

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.16.004

污泥中的磷及回收技术研究进展

丁燕燕, 于鸿宇, 戴晓虎

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 污泥磷回收是解决磷资源匮乏的战略需求,也是废物资源化的有效手段。因有毒物质的存在,污泥磷释放是磷回收的重要前提。根据不同的污水处理工艺及后续污泥处理处置技术,介绍了三种主要富磷污泥中磷的赋存形态及转化机制,提出了识别污泥中磷的赋存形态对磷回收技术开发的重要性。基于目前对污泥中磷赋存形态的认识,以酸溶为代表的化学法和以厌氧消化为核心的物化-生物组合技术是污泥磷释放的有效手段。针对污泥中磷回收技术研究现状及存在的问题,结合污泥综合处理处置的理念,指出开发与污泥厌氧资源化相适应的磷回收技术成为可持续发展的方向。

关键词: 污泥; 磷回收; 磷的赋存形态; 技术选择; 综合处理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)16-0029-06

Research Progress on Phosphorus in Sludge and Its Recovery Technology

DING Yan-yan, YU Hong-yu, DAI Xiao-hu

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Phosphorus recovery from sludge is a strategic demand to solve the shortage of phosphorus resources and an effective means of waste recycling. Phosphorus release has become an important prerequisite for phosphorus recovery from sludge due to the presence of toxic substances. The occurrence states and transformation mechanism of phosphorus in three main phosphorus-rich sludge were introduced based on different sewage treatment processes and subsequent sludge treatment and disposal technologies. The importance of identifying phosphorus occurrence states in sludge for phosphorus recovery technology development was proposed. Based on the current understanding of the phosphorus occurrence states in sludge, the chemical method represented by acid extraction and the physicochemical biological combination technology with anaerobic digestion as the core were effective methods of phosphorus release from sludge. The current research status and existing problems of phosphorus recovery technology in sludge combining the concept of comprehensive treatment and disposal of sludge were discussed. It is pointed out that the development of phosphorus recovery technology suitable for anaerobic resource utilization of sludge has become a sustainable development direction.

Key words: sludge; phosphorus recovery; phosphorus occurrence states; technology selection; comprehensive treatment

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07403002-01)

通信作者: 戴晓虎 E-mail: daixiaohu@tongji.edu.cn

1 磷稀缺及从污泥中回收磷的可行性

磷是所有生物必需的营养元素之一。全球人口增长和集约化的耕作方式需要更多的磷肥来提高农作物产量^[1]。因磷肥的生产以磷矿加工为主,世界磷矿的消耗量平均每年以2%左右的速度增长。根据美国地质调查局的统计数据,2020年世界磷矿石的开采量约 2.23×10^8 t(以 P_2O_5 计),以目前的磷矿储量(710×10^8 t)和消耗速度计算,世界磷矿资源将在290年内消耗殆尽。因此,作为不可再生资源,磷矿的长期稳定供应成为全人类值得关注的问题之一。我国是人口大国,截至2020年我国的磷矿储量仅剩 32×10^8 t,不到世界储量的5%,然而每年的磷矿消耗量却达世界水平的40%~50%。不均的资源分布和巨大的开采需求使得我国磷资源短缺问题严重,磷资源回收成为我国可持续发展的战略性需求。

根据2019年的城乡建设统计年鉴,2019年我国城镇污水处理总量高达 633×10^8 m³/a,由此产生 6500×10^4 t的剩余污泥(以含水率为80%计)。这些污泥富集了污水中大量的有机污染物、病原微生物、重金属等物质,需要妥善处理处置^[2]。除了污染属性,污泥也具备资源属性。我国污水处理厂进水磷浓度一般为4~5 mg/L,为了防止富营养化,出水磷浓度控制在0.5 mg/L以下^[3],因此,污水中90%以上的磷被转移到污泥中。研究表明,污泥中的磷含量可达到污泥干质量的2%~5%^[1],作为放错了地方的资源,污泥是一种有前景的磷资源回收原料。

