

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.9

第40卷 第9期

目次

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷 (3849)
郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析	郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (3856)
济南市背景区域大气 PM _{2.5} 污染特征及其对能见度的影响	别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴 (3868)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中多环芳烃来源解析及健康风险评估	刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇 (3875)
2001~2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势	刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏 (3886)
长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征	赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳 (3898)
燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征	杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳 (3908)
高速公路沿线 PM _{2.5} 中重金属污染特征	李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍 (3916)
北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险	胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹 (3924)
风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用	秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春荣 (3935)
京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕 (3942)
成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱	周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文斌 (3949)
工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估	孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘 (3962)
典型华北农村地区冬季 HONO 的浓度水平及来源分析	王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊峰 (3973)
不同方法制备 Co ₃ O ₄ 催化剂 CO-SCR 性能及机制	仲雪梅, 张涛, 李佳萌, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振 (3982)
全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征	崔杰文, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津 (3990)
江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素	史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笪文怡, 季鹏飞 (4000)
城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素: 以宁波市小浞江为例	高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉 (4009)
水华对沉积物中氮的转化和去除的影响	肖琳, 杨佳怡 (4018)
沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性	刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟 (4023)
汾河下游雨季硝酸盐污染源解析	汪银龙, 冯民权, 董向前 (4033)
新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (4042)
基于多个扩增子的 DNA metabarcoding 技术探究黄海微型真核浮游植物多样性	张莉, 张远, 林佳宁, 王书平 (4052)
FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较: 以贵州三座水库为例	陈倩, 李秋华, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书 (4061)
天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制	邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕 (4072)
镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中 Pb ²⁺ 的去除	何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹 (4081)
2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附 Pb ²⁺	晋圣兆, 向阳, 张隽琦, 张凯, 吉庆华 (4091)
钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验	白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善 (4098)
大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除	贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建峰 (4105)
A ² /O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化	荣懿, 刘小叙, 何音旋, 章武首, 金鹏康 (4113)
上向流厌氧滤池 (UAF) 处理城市生活污水的运行效能	杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆 (4121)
微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析	张若晨, 陈川, 邵博, 王威, 徐熙俊, 任南琪 (4128)
基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验	张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉 (4136)
聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比	易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华 (4143)
厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学	唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚 (4152)
Ca ²⁺ 对污泥硝化活性和絮凝沉降性能的影响	张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏 (4160)
从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷	畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢 (4169)
信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响	徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏清旋 (4177)
海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响	胡越航, 宣丽霞, 裴琼芬 (4185)
耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析	赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了 (4195)
稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响	保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗 (4202)
地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响	陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊 (4213)
氮肥深施及间种白三叶草对茶园 N ₂ O 排放的影响	吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水 (4221)
三峡库区及其下游溶解氧化亚氮 (N ₂ O) 分布和释放	程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲 (4230)
沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响	朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽 (4238)
新建铅蓄电池集聚区对周边土壤环境的影响: 基于重金属空间特征	丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦 (4244)
不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响	杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席 (4253)
基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法	张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚 (4262)
缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征	罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明 (4270)
西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响	田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才 (4278)
调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析	彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳 (4287)
海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源	陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝 (4295)
《环境科学》征订启事 (3923) 《环境科学》征稿简则 (3941) 信息 (4041, 4051, 4229)	

从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷

畅萧, 曾薇*, 王保贵, 许欢欢

(北京工业大学环境与能源工程学院, 城镇污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京 100124)

摘要: 为了实现以鸟粪石(MAP, $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)的形式回收剩余污泥厌氧发酵上清液中的氮磷, 研究了氮磷溶出的最佳条件及不同的反应条件对氮磷回收的影响。结果表明在 pH 为 10.5, 温度为 35℃ 时, 发酵液中溶出的氨氮与正磷酸盐质量浓度皆在第 5 d 达到峰值; 在添加磷源的条件下, 磷回收的最佳条件为 pH = 9.5、N:P = 0.8、Mg:P = 1.8; 未添加磷源的条件下, 回收磷的最佳条件为 pH = 9.5、Mg:P = 1.6、转速 200 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。此外, 降低 N:P 摩尔比对于鸟粪石的形态和纯度均有显著影响。利用扫描电镜(SEM)、X 光微区分析(EDS)、X 射线衍射(XRD)和傅里叶红外光谱(FTIR)等手段对回收产物进行了表面相貌及物相组成分析, 证实了沉淀物的主要成分为 MAP。以鸟粪石形式回收剩余污泥中的氮磷, 是实现污泥资源化的一种有效手段。

关键词: 剩余污泥; 厌氧发酵; 氨氮; 磷酸盐; 鸟粪石

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)09-4169-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201811258

Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge

CHANG Xiao, ZENG Wei*, WANG Bao-gui, XU Huan-huan

(National Engineering Laboratory for Advanced Municipal Wastewater Treatment and Reuse Technology, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To recover nitrogen and phosphorus from the supernatant of anaerobic fermentation of excess sludge in the form of struvite (MAP, $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), the optimum conditions of nitrogen and phosphorus dissolution and the effects of different reaction conditions on nitrogen and phosphorus recovery were studied. The results showed that the concentration of ammonia nitrogen and orthophosphate that dissolved in the fermentation liquid peaked on the fifth day of the experiment at pH 10.5 and 35℃. When a phosphorus source was and was not added, the optimum conditions for recovering phosphorus were pH = 9.5, N:P = 0.8, and Mg:P = 1.8 and pH = 9.5, Mg:P = 1.6, and speed = 200 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, respectively. In addition, reducing the N:P molar ratio had a significant effect on the morphology and purity of the struvite. Scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometry (EDS), X-ray diffraction (XRD), and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) were used to analyze the surface appearance and phase composition of the recovered products. The main component of the precipitate was MAP. Recovery of nitrogen and phosphorus in excess sludge in the form of struvite is an effective means for realizing sludge resource utilization.

