

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

**2013**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究 ..... 苗红妍,温天雪,王丽,李杏茹,王跃思(1225)

鼎湖山 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子浓度特征分析 ..... 赵亚南,王跃思,温天雪,刘全(1232)

北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征 ..... 黄怡民,刘子锐,陈宏,王跃思(1236)

深圳市 PM<sub>2.5</sub> 化学组成与时空分布特征 ..... 云慧,何凌燕,黄晓锋,兰紫娟,李响,曾立武(1245)

福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究 ..... 易志刚,黄幸然,毕峻奇,郭萍萍,郑丽丽(1252)

河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征 ..... 丁中原,毛潇萱,马子龙,田慧,郭强,黄韬,高宏,李军,张干(1258)

淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算 ..... 薛文博,王金南,杨金田,雷宇,燕丽,贺晋瑜,韩宝平(1264)

香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析 ..... 黄文敏,朱孔贤,赵玮,余博识,袁希功,冯瑞杰,毕永红,胡征宇(1270)

变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响 ..... 赵微,林健,王树芳,刘记来,陈忠荣,寇文杰(1277)

基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析 ..... 邓欧平,孙嗣咏,吕军(1284)

西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探 ..... 郭威,李祥忠,刘卫国(1291)

滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应 ..... 郭怀成,向男,周丰,王永华,李发荣,朱翔,毛国柱,于书霞,李娜,盛虎,杨永辉,何成杰,王翠榆(1298)

三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算 ..... 牛凤霞,肖尚斌,王雨春,刘德富,黎国育,王亮,纪道斌,杨正健(1308)

海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况 ..... 辛成林,任景玲,张桂玲,郭亚平,张国玲,刘素美(1315)

黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征 ..... 吴斌,宋金明,李学刚(1324)

扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价 ..... 叶华香,臧淑英,张丽娟,张玉红(1333)

上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价 ..... 唐庆丽,程金平,高昊旻,姚磊,蒋真毅,吴旻,谢翠松,梁海,王鹤,皮帅帅,余朝毅(1340)

我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析 ..... 张灿,陈虹,余忆玄,王立军,韩建波,陶平(1345)

江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较 ..... 金涛,吕学敏,曾一凡,张冰冰,马鲲鹏,姜朴,唐非(1351)

北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋 ..... 周益奇,刘云霞(1357)

降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究 ..... 胡园园,杨娜,丁毅,徐文璐,陈秀荣,艾奇峰,陈善佳,王利鹏,黄华(1363)

渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险 ..... 安立会,张燕强,宋双双,刘玥,高俊敏,陈浩,赵兴茹,雷坤,郑丙辉(1369)

巨牡蛎(*Crassostrea* sp.)对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积 ..... 刘锡尧,袁东星,陈耀瑾(1374)

咪唑氯盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究 ..... 黄若男,范军杰,涂宏志,谭凌燕,刘惠君,徐冬梅(1380)

铝盐混凝除磷影响因素及机制研究 ..... 陈桂霞,胡承志,朱灵峰,童华卿(1386)

混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究 ..... 刘冰,余国忠,古励,赵承美,李清飞,翟慧敏(1392)

活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究 ..... 王佳裕,戴启洲,鱼杰,颜亦舟,陈建孟(1402)

氯酚溶液的  $\gamma$  辐照还原降解研究 ..... 彭云霞,何仕均,龚文琪,王建龙(1411)

C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析 ..... 袁怡,黄勇,邓慧萍,盛学敏,潘杨,李祥(1416)

以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究 ..... 翟晓峰,蒋成爱,吴光学,曾运涛(1421)

固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选 ..... 李斌,郝瑞霞(1428)

基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺 ..... 卢健聪,高大文,孙学影(1435)

多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟 ..... 周振,吴志超,王志伟,杜兴庄,蒋玲燕,邢灿(1442)

高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较 ..... 赵志瑞,马斌,张树军,李滨,白志辉,王晓辉,庄国强,张洪勋(1448)

活性污泥絮体的分形结构分析 ..... 阮晓东,刘俊新(1457)

负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究 ..... 沈娜,杨昌柱,濮文虹,罗应东(1464)

预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响 ..... 熊光城,濮文虹,杨昌柱(1472)

同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究 ..... 张超,陈银广,顾国维(1479)

利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性 ..... 谢薇薇,袁伊,王志伟,孔繁翔,史小丽(1485)

阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用 ..... 郭亚丽,傅海燕,黄国和,高攀峰,柴天,严滨,廖欢(1492)

象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征 ..... 朱艺峰,黄简易,林霞,杨莹,邢超,严小军(1498)

环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究 ..... 王进,徐真,彭书传,夏明山,岳正波,陈天虎(1510)

铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解 ..... 史广宇,尹华,叶锦韶,彭辉,张娜,何宝燕(1517)

酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 的影响 ..... 黄翔峰,王凯,黎明霞,王彩林,陆丽君,刘佳(1524)

玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构 ..... 乔江涛,郭荣波,袁宪正,师晓爽,许晓晖,范晓蕾,邱艳玲(1531)

红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化 ..... 刘子旭,孙力平,李玉友,邱春生(1540)

4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究 ..... 杨宾,李慧颖,伍斌,杜晓明,李发生(1545)

污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源 ..... 姚林林,张彩香,李佳乐,廖小平,王焰新(1553)

呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 ..... 郭伟,孙文惠,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,张君(1561)

水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征 ..... 李苗苗,聂三安,陈晓娟,罗璐,朱捍华,石辉,葛体达,童成立,吴金水(1568)

亚热带不同稻田土壤微生物生物量碳的剖面分布特征 ..... 盛浩,周萍,袁红,廖超林,黄运湘,周清,张杨珠(1576)

施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响 ..... 刘翠英,蒋新(1583)

螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复 ..... 刘霞,王建涛,张萌,王力,杨亚提(1590)

不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响 ..... 蒋田雨,姜军,徐仁扣,周立祥,王世梅(1598)

绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究 ..... 蓝舟琳,彭丹,郭楚玲,朱超飞,薛秀玲,党志(1605)

改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 的脱除性能 ..... 邢坤,王海增(1611)

羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响 ..... 涂丽杏,朱能武,吴平霄,李平,吴锦华(1617)

新型生物质活性炭烟气脱硫研究 ..... 刘洁岭,汤争光,陈杰,蒋文举,江霞(1623)

城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用 ..... 毛建素,马兰(1628)

厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷 ..... 闫祯,崔胜辉,李桂林,任引,徐礼来(1636)

《环境科学》征订启事(1283) 《环境科学》征稿简则(1332) 信息(1350,1509,1582,1644) 专辑征稿通知(1523)

# 同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究

张超<sup>1</sup>, 陈银广<sup>2</sup>, 顾国维<sup>2</sup>

(1. 石油化工科学研究院 中国石化水处理中心, 北京 100083; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 同时回收氮磷可以显著提高碱性发酵污泥的脱水性能, 但是目前对其机制尚不清楚. 通过批式试验, 研究了 $\zeta$ 电位、二价离子、胞外聚合物、溶解性聚合物以及鸟粪石对碱性发酵污泥脱水性能的影响. 结果表明, 在最佳回收条件下 ( $\text{pH} = 10.0$ ,  $n(\text{P})/n(\text{N}) = 1.3 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $n(\text{Mg})/n(\text{N}) = 1.9 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ), 镁离子不仅能使 $|\zeta|$ 电位减小到14 mV以下, 而且使一价阳离子与二价阳离子比例降低到9 mol·mol<sup>-1</sup>以下; 同时回收氮磷可以显著降低溶解性多聚物和胞外聚合物的含量, 尤其是溶解性蛋白质和松散型胞外聚合物的含量; 这些变化都促进了碱性发酵污泥的脱水. 此外, 鸟粪石的形成也有助于提高脱水效果.

**关键词:** 碱性发酵污泥; 回收; 氨氮; 磷酸盐; 脱水

中图分类号: X703.1; X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1479-06

## Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery

ZHANG Chao<sup>1</sup>, CHEN Yin-guang<sup>2</sup>, GU Guo-wei<sup>2</sup>

(1. Water Treatment Center of SINOPEC, Research Institute of Petroleum Processing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Simultaneous ammonium and phosphate recovery could notably improve the dewaterability of alkaline fermented sludge, the mechanisms of which, however, remains unclear at present. The influence of zeta potential, divalent ions, extracellular polymeric substances (EPS), dissolved polymers and struvite were studied in batch experiments. Under the optimal ammonium and phosphate recovery condition [i. e.  $\text{pH} = 10.0$ ,  $n(\text{P})/n(\text{N}) = 1.3 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $n(\text{Mg})/n(\text{N}) = 1.9 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ], it was found that magnesium ion could not only decrease the absolute value of zeta potential to 14 mV, but also reduce the monovalent to divalent ions ratio to 9 mol·mol<sup>-1</sup>, which promoted the dewaterability of alkaline fermented sludge; also, the dissolved polymers and EPS, especially the dissolved protein and the loosely bound EPS, reduced remarkably. Results showed that all the factors above promoted sludge dewatering. Furthermore, the struvite formed during ammonium and phosphate recovery improved the dewaterability.

**Key words:** alkaline fermented sludge; recovery; ammonium; phosphate; dewatering

剩余污泥在碱性条件下产生富含短链脂肪酸 (SCFAs) 的发酵液, 其 SCFAs 含量为传统发酵液的 3~4 倍<sup>[1]</sup>. 研究表明, 这种发酵液是一种优质的除磷脱氮碳源<sup>[2-5]</sup>, 把它作为实际污水的补充碳源, 可以大幅度提高生物脱氮除磷的去除效率和系统稳定性. 然而, 在碱性条件下发酵后, 污泥脱水性能大幅恶化, 例如发酵 7 d 后, 碱性发酵污泥的毛细吸水时间 (CST) 增大到 30 000 s 以上, 污泥比阻 (SRF) 增加了 45 倍<sup>[6]</sup>, 发酵混合物难以实现泥水分离, 因此阻碍了发酵液的应用. 笔者研究发现<sup>[7]</sup>, 通过向碱性发酵污泥中投加适量的磷酸盐、镁离子和聚丙烯酰胺 (PAM), 不仅可以迅速改善碱性发酵污泥的脱水性能, 而且能够回收氮磷形成具有经济价值的鸟粪石 (MAP), 被证明是一种有效和可靠的脱水技术 (表 1). 目前, 该方法已经取得了初步应用<sup>[8-10]</sup>, 但

是人们对同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的原因尚不清楚, 因此有必要对该方法的机制进行深入研究.

