

生物沥滤法对剩余污泥中重金属及养分含量的影响

向少云, 田永静, 夏晶, 黄天寅, 刘锋
(苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘要: 以城市剩余污泥为材料,通过对硫酸亚铁(FS)、硫酸亚铁铵(FAS)、单质硫(S^0)三种底物的单一和复合投加生物沥滤试验,研究不同类型底物对污泥中重金属及养分含量的影响。结果表明,底物为FAS + S^0 时污泥中重金属溶出效果最佳,此时对污泥中Cu、Zn、Cr和Ni的去除率分别可达86.7%、88.2%、76.2%和65.0%。沥滤结束时,FAS为底物的污泥中TN、TP含量最高,其次为FS, S^0 为底物时污泥中TN、TP含量最低,FS + S^0 和FAS + S^0 为底物时污泥中TN、TP的含量较单独投加 S^0 时有所提高但不明显,说明 S^0 是导致污泥中TN、TP流失的主要因素。

关键词: 生物沥滤; 剩余污泥; 底物; 重金属; 总氮; 总磷

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2018)01-0020-06

Influence of Bioleaching on Heavy Metals and Nutrient Content of Municipal Sewage Sludge

XIANG Shao-yun, TIAN Yong-jing, XIA Jing, HUANG Tian-yin, LIU Feng
(School of Environment Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The influence of different substrates in bioleaching on the heavy metals and nutrient content of municipal sewage sludge was discussed. Ferrous sulfate (FS), ammonium ferrous sulfate (FAS), and elemental sulfur (S^0) were chosen as single or composite substrates for bioleaching experiment. The results showed that the best substrate was FAS + S^0 ; the removal of Cu, Zn, Cr and Ni could reach 86.7%, 88.2%, 76.2% and 65.0%, respectively. Meanwhile, the loss of total nitrogen and phosphorous in the sludge with FAS was the lowest, followed by FS. S^0 was the predominant factor for the loss of nutrients in the sludge. Although addition of FAS and FS could weaken the effect of S^0 , the loss of total nitrogen and phosphorous was still great.

Key words: bioleaching; sewage sludge; substrate; heavy metal; total nitrogen; total phosphorus

城市污水处理厂在运行过程中,存在产生大量剩余污泥、污泥膨胀等现象。剩余污泥难降解、污染难以控制等缺点越来越引起人们重视。目前,污泥

的处理处置技术包括农用、填埋、焚烧和消化等。其中污泥农用是一种资源回用、环境友好的常用措施。污泥中的主要成分是有有机质,并含有丰富的N、P、

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478283); 苏州市水利科技项目(2015-7-3); 苏州科技大学资助项目(331731201); 苏州科技大学研究生科研与实践创新计划项目(SKCX17_018)

通信作者: 田永静 E-mail:2434509572@qq.com

K, 这些元素是农作物和植物生长所必需的营养元素, 因此污泥可以用来改善土壤理化性质, 提高土壤肥效^[1~3]。但污泥富集了污水中 50% ~ 80% 的重金属, 并且含有大量的细菌、病原微生物和寄生虫卵等^[4,5]。其中, 重金属具有较大毒性, 可以通过食物链传递和积累, 这严重限制了我国污泥农用的进程^[6,7]。近年来, 生物沥滤处理技术因重金属处理效率高、运行成本低、实用性强和基本无二次污染等优点, 在处理受重金属污染的污泥、土壤、底泥等方面得到了广泛研究^[8~10]。

