

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.13.014

# 污泥生物淋滤过程中磷形态的分布及相间迁移转化

路 闯, 张 晶, 游宏坤, 李兆强, 迈 迪, 范晓军, 岳秀萍,  
端 允

(太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 晋中 030600)

**摘 要:** 利用SMT法分析了生物淋滤过程中剩余污泥固相、液相和胞外聚合物(EPS)中磷形态及分布。结果表明,采用生物淋滤法处理5 d后,可利用磷占比从29.0%上升至80.5%,液相总磷(TDP)含量比对照组提高了6.54 mg/g,生物有效磷(BAP)占固相总磷(TSP)的比例从28.6%上升至70.2%,释磷的同时提高了污泥的可生物利用性;正磷酸盐含量显著增加,占TDP的96.9%,有利于后期磷的回收利用。磷的迁移转化分为吸收和释放两个阶段,在吸收阶段,磷从液相和EPS中向固相迁移,优势形态从羟基磷灰石磷(AP)转化为有机磷(OP);在释放阶段,磷从固相向EPS和液相中迁移,其优势形态转化为正磷酸盐。最佳的释磷效果发生在没有调控酸碱度的对照组。Ca、Mg、Fe的测定结果表明,钙磷和铁磷是污泥液相磷的主要磷源。

**关键词:** 生物淋滤; 剩余污泥; 磷释放; 生物有效磷; 迁移转化

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)13-0086-07

## Phosphorus Form Distribution and Interphase Migration and Transformation during Sludge Bioleaching

LU Chuang, ZHANG Jing, YOU Hong-kun, LI Zhao-qiang, AHMADI Hikmatullah,  
FAN Xiao-jun, YUE Xiu-ping, DUAN Yun

(School of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong  
030600, China)

**Abstract:** The form and distribution of phosphorus in the solid phase, liquid phase, and extracellular polymeric substances (EPS) of excess sludge during bioleaching were analyzed using the SMT method. After 5 days of treatment using the bioleaching method, the proportion of available phosphorus increased from 29.0% to 80.5%. Additionally, the concentration of total dissolved phosphorus (TDP) in the liquid phase showed a significant increase of 6.54 mg/g compared to the control group. Furthermore, there was an observed increase in the proportion of bioavailable phosphorus (BAP) from 28.6% to 70.2%. Phosphorus release also improved the bioavailability of sludge. The concentration of orthophosphate experienced a significant increase, representing 96.9% of the TDP. This development was beneficial for the subsequent recovery and utilization of phosphorus. The process of phosphorus migration and transformation could be categorized into two distinct stages: absorption and release. During the stage of phosphorus absorption, there was a migration of phosphorus from the liquid phase and EPS to the solid

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52170045)

通信作者: 端允 E-mail: duanyun@tyut.edu.cn

phase. The dominant form also changed from apatite phosphorus (AP) to organic phosphorus (OP). In the stage of phosphorus release, there was a migration of phosphorus from the solid phase to EPS and the liquid phase, with its dominant form being transformed into orthophosphate. The most effective release of phosphorus was observed in the control group, where pH was not regulated. The analysis of Ca, Mg and Fe indicated that Ca-P and Fe-P were the primary sources of phosphorus in the liquid phase of sludge.

**Key words:** bioleaching; excess sludge; phosphorus release; bioavailable phosphorus; migration and transformation

磷属于沉积型循环物质,且循环周期较长,常出现局部性匮乏情况。在城市污水处理中,由于磷元素具有单向流动的特点,不能被分解消耗,大部分的磷只能以必要元素的形式储存在微生物中,最终以污泥的形式进行排放,这产生了大量富含磷的剩余污泥,造成了磷资源的流失<sup>[1]</sup>。目前用于提高剩余污泥释磷性能的方法主要有超声波法、焚烧法、微波辐射法、热水解等物理方法,高级氧化法和化学淋滤法等化学方法,好氧法和厌氧法等生物方法,以及多种方法的耦合<sup>[2-4]</sup>。生物法由于成本低廉、释磷效果明显等优点而受到广泛关注。