### 1 材料与方法

#### 1.1 批式试验

为研究同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制, 设计了表 2 的批式试验, 考察 $\zeta$ 电位、污泥胞外聚合物 (EPS)、溶解性聚合物以及二价离子浓度对污泥脱水性能影响. A 组试验为仅添加

收稿日期: 2012-07-05; 修订日期: 2012-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50408039); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2007AA06Z326); 中国石化科研项目 (311047)

作者简介: 张超 (1981~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为废水生物处理与污泥资源化, E-mail: zhangchao\_seu@163.com

表 1 同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能前后发酵液成分和污泥脱水性能比较<sup>1)</sup>Table 1 Compositions of fermentation liquid and the dewaterability of the sludge before and after SOP and  $\text{NH}_4^+$ -N recovery

项目	发酵液成分/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$						脱水性能		
	P	$\text{NH}_4^+$ -N	SCOD	SCFAs	多糖	蛋白质	CST/s	SRF/ $\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$	WPC/%
回收前	213	275	8 962	4 276	222	1 801	> 30 000	$41.3 \times 10^{13}$	97.5
回收后	18	27	8 011	4 225	161	1 428	21	$1.2 \times 10^{13}$	73.4
去除率/%	91.5	90.2	10.4	1.2	27.5	20.7			

1) SCOD:溶解性 COD; SCFAs:短链脂肪酸; CST:毛细吸水时间; SRF:污泥比阻; WPC:脱水泥饼含水率; 回收工况:  $\text{pH} = 10.0$ ,  $n(\text{P})/n(\text{N}) = 1.3$ ,  $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,  $n(\text{Mg})/n(\text{N}) = 1.9$ ,  $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 反应结束后 ( $\text{pH} = 9.35$ ) 按  $m(\text{PAM})/m(\text{DS}) = 1.0\%$  (DS 为污泥干重) 的比例投加 PAM; SCOD、SCFAs、多糖、蛋白质均以 COD 计

表 2 批次试验安排

Table 2 Batch tests for dewatering mechanism study

序号	A	B	C
1	0% PAM	MAP + 0% PAM	$[n(\text{Mg})/n(\text{N}) = 0] + \text{PAM}$
2	0.33% PAM	MAP + 0.33% PAM	$[n(\text{Mg})/n(\text{N}) = 0.5] + \text{PAM}$
3	0.67% PAM	MAP + 0.67% PAM	$[n(\text{Mg})/n(\text{N}) = 1] + \text{PAM}$
4	1.0% PAM	MAP + 1.0% PAM	$[n(\text{Mg})/n(\text{N}) = 1.5] + \text{PAM}$
5	1.5% PAM	MAP + 1.5% PAM	$[n(\text{Mg})/n(\text{N}) = 2] + \text{PAM}$
6	2.0% PAM	MAP + 2.0% PAM	$[n(\text{Mg})/n(\text{N}) = 3] + \text{PAM}$

PAM,  $m(\text{PAM})/m(\text{DS})$  为 0% ~ 2.0%; B 组试验为最佳氮磷回收条件下 (最佳条件为  $\text{pH} = 10.0$ ,  $n(\text{P})/n(\text{N}) = 1.3$ ,  $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ,  $n(\text{Mg})/n(\text{N}) = 1.9$ ,  $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) 回收氮磷形成 MAP, 并添加 PAM,  $m(\text{PAM})/m(\text{DS})$  为 0% ~ 2.0%; C 组试验为不同  $n(\text{Mg})/n(\text{N})$  条件下添加等量的 PAM. 3 组试验均取 500 mL 碱性发酵污泥<sup>[1]</sup>, 必要时补充适量蒸馏水使絮凝后污泥体积为 600 mL. 在混凝之前, 调整 pH 至 9.35, 其原因为: ①最佳回收氮磷条件反应结束后, 污泥混合液 pH 为 9.35; ②避免 pH 对脱水性能的影响.

## 1.2 测试方法

EPS 可以分为松散型 EPS (LB-EPS) 和紧密型 EPS (TB-EPS). 采用改良的加热提取法<sup>[11]</sup> 分别提取 LB 和 TB, 得到含有 LB 的离心液和含有 TB 的离心液, 分别测定后 2 种离心液中的蛋白质、多糖和 DNA, 各自的蛋白质、多糖和 DNA 之和即为该类型 EPS 的含量. 多糖采用蒽酮试剂法测定<sup>[12]</sup>; 蛋白质采用福林-酚试剂法测定<sup>[13]</sup>; DNA 采用二苯胺法测定<sup>[14]</sup>.

采用 5% 的  $\text{HNO}_3$  调节发酵液 pH 值小于 2, 经 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤后, 用离子发射光谱仪 (ICP-OES, PerkinElmer Optima 2100DV) 仪器检测金属离子浓度. 采用 Zeta 电位仪 (Nano-Z Zetasizer, Malvern Co.) 测定  $\zeta$  电位.

