

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.100



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



铁盐辅助生物除磷工艺研究进展

何强,何璇,洪毅怡晖,刘杰妮,卢旺,徐仰辉,皇甫小留

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400045)

摘要:磷作为生命有机体中必不可少的元素,在生命活动中起着至关重要的作用。近年来,随着污水厂排放标准日趋严格,铁盐作为化学除磷药剂被广泛应用于污水处理厂中。尽管目前已对化学辅助生物除磷和侧流磷回收等创新改进工艺开展了大量的研究,但由于污水体系的多样性和复杂性,污水厂的除磷效率及磷资源回收仍面临诸多挑战。综述铁盐辅助生物除磷工艺运行的基本特征,梳理污水处理过程中铁与磷的相互作用机制,总结两种工艺中铁盐对微生物群落结构的影响及归趋,并对今后工艺的研究方向进行展望。研究发现,继续系统开展微生物与不同磷矿物共生关系的研究,优化侧流磷回收下游产物的分离纯化条件,并建立合理预测和反馈污水处理系统中铁、磷浓度的动态模型是提高污水处理厂资源回收效率、促进可持续发展的必然举措。

关键词:化学辅助除磷;侧流磷回收;铁盐;微生物群落;聚磷菌

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**R **文章编号:**2096-6717(2022)01-0160-08

A review of ferric salt dependent phosphorus removal in wastewater

HE Qiang, HE Xuan, HONG Yiyihui, LIU Jieni, LU Wang, XU Yanghui, HUANGFU Xiaoliu

(Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Phosphorus, as an essential element in life organism, plays an important role in life activities. Recently, with the increasingly stringent discharge standards of wastewater treatment plants (WWTPs), ferric salts have been widely used in WWTPs as chemical agents for phosphorus removal. Although a large number of studies have been carried out, due to the diversity and complexity of the sewage system, the efficiency of chemical-assisted biological phosphorus removal and side-stream phosphorus recovery is still facing many challenges. Therefore, this article reviews the basic characteristics of the ferric salt dependent phosphorus removal process, sorts out the interaction mechanism between ferric salt and phosphorus. The influence and trend of iron salt on microbial community structure in the two processes are summarized, and

收稿日期:2021-01-06

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0404703, 2018YFC1903203);重庆市技术创新与应用发展专项(cstc2019jcsx-tjsbX0002)

作者简介:何强(1965-),男,教授,博士生导师,主要从事污水处理技术研究, E-mail: hq0980@126.com.

皇甫小留(通信作者),男,副教授,博士生导师, E-mail: hfxl-hit@163.com.

Received: 2021-01-06

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC0404703, 2018YFC1903203); Chongqing Technology Innovation and Application Development Project (No. cstc2019jcsx-tjsbX0002)

Author brief: HE Qiang (1965-), PhD, professor, doctoral supervisor, main research interest: sewage treatment, E-mail: hq0980@126.com.

HUANGFU Xiaoliu (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: hfxl-hit@163.com.

the research direction of the process in the future is prospected. It is found that continuing to systematically study the symbiotic relationship between microorganisms and different phosphorus minerals, optimizing the separation and purification conditions of downstream products of side stream phosphorus recovery, and establishing a dynamic model to reasonably predict and feed back the concentration of iron and phosphorus in the sewage treatment system are inevitable measures to improve the resource recovery efficiency of the sewage treatment plant and promote sustainable development.

Keywords: chemical-aid phosphorus removal; side-stream phosphorus recovery; ferric salt; microbial community; polyphosphate-accumulating bacterium

磷在地壳中含量丰富,是地壳中常见的元素之一,主要以磷酸盐的形式存在于矿石中。磷在生物学功能上不能被任何其他元素所取代,并且是一种不可再生的自然资源。但由于全球人口的增长导致对肥料的需求逐渐增加,这意味着未来对磷的需求将进一步增加,预计到 2050 年全球磷需求量将增长 50%至 100%^[1]。而另一方面,由于磷过量存在会引起水体的富营养化,水体多样性丧失,所以,限制磷排放对控制水体富营养化具有重要意义。在此背景下,强化生物除磷工艺作为一种经济且可持续的处理工艺应运而生。因为其具有处理成本相对较低、操作简单、运行灵活等优点,强化生物除磷工艺已成为污水处理除磷的重要途径。但由于传统的强化生物除磷工艺容易受到温度、水力冲击和进水碳源等外界条件的变化干扰,导致除磷效果大幅降低,难以实现高效除磷。因此,能够充分发挥强化生物除磷工艺优势,又能弥补化学除磷方法富磷污泥较多弊端的化学辅助生物除磷技术在近年来的城镇污水处理厂提标改造过程中得到了广泛应用。

