

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题

序	陈卫平 (4069)
再生水灌溉利用的生态风险研究进展	陈卫平,张炜铃,潘能,焦文涛 (4070)
绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究	潘能,侯振安,陈卫平,焦文涛,彭驰,刘文 (4081)
绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析	潘能,陈卫平,焦文涛,赵忠明,侯振安 (4088)
再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响	赵忠明,陈卫平,焦文涛,王美娥 (4094)
模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响	吕斯丹,陈卫平,王美娥 (4100)
模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响	吕斯丹,陈卫平,王美娥 (4108)
再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究	赵忠明,陈卫平,焦文涛,王美娥 (4115)
再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟	王美娥,陈卫平,焦文涛 (4121)
城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究	王巧环,陈卫平,王效科,任玉芬,张烨 (4127)
北京市再生水的公众认知度评估	张炜铃,陈卫平,焦文涛 (4133)

研究报告

北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究	陈鹏飞,张蕾,权建农,高扬,黄梦宇 (4141)
世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染源研究	王红丽,陈长虹,黄海英,王倩,陈宜然,黄成,李莉,张钢锋,陈明华,楼晟荣,乔利平 (4151)
贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究	张军科,王跃思,吴方堃,孙杰 (4159)
区域大气环境风险源识别与危险性评估	张晓春,陈卫平,马春,詹水芬,焦文涛 (4167)
稻草烟尘中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素	刘刚,孙丽娜,李久海,徐慧 (4173)
汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性	胡志远,李金,谭丕强,楼狄明 (4181)
城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应	隆茜,周菊珍,孟颖,达良俊 (4188)
闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征	杨平,仝川,何清华,黄佳芳 (4194)
模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响	刘艳,陈书涛,胡正华,任景全,沈小帅 (4205)
广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异	孔祥胜,祁士华,孙蓓,黄保健 (4212)
松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究	马万里,刘丽艳,齐虹,白杨,沈吉敏,陈忠林,李一凡 (4220)
温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源	周婕成,陈振楼,毕春娟,吕金刚,许世远,潘琪 (4226)
温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源	周婕成,毕春娟,陈振楼,王璐,许世远,潘琪 (4237)
辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估	武江越,刘征涛,周俊丽,高富 (4244)
某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究	裴芳,罗泽娇,彭进进,祁士华 (4251)
某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征	刘庚,郭观林,南锋,魏文侠,李发生,毕如田 (4256)
太原市污灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析	廖小平,张彩香,赵旭,向青清,李佳乐 (4263)
上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价	吕金刚,毕春娟,陈振楼,周婕成,韩景超 (4270)
近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价	李瑞利,柴民伟,邱国玉,贺蓓 (4276)
北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究	张伟,张洪,单保庆 (4284)
太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征	秦延文,张雷,郑丙辉,曹伟 (4291)
典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征	朱国锋,蒲焘,何元庆,王培震,张建龙,张宁宁,辛惠娟 (4300)
螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究	周露洪,谷孝鸿,曾庆飞,毛志刚,高华梅,孙明波 (4307)
固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究	沈清清,彭谦,赖泳红,纪开燕,韩秀林 (4316)
采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为	肖萍,肖峰,赵锦辉,秦潼,王东升,冯金荣,许光 (4322)
水体中甲基汞光化学降解特征研究	孙荣国,毛雯,马明,张成,王定勇 (4329)
土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究	李时银,李小荣,朱怡苹,朱江鹏,王国祥 (4335)
酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究	陈超,赵倩,封莉,张立秋 (4340)
利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究	王夏琳,李睿华 (4346)
地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究	郭磊,贾永刚,付腾飞,刘晓磊,赵战坤 (4352)
表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究	谢杰,王哲,吴德意,李春杰 (4361)
抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测	季军远,邢雅娟,郑平 (4367)
废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究	王振,刘超翔,李鹏宇,董健,刘琳,朱葛夫 (4373)
基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氮水处理	庆承松,鲍韬,陈天虎,陈冬,谢晶晶 (4380)
硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究	钟晨宇,叶杰旭,李若愚,陈胜,孙德智 (4387)
水平电场作用下活性污泥的脱水研究	季雪元,王毅力,冯晶 (4393)
多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中降解的影响	宋宁慧,单正军,石利利,郭敏,许静,孔德洋 (4400)
碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究	陈广银,郑正,常志州,王海芹,叶小梅 (4406)
含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为	王兴润,农泽喜,王琪 (4412)
国家大气污染物排放标准体系研究	江梅,张国宁,张明慧,邹兰,魏玉霞,任春 (4417)
环境基准向环境标准转化的机制探讨	毕岑岑,王铁宇,吕永龙 (4422)
对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析	傅国伟 (4428)
《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录	(4434)
《环境科学》征订启事(4099)	
《环境科学》征稿简则(4166)	
信息(4180, 4219, 4225, 4275)	
专辑征稿通知(4172)	

水平电场作用下活性污泥的脱水研究

季雪元, 王毅力*, 冯晶

(北京林业大学环境科学与工程学院, 北京市污染水源地控制技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 通过考察水平电场作用下活性污泥的性质 (pH、电导率)、絮凝调理及电场因素 (电压大小、电场应用方式、极板间距) 对污泥电脱水效果的影响, 确定了水平电场下污泥电脱水的最佳条件。结果表明, 对于本研究的活性污泥, 以水平电场为驱动力进行脱水, 在原始 pH (6.93)、电导率 = $1.46 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的条件下污泥电脱水效果最好; 投加阳离子型聚丙烯酰胺 (CPAM) 可以使污泥脱水率提高 30%~40%, 缩短达到相同电脱水效果的时间, 但对电脱水率的提高不显著。水平电场施加 60 min, 絮凝调理后污泥的电脱水率可达 83.12%, 而对应的原始污泥则需要 120 min 才能达到 75.31% 的电脱水效果。延迟电场应用对污泥电脱水效果产生抑制作用。此外, 本研究确定的最佳脱水条件为: CPAM 投药量为 $9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 电场强度为 $600 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, 极板间距为 40 mm, 电场应用时间为 60 min。在上述最佳条件下对活性污泥进行电脱水, 其含水率从 99.30% 降至 95.15%, 脱水率可达 85.33%。