生物淋滤法是一种通过酸化作用提高污泥重金属溶出和脱水性能的好氧生物处理方法,具有处理成本低、酸化效果好和运行简单等优点。研究表明,污泥中起释磷作用的好氧微生物群体主要为硫杆菌,其在酸性条件下有着良好的活性<sup>[5]</sup>。Tavares Ferreira 等<sup>[6]</sup>发现,在酸性条件下钙磷、铝磷和铁磷可从沉淀转变为溶解态。接伟光等<sup>[7]</sup>发现,酸性环境有利于磷的释放。可见,生物淋滤法具有作为剩余污泥磷释放处理方法的潜力。

在目前的研究中,生物淋滤法多应用于污泥脱水和重金属溶出方面,尚未发现用于污泥中磷的释放。Gorazda 等<sup>[8]</sup>发现,剩余污泥中磷的释放程度受到污泥组成、磷形态等因素的影响。高湘等<sup>[9]</sup>通过对土壤以及湖泊、河流底泥中的磷形态和释放规律进行分析发现,影响无机磷释放的最主要因素是环境的酸碱度。因此,笔者以剩余污泥中磷为研究对象,探索生物淋滤过程中磷的迁移转化规律,以及能源底物、pH 和金属离子对磷迁移转化的影响,旨在为剩余污泥中磷的资源化利用提供理论支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

剩余污泥取自晋中市某污水处理厂(SBR 工艺)

的污泥浓缩池,过 18 目筛除去污泥中大颗粒杂质。微曝气保存污泥,防止污泥在厌氧条件下释放磷元素<sup>[10]</sup>。实验污泥的基本性质:pH 为 6~7,SVI 为 20.7~23.2 mL/g,MLSS 为 34.3~36.5 g/L,MLVSS 为 20.7~22.8 g/L,DOC 为 9~16 mg/L,TP 为 16~20 mg/g,液相总磷(TDP)为 0.5~0.6 mg/L,上清液中 Ca、Mg、Fe 分别为(28.0±3.7)、(8.1±0.3)、(482.0±20.3) mg/L。

### 1.2 实验方法

富集培养 3 次后的接种污泥与污泥样品,按照 1:9 的比例混合,投加硫粉和 FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 作为生物淋滤的能源底物,在 200 r/min、30 °C 的振荡器中培养 5 d。

生物淋滤释磷性能优化实验:分别改变两种能源底物的投加量,测定各组中液相总磷(TDP)和溶解性无机磷(DIP)的浓度变化,并设置对照组。

污泥中磷的迁移转化实验:取 20 mL 淋滤污泥在 3 000 r/min 的条件下离心 10 min,测定上清液中 TDP、DIP 及 Ca、Mg、Fe 的含量,所剩泥饼在 60 °C 下烘干 12 h 后,于 105 °C 下烘干 3 h;研磨,过 100 目筛,所得污泥样品干燥保存。测定污泥中各形态磷的浓度,设置未生物淋滤处理的混合污泥为对照组。

pH 对磷迁移转化影响实验:每 8 h 分别调节 pH 至 2、3、4、5、6、7,设置未调节 pH 的淋滤污泥为对照组,记录上清液和 EPS 中 TDP 和 DIP 的浓度变化。

### 1.3 分析项目及方法

剩余污泥中各形态磷的提取和测定分别采用欧洲标准测试测量组织提出的 SMT 法<sup>[11]</sup>及钼锑抗分光光度法。总磷(TP)主要包含两部分:TDP 和固相总磷(TSP)。TDP 又可分为 DIP 和溶解性有机磷(DOP)。固相磷则分为固相无机磷(SIP)和固相有机磷(SOP),其中无机磷(IP)又根据与磷酸根结合的金属离子不同,可分为非羟基磷灰石磷(NAIP)和

羟基磷灰石磷(AP)。SOP的浓度通过计算TSP和SIP的差值得求<sup>[12]</sup>。生物有效磷(BAP)为SOP与NAIP含量之和<sup>[13]</sup>。可利用磷为BAP与TDP含量之和。样品中磷分级提取的准确性通过SIP的回收率来验证<sup>[3]</sup>。胞外聚合物(EPS)被分为溶解层(SB-EPS)、松散层(LB-EPS)和紧密结合层(TB-EPS),采用热提取法提取<sup>[14]</sup>,其中SB-EPS中总磷的浓度即为TDP;Ca、Mg、Fe采用原子吸收法测定;DOC采用TOC-VCPH测定仪测得;MLSS、MLVSS采用重量法测定。