化学辅助生物除磷主要是通过通过在污水处理系统中加入铁盐或铝盐等化学试剂,使化学沉淀和生物除磷同时进行,以满足稳定排放的要求。近年来,学者们对铁盐的除磷性能^[2]、铁盐对生物除磷功能^[3]、污泥特性^[4]等影响进行了大量研究。但在化学辅助生物除磷工艺中各种物理化学参数之间关系复杂,其去除效率受 DO、有机物、pH 值、碱度以及化学药剂种类等因素影响^[5]。因此,在实际污水处理过程中,铁盐等化学药剂的投加量仍以经验为主,造成了许多不必要的浪费。其次,与传统的强化生物除磷工艺相比,化学辅助生物除磷尽管大大提高了污染物的去除率,但同时也会产生大量富磷污泥。常用的填埋处置方法需要占用大量土地空间,污泥处置的环境和经济成本大幅增加。此外,化学辅助生物

除磷所产生的污泥中还含有大量的有机物和磷,分离污泥中与化学键结合的磷很困难,无法进一步进行有效的磷回收,从而限制了富磷污泥的下游经济效益^[6]。

另外,中国城市污水中的有机碳氮比整体较低^[7],使用生物方法实现污水达标脱氮困难且成本高昂。为了弥补生物脱氮过程中有机碳的不足,通常需要在废水中加入甲醇、葡萄糖等外部有机碳源。因此,作为传统生物强化除磷和化学辅助生物除磷工艺的创新改进和新兴替代品——侧流磷回收工艺通过部分回流活性污泥或者通过侧流厌氧反应器分流污泥,利用剩余的回流污泥进行发酵,所产生的挥发性脂肪酸(VFA)可实现减少化学药剂使用量的目的,从而提高工艺稳定性^[8]。虽然目前侧流磷回收工艺的研究已成为热点,但关于其微生物种群的确切作用机制鲜有报道。笔者从工艺运行特征、污水中铁与磷的相互作用以及微生物种群的变化等方面,对不同形式的铁盐辅助生物除磷工艺进行重新梳理和总结,以期优化污水处理厂运行策略、提高污水处理厂的磷回收效率提供参考。

1 铁盐辅助生物除磷工艺的运行特征

传统强化生物除磷的稳定性和可靠性较差,容易造成出水磷浓度不稳定的情况。因此,在过去的 20 年中,人们深入研究了使微生物代谢与金属盐协同作用的化学辅助生物除磷技术,这为提高污染物去除率而又不显著增加处理成本提供了一种可行的方法。根据化学除磷药剂投加位置的不同,可将化学辅助生物除磷工艺分为前置化学除磷、同步化学除磷和后置化学除磷^[9]。同步化学除磷是将化学药剂投加在曝气池末端或二次沉淀池进水中,药剂在除磷时对有机物的固液分离有一定帮助。同时,该方式不用增添搅拌混合、沉淀分离设施,所需投资较

