

王维康, 钟颖, 王颖, 等. 臭气全流程治理技术在全地下水水质净化厂的应用[J]. 净水技术, 2024, 43(2):176-183.

WANG W K, ZHONG Y, WANG Y, et al. Application of full process odor control technology in all underground WWTP[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(2):176-183.

臭气全流程治理技术在全地下水水质净化厂的应用

王维康^{1,*}, 钟颖¹, 王颖¹, 张辉平¹, 黄海²

(1. 深圳市利源水务设计咨询有限公司, 广东深圳 518031; 2. 深圳市环境水务集团有限公司, 广东深圳 518031)

摘要 以深圳市全地下水水质净化厂——洪湖水水质净化厂预处理区和生化区臭气为研究对象, 文中结合地下水水质净化厂的特点及不同水处理段的臭气浓度特征, 采用全流程臭气治理技术, 对项目臭源点全识别封闭、臭气全输送、多种处理工艺高效组合治理。总体采用生物法处理, 整体除臭规模为 95 000 m³/h, 系统运行智能简便、运营成本较低。对投产运行后 2 年的臭气污染物监测数据分析, 臭气监测值远低于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 的一级标准值, 处理效果优于预期除臭目标。

关键词 全地下水水质净化厂 全流程除臭 组合工艺 应用实践 达标排放

中图分类号: TU992 文献标识码: B 文章编号: 1009-0177(2024)02-0176-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.02.022

Application of Full Process Odor Control Technology in All Underground WWTP

WANG Weikang^{1,*}, ZHONG Ying¹, WANG Ying¹, ZHANG Huiping¹, HUANG Hai²

(1. Shenzhen Liyuan Water Design & Consulting Co., Ltd., Shenzhen 518031, China;

2. Shenzhen Water and Environment Group Co., Ltd., Shenzhen 518031, China)

Abstract The odor in the pretreatment unit and biochemical unit of Honghu wastewater treatment plant (WWTP), an underground WWTP in Shenzhen is studied in this paper, based on the characteristics of WWTP and odor concentration characteristics of different water treatment sections, the whole process odor treatment technology has been adopted, and carried out the odor source points identification and sealing, odor transportation and multiple treatment processes. The overall odor is controlled by biological method, the deodorization scale is 95 000 m³/h, the system operation is intelligent and simple, low operating cost. According to the analysis of odor pollutant monitoring data for 2 years after operation, the odor monitoring values are much lower than the first level standard values of the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918—2002), and the treatment effect is better than the expected deodorization target.

Keywords all underground WWTP complete process deodorization combined process application and practice up-to-standard discharge

目前, 随着我国工业迅猛发展, 城市化进程同步呈现高速发展的趋势。此外, 随着全国经济的高速崛起以及公众的环保意识逐渐增强, 导致高效发展经济引起的环境问题与居民对美好生活的高追求之间存在高度不平衡。这种不平衡在一线城市尤为突

出, 水质净化厂已愈来愈接近高密度居民区, “邻避效应”也日趋突出。

因此, 城市建设规划时, 近年来越来越多的水质净化厂采用全地下或半地下布置, 将污水处理单元通过组团布置形成集中的混凝土结构, 处理单元均密封在地下或半地下^[1]。由于其设置在地下且相对封闭的特点, 更易积聚致臭气体并难以通过自然通风稀释和散逸, 具有浓度高、扩散慢、分布广、处理难度较大等特点。此外, 臭气会腐蚀相关设备降低其使用寿命, 需采用针对性的臭气

[收稿日期] 2023-05-29

[通信作者] 王维康(1983—), 男, 高级工程师, 研究方向主要为城市污水处理与回用、海绵城市建设、城市排水系统及黑臭水体治理及城市恶臭气体治理等方面的设计、研究和技术管理, E-mail: 37561411@qq.com。