CST 采用 CST 仪 (Triton Electronics Ltd.) 测定; SRF 测定采用文献 [15] 中的方法; WPC 的测定采用文献 [16] 的方法: 将 100 mL 污泥倒入 15 cm 的布氏漏斗中, 然后用真空机抽滤 30 min, 空压力保持在

0.05 MPa, 取下湿滤纸及泥饼一起称重 ( $W_1$ ) 后放入烘箱 105 $^\circ\text{C}$  烘干并称重 ( $W_2$ ), WPC 可用下式计算:

$$\text{WPC} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\%$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 批次试验污泥脱水性能

图 1 为批次试验污泥脱水性能. 当既不回收氮磷也不投加 PAM 时 (A), 污泥 SRF、WPC 和 CST 分别为  $41.3 \times 10^{13} \text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、97.5% 和 > 30 000 s; 如果按 1.0% 的比例加入 PAM, SRF、WPC 和 CST 分别为  $38.6 \times 10^{13} \text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、97.1% 和 5 532 s; 即使 PAM 用量增加到 2.0%, SRF 和 WPC 依然没有改善, 这显然不能满足污泥脱水要求. 回收氮磷后 (B), 即使不添加 PAM, 污泥的脱水性能也有较明显的改善, 当  $m(\text{PAM})/m(\text{DS})$  为 1.0% 时, SRF、WPC 和 CST 分别为  $1.2 \times 10^{13} \text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、73.4% 和 21 s, 继续增加 PAM 反而使污泥脱水性能变差. 在同等 PAM 投加量 (1.0%) 的情况下 (C), 回收氮磷污泥的 SRF、污泥脱水后体积和 CST 分别减少到为没有氮磷回收污泥的 3.1%、11.3% 和 0.4%. 因此, 综合上述情况考虑, PAM 投加量以 1.0 ~ 1.5% 为宜. 此外, 由图 1 还可以看出, 当  $n(\text{Mg})/n(\text{N}) \geq 1.5$  时, 污泥脱水性能明显改善.

### 2.2 $\zeta$ 电位

在接近中性的  $\zeta$  电位的环境中, 细小的污泥颗粒容易聚合成较大的污泥颗粒<sup>[17]</sup>. 据报道, 当  $|\zeta| < 14 \text{mV}$  时胶体脱稳就会发生凝聚<sup>[18]</sup>. 由图 2 可

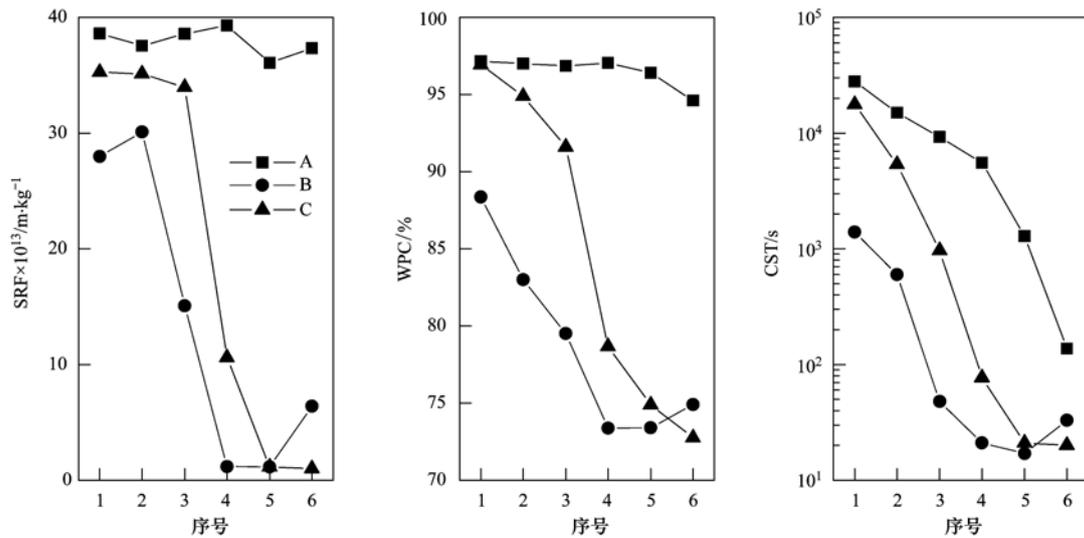
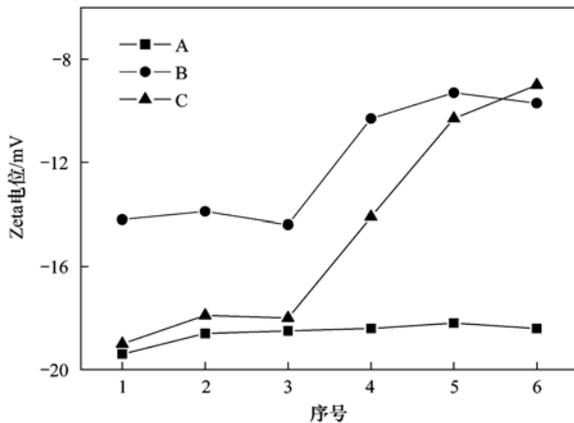


图1 批式试验结果

Fig. 1 Experiment results of batch tests

见,当仅添加 PAM 而没有氮磷回收时(A),系统的 $\zeta$ 电位维持在 $-19\text{ mV}$ 左右. 如果不添加 PAM,而仅在最佳回收条件下进行氮磷回收(B), $\zeta$ 电位即上升到 $-14\text{ mV}$ 左右;当 PAM 投加量增加到 $1.0\%$ 时, $\zeta$ 电位曲线出现一个折点,但是当 PAM 增加到 $2.0\%$ 时, $\zeta$ 电位的绝对值反而增加;显然,最佳工况回收氮磷并投加 PAM 时污泥的 $\zeta$ 电位变化曲线与图 1 中污泥脱水性能的变化趋势相符.