小。因此,同步投加的方式使用最为广泛,其典型流程图如图 1 所示。

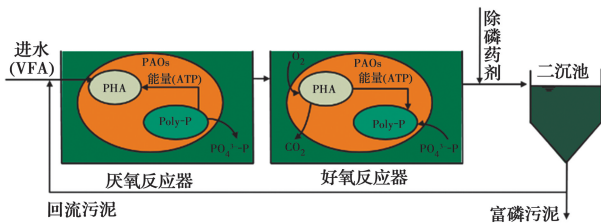


图 1 化学辅助生物除磷工艺的典型处理流程

Fig. 1 Typical workflow of chemically assisted biological phosphorus removal

化学辅助除磷主要通过向污水中投加金属盐,金属盐与污水中存在的溶解性磷酸盐形成难溶的颗粒状磷酸盐沉淀物,进而实现污水除磷^[10]。由于铁盐价格比铝盐便宜,固体沉淀中的磷酸铁无毒,并且铁盐还可以防止厌氧消化过程中的硫化氢排放,目前铁盐已成为污水处理厂除磷的主流化学药剂。现有研究普遍认为,铁盐辅助生物除磷工艺的主要作用机理是在酸性 pH 值范围内用铁的水解产物进行电荷中和,并在碱性 pH 值范围内被大量无定形沉淀物所包裹^[11]。所以,当铁盐添加到水体中时,会水解产生大量水解产物^[12],从而降低水体的 pH 值,随后在聚集过程中改变胶体物质的电荷和天然有机物的组织。但实际上,在铁盐辅助生物除磷系统中,铁可以通过多种方式来增强生物系统中污染物的去除,例如零价铁可通过降低氧化还原电位并影响微生物群落来改善厌氧消化系统的产酸和产甲烷活性^[13]。此外,Fe²⁺和零价铁还可以作为微生物的电子供体,从而直接参与微生物的分解代谢和合成代谢。因此,进一步分析污泥中确切的铁磷化合物种类和形态对了解磷素的迁移路径、生物有效性至关重要。

2 铁盐辅助生物除磷工艺中的铁磷化合物

铁是一种过渡金属,其化学性质非常多样,所以在铁盐辅助生物除磷工艺系统中除了发生化学沉淀、化学络合作用外,还可以通过离子交换以及磷酸铁盐本身的沉淀对水中溶解磷进行吸附来去除磷酸盐。从而导致 Fe²⁺和 Fe³⁺在不同 pH 值和氧化还原电位(ORP)条件下达到平衡所存在的形态不同^[14]。如图 2 所示,Fe²⁺和 Fe³⁺在不同 pH 值条件

下可被水解形成各种不溶性氧化物,羟基氧化物和氢氧化物^[15]。目前已经发现在污水中可形成针铁矿、水铁矿、纤铁矿、赤铁矿以及磁铁矿等不同类型的铁氧化物^[16]。不同的铁氧化物具有不同的晶体结构,并且这些结构在很大程度上决定了铁氧化物的孔隙率、比表面积、溶解度和还原性等性质^[17]。同时,铁氧化物的这些性质又将反过来影响铁氧化物与正磷酸盐结合特性和吸附能力^[18]。除此之外,相同类型的铁氧化物上正磷酸盐的吸附能力也会因晶体表面羟基基团的类型和密度不同而有所差异。

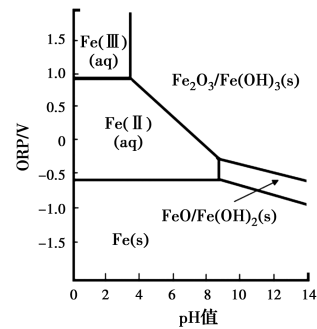


图 2 不同 pH 值和 ORP 条件下铁的稳定形态^[14]

Fig. 2 Stable iron species under different pH and ORP conditions

由于 Fe³⁺在水溶液中的水解通常非常迅速,目前的研究认为,在系统中投加 Fe³⁺时,除磷的主要机理是正磷酸盐在铁氧化物上的吸附^[19]。而投加 Fe²⁺时,由于 Fe²⁺可以部分或完全氧化为 Fe³⁺,其情况较为复杂。一般来说,Fe²⁺的氧化很大程度上取决于环境中的溶解氧浓度和 pH 值,所以 Fe²⁺通常被添加到污水处理厂的曝气阶段,以便氧化为 Fe³⁺^[20]。因此,在污水处理过程中需要较高的 ORP,以发生不同的微生物和化学过程。但目前在污水处理领域因 ORP 的变化而引起的铁形态改变并未引起太多关注。根据文献报道,在土壤和沉积物系统中存在大量能够异化还原 Fe³⁺的铁还原菌。这些微生物通过将 Fe³⁺还原成 Fe²⁺的过程增加了铁磷化合物的可溶性,从而提高了磷的活性^[21]。但铁氧化物的还原性取决于其晶体结构、溶解度和表面积。针铁矿和赤铁矿等低表面积和低溶解度的铁氧化物通常比纤铁矿和水铁矿等无定形氧化铁更难被铁还原菌利用^[22]。但铁氧化物一旦被还原,Fe²⁺便会以磁铁矿、绿锈或蓝铁矿的形式沉淀。此外,在电子受体(例如氧或硝酸盐)存在的情况下,溶解态或固体的亚铁化合物会在铁氧化菌的作用下被氧

化^[23]。在一定条件下,某些铁还原菌还会形成类似菌毛的导电附属肢体,作为电子导管向远距离铁氧化物传递电子,避免细胞表面与电子受体的直接接触,从而使 Fe^{3+} 氧化物更容易被还原^[24]。目前,有报道指出,在污水处理厂中铁还原菌和氧化菌同样非常活跃^[20],因此,在厌氧条件下, Fe^{3+} 的还原有可能也会导致污泥中磷的大量释放。

