

城市污泥深度脱水调理药剂的筛选与优化研究

刘力荣^{1,2} 罗衍强^{1,2} 彭丽思^{1,2} 龚丽芳^{1,2} 马迎辉^{1,2} 叶挺进³ 陈繁忠¹ 李刚⁴

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 佛山市水业集团公司, 广东 佛山 528000; 4. 贵州同净环保科技有限公司, 贵阳 550081)

摘要:以佛山市镇安污水厂污泥为对象,以污泥沉降比、污泥比阻(SRF)、毛细吸水时间(CST)、泥饼含水率和脱水率为指标,研究比较了添加单一絮凝剂、有机-无机复合絮凝剂对污泥脱水性能的影响,探讨了助凝剂对污泥脱水的影响。结果表明:1)单一絮凝剂作污泥调理剂时,以阳离子聚丙烯酰胺(PAM)脱水效果最好,其最佳投加量为30~60 mg/L。有机-无机絮凝剂复合作污泥调理剂,比之单一絮凝剂,污泥脱水效果有明显改善。2)添加石灰、粉煤灰等助凝剂,可显著提高污泥脱水效果,并能大幅降低絮凝剂添加量。在实验范围内,阳离子PAM 9 mg/L、粉煤灰 30 g/L、生石灰 30 g/L为最佳污泥调理药剂组合。

关键词:城市污泥脱水;沉降性能;污泥比阻;毛细吸水时间;污泥含水率

STUDY ON SCREENING AND OPTIMIZATION OF MUNICIPAL SLUDGE DEEP DEWATERING CONDITIONERS

Liu Lirong^{1,2} Luo Yanqiang^{1,2} Peng Lisi^{1,2} Gong Lifang^{1,2} Ma Yinghui^{1,2} Ye Tingjin³ Chen Fanzhong¹ Li Gang⁴

(1. Guangzhou institute of geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Foshan Water Group, Foshan 528000, China;

4. Guizhou Same Net Environmental Protection Technology Company Limited, Guiyang 550081, China)

Abstract: Taking the sludge of Foshan Zheng'an sewage treatment plant as research object, and using sludge settling performance, specific resistance to filtration(SRF), capillary suction time(CST); water content of sludge cake and dehydration rate as indexes, it was investigated the different influence between adding single flocculant and organic-inorganic compound flocculant, to discussed the influence of coagulant-aid, such as quicklime and fly ash on sludge dehydration. The results shows: 1) Under single flocculant condition, the cationic polyacrylamide(PAM)' dewatering effect is the best, the best additive quantity is 30~60 mg/L. Under organic-inorganic compound flocculant condition, sludge dewatering performance shows obvious improvement compared with single flocculant condition. 2) Under flocculant plus coagulant-aid condition, sludge dewatering performance shows obvious improvement and less flocculant additive amount compared with organic-inorganic compound flocculant condition. Within the scope of experiment, the best sludge conditioner combination is 9 mg/L cationic polyacrylamide(PAM), 30 g/L quicklime, 30 g/L fly ash.

Keywords: dehydration of urban sludge; sludge settling performance; specific resistance to filtration(SRF); capillary suction time(CST); water content of sludge cake

0 引言

城市污水厂污泥产生量大、含水率高且含有大量的有机物、重金属、致病菌等^[1]。污泥脱水处理是后续处置(填埋或焚烧)的必要环节。目前提高污泥脱水效果的手段主要有通过化学方法、物理方法、生物方法进行调理,配合采用先进脱水设备脱水^[2]。相比于物理法、生物法,化学调理简单易行。污泥化学调理以往已有许多研究与实践,如鹿雯^[3]、黄志斌^[4]等人通过投加化学药剂改善污泥脱水性能,表

明无机絮凝剂存在絮凝效果差、投加大等缺点;有机絮凝剂存在具有一定生物毒性,难以生物降解等缺点。余志荣^[5]、杨斌^[6]等利用粉煤灰和生石灰在污泥中形成坚硬的网络骨架的性质^[7],提高污泥的脱水性能,但这些材料单独使用容易造成投加大、泥饼增容等问题。因此研究优化絮凝剂与生石灰、粉煤灰等助凝剂的联合应用,寻找高效的污泥脱水药剂组合,对提高城市污泥脱水效果,改进污泥脱水工艺具有重要意义。