固相对LB-EPS、TB-EPS及TDP的磷释放贡献率( $P_{\text{release}}$ )按式(1)计算:

$$P_{\text{release}} = \frac{C_{P_{(\text{EPS})(N_t)}} - C_{P_{(\text{EPS})(N_0)}}}{C_{P_{(\text{EPS})(N_t)}} - C_{P_{(\text{EPS})(N_0)}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $C_{P_{(\text{EPS})(N_t)}}$ 为EPS某一层在某一时期磷的浓度,mg/L; $C_{P_{(\text{EPS})(N_0)}}$ 为EPS某一层在初始时期磷的浓度,mg/L; $C_{P_{(\text{EPS})(N_t)}}$ 为总EPS在某一时期磷的浓度,mg/L; $C_{P_{(\text{EPS})(N_0)}}$ 为总EPS在初始时期磷的浓度,mg/L。

LB-EPS和TB-EPS对TDP的 $P_{\text{release}}$ 按式(2)计算:

$$P_{\text{release}} = \frac{C_{P_{(\text{EPS})(N_t)}} - C_{P_{(\text{EPS})(N_0)}}}{C_{P_{\text{EPS}(\text{LB}+\text{TB})(N_t)}} - C_{P_{\text{EPS}(\text{LB}+\text{TB})(N_0)}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $C_{P_{(\text{EPS})(N_t)}}$ 及 $C_{P_{(\text{EPS})(N_0)}}$ 同式(1); $C_{P_{\text{EPS}(\text{LB}+\text{TB})(N_t)}}$ 为LB-EPS和TB-EPS在某一时期磷的总浓度; $C_{P_{\text{EPS}(\text{LB}+\text{TB})(N_0)}}$ 为LB-EPS和TB-EPS在初始时期磷的总浓度。

SIP的回收率按式(3)计算:

$$\text{SIP回收率} = \frac{C_{\text{NAIP}} + C_{\text{AP}}}{C_{\text{SIP}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $C_{\text{NAIP}}$ 为污泥固相中NAIP的浓度,mg/L; $C_{\text{AP}}$ 为污泥固相中AP的浓度,mg/L; $C_{\text{SIP}}$ 为污泥中SIP的浓度,mg/L。

## 2 结果与讨论

### 2.1 剩余污泥中磷的形态分析

实验开始前污泥中的磷形态分布见表1。可以看出,本次实验污泥性质相对稳定,TDP含量低,生物利用性差,属于较难资源化的污泥,其初始可利用磷含量仅占TP的28.5%。污泥中的磷几乎都存在于固相中,TSP占TP的99%以上。SIP占TSP的80.9%,是TSP的主要成分,其回收率为99.3%。而SIP的主体为性质稳定、不易被生物利用的AP,占

SIP的88.3%,与其他地区以NAIP为主体的城市污水处理厂污泥以及湖泊、河流和土壤等沉积物<sup>[15]</sup>中的存在较大差异。因此本实验选用此生物利用性较差的剩余污泥作为研究对象,探究其在生物淋滤法处理过程中实现磷资源化回收利用的可能性。

表1 剩余污泥磷形态分布

Tab.1 Phosphorus form distribution in excess sludge

形态	含量/(mg·g <sup>-1</sup> )	占比/%	说明
TP	18.19±1.78		占比TP
TSP	18.07±0.98	99.3	
TDP	0.12±0.01	0.7	
SIP	14.62±0.92	80.9	占比TSP
BAP	5.06±0.28	28.0	
SOP	3.45±0.06	19.1	
NAIP	1.61±0.22	8.9	
AP	12.91±0.60	88.3	占比SIP

### 2.2 能源底物的投加量对磷释放的影响

能源底物硫粉和FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O配比会影响微生物的生长活性,从而影响剩余污泥中磷的释放。考虑到经济因素,硫粉投加量选择在5g/L以内。图1为能源底物投加量对剩余污泥磷释放的影响。