3 铁盐辅助生物除磷工艺中的微生物种群

与传统强化生物除磷工艺中的微生物种群一样,PAOs 和 GAOs 仍是铁盐辅助生物除磷工艺中的重要微生物。近年来,越来越多地使用分子技术来表征铁盐辅助生物除磷工艺中的污泥微生物群落结构,并根据其隶属关系对 PAOs 进行分类。其中, *Ca. Accumulibacter* 和 *Tetrasphaera* 是铁盐辅助生物除磷工艺中最重要的 PAOs。但由于铁盐投加后可能会随着污泥回流再次返回生物区,铁盐自身对于 PAOs 具有一定的抑制或毒性作用^[25]。同时,通过污泥回流进入到厌、缺氧池的铁盐也可能会迅速与进水中的磷发生共沉淀作用,导致铁盐辅助生物除磷系统中进水磷与碳源的比率较低^[26],从而影响系统的运行特性和微生物种群。有学者认为碳磷比是影响细菌群落结构的重要因素。一方面,高碳磷比更有利于 GAOs 的增殖^[27];另一方面,高碳磷比条件下 PAOs 还可以将多磷酸盐累积代谢转移到糖原累积代谢^[28]。但目前铁盐对于聚磷微生物种群的具体影响研究较少。Wang 等^[29]报道了采用化学辅助生物除磷工艺的污水处理厂中微生物群落结构,发现尽管化学辅助生物除磷系统中存在多种 PAOs,但是 *Ca. Accumulibacter* 和 *Tetrasphaera* 这两个最重要的 PAOs 种属的相对丰度分别仅为 0.59% 和 0.20%,而 GAOs 的两个属 *Competibacter* 和 *DeFluviicoccus* 的相对丰度则分别高达 5.77% 和 1.28%。此外,不同类进化枝的 *Ca. Accumulibacter* 具有不同的代谢特征。进化枝 IIC 被认为是各种废水处理系统中的优势进化枝^[30]。Mao 等^[31]发现,来自全球 6 个不同国家的 18 座污水处理厂的进化枝均一致。此外,还在 *Ca. Accumulibacter* 谱系中发现其相对丰度与进水总磷和化学需氧量显著相关($p < 0.05$),而与纬度等地理因素无关。这表明聚磷微生物除磷的潜力更多地是由污水处理厂的当地环境条件驱动,而不是靠特定

的微生物群落驱动。

4 新型侧流磷回收工艺的运行特征

尽管与传统的化学除磷相比,铁盐辅助生物除磷工艺具有较好的经济和环境优势。但在实际处理过程中,由于需要使用铁盐来实现可靠的污染物去除性能和良好的出水效果。这种方式容易导致铁离子在污泥中不断累积从而对生物系统造成不良影响。所以,在不影响主流工艺的基础上,通过增设侧流磷回收工艺来辅助除磷已经成为新的研究热点。一般来说,侧流磷回收工艺的主流部分仍是常规的生物处理系统,利用外加的侧流操作单元将生物处理过程中的回流污泥进行污泥发酵生产 VFA,同时,让聚磷菌在其最大释磷能力条件下将水中残余的磷浓度降至更低水平。最后利用化学方法产生难溶或沉淀物,从而实现磷资源从污水中剥离和回收。

目前应用较多的侧流除磷工艺形式主要有 PhoStrip 工艺和 BCFS 工艺。其中最为典型的 PhoStrip 工艺是在传统常规活性污泥处理方法的基础上增设一个除磷池和化学反应池,将一部分回流污泥(约为进水流量的 4%~10%)转移到厌氧释磷池中使其释磷^[32]。释磷后的污泥再次回流到好氧池中继续进行吸磷,富磷上清液则进入化学反应沉淀池。通过添加化学药剂使其产生沉淀,最终磷以晶析沉淀的形式从水体中去除^[33]。图 3 是 PhoStrip 工艺流程图。目前该工艺已发展成为比较成熟的城市污水处理工艺,能够在不使用外部碳源或化学除磷的条件下实现出水平均 TP 浓度低于 0.25 mg/L^[34]。