本文以污泥沉降性能、污泥比阻 (specific resistance to filtration, 简称 SRF)、毛细吸水时间 (capillary suction time, 简称 CST)、泥饼含水率、脱水率为污泥脱水性能评价指标, 研究了单一絮凝剂、复合絮凝剂作污泥调理剂时污泥脱水效果, 以及石灰、粉煤灰等助凝剂在污泥脱水中的作用, 对絮凝剂、助凝剂的添加量、配比对污泥脱水效果的影响规律做了较系统

分析, 旨在优化污泥脱水调理药剂, 提高污泥脱水效果。

1 实验部分

1.1 实验材料

实验所用污泥取自佛山市镇安污水处理厂污泥浓缩池, 采样后储存于 4°C 的冰柜中。原始污泥的特性如表 1 所示。

表 1 污泥特性

pH	含水率/%	黏度/(Pa·s)	滤液密度/(g·mL ⁻¹)	COD/(g·L ⁻¹)	SS/(g·L ⁻¹)
7.91	99.59	0.921 × 10 ⁻³	0.97	10.31	16.5
VSS/(g·L ⁻¹)	有机物含量/(g·g ⁻¹ ·DS ⁻¹)	比阻/(cm·g ⁻¹)	CST/s	MLSS/(g·L ⁻¹)	SVI
7.261	0.316	1.46 × 10 ¹²	29.2	19.9	41.21

絮凝剂分为有机和无机两类:

1) 有机絮凝剂: 阳离子聚丙烯酰胺 (简称阳离子 PAM)、阴离子 PAM、非离子 PAM (沁阳市乐邦水处理材料有限公司)。

2) 无机絮凝剂: 聚合氯化铝 (Polyaluminium Chloride, 简称 PAC)、碱式氯化铝 (Basic Aluminium Chloride, 简称 BAC)、三氯化铁 (巩义市源州净化滤料有限公司)。

助凝剂为生石灰、粉煤灰。

1.2 实验方法

1.2.1 污泥沉降实验

将污泥 100 mL 装入 100 mL 量筒中, 静置 30 min, 在 1、3、5、10、15、20、30 min 时刻记录量筒中所形成的沉淀污泥的容积 V 。 V 占原混合液容积 V_0 的体积分数, 以百分数表示, 即:

$$SV(\text{污泥沉降比}) = \frac{V}{V_0} \times 100\% \quad (1)$$

污泥沉降比反映了污泥的沉降性能。

1.2.2 毛细吸水时间测定

将一定量的污泥置于漏斗中, 漏斗下的标准滤纸产生毛细吸水压力, 从污泥中“吸收”水分, 污泥中的水分流过盖板上的两个以标准间隔放置的电极, 记录水分通过这两个电极间的时间, 即为 CST, 单位是 s。选用直径为 1 cm 的漏斗。在漏斗中通过毛细吸水产生的力量远远大于流体静压的顶点, 所以测试不依赖污泥的数量, 只要有污泥就可产生 CST。污泥的状态和在滤纸上形成的纸饼的过滤性决定水分渗入滤纸的速率的改变, 所以可以通过测定 CST 评价污泥的脱水性能。CST 越小污泥的脱水性能越好。

1.2.3 污泥比阻测定

污泥比阻 SRF 值是表示污泥可过滤性的综合指

标。其大小为:

$$SRF = \frac{2PA \times b}{\mu \times c} (\text{cm/g}) \quad (2)$$

式中: P 为抽滤过程的真空压; A 为过滤面积; b 是以纵坐标 $(V_0 - V)$ 、横坐标 $t/(V_0 - V)$ 所作的图的斜率; μ 为滤液的黏度。SRF 值越小, 污泥的脱水性能越好, 一般认为 SRF 值大于 $9.18 \times (10^{11} \sim 10^{12}) \text{ cm/g}$ 属于难脱水污泥, 小于 $3.67 \times 10^{11} \text{ cm/g}$ 属于易脱水污泥^[10]。取 100 mL 待测污泥混合液, 装入已铺设滤纸并调节好的布氏漏斗中, 重力过滤 1 min, 启动真空泵, 调节真空压为 35.5 kPa, 记下此时计量筒内滤液体积 V_0 , 启动秒表, 开始时, 每隔 5 s 记下量筒内相应的滤液体积 V_1 , 在整个实验过程中注意保持实验压力恒定。定压过滤至滤饼破裂, 真空破坏, 如真空长时间不破坏, 则过滤 7~8 min 即可停止。