Key words: excess sludge; anaerobic fermentation; ammonia nitrogen; phosphate; struvite

磷是一种生物体所必需的基本营养素, 它在农业和工业发展中发挥着不可替代的重要作用^[1]。然而, 磷矿石的不可替代性使其具备不可再生的特点^[2]。国内外研究表明, 有相当一部分的磷经过污水处理系统进入到污泥中, 污泥中磷的含量(占污泥干重)约为 1% ~ 3%^[3]。如果污泥直接投入到海中或土地填埋, 磷和氮的浸出会对环境造成严重的二次污染^[4]。因此, 文献[5]中再次对污泥无害化处理处置提出较高的要求, 并强调在坚持无害化处理的同时, 鼓励采用资源化、能源化技术手段, 尽可能回收污泥中的能源和资源。污泥在处理(如浓缩、脱水以及消化)过程中, 由于厌氧环境的存在, 会释放部分磷到上清液中, 污水中 20% ~ 50% 的磷和部分氮将返回到污水处理系统^[6], 若将上清液回流到污水处理厂前段, 不仅会导致磷负荷增高, 降低磷的去除率^[7], 还会影响出水磷的达标, 造成水

体的富营养化。因此, 污水处理厂为磷的回收提供了可能^[8], 从其中获取的磷资源可替代部分磷矿开采^[9~11]。通过 MAP 法对剩余污泥中的氮磷进行再循环, 不仅能减缓磷资源的流失, 还能减少污水处理系统的磷氮负荷^[12]。此外, 鸟粪石作为一种优良的缓释肥料^[13], 具有较高的商业价值。

提高剩余污泥中氮磷回收率的关键, 在于污泥中氮磷最大限度地释放^[14], 而污泥发酵预处理是氮磷释放的有效途径。污泥预处理可以破解胞外聚合物(EPS)、污泥细胞和二价阳离子桥接结构, 增强生物的可降解性能^[15]。在污泥发酵过程中, 随着蛋白质的水解, 以及污泥细胞的破碎, 在污泥发酵

收稿日期: 2018-11-30; 修订日期: 2019-03-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401103)

作者简介: 畅萧(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: 2480361711@qq.com

* 通信作者, E-mail: zengwei@bjut.edu.cn

过程中会释放出大量的氮磷元素,不利于发酵液作为脱氮除磷的外加碳源使用.氮磷元素和腐殖酸是植物生长所需的营养物质,因此对其回收有着重要的意义^[1].

市政污泥厌氧消化过程中产生的污水^[16~18]是鸟粪石研究最广泛的氮磷来源.城市废水中含有 PO_4^{3-} 质量浓度为 $21 \sim 270 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NH_4^+ 质量浓度为 $168 \sim 1\,400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.对于鸟粪石沉淀,当正磷酸盐质量浓度较低($< 55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)时,需要补充磷盐(H_3PO_4 和 KH_2PO_4)的添加^[18].而在废水污泥颗粒中,固定磷需要使用一些预处理方法(酸碱、微波或增强生物除磷)来辅助增强鸟粪石形成^[19,20].虽然国内外MAP结晶成粒技术的研究较多,但大多集中在对高氨氮、高磷浓度污水的研究上^[21],而当原污水磷浓度较低时,生成的MAP多为颗粒细小的粉末状,其难以从水中分离,易随出水流失,不利于MAP的回收.同时,污泥浓缩上清液或未经消化的污泥脱水液中磷浓度较低,通常小于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.因此,有必要针对 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下的低磷溶液开展研究,并与添加磷源之后的高浓度溶液进行对比.本研究首先探究了污水处理厂污泥厌氧消化液的最佳释放氮磷的条件,然后针对不同磷浓度的污泥厌氧消化液,考察了MAP结晶法处理的最佳工艺条件,并利用扫描电镜(SEM)、X光微区分析(EDS)、X射线衍射(XRD)及傅立叶红外光谱(FTIR)对沉淀产物进行形态和成分分析,旨在为MAP结晶法用于污泥厌氧消化液中氮磷的回收提供参考.

1 材料与方法

1.1 污泥来源及试验装置

本试验污泥取自北京市小红门污水处理厂的二沉池剩余污泥.将收集的污泥先在 4°C 下静置12 h,去掉多余上清液后储存在 4°C 的冰箱中,以便试验过程中保持污泥的新鲜度.脱水污泥的含水量为97.6%,pH 6.8~7.3,总悬浮固体(TSS)质量浓度为 $24\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 1\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,挥发性固体(VSS)质量浓度为 $14\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,可溶性化学需氧量(SCOD)质量浓度为 $153 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

本试验SBR厌氧发酵罐为有机玻璃制作的圆柱形,罐体内径180 mm,高400 mm,有效容积10.17 L.搅拌桨采用螺旋桨式,即一对桨叶之间相互垂直并与水平面成 45° 角.该装置每个探头插口均带有内丝封头、螺帽及密封环,可阻止外界空气进入保证厌氧环境.

1.2 试验方法

1.2.1 剩余污泥厌氧发酵试验

取500 mL浓缩后的污泥平均加入到5个小试厌氧反应器中,通过单因素法分别研究了发酵时间、发酵温度及发酵pH对污泥氮磷释放的影响,未调节pH的反应器为空白试验.试验pH调节使用浓度为 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的NaOH溶液和 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的HCl.

1.2.2 从添加磷源的发酵液中回收磷

取发酵后的污泥溶液以 $5\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心5 min,通过 $0.45 \mu\text{m}$ 的滤膜过滤,用紫外分光光度计测上清液中磷酸盐和氨氮的质量浓度.将体积为500 mL的上清液平均加入到5个150 mL的锥形瓶中,试验中N:P摩尔比采用浓度为 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的P溶液调节,Mg:P摩尔比采用浓度为 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Mg^{2+} 溶液调节,pH调节使用浓度为 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的NaOH溶液和 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的HCl.本试验采用单因素轮换法,具体操作方法为:固定每个锥形瓶中溶液的N:P=0.8和Mg:P=1.2,调节溶液pH值为(8~10.5),选择最佳的pH;在最佳的pH下,固定N:P=0.8,调节溶液的Mg:P摩尔比(1.2:1、1.6:1、1.8:1、2:1和2.2:1),确定最佳的Mg:P摩尔比;在最佳的pH和Mg:P摩尔比下,调节溶液的N:P摩尔比为(0.4:1、0.6:1、0.8:1、1:1和1.2:1),确定最佳的N:P摩尔比.锥形瓶均在六联搅拌机中以 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 搅拌反应20 min,沉淀50 min,离心过膜后测定上清液中的磷酸盐和氨氮的质量浓度,并计算两者的剩余摩尔量及去除率.本试验中添加的磷源为 Na_2HPO_4 ,镁源为 MgCl_2 ,均为分析纯.

1.2.3 从未添加磷源的发酵液中回收磷

取发酵后的污泥溶液以 $5\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心5 min,通过 $0.45 \mu\text{m}$ 的滤膜过滤,用紫外分光光度计测上清液中磷酸盐和氨氮的质量浓度.将体积为600 mL的上清液平均加入到6个150 mL的锥形瓶中,调节pH、Mg:P摩尔比的溶液与1.2.2节中的一样.采用单因素轮换法,具体操作方法为:固定每个锥形瓶中溶液的Mg:P=1.2,调节溶液pH值为(8~10.5),选择最佳的pH;在最佳的pH下,调节不同的Mg:P摩尔比(1.2:1、1.6:1、1.8:1、2:1和2.2:1),确定最佳的Mg:P摩尔比;在最佳的pH、Mg:P摩尔比下,使锥形瓶在六联搅拌机中以不同的转速(200、300、400、500和 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)搅拌反应20 min,沉淀50 min.每个因素试验之后,均将反应结束的溶液离心过膜后测定磷酸盐和氨氮质量浓度,并计算两者的剩余摩尔量及去除率.