关键词: 活性污泥; 水平电场; 污泥性质; 絮凝调理; 脱水率

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4393-07

Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field

Ji Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing

(Beijing Key Laboratory for Source Control Technology of Water Pollution, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: For an electro-dewatering process of activated sludge (AS), the effect of pH and conductivity of AS, flocculation conditioning and operation factors of horizontal electric field (voltage magnitude, method of applying electric field and distance between plates) were investigated, and the corresponding optimum electro-dewatering conditions were also obtained. The results showed that the best electro-dewatering effect was achieved for AS without change of its pH value (6.93) and conductivity ($1.46 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$). CPAM conditioning could lead to the increase of 30%-40% in the dewatering rate and accelerate the dewatering process, whereas a slight increase in the electro-dewatering rate. The electro-dewatering rate for conditioned AS reached 83.12% during an electric field applied period of 60 minutes, while this rate for original AS could be 75.31% even the electric field applied period extended to 120 minutes. The delay of applying the electric field had an inhibition effect on the AS electro-dewatering rate. Moreover, the optimum conditions for AS electro-dewatering were followed: CPAM dose of $9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, electric field strength of $600 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, distance between the two plates of 40 mm, dehydration time of 60 minutes. Under above optimum conditions the AS electro-dewatering rate could approach to 85.33% and the moisture content in AS decreased from 99.30% to 95.15% accordingly.

Key words: activated sludge; horizontal electric field; sludge characteristics; flocculation conditioning; dewatering rate

剩余污泥是城市污水处理厂污水处理工艺所产生的固体废弃物, 其含水率高 (99% 左右), 脱水性能差, 处理处置困难^[1~3], 因而高效的污泥脱水技术的开发和应用是污水处理厂正常运行的保证。目前常见的污泥脱水技术主要包括自然干燥、热干化、机械脱水、电脱水等, 其中电脱水技术尚未进行工程应用^[4]。大量的研究表明, 自然干燥法占地面积大, 处理周期长; 热干化法工艺设备复杂, 操作要求及能耗高; 机械脱水的脱水性能尚存在一定局限, 只能去除污泥的自由水, 脱水后污泥仍含有 80% 左右的水分^[4~6]。而电脱水作为一种以电场为驱动力的固液分离技术, 其原理是在电场的作用下, 污泥中的负电性颗粒通过电泳作用向阳极迁移, 而处于双电层-扩散层内的反离子携带水分通过电渗作用向

阴极迁移。目前的研究显示, 该技术不仅可以脱除污泥中的自由水和部分束缚水, 而且操作较为稳定^[4,5], 因此有望成为安全、高效、经济的污泥处理处置的技术。

目前, 在污泥电脱水技术的研究方面, 以垂直方向的直流电场为驱动力的电脱水技术为主。然而该技术在脱水初始阶段阳极附近污泥含水率迅速降低, 脱水过程电极附近发生电化学反应而产生一些

收稿日期: 2012-02-24; 修订日期: 2012-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21177010, 51078035); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20100014110004); 中央高校专项基金北京林业大学科技创新计划项目 (JC2011-1, TD2010-5)

作者简介: 季雪元 (1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染控制理论与技术, E-mail: xueyuan4967@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wangyil@mail@126.com

气体(O_2 和 H_2),上述现象均会导致接触电阻急剧增加,严重抑制污泥脱水效果的提高^[5,7]. 鉴于此,Yoshida 等^[8,9]研发了多级电脱水装置,并提出以交变电场为驱动力,周期性改变电极方向的电脱水技术,Rabie 等^[10]尝试采用间断电脱水技术进行污泥脱水,但是这些措施对脱水效果的改善均不显著.Ho 等^[11]指出采用旋转阳极可以抑制阳极附近污泥饼的形成,从而降低接触电阻,提高脱水能效,但是旋转阳极的应用导致系统能耗增加;周加祥等^[12]提出采用水平电场(反应器内阴阳极板间电流方向与重力方向垂直)进行污泥脱水,与垂直电场(反应器内阴阳极板间电流方向与重力方向一致)相比,可以解决阳极接触电阻增加对电脱水过程的影响,减少电解气体对脱水系统的危害,提高污泥脱水效率,简化设备结构,更适合于大规模污泥脱水装置的建设^[5,12].

尽管如此,水平电脱水技术的研究还是较少,其反应器关键结构和工艺参数尚需进一步探讨. 鉴于此,本研究从污泥性质、絮凝调理及电场施加条件参数等方面进行分析,确定了水平电场污泥脱水的优化条件,以期推进污泥电脱水技术的发展.

1 材料与方法

1.1 污泥样品

剩余活性污泥采自北京市某污水处理厂曝气池,污泥样品在 2 h 内运至实验室后,置于 $(4 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 冰箱保存备用,为了尽可能保证污泥性质的稳定,每批实验在 5 d 内完成. 活性污泥基本性质如表 1 所示.

表 1 活性污泥基本性质 Table 1 Characteristics of AS			
pH	电导率/ $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$	含水率/%	TSS/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
7.00 ± 0.10	1.46 ± 0.04	99.25 ± 0.05	$5 \sim 7$

1.2 实验装置

水平电脱水反应器的实验装置如图 1 所示. 其主体装置由有机玻璃制成,使用 $\text{IrO}_2\cdot\text{Ta}_2\text{O}_5$ 网状电板作为阴阳电极,孔径 $60\ \mu\text{m}$ 的尼龙滤布作为过滤介质. 阴极板与滤布之间放置一块滤板,固定滤布并保证滤布与阴极板间有一定间隔. 阴阳电极板及过滤介质截面积均为 $85\ \text{mm} \times 50\ \text{mm}$,初始极板间距为 $65\ \text{mm}$,同时可以在 $65 \sim 20\ \text{mm}$ 的范围内对极板间距进行调节. 电源为 DH1719A-4 单路稳压稳流电源.