1.2.4 泥饼含水率及脱水率测定

滤纸重量为 W_0 , 将泥饼连同滤纸一起称重, 测得重量 W_1 , 然后将它们放入烘箱内, 105°C 烘干 5 h 后, 放入干燥器中冷却, 称量此时重量 W_2 。

$$\text{泥饼含水率} = \left(1 - \frac{W_2 - W_0}{W_1 - W_0}\right) \times 100\% \quad (3)$$

脱水率也是衡量调节后污泥脱水性能的标准之一, 其计算公式如下:

$$\text{脱水率} = \frac{Q_r - Q_c}{Q_r} \times 100\% \quad (4)$$

式中: Q_r 为抽滤前污泥中的总水量, g; Q_c 为泥饼中残留的水量, g。

2 结果与讨论

2.1 单一絮凝剂作为污泥调理药剂时污泥脱水的效果及分析

初步实验表明, 单独投加阳离子 PAM 时, 污泥形

成明显絮体。而单独投加阴离子 PMA、非离子 PAM、聚合氯化铝、碱式氯化铝、三氯化铁絮凝剂时,污泥不能形成明显絮体。单独投加粉煤灰、生石灰助凝剂,污泥颜色变浅,固体含量增多,但不能形成絮体。对污泥单独添加阳离子 PAM 的情况做了定量研究。将阳离子 PAM 配制为质量浓度 0.3% 溶液,添加到污泥中,快搅 300 r/min, 30 ~ 40 s,慢搅 50 r/min, 5 min。图 1—图 3 分别表示阳离子 PAM 添加量对污泥沉降性能影响、对污泥 CST 与 SRF 的影响、对脱水泥饼含水率及污泥脱水率的影响。

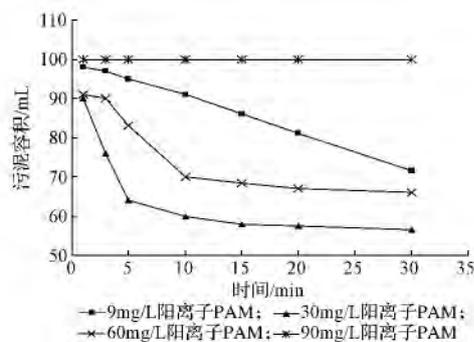


图1 阳离子 PAM 添加量对污泥沉降性能影响

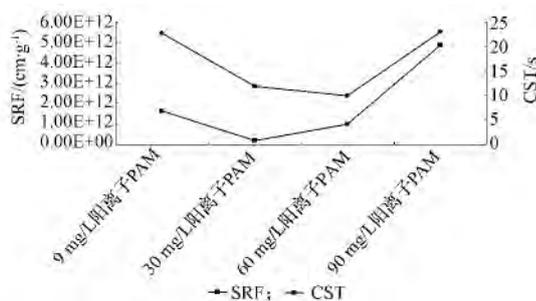


图2 阳离子 PAM 添加量对污泥 CST 与 SRF 的影响

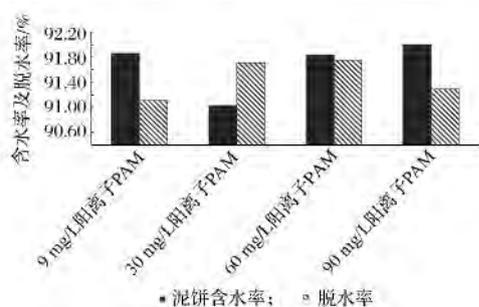


图3 阳离子 PMA 添加量对泥饼含水率及污泥脱水率的影响

由图 1 可见:阳离子 PMA 投加量为 30 mg/L 时,污泥沉降性能最好。由图 2 可见:当阳离子 PMA 投加量为 30 mg/L 时,污泥 SRF 值最低,为 1.99×10^{11} cm/g, CST 值为 11.9 s;当投加量为 60 mg/L 时,污泥