1.3 分析方法

污泥上清液中的氨氮和正磷酸盐的质量浓度, 分别采用纳氏试剂光度法和钼锑抗分光光度法进行测定. 污泥溶液的 pH 值采用便携式 pH 计(WTW, SenTix® 940, 德国)测量, SCOD 采用连华科技 5B-1 型 COD 快速测定仪测定. 反应得到的沉淀物先用蒸馏水洗涤 3 次, 在 $70^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中干燥 48h 后, 用 SEM-EDS (SU3500, 日立)、XRD (D8 ADVANCE, BRUKER, 德国)和 FTIR (VERTEX70, 德国)分析沉淀物的形态特征及元素组成.

2 结果与讨论

2.1 污泥发酵水解

污泥水解程度可以通过上清液中 SCOD 的质量浓度的变化来表示, SCOD 质量浓度越高表明污泥的水解程度越高^[22, 23]. 图 1 显示了不同 pH、温度及发酵时间对 SCOD 溶出的影响, 在整个试验过程中保持同一个 pH. 由图 1(a)可知, 每个反应器前 5d 的 SCOD 质量浓度随时间逐渐增加, 这表明污泥中越来越多的颗粒状有机物变成可溶性底物. 然而, 不同 pH 值下产生的 SCOD 量是完全不同的, 原因是产生的可溶性蛋白质和碳水化合物在不同的

pH 下是不同的. 在发酵第 5d, 碱性(pH = 10.0)条件下的 SCOD ($4\,741\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)显著高于接近中性(pH = 8.0 和 SCOD = $2\,062\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、酸性(pH = 4.0 和 SCOD = $514\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)或空白试验中的 SCOD ($887.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 由于所有批式反应器中的 TCOD 相同, 因此碱性条件下 SCOD 与 TCOD 的比值远高于其它发酵条件. 在碱性条件下污泥更容易水解, 这是因为在碱性条件下促使 EPS 中的酸性基团分离, 使污泥表面的胞外聚合物带的负电荷增加, 这些带负电的 EPS 基团之间相互排斥, 从而使碳水化合物和蛋白质被大量解析出来^[24]. 从图 1(b)可知, 不同的温度条件下, 上清液中的 SCOD 质量浓度变化趋势一致, 即在发酵第 5d 达到峰值. 在出现峰值时, 不同温度条件下 SCOD 质量浓度高低依次为 $35^{\circ}\text{C} > 40^{\circ}\text{C} > 30^{\circ}\text{C} > 25^{\circ}\text{C} > \text{空白}$, 最大 SCOD 质量浓度为 $5\,800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 是空白的 4 倍多, 因此, 适当提高发酵温度有助于促进污泥水解, 增大 SCOD 的生成量, 这与李倩倩等^[25]的研究结果一致. 其原因可能是较高的温度可以提高蛋白质和多糖等有机物的溶解度^[26], 且中温条件(35°C)能够提高水解菌的生长速率和新陈代谢速率, 增加水解菌的数量, 从而增加发酵液中 SCOD 的生成量^[27].

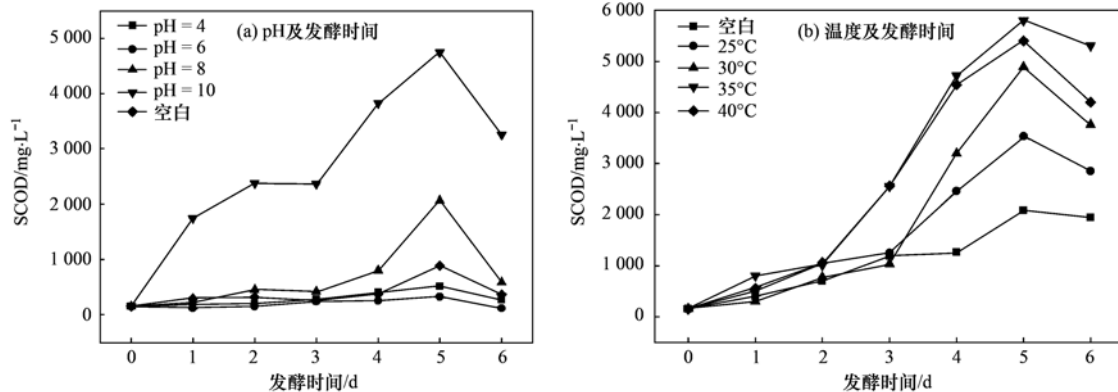


图 1 不同 pH、温度及发酵时间对 SCOD 溶出的影响

Fig. 1 Effects of different pH, temperature, and fermentation time on SCOD dissolution

2.2 污泥上清液中磷酸盐及氨氮质量浓度的变化

2.2.1 厌氧发酵 pH 及发酵时间对磷酸盐及氨氮溶出的影响

污泥溶液 pH 对污泥发酵溶出氮磷有较大的影响. 如图 2 所示, pH 为 10 时磷酸盐及氨氮溶出量是空白试验下的 3 倍左右. 这是因为高 pH 条件能够破坏微生物的细胞壁及细胞膜, 导致细胞裂解, 使胞外聚合物(EPS)中蛋白质和多糖有效溶解并释放至系统中. 蔡英超等^[28]在室温条件下考察了 pH 值对剩余污泥发酵的影响, 发现在碱性条件下剩余污泥更容易水解, 蛋白质、碳水化合物和 SCFAs 等产量都显著提升. 由图 2 可知发酵液中氨氮质量浓

度显著高于磷酸盐质量浓度, 这与 Banister 等^[29]的报道相同. 这是因为氨氮是由蛋白质和尿素等有机氮物质分解而成, 磷酸盐是由磷脂双分子层和多磷酸颗粒分解而成. 磷脂双分子层和多磷酸颗粒含量显著低于蛋白质和尿素等有机氮物质, 所以污泥厌氧发酵液中氨氮质量浓度显著高于磷酸盐质量浓度. 因此在本研究中将 pH 控制在 10 左右.