生物沥滤是利用嗜酸性硫杆菌的生物氧化作用, 将污泥中的重金属溶出而进入液相, 再通过固液分离加以去除^[11,12]。已有研究证明, 各类型污泥中均存在嗜酸性硫杆菌, 通过添加底物后可促使污泥中固有嗜酸性硫杆菌繁殖生长并成为优势菌^[13,14]。研究表明, 底物的种类和数量都制约着污泥中嗜酸性硫杆菌的生长繁殖以及对重金属的去除效率^[12,15]。当利用 S^0 、 $FeSO_4$ 、 $Na_2S_2O_3$ 、 FeS 和 FeS_2 等不同含硫底物作为沥滤基质对污水处理厂剩余污泥进行驯化培养时, 在污泥 pH 值从初始值降到 3 以下或 ORP 值达到 500 mV 以上时, 即可得到以嗜酸性硫杆菌为优势菌的接种菌液^[15,16]。在生物沥滤中因污泥本身含有养分(N、P、K), 所以一般不需额外添加营养物质来协助嗜酸性硫杆菌的生长繁殖。但生物沥滤过程中产生的大量嗜酸性硫杆菌会严重损耗污泥中的养分, 这不利于污泥的土地利用。因此, 以硫酸亚铁铵(FAS)、硫酸亚铁(FS)、单质硫(S^0)的单一和组合作为生物沥滤的底物, 以 pH 值降到 3 以下或 ORP 值达到 500 mV 以上时的污泥(含水率为 97.75%)为驯化后的嗜酸性硫杆菌优势菌群接种液进行重金属沥滤试验, 研究不同的底物和投加方式对城市剩余污泥的 pH 值、ORP 以及重金属的影响, 在此基础上进一步讨论了其对污泥中 N、P 含量的影响, 以期在城市剩余污泥的无害化与资源化处理提供思路。

1 材料与方 法

1.1 供试污泥与试剂

供试污泥取自苏州市高新区某污水处理厂的浓缩污泥。污泥取回后, 于 4 °C 下冷藏, 在试验时取用。污泥的有机质含量为 51.78%, pH 值为 6.8, 含水率为 97.75%, 离心脱水率为 72.25%, 总氮为 30.13 g/kg, 总磷为 17.29 g/kg(均以干物质计),

Cu、Zn、Ni、Cr 等重金属含量分别为 690.25、6 074.19、83.25、355.90 mg/kg。

试验所用试剂包括: 硫酸亚铁、硫酸亚铁铵、 S^0 、硝酸、高氯酸和氢氟酸, 除消解所用酸为优级纯外其余试剂均为分析纯; 试验用水为去离子超纯水。

1.2 污泥沥滤试验设计

课题组前期试验表明, 当底物投加量为 10 g/L 时, 污泥酸化速率较快, 沥滤至第 4 天时 pH 值稳定在 2.0 左右。因此, 本试验采用底物投量为 10 g/L。

驯化阶段, 分别将等量的 300 mL 剩余污泥混合液加至 1# ~ 6# 锥形瓶(500 mL)中, 再依次投加浓度均为 10 g/L 的底物 FS、FAS、 S^0 、FS + S^0 、FAS + S^0 以及不投加(空白对照)。在 30 °C 和 180 r/min 条件下驯化培养, 当污泥 pH 值降到 3 以下或 ORP 值达到 500 mV 以上时, 得到以嗜酸性硫杆菌为优势菌的混合接种菌液^[15,16]。

沥滤阶段, 将驯化污泥按 10% 的体积比分别加入到已盛有 270 mL 剩余污泥混合液的锥形瓶(500 mL)中, 再依次投加浓度为 10 g/L 的上述底物, 并在同等条件下进行富集培养, 直至 pH 值降至 3 以下或 ORP 值达到 500 mV 以上, 重复以上步骤操作 3 次。对最后一次操作进行取样分析, 测定污泥 pH 值、ORP、上清液中重金属含量以及干污泥中重金属、总氮及总磷含量。试验过程中用去离子水补齐锥形瓶内散失的水分。每组试验均设置 3 个平行, 取平均值进行分析。

1.3 分析方法

上清液的 pH 值采用 Thermo Orin A121 精密 pH 计测定, ORP 采用便携式 ORP57 测试笔测定, 重金属含量采用火焰原子吸收分光光度计测定; 污泥的全氮含量采用碱性过硫酸钾消解 - 紫外分光光度法测定, 全磷含量采用钼锑抗分光光度法测定; 污泥采用 HNO_3 、 $HClO_4$ 、HF 三酸消解后, 采用 ICP - OES 测定消解液中的 Cu、Zn、Cr、Ni 含量。

2 结果与讨论

2.1 污泥 pH 值和 ORP 随沥滤时间的变化

在生物沥滤过程中, 污泥体系的 pH 值下降速率和 ORP 上升速率, 是表征微生物增长和沥滤效果的重要指标。在沥滤的前 4 d, 各组污泥体系的 pH 值下降较为明显, 且下降速率顺序为: FS + S^0 > FAS + S^0 > S^0 > FS > FAS > 空白(见图 1)。其中 FS 与 S^0 或 FAS 与 S^0 共同作为底物时更能加速污泥 pH

