

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.11.003

## 基于朗格利尔指数解析曝气器结垢研究

王建利, 姚晓琰, 高放, 薛晓飞, 冒建华, 李凌云, 史彦伟  
(北控水务<中国>投资有限公司, 北京 100102)

**摘要:** 微孔曝气器是市政污水处理厂常用的气体扩散设备,但长期运行过程中的结垢不仅导致能耗增加,甚至会影响曝气系统的安全运行。为此,选择不同地区的12个污水处理厂,结合对结垢成分和好氧区混合液理化性质的分析,探讨了地域和运行条件对结垢的影响。结果表明,除西南地区外,污水厂曝气器上的主要结垢物质是铁盐。基于朗格利尔指数对曝气器结垢因素进行多元回归分析,发现南方区域的结垢受温度的影响,而总碱度是导致北方区域曝气器结垢的主要因素。根据造成结垢的原因,可选择合适的除磷药剂等措施加以应对。

**关键词:** 污水处理厂; 曝气器; 结垢; 朗格利尔指数; 多元回归分析

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)11-0013-06

### Analysis of Scale Formation of Aerator Based on Langelier Index

WANG Jian-li, YAO Xiao-yan, GAO Fang, XUE Xiao-fei, MAO Jian-hua,  
LI Ling-yun, SHI Yan-wei

(Beijing Enterprises Water Group <China> Investment Limited, Beijing 100102, China)

**Abstract:** Fine bubble aerators are the common air diffusion devices used in the aerobic area of municipal wastewater treatment plants (WWTPs). During long-term operation, scaling will be formed on the aerators, which may lead to an increase in energy consumption and influences the safe operation of the aeration system. The influencing factors of scaling in different regions and operating conditions were analyzed by characterizing the scaling fouling ingredients and physicochemical properties of mixed liquid in the aerobic zones. The results showed that the scaling on the aerators was constituted of iron, especially ferric phosphate, except WWTPs in the southwest region. The scaling factors of aerators were analyzed by multiple regression based on Langelier saturation index (LSI), and it was founded that scaling was dominated by temperature in the south while total alkalinity in the north. According to the cause of scaling, the preventive measures such as choosing suitable non-Fe phosphorus removal agents were given.

**Key words:** wastewater treatment plant; aerator; scaling; Langelier saturation index (LSI); multiple regression

随着我国城镇污水处理事业的高速发展,其能耗已超过全社会能耗的1%。污水处理已成为能耗密集型行业,这与低碳社会发展相背离。在污水处理过程中,曝气能耗占全厂总能耗的50%~

60%<sup>[1-2]</sup>。因此,保证曝气系统的稳定、高效运行,是好氧生物处理单元达到良好运行效果的前提,也是污水处理厂节能降耗的需求<sup>[3]</sup>。

实际运行中,污水厂的微孔曝气器经过长期使

通信作者: 高放 E-mail: Gaofang@bewg.net.cn

用后,水中的钙、镁、铁等物质沉积在曝气膜片上,造成微孔堵塞进而影响曝气效果,使充氧能力和搅拌性能大大降低<sup>[4]</sup>。由于扩散不畅,还会引起风机出口风压增大,从而使得风机长期在高负荷和高能耗下运行,增加了运行费用并影响污水厂的安全稳定生产<sup>[5-6]</sup>。

目前,有关曝气器所处环境的混合液化学特征和控制因素研究较为薄弱。饱和pH与饱和指数的概念由朗格利尔(Langelier)提出,用以判断结垢物质在液体中的析出趋势<sup>[7]</sup>。有研究者利用朗格利尔指数模型分析水质指标对管垢中腐蚀产物释放的影响,并通过模拟试验建立了代表总结垢物质浓度的非线性模型<sup>[8]</sup>。借鉴已有研究,选择北控水务下辖不同区域的12个污水处理厂为样本,通过调研曝气器表面结垢物、好氧池中混合液特性以及现场运行参数,分析了水质化学成分等对曝气器结垢产物释放的影响,并利用朗格利尔结垢模型对曝气器的结垢趋势进行判断,以期对曝气系统的优化运行提供指导。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料

为解决污水厂中曝气器出现结垢引起的高能耗等问题,选取各区域曝气风压阻力大和生化曝气能耗较高的污水处理厂作为备选厂;同时,针对不同地域的污水水质、气候等差异,将此类污水厂的曝气设备作为研究对象,具体如表1所示。