2.2.2 厌氧发酵温度及发酵时间对磷酸盐和氨氮溶出的影响

发酵温度对剩余污泥厌氧发酵时磷酸盐及氨氮的释放有显著的影响. 由图 3 可知, 磷酸盐和氨氮浓度在 1~5 d 均随发酵时间的延长而增加, 在第 5

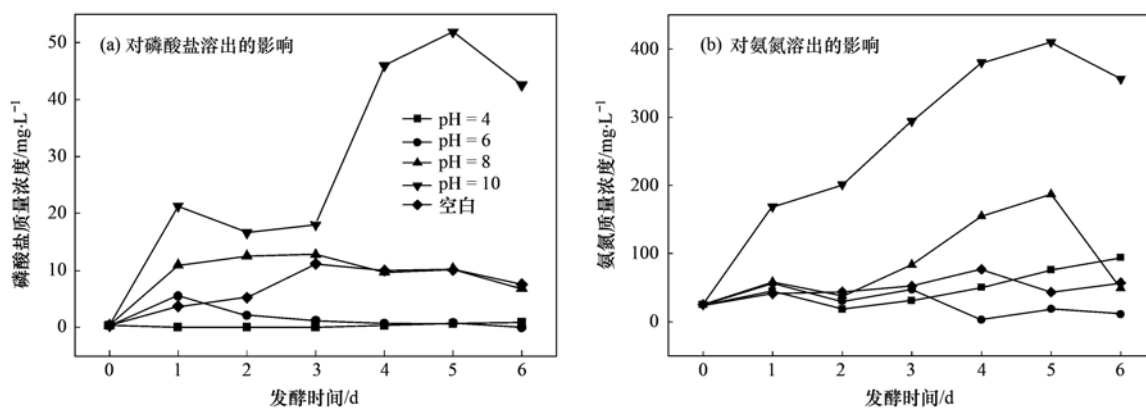


图2 不同发酵时间及 pH 对磷酸盐及氨氮溶出的影响

Fig. 2 Effects of different fermentation time and pH on the dissolution of phosphate and ammonia nitrogen

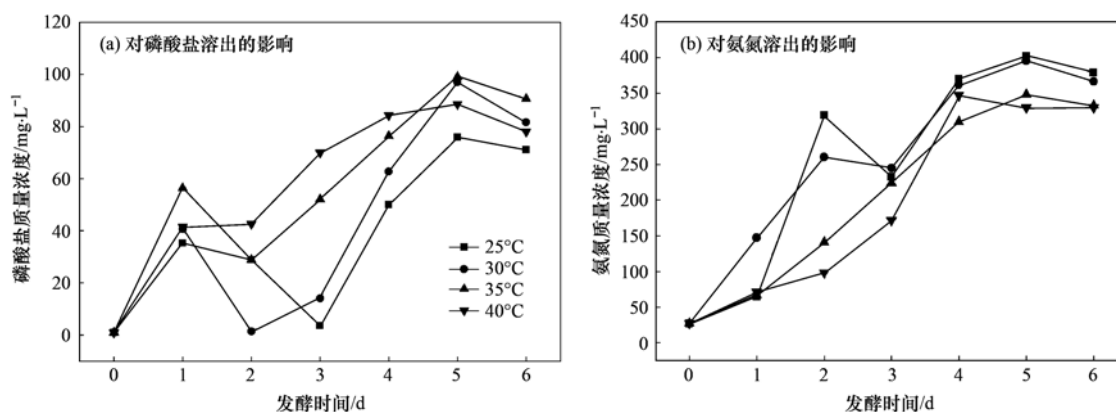


图3 不同发酵时间及温度对磷酸盐及氨氮溶出的影响

Fig. 3 Effects of different fermentation time and temperature on the dissolution of phosphate and ammonia nitrogen

d 达到最大质量浓度后开始缓慢下降. 两者区别在于磷酸盐在 35℃ 释放量最佳, 而氨氮在 25℃ 达到最佳. 由于从上清液中以鸟粪石形式进行磷回收, 氨氮本身是过量的, 所以选择磷酸盐释放的最佳温度 35℃. 磷酸盐在 35℃ 质量浓度最高, 是由于 35℃ 条件下污泥溶出的 SCOD 质量浓度较高[图 1 (b)], 且微生物的活性较强, 较多的蛋白质和含磷有机物被水解产酸^[30].

2.3 MAP 法回收氮磷的影响因素

2.3.1 磷源及 pH 对磷酸盐和氨氮回收率的影响

pH 是影响鸟粪石结晶成粒最重要的因素之一, pH 不仅影响鸟粪石在溶液中的溶解度, 还可以通过影响溶液的过饱和状态进而影响鸟粪石的生成. 尽管 H^+ 不直接影响溶液中的离子平衡, 但游离 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 离子的质量浓度高度依赖 pH 值^[31]. 在本研究中, 为了确定 MAP 反应的最佳 pH 值, 将污泥厌氧发酵上清液按照 1.2.2 节及 1.2.3 节的步骤进行操作. 上清液中的磷酸盐、氨氮剩余浓度及两者的回收率如图 4 所示. 从中可知无论是否添加磷源, 磷酸盐和氨氮的回收率变化趋势基本一致, 均在 pH 为 9.5 时达到峰值. 继续提高 pH, 磷酸盐

与氨氮回收率均出现增加缓慢或者下降, 这是因为当 pH 值提高到一定程度, 溶液中的 OH^- 离子可能与 Mg^{2+} 反应生成 $Mg(OH)_2$ 沉淀, 使溶液中 Mg^{2+} 减少, 从而影响鸟粪石沉淀继续生成. 所以, 磷酸盐的去除率无法继续提高. 由于本试验发酵液中的氨氮浓度是磷酸盐的 3 倍多, 所以鸟粪石的回收以磷酸盐含量为主, 因此由图 4 所示在两种情况下磷酸盐的回收率最高均达到 90%, 而不添加磷源的氨氮回收率显著低于添加磷源时的回收率.

2.3.2 磷源及镁磷摩尔比对磷酸盐和氨氮回收率的影响

污泥预处理后的上清液中 NH_4^+-N 的浓度为 $PO_4^{3-}-P$ 的 3 倍, 表明氨氮是过量的, 因此, Mg:P 摩尔比是 MAP 从上清液中回收 $PO_4^{3-}-P$ 的关键影响因素. 本研究中为了确定不同 Mg:P 摩尔比对磷酸盐和氨氮回收率的影响, 将污泥厌氧发酵上清液按照 1.2.2 节及 1.2.3 节的步骤进行操作. 上清液中剩余的磷酸盐、氨氮浓度及两者的回收率如图 5 所示. 从中可知, 无论是否添加磷源, 在 Mg:P 摩尔比为 1.2 ~ 1.6 时磷酸盐回收率均呈现上升趋势, 这是因为生成 MAP 的理论摩尔比是 1:1:1, 根据化学