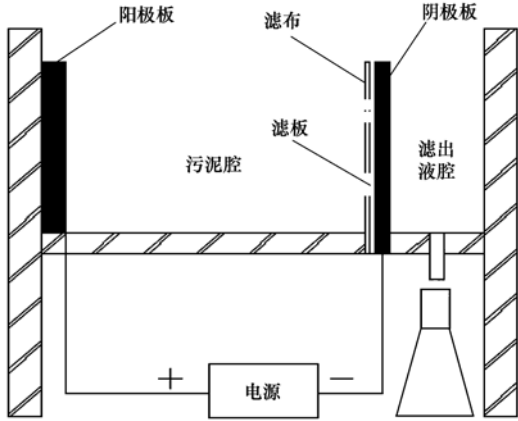


图 1 水平电场污泥脱水反应器
Fig. 1 Experimental reactor of sludge dewatering under horizontal electric field

1.3 实验方法

分别将数滴 $1\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{HCl}$ 或 $1\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{NaOH}$ 溶液加入活性污泥中,用玻璃棒轻微搅拌均匀,调节其 pH 值;采用 $2\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{KCl}$ 溶液对电导率进行调节;然后对上述污泥进行水平电场电脱水实验,探讨 pH、电导率对脱水效果的影响. 取适量活性污泥置于 1 L 的有机玻璃烧杯中,以 $270\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的强度进行快速搅拌,同时迅速加入不同剂量的 0.1% 阳离子聚丙烯酰胺(CZ-8698,北京北科绿洁环保科技有限公司)溶液,然后依次快速搅拌 60 s ($270\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$),慢速搅拌 60 s ($20\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$),搅拌结束后将污泥及上清液置于反应器内,进行相关脱水实验,探讨絮凝调理对水平电场电脱水效果的影响.

水平电场施加参数的影响实验程序如下,将适量原始污泥置于水平电场反应器,施加直流电场,改变操作条件(电场强度 $0 \sim 750\ \text{V}\cdot\text{m}^{-1}$,电场应用方式,极板间距),持续收集阴极滤出液,测定滤出液质量的逐时变化(PL2002-IC 型电子天平,上海梅特勒-托利多仪器有限公司),探讨上述电场施加参数的影响.

1.4 分析方法

1.4.1 污泥的理化性质

活性污泥的 pH 值采用 PB-10 型 pH 计(Sartorius,德国)测定;污泥电导率由 EC215 型电导率仪(北京康高特科技有限公司)测定;通过 Zetasizer Nano Z 型 Zeta 电位仪(Malvern Instrument,英国)测定污泥及其上清液的 Zeta 电位;污泥上清液的黏度采用 DV-III 型流变仪(Brookfield,美国)测定;另外,上清液中胶体粒子表面电荷的测定依据胶体滴定法进行^[13,14].

1.4.2 污泥的脱水效果

污泥的初始含水率采用质量法分析测定^[15]；脱水过程中，污泥的含水率及脱水率分别按公式(1)、(2)计算。

$$\text{污泥含水率} = \frac{m_s \times W_0 - m_w}{m_s - m_w} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{污泥脱水率} = \frac{m_w}{m_s \times W_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中， m_w 为滤出液质量，g； m_s 为初始污泥总质量，g； W_0 为初始污泥含水率，%。

2 结果与讨论

2.1 污泥性质对电脱水的影响

2.1.1 初始 pH 对污泥电脱水的影响

不同 pH 值的活性污泥在 40 V 电压下的脱水效果如图 2(a) 所示。随着污泥电脱水的进行，脱水率逐渐提高。活性污泥在原始 pH 值时进行电脱水，最终脱水率达到 73.89%；而进行酸化和碱化后的活性污泥，最终脱水率分别为 67.00% 和 59.34%。可见，对活性污泥进行酸化或碱化，均导致污泥脱水效果的降低，pH = 10.52 的碱性条件对污泥电脱水效果的抑制作用更强。此外，Citeau 等^[16]指出以垂直电场为驱动力进行污泥脱水，在弱酸性 (pH = 5.30) 条件下

污泥电脱水效果最佳。然而本研究结果表明，活性污泥在原始 pH (6.93) 条件下电脱水效果最好，这一结论与 Citeau 等^[16]针对原始活性污泥的研究结果不一致，原因可能是所采用的电场方向及污泥性质不同。

图 2(b) 为活性污泥的 Zeta 电位、电导率及上清液黏度随 pH 值的变化曲线。如图所示，活性污泥的 Zeta 电位随 pH 值的升高逐渐降低。对活性污泥进行酸化或碱化，均导致污泥的电导率升高。酸化后污泥上清液的黏度变化幅度较小，无明显变化趋势；然而，碱化后污泥上清液的黏度逐渐增大。根据公式(3)^[16]，采用电脱水过程中典型的电流值进行电渗流速估算，结果见表 2。可见，活性污泥经过酸化或碱化处理后，污泥电脱水过程的初期、末期及平均电渗流速均降低。此外，与污泥碱化相比，经过酸化处理的污泥，在脱水初期受到的抑制作用更显著。但从污泥电脱水整体效果看，碱化对污泥电脱水性能的抑制作用更强。这一结论与图 3 所示的研究结果一致。

$$q_E = \frac{D|\zeta|i}{\mu\lambda} \quad (3)$$

式中， q_E 为电渗流速， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； D 为介电常数， $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$ ； i 为电流密度， $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ ； ζ 为污泥 Zeta 电位，V； λ 为污泥电导率， $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ ； μ 为上清液黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