表1 污水处理厂信息

Tab.1 Lists of WWTPs

污水厂名称	省份	曝气器类型
北镇市北控水务有限公司	辽宁	管式
北镇市沟帮子清源污水处理有限公司	辽宁	盘式
锦州市北控水务有限公司	辽宁	盘式
玉溪北控水质净化有限公司	云南	管式
呼图壁县丰泉污水处理有限公司	新疆	盘式
临汾第一污水厂	山西	盘式
宜宾北控水务有限公司	四川	盘式
绵阳中科成污水净化有限公司	四川	盘式
花都污水厂	广州	盘式
南沙污水处理厂	海南	盘式
日照市岚山云通水务有限公司	山东	盘式
聊城市冠县嘉诚水质净化有限公司	山东	盘式

### 1.2 分析方法

采用X射线荧光光谱(XRF)分析堵塞曝气器表

面的结垢物质化学组分。取污水处理厂好氧池混合液,分析pH、TDS、碱度、铁、钙、铝、镁、锰等指标。其中,pH:pH分析仪,TDS:TDS分析仪,碱度:电位滴定法,铁、钙、铝、镁、锰等金属离子:电感耦合等离子发射光谱法(ICP-AES)。

### 1.3 运行条件和曝气系统参数调研

对各污水厂曝气器投入使用到更换整个周期内可能影响曝气器结垢的因素进行了调研,包括污水厂生化工艺、生化段药剂投加情况、曝气系统空气温度、曝气器维护情况等。调研指标的选取主要基于以下原因:污水厂生化工艺的选择会影响曝气方式,如连续曝气或间歇曝气,进而对曝气器结垢、堵塞产生影响;药剂的投加,尤其是金属盐药剂的投加会对曝气器表面结垢物组分和结垢程度产生影响;曝气系统风管温度与结垢物的生成速度相关;曝气器维护情况直接影响曝气器表面结垢物质清洗和使用寿命。

取样周期为2019年11月—2020年11月,温度测试频次为1次/月(取月均值),水质分析频次为1次/月(取月均值)。

### 1.4 结垢模型和回归分析

朗格利尔指数(LSI)是针对钙类结垢和水中pH之间的平衡表达式,用于判断物质的结垢沉积趋势,其计算公式见文献[9]。当 $LSI>0$ 时,结垢物会从水中析出,这种条件易于结垢;当 $LSI<0$ 时,原有水垢层会被溶解掉,不易形成结垢。

分析造成曝气器堵塞的主导因素,其模型公式如下所示:

$$LSI=pH-pH_s \quad (1)$$

$$pH_s=(9.7+A+B)-(C+D) \quad (2)$$

$$A=\lg(TDS-1)/10 \quad (3)$$

$$B=-13.12 \times \lg(T+273.15)+34.55 \quad (4)$$

$$C=\lg(TH)-0.4 \quad (5)$$

$$D=\lg(TA) \quad (6)$$

式中:TDS为水样中溶解性总固体含量; $T$ 为温度;TH为总硬度;TA为总碱度。

结合12个污水处理厂的混合液水样水质以及相应曝气盘上结垢物质的检测分析结果,运用SPSS软件对水质化学组分、污水处理厂运行条件与膜片结垢程度之间的相关性进行分析;同时,进一步利用多元回归分析方法判断不同条件对曝气器结垢趋势的影响程度。