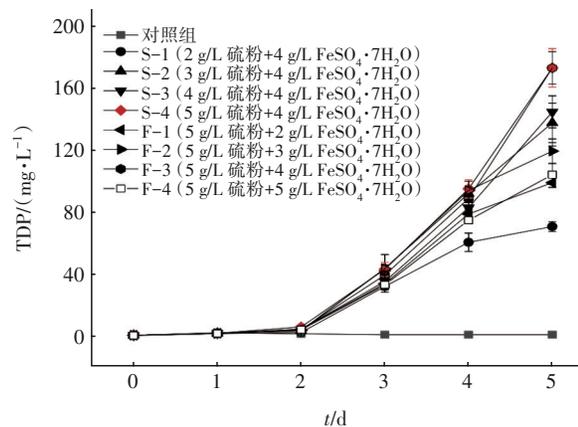


图1 能源底物投加量对剩余污泥磷释放的影响

Fig.1 Effect of energy substrate dosage on phosphorus release from excess sludge

由图1可以看出,与对照组相比,投加能源底物有明显的磷释放现象。实验组中TDP含量随时间的增加呈上升趋势。S-3组和S-4组的释磷速率持续升高,说明硫粉投加量在4~5g/L最有利于磷的释放。F-4组释磷效果并不理想,低于铁投加量更低的F-3组,这说明释磷过程中FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O的投加量不宜超过4g/L。淋滤过程结束后,S-4组的释磷效果最好,TDP含量达到173.57mg/L,比对照组高

172.35 mg/L。综上所述,选用释磷效果更好的S-4组作为能源底物投加配比。

## 2.3 生物淋滤过程中磷的迁移转化

### 2.3.1 生物淋滤过程中磷形态的转化

图2为生物淋滤过程中磷形态的迁移转化。

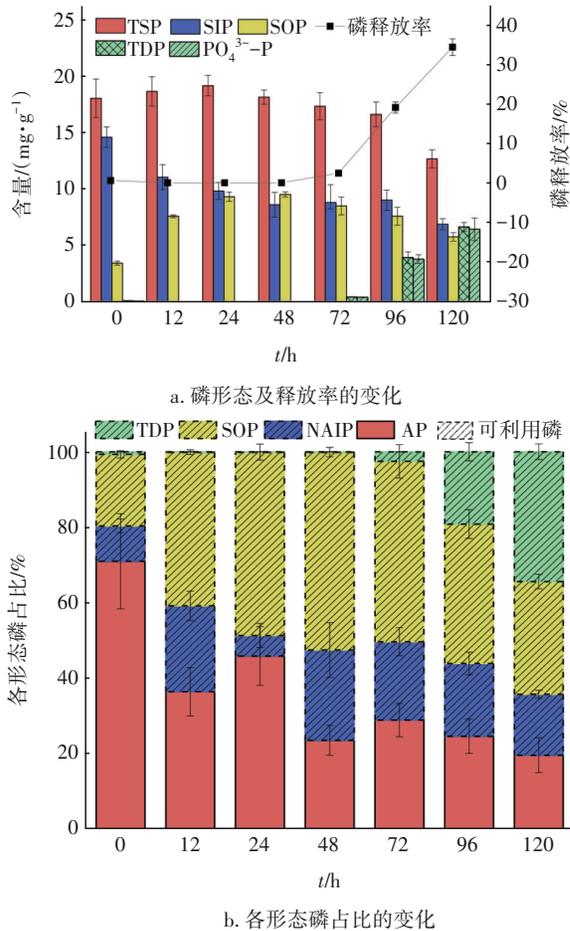


图2 生物淋滤过程中磷形态的迁移转化

Fig.2 Migration and transformation of phosphorus form during bioleaching

由图2(a)可知,固相磷含量变化呈现先基本不变后减少的趋势,液相磷的变化呈现先基本不变后增加的趋势。0~48 h,固、液相中磷的含量并没有明显变化,说明此时污泥中的磷还没有发生从固相到液相的迁移。48~120 h,固相中的磷开始向液相迁移,TSP含量从18.17 mg/g减少至12.69 mg/g,TDP含量从0.12 mg/g升高至6.66 mg/g,磷的释放率从0.7%提高至34.4%。

由图2(b)可知,生物淋滤法可以显著改善污泥磷的可利用性,经过5 d的处理,可利用磷从占比TP的29.0%上升至80.5%。值得注意的是,虽然在0~

48 h污泥中的磷并没有发生从固相到液相的迁移,但在固相中各形态磷占比发生了明显变化。污泥磷的固相主体逐渐从AP变为OP。SIP含量逐渐减少,从占比TSP的80.9%下降至47.4%;AP从占比TSP的71.4%下降至23.5%。而SOP含量逐渐增加,从占比TSP的19.1%上升至52.5%。这说明磷在固、液相间迁移转化之前,先在固相中发生了IP向OP的形态转化,可能是由于自养型微生物生命活动生成RNA、DNA、磷脂层、腐殖质、磷酸盐酯、磷酸糖等物质导致的<sup>[16]</sup>。该过程中,污泥固相中惰性组分AP的占比大幅减少,并且BAP从占比TSP的28.6%上升至70.2%,污泥生物可利用性提高。48~120 h,固相中的SOP、NAIP和AP含量都开始减少,而TDP含量升高,有机磷的磷释放贡献率最高。