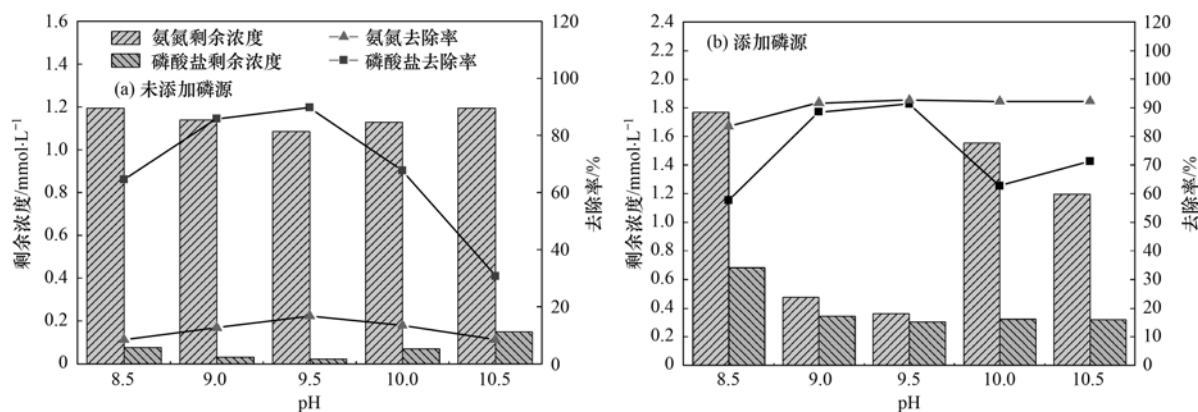


图4 磷源及 pH 对磷酸盐和氨氮回收率的影响

Fig. 4 Effects of phosphorus source and pH on the recovery of phosphate and ammonia nitrogen

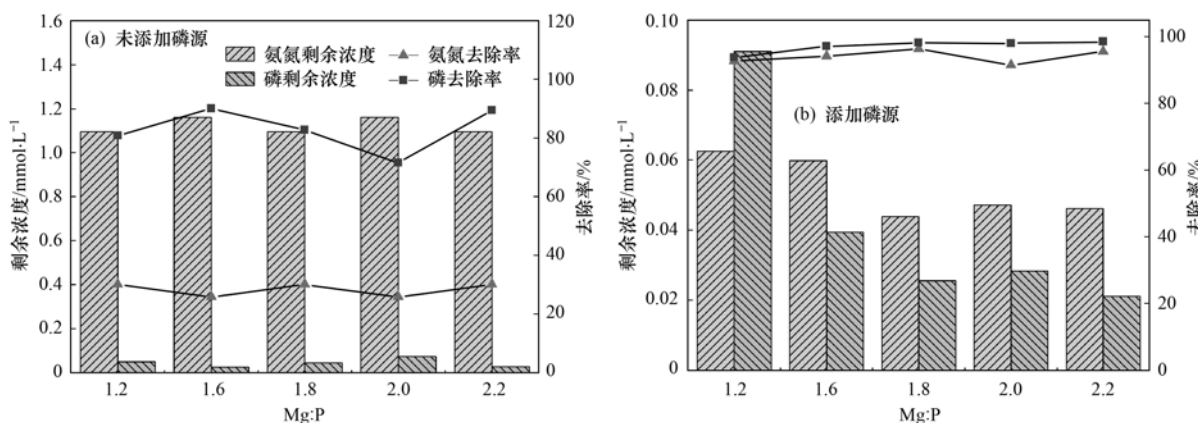


图5 磷源及 Mg:P 摩尔比对磷酸盐和氨氮回收率的影响

Fig. 5 Effects of phosphorus source and pH on the recovery of phosphate and ammonia nitrogen

反应平衡原理, 增加任一种反应物的量都会促进反应向正方向进行. 因此, 过量的 Mg^{2+} 或 NH_4^+ 都将促进反应向生成 MAP 的方向进行, 从而降低残余磷酸盐浓度, 提高磷的回收率. 继续提高 Mg:P 摩尔比, 磷回收率降低或者提高缓慢, 可能是因为一部分镁离子与高质量浓度的 SCOD(如蛋白质, 上清液中的脂质) 结合甚至与 SCOD 共沉淀^[32]. 在未添加磷源的条件下 Mg:P 摩尔比为 1.6 时取得最高回收率, 在添加磷源的条件下 Mg:P 摩尔比为 1.8 时

取得最高回收率.

2.3.3 磷源、氮磷摩尔比及搅拌转速对磷酸盐和氨氮回收率的影响

在添加磷源的条件下, 研究了 N:P 摩尔比对磷酸盐和氨氮回收率的影响, 发现磷酸盐与氨氮的去除率随 N:P 摩尔比增加而升高[图 6(a)]. 由 MAP 生成反应可知, 磷酸盐浓度的升高有利于反应向正方向进行, 同时使氨氮去除率升高. 因此在添加磷源时选择 N:P=0.8 为最佳条件. 在未添加磷源的情况