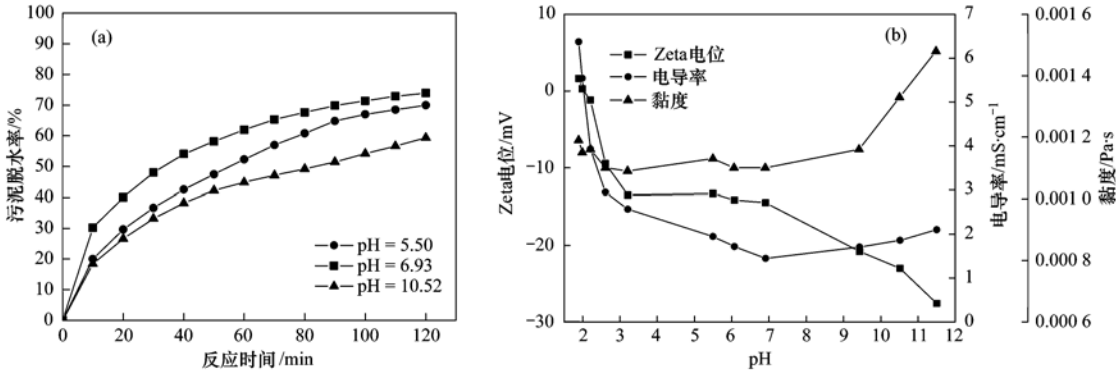


图 2 初始 pH 值对活性污泥电脱水及理化性质的影响

Fig. 2 Effects of initial pH values on electro-dewatering and physicochemical properties of AS

表 2 不同初始 pH 值条件下电渗流速估算值

Table 2 Estimated values of electro-osmotic flow at different initial pH values

样品 pH	介电常数 / $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$	Zeta 电位 /V	黏度 / $\text{Pa}\cdot\text{s}$	电导率 / $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$	电流密度/ $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$			电渗流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$		
					初期	末期	平均	初期	末期	平均
5.50	7.12×10^{-10}	-0.013 33	0.001 13	0.195	17.65	17.06	19.36	7.60×10^{-7}	7.34×10^{-7}	8.33×10^{-7}
6.93	7.12×10^{-10}	-0.014 50	0.001 10	0.145	24.71	11.76	14.31	15.98×10^{-7}	7.61×10^{-7}	9.26×10^{-7}
10.52	7.12×10^{-10}	-0.023 03	0.001 33	0.186	21.18	4.71	12.35	14.03×10^{-7}	3.12×10^{-7}	8.18×10^{-7}

2.1.2 初始电导率对污泥电脱水的影响

图 3 为不同电导率的活性污泥在 40 V 电压下

的脱水效果。可见，当污泥未调节电导率时 ($\sigma = 1.46 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)，其电脱水效果最佳，电导率升高至

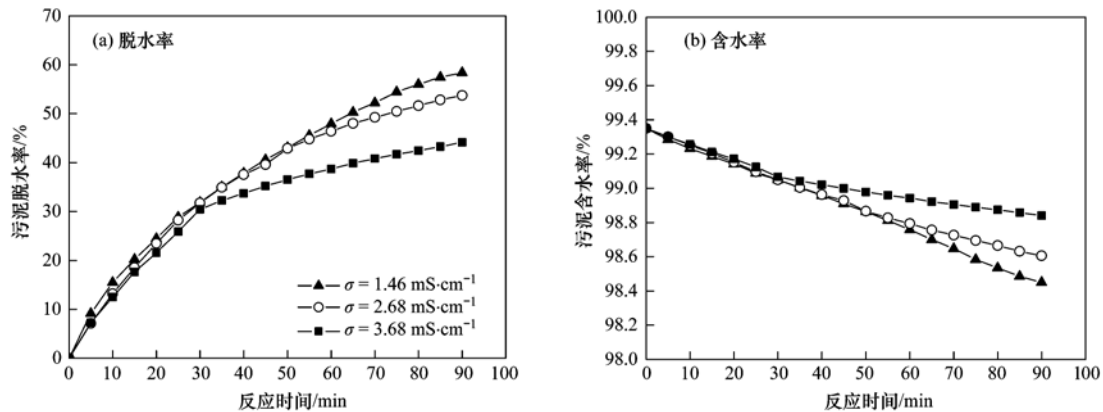


图3 初始电导率对活性污泥电脱水的影响

Fig. 3 Effects of initial conductivity on electro-dewatering of AS

2.68 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时污泥脱水率降低, 达到 3.68 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时污泥电脱水效果最差. 此外, 活性污泥 ($\sigma = 3.68 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$) 进行 30 min 电脱水后, 污泥的脱水率曲线出现拐点. 依据公式(3)^[16]可知, 污泥电导率的提高会导致电渗流速降低, 电脱水效果变差. 此外, Citeau 等^[16]指出, 活性污泥含盐量的增加对电脱水产生抑制作用, 并且会提高电源能耗. 这与本研究所得结论一致.

2.2 絮凝调理对污泥电脱水的影响

为减少污泥胞外聚合物(EPS)的影响、提高脱水能力, 在污泥预处理过程中, 经常通过添加絮凝剂进行污泥调理^[17-19]. 絮凝调理可以去除污泥中的大部分自由水及部分间隙水, 使固液分离效果明显. 图4(a)和图4(b)为20 V电压下原始污泥和不同CPAM投药量下污泥脱水效果的变化曲线. 原始污泥经CPAM絮凝调理后, 在脱水0~5 min时, 污泥脱水率急剧上升, 此后脱水率缓慢上升, 对应的脱水速率逐渐下降. 与原始污泥相比, 絮凝调理后污泥的脱水率提高30%~40%. CPAM投药量为5~7 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 污泥的脱水率增幅较明显, 投药量增加至9 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 脱水率仍有提高, 而增至11 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 脱水效果增加不明显, 因此在本实验中, CPAM的最佳投药量选定为9 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 对应的污泥脱水率可达80.94%, 含水率降低至96.43%.