整个生物淋滤过程中SIP含量由占TP的80.4%下降至35.7%,TDP含量占比由0.7%上升至34.4%,BAP含量占比由28.6%升高至70.2%,可利用磷含量由29.0%上升至80.5%,SIP回收率为98.6%~105.5%。因此,生物淋滤法可有效释放污泥中的磷,同时提高污泥的可生物利用性。处理后污泥中TDP的主要存在形态为正磷酸盐,占比96.9%,有利于后期形成正磷酸盐沉淀进行回收<sup>[4]</sup>。

### 2.3.2 生物淋滤过程中各相间磷的迁移

图3为生物淋滤过程中胞外聚合物中磷的迁移转化及贡献。由图3(a)并结合上述分析结果可知,生物淋滤释放污泥磷的过程可分为吸收和释放两个阶段。0~48 h为磷吸收阶段,TSP对EPS的LB、TB及SB中磷的贡献率为负,表明此时磷从液相向固相迁移;48~120 h为磷释放阶段,TSP对EPS的LB及SB中磷的贡献率为正,表明此时磷从固相向液相迁移。在磷释放阶段,TSP对EPS的LB和SB中磷的贡献率呈上升趋势,且以对TDP的贡献为主,其最高贡献率达90.0%;并且此时EPS的TB和LB对TDP的贡献率接近于0,说明此时EPS中的磷都已经释放到了液相中。综上所述,经过生物淋滤处理后,污泥EPS各层中的磷几乎都转移到了液相中。24~72 h,TB-EPS对TDP的贡献率为正,最高贡献率在48 h,为31.7%,这说明磷释放阶段最初始的供磷者是TB-EPS层。由图3(b)可知,该污泥EPS中磷主要存在于TB和SB中,分别占49.4%和38.1%。经过5 d的生物淋滤处理后,SB-EPS中磷成为了EPS中磷的主要成分,占比从38.1%升高到了

88.8%,说明生物淋滤可以有效地将EPS中的磷释放到液相中。因此,生物淋滤中磷吸收过程主要的供磷者为TB和SB中的磷,而磷释放过程主要的供磷者为TSP。

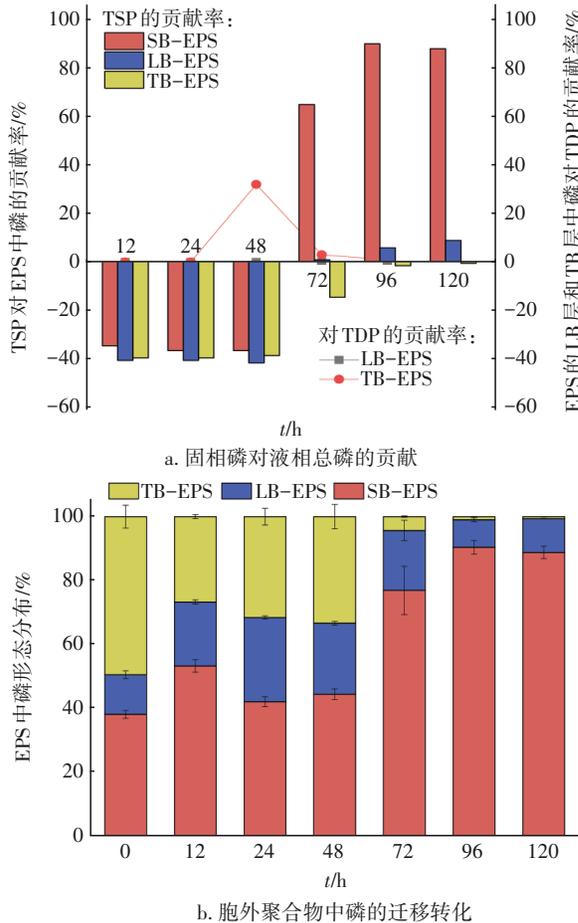


图3 生物淋滤过程中胞外聚合物内磷的迁移转化及贡献  
 Fig.3 Migration-transformation and contribution of phosphorus in EPS during bioleaching