## 2 结果与分析

### 2.1 曝气器表面结垢物质解析

此次调研收集了来自不同地域的污水处理厂更换的曝气器,利用 XRF 分析仪对曝气盘上的结垢物质的化学成分进行检测, XRF 分析结果如图 1 所示。

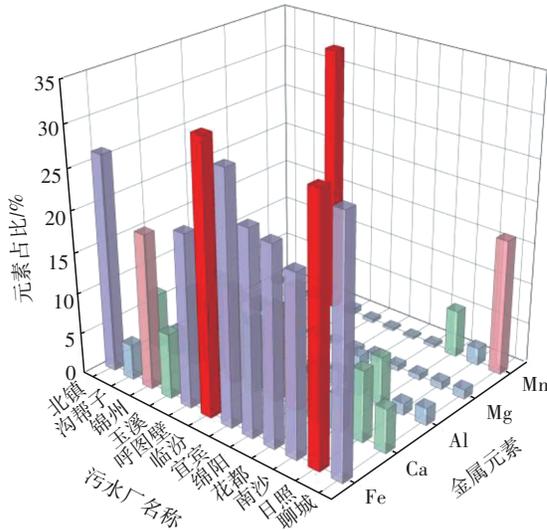


图1 污水处理厂结垢物中金属元素含量分布

Fig.1 Metal distribution of scales in WWTPs

从图1可以看出,对于不同地区的污水厂,造成结垢的主要金属物质有所差异,但综合来看主要为铁、钙、铝、镁、锰。在所检测的12个污水厂的曝气器中,有10个污水厂的结垢物质中铁含量最高,可达18.78%~32.37%;沟帮子污水厂的结垢物质中铝含量最高,占比为7.31%;玉溪污水厂的结垢物质中以锰含量最高,可达32.79%。

形成沉淀的物质多为金属氧化物、氢氧化物以及碳酸盐,此外,从 XRF 检测结果可以看出,P 和 Si 的含量也较高(见图2),P 多为污泥或除磷药剂吸附的 P 附着在曝气器表面,会形成一些磷酸盐和硅酸盐的不溶物,Si 含量高是因为含有大量的石英类物质,如泥沙等。

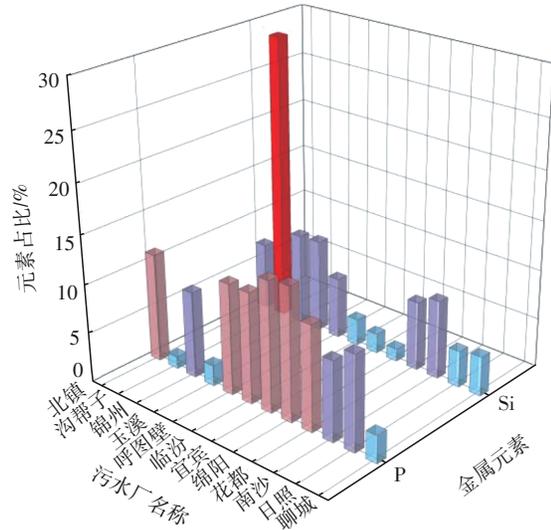


图2 污水处理厂结垢物中P和Si元素含量分布

Fig.2 P and Si distribution of scales in WWTPs

### 2.2 好氧区混合液解析

结合水样检测数据(见表2)、污水厂工艺和投加药剂的情况进行分析,曝气器结垢物质的组成与污水厂投加药剂有直接关系,污水厂进水中钙、镁含量偏高,铁和铝含量很低,但是好氧池混合液中铁和铝的含量却有显著上升,这是因为污水厂在运行中大多投加铁盐或铝盐。

表2 污水处理厂混合液检测结果

Tab.2 Testing results of mixing liquids in WWTPs

项目	混合液中元素含量/(mg·L <sup>-1</sup> )						总碱度/(mg·L <sup>-1</sup> )	pH	TDS/(mg·L <sup>-1</sup> )
	Fe	Ca	Al	Mg	Mn	Si			
北镇污水厂	206.1	136.0	39.1	36.4	1.26	15.48	572.45	6.97	713
沟帮子污水厂	65.1	177.3	108.1	69.9	0.78	7.43	820.34	6.95	1 042
锦州污水厂	179.0	193.5	62.6	64.4	3.43	15.24	392.51	7.05	945
玉溪污水厂	143.8	145.1	142.8	50.7	13.14	0.15	256.09	7.07	517
呼图壁污水厂	154.5	159.9	56.0	31.9	3.79	0.21	564.91	7.20	1 505
临汾污水厂	177.1	113.6	118.9	59.3	1.75	3.08	347.30	7.00	1 035
宜宾污水厂	70.2	100.9	75.1	37.3	1.34	8.77	289.57	6.79	537
绵阳污水厂	109.1	229.2	92.8	87.3	3.94	0.47	352.34	6.90	967
花都污水厂	163.7	80.6	201.0	12.6	1.44	4.08	546.35	7.02	1 093
南沙污水厂	129.6	129.5	227.2	35.4	1.69	2.64	167.98	6.94	1 025
日照污水厂	111.4	116.0	32.7	75.7	4.22	8.72	353.91	7.06	1 710
聊城污水厂	213.3	84.4	62.3	89.3	9.12	10.19	588.76	7.10	1 575