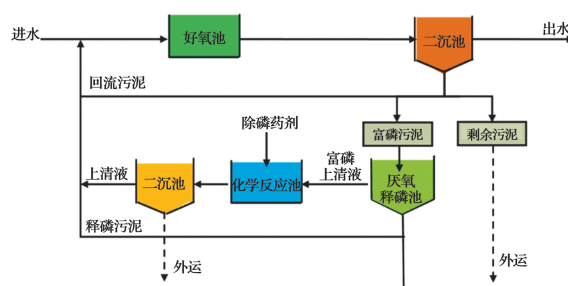


图 3 PhoStrip 工艺流程示意图

Fig. 3 PhoStrip process flow diagram

BCFS 工艺则是充分利用反硝化除磷菌(DPBs)的缺氧反硝化除磷作用以实现磷的完全去除和氮的最佳去除,图 4 是该工艺的流程图。BCFS 工艺通过在 UCT 工艺的厌氧池与缺氧池中间增设一个接

触池,不仅可以对污水中的有机物进一步吸附去除,防止污泥膨胀,还可以快速将回流污泥中的 NO_3^- 去除,为厌氧池中 DPBs 发挥释磷作用提供保障^[35]。此外,由于在厌氧池出水端磷酸盐含量最高,所以在厌氧池后端还设置了除磷器进行化学除磷。但在 BCFS 工艺实际运行过程中,为了满足硝化细菌脱氮的需要而设置的污泥停留时间一般较长,存在硝化菌和聚磷菌在泥龄上的矛盾,从而降低了整个系统的除磷效果^[36]。在 PhoStrip 和 BCFS 工艺的基础上,业内专家学者还开发了与其他主流生物除磷工艺相结合的变形工艺,均在一定程度上实现了强化除磷的目的。

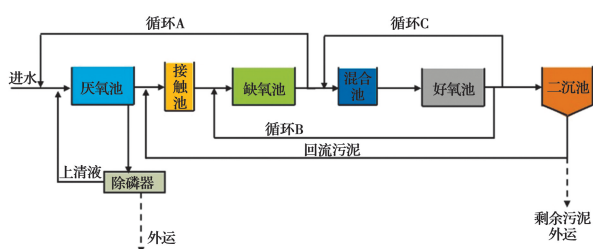


图 4 BCFS 工艺流程示意图

Fig. 4 BCFS process flow diagram

此外,众多学者就侧流磷回流工艺侧流位置的选择以及投加化学药剂的类型也展开了讨论。侧流工艺主要的效能提升方式是将污泥发酵作为补充碳源添加到侧流厌氧反应器中,从而实现在不添加化学药剂的情况下确保污水处理厂出水达到排放标准^[37]。但也有报道提出在传统的强化生物除磷工艺中的厌氧池进行改造^[38],划分出一个区段作为侧流池。该方法在减少工程措施费用的同时还可以利用侧流反应器提供额外的可溶性 COD,从而保证出水 TP 可以从平均 2.05 mg/L 降低至 1.14 mg/L 以下^[39]。此外,对除磷药剂的单位投加量也进行了计算,认为采用侧流磷回收工艺的单位药剂(CaO/mg)投加量仅为直接进行化学除磷的 7.7%~8.4%。通过分析不同形式侧流磷回收工艺的报道可以发现,利用 PAOs 厌氧释磷的特性进行侧流化学磷回收确实可以在有效去除有机物的同时实现进水磷素的回收。但目前所采用的这些侧流磷回收工艺要去除污水中大部分磷所需的加药量仍然较大,要真正实现回收磷资源还有很大的研究空间。

5 侧流工艺中微生物种群的变化

一般来说,侧流磷回收工艺中的典型聚磷微生物

物 *Ca. Accumulibacter* 的数量占总生物量种群的 4.6%至 7.6%^[34],其比例与常规生物除磷工艺中的数量水平相当。但同铁盐辅助生物除磷工艺一样,进水碳磷比会严重影响微生物群落结构。有研究报告,当进水碳磷比在 100:2 至 100:20 之间变动时,GAOs 与 PAOs 共存于系统中;但当碳磷比降至 100:2 将会引起胞内聚磷颗粒浓度降低,并将最终导致 GAOs 取代 PAOs 而成为系统中的主要菌群^[41]。此外,与常规处理工艺相比,侧流磷回收工艺中的 *Tetrasphaera* 菌属丰度也相对较高^[42]。当然,这有可能是由于进水水质不同导致的,目前这一结论并没有得到明确验证。