### 2.4 pH对剩余污泥磷迁移转化的影响

根据2.1节,实验所用污泥中磷的主要存在形态为TSP,其迁移转化易受pH的影响<sup>[7]</sup>。图4为pH对生物淋滤过程中剩余污泥磷释放的影响。由图4可知,随着pH的下降,不调控pH的对照组TDP含量显著上升,并且随着时间的增加呈现先基本不变后上升的趋势,在120h达到最佳释磷量,TDP含量为146.17 mg/L,释磷率为29.5%。通过观察调控pH实验组的释磷情况发现,生物淋滤过程中随着时间的增加,pH的调节对磷的释放反而起到抑制作用。pH为2、3、4、5、6、7实验组在120h的释磷率分别为13.5%、2.2%、0.7%、0.6%、0.6%、0.7%,仅

有pH=2实验组有明显的释磷表现,然而其TDP含量随着时间的增加呈降低的趋势,在24h达到最佳释磷量,TDP含量为126.87 mg/L,达到了整个生物淋滤过程磷累积量的215.5%,这种前期释磷现象可能是因为调节pH的无机酸的酸化作用而非生物淋滤作用<sup>[17]</sup>;24~120h,pH=2实验组的TDP含量逐渐降低,在120h时仅为56.85 mg/L。结合2.3节对生物淋滤释磷规律的分析可推断,pH=2实验组的后期吸磷现象可能是由于剩余污泥在释磷前会先进行吸磷,而在120h仍没有进行到释磷阶段可能是由于恒定的pH=2环境抑制了硫杆菌的活性,不能促进该淋滤污泥磷的释放。

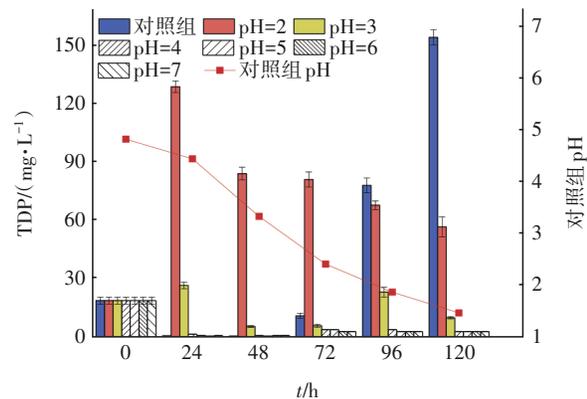


图4 pH对生物淋滤过程中剩余污泥磷释放的影响  
 Fig.4 Effect of pH on phosphorus release from excess sludge in bioleaching process

生物淋滤处理5d后,pH对生物淋滤过程中污泥磷形态的影响如图5所示。可知,pH为7.2及对照组的可利用磷占比要优于其他各组,且酸碱调控组(pH=7、pH=2)的可利用磷占比高于未经调控组的,TDP占比则相反。这说明在生物淋滤过程中相对于磷的释放,酸碱调控更有利于磷形态的转化;而未调控酸碱度的淋滤过程则更利于磷的释放。随着pH的降低SOP占比呈下降趋势,在pH=2的条件下,SOP仅占TP含量的12.0%;SIP的占比随着pH的降低呈上升趋势,当pH=2时,SIP占TP含量的74.5%,并且以NAIP为主,占TP含量的56.2%,这说明酸性条件可以促进OP向IP的转化。本实验在pH为3~7的条件下,TDP接近于0,几乎没有磷的释放,这与Latif等<sup>[15]</sup>的研究存在差异,可能是由于处于吸磷阶段。这说明生物淋滤中磷的释放受到酸化作用和生物作用的共同调节。在pH=7的条件下,SOP的含量超过其他组的1~4倍,可能是由于调