图2  $\zeta$  电位变化示意Fig. 2 Plot of  $\zeta$  potential

在相同 PAM 投加量的情况下(C),随着 $n(\text{Mg})/n(\text{N})$ 的增加,污泥的 $\zeta$ 电位绝对值在不断降低,当 $n(\text{Mg})/n(\text{N})$ 大于 $1.5$ 时, $|\zeta|$ 降至 $14\text{ mV}$ 以下. 由于 $\text{Mg}^{2+}$ 带有正电荷,因此 $\text{Mg}^{2+}$ 的加入是引起 $|\zeta|$ 降低的另一个直接因素.

### 2.3 镁离子

阳离子在细小的污泥颗粒之间架桥使污泥形成

较大的絮体,是污泥絮体的一部分. 研究发现,阳离子( $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ )浓度、以及一价阳离子( $\text{M}^+$ )与二价阳离子( $\text{D}^{2+}$ )浓度之比 $n(\text{M}^+)/n(\text{D}^{2+})$ ,是影响污泥沉降性能和脱水性能的关键因素之一<sup>[19~22]</sup>. 在碱性发酵过程中,需要添加 NaOH 以维持系统的 pH 值,从而引入了大量的 $\text{Na}^+$ ,导致 $n(\text{M}^+)/n(\text{D}^{2+})$ 严重失衡,该比例高达 $100\text{ mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 以上(图 3),远远高于适合污泥脱水的比例区间 $[n(\text{M}^+)/n(\text{D}^{2+})$ 为 $0.3\sim 4\text{ mol}\cdot\text{mol}^{-1}]$ . 然而,在最佳工况回收氮磷之后(B),二价阳离子的浓度达到 $11.2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ , $n(\text{M}^+)/n(\text{D}^{2+})$ 比例下降到 9 左右,在 PAM 的作用下,以二价离子为媒介,微小的污泥颗粒容易聚集成大的颗粒,从而脱水性能得以改善. 如图 3 所示,在不同的 $n(\text{Mg})/n(\text{N})$ 下(C),系统中二价阳离子以及 $n(\text{M}^+)/n(\text{D}^{2+})$ 的变化曲线与图 1 中污泥脱水性能的变化曲线趋势一致. 这说明,镁离子的加入,不仅回收了氮磷,而且同时提供了大量的二价离子,优化了系统中的 $n(\text{M}^+)/n(\text{D}^{2+})$ 比例,促进了污泥脱水.

由上述讨论可知,溶液中镁离子浓度为 $11.2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,同时测得的磷酸根离子和氨离子的浓度分别为 $0.6\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ .  $c(\text{Mg}^{2+})\cdot c(\text{NH}_4^+)\cdot c(\text{PO}_4^{3-})$ 的乘积为 $10^{-7.88}$ ,大于 pH 为 9.35 时的条件溶度积( $10^{-9.22}$ )<sup>[23, 24]</sup>,似乎应该继续形成沉淀以降低镁离子、磷酸根离子和氨离子的浓度. 实际上,溶液的离子强度对鸟粪石的条件溶度积有较大的影响,在同时回收氮磷之后,溶液的离子强度为 $0.16\sim 0.20$ . 在如此高的离子强度作用

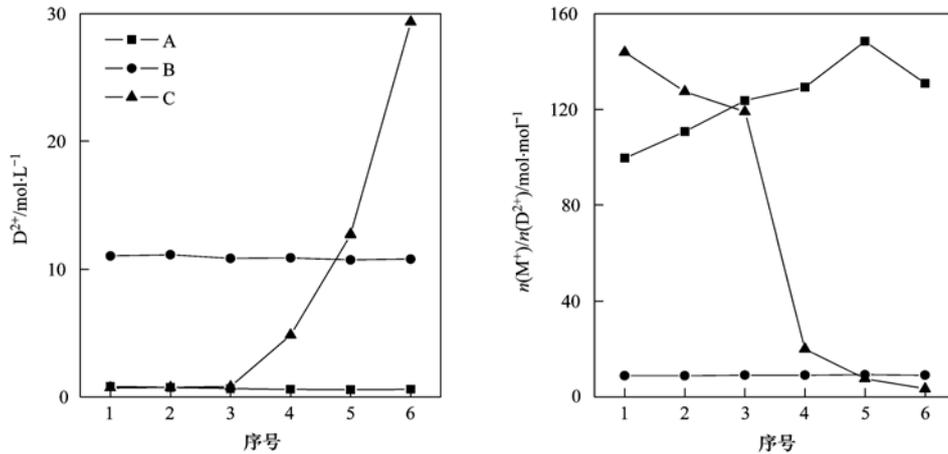


图 3 离子变化示意

Fig. 3 Variations of cation concentrations

下, pH 为 9.35 时的理论条件溶度积为  $10^{-7.8}$ , 这与本试验的实际值十分相近, 因此, 同时回收氮磷之后的系统中可以保持较高的镁离子浓度, 从而促进碱性发酵污泥的脱水。