2 污泥中的磷及转化机制

根据污水除磷工艺及后续污泥处理处置技术,富磷污泥一般包括三大类:①生物除磷的活性污泥;②铁盐或铝盐强化除磷的化学污泥;③污泥灰分。污泥中磷的赋存形态因污泥种类不同而存在显著差异,识别污泥中磷的形态分布是开发污泥磷回收技术的重要前提。

2.1 生物除磷的活性污泥

生物除磷因其运行成本低、除磷效率高而成为目前城市污水厂广泛采用的除磷工艺,其原理是聚磷菌在厌氧条件下释磷和在好氧条件下过度吸磷,使磷主要以聚磷的形式存在于细胞内,并通过排泥的方式而达到除磷的目的。聚磷的释放可以通过创造厌氧环境使其被聚磷菌分解,从而产生吸收污

水中易生物降解有机物的能量,当聚磷菌暴露于不利环境(如低pH、细胞膜被破坏)时,需要消耗更多的能量以抵抗环境的胁迫,从而加速聚磷分解释放更多的磷酸根^[4]。

受实际进水中金属含量高、微生物代谢等的影响,除聚磷外,活性污泥中磷的形态复杂多样,目前主要通过分步提取法识别污泥中磷的形态分布。常用的SMT法将污泥中的磷分为无机磷和有机磷。研究表明,活性污泥中主要是无机磷,占污泥总磷的50%~80%^[5]。无机磷可进一步分为非磷灰石无机磷(NAIP,磷与铝、铁、锰的氧化物和氢氧化物)和磷灰石无机磷(AP,磷与钙的氧化物和氢氧化物),两者的比例与进水金属的含量有关。不同种类的无机磷溶解性不同,AP适合在酸性条件下释放磷,而NAIP在碱性条件下更有利于磷的释放^[6]。然而,SMT法对磷形态分类粗糙,如活性污泥中的聚磷无法被识别。冷高氯酸-氢氧化钠提取法虽然能有效提取并识别聚磷,但不能直接获得磷的具体存在形态,只能通过正磷和总磷的含量进行间接分析。基于此,核磁共振等先进仪器分析法被用于磷形态的分析。核磁共振等方法可以更加细致地区分不同种类的有机磷(单脂磷、二脂磷和磷酸酯)和无机磷(正磷酸盐、焦磷和聚磷)^[7],但是无法得到具体的磷形态空间分布的信息。因此,需要进一步探索全面系统识别活性污泥中磷赋存形态的方法。

2.2 铁盐或铝盐强化除磷的化学污泥

在进水总磷浓度较高的情况下,为了达标排放,我国35%以上的城镇污水处理厂采用化学法除磷^[8]。化学除磷通常采用铝盐或铁盐作混凝剂,通过电荷中和及吸附架桥作用去除污水中的磷。90%以上的磷以Fe-P/Al-P形式存在或吸附在 $Fe(OH)_3$ / $Al(OH)_3$ 的表面,与有机物形成大的絮状体。聚合絮凝体会产生“笼”效应,限制细菌和酶进入絮体内部,阻碍污泥的水解和磷的释放^[9],因此污泥的水解是Fe-P/Al-P释放的前提。Al-P转化机制比较单一,当 $pH \leq 2$ 或 $pH \geq 12$ 时会发生明显溶解^[10]。而铁化合物形态多样,pH变化、氧化还原反应、硫化物沉淀、络合作用等都可以实现Fe-P的溶解释放^[11],然而具体的Fe-P形态会影响磷的释放效果。有研究表明,碱溶法能有效溶解磷酸铁,但对铁盐除磷的三级污泥释磷效果不佳^[12],这可能是因为污泥中的Fe-P主要以非磷酸铁的一种或几种形式存在。因