值的下降,这表明复合底物之间存在协同作用。张军等^[15]将单质硫与 FeSO₄、Na₂S₂O₃、FeS₂、FeS 四种底物分别复合使用时,也有相似的污泥 pH 值变化规律。FS、FAS 和 S⁰ 作为底物使得污泥的 pH 值下降,是由于嗜酸性硫杆菌的生物氧化作用将 Fe²⁺、S⁰ 分别转化成 Fe³⁺ 和硫酸,以及 Fe³⁺ 的水解作用或是生成了黄铁矾^[17,18]。沥滤 12 d 时,FS + S⁰、FAS + S⁰、S⁰、FS 和 FAS 五个试验组的 pH 值最终分别达到 1.34、1.58、1.80、2.41 和 2.52。

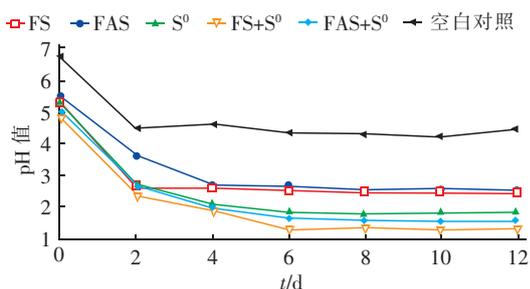


图 1 各试验组 pH 值变化

Fig. 1 Change of pH value in experimental groups

在沥滤过程中,ORP 呈现先急剧上升后缓慢上升的趋势。在前 4 d 各污泥体系的 ORP 上升较快,其上升速率顺序是: FS + S⁰ > FAS + S⁰ > S⁰ > FS > FAS > 空白,这与 pH 值的变化趋势正好相反(见图 2)。沥滤到第 4 天,FS + S⁰ 作底物的 ORP 值是对照组的近两倍。可见,投加复合底物可有效促进污泥 ORP 的上升。沥滤 12 d 后,FS + S⁰、FAS + S⁰、S⁰、FS 和 FAS 五个试验组的 ORP 达到最高,分别为 689、652、610、573 和 536 mV。沥滤过程中 ORP 增加,是由于不断振荡充氧导致还原性物质被化学氧化或是因为嗜酸性硫杆菌的生物氧化作用^[19]。

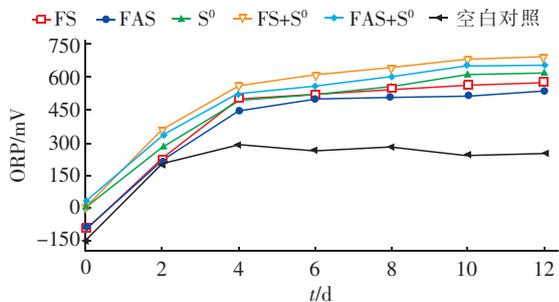


图 2 各试验组 ORP 值变化

Fig. 2 Change of ORP value in experimental groups

2.2 污泥中 Cu、Zn、Cr、Ni 的沥滤效果

图 3 为各试验组随着沥滤时间延长污泥中 Cu、

Zn、Cr、Ni 的溶出情况。相对于空白对照组,各试验组污泥中 Cu、Zn、Cr 和 Ni 的溶出率均稳步上升,沥滤 12 d 后,各试验组的 Cu、Zn、Cr、Ni 平均溶出率分别达到了 80%、82%、68% 和 57%。在空白对照组中,4 种重金属的最大溶出率均低于 20%。