为进一步探究造成污水厂曝气盘结垢的原因,对处理工艺、投加药剂情况、曝气管温度进行了调研,结果见表3。在所检测的12个污水厂中,北镇、锦州、临汾、花都、南沙、日照、聊城等7个污水厂投加单一铁盐药剂,其好氧池混合液中的铁元素含量显著增加,甚至高于钙元素,推测这是导致7个污水厂的曝气器结垢物质中铁元素最多的原因。南沙污水厂因为投加的药剂是聚合氯化铝铁(PAFC),所以曝气器表面也沉积了较多铝垢。玉溪和宜宾两个污水厂投加的药剂是聚合氯化铝(PAC),其混合液中的铝含量也很高。但是宜宾污水厂曝气器的结垢物质中却是铁含量最高,考虑原因应是污水厂采用的工业级聚合氯化铝中也含有少量铁盐,同时与进水中铁元素含量较高有关。铁盐的沉淀物多以三价铁形式存在,而三价铁沉淀相较铝盐沉淀溶

度积更小、更稳定,长期累积富集造成结垢物中铁盐含量更高。玉溪污水厂曝气器的结垢物质中锰含量很高,这主要与当地进水中的锰元素含量远高于其他区域污水厂有关。沟帮子污水厂工作人员自述不投加药剂,由图1可知,其曝气器表面结垢物没有明显的特征物,铝、铁、钙含量相对其他污水厂要均衡,但是其好氧池和回流污泥中的铝元素含量却较高,与结垢物中铝含量最高吻合,而目前尚未明确铝垢的来源。此外,推测经过长期运行,曝气膜片会有局部破损的情况,含有污泥杂质的混合液会在系统停运或间歇运行时进入曝气器并扩散至相邻未破损的曝气器内,污泥杂质中的铁盐、铝盐会从膜片内部积聚在膜片扩散孔位置,并造成曝气器内部堵塞<sup>[10]</sup>,这种情况在采用间歇曝气或刚玉曝气器的污水厂尤为严重。

表3 污水处理厂工艺和曝气器维护情况

Tab.3 Processes and maintenance of aerators in WWTPs

项目	工艺	投药情况	曝气器维护	曝气管末端温度/°C
北镇污水厂	A <sup>2</sup> O	沉砂池投加氯化亚铁	更换前甲酸清洗过1~2次	25~29
沟帮子污水厂	A <sup>2</sup> O	不投加	无清洗	16~22
锦州污水厂	A <sup>2</sup> O	粗格栅间投加氯化亚铁	无清洗	25
玉溪污水厂	A <sup>2</sup> O	偶尔投加PAC	甲酸清洗1次	43
呼图壁污水厂	SBR	偶尔加PAC、铁盐	无清洗	20
临汾污水厂	A <sup>2</sup> O	生化池加聚合硫酸铁	甲酸清洗1次	36
宜宾污水厂	CASS	生化池加PAC	甲酸清洗2次	42
绵阳污水厂	UNITANK	加铝盐除磷	2年甲酸酸洗1次	55
花都污水厂	改良型A <sup>2</sup> O	生化池加聚合硫酸铁	无清洗	35
南沙污水厂	A <sup>2</sup> O	好氧池出水口投加PAFC	人工表面清洗	40
日照污水厂	改良型A <sup>2</sup> O	高效沉淀池加聚合硫酸铁	无清洗	35
聊城污水厂	氧化沟	高效沉淀池加聚合硫酸铁	无清洗	35

### 2.3 曝气器结垢分析

根据混合液中硬度、碱度以及pH,并结合曝气支管末端的温度作为参考,利用朗格利尔结垢模型对12个样本进行计算,得到LSI值如图3所示。除了南沙、宜宾污水厂的LSI指数分别是0.075、0.23外,其他几个污水厂的LSI指数值均超过0.4,其中绵阳和聊城污水厂的LSI指数值超过0.8。利用SPSS软件对LSI指数与各影响因素的相关性进行统计分析,结果见表4。可见,相对于其他影响因素,总碱度和温度对LSI指数的正影响最为显著( $p$ 为0.001)。结合混合液指标和运行参数,造成北方污水处理厂的曝气器结垢的主要因素是总碱度,而曝气过程中较高的气体温度是导致南方污水处理厂