SRF 值为 8.81×10^{11} cm/g, CST 值为 9.9 s。由图 3 可见:当投加量为 30 ~ 60 mg/L 时,泥饼含水率较低,污泥脱水率较高。可见,单独添加阳离子 PMA 做污泥调理剂时,投加量为 30 ~ 60 mg/L 时,污泥脱水效果最显著。与汪毅恒^[8]等的研究结果相似。阳离子 PAM 高分子呈伸展的链状吸附,能够与远距离的邻近交替通过桥连作用形成包含少量水份,粒径较大的团状絮体^[9]。

2.2 有机-无机复合絮凝剂作污泥调理药剂对污泥脱水性能的影响

分别研究 PAC、BAC、三氯化铁与阴离子 PAM 复合添加;PAC、BAC、三氯化铁与非离子 PAM 复合添加,对污泥脱水效果的影响。尽管 PAC、BAC、三氯化铁三种无机絮凝剂,以及非离子 PAM、阴离子 PMA 二种有机絮凝剂单独添加时,观测不到污泥絮体形成,但复合添加时都能观测到较好絮凝效果。这可能是由于原污泥的碱度不足,单独投加阴离子、非离子 PAM,或单独投加 PAC、BAC、三氯化铁难以形成带正电荷聚合体^[10]。

图 4、图 5、图 6 分别表示 PAC 与阴离子 PAM 复合絮凝剂的配比、添加量对污泥沉降性能的影响,对污泥 CST、SRF 的影响,对泥饼含水率和污泥脱水率的影响。