技术手段的限制,目前对磷的具体存在形态及转化机制缺乏相关的研究。

2.3 污泥灰分

污泥焚烧可以显著减少污泥体积(90%)和污泥中的有机物,得到无害化的副产物(灰分),而且污泥中几乎所有的磷都残留在污泥焚烧产生的灰分中。因立法或土地的限制,全球每年通过污泥焚烧产生超过 170×10^4 t的灰分,其中包含 $(12 \sim 18) \times 10^4$ t的磷(按质量分数为7%~11%计算)^[1]。研究表明,焚烧温度达到450℃时,有机磷完全转化为无机磷,继续升高温度到600~800℃,灰分中的磷主要以矿物质沉淀形式的磷酸盐存在^[1]。灰分中磷的释放主要是矿物质沉淀磷酸盐的溶解,因此化学萃取是最简单有效的方式。

3 污泥中的磷回收技术

金属、致病菌等有毒污染物质的存在,使得富磷污泥不能直接作为肥料使用,污泥中的磷先释放再回收成为目前磷回收的主要手段,其中磷的有效释放是磷回收的关键。基于污泥中磷的赋存形态,污泥中磷释放的关键是胞内聚磷、胞外有机磷及金属磷酸盐沉淀的释放。针对不同磷形态的转化机制,污泥中的磷释放技术可分为物化法、生物法及物化-生物组合三类。

3.1 物化法

物化法主要是通过投加化学药剂或者热处理来破坏污泥絮体和细胞结构,溶解金属结合态的磷,实现污泥中磷的释放。酸溶、碱溶提取法因其释磷效率高而被广泛用于剩余污泥^[12]和灰分^[13]中磷的回收。研究发现,当 $\text{pH} \leq 4$ 时,细胞开始发生溶胞作用,细胞内的磷得到释放^[14];当 $\text{pH} > 11$ 时细胞膜被破坏,细胞膜上或细胞内部的含磷物质被水解,有机磷被释放^[15]。此外,酸溶能有效实现无机磷的溶出。Ca-P在 pH 为4时开始有明显的磷溶出,而Fe-P、Al-P的溶解需要更低的 pH 。研究表明,采用硫酸酸溶,当 pH 为2时,Al-P污泥磷的溶出率达95%;当 pH 为1.5时,Fe-P污泥磷的溶出率达78%^[12]。然而,金属的共溶使得富磷酸液需要进一步分离纯化才能实现磷的清洁回收。

Donatello等^[16]发现阳离子交换柱能有效实现磷和金属的分离,富集的磷以磷酸或鸟粪石沉淀的方式回收,但离子交换会造成部分磷的损失。纳滤

技术通过筛分和静电作用也能有效截留重金属实现磷酸的回收。研究表明,通过改变过滤方式,采用不断稀释过滤法,在 pH 为0.5、溶液透过率达90%时,可以实现83.7%的磷回收^[17]。另外,通过膜材料改性,可以得到高通量、高重金属截留和高磷回收率的纳滤膜^[18]。但是目前大部分研究仅限于实验室阶段,后续需要关注实际应用中的可行性,并进一步开发经济有效的膜材料。近年来,开发新型吸附剂从富磷酸性溶液中选择性吸附磷酸盐也受到广泛关注。这一吸附过程将纯化和沉淀/结晶步骤相结合,吸附后的含磷介质可直接用作磷肥。Wu等^[18]研究指出,当前研究的热门金属(铜和钴)和具有潜力的金属(钛和铈)都可用于开发高效除磷吸附材料。其中,经Zr改性的磁性吸附剂对磷表现出良好的吸附和解吸特性,在最适条件(吸附率达100%,循环5次,吸附和解吸率保持在90%和110%以上),且在酸性条件下,仅有13%的损失量^[19]。Fang等^[20]发现采用氯化镁改性,在700℃下热解制成的污泥生物炭对富磷的酸浸液有良好的吸附效能,富磷的生物炭可作为理想的再生磷肥。污泥生物炭吸附剂同时实现了污泥的资源化利用和磷的清洁回收,具有重要的社会环境效益和广阔的市场应用前景。