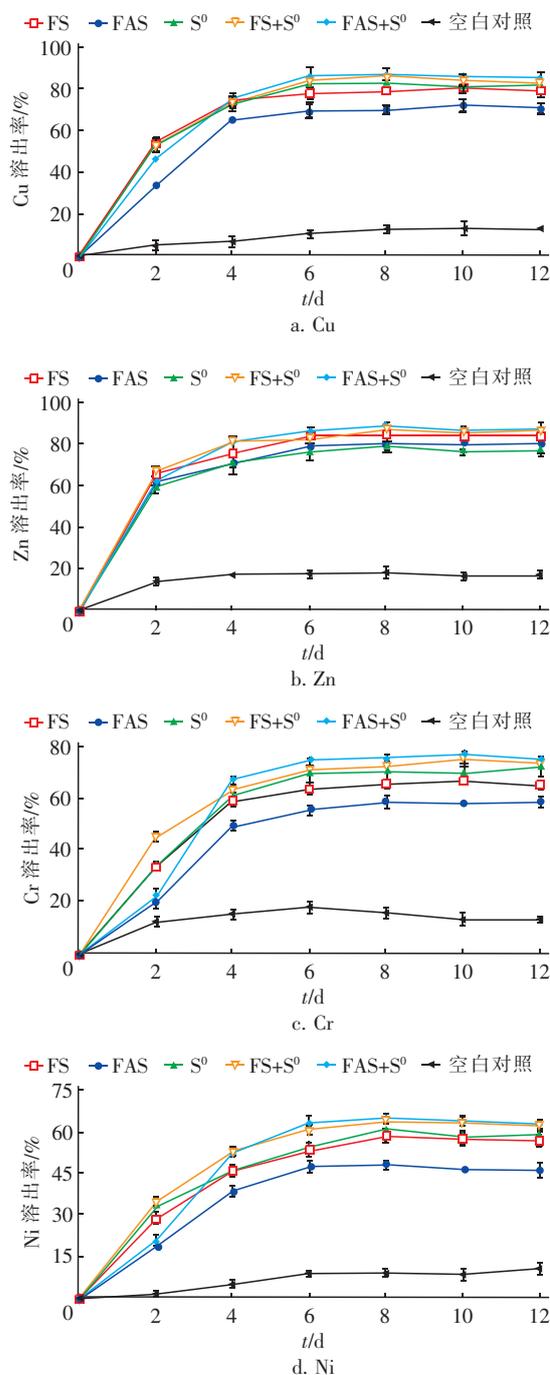


图 3 各试验组的重金属溶出率

Fig. 3 Solubilization of Cu、Zn、Cr and Ni in experimental groups

由图 3(a) 可见,在沥滤的前 4 d,各试验组的

Cu 溶出速率较快,到第 6 天开始变缓,而后趋于稳定。这种变化趋势与污泥 pH 值和 ORP 的变化相同,说明污泥中 Cu 的溶出受到污泥 pH 值和 ORP 的影响较大。以 FS 和 S^0 或是 FAS 和 S^0 共同作为底物时 Cu 的溶出效果较单独投加 FS 和 FAS 的试验组要好,也好于单独投加 S^0 的。在投加单一底物时,污泥中 Cu 的溶出率排序是: $S^0 > FS > FAS$,其最高溶出率分别达到 82.3%、80.0%、71.8%。 S^0 作为底物更有利于 Cu 的溶出,同时说明 Cu 的溶出受到污泥系统酸化程度的影响较大。在投加复合底物时,FAS + S^0 组对污泥中 Cu 的沥滤效果好于 FS + S^0 组,其最高溶出率分别达到 86.7% 和 85.8%,这可能是由于 FS 与 S^0 共同作为底物时,污泥的 pH 值降到 1.5 以下,对嗜酸性硫杆菌的繁殖产生一定的危害,从而影响到其沥滤效果^[9]。从沥滤第 10 天开始各组的溶出率都有下降的趋势,这是由于污泥中的有机物对 Cu 具有较强的亲和力,已溶解到液相中的 Cu 再一次被污泥吸附或是与污泥中的有机物发生了络合作用^[9,20]。

由图 3(b)可知,污泥中 Zn 的溶出率与其他三种金属有明显差异,即在第 2 天各试验组 Zn 的溶出率就达到 60% 左右,而 Cu、Cr 和 Ni 的溶出率在第 4 天才分别达到 70%、61% 和 48% 左右。这表明在生物沥滤过程中,Zn 的溶出要早于其他三种金属,其原因可能是 Zn 的溶出对酸度的要求低于其他三种金属。石超宏在研究生物沥浸去除污泥中重金属及改善脱水性能时也发现了类似的现象^[21]。至第 8 天各试验组 Zn 的溶出率达到最高峰,溶出率由大到小依次是 FAS + S^0 、FS + S^0 、FS、FAS、 S^0 ,分别为 88.2%、86.4%、83.9%、79.8%、78.2%。FS + S^0 组的溶出率低于 FAS + S^0 组,是由于污泥体系的 pH 值低于嗜酸性硫杆菌生长繁殖的阈值,造成其溶出率降低。此后各试验组的溶出率与 Cu 的溶出率变化趋势相同,都呈下降的趋势,是由于污泥中的有机物与可溶性 Zn 的络合和再吸附造成的。总体来看,各试验组 Zn 的溶出率相差不大,投加复合底物要稍好于投加单一底物。