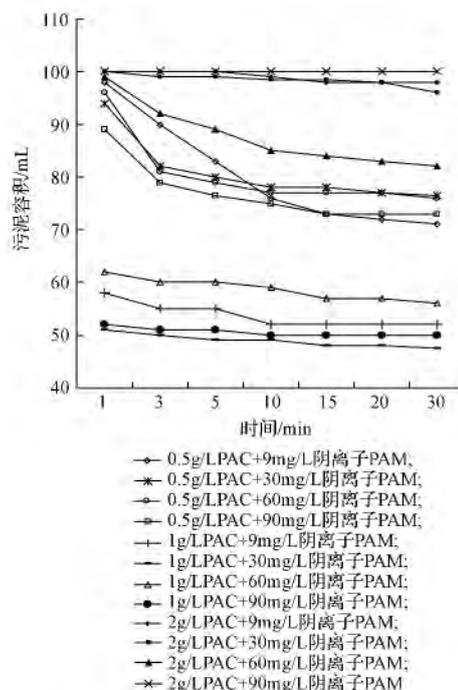


图4 阴离子 PAM 与 PAC 复合絮凝剂配比、添加量对污泥沉降性能的影响

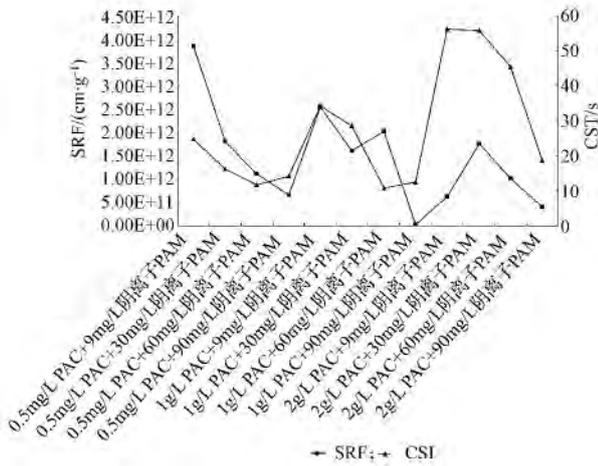


图5 阴离子PAM与PAC复合絮凝剂配比、添加量对污泥CST、SRF的影响

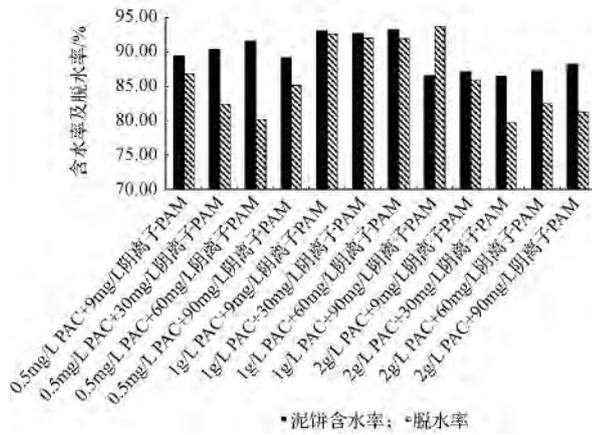


图6 阴离子PAM与PAC复合絮凝剂配比、添加量对泥饼含水率和污泥脱水率的影响

由图4可见:当PAC投加量为1 g/L时,污泥沉降性能最好,明显好于PAC投加量为0.5 g/L、2 g/L的情况。PAC投加量为1 g/L阴离子PAM投加量为30 g/L时污泥沉降性能最好,而且在实验范围内阴离子PAM投加量变化对污泥沉降性能影响不明显。

由图5可见:当PAC投加量固定时,随着阴离子PAM投加量增加,CST有较大幅度降低,SRF变化也呈现类似变化趋势。在实验范围内,PAC投加量0.5 g/L时、阴离子PAM投加量60 g/L或90 g/L;PAC投加量1 g/L时,阴离子PAM投加量60 g/L或90 g/L,以上四种情况下CST值、SRF值较小。对比图4、图5发现1 g/L PAC + 60 mg/L阴离子PAM、1 g/L PAC + 90 mg/L阴离子PAM、2 g/L PAC + 90 mg/L阴离子PAM三组出现沉降容积大而SRF、CST值却小的现象,这与刘欢^[11]等人对污泥脱水性能指标相关性的研究结果(即SRF、CST越小,污泥沉降性能越好)有差异。这可能是由于不同絮凝剂体系,搅拌过程对絮体形成的影响不同,致使一些絮体包裹大量水分或脱离絮体团,无法沉降。各项污泥脱水性能指标之间相关性及其内在原因尚有待进一步研究。

由图6可知:当PAC投加量为1 g/L时,阴离子PAM投加量从9 g/L增加到60 g/L,泥饼含水率逐渐升高,脱水率降低;当PAC投加量为1 g/L,阴离子PAM投加量为90 g/L时,泥饼含水率最低,为86.61%,污泥脱水率最高,为93.71%。

表2为6组有机-无机复合絮凝剂对污泥脱水效果的影响对比。

表2 6组有机-无机复合絮凝剂脱水效果比较

药剂组合	污泥容积/mL	污泥比阻 SRF/(cm·g ⁻¹)	毛细吸水时间 CST/s	脱水率/%
原污泥	91	1.46 × 10 ¹²	29.2	84.81
90 mg/L 阴离子 PAM + 1 g/L PAC	50	2.59 × 10 ¹⁰	12.5	93.41
9 mg/L 阴离子 PAM + 1 g/L BAC	55	1.38 × 10 ¹²	24.8	90.78
30 mg/L 阴离子 PAM + 3 g/L 氯化铁	66	3.92 × 10 ¹¹	14.8	92.20
30 mg/L 非离子 PAM + 0.5 g/L PAC	52	3.24 × 10 ¹¹	37.3	90.36
60 mg/L 非离子 PAM + 3 g/L BAC	69	2.35 × 10 ¹¹	21.9	91.18
90 mg/L 非离子 PAM + 1 g/L 三氯化铁	65	5.69 × 10 ¹¹	13.9	90.52

由表2可知:添加90 mg/L阴离子PAM、1 g/L聚合氯化铝时4个污泥脱水性能评价指标综合情况最好。但当添加30 mg/L非离子PAM、0.5 g/L聚合氯化铝做调理剂时,CST值为37.3 s大于原污泥的29.2 s。实验中观测到,非离子PMA添加浓度过高,而PAC添加浓度过低,导致溶液黏稠度增大,从而使