治理技术应对此类水质净化厂臭气治理^[2]。

鉴于全地下水水质净化厂存在臭气成分复杂、环境要求高、治理难度大等问题,应在满足安全生产和相关标准的基础上,提升水质净化厂工作环境,保障操作人员身心健康。本文就全流程臭气治理技术在全地下水水质净化厂——洪湖水水质净化厂的应用相关要点进行阐述,以期在同类项目的臭气治理中提供参考。

1 工程背景

洪湖水水质净化厂位于深圳市罗湖区洪湖公园

北端,布吉河东侧。该厂以“上园下厂”的模式设计为全地下水水质净化厂,地下是处理规模为 10 万 m³/d 的水质净化厂,地面建成为荷花主题公园。采用膜生物反应器(MBR)处理工艺,处理后出水补充河道和布吉河,水处理工艺流程如图 1 所示。该项目周边已被楼宇包围,为避免臭气厂内聚集及外溢造成不利环境影响,同时改善厂内工作人员工作环境,对该厂区一期的预处理区和生化区进行了全流程臭气治理。

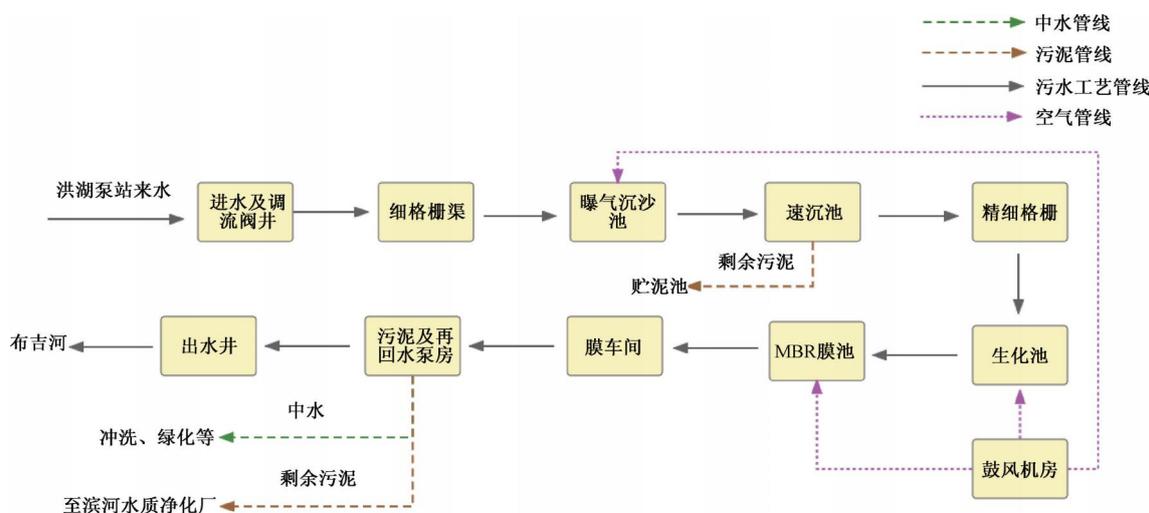


图 1 水处理工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Water Treatment

2 臭源分析及臭气排放标准

经项目全区域臭源识别,本全地下水水质净化厂臭源点包括格栅、沉砂池、精细格栅、速沉池、厌氧池、

缺氧池、好氧池和膜池。由于剩余污泥输送至滨河水水质净化厂处理,厂内未设污泥处理设施,不考虑污泥除臭。相关臭源分析和硫化氢浓度如表 1 所示。

表 1 项目臭源分析
Tab. 1 Analysis of Project Odor Sources

工艺段划分	区域	臭源分析	硫化氢/(mg·m ⁻³)
预处理段	格栅	栅渣、格栅渠水面	5~50
	曝气沉砂池	曝气导致污水剧烈搅动,产生大量臭气	5~50
	精细格栅	栅渣、格栅渠水面	5~50
	速沉池	大面积污水水面	5~50
生化段	厌氧池	大面积污水水面	≤10
	缺氧池	大面积污水水面	≤10
	好氧池	曝气导致污水剧烈搅动,产生大量臭气	≤10
	膜池	剩余污泥、曝气	≤10