从图 3(c)可知,沥滤至第 2 天,各试验组 Cr 的溶出率均较低,投加 FS、FAS、 S^0 、FAS + S^0 作为底物的溶出率分别为 33.1%、19.3%、33.9%、22.3%。沥滤第 4 天随着污泥体系 pH 值的下降和 ORP 的提高,各试验组的 Cr 溶出率快速增加,其中投加 FAS

+ S^0 为底物的溶出率增加最明显:沥滤第 2 天,Cr 的溶出率为 22.3%,污泥的 pH 值为 2.7,ORP 为 335 mV;沥滤第 4 天,Cr 的溶出率达到 66.6%,此时污泥的 pH 值为 1.9,ORP 为 520 mV。这说明 Cr 的溶出率明显受 pH 值和 ORP 的影响,并且 Cr 的溶出对污泥体系的 pH 值要求较高。总体来看 Cr 的溶出规律与 Cu 的类似,各试验组 Cr 的溶出率由大到小依次是 FAS + S^0 、FS + S^0 、 S^0 、FS、FAS,其最高溶出率分别为 76.2%、74.9%、69.6%、66.1%、58.2%。

从图 3(d)可知,沥滤第 2 天,各试验组 Ni 的溶出率较低,投加 FAS、FS、 S^0 、FS + S^0 、FAS + S^0 作为底物的各试验组的溶出率分别为 18.5%、28.4%、32.7%、34.4%、20.5%。而后随着沥滤时间的增加各试验组的溶出率稳步提升。在沥滤的第 8 天,各试验组 Ni 的溶出率达到最大值,分别为 48.0%、58.4%、60.7%、63.6%、65.0%。总体来说投加复合底物的溶出率要好于其他试验组,同样是由于复合底物之间存在协同作用,使得污泥体系产酸量更大,ORP 值更高,促进了 Ni 的快速溶出。并且在沥滤第 10 天开始也出现了可溶性 Ni 与污泥中的有机物络合和再吸附现象。

表 1 为生物沥滤前后污泥中 Cu、Zn、Cr 和 Ni 含量的变化情况,沥滤开始前各组污泥中 Cu 和 Zn 含量较高,均超过我国农用污泥中重金属最低标准值,Cr 含量也超过了酸性土壤要求的限值,Ni 虽没超标,但也能检测到它的存在,且接近酸性土壤要求的限值^[22]。

表 1 各试验组沥滤过程中污泥重金属含量变化

Tab.1 Change of heavy metal content in bioleaching groups

项 目	重金属含量/(mg · kg ⁻¹)				
	Cu	Zn	Cr	Ni	
1 [#]	沥滤前	540.85	5 685.74	307.15	82.16
	沥滤后	115.74	935.83	109.02	35.32
2 [#]	沥滤前	534.71	5 653.73	300.23	90.41
	沥滤后	158.27	1 152.01	125.52	48.75
3 [#]	沥滤前	518.44	5 203.97	299.45	76.91
	沥滤后	97.46	1 210.12	85.98	31.84
4 [#]	沥滤前	503.4	5 223.67	284.76	83.43
	沥滤后	88.60	733.41	77.26	31.62
5 [#]	沥滤前	517.32	5 375.83	275.04	76.89
	沥滤后	78.61	720.37	69.05	28.72

经 12 d 沥滤后,各组污泥中 Cu、Cr 和 Ni 的含量均低于标准中酸性土壤(pH 值 < 6.5)农用标准,投加复合底物和 S^0 的 Zn 含量低于碱性土壤(pH 值

≥6.5)农用标准值。其中,FAS + S⁰ 作为底物的生物沥滤效果最好,沥滤结束时污泥中 Cu、Zn、Cr、Ni 含量分别为 78.61、720.37、69.05、28.72 mg/kg。

2.3 沥滤前后污泥中N、P含量的变化

污泥经过较长时间的生物沥滤后,在高强度的酸化和较高的氧化还原电位条件下,污泥中 TN、TP 流失过大,这不利于污泥的土地利用。图4显示的是生物沥滤前后污泥中 TN、TP 的变化情况,各组在沥滤后污泥中总氮、总磷含量均有所下降。1[#] ~ 5[#] 投加的底物分别为 FS、FAS、S⁰、FS + S⁰、FAS + S⁰, 沥滤 12 d 后各组污泥中总氮含量的下降率分别为 39.1%、28.8%、42.7%、42.3%、40.0%, 总磷含量的下降率分别为 26.2%、15.4%、42.2%、39.7%、28.4%。