曝气器结垢的主要因素。

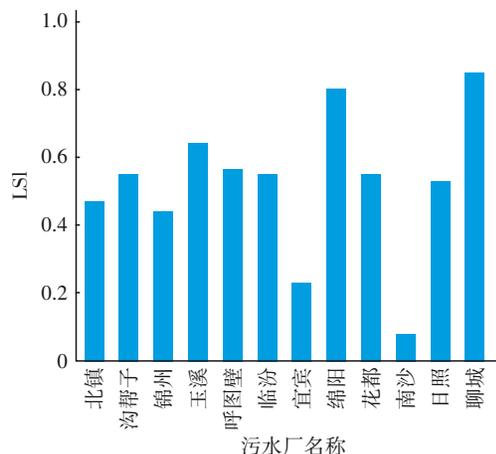


图3 污水处理厂曝气器结垢指数

Fig.3 Langelier saturation index of aerators in WWTPs

表4 曝气器结垢朗格利尔指数回归分析

Tab.4 LSI regression analysis of aerators in WWTPs

项 目	非标准化系数		标准化系数 Beta	<i>t</i>	<i>p</i>	VIF	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>F</i>
	<i>B</i>	标准误差						
常数	-9.779	2.262	—	-4.323	0.005**	—	0.925	<i>F</i> (5,6)=14.818, <i>p</i> =0.003
总碱度	0.001	0	1.025	5.970	0.001**	2.029		
pH	1.223	0.319	0.610	3.832	0.009	2.029		
TDS	0	0	-0.078	-0.540	0.609	1.673		
温度	0.025	0.004	1.063	5.764	0.001**	2.724		
总硬度	0.001	0	0.422	3.638	0.011*	1.077		

注: 因变量为LSI; D-W值为1.956; \*表示 $p < 0.05$ , \*\*表示 $p < 0.01$ 。

## 2.4 曝气器结垢的其他原因

除了以上分析的水中物质在曝气器表面结垢造成曝气器堵塞外,鼓风机系统的运行情况、曝气器的产品质量、安装也直接影响到曝气器使用,造成曝气器堵塞。如鼓风机进风过滤系统失效导致大量灰尘进入曝气器,或曝气器表面损坏破裂,曝气器、管道安装问题导致管路密封不严,使得污泥流入到曝气盘内部堵塞曝气孔,这种情况尤其对于间歇曝气运行的工艺影响更大。据宜宾污水厂工作人员反馈,该厂即出现过曝气管破损情况,采用CASS工艺运行,停止曝气时,就会有污泥倒灌现象。各污水厂的曝气器更换周期都比较大,有些使用时间超过10年,最短的也有5年。由于欠缺对曝气器的日常维护,多数污水厂没有进行过定期清洗,仅在大修停水时对其进行人工表面清洗,或在曝气器更换前期,清洗过一两次,而此时曝气器使用寿命已到,老化现象严重,清洗初时有效果,但维持时间不长,不得不更换。由曝气器引起的能耗增加是日积月累逐渐增加的,目前并没有引起污水厂重视。

## 3 结论

① 大部分污水处理厂曝气器上的结垢元素以Fe和Ca为主,只有云南的玉溪污水厂以Mn为主,与当地矿产资源特性高度关联;结合P元素含量,认为主要结垢形式为磷酸盐垢。因此,除提升生物除磷效率外,宜减少投加铁盐为主的除磷药剂,更换为较高纯度的铝盐类药剂。

② 污水处理厂曝气器结垢主要受温度和总碱度的影响,其中南方污水厂主要受曝气管内空气温度(夏季加压空气温度会超过100℃)的影响,北方污水厂则是因高碱度导致曝气器结垢。针对温度的影响,建议在曝气管道上增加换热设备,降低

加压空气的温度;而对于总碱度的影响,可适当提高回流污泥量,加强硝化作用,用生物硝化反应来降低总碱度。

③ 对于曝气器上的结垢,定期的化学清洗,尤其以甲酸对曝气器进行定期的维护清洗,是减缓堵塞的有效途径。根据绵阳、玉溪等项目对清洗方法的验证,当风机风压增幅 $\geq 3$  kPa时,通过安装在每组曝气器的进气支管弯管处的加药口,在曝气的同时,用甲酸设备将甲酸(含量为80%)注入曝气支管,雾状的甲酸随高速流动的压缩空气一起沿布气管进入微孔曝气器,可实现对曝气器膜片上微孔的清洗。相比于清洗前,鼓风机能耗可降低约10%。