2.4 聚合物

影响污泥脱水的聚合物包括溶解性聚合物(主要是多糖和蛋白质)和污泥胞外聚合物(EPS)。当液相中的溶解性聚合物浓度减少时, 可以减轻对滤布孔隙的堵塞, 过滤性能变好。如图 4 所示, 在没有鸟粪石回收时(A), 随着 PAM 的增加, 溶解性多聚物的含量仅由  $1342.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  降低到  $1252.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 其中多糖由  $198.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  下降到  $180.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 蛋白质由  $1144.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  下降到  $1072.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在不添加 PAM 的情况下, 与不回收氮磷相比, 在最佳工艺条件下同时回收氮磷时(B), 系统中的多聚物有明显的下降(由  $1342.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  下降到  $1152.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )。在最佳 PAM 投加量时, 多聚物含量进一步下降到  $1051.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 而继续增加 PAM, 多聚物含量则没有明显的变化。在 PAM 投加量为 1.0% 时(C), 当  $n(\text{Mg}^{2+})/n(\text{N})$  大于 1.0, 系统中的多聚物迅速下降, 这说明镁离子是引起多聚物下降的关键因素, 原因可能是  $\text{Mg}^{2+}$  使带负电的胶体脱稳并与部分大分子聚合物形成沉淀, 从而多聚物浓度下降。

蛋白质是溶解性多聚物的主要成分, 占总量的 86% 左右。在回收氮磷或添加 PAM 调理后, 蛋白质减少量占多聚物减少量的 80% 左右。这表明, 与多糖相比, 蛋白质对污泥脱水性能的影响更大。

胞外聚合物是影响污泥脱水性能的另一重要因素, 对比图 1 与图 5 可以看出, 随着污泥 LB 含量的

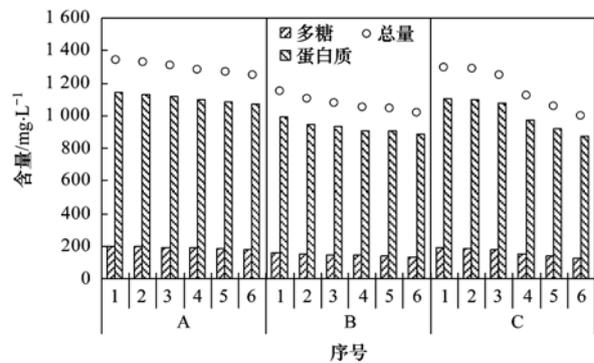


图 4 溶解性多聚物的变化

Fig. 4 Variations of soluble biopolymers

减少, 污泥脱水性能得以改善, 但是氮磷回收和 PAM 调理对 TB 含量没有明显的影响。无论是 LB 还是 TB, 蛋白质均是 EPS 的主要组分, 约占 LB 或 TB 的 76% ~ 84%; 其次为多糖, 占 LB 或 TB 的 9% ~ 15%; DNA 含量最少, 占 LB 或 TB 的 4% ~ 10%。由图 5 还可以看出, 在回收氮磷和 PAM 调理的过程中, 变化最大的是 LB 中的蛋白质, 但是 LB 中的多糖和 DNA、以及 TB 都没有明显变化。

将 LB、TB 分别与污泥脱水性能的指标进行拟合可以发现, LB 与 SRF、WPC 和 CST 均有良好的数学关系, 然而 TB 无法与 SRF、WPC 和 CST 进行有效拟合。这说明, LB 是影响污泥脱水性能的重要因素, 当 LB 含量增加时, 污泥的脱水性能恶化。LB 是一种具有较高黏性的物质, 位于细胞和污泥絮体结构的外侧, 因此当 LB 增加时, 泥水混合物的黏度也随之增加, 从而增加了液体的黏度, 导致污泥的脱水性能变差<sup>[11]</sup>。此外, 由于 LB 中含有大量的结合水, 而结合水的增加将导致 SRF 增加<sup>[25]</sup>, 因此, LB 含量高的污泥更难过滤, 泥饼的含水率也较高(图 6)。