控 pH 所投加的 NaOH 所造成的<sup>[18]</sup>。SIP 回收率为 97.5%~104.9%。

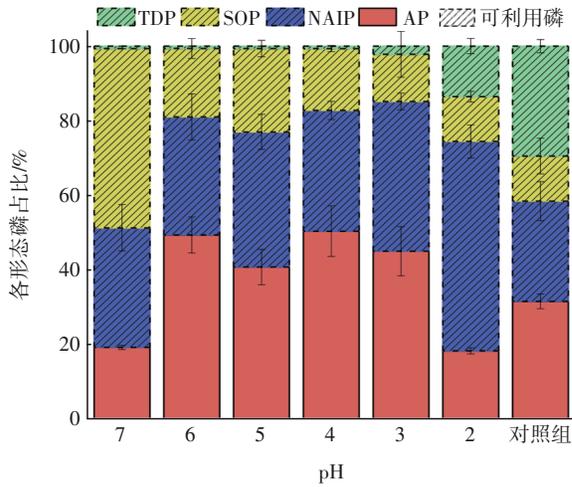


图5 恒定 pH 对生物淋滤过程中剩余污泥磷形态的影响  
Fig.5 Effect of constant pH on phosphorus form of excess sludge in bioleaching process

## 2.5 生物淋滤过程中金属离子的释放

磷溶解度的增加可能与钙磷、镁磷和铁磷等化合物在酸性条件下的溶解有关<sup>[14]</sup>,磷释放过程中金属离子的变化如图(6)所示。

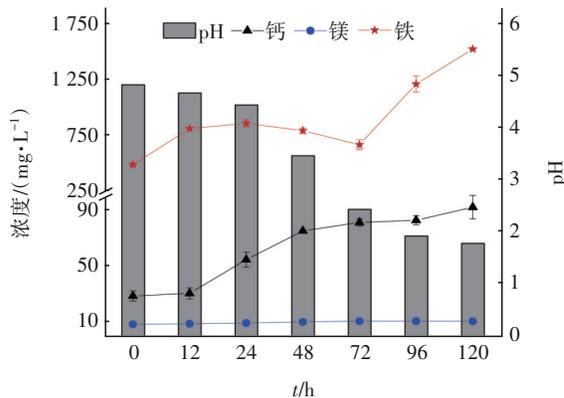


图6 生物淋滤过程中金属离子的释放  
Fig.6 Release of metal ions during bioleaching

由图6可知,液相中Ca和Fe的浓度随着时间的增加呈上升趋势,而Mg浓度的变化并不明显。0~120 h, Ca、Fe浓度分别从28.0和482.0 mg/L上升至90.5和1516.4 mg/L,这是由于酸性条件下污泥中的沉淀物发生了溶解,从而释放了固相中的金属和磷,这与Latif等<sup>[15]</sup>的研究结果一致。在生物淋滤过程中,固相中主要的供磷者为钙磷和铁磷,其浓度随着时间的增加呈上升趋势,而Mg浓度变化并不明显。因此,本实验污泥固相中的钙磷和铁磷是

液相磷的主要来源。

## 3 结论

① 经过5 d的生物淋滤处理,可利用磷从占比TP的29.0%上升至80.5%;BAP从占比TSP的28.6%升高至70.2%;TDP从占比TP的0.7%升高至34.4%。经过生物淋滤处理后,污泥的可利用性和释磷性能显著增强;处理后的液相磷形态几乎都为正磷酸盐,有利于后期磷的回收利用。

② 生物淋滤的磷迁移转化过程分为释磷和吸磷两个阶段。其优势形态从AP转变为OP再转变为正磷酸盐。吸磷阶段主要的供磷者为TB-EPS和SB-EPS中的磷,释磷阶段主要的供磷者为TSP。

③ 生物淋滤过程中,磷的释放受到酸化作用和生物作用的共同影响,并且在不调控酸碱度的环境下,更有利于磷的释放。

④ 钙磷和铁磷是生物淋滤过程中液相磷的主要磷源。

## 参考文献:

- [1] SARVAJAYAKESAVALU S, LU Y L, WITHERS P J A, *et al.* Phosphorus recovery: a need for an integrated approach [J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2018, 4(2): 48-57.
- [2] 阿姆纳. 污水处理厂含铝剩余污泥碱处理过程中磷的释放:分布和机理分析[D]. 北京:北京林业大学, 2019.  
AMNA Bashir. Phosphorus Release during Alkaline Treatment and Subsequent Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge from Wastewater Treatment Plants: Speciation and Mechanism Clarification [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019 (in Chinese).
- [3] 纪莎莎, 黄瑾. 污泥焚烧工程中的磷形态分布与磷迁移研究[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(5): 26-30.  
JI Shasha, HUANG Jin. Phosphorus forms distribution and migration in sludge incineration project [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(5): 26-30 (in Chinese).
- [4] 胡德秀, 张聪, 张艳. 超声强化污泥释磷及MAP法磷回收优化研究[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(15): 65-72.  
HU Dexiu, ZHANG Cong, ZHANG Yan. Phosphorus release from sludge enhanced by ultrasound and optimization of phosphorus recovery by magnesium ammonium phosphate method [J]. *China Water &*