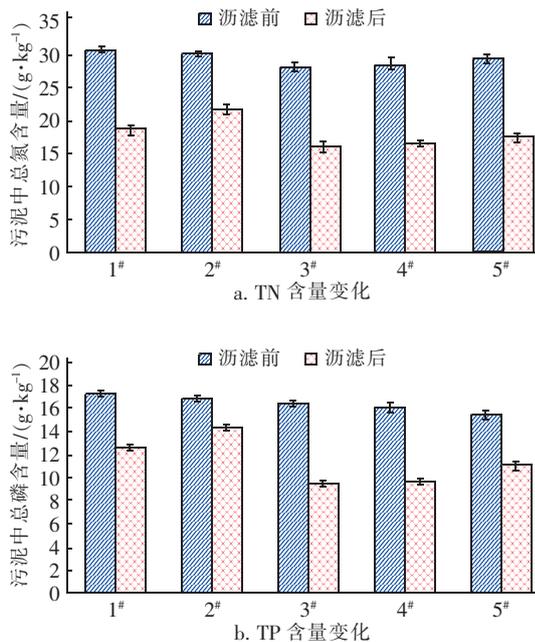


图4 各试验组沥滤过程中污泥总氮、总磷含量变化

Fig.4 Change of nitrogen and phosphorus content in bioleaching groups

当投加单一底物时,以 S⁰ 为底物的试验组经沥滤后污泥中 TN、TP 含量最低,分别为 15.78、9.53 g/kg;以 FS 为底物的试验组 TN、TP 的含量相对较高,以 FAS 为底物的试验组 TN、TP 的含量最高。这是由于硫酸亚铁和硫酸亚铁铵作为底物时,提供了氧化亚铁硫杆菌(*Thiobacillus ferrooxidans*, *T. f*) 生长所需的 Fe²⁺,促进了氧化亚铁硫杆菌的增殖,并且硫酸亚铁铵还为微生物提供了 N 营养源。当投加复合底物时,FS + S⁰ 和 FAS + S⁰ 作为底物的 TN、TP

含量较单独投加 S⁰ 时有所提高但不明显。FS + S⁰ 作为底物时污泥中 TN、TP 的下降率仅比 S⁰ 的低 0.4%、2.5%;FAS + S⁰ 比 S⁰ 低 2.7%、13.8%。这说明投加复合底物时 S⁰ 对污泥中 TN、TP 的流失占主导作用。这是由于投加 S⁰ 的试验组的 pH 值较未投加 S⁰ 的下降快,均在 2 以下,较低的 pH 值能够让与污泥络合的一部分有机物溶解,并使得污泥中微生物蛋白质遭到破坏,污泥养分含量降低^[23,24]。

3 结论

① 在生物沥滤过程中,各组污泥 pH 值都呈现下降趋势。FS 与 S⁰ 或 FAS 与 S⁰ 配合作为嗜酸性硫杆菌底物时更能加速污泥体系的酸化和 ORP 升高。

② 不同底物对污泥中 Cu、Cr、Ni 溶出效果排序为:FAS + S⁰ > FS + S⁰ > S⁰ > FS > FAS;对污泥中 Zn 的溶出效果排序为:FAS + S⁰ > FS + S⁰ > FS > FAS > S⁰。FAS + S⁰ 对污泥中重金属的溶出效果最佳,此时对 Cu、Zn、Cr 和 Ni 的去除率分别可达 86.7%、88.2%、76.2% 和 65.0%。

③ 各试验组经 12 d 沥滤后污泥中总氮、总磷含量排序为:S⁰ < FS + S⁰ < FAS + S⁰ < FS < FAS,底物 S⁰ 对污泥中 TN、TP 的流失影响较大。

④ 从重金属溶出效果和对污泥养分损耗影响两方面考虑推荐采用 FAS + S⁰ 作为底物进行生物沥滤。

参考文献:

- [1] 黄明,何强,张学洪,等. SBR 工艺去除城市污泥中重金属的研究[J]. 中国给水排水,2006,22(13):90-93.
- [2] 王晓利,曾正中,王厚成,等. 污泥处理处置及资源化方法探讨[J]. 环境工程,2014,32(3):150-154.
- [3] 黄明,孙兴福,许立巍. 生物沥滤去除城市污泥中重金属的温度控制研究[J]. 中国给水排水,2011,27(7):18-21.
- [4] 闫志成,许国仁,李建政. 污泥热解工艺的连续式生产性研究[J]. 中国给水排水,2017,33(13):16-20.
- [5] 郑冠宇,王世梅,周立祥. 污泥生物沥滤处理对病原物的杀灭效果影响[J]. 环境科学,2007,28(7):1539-1542.
- [6] 张玮,傅大放. 不同污泥处置方法中重金属的迁移规律[J]. 中国给水排水,2007,23(12):22-25.
- [7] 李桃,周俊,李伟,等. 生物沥滤对自然干化污泥重金

- 属去除效果研究[J]. 环境科学学报,2016,32(2):569-575.
- [8] Fontmorin J M, Sillanpää M. Bioleaching and combined bioleaching/Fenton-like processes for the treatment of urban anaerobically digested sludge: Removal of heavy metals and improvement of the sludge dewaterability [J]. Sep Purif Technol, 2015, 156:655-664.
- [9] 赵一德,张鹏,吴志超. 生物浸沥去除污泥中的重金属[J]. 环境工程,2002,20(1):47-50.
- [10] Babel S, Del Mundo Dacera D. Heavy metal removal from contaminated sludge for land application: A review [J]. Waste Manage, 2006, 26(9):988-1004.
- [11] 周顺桂,周立祥,黄焕忠. 生物淋滤技术在去除污泥中重金属的应用[J]. 生态学报,2002,22(1):125-133.
- [12] Lombardi A T, Garcia O. An evaluation into the potential of biological processing for the removal of metals from sewage sludges [J]. Crit Rev Microbiol, 1999, 25(4):275-288.
- [13] Chen Y, Hua Y, Zhang S, et al. Transformation of heavy metal forms during sewage sludge bioleaching [J]. J Hazard Mater, 2005, 123(1/3):196-202.
- [14] Tyagi R D, Tran F T. Bacterial leaching of metals from sewage sludge by indigenous iron-oxidizing bacteria [J]. Environ Pollut, 1993, 82(1):9-12.
- [15] 张军,徐浚洋,王敦球,等. 含硫底物种类与浓度对污泥重金属生物沥滤的影响[J]. 环境工程,2015,33(4):39-43.
- [16] Chen Y X, Hua Y M, Zhang S H. Effect of substrate concentration on the bioleaching of heavy metals from sewage sludge [J]. J Environ Sci, 2004, 16(5):788-792.
- [17] 朱海凤,周立祥,王电站. 生物沥滤的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响[J]. 环境科学,2012,33(3):916-921.
- [18] 周立祥,周顺桂,王世梅,等. 制革污泥中铬的生物脱除及其对污泥的调理作用[J]. 环境科学学报,2004,24(6):1014-1020.
- [19] 周顺桂,周立祥,方迪,等. 黄铁矿与硫粉配合提高污泥重金属的淋滤效果[J]. 中国环境科学,2004,24(1):110-114.
- [20] Xiang L, Chan L C, Wong J W. Removal of heavy metals from anaerobically digested sewage sludge by isolated indigenous iron-oxidizing bacteria [J]. Chemosphere, 2000, 41(1/2):283-287.
- [21] 石超宏,朱能武,吴平霄,等. 生物沥浸去除污泥重金属及改善脱水性能研究[J]. 中国环境科学,2013,33(3):474-479.
- [22] GB 4284—84, 农用污泥中污染物控制标准[S]. 北京:中国标准出版社,1984.
- [23] 李音,曾光明,张盼月,等. 底物对浓缩污泥中重金属生物淋滤的影响[J]. 环境科学与技术,2006,29(5):1-3.
- [24] Wong J W C, Xiang L, Chan L C. pH requirement for the bioleaching of heavy metals from anaerobically digested wastewater sludge [J]. Water Air Soil Pollut, 2002, 138:25-35.



作者简介:向少云(1992-),女,安徽巢湖人,硕士研究生,从事污水处理与回用技术研究。

E-mail:767825236@qq.com

收稿日期:2017-11-02