本项目臭气污染物排放允许浓度执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一

级标准(表 2)。

表2 项目臭气污染物排放允许浓度
Tab. 2 Permissible Emission Concentrations of Odor
Pollutants in the Project

控制项目	一级标准
氨	$\leq 1.0 \text{ mg/m}^3$
硫化氢	$\leq 0.03 \text{ mg/m}^3$
臭气	≤ 10
甲烷	$\leq 0.5\%$

3 除臭工艺

目前针对市政水质净化厂站臭气污染物,主要处理技术包括生物法、化学法、物理法、光催化氧化法、可循环生物除臭法^[3],以及这几类技术的联合处理等。生物法利用载体填料表面上的微生物通过自身氧化分解作用脱臭^[4],尤以生物滤池以及生物滴滤池除臭技术应用最多^[5];化学法是结合酸碱中和、氧化还原原理,利用吸收塔作为反应装置进行除

臭^[6];物理法利用吸附系统对臭气成分进行吸附,吸附系统一般由颗粒状材料静态层组成^[7];光催化氧化法中光催化材料暴露在大于或等于光催化剂带隙能量的光照下时,会产生电子-空穴对并进一步与空气中的氧反应生成 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}_2$ 等强氧化性的活性物质,这类活性物质可有效将臭气污染物以及难微生物降解的大分子氧化,最终将其分解为 CO_2 、 H_2O 等无机小分子,达到除臭的目的^[8];可循环除臭即利用缓释投加生物强化填料的办法,将污水处理的活性污泥活性化,使其中的菌群驯化增殖,并通过增加除臭污泥回流至进水总管等方式,使全厂构筑物水池内均可利用除臭菌属微生物降解恶臭污染物、有机质分解能力强的特性,从根源上达到除臭的目的,此外,经过强力驯化的有效菌种也将用于后续末端生物除臭设备的菌群接种,实现菌种循环利用^[9]。各种除臭工艺特征比选如表3所示。

表3 除臭工艺比选分析
Tab. 3 Analysis for Comparison and Selection of Deodorization Processes

对比项目	生物法	化学法	物理法	光催化氧化法	可循环生物除臭法
主要原理	生物降解	吸附、中和、氧化	稀释、掩盖、吸附	高级氧化	全过程除臭+全过程除臭有效菌接种
成本	低	高	较低	高	较低
处理达到标准	一级标准	二级标准或一级	很难达标	二级标准或一级	二级标准
占地面积	较大	较大	较小	小	小
二次污染	无	大	较小	较小	无

通过对比,生物法具有较为明显的优势,但全地下水水质净化厂预处理区臭气浓度波动大,可考虑利用工艺组合降低进气负荷并保障出气稳定。组合工艺即根据项目特征及处理要求,将两种或多种除臭工艺进行组合,通过自动化控制技术,形成模块化组合除臭工艺。研究^[10]表明,在单独使用高能离子设备达到40%硫化氢去除率的条件下,通过组合光催化氧化工艺可以达到99%以上的硫化氢去除率。天津市港区污水厂通过化学洗涤与生物过滤组合工艺对污水厂散发的臭气进行处理,处理效果不仅能达到天津地标的环保要求,还降低了运行成本^[11]。

故本项目主体采用生物法治理,针对浓度波动较高区增加预处理系统,后续处理要求提高时增加深度处理。同时为改善操作空间的环境,降低全厂臭气的本底值,增加可循环生物除臭工艺。

4 技术路线与方案

本项目由封闭系统、臭气收集系统、可循环生物

除臭系统、末端模块化除臭系统、负离子新风系统等构成全流程处理除臭系统。其中,针对预处理区和生化区的臭气浓度特征,末端模块化除臭系统分别采用“喷淋预处理+生物法+光催化氧化深度处理”组合工艺和“生物法”处理。除臭工艺流程如图2所示。