- Wastewater, 2020, 36(15): 65-72 (in Chinese).
- [ 5 ] 白爽,郭丽娜,赵立新. 嗜酸性氧化亚铁硫杆菌对市政污泥脱水性能的影响[J]. 天津理工大学学报, 2019, 35(6): 61-64.  
BAI Shuang, GUO Lina, ZHAO Lixin. Effect of *Acidithiobacillus ferrooxidans* on the dewatering performance of municipal sludge[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2019, 35 (6) : 61-64 (in Chinese).
- [ 6 ] TAVARES FERREIRA T J, DE SOUSA ROLLEMBERG S L, DE BARROS A N, *et al.* Integrated review of resource recovery on aerobic granular sludge systems: possibilities and challenges for the application of the biorefinery concept[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 291: 112718.
- [ 7 ] 接伟光,彭轶,彭永臻,等. pH值对剩余污泥中氮、磷溶出及菌群组成的影响[J]. 中国给水排水, 2014, 30(17): 22-25,31.  
JIE Weiguang, PENG YI, PENG Yongzhen, *et al.* Impact of pH on dissolution of nitrogen and phosphorus and community composition of excess sludge[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30 (17) : 22-25, 31 (in Chinese).
- [ 8 ] GORAZDA K, WZOREK Z, TARKO B, *et al.* Phosphorus cycle: possibilities for its rebuilding [J]. Acta Biochimica Polonica, 2013, 60(4): 725-730.
- [ 9 ] 高湘,李妍,何怡. 湖泊底泥磷释放及磷形态变化[J]. 环境工程学报, 2015, 9(7): 3350-3354.  
GAO Xiang, LI Yan, HE Yi. Phosphorus release and phosphorus form change in lake sediments[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9 (7) : 3350-3354(in Chinese).
- [10] 陈树俊. 基于低温热处理技术的城市污泥磷回收[D]. 广州: 广东工业大学, 2017.  
CHEN Shujun. Phosphorus Recover from Sewage Sludge Based on Thermal Treatment [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2017 (in Chinese).
- [11] ZHU M Y, ZHU G W, LI W, *et al.* Estimation of the algal-available phosphorus pool in sediments of a large, shallow eutrophic lake (Taihu, China) using profiled SMT fractional analysis [J]. Environmental Pollution, 2013, 173: 216-223.
- [12] 俞振飞,王国祥,钱君龙,等. SMT法测定沉积物标准样品有机磷形态分析方法探究[J]. 中国环境监测, 2013, 29(3): 117-122.  
YU Zhenfei, WANG Guoxiang, QIAN Junlong, *et al.* A research of characterizing the organic phosphorus from standard sediment samples by SMT [J]. Environmental Monitoring in China, 2013, 29 (3) : 117-122 (in Chinese).
- [13] 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.
- [14] XIAO K K, CHEN Y, JIANG X, *et al.* Characterization of key organic compounds affecting sludge dewaterability during ultrasonication and acidification treatments [J]. Water Research, 2016, 105(1): 470-478.
- [15] 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.
- [16] RAVEN J A. The evolution of autotrophy in relation to phosphorus requirement [J]. Journal of Experimental Botany, 2013, 64(13): 4023-4046.
- [17] ZHANG C, TAN X J, YANG X, *et al.* Acid treatment enhances phosphorus release and recovery from waste activated sludge: performances and related mechanisms [J]. Science of the Total Environment, 2021, 763: 142947.
- [18] 贺张伟. 剩余污泥厌氧发酵产酸与磷释放的影响因素及机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
HE Zhangwei. Study on Influence Factors and Mechanisms of Short Chain Fatty Acids Production and Phosphorus Release during Waste Activated Sludge Anaerobic Fermentation Process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018(in Chinese).

作者简介:路闯(1995-),男,内蒙古通辽人,硕士,主要研究方向为固体废物处理与资源化。

E-mail: 15880049097@163.com

收稿日期:2022-02-22

修回日期:2022-03-24

(编辑:任莹莹)