铁盐投加对侧流磷回收工艺中聚磷微生物的影响现阶段还缺乏共识,但可以确定的是,侧流磷回收工艺中厌氧发酵阶段的微生物种群和数量与常规系统有很大区别。在厌氧除磷池中 Bacteroidetes 将会成为最大的微生物门类,在该门中的大多数是 *Prevotella*^[43]。*Prevotella* 菌属有助于分解蛋白质和碳水化合物,从而产生乙酸、丁二酸等短链脂肪酸^[44]。其次就是与好氧池中相同的 Proteobacteria 菌门,但由于厌氧条件的存在,其占比较低。然后就是以 Clostridiaceae 菌科为主的 Firmicutes 菌门,该门中典型的铁还原菌 *Clostridium beijerinckii* 和 *Alkaliphilus metalliredigenes* 在厌氧发酵过程中可以利用 VFAs 作为碳源和电子供体进行 Fe^{3+} 还原^[23]。因此,投加 Fe^{3+} 将会改变微生物群落结构,导致侧流磷回收系统中生物群落的物种丰富度和多样性有所下降。

6 结论与展望

日趋严格的污染物排放标准势必将促使城镇污水处理厂不断提高除磷能力和磷回收效率。铁盐辅助生物除磷工艺因为拥有化学和生物除磷的同时作用,能够大幅提高污染物的去除效率,在污水处理行业有着广泛的实际工程应用前景。但在处理过程中铁盐将回流至生物反应区,导致系统中碳磷比降低,同时也导致 GAOs 与 PAOs 在厌氧段产生竞争,削弱微生物系统除磷的作用。而侧流磷回收工艺可以利用增设的侧流操作单元将回流污泥进行发酵,生产 VFA,实现最大程度的厌氧释磷并进行磷资源的回收。但由于在侧流磷回收工艺中投加的 Fe^{3+} 会改变微生物群落结构,导致微生物群落的物种丰富

度和多样性下降。因此,在实际处理过程中所需的投药量仍然较大,要真正实现回收磷资源还有很大的研究空间。污水厂除磷效率低、资源浪费大的问题也没有从根本上得到解决。很多新问题需要进一步探索,因此,有以下几点建议:

1)污水中含有大量的微生物,包括细菌和微藻。近年来,*Acinetobacter*、*Cyanobacteria* 和铁还原菌的不同类型都被用于污水除磷,但由于磷矿物在自然环境和实际应用中发挥着许多积极作用,因此,还需要研究微生物与不同磷矿物的共生关系。

2)尽管侧流磷回收工艺是一种有效除磷和回收磷的方法,但目前其后端回收物鸟粪石和蓝铁矿等形成的影响因素,特别是结晶机理还不清楚。因此,在实际应用过程中可以进一步优化不同结晶产物分离纯化的操作条件,提高磷资源回收产率。

3)建立污水厂药剂投加动态预测模型,探讨在污水厂运行过程中动态负载条件下铁盐对系统除磷效率的控制,合理地预测和反馈污水处理系统中铁、磷浓度的动态变化,实现污水厂节能降耗技术措施“落地”。

参考文献:

- [1] CORDELL D, DRANGERT J O, WHITE S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought [J]. *Global Environmental Change*, 2009, 19 (2): 292-305.
- [2] CHEN Y J, HE H J, LIU H Y, et al. Effect of salinity on removal performance and activated sludge characteristics in sequencing batch reactors [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 249: 890-899.
- [3] WANG Y, TNG K H, WU H, et al. Removal of phosphorus from wastewaters using ferrous salts-A pilot scale membrane bioreactor study [J]. *Water Research*, 2014, 57: 140-150.
- [4] LI J Y. Effects of Fe(III) on floc characteristics of activated sludge [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2005, 80(3): 313-319.
- [5] ZHANG J, BLIGH M W, LIANG P, et al. Phosphorus removal by in situ generated Fe(II): Efficacy, kinetics and mechanism [J]. *Water Research*, 2018, 136: 120-130.
- [6] OLESZKIEWICZ J A, KRUK D, DEVLIN T, et al. Options for improved nutrient removal and recovery from municipal wastewater in the Canadian context [EB/OL]. 2015
- [7] LI R H, WANG X M, LI X Y. A membrane bioreactor with iron dosing and acidogenic co-fermentation for enhanced phosphorus removal and recovery in wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2018, 129: 402-412.
- [8] BARNARD J L, DUNLAP P, STEICHEN M. Rethinking the mechanisms of biological phosphorus removal [J]. *Water Environment Research*, 2017, 89 (11): 2043-2054.
- [9] 董建威,何强,司马卫平. 除磷剂对处理含盐废水污泥活性及絮体结构的影响[J]. *中国给水排水*, 2015, 31 (13): 1-3.
- DONG J W, HE Q, SIMA W P. Effect of phosphorus removing agents on sludge activity and floc structure in saline wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(13): 1-3. (in Chinese)
- [10] 吕秀彬,杨志宏,付佳,等. 铝盐化学除磷对 SBR 工艺生物脱氮除磷的影响[J]. *水处理技术*, 2016, 42(6): 59-63.
- LV X B, YANG Z H, FU J, et al. Study on the influence of aluminum salt flocculant on biological phosphorus and nitrogen removal of SBR [J]. *Technology of Water Treatment*, 2016, 42(6): 59-63. (in Chinese)
- [11] YU W Z, GREGORY J, CAMPOS L C, et al. Dependence of floc properties on coagulant type, dosing mode and nature of particles [J]. *Water Research*, 2015, 68: 119-126.
- [12] CHEN K Y, HSU L C, CHAN Y T, et al. Phosphate removal in relation to structural development of humic acid-iron coprecipitates [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 10363.
- [13] HAO X D, WEI J, VAN LOOSDRECHT M C M, et al. Analysing the mechanisms of sludge digestion enhanced by iron [J]. *Water Research*, 2017, 117: 58-67.
- [14] 李勇,彭贵龙,何强,等. 大型污水处理厂工艺改造与应用对比分析[J]. *给水排水*, 2015, 51(4): 26-29.
- LI Y, PENG G L, HE Q, et al. Comparison and analysis on the process upgrading and application of a large wastewater treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, 51(4): 26-29. (in Chinese)