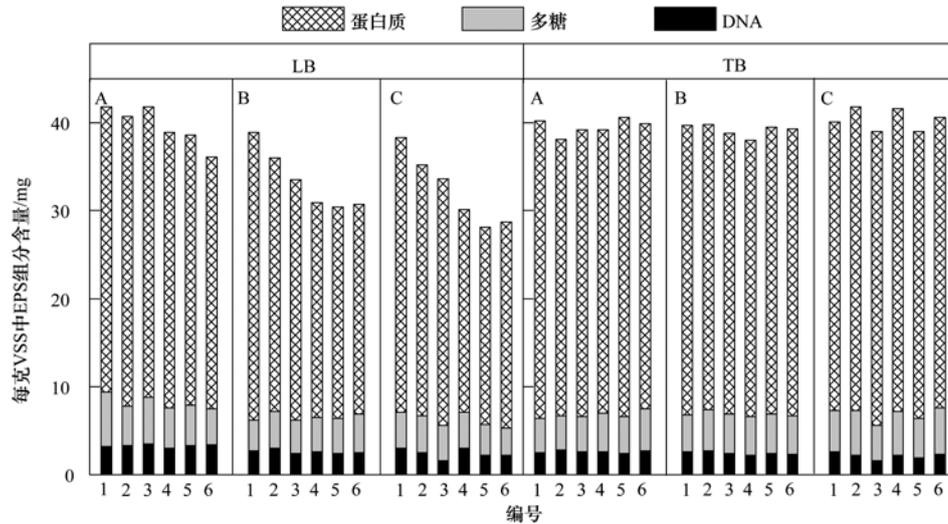


图5 胞外聚合物的变化

Fig. 5 Variations of sludge EPS

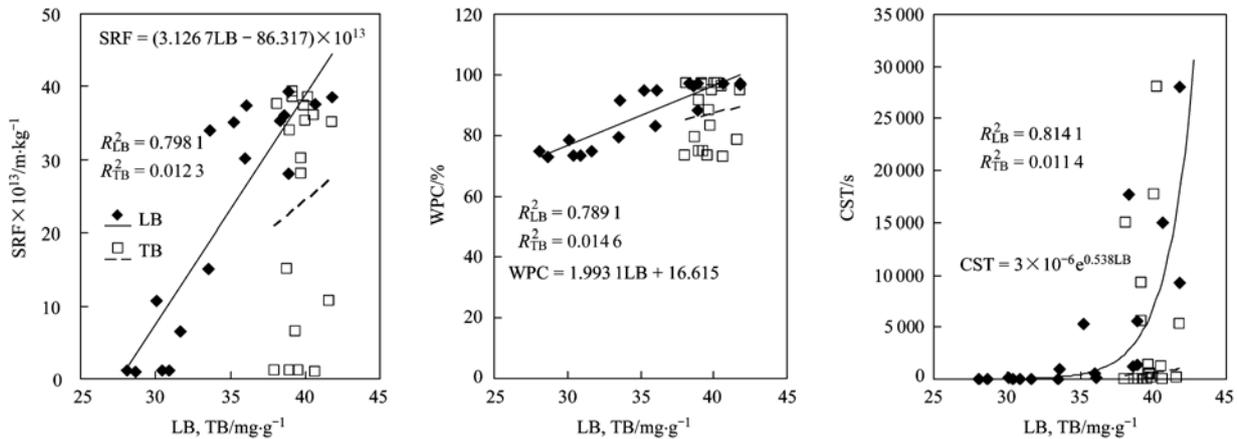


图6 LB(TB)与SRF、WPC、CST的关系

Fig. 6 Relationships between LB (TB) and SRF, WPC, CST

2.5 鸟粪石

在同时回收氮磷的过程中,不仅降低了 $|\zeta|$ ,增加了二价离子浓度,优化了 $n(M^{+})/n(D^{2+})$ ,减少了溶解性多聚物和LB-TBS,还形成了鸟粪石沉淀.因此,有必要讨论鸟粪石对污泥脱水性能的影响.

取两份 500 mL 发酵污泥,其中一份仅加入 PAM 调理并稀释到 600 mL;另一份不回收氮磷,但是加入与回收氮磷时理论上形成的鸟粪石相同量的鸟粪石,充分搅拌后再加入 PAM(1.0%),PAM 调理后的体积为 600 mL. 试验结果如表 3 所示,与没有鸟粪石的污泥相比,有鸟粪石的污泥的 SRF 和 CST 分别减少了 45.3% 和 67.7%,这表明鸟粪石的形成对碱性发酵污泥脱水也有促进作用,其原因可能是鸟粪石的杆状或 X 状结构减轻了黏性较大的多聚物对泥饼的堵塞.

表3 鸟粪石对污泥脱水性能的影响

Table 3 Effect of struvite on sludge dewaterability

项目	SRF $\times 10^{13}/m \cdot kg^{-1}$	CST/s
无鸟粪石	38.6	5 532
有鸟粪石	21.1	1 786

3 结论

(1) 在最佳氮磷回收条件下,投加 1.0% 的 PAM,碱性发酵污泥 SRF、脱水后污泥体积和 CST 分别减少到未回收氮磷污泥的 3.1%、11.3% 和 0.4%.

(2 镁离子的加入是引起  $\zeta$  电位降低的直接因素,当  $n(Mg)/n(N)$  大于 1.5 时, $|\zeta|$  降至 14 mV 以下;同时回收氮磷后,污泥中一价阳离子与二价阳离子比例由  $100 mol \cdot mol^{-1}$  降低到  $9 mol \cdot mol^{-1}$ ,

有效促进了污泥脱水。

(3)同时回收氮磷能有效降低溶解性聚合物和胞外聚合物的含量。溶解性多聚物中的蛋白质对脱水性能的影响较大;胞外多聚物中的LB与污泥脱水性能有较好的数学关系,当LB含量下降时,污泥脱水性能得到显著改善。