渗透时间增大。

2.3 助凝剂对污泥脱水性能的影响

已有研究表明,利用粉煤灰和生石灰在污泥中形成坚硬网络骨架的性质可以提高污泥的脱水性能^[7],但这些材料单独使用易造成投加大、泥饼增容等缺点。本部分研究了絮凝剂与助凝剂复合添加时污泥脱

水效果,着重探讨助凝剂的作用。图7、图8、图9分别表示阳离子PAM加粉煤灰、生石灰复合添加剂对污泥沉降性能的影响、对污泥CTS、SRF的影响、泥饼含水率、污泥脱水率的影响。

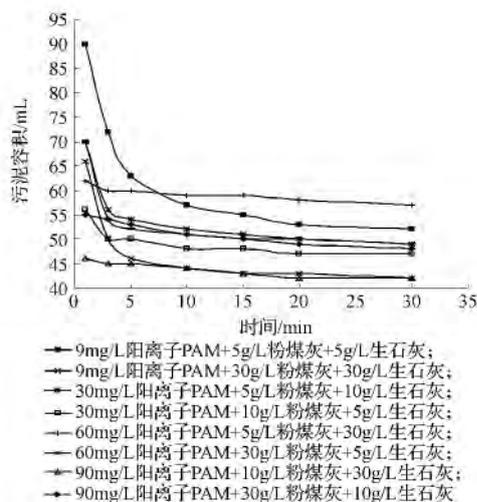


图7 阳离子PAM加粉煤灰、生石灰投加量对污泥沉降性能的影响

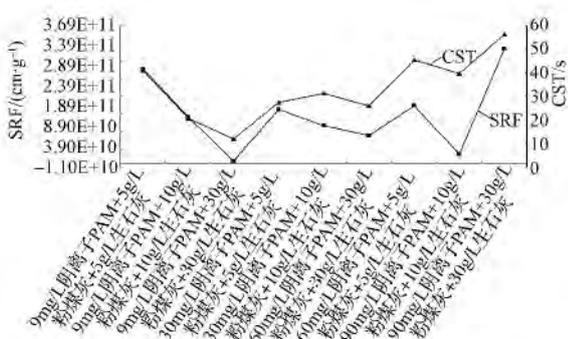


图8 阳离子PAM加粉煤灰、生石灰投加量对污泥CTS、SRF的影响

由图7可见:添加助凝剂,与单一絮凝剂相比,可明显改善污泥沉降性能(对比图1)。添加助凝剂后,即使当阳离子PAM投加量降低到9 mg/L时,仍表现出较好的污泥沉降性能,因此助凝剂的添加,可减少阳离子PAM的用量,有利于降低药剂成本。在实验范围内投加量为9 mg/L阳离子PAM、30 g/L粉煤灰、30 g/L

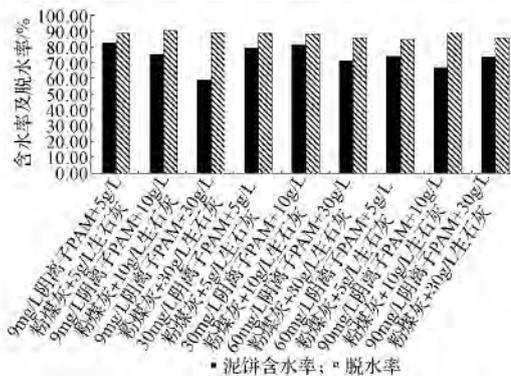


图9 阳离子PAM加粉煤灰、生石灰投加量对泥饼含水率、污泥脱水率的影响

生石灰时,污泥的沉降性能最好。

由图8可见:添加助凝剂,与单一絮凝剂相比,污泥比阻SRF普遍有降低(对比图2)。当阳离子PAM投加量小(9 mg/L)时,添加助凝剂,污泥CST降低,但当阳离子PAM投加量较大(9 mg/L)时,添加助凝剂,污泥CST反而有所增加。当采用阳离子PAM添加量9 mg/L、粉煤灰30 g/L、生石灰30 g/L时,SRF值最低,为 6.08×10^9 ,CST最低,为12 s。

由图9可知,添加助凝剂,与单一絮凝剂相比,泥饼的含水率普遍有明显下降,但脱水率与单独用絮凝剂时变化不明显(对比图3)。投加量为9 mg/L阳离子PAM+30 g/L粉煤灰+30 g/L生石灰时泥饼含水率最低为59.31%,脱水率为89.05%。