- [15] CORNELL R M S U, SCHWERTMANN U. The iron oxides: Structure, properties, reactions, occurrences, and uses [M]. John Wiley & Sons, Hoboken, 2003.
- [16] 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(16): 9400-9414.
- [17] WANG X M, LIU F, TAN W F, et al. Characteristics of phosphate adsorption-desorption onto ferrihydrite [J]. *Soil Science*, 2013, 178(1): 1-11.
- [18] 胡知, 何强, 苏晓轩, 等. 深水湖泊龙景湖磷形态组成及周年变化规律[J]. *环境影响评价*, 2017, 39(4): 71-75.
HU Z, HE Q, SU X X, et al. Phosphorus speciation and annual variation pattern of deep-water Longjing lake [J]. *Environmental Impact Assessment*, 2017, 39(4): 71-75. (in Chinese)
- [19] SZABÓ A, TAKÁCS I, MURTHY S, et al. Significance of design and operational variables in chemical phosphorus removal [J]. *Water Environment Research*, 2008, 80(5): 407-416.
- [20] RASMUSSEN H, NIELSEN P H. Iron reduction in activated sludge measured with different extraction techniques [J]. *Water Research*, 1996, 30(3): 551-558.
- [21] HEIBERG L, KOCH C B, KJAERGAARD C, et al. Vivianite precipitation and phosphate sorption following iron reduction in anoxic soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(3): 938-949.
- [22] CHENG X, CHEN B, CUI Y X, et al. Iron (III) reduction-induced phosphate precipitation during anaerobic digestion of waste activated sludge [J]. *Separation and Purification Technology*, 2015, 143: 6-11.
- [23] WEBER K A, ACHENBACH L A, COATES J D. Microorganisms pumping iron: Anaerobic microbial iron oxidation and reduction [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2006, 4(10): 752-764.
- [24] POSTH N R, CANFIELD D E, KAPPLER A. Biogenic Fe(III) minerals: From formation to diagenesis and preservation in the rock record [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 135: 103-121.
- [25] AUGER C, HAN S, APPANNA V P, et al. Metabolic reengineering invoked by microbial systems to decontaminate aluminum: Implications for bioremediation technologies [J]. *Biotechnology Advances*, 2013, 31(2): 266-273.
- [26] MA B W, CHEN G X, HU C Z, et al. Speciation matching mechanisms between orthophosphate and aluminum species during advanced P removal process [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 1311-1319.
- [27] BUROW L C, MABBETT A N, MCEWAN A G, et al. Bioenergetic models for acetate and phosphate transport in bacteria important in enhanced biological phosphorus removal [J]. *Environmental Microbiology*, 2008, 10(1): 87-98.
- [28] ACEVEDO B, MURGUI M, BORRÁS L, et al. New insights in the metabolic behaviour of PAO under negligible poly-P reserves [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 311: 82-90.
- [29] WANG B G, JIAO E L, GUO Y, et al. Investigation of the polyphosphate-accumulating organism population in the full-scale simultaneous chemical phosphorus removal system [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(30): 37877-37886.
- [30] QIU G L, ZUNIGA-MONTANEZ R, LAW Y, et al. Polyphosphate-accumulating organisms in full-scale tropical wastewater treatment plants use diverse carbon sources [J]. *Water Research*, 2019, 149: 496-510.
- [31] MAO Y, GRAHAM D W, TAMAKI H, et al. Dominant and novel clades of *Candidatus Accumulibacter phosphatis* in 18 globally distributed full-scale wastewater treatment plants [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11857.
- [32] SALEHI S, CHENG K Y, HEITZ A, et al. Re-visiting the PhoStrip process to recover phosphorus from municipal wastewater [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 343: 390-398.
- [33] 牛学义. PhoStrip 侧流除磷工艺及其应用实例[J]. *给水排水*, 2002, 28(11): 8-12.
NIU X Y. Application of PhoStrip process for P removal [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2002, 28(11): 8-12. (in Chinese)
- [34] MIELCZAREK A T, NGUYEN H T T, NIELSEN J L, et al. Population dynamics of bacteria involved in enhanced biological phosphorus removal in Danish wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 2013, 47(4): 1529-1544.