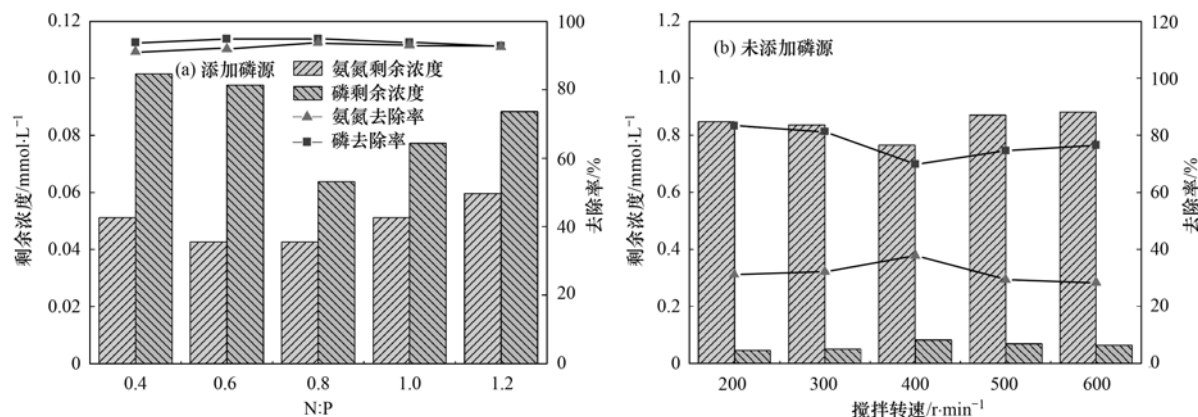


图6 磷源、N:P 摩尔比及搅拌转速对磷酸盐和氨氮回收率的影响

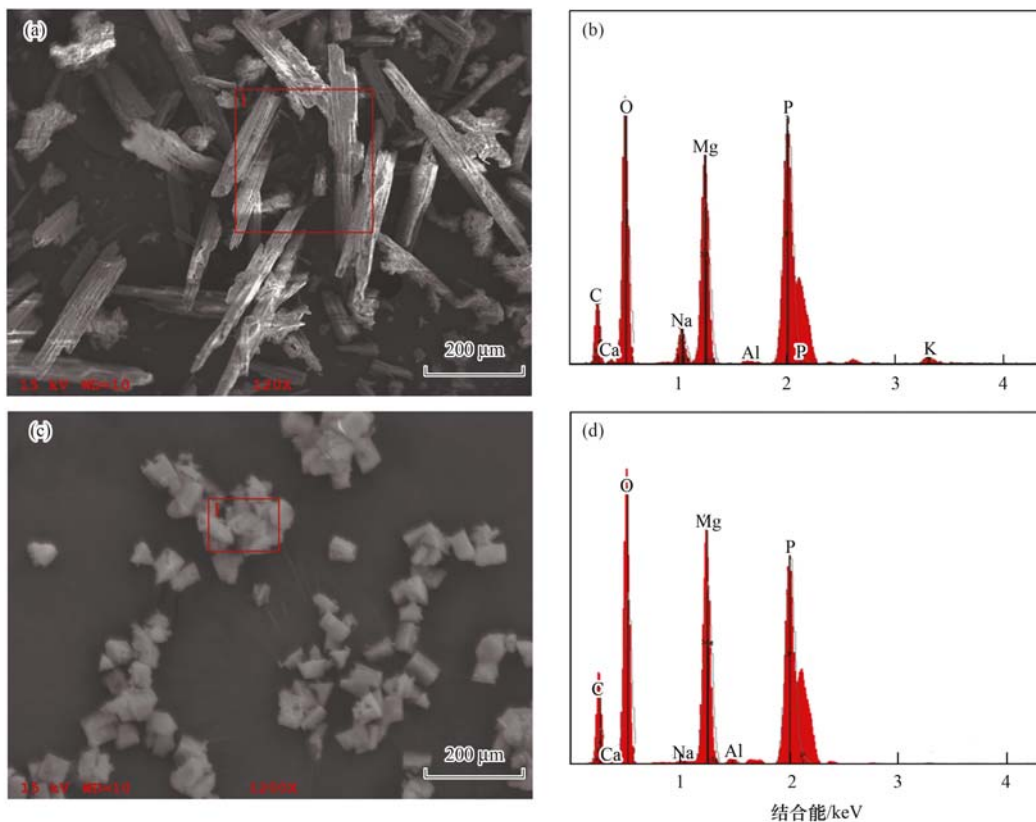
Fig. 6 Influence of phosphorus source, N:P molar ratio, and agitation speed on the recovery of phosphate and ammonia nitrogen

下,研究了搅拌转速对磷酸盐和氨氮回收率的影响,发现在搅拌转速为 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,磷酸盐及氨氮均达到了最高回收率. 这是因为当搅拌转速较大时,一方面使污泥上清液与加入的镁和氢氧化钠快速均匀混合,另一方面提高了各离子间和小晶体间碰撞的可能次数,而且转速较低,离子和小晶体结合后不易分离. 当转速大于 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,磷酸盐和氨氮的回收率都出现了下降,这是因为搅拌强度过大,由此造成的大水力剪切作用又会使碰撞在一起的离子和小晶体无法牢固结合,或者小晶体无法持续生长. 因

此,转速应该控制在 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右.

2.4 回收产物的特征分析

收集在最优条件下获得的沉淀物,利用 SEM-EDS、FTIR 及 XRD 等手段进行特征分析. 添加磷源的 SEM 图像[图 7(a)]显示出鸟粪石晶体是典型棱柱形^[33], Huang 等^[34]报道了使用 MgCl_2 作为 Mg^{2+} 源的类似晶体形状. EDS 显示[图 7(b)和图 7(d)],沉淀物的主要特征峰是 C、Mg、P 和 O 的峰. FTIR 分析回收产物的红外光谱与 MAP 相近(图 8), $3\,700 \sim 2\,500 \text{ cm}^{-1}$ 波段表明结晶水合物的



(a) 添加磷源的 SEM; (b) 添加磷源的 EDS; (c) 未添加磷源的 SEM; (d) 未添加磷源的 EDS

图 7 回收产物的 SEM-EDS 图像

Fig. 7 SEM-EDS images of the recovered products

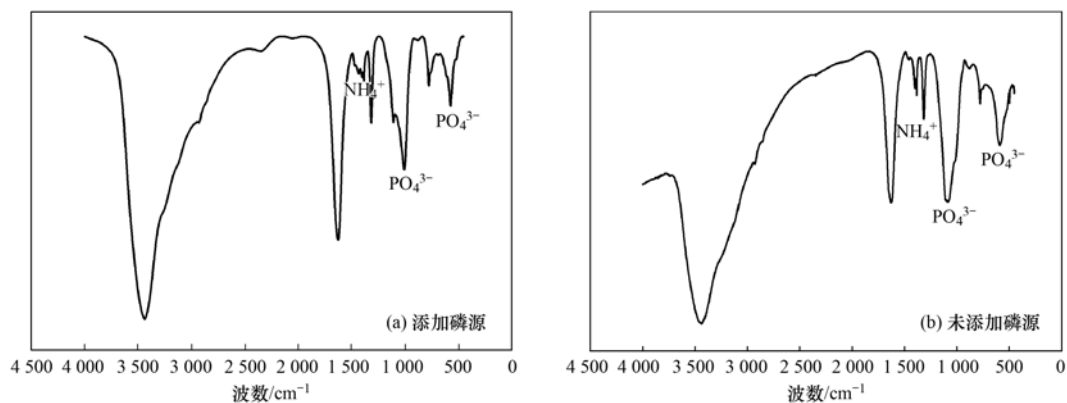


图 8 回收产物的 FTIR 图谱

Fig. 8 FTIR spectra of the recovered products

存在, $1\,649\text{ cm}^{-1}$ 波段附近的傅里叶红外光谱分析为 $\text{H}-\text{OH}$ 结合键, $1\,445\text{ cm}^{-1}$ 波段是 NH_4^+ 的特征峰^[35], $1\,077\text{ cm}^{-1}$ 和 567 cm^{-1} 波段是 PO_4^{3-} 的特征峰^[28], 说明产物包含 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 和 H_2O 基团. 此外, XRD 对比分析显示(图 9), 未添加磷源的 XRD 图谱在 20° 和 40° (2θ) 之间具有低强度的宽峰. 有研究表明, 该宽峰为无定形的衍射峰^[36], 说明沉淀物中包含无定形固体, 这与 SEM 图像[图 7(c)]显示的无定形板状结构相对应. 通过与鸟粪石标准卡片对比, 发现添加磷源的鸟粪石纯度明显比未添加磷源的高.