综上所述,添加助凝剂,可明显改善污泥脱水性能,尤其是大幅降低了泥饼含水率。投加量为9 mg/L阳离子PAM、30 g/L粉煤灰、30 g/L生石灰时,污泥脱水综合性能最好。添加粉煤灰和生石灰,有助于形成坚实网络骨架,降低了污泥的可压缩性,阻止絮体崩溃,同时提高污泥的碱性^[12]。表3为6组絮凝剂-助凝剂复合添加剂的污泥脱水效果对比。

由表3可知:对不同絮凝剂体系,添加助凝剂都有助于污泥絮体的形成,有助于提高污泥脱水效果,尤其是添加助凝剂可大幅降低泥饼的含水率。

表3 6组絮凝剂-助凝剂对脱水效果对比

药剂组合	污泥容积/mL	污泥比阻 SRF/($\text{cm} \cdot \text{g}^{-1}$)	毛细吸水时间 CST/s	泥饼含水率/%	脱水率/%
9 mg/L 阳离子PAM + 30 g/L 粉煤灰 + 30 g/L 生石灰	42	6.08×10^9	12	59.31	89.05
9 mg/L 阴离子PAM + 30 g/L 粉煤灰 + 30 g/L 生石灰	45	2.54×10^{10}	12.9	60.49	91.59
9 mg/L 非离子PAM + 30 g/L 粉煤灰 + 30 g/L 生石灰	38	6.39×10^9	11.6	60.64	90.24
0.5 g/L PAC + 30 g/L 粉煤灰 + 30 g/L 生石灰	60	3.25×10^{10}	15.8	65.72	89.59
0.5 g/L BAC + 30 g/L 粉煤灰 + 30 g/L 生石灰	59	4.73×10^{10}	14.9	66.40	87.29
0.5 g/L 三氯化铁 + 30 g/L 粉煤灰 + 30 g/L 生石灰	72	1.22×10^{10}	15.1	69.49	81.11

(下转第77页)

3 结论

采用富集驯化的方式,以景观水体水样和沉积物为对象,经过平板初筛共获得12株阳性菌株。好氧反硝化性能测定结果表明,所有菌株均具有好氧脱氮能力,其中11株TN去除率>50%,4株NO₂⁻-N累积浓度>2 mg/L。

12株好氧反硝化菌全部属于变形菌门(Proteobacteria),分属于3个属的4个物种。其中,从水样中获得3个物种,沉积物中仅1个物种,水体中好氧反硝化菌多样性高于沉积物。同一物种的不同菌株存在脱氮性能的差异,因此开展好氧反硝化菌株的筛选及脱氮性能检测是非常必要的。

参考文献

- [1] 王祥荣. 生态与环境—城市可持续发展与生态环境调控新论[M]. 南京: 东南大学出版社, 2000.
- [2] 乔顺风, 刘恒义, 靳秀云, 等. 养殖水体氨氮积累危害与生物利用[J]. 河北渔业, 2006, 1: 20-22.
- [3] 董玉波, 戴媛媛. 亚硝酸盐氮对水产经济动物毒性影响的研究概况[J]. 水产养殖, 2011, 32(4): 28-32.
- [4] 刘东山, 罗启芳. 东湖氮循环细菌分布及其作用[J]. 环境科学, 2002, 23(3): 29-35.
- [5] 焦燕. 南方典型重污染城市内河水联合生物处理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [6] Zhu L, Ding W, Feng L J, et al. Isolation of aerobic denitrifiers and characterization for their potential application in the bioremediation of