## 参考文献:

- [1] 张羽就,席佳锐,陈玲,等. 中国城镇污水处理厂能耗统计与基准分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(8): 8-17.  
ZHANG Yujiu, XI Jiarui, CHEN Ling, et al. Energy consumption statistics and benchmarking analysis of urban wastewater treatment plants (WWTPs) in China [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(8): 8-17 (in Chinese).
- [2] 刘常敬,石凤,杨晨光,等. 节能型半地下污水厂多段多级AO工艺设计及调试运行[J]. 中国给水排水, 2018, 34(22): 51-54.  
LIU Changjing, SHI Feng, YANG Chenguang, et al. Design and commission of energy-saving and semi-underground wastewater treatment plant with multi-stage AO as treatment process [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(22): 51-54 (in Chinese).
- [3] 薛媛媚,王斌,朱景刚,等. 微孔曝气器的清洗方案改进及实施效果[J]. 中国给水排水, 2011, 27(10): 98-100.

- XUE Yuanmei, WANG Bin, ZHU Jinggang, *et al.* Improvement of cleaning scheme of microporous aerator and its execution effect[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(10):98-100(in Chinese).
- [4] 李云辉. 长期运行期间微孔曝气系统氧传质效率的影响因素及污染控制[J]. *净水技术*, 2021, 40(6): 28-34, 61.
- LI Yunhui. Influencing factors and fouling control of oxygen mass-transfer efficiency for fine-bubble aeration system during long-term operation [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(6): 28-34, 61 (in Chinese).
- [5] 汪丁亮, 陈兴权, 殷礼文, 等. 污水生化处理曝气系统的更新改造[J]. *工业水处理*, 2013, 33(10): 89-91.
- WANG Dingliang, CHEN Xingquan, YIN Liwen, *et al.* Biochemical sewage treatment aeration system renovation [J]. *Industrial Water Treatment*, 2013, 33(10): 89-91 (in Chinese).
- [6] 梁远, 王佳伟, 李洁, 等. 微孔曝气器充氧性能变化对污水处理厂能耗的影响[J]. *给水排水*, 2011, 37(1): 42-45.
- LIANG Yuan, WANG Jiawei, LI Jie, *et al.* Influence of oxygenation capacity of fine bubble aerator on energy consumption in wastewater treatment plant[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2011, 37(1): 42-45 (in Chinese).
- [7] 张杰, 周金龙, 曾妍妍, 等. 新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素[J]. *环境科学*, 2021, 42(4): 1706-1713.
- ZHANG Jie, ZHOU Jinlong, ZENG Yanyan, *et al.* Hydrochemical characteristic and their controlling factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(4): 1706-1713 (in Chinese).
- [8] 赵蓓, 李玉仙, 王敏, 等. 北方某市供水管网对丹江口水适应性预测方法研究[J]. *给水排水*, 2015, 41(4): 104-109.
- ZHAO Pei, LI Yuxian, WANG Min, *et al.* Study on the prediction method on the adaptability of the water supply network on the raw water from Danjiangkou reservoir in a North China city[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, 41(4): 104-109(in Chinese).
- [9] 鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 等. 巴楚县浅层地下水中氟的分布特征及影响因素分析[J]. *环境化学*, 2021, 40(11): 3455-3463.
- LU Han, ZENG Yanyan, ZHOU Jinlong, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of fluorine in shallow groundwater of Bachu County [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(11): 3455-3463 (in Chinese).
- [10] 刘兵, 韩燕聪, 郭延勇, 等. 污水处理厂氧化沟曝气系统改造[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(2): 109-111.
- LIU Bing, HAN Yancong, GUO Yanyong, *et al.* Oxidation ditch aeration system modification in wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(2): 109-111(in Chinese).

作者简介:王建利(1963- ),男,山东潍坊人,高级工程师,研究方向为水处理工艺设计及运营优化、市政污水处理工艺技术及设备研发、水污染控制等。

E-mail:wangjianli@bewg.net.cn

收稿日期:2022-03-03

修回日期:2022-03-18

(编辑:李德强)

加强河湖保护与管理,推进水生态文明建设