图4(c)为活性污泥离心上清液中胶体的Zeta电位和表面电荷密度随CPAM投药量的变化曲线. 如图所示, 上清液Zeta电位随着CPAM投药量的增加逐渐升高, 其绝对值逐渐降低; 此外, 原始活性污泥离心上清液中胶体的表面电荷密度为(-0.150 ± 0.00) $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$, 当CPAM投药量为7 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 表面电荷密度上升到(-0.107 ± 0.00) $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$, 在

此后的2个投药量下, 表面电荷密度有些降低. 总体而言, 投加絮凝剂CPAM能够中和污泥絮体表面的负电荷, 使污泥发生絮凝作用而产生大的聚集体^[20], 从而提高污泥的机械脱水性能. 然而, 依据公式(3)^[16]可知, 污泥颗粒Zeta电位绝对值的降低对电渗流速产生不利影响, 抑制污泥的电脱水效果. 因此, 污泥表面负电荷量的降低对其电脱水效果既具有提高作用, 又具有抑制效果, 从而产生如图4(d)的结果, 即CPAM的投加缩短了达到相同电脱水效果的时间, 但是对污泥电脱水率的提高并不显著. 因此, 在本研究中, 絮凝剂CPAM的投加可以改善污泥的脱水性能, 提高其脱水率, 缩短达到相同电脱水效果的时间, 但对电脱水效果的提高不显著, 这一结论与Saveyn等^[19]对絮凝调理后污泥电脱水性能的研究结果一致.

2.3 电场施加条件对污泥电脱水的影响

2.3.1 电压的影响

图5(a)为活性污泥在不同电压(电场强度)下脱水率的变化曲线. 在极板间距一定的情况下, 污泥的脱水率随电压(电场强度)的增大而逐渐提高. 这说明, 电场强度的增大导致电渗流速增加, 污泥脱水驱动力增强, 提高了脱水效率^[21]. 图5(b)给出电脱水过程中电流的变化趋势. 随着污泥电脱水的进行, 电流逐渐减小, 较高的电场强度始终获得较大的电流, 但当电场强度为750 $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 时, 脱水50 min后电流急速下降. 然而, 以电场为驱动力进行污泥脱水时, 过高的电场强度会加剧阴阳电极处电化学反应的发生, 生成的 OH^- 和 H^+ 引起电极处污泥pH值的变化, 从而导致阴极附近污泥Zeta电位的绝对值降低, 阳极附近污泥Zeta电位的绝对值升高^[10]. 由公式(3)^[16]可知, 阴极附近污泥Zeta电位绝对值

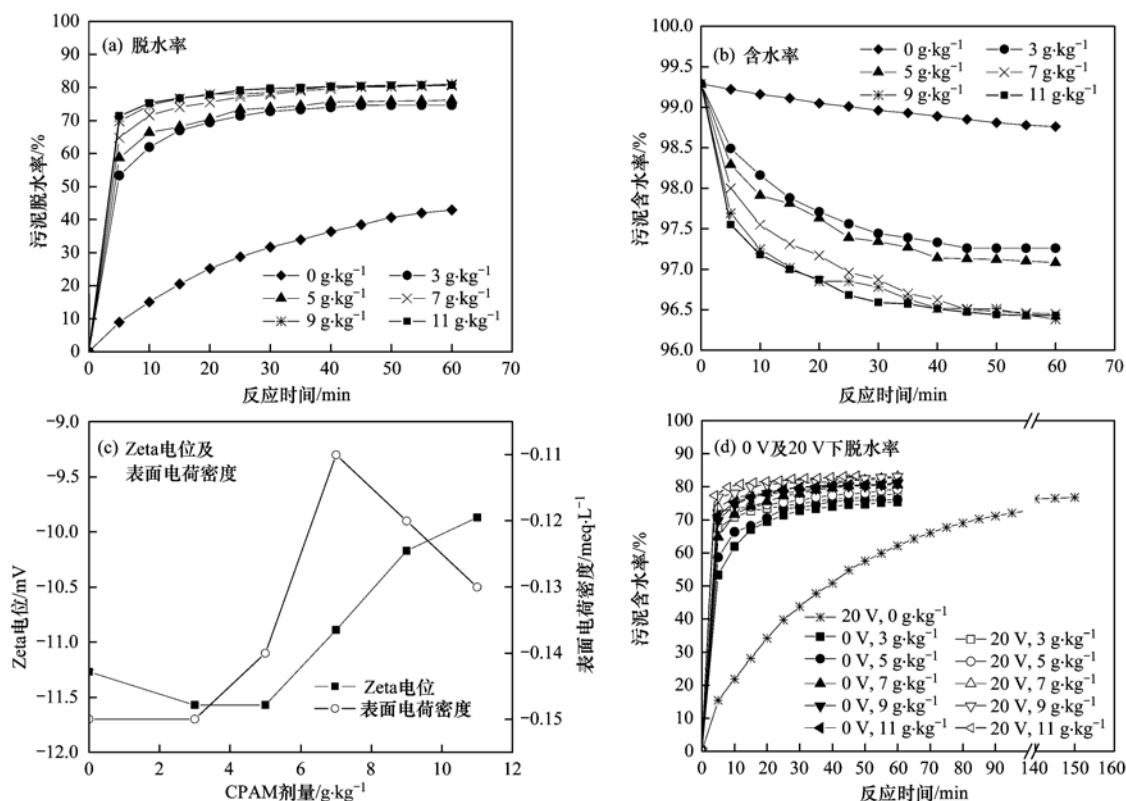


图4 CPAM投药量对活性污泥电脱水效果及理化性质的影响

Fig. 4 Effects of CPAM doses on electro-dewatering rates and physicochemical properties of AS