此外,氧化剂能有效破坏细胞膜进而提高磷的释放,并将有机磷转化为无机磷。其中臭氧和 H_2O_2 是常用的氧化剂。热处理法因其处理时间短、释磷效率高也成为污泥释磷技术研究的热点之一,主要通过超声、微波、热水解等方式使污泥体系升温,破坏污泥及细胞结构^[21]。虽然物化法操作简单、快速高效,但对化学药剂的需求量大、后续污泥的处理处置问题及加热引起的高能耗等限制了其大规模的工程应用。

3.2 生物法

生物法是指在厌氧转化过程中,污泥中的磷在微生物的作用下实现从固相到液相的转化。厌氧消化作为国际上最受欢迎的污泥处理处置技术之一,其过程主要分为水解酸化、产氢产乙酸和产甲烷三个阶段。理论上,在有机物水解阶段主要是有机磷的释放,在酸化阶段则是金属磷酸盐沉淀(Ca-P、Mg-P)的溶解及该阶段产生的 H_2S 进一步导致的Fe-P的释放;在产乙酸阶段,聚磷菌主要通过分解聚磷来提供能量等。然而,实际研究表明,污泥中

的磷在厌氧消化过程中仅有少量释放^[7, 21],对于含固率为3.5%的活性污泥,厌氧消化30 d后,沼液中的总磷仅有56.4 mg/L,释放效率不足10%;即使是高含固厌氧消化污泥(含固率>10%)沼液中的总磷含量也不超过150 mg/L,远低于污泥中磷的总量。这可能是因为厌氧消化过程中微生物的消耗作用及产甲烷阶段因酸的转化使得污泥pH升高导致释放的磷与金属再沉淀作用。基于此,有研究发现,将厌氧消化产甲烷改为厌氧发酵产酸,厌氧发酵12 d后,活性污泥中磷的释放率高达43.3%^[22]。这主要是因为产酸降低了污泥pH从而促进了金属磷酸盐沉淀的有效溶出,同时避免了产甲烷阶段污泥pH升高出现的再沉淀反应。此外,磷的释放效率受污泥种类的影响,Lin等^[9]分别对采用铁盐和铝盐强化的一级污泥进行厌氧发酵,结果发现厌氧条件下Fe(Ⅲ)的还原会导致污泥絮凝体的解体、Fe-P的溶解,磷释放率达31%;而铝盐强化的一级污泥基本无磷的释放。因此,针对生物法释磷效率低的问题,以厌氧消化为核心的改进技术的选择取决于富磷污泥的种类。

3.3 物化-生物组合技术

为了提高剩余活性污泥在厌氧消化过程中磷的释放,热水解、蛋白酶水解、高压脉冲等预处理技术成为近年来研究的热点。有研究发现,热水解预处理使污泥上清液中磷的浓度提高了一倍,但后续厌氧消化过程中,上清液中磷浓度几乎无上升反而有所下降^[7],这与周思琪的研究结果一致^[21]。这可能与沼液中释放的磷和金属的再沉淀作用,以及产甲烷菌等微生物对磷的消耗等有关。与热水解预处理相比,蛋白酶水解和厌氧发酵组合工艺效果更优,污泥的释磷效率提高了72.4%^[23]。Ma等^[24]采用乙二胺四乙酸(EDTA)与高压脉冲放电预处理相结合的方法,在破坏污泥结构的同时防止金属磷酸盐沉淀的形成,显著提高了污泥厌氧发酵过程中磷的释放。因此,破坏污泥结构、减少金属磷酸盐沉淀是提高污泥厌氧消化过程中磷释放的有效手段。

通过投加化学添加剂或改变操作条件促进金属磷酸盐沉淀的溶出也能有效提高活性污泥厌氧消化过程中的磷释放效率。Zhang等^[25]研究发现在厌氧消化过程中投加EDTA,可以减少Ca-P、Mg-P沉淀,有效提高磷的释放率,但是成本高和效率低等问题限制了EDTA的工程应用。Latif等^[26]在厌氧