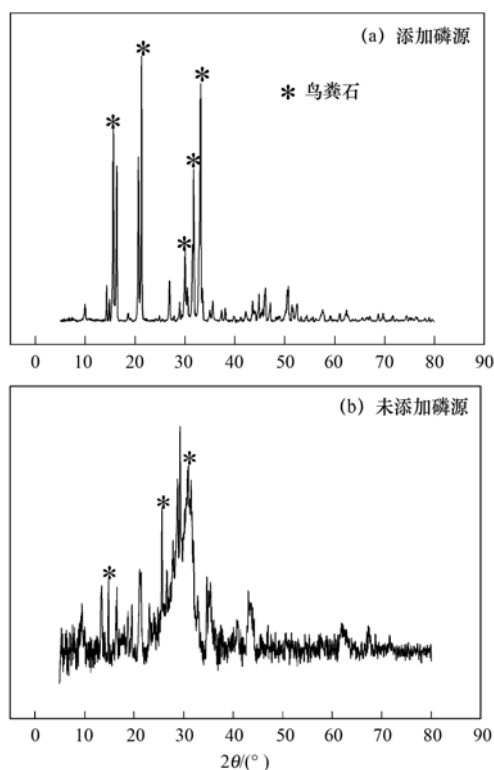


图 9 回收产物的 XRD 图谱

Fig. 9 XRD spectra of the recovered products

3 结论

(1) pH、温度和发酵时间是影响剩余污泥厌氧发酵的重要因素. 碱性($\text{pH} = 10$)条件下剩余污泥更容易水解, 蛋白质、碳水化合物和 SCOD 等产量都显著提高, 并且中温条件(35°C)能够提高水解菌的生长速率和新陈代谢速率, 增加水解菌的数量, 从而增加发酵液中的 SCOD 生成量.

(2) pH、Mg:P 摩尔比、N:P 摩尔比及搅拌转速是影响 MAP 法回收氮磷的重要因素. 鸟粪石形成的最佳 pH 均为 9.5, Mg:P 摩尔比为 1.6 ~ 1.8, 搅拌转速为 $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$.

(3) N:P 摩尔比是影响鸟粪石成分的关键影响因素, 当其低于 1 时, 通过 SEM 和 XRD 图谱可知

形成的 MAP 晶体更大, 与标准鸟粪石的匹配度更高. 故以 MAP 法回收氮磷的过程中, 应尽量降低 N:P 摩尔比, 以保证沉淀物的纯度.

(4) 以鸟粪石形式从剩余污泥中回收氮磷, 是剩余污泥资源化利用的一种有效方法. 发酵液回收氮磷后可与市政污水一起进入污水处理厂处理, 无二次污染物产生, 具有广阔的应用前景.

参考文献:

- [1] Chen M P, Graedel T E. The potential for mining trace elements from phosphate rock[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, **91**: 337-346.
- [2] Larsen T A, Udert K M, Lienert J. Source separation and decentralization for wastewater management[M]. London: IWA Publishing, 2013. 29-44.
- [3] Fischer F, Bastian C, Happe M, et al. Microbial fuel cell enables phosphate recovery from digested sewage sludge as struvite[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(10): 5824-5830.
- [4] Korboulevsky N, Dupouyet S, Bonin G. Environmental risks of applying sewage sludge compost to vineyards: carbon, heavy metals, nitrogen, and phosphorus accumulation[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, **31**(5): 1522-1527.
- [5] “十三五”城镇污水垃圾处理设施建设迎中期评估[J]. *给水排水*, 2018, **54**(8): 98.
- [6] Parsons S A, Smith J A. Phosphorus removal and recovery from municipal wastewaters[J]. *Elements*, 2008, **4**(2): 109-112.
- [7] 毕薇. 碱解剩余污泥上清液制备磷酸铵镁的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014. 15-17.
Bi W. Study on magnesium ammonium phosphate production from the alkaline hydrolysis supernatant of excess sludge from the second level biochemical sewage treatment plant [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. 15-17.
- [8] Schoumans O F, Bouraoui F, Kabbe C, et al. Phosphorus management in Europe in a changing world[J]. *Ambio*, 2015, **44**Suppl 2: 180-192.
- [9] Egle L, Zoboli O, Thaler S, et al. The Austrian P budget as a basis for resource optimization[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, **83**: 152-162.
- [10] Zoboli O, Laner D, Zessner M, et al. Added values of time series in material flow analysis: the Austrian phosphorus budget from 1990 to 2011[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, **20**(6): 1334-1348.
- [11] Zoboli O, Zessner M, Rechberger H. Supporting phosphorus management in Austria: potential, priorities and limitations[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **565**: 313-323.
- [12] Pastor L, Mangin D, Ferrer J, et al. Struvite formation from the supernatants of an anaerobic digestion pilot plant [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(1): 118-125.
- [13] Zou J T, Li Y M. Anaerobic fermentation combined with low-temperature thermal pretreatment for phosphorus-accumulating granular sludge: release of carbon source and phosphorus as well as hydrogen production potential[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **218**: 18-26.
- [14] 沈雪莲, 周振, 任伟超, 等. 城镇污水处理厂污泥中磷的形态分布及生物可利用性分析[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(3): 1200-1204.
Shen X L, Zhou Z, Ren W C, et al. Fractionation and