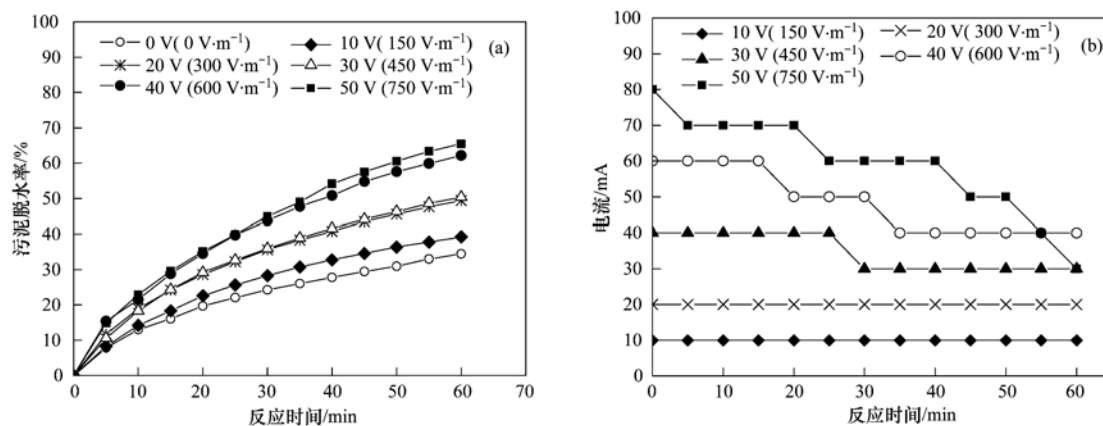


图5 不同电场强度下活性污泥脱水效果及电流的变化

Fig. 5 Variation of electro-dewatering rates of AS and electric current with electric field strength

的降低减小了电渗流速,抑制了电脱水的进行.此外,过高的电场强度会加重阳极处电化学反应 $M \rightarrow M^{n+} + ne^-$ (M 指阳极材料) 的发生,致使阳极氧化腐蚀现象严重,影响系统的耐用性^[22,23]. 综合考虑脱水效果、系统耐用性及能耗,本实验中的最佳电场强度选定为 $600 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$.

2.3.2 电场应用方式的影响

(1) 延长电场应用时间对污泥电脱水的影响
电场的应用时间可以影响污泥的脱水效果和能

量消耗. 如图6所示,反应初期活性污泥中的自由水被迅速脱除,在脱水 $0 \sim 5 \text{ min}$ 时,污泥脱水率急速上升,脱水速率最大值达 $3.08\% \cdot \text{min}^{-1}$, 5 min 后脱水速率逐渐下降,随着脱水的进行,脱水率逐渐提高,含水率逐渐降低. 根据文献的研究,电脱水装置的电场应用时间一般为 120 min ^[24],图6显示这一时间的脱水率趋于稳定值 75.31% ,继续施加电场污泥的脱水率变化不大. 而由图4(a)可知,对于絮凝调理污泥,脱水 60 min 后污泥的脱水率趋于稳

定,脱水率达 83.12%,比原始污泥的脱水率提高了 7.81 个百分点. 根据上述研究结果表明,对于原始污泥施加电场时间以 120 min 为宜,而絮凝调理污泥的最佳电脱水时间为 60 min.

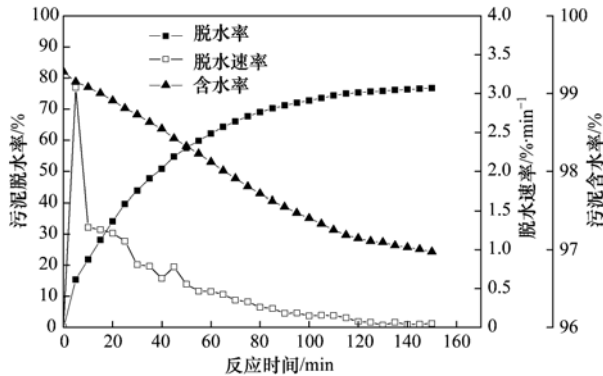


图 6 延长电场应用时间对活性污泥脱水的影响

Fig. 6 Effects of extending the application of the electric field on electro-dewatering of AS

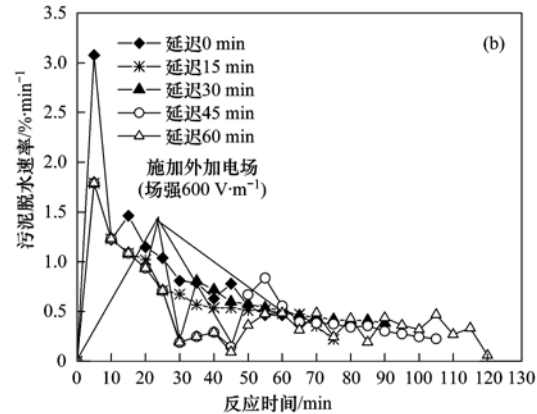
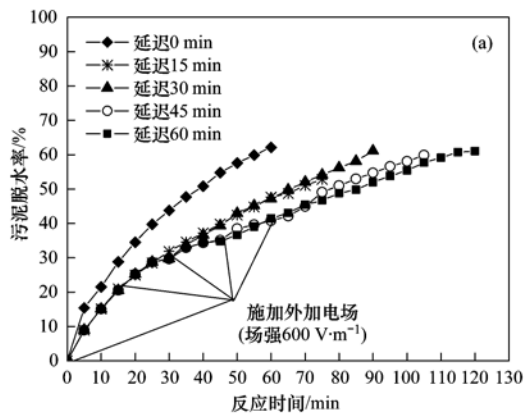


图 7 延迟电场应用对活性污泥电脱水的影响

Fig. 7 Effects of delaying the application of the electric field on electro-dewatering of AS

一致,原因可能是所采用的电场方向及污泥性质不同.