本项目根据《城镇污水处理厂臭气处理技术规程》(CJJ/T 243—2016),对厂区除臭规模进行了详尽精准地核算。因项目周边居民日益增多、商业较为发达、进水污水浓度较高,栅渣间、格栅除臭罩等重点部分换气次数以10~15次/h来计,同时每个构筑物除臭规模均考虑5%~10%的漏损量。

经计算,预处理区除臭规模为35 000 m^3/h ,生化区除臭规模为60 000 m^3/h ,总除臭规模为95 000 m^3/h 。

4.1 臭气封闭系统

封闭工程是指对产生致臭气体的臭气源进行

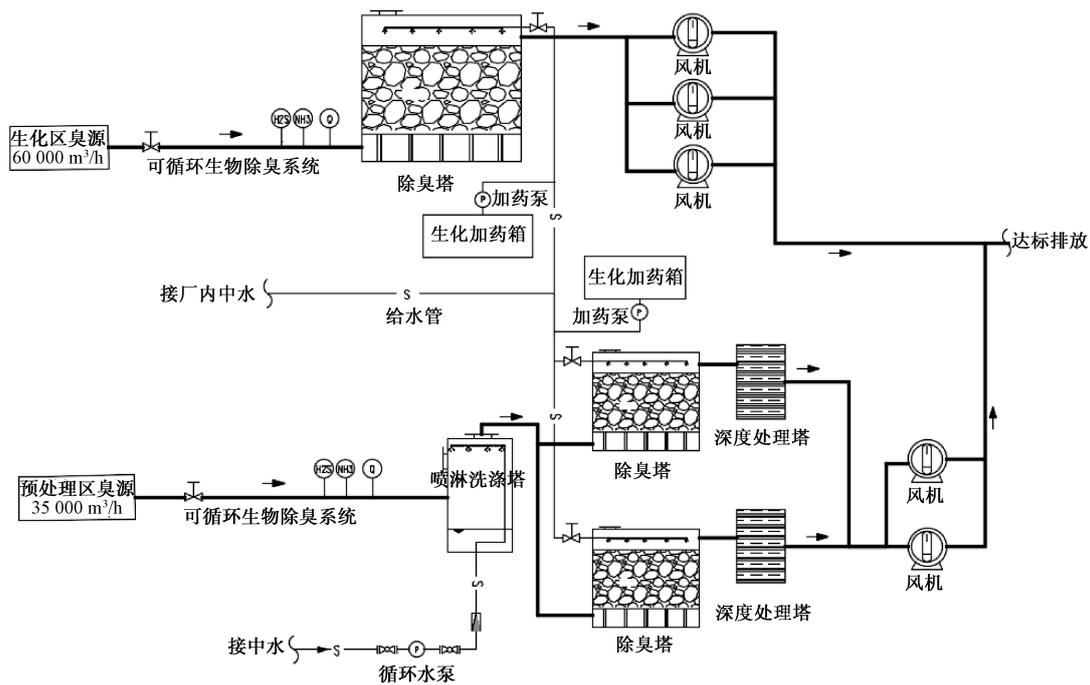


图2 除臭工艺流程

Fig. 2 Process Flow of Deodorization

加罩或者加盖处理,经收集风管将臭气源产生的臭气输送到处理单元进行处理。由于本项目是全地下水水质净化厂,主体构筑物在下层,可结合原有

混凝土顶板作为盖体,对局部敞开式构筑物进行针对性补充封闭,各区域封闭形式及材质如表4所示。

表4 项目臭气封闭方法及材质

Tab. 4 Methods and Materials of Project for Odor Sealing

名称	封闭形式描述	材质
进水井	混凝土池盖+敞口盖板	盖板 FRP 或不锈钢
细格栅	整体封闭罩	304 不锈钢骨架+钢化玻璃
沉砂池	混凝土池盖+敞口盖板	盖板 FRP 或不锈钢
速沉池	混凝土池盖+敞口盖板	盖板 FRP 或不锈钢
渣斗/砂斗	设备局部封闭+车间整体封闭罩	304 不锈钢骨架+钢化玻璃
精细格栅	整体封闭罩	304 不锈钢骨架+钢化玻璃
生化池	混凝土池盖+敞口盖板	盖板 FRP 或不锈钢
膜池	混凝土池盖+敞口盖板	盖板 FRP 或不锈钢