- oligotrophic ecosystem[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 108: 1-7.
- [7] 胡蕊. 景观水体污染底泥生物修复技术[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [8] Takaya N, Maria Antonina B C S, Yasushi S, et al. Aerobic denitrification bacteria that produce low levels of nitrous oxide[J]. *Applied and Environment Microbiology*, 2003, 69(6): 3152-3157.
- [9] 翟茜, 汪莘, 李秀婷, 等. 活性污泥中好氧反硝化菌的富集筛选及鉴别[J]. *环境科学与技术*, 2007, 30(1): 11-13.
- [10] 魏复盛. 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] Kim OS, Cho YJ, Lee K, et al. Introducing EzTaxon-e: A prokaryotic 16S rRNA gene sequence database with phylotypes that represent uncultured species[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2012, 62(3): 716-721.
- [12] Wilson L, Bouwer E. Biodegradation of aromatic compounds under mixed oxygen/denitrifying conditions: A review[J]. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 1997, 18(2/3): 116-130.
- [13] 尹明锐, 汪莘, 刘健楠, 等. 复合脱氮菌群的构建及其脱氮特性研究[J]. *北京工商大学学报. 自然科学版*, 2010, 28(3): 55-59.
- [14] Stackebrandt E, Ebers J. Taxonomic parameters revisited: Tarnished gold standards[J]. *Microbiology Today*, 2006, 33(4): 152.
- [15] Peyton B M, Mormile M R, Petersen J N. Nitrate Reduction with *Halomonas campisalis*: Kinetics of denitrification at pH 9 and 12.5% NaCl[J]. *Water Research*, 2001, 35(17): 4237-4242.
- [16] 王薇, 蔡祖聪, 钟文辉, 等. 好氧反硝化菌的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(11): 2618-2625.

作者通信处 李安峰 100037 北京市环境保护科学研究院

E-mail laf8@sohu.com

2012-01-08 收稿

(上接第69页)

3 结论

1) 单一絮凝剂作污泥调理剂时, 阳离子PAM脱水效果最好, 最佳投加量为30~60 mg/L。有机絮凝剂-无机絮凝剂复合作污泥调理剂, 比之单一絮凝剂, 污泥脱水效果有明显改善。

2) 添加石灰、粉煤灰等助凝剂, 可显著提高污泥脱水效果, 并能大幅降低絮凝剂的添加量。在实验范围内, 以絮凝剂加助凝剂作污泥调理剂时, 阳离子PAM 9 mg/L + 30 g/L 粉煤灰 + 30 g/L 生石灰为最优污泥调理药剂组合。

参考文献

- [1] Zall J, Galil N, Rehbum M. Skeleton builders for conditioning oily sludge [J]. *Water Pollution Control Federation*, 1977, 59(7): 699-706.
- [2] 于文华. 阳离子表面活性剂与FeCl₃、CaO联合作用于污泥脱水及机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [3] 鹿雯, 张登峰, 胡开林, 等. 阳离子表面活性剂对污泥脱水性能的影响和作用机理[J]. *环境化学*, 2008, 27(4): 444-448.
- [4] 黄志斌, 陈亮, 高莉莉, 等. Ca²⁺和PAM对污泥流变性和脱水性能

- 的影响[J]. *污染防治技术*, 2003, 16(4): 48-51.
- [5] 余志荣, 郝雨仓, 高延耀, 等. 石灰在污泥调治中的应用及作用机理研究[J]. *中国给排水*, 1989, 5(6): 7-11.
- [6] 杨斌, 杨家宽, 唐毅, 等. 粉煤灰和生石灰对生活污水污泥脱水影响研究[J]. *环境科学与技术*, 2007, 30(4): 98-100.
- [7] 王静, 宋存义, 孙文亮, 等. 添加粉煤灰对污泥填埋特性研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2006, 7(3): 65-67.
- [8] 汪毅恒, 范艳辉, 柳海波, 等. 阳离子聚丙烯酰胺(PAM)改善污泥脱水性能的研究[J]. *北方环境*, 2012, 24(3): 105-108.
- [9] 朱哲, 李涛, 王东升, 等. 阳离子PAM投加量对絮体性状特征的影响[C]//中国化工会第八届水处理大会暨学术研讨会论文集, 2006.
- [10] 涂玉. 污泥调理中混凝剂对污泥脱水性能影响研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.
- [11] 刘欢, 李亚林, 时亚飞, 等. 无机复合调理剂对污泥脱水性能的影响[J]. *环境化学*, 2011, 30(11): 1877-1881.
- [12] 高延耀, 顾国维, 周琪. 水污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.

作者通信处 刘力荣 510640 广州中国科学院广州地球化学研究所

E-mail 342794901@qq.com

2014-02-12 收稿