2.3.3 极板间距的影响

相同电场强度下极板间距影响污泥的脱水效果. 如图 8 所示,在电场强度 $600 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 条件下,极板间距为 40 mm 时,污泥的电脱水效果最佳,脱水率达 64.69%,增大或减小极板间距均会导致污泥脱水率降低. 原因可能是脱水效果与反应器底端污泥吸附的水分(难脱离)占总水量的比例有关^[26],随着极板间距的增大,反应器底端污泥吸附的水分占总水量比例降低,致使污泥脱水率增加. 然而,在一定电压下,极板间距的增大会导致电场强度降低、污泥自由水迁移时间增加,从而抑制污泥电脱水效果的提高. 上述 2 种现象对污泥电脱水效果产生相

(2) 延迟电场应用对污泥电脱水的影响

在污泥电脱水过程中,系统能耗随反应进行逐渐增大. 在提高脱水效果的同时,为降低能耗,应尽量缩短电场的应用时间. 图 7(a) 为延迟电场施加时间污泥的脱水率逐时变化曲线. 可见,延迟 15 min 施加电场,污泥的脱水率达 52.80%,与不延迟电场所得污泥脱水率 62.15% 相比下降 9.35 个百分点,而延迟时间增加至 30 ~ 60 min 时,污泥电脱水率反而增加,接近未延迟的结果,但均低于未延迟所得的污泥脱水率. 图 7(b) 为电场延迟应用时污泥脱水速率的变化曲线. 如图所示,延迟 15 ~ 60 min 电场后,污泥的电脱水速率低于未延迟电场污泥脱水速率. 由此可见,以水平电场为驱动力进行污泥脱水不宜延迟电场的应用. 然而, Miller 等^[25]在以垂直方向的直流电场为驱动力进行电脱水的研究中指出,延迟或暂停应用 5 ~ 15 min 电场对污泥电脱水效果没有明显的抑制作用. 与本研究结果不

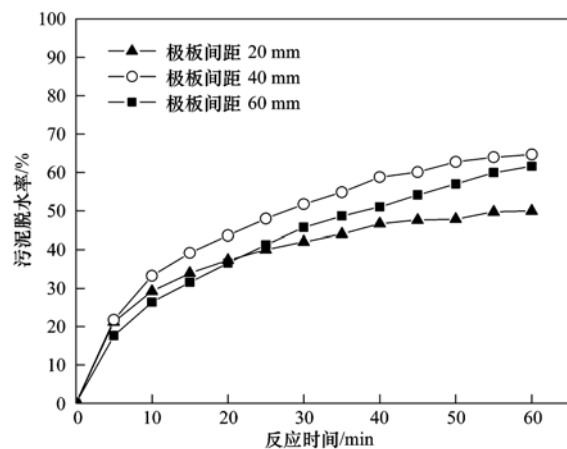


图 8 不同极板间距(污泥厚度)下活性污泥电脱水效果

Fig. 8 Electro-dewatering rates of AS at different distances between plates (sludge thickness)

反的影响,不同极板间距下它们的影响程度不同,导致得到不同的脱水效果. 因此,不同电场强度下,极板间距过大或者过小,均会影响污泥脱水效果. 本实验中,当电场强度为 $600 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,极板间距 40 mm 为宜.

2.4 最佳条件下污泥脱水效果

在上述最佳条件下进行活性污泥的电脱水实验,结果表明污泥的含水率从 99.30% 降至 95.15%,污泥最终脱水率达 85.33%. 而周加祥等^[12]针对水平电场污泥脱水的研究结果显示,在 40 V 电压下活性污泥(含水率 97.0%)脱水 60 min(极板间距 65 mm),污泥最终脱水率为 50%,经过估算相应的含水率可达 94%. 脱水效果差异的存在,可能是由于文献[12]在进行污泥电脱水前,将原始污泥过滤浓缩,而导致污泥絮体增大. 另外,实验所采用的活性污泥性质的差异也可能导致水平电脱水效果的不同.

3 结论

(1) 污泥在原始 pH 及电导率条件下,电脱水效果最好.

(2) 絮凝剂 CPAM 的投加可以改善污泥的脱水性能,并可以缩短达到相同电脱水效果的时间,但对污泥电脱水率的提高不显著.

(3) 水平电场施加条件对活性污泥的电脱水效果产生重要的影响. 电场强度和其应用时间的增加均有利于电脱水效果的提高,但电极的腐蚀、能耗的增加会限制这些因素的进一步增加. 水平电场为驱动力进行污泥脱水不宜使用延迟电场的操作模式,极板间距过大或者过小均对污泥电脱水效果不利.

参考文献:

- [1] 陈世朋, 张景来. 污水处理中的污泥脱水技术研究进展[J]. 污染防治技术, 2006, **19**(1): 16-19.
- [2] 荀锐, 王伟, 乔玮, 等. 城市污泥处理现状与强化脱水的水热减量化技术[J]. 环境卫生工程, 2008, **16**(2): 28-32.
- [3] 周贞英, 袁海平, 朱南文, 等. 电化学处理改善剩余污泥脱水性能[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(10): 2199-2203.
- [4] 卢宁, 文一波, 魏婧娟. 污泥的电渗透脱水技术研究进展[J]. 环境科学与管理, 2010, **35**(3): 85-87.
- [5] Mahmoud A, Olivier J, Vaxelaire J, *et al.* Electrical field: a historical review of its application and contributions in wastewater sludge dewatering[J]. Water Research, 2010, **44**(8): 2381-2407.
- [6] Barton W A, Miller S A, Veal C J. The electrodewatering of sewage sludge[J]. Drying Technology, 1999, **17**(3): 497-522.
- [7] Weber K, Stahl W. Improvement of filtration kinetics by pressure electrofiltration[J]. Separation and Purification Technology, 2002, **26**(1): 69-80.
- [8] Yoshida H. Practical aspects of dewatering enhanced by electroosmosis[J]. Drying Technology, 1993, **11**(4): 787-814.
- [9] Yoshida H, Kitajyo K, Nakayama M. Electroosmotic dewatering under A. C. electric field with periodic reversals of electrode polarity[J]. Drying Technology, 1999, **17**(3): 539-554.
- [10] Rabie H R, Mujumdar A S, Weber M E. Interrupted electroosmotic dewatering of clay suspensions[J]. Separations Technology, 1994, **4**(1): 38-46.
- [11] Ho M Y, Chen G H. Enhanced electro-osmotic dewatering of fine particle suspension using a rotating anode[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2001, **40**(8): 1859-1863.
- [12] 周加祥, 余鹏, 刘铮, 等. 水平电场污泥脱水过程[J]. 化工学报, 2001, **52**(7): 635-638.
- [13] Jin B, Wilén B M, Lant P. A comprehensive insight into floc characteristics and their impact on compressibility and settleability of activated sludge[J]. Chemical Engineering Journal, 2003, **95**(1-3): 221-234.
- [14] Wilén B M, Jin B, Lant P. The influence of key chemical constituents in activated sludge on surface and flocculating properties[J]. Water Research, 2003, **37**(9): 2127-2139.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版) 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] Citeau M, Larue O, Vorobiev E. Influence of salt, pH and polyelectrolyte on the pressure electro-dewatering of sewage sludge[J]. Water Research, 2011, **45**(6): 2167-2180.
- [17] Laursen S, Jensen J B. Electroosmosis in filter cakes of activated sludge[J]. Water Research, 1993, **27**(5): 777-783.
- [18] Gingerich I, Neufeld R D, Thomas T A. Electroosmotically enhanced sludge pressure filtration[J]. Water Environment Research, 1999, **71**(3): 267-276.
- [19] Saveyn H, Pauwels G, Timmerman R, *et al.* Effect of polyelectrolyte conditioning on the enhanced dewatering of activated sludge by application of an electric field during the expression phase[J]. Water Research, 2005, **39**(13): 3012-3020.
- [20] Dentel S K. Conditioning[A]. In: Spinoso L, Vesilind P A. Sludge into biosolids: processing, disposal, utilization[C]. London: IWA Publishing, 2001. 278-310.
- [21] Adamson A W. Physical chemistry of surfaces[M]. (5th ed.) New York: John Wiley & Sons, 1990.
- [22] Saveyn H, Van der Meer P, Pauwels G, *et al.* Bench-and pilot-scale sludge electrodewatering in a diaphragm filter press[J]. Water Science and Technology, 2006, **54**(9): 53-60.
- [23] Tuan P A, Jurate V, Mika S. Electro-dewatering of sludge under pressure and non-pressure conditions[J]. Environmental Technology, 2008, **29**(10): 1075-1084.
- [24] Mahmoud A, Olivier J, Vaxelaire J, *et al.* Electro-dewatering of wastewater sludge: influence of the operating conditions and their interactions effects[J]. Water Research, 2011, **45**(9): 2795-2810.
- [25] Miller S A, Murphy A, Veal C J, *et al.* Improved filtration of sewage sludge using electro-dewatering[R]. Australia: the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), 1998. 65.
- [26] 马德刚, 张书廷, 季民, 等. 污泥电渗透脱水操作条件的优化研究[J]. 中国给水排水, 2005, **21**(5): 36-38.

CONTENTS

Preface	CHEN Wei-ping (4069)
Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review	CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, <i>et al.</i> (4070)
Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water	PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4081)
Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment	PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4088)
Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4094)
Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4100)
Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4108)
Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4115)
Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musks in Soils Input Through Recycle Water Irrigation	WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4121)
Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality	WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (4127)
Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing	ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4133)
Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing	CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, <i>et al.</i> (4141)
Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO	WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, <i>et al.</i> (4151)
Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station	ZHANG Jun-he, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (4159)
Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment	ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, <i>et al.</i> (4167)
Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanes and <i>n</i> -Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw	LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (4173)
Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car	HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4181)
Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai	LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, <i>et al.</i> (4188)
Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary	YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, <i>et al.</i> (4194)
Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation	LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (4205)
Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, <i>et al.</i> (4212)
Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season	MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, <i>et al.</i> (4220)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (4226)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4237)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River	WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, <i>et al.</i> (4244)
Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site	PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, <i>et al.</i> (4251)
Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China	LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, <i>et al.</i> (4256)
Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (4263)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai	LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4270)
Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (4276)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River	ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (4284)
Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake	QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (4291)
Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region: A Case Study of Baishui Glacier No. 1	ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (4300)
Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification	ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, <i>et al.</i> (4307)
Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on <i>Microcystis aeruginosa</i>	SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, <i>et al.</i> (4316)
A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process	XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, <i>et al.</i> (4322)
Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, <i>et al.</i> (4329)
Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent	LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, <i>et al.</i> (4335)
Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors	CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, <i>et al.</i> (4340)
Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS)	WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)
Experimental Research on <i>In-Situ</i> Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage	GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, <i>et al.</i> (4352)
Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites	XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, <i>et al.</i> (4361)
Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters	JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping (4367)
Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks	WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, <i>et al.</i> (4373)
Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation	QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (4380)
Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge	ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruoyu, <i>et al.</i> (4387)
Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field	JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing (4393)
Effects of Multiple Environmental Factors on Trifluorsulfuron-methyl Degradation in Soils	SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, <i>et al.</i> (4400)
Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested <i>Spartina alterniflora</i>	CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, <i>et al.</i> (4406)
Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste	WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi (4412)
Study on Emission Standard System of Air Pollutants	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, <i>et al.</i> (4417)
Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China	BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long (4422)
Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals	FU Guo-wei (4428)

《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)

2012年12月15日 33卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 12 Dec. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行