消化过程中保持污泥酸化,考察了污泥在不同pH条件下厌氧消化的释磷效果,结果发现,与中性条件相比,在pH<5.6时磷的释放率增加了3.6倍,达到80%,然而水解能力的减弱造成甲烷产率下降。为了减少化学药剂的使用量并降低对甲烷产率的影响,该课题组改进操作条件,采用加压反应器进行厌氧消化,通过保留液体中的弱酸二氧化碳来降低系统pH,结果表明,当压力为0.6 MPa、pH为6.4时,磷的释放率达到75%^[27],但后续的推广应用需要解决运行成本高和有机质转化率较低的问题。

对于富含Fe-P/Al-P的化学污泥,污泥结构破坏、Fe-P/Al-P的磷溶出是厌氧过程中磷释放的关键^[9]。研究发现,碱性发酵技术在促进污泥水解及磷释放回收上表现出独特的优势。一方面,碱性条件有助于污泥絮体破碎,促进厌氧细菌将有机磷转化为无机磷;另一方面,氢氧化物沉淀的形成进一步加速了磷的释放。研究表明,与直接厌氧发酵相比,经铝盐、铁盐强化的一级污泥在pH为11时,磷的释放率分别提高了36.5%和69.4%^[28-29]。此外,投加硫酸盐也能有效增强厌氧发酵过程中Fe-P污泥的磷溶出,磷的释放率从33.2%(无投加)提高到56.2%^[30]。然而,硫酸盐的投加在一定程度上会降低甲烷产量^[31],因此如何在污泥厌氧资源化过程中同步实现磷高效释放及高附加值回收是未来技术改进的目标。

因富磷沼液中同时含有丰富的氨氮,鸟粪石沉淀法成为同步回收沼液中氮、磷的有效手段^[28-29]。研究表明,在最优条件下,磷回收率达90%以上,然而粒径小、成本高等问题限制了其工程应用。近年来,Wilfert等^[32]在消化污泥中发现一种非常稳定且经济价值不菲的磷铁化合物——蓝铁矿,特别是铁盐除磷的消化污泥中有40%~50%的磷以蓝铁矿的形式存在。然而,污泥中蓝铁矿的分离提纯是蓝铁矿回收的难点。为了得到清洁的蓝铁矿,有研究在酸性条件下通过投加氯化铁强化厌氧发酵过程中铁、磷的释放,使污泥中82.60%的磷以蓝铁矿的形式从沼液中得到回收^[33],这为厌氧消化后富磷沼液中的磷回收提供了新思路。

4 结论与建议

污泥中磷的高效回收在有效补充磷资源的同时也防止了污泥处理处置过程中磷的再次释放产

生营养化的风险。污泥中磷形态分布因进水条件、污水处理工艺及后续污泥处理处置技术不同存在显著差异,进而影响磷的释放效率。因此识别污泥中磷的形态分布是开发磷回收技术的首要前提,目前因检测手段等限制缺乏相关的数据支撑。

在污泥厌氧资源化过程中实现磷回收成为经济、可持续的发展方向。作为国际上最常用的污泥处理方法之一的厌氧消化技术,存在磷释放效率低的问题。目前一些强化手段虽然在一定程度上提高了释磷效率,但对厌氧消化过程中磷的迁移转化等缺乏全面的机理分析,无法识别限制磷释放的主要因素。此外,以厌氧消化为核心的改进技术,如投加硫酸盐、酸化污泥等方法,虽然在一定程度上提高了磷的释放率,但是对产甲烷的抑制作用限制了该技术的推广应用,因此开发与污泥厌氧资源化相适应的磷回收技术具有良好的工程应用价值。

参考文献:

- [1] FANG L, WANG Q M, LI J S, *et al.* Feasibility of wet-extraction of phosphorus from incinerated sewage sludge ash (ISSA) for phosphate fertilizer production: a critical review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2021, 51(9): 939-971.
- [2] 许颖. 剩余污泥中关键组分结构对其厌氧生物转化的影响及机制[D]. 上海:同济大学, 2018.
- XU Ying. The Effect and Mechanism of Key Components Structure in the Residual Sludge on Anaerobic Biotransformation [D]. Shanghai: Tongji University, 2018 (in Chinese).
- [3] JIN L Y, ZHANG G M, TIAN H F. Current state of sewage treatment in China [J]. *Water Research*, 2014, 66: 85-98.
- [4] FENG C J, WELLES L, ZHANG X D, *et al.* Stress-induced assays for polyphosphate quantification by uncoupling acetic acid uptake and anaerobic phosphorus release [J]. *Water Research*, 2020, 169: 115228.
- [5] XU Y F, HU H, LIU J Y, *et al.* pH dependent phosphorus release from waste activated sludge: contributions of phosphorus speciation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 267: 260-265.
- [6] LI S S, ZENG W, JIA Z Y, *et al.* Phosphorus species transformation and recovery without apatite in FeCl_3 -assisted sewage sludge hydrothermal treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 399: 125735.
- [7] 刘佳琪. 污泥预处理及厌氧消化系统中磷的释放、转化与回收[D]. 北京:北京林业大学, 2018.
- LIU Jiaqi. Phosphorus Release, Transformation and Recovery in Sludge Pretreatment and Anaerobic Digestion System [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018 (in Chinese).
- [8] 张维, 颜秀勤, 张悦, 等. 我国城镇污水处理厂运行药耗分析 [J]. *中国给水排水*, 2017, 33(4): 103-108.
- ZHANG Wei, YAN Xiuqin, ZHANG Yue, *et al.* Analysis of chemicals consumption in urban sewage treatment plants in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(4): 103-108 (in Chinese).
- [9] LIN L, LI R H, YANG Z Y, *et al.* Effect of coagulant on acidogenic fermentation of sludge from enhanced primary sedimentation for resource recovery: comparison between FeCl_3 and PACl [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 325: 681-689.
- [10] LIN L, LI X Y. Effects of pH adjustment on the hydrolysis of Al-enhanced primary sedimentation sludge for volatile fatty acid production [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 346: 50-56.
- [11] WILFERT P, KUMAR P S, KORVING L, *et al.* The relevance of phosphorus and iron chemistry to the recovery of phosphorus from wastewater: a review [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49: 9400-9414.
- [12] MONEA M C, LÖHR D K, MEYER C, *et al.* Comparing the leaching behavior of phosphorus, aluminum and iron from post-precipitated tertiary sludge and anaerobically digested sewage sludge aiming at phosphorus recovery [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 247: 119129.
- [13] LIANG S, CHEN H M, ZENG X H, *et al.* A comparison between sulfuric acid and oxalic acid leaching with subsequent purification and precipitation for phosphorus recovery from sewage sludge incineration ash [J]. *Water Research*, 2019, 159: 242-251.
- [14] 谢逸俊, 林晓丰, 林燕娟, 等. 酸碱对剩余活性污泥中氮磷类物质破解研究 [J]. *广东石油化工学院学报*, 2015, 25(1): 32-36.
- XIE Yijun, LIN Xiaofeng, LIN Yanjuan, *et al.* Research on disposal methods of N and P released from excess activated sludge [J]. *Journal of Guangdong University of Petrochemical Technology*, 2015, 25 (1):