- bioavailability of phosphorus in sludge from municipal wastewater treatment plants [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(3): 1200-1204.
- [15] Gallipoli A, Gianico A, Gagliano M C, *et al.* Potential of high-frequency ultrasounds to improve sludge anaerobic conversion and surfactants removal at different food/inoculum ratio [J]. Bioresource Technology, 2014, **159**: 207-214.
- [16] Jin X D, Gu P, Zhang G H, *et al.* Removal of nickel and strontium from simulated radioactive wastewater via a pellet coprecipitation-microfiltration process [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2014, **301**(2): 513-521.
- [17] Uysal A, Yilmazel Y D, Demirel G N. The determination of fertilizer quality of the formed struvite from effluent of a sewage sludge anaerobic digester [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **181**(1-3): 248-254.
- [18] Latifan M, Liu J, Mattiasson B. Struvite-based fertilizer and its physical and chemical properties [J]. Environmental Technology, 2012, **33**(24): 2691-2697.
- [19] Bi W, Li Y Y, Hu Y Y. Recovery of phosphorus and nitrogen from alkaline hydrolysis supernatant of excess sludge by magnesium ammonium phosphate [J]. Bioresource Technology, 2014, **166**: 1-8.
- [20] Sun R, Xing D F, Jia J N, *et al.* Methane production and microbial community structure for alkaline pretreated waste activated sludge [J]. Bioresource Technology, 2014, **169**: 496-501.
- [21] 黄羽. 机械搅拌-微滤组合工艺处理含锶废水[D]. 天津: 天津大学, 2014. 17-20.
Huang Y. Treatment of strontium-containing wastewater by combined process of mechanical mixing and microfiltration [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. 17-20.
- [22] 毋海燕. 碱性条件下温度对初沉污泥水解及产酸的影响 [J]. 净水技术, 2018, **37**(6): 29-35.
Wu H Y. Influence of temperature on hydrolysis and acidification of primary sludge under alkaline condition [J]. Water Purification Technology, 2018, **37**(6): 29-35.
- [23] Andreasen K, Petersen G, Thomsen H, *et al.* Reduction of nutrient emission by sludge hydrolysis [J]. Water Science and Technology, 1997, **35**(10): 79-85.
- [24] Cassini S T, Andrade M C E, Abreu T A, *et al.* Alkaline and acid hydrolytic processes in aerobic and anaerobic sludges; effect on total EPS and fractions [J]. Water Science and Technology, 2006, **53**(8): 51-58.
- [25] 李倩倩, 郭亮, 赵阳国, 等. 热处理温度对污泥水解效果的影响及其三维荧光光谱特征 [J]. 中国海洋大学学报, 2016, **46**(9): 102-106.
Li Q Q, Guo L, Zhao Y G, *et al.* Effect of pretreatment temperature on excess sludge hydrolysis and its characteristics of fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy [J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, **46**(9): 102-106.
- [26] 苏高强, 王淑莹, 郑冰玉, 等. 温度和污泥浓度对碱性条件下剩余污泥水解酸化的影响 [J]. 环境工程学报, 2013, **7**(4): 1231-1236.
Su G Q, Wang S Y, Zheng B Y, *et al.* Effect of temperature and sludge concentration on hydrolysis and acidification of waste activated sludge under alkaline condition [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, **7**(4): 1231-1236.
- [27] Appels L, Baeyens J, Degève J, *et al.* Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, **34**(6): 755-781.
- [28] 蔡英超, 张鹏, 苏宏, 等. pH 值对剩余污泥暗发酵产氢的影响 [J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(6): 144-147.
Cai Y C, Zhang P, Su H, *et al.* Effect of pH value on hydrogen production from dark fermentation of surplus sludge [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **37**(6): 144-147.
- [29] Banister S S, Pitman A R, Pretorius W A. The solubilisation of N and P during primary sludge acid fermentation and precipitation of the resultant P [J]. Water SA, 1998, **24**(4): 337-342.
- [30] 解竞, 段旭, 冯雷雨, 等. 温度对超声波与碱促进污泥厌氧产酸的影响 [J]. 环境科学与技术, 2018, **41**(4): 139-145.
Xie J, Duan X, Feng L Y, *et al.* Effects of temperature on ultrasonic-alkaline augmentation of volatile fatty acids production in anaerobic fermentation of wastewater sludge [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **41**(4): 139-145.
- [31] Nelson N O, Mikkelsen R L, Hesterberg D L. Struvite precipitation in anaerobic swine lagoon liquid: effect of pH and Mg:P ratio and determination of rate constant [J]. Bioresource Technology, 2003, **89**(3): 229-236.
- [32] Tong J, Chen Y G. Enhanced biological phosphorus removal driven by short-chain fatty acids produced from waste activated sludge alkaline fermentation [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(20): 7126-7130.
- [33] Korchev A, Saidou H, Amor M B. Phosphate recovery through struvite precipitation by CO₂ removal: Effect of magnesium, phosphate and ammonium concentrations [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **186**(1): 602-613.
- [34] Huang H M, Li B, Li J, *et al.* Influence of process parameters on the heavy metal (Zn²⁺, Cu²⁺ and Cr³⁺) content of struvite obtained from synthetic swine wastewater [J]. Environmental Pollution, 2019, **245**: 658-665.
- [35] Rouff A A. Sorption of chromium with struvite during phosphorus recovery [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(22): 12493-12501.
- [36] Zhou J Z, Wu S M, Pan Y, *et al.* Enrichment of heavy metals in fine particles of municipal solid waste incinerator (MSWI) fly ash and associated health risk [J]. Waste Management, 2015, **43**: 239-246.

CONTENTS

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, <i>et al.</i> (3849)
Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017	GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (3856)
Characteristics of Atmospheric PM _{2.5} Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan	BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, GAO Ying, <i>et al.</i> (3868)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (3875)
Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017	LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, <i>et al.</i> (3886)
Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta	ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, <i>et al.</i> (3898)
Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers	YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (3908)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} Near Highway	LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, <i>et al.</i> (3916)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (3924)
Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant	QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, <i>et al.</i> (3935)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei	LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, <i>et al.</i> (3942)
Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, <i>et al.</i> (3949)
Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources	MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, <i>et al.</i> (3962)
Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China	WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, <i>et al.</i> (3973)
CO-SCR Performance and Mechanism over Co ₃ O ₄ Catalysts	ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, <i>et al.</i> (3982)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China	 CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, <i>et al.</i> (3990)
Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province	 SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4000)
Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City	 GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4009)
Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal	 XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)
Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs	LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (4023)
Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)
Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (4042)
Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons	 ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (4052)
Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG; Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau	CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, <i>et al.</i> (4061)
Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals	SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4072)
Removal of Pb ²⁺ from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent	HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4081)
Intensified Electrosorption of Pb ²⁺ by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode	JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, <i>et al.</i> (4091)
Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe ₃ O ₄	BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jian-feng, <i>et al.</i> (4098)
Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants	JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (4105)
Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A ² /O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater	RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, <i>et al.</i> (4113)
Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment	YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, <i>et al.</i> (4121)
Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions	ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, <i>et al.</i> (4128)
Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal	ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4136)
Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal	YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, <i>et al.</i> (4143)
Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge	TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (4152)
Effect of Ca ²⁺ on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge	ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, <i>et al.</i> (4160)
Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge	CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Signal Molecule Combined with <i>Thiobacillus denitrificans</i> on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur	XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, <i>et al.</i> (4177)
Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage	HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)
Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process	 ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, <i>et al.</i> (4195)
Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils	BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, <i>et al.</i> (4202)
Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland	CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, <i>et al.</i> (4213)
N ₂ O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover	LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (4221)
Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River	CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (4230)
Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters	ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, <i>et al.</i> (4238)
Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment: A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals	 DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, <i>et al.</i> (4244)
Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, <i>et al.</i> (4253)
Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety	ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, <i>et al.</i> (4262)
Content of Soil Phytolith-Occluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns at Jinyun Mountain	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (4270)
Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China	 TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, <i>et al.</i> (4278)
Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice	PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (4287)
Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuoguo	CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, <i>et al.</i> (4295)