(4)鸟粪石的形成对碱性发酵污泥脱水也有促进作用,与没有鸟粪石的污泥相比,有鸟粪石的污泥的SRF和CST分别减少了45.3%和67.7%。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Yuan H Y, Chen Y G, Zhang H X, *et al.* Improved bioproduction of short-chain fatty acids (SCFAs) from excess sludge under alkaline conditions[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, **40**(6): 2025-2029.
- [ 2 ] Tong J, Chen Y G. Enhanced biological phosphorus removal driven by short-chain fatty acids produced from waste activated sludge alkaline fermentation [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41**(20): 7126-7130.
- [ 3 ] Tong J, Chen Y G. Recovery of nitrogen and phosphorus from alkaline fermentation liquid of waste activated sludge and application of the fermentation liquid to promote biological municipal wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2009, **43**(12): 2969-2976.
- [ 4 ] Zheng X, Tong J, Li H J, *et al.* The investigation of effect of organic carbon sources addition in anaerobic-aerobic (low dissolved oxygen) sequencing batch reactor for nutrients removal from wastewaters[J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(9): 2515-2520.
- [ 5 ] Zheng X, Chen Y G, Liu C C. Waste activated sludge alkaline fermentation liquid as carbon source for biological nutrients removal in anaerobic followed by alternating aerobic-anoxic sequencing batch reactors [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2010, **18**(3): 478-485.
- [ 6 ] 张超. 混合短链脂肪酸作为增强生物除磷碳源的计量学和动力学研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- [ 7 ] Zhang C, Chen Y G. Simultaneous nitrogen and phosphorus recovery from sludge-fermentation liquid mixture and application of the fermentation liquid to enhance municipal wastewater biological nutrient removal [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, **43**(16): 6164-6170.
- [ 8 ] Zhu X Y, Chen Y G. Reduction of N<sub>2</sub>O and NO generation in anaerobic-aerobic (low dissolved oxygen) biological wastewater treatment process by using sludge alkaline fermentation liquid [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, **45**(6): 2137-2143.
- [ 9 ] Ji Z Y, Chen Y G. Using sludge fermentation liquid to improve wastewater short-cut nitrification-denitrification and denitrifying phosphorus removal via nitrite[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, **44**(23): 8957-8963.
- [ 10 ] Zhao Y X, Chen Y G. Nano-TiO<sub>2</sub> enhanced photofermentative hydrogen produced from the dark fermentation liquid of waste activated sludge [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, **45**(19): 8589-8595.
- [ 11 ] Li X Y, Yang S F. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge [J]. *Water Research*, 2007, **41**(5): 1022-1030.
- [ 12 ] David J, Michael G R, Glen T D. *Manual on the causes and control of activated sludge bulking and foaming*[M]. (2nd ed). Florida: Boca Raton, Lewis Publishers, 1993.
- [ 13 ] Lowry O H, Rosebrough N J, Farr A L, *et al.* Protein measurement with the Folin phenol reagent [J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 1951, **193**(1): 265-275.
- [ 14 ] Burton K. Determination of DNA concentration with diphenylamine[J]. *Methods in Enzymology*, 1968, **12B**: 163-166.
- [ 15 ] 金儒林, 刘永龄. 污泥处置[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982. 159-163.
- [ 16 ] Chen Y G, Yang H Z, Gu G W. Effect of acid and surfactant treatment on activated sludge dewatering and settling[J]. *Water Research*, 2001, **35**(11): 2615-2620.
- [ 17 ] Chang I L, Chu C P, Lee D J, *et al.* Expression dewatering of alum-coagulated clay slurries [J]. *Environmental Science and Technology*, 1997, **31**(5): 1313-1319.
- [ 18 ] Chang Y G, Ma F, Guo J B, *et al.* Cloning of flocculent gene and morphology characterization of flocculent [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*. 2007, **28**(9): 1685-1689.
- [ 19 ] Neyens E, Baeyens J, Creemers C. Alkaline thermal sludge hydrolysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, **97**(1-3): 295-314.
- [ 20 ] Novak J T, Sadler M E, Murthy S N. Mechanisms of floc destruction during anaerobic and aerobic digestion and the effect on conditioning and dewatering of biosolids[J]. *Water Research*, 2003, **37**(13): 3136-3144.
- [ 21 ] Higgins M J, Novak J T. The effect of cations on the settling and dewatering of activated sludges: laboratory results [J]. *Water Environment Research*, 1997, **69**(2): 215-224.
- [ 22 ] Higgins M J, Novak J T. Dewatering and settling of activated sludges: the case for using cation analysis [J]. *Water Environment Research*, 1997, **69**(2): 225-232.
- [ 23 ] Ohlinger K N, Young T M, Schroeder E D. Predicting struvite formation in digestion [J]. *Water Research*, 1998, **32**(12): 3607-3614.
- [ 24 ] Snoeyink V L, Jenkins D. *Water Chemistry* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1980.
- [ 25 ] Forster C F. The rheological and physico-chemical characteristics of sewage sludges[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2002, **30**(3): 340-345.

## CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan .....	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM <sub>2.5</sub> at Dinghu Mount .....	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing .....	HUANG Yi-min, LIU Zi-ru, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> Species in Shenzhen .....	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou .....	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China .....	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City .....	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors .....	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method .....	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changde River .....	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City .....	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed .....	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorus in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter .....	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan .....	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary .....	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland .....	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai .....	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas .....	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province .....	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China .....	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Floes .....	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk ( <i>Rapana venosa</i> ) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China .....	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System .....	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm .....	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process .....	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon .....	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon .....	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation .....	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process .....	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon .....	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter .....	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX .....	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process .....	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System .....	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Floes .....	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method .....	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules .....	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery .....	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes .....	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i> .....	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay .....	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment .....	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .....	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 .....	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities .....	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation .....	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media .....	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil .....	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot .....	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density .....	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils .....	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils .....	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant .....	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils .....	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills .....	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide .....	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC .....	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon .....	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application .....	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China .....	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行