注:FRP——纤维增强复合材料。

4.2 臭气收集系统

本项目臭气收集系统含臭气收集输送管道、吸风口、负压牵引风机等,臭气经负压牵引风机离心加压后经不锈钢风管进入除臭单元,处理达标后经风机排放。所有吸风口均采用点式抽风,厂内的收集管道和输送管道均采用 304 不锈钢风管,每个风管吸风口处均设置调节阀及风向

标。除臭管道设计风速均满足《城镇污水处理厂臭气处理技术规程》(CJJ/T 243—2016)中的要求,干管和支管风速分别满足 6~14 m/s 和 2~8 m/s。

本项目风机共设 5 台,其中预处理区除臭风机 2 台,生化区除臭风机 3 台,均选用耐腐蚀的玻璃钢材质详细参数如表 5 所示。

表5 配套风机参数
Tab.5 Parameters of Corollary Fans

设备名称	技术参数	电机电源	数量	备注
预处理除臭风机	流量 $Q=35\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ 风压 $P=2\ 800\ \text{Pa}$ 功率 $N=55\ \text{kW}$	AC380V/3相/50 Hz	2台	配隔音罩,1用1备
生化区除臭风机	$Q=30\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ $P=2\ 700\ \text{Pa}$ $N=45\ \text{kW}$	AC380V/3相/50 Hz	3台	配隔音罩,2用1备

4.3 臭气处理系统

为降低全厂臭气本底值及全面保障除臭效果,本项目臭气处理系统包含高效可循环除臭系统和末端智能模块化协同除臭系统。在整个除臭工况运行中,全程通过24 h自动化控制技术,对不同工艺段的除臭设备参数进行实时调整和运行管理。

4.3.1 高效可循环生物除臭系统

本项目高效可循环生物除臭系统包含除臭微生物强化系统和除臭污泥回流系统。其中微生物强化系统投放于生化池,无需提供额外动力,共使用14个生物强化培养罐体,每个培养罐内含2种

生物强化填料,悬浮安装于生化池中,每个罐直径为1 650 mm,高度为1 800 mm,SS304不锈钢材质,上部和底部设有多孔板;除臭污泥回流系统将驯化后的除臭微生物污泥回流至污水厂粗格栅前池之前,设计回流量为5%,通过活性污泥回流处理达到降低全厂臭气本底值。高效可循环生物除臭系统经安装运行后,监测各水处理构筑物产生臭气中硫化氢、氨气浓度(表6~表7),可得出经安装可循环生物除臭系统后,各构筑物产生臭气中硫化氢、氨气浓度监测值显著下降,去除率可分别达到64%~88%、68%~92%。

表6 可循环生物除臭系统安装前后硫化氢监测值及去除率
Tab.6 Monitoring Value and Removal Rate of Hydrogen Sulfide before and after Installation of Recyclable Biological Deodorization System

检测位置	设备安装前硫化氢/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)			设备运行后硫化氢/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)			去除效率		
	第1 d	第2 d	第3 d	第1 d	第2 d	第3 d			
曝气沉砂池 1#	5.140	4.970	5.520	1.420	1.160	1.980	72%	77%	64%
速沉池 2#	0.805	0.649	0.824	0.211	0.179	0.203	74%	72%	75%
精细格栅池 3#	0.678	1.000	0.699	0.212	0.192	0.180	69%	81%	74%
生化池除臭系统进口 4#	1.900	2.090	2.100	0.491	0.302	0.270	74%	86%	87%
生化池厌氧区 5#	1.210	1.260	1.350	0.440	0.362	0.393	64%	71%	71%
膜车间 6#	0.102	0.09	0.127	0.019	0.011	0.022	81%	88%	83%