- [35] 邱立平, 孙成江, 王嘉斌, 等. 反硝化除磷技术综述[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2015, 29(3): 161-166.
QIU L P, SUN C J, WANG J B, et al. Research advances of denitrifying phosphorous removal technology [J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2015, 29(3): 161-166. (in Chinese)
- [36] 郝晓地, 汪慧贞, Mark van Loosdrecht. 可持续除磷脱氮 BCFS 工艺[J]. 给水排水, 2002, 28(9): 7-10.
HAO X D, WANG H Z, VAN LOOSDRECHT M. Sustainable biological nutrient removal BCFS process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2002, 28(9): 7-10. (in Chinese)
- [37] 张千. 基于固相反硝化和吸附除磷的低碳源污水脱氮除磷技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
ZHANG Q. Study on the technology of simultaneous nitrogen and phosphorous removal based on solid-phase denitrification and phosphorous adsorption [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [38] 肖威中, Nate Cullen, 陈涛, 等. Durham 污水处理厂提标改造: 新增生污泥厌氧释磷和磷回收[J]. 净水技术, 2016, 35(6): 11-17.
XIAO W Z, CULLEN N, CHEN T, et al. Upgrading and reconstruction of Durham WWTP in application of newly constructed raw sludge anaerobic phosphorus release and phosphorus recovery process [J]. Water Purification Technology, 2016, 35(6): 11-17. (in Chinese)
- [39] ONNIS-HAYDEN A, SRINIVASAN V, TOOKER N B, et al. Survey of full-scale sidestream enhanced biological phosphorus removal (S2EBPR) systems and comparison with conventional EBPRs in North America: Process stability, kinetics, and microbial populations [J]. Water Environment Research, 2020, 92(3): 403-417.
- [40] 闵智, 甘民, 左宁, 等. SBR 侧流除磷工艺低成本化学除磷及磷回收潜能分析[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2011, 32(2): 154-158.
MIN Z, GAN M, ZUO N, et al. Analysis on potential of SBR side stream phosphorus removal process for chemical phosphorus removal and recovery with low cost [J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2011, 32(2): 154-158. (in Chinese)
- [41] LIU W T, NAKAMURA K, MATSUO T, et al. Internal energy-based competition between polyphosphate- and glycogen-accumulating bacteria in biological phosphorus removal reactors—Effect of PC feeding ratio [J]. Water Research, 1997, 31(6): 1430-1438.
- [42] STOKHOLM-BJERREGAARD M, MCILROY S J, NIERYCHLO M, et al. A critical assessment of the microorganisms proposed to be important to enhanced biological phosphorus removal in full-scale wastewater treatment systems [J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 718.
- [43] LI R H, LI B, LI X Y. An integrated membrane bioreactor system with iron-dosing and side-stream co-fermentation for enhanced nutrient removal and recovery: System performance and microbial community analysis [J]. Bioresource Technology, 2018, 260: 248-255.
- [44] SHEN P H, ZHANG J Y, ZHANG J, et al. Changes in microbial community structure in two anaerobic systems to treat bagasse spraying wastewater with and without addition of molasses alcohol wastewater [J]. Bioresource Technology, 2013, 131: 333-340.

(编辑 王秀玲)