- 32–36 (in Chinese).
- [15] 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.
- [16] DONATELLO S, TONG D, CHEESEMAN C R. Production of technical grade phosphoric acid from incinerator sewage sludge ash (ISSA) [J]. *Waste Management*, 2010, 30: 1634–1642.
- [17] SCHÜTTE T, NIEWERSCH C, WINTGENS T, *et al.* Phosphorus recovery from sewage sludge by nanofiltration in diafiltration mode [J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, 480: 74–82.
- [18] WU B L, WAN J, ZHANG Y Y, *et al.* Selective phosphate removal from water and wastewater using sorption: process fundamentals and removal mechanisms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54: 50–66.
- [19] LIN X C, LAN L H, ALTAF R, *et al.* Simultaneous P release and recovery from fish farm sludge using a Zr-modified magnetic adsorbent treated by ultrasound [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 250: 119529.
- [20] FANG L, YAN F, CHEN J J, *et al.* Novel recovered compound phosphate fertilizer produced from sewage sludge and its incinerated ash [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8: 6611–6621.
- [21] 周思琪. 高温热水解对含固污泥中磷的形态转化影响研究[D]. 上海: 同济大学, 2019.
- ZHOU Siqi. Effect of Thermolysis on Phosphorus Speciation Transformation in Solid Sludge [D]. Shanghai: Tongji University, 2019 (in Chinese).
- [22] LI L, PANG H L, HE J G, *et al.* Characterization of phosphorus species distribution in waste activated sludge after anaerobic digestion and chemical precipitation with Fe^{3+} and Mg^{2+} [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 373: 1279–1285.
- [23] LIU X, LI A J, MA L S, *et al.* A comparison on phosphorus release and struvite recovery from waste activated sludge by different treatment methods [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2020, 148: 104878.
- [24] MA X, LIU J Y, HU P S, *et al.* Combining ethylene diamine tetraacetic acid and high voltage pulsed discharge pretreatment to enhance short-chain fatty acids and phosphorus release from waste activated sludge via anaerobic fermentation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 240: 118252.
- [25] ZHANG T X, BOWERS K E, HARRISON J H, *et al.* Releasing phosphorus from calcium for struvite fertilizer production from anaerobically digested dairy effluent [J]. *Water Environment Research*, 2010, 82: 34–42.
- [26] LATIF M A, MEHTA C M, BATSTONE D J. Low pH anaerobic digestion of waste activated sludge for enhanced phosphorous release [J]. *Water Research*, 2015, 81: 288–293.
- [27] LATIF M A, MEHTA C M, BATSTONE D J. Enhancing soluble phosphate concentration in sludge liquor by pressurised anaerobic digestion [J]. *Water Research*, 2018, 145: 660–666.
- [28] CHEN Y, LIN H, YAN W, *et al.* Alkaline fermentation promotes organics and phosphorus recovery from polyaluminum chloride-enhanced primary sedimentation sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 294: 122160.
- [29] CHEN Y, LIN H, SHEN N, *et al.* Phosphorus release and recovery from Fe-enhanced primary sedimentation sludge via alkaline fermentation [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 278: 266–271.
- [30] YANG H, LIU J Y, HU P S, *et al.* Carbon source and phosphorus recovery from iron-enhanced primary sludge via anaerobic fermentation and sulfate reduction: performance and future application [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 294: 122174.
- [31] LIPPENS C, DE VRIEZE J. Exploiting the unwanted: sulphate reduction enables phosphate recovery from energy-rich sludge during anaerobic digestion [J]. *Water Research*, 2019, 163: 114859.
- [32] WILFERT P, MANDALIDIS A, DUGULAN A I, *et al.* Vivianite as an important iron phosphate precipitate in sewage treatment plants [J]. *Water Research*, 2016, 104: 449–460.
- [33] CAO J S, WU Y, ZHAO J N, *et al.* Phosphorus recovery as vivianite from waste activated sludge via optimizing iron source and pH value during anaerobic fermentation [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 293: 122088.

作者简介: 丁燕燕(1994–), 女, 山东东明人, 在读博士研究生, 研究方向为污泥磷回收技术。

E-mail: 1910518@tongji.edu.cn

收稿日期: 2020–11–19

修回日期: 2021–07–01

(编辑: 丁彩娟)