表7 可循环生物除臭系统安装前后氨气监测值及去除率
Tab.7 Monitoring Value and Removal Rate of Ammonia before and after Installation of Recyclable Biological Deodorization System

检测位置	设备安装前氨气/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)			设备运行后氨气/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)			去除效率		
	第1 d	第2 d	第3 d	第1 d	第2 d	第3 d			
曝气沉砂池 1#	5.82	5.69	6.04	1.52	1.05	1.90	74%	82%	69%
速沉池 2#	1.13	3.86	1.36	0.29	0.30	0.28	74%	92%	79%
精细格栅池 3#	4.09	4.59	4.33	0.96	0.79	0.56	77%	83%	87%
生化池除臭系统进口 4#	5.25	6.98	5.48	1.66	1.50	1.42	68%	79%	74%
生化池厌氧区 5#	4.80	4.46	5.02	1.33	1.10	1.02	72%	75%	80%
膜车间 6#	1.46	1.25	1.60	0.25	0.20	0.23	83%	84%	86%

目前国内也有多个污水处理厂采用了可循环生物除臭技术,如包头市北郊水质净化厂(污水处理规模为10万 m³/d)。同国内其他项目应用情况相比,本项目基于除臭菌种的污水处理系统过程臭气减量技术,利用缓释投加生物强化填料并采用回流的方式,从源头上消除致臭物质,除臭效率高。此外,通过驯化后的生物菌种可有效接种至后续末端模块化系统中的生物除臭设备,大大节约生物驯化成本。

4.3.2 末端智能模块化除臭系统

将生物滤池除臭工艺、光催化负离子氧化除臭工艺、喷淋预洗涤工艺进行整合,开发智能模块化组合除臭设备,可根据臭气负荷及波动情况全自动智能化运行。本项目末端模块化除臭系统包含预处理区喷淋洗涤预处理设备、生物除臭设备、光催化氧化后处理设备以及生化区生物除臭设备。

(1) 预处理设备

考虑到预处理区的臭气浓度较高、波动大,为保障生物除臭菌群的稳定性并降低后续生物处理负荷,预处理区除臭增设喷淋洗涤设备。设304不锈钢材质洗涤塔1座,采用厂内中水洗涤,配备循环水泵及在线pH监测仪表。详细参数如表8所示。

表8 喷淋洗涤设备参数

Tab. 8 Parameters of Spray Washing Equipment

项目	处理规模/(m ³ ·h ⁻¹)	设计参数
预处理区	35 000	预处理塔尺寸:L×B×H=4.0 m×4.0 m×3.3 m 循环喷淋泵:Q=35 m ³ /h,扬程H=35 m,N=55 kW
生化区	60 000	不设预处理设备

(2) 生物除臭设备

生物除臭装置是整个除臭系统的核心环节,本项目除臭塔采用玻璃钢材质拼装制成,除臭塔为全封闭结构,并设有合理的检修孔、进气孔、出气孔等。塔体分为4个区域:上层的雾化喷淋系统,中间的生物填料过滤层,下部的生物填料支撑系统以及底部的配气系统与废液收集系统。通过控制表面负荷以及停留时间实现臭气均匀通过填料,从而达到理想的除臭效果。

生物填料是整个除臭装置的关键,本项目采用生物炭组合填料,该类填料孔隙率高、有效面积大、气水的透过性好、传质速率快,更利于微生物在其表

面附着、生长和繁殖,从而达到更好的臭气净化效果。

本项目预处理区和生化区除臭系统均各设置2座生物除臭装置,详细参数如表9所示。

表9 除臭塔设计参数

Tab. 9 Design Parameters of Deodorization Tower

项目	预处理区	生化区
单塔处理风量/(m ³ ·h ⁻¹)	17 500	30 000
单塔占地尺寸(L×B)	4 m×12 m	6 m×12 m
除臭塔数量/座	2	2
表面负荷[空塔滤速/m ³ ·(m ⁻² ·s ⁻¹)]	0.101	0.116

