratt S, Batstone D J. Phosphorus recovery from wastewater through microbial processes[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2012.
- [8] Wong P Y, Cheng K Y, Kaksonen A H, et al. A novel post denitrification configuration for phosphorus recovery using polyphosphate accumulating organisms[J]. *Water Research*, 2013, 47(17): 6488–6495.
- [9] Petruzzelli D, Dell'Erba A, Liberti L, et al. A phosphate-selective sorbent for the REM NUT?process: field experience at massafra wastewater treatment plant[J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2004, 60: 195–202.
- [10] Bottini A, Rizzo L. Phosphorus recovery from urban wastewater treatment plant sludge liquor by ion exchange [J]. *Separation Science and Technology*, 2012, 47(4): 613–620.
- [11] Sendrowski A, Boyer T H. Phosphate removal from urine using hybrid anion exchange resin[J]. *Desalination*, 2013, 322: 104–112.
- [12] Cathie Lee W P, Mah S K, Leo C P, et al. Performance studies of phosphorus removal using cross-flow nanofiltration[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2013 (ahead-of-print): 1–9.
- [13] Blöcher C, Niewersch C, Melin T. Phosphorus recovery from sewage sludge with a hybrid process of low pressure wet oxidation and nanofiltration[J]. *Water Research*, 2012, 46(6): 2009–2019.
- [14] 韩瑾. 沼液膜浓缩分离及其液肥混配技术研究[D]. 杭州 浙江林学院, 2009.
Han Jin. Study on Biogas Slurry Concentration and Separation by Membrane and Liquid Fertilizer Preparation Technology

- [D]. Hangzhou: Zhejiang Forestry University, 2009. (in Chinese)
- [15] Mihelcic J R, Fry L M, Shaw R. Global potential of phosphorus recovery from human urine and feces [J]. *Chemosphere*, 2011, 84(6): 832–839.
- [16] Kemacheevakul P, Polprasert C, Shimizu Y. Phosphorus recovery from human urine and anaerobically treated wastewater through pH adjustment and chemical precipitation [J]. *Environmental Technology*, 2011, 32(7): 693–698.
- [17] Antonini S, Nguyen P T, Arnold U, et al. Solar thermal evaporation of human urine for nitrogen and phosphorus recovery in Vietnam [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 414: 592–599.
- [18] Ichihashi O, Hirooka K. Removal and recovery of phosphorus as struvite from swine wastewater using microbial fuel cell [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 114: 303–307.
- [19] Yilmazel Y D, Demirel G. Nitrogen and phosphorus recovery from anaerobic co-digestion residues of poultry manure and maize silage via struvite precipitation [J]. *Waste Management & Research*, 2013.
- [20] Okano K, Uemoto M, Kagami J, et al. Novel technique for phosphorus recovery from aqueous solutions using amorphous calcium silicate hydrates (A-CSHs) [J]. *Water Research*, 2013.
- [21] Donatello S, Cheeseman C R. Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): a review [J]. *Waste management*, 2013, 33(11): 2328–2340.
- [22] 邢隰. 沼液营养物的沸石吸附回收与利用 [D]. 重庆: 西南大学, 2013.
Xing Ze. Adsorption and Its Utilization of Nutrient from Biogas Slurry by Zeolite [D]. Chongqing: Southwest University, 2013. (in Chinese)
- [23] Gebrezgabher S A, Meuwissen M P M, Prins B A M, et al. Economic analysis of anaerobic digestion: a case of green power biogas plant in the Netherlands [J]. *NJAS–Wageningen Journal of Life Sciences*, 2010, 57(2): 109–115.
- [24] 徐国锐. 沼液纳滤膜浓缩技术及其液体有机肥开发研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
Xu Guorui. The Research on Concentration Technology for Biogas Slurry Using Nanofiltration Membrane and Subsequent Development of Concentrated Biogas Slurry as Liquid Organic Fertilizer [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [25] 杨雪, 万春黎, 杜茂安, 等. 鸟粪石法同步回收发酵液中高质量浓度氮磷 [J]. *哈尔滨商业大学学报: 自然科学版*, 2013, 29(1).
Yang Xue, Wan Chunli, Du Maoan, et al. Simultaneous recovery of nitrogen and phosphorus in fermentive liquid by struvite precipitation [J]. *Journal of Harbin University of Commerce: Natural Sciences Edition*, 2013, 29(1). (in Chinese)
- [26] Petzet S, Cornel P. Towards a complete recycling of phosphorus in wastewater treatment—options in Germany [J]. *Water Science & Technology*, 2011, 64(1): 29–35.
- [27] Schipper W J, Korving L. Full-scale Plant Test Using Sewage Sludge Ash as Raw Material for Phosphorus Production [C]// Ashley K, Mavinic D, Koch F, Proc. International Conference on Nutrient recovery, 2009: 591–598.
- [28] Kalmykova Y, Karlfeldt Fedje K. Phosphorus recovery from municipal solid waste incineration fly ash [J]. *Waste Management*, 2013.
- [29] 马泉智, 向连城, 宋永会, 等. 畜禽粪便沼液絮凝预处理及 MAP 法磷回收技术 [J]. *环境工程学报*, 2013, 3(3): 202–207.
Ma Quanzhi, Xiang Liancheng, Song Yonghui, et al. Technology development of flocculating pretreatment of livestock and poultry manure slurry and of phosphorus recovery by MAP crystallization [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2013, 3(3): 202–207 (in Chinese)
- [30] 袁鹏, 宋永会, 袁芳, 等. 磷酸铵镁结晶法去除和回收养猪废水中营养元素的实验研究 [J]. *环境科学学报*, 2007, 27(7): 1127–1134.
Yuan Peng, Song Yonghui, Yuan Fang, et al. Nutrient removal and recovery from swine wastewater by crystallization of magnesium ammonium phosphate [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(7): 1127–1134. (in Chinese)
- [31] 段金明, 方宏达, 林锦美, 等. 沸石吸附氨氮辅助鸟粪石法去除养猪废水营养物质 [J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(12): 181–184.
Duan Jinming, Fang Hongda, Lin Jinmei, et al. Nutrient removal from swine wastewater by struvite precipitation with ammonia adsorption on zeolite [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(12): 181–184. (in Chinese)
- [32] 谢强, 谢杰, 迟丽娜, 等. 一种能同时吸附水中多种污染物的新型吸附材料: 表面活性剂改性沸石 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2013, 43(8): 921–929.
Xie Qiang, Xie Jie, Chi Lina, et al. A new sorbent that simultaneously sequesters multiple classes of pollutants from water: Surfactant modified zeolite [J]. *Sci China Tech Sci*, 2013, 43(8): 921–929. (in Chinese)
- [33] 胡怡, 宋永会, 钱锋. 赤泥晶种法磷酸铵镁结晶工艺模拟废水磷的回收 [J]. *环境工程学报*, 2012, 2(6): 3019–3024.
Hu Yi, Song Yonghui, Qian Feng. Phosphorus recovery from synthetic wastewater as struvite by red mud-seeded crystallization [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 2(6): 3019–3024. (in Chinese)
- [34] Kim E H, Yim S B, Jung H C, et al. Hydroxyapatite crystallization from a highly concentrated phosphate solution using powdered converter slag as a seed material [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 136(3): 690–697.
- [35] Le Corre K S, Valsami-Jones E, Hobbs P, et al. Struvite crystallisation and recovery using a stainless steel structure as a seed material [J]. *Water Research*, 2007, 41(11): 2449–2456.