(3) 光催化氧化后处理设备

因预处理区臭气浓度较高,为防止臭气浓度异常超高时生物系统降解不彻底,增加深度处理装置即光催化氧化后处理设备。生化区臭气浓度较低,生物除臭可以处理达标,故未设深度处理。深度处理主要参数如表10所示。

表10 深度处理系统设计参数

Tab. 10 Design Parameters of Advanced Treatment System

项目	深度处理系统
预处理区	Q=35 000 m ³ /h,N=9 kW,1套
生化区	不设深度处理装置

4.4 负离子新风系统

由于是全地下水水质净化厂设计,除臭空间均位于地下操作空间的池盖以下,形成空气流从操作空间流向池盖下的负压空间,对重点区域预处理区和速沉池巡检区增设离子新风系统,其他区域因暖通专业已考虑送风,不再设离子新风系统。预处理区及速沉池操作空间各设计负离子送风设备1套,规模分别为10 000 m³/h和5 000 m³/h。新风系统针对有人员进入的空间,按照特定区域换气次数为6次/h设计,主要由新风机、离子/臭氧发生设备、送风管道和风幕机组成,通过输送新鲜空气或者森林型新风,达到操作空间内臭味减轻的效果。

5 运行效果

洪湖水水质净化厂一期全流程除臭系统于2020年5月投入运行,年运行成本为76.8万元,折合到污水为0.04元/m³。近1~2年内通过对一期排放口下风向5 m处进行硫化氢、氨气、甲烷和臭气浓度无组织监测,得监测数据如图3所示,对比《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一

级标准,可以看出氨气和硫化氢浓度虽然随季节呈现一定的波动,但均远低于 GB 18919—2002 中一级标准,甚至低于深圳市环境水务集团企业内控限值(硫化氢质量浓度为 0.02 mg/m^3 ;氨气质量浓度为

0.76 mg/m^3 ;甲烷质量分数为 0.5%),甲烷浓度监测长期处于超低浓度,臭气浓度均为未检测出。表明全流程除臭技术应用于全地下式水质净化厂的除臭效果稳定可靠。

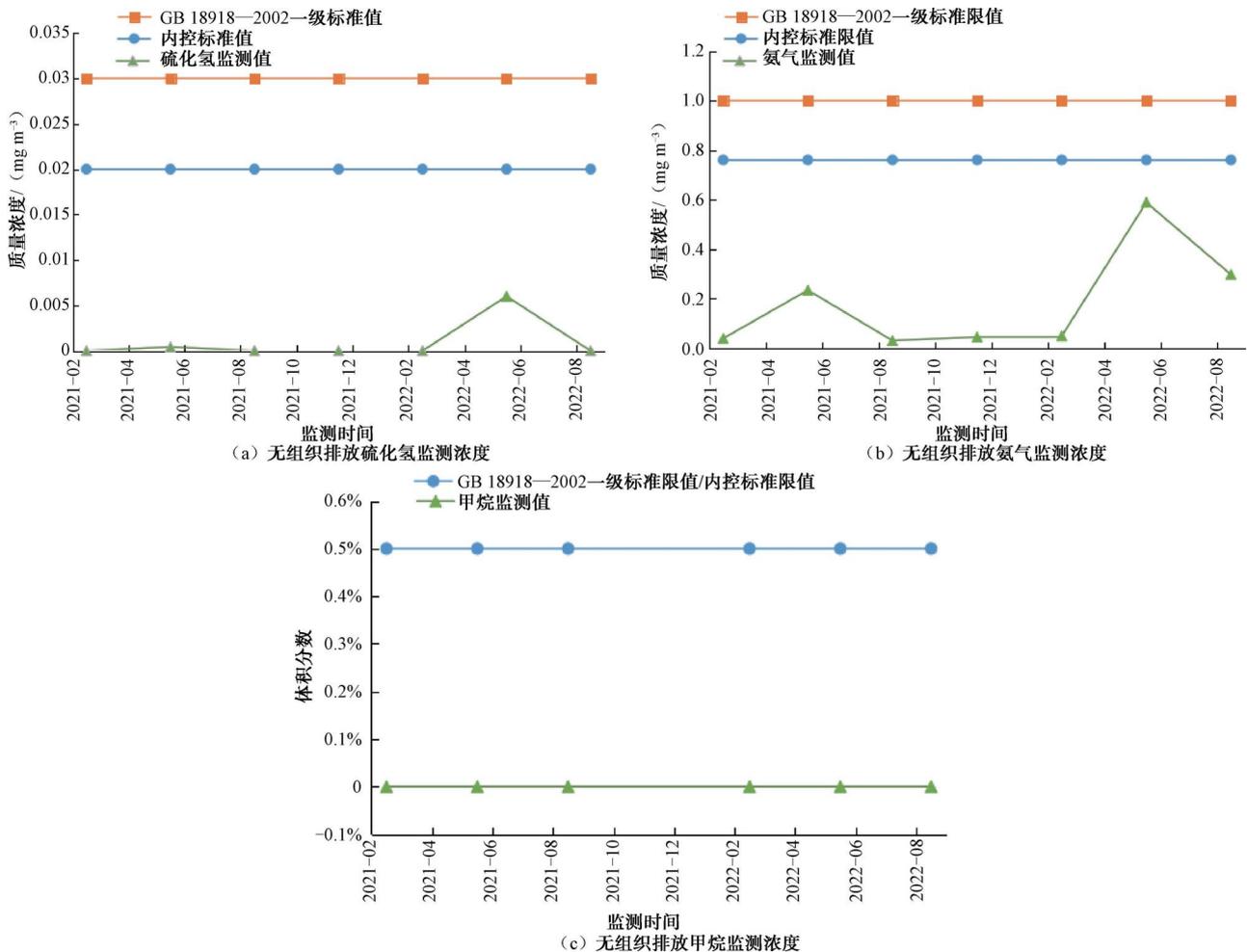


图 3 近 1~2 年内无组织排放氨气、硫化氢、甲烷监测浓度

Fig. 3 Monitoring Concentration of Unorganized Emissions of Ammonia, Hydrogen Sulfide, and Methane in Past 1~2 Years

6 结论

(1) 本项目通过对臭气源全识别、全封闭,利用可循环生物除臭系统及末端模块化除臭系统对全地下水水质净化厂臭气进行全流程治理,主体采用生物法治理,针对性地配合化学喷淋及光催化氧化法,整体除臭规模为 $95\ 000 \text{ m}^3/\text{h}$,处理后臭气控制标准要严于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级标准。项目实施为今后全绿色无臭全地下水水质净化厂的建设提供了指导,对大城市污水处理厂提标改造具有重要意义。

(2) 本文针对地下水水质净化厂全流程超净处理

臭气排放进行了长期监测和数据跟踪,为相关建设标准、排放标准、技术路线等提供数据支撑,对相关管理体系建设具有较好的参考意义。

(3) 本文以全地下水水质净化厂——深圳市洪湖水水质净化厂一期预处理区和生化区的臭气作为治理对象,以全流程臭气治理理念贯穿项目全周期建设,致力打破“邻避效应”,化邻避为邻利。文章以期全地下水水质净化厂臭气治理技术提供良好的思路,为同类项目建设提供积极的示范意义。

参考文献

[1] 刘雪林, 尹利军, 康金郁, 等. 地理式污水处理厂除臭工艺

- 的选择及探讨[J]. 绿色科技, 2019(10): 83-85, 90.
- LIU X L, YIN L J, KANG J Y, et al. Discussion of deodorization process in underground wastewater treatment plant[J]. Journal of Green Science and Technology, 2019(10): 83-85, 90.
- [2] 康凯, 李洋. 地下污水厂通风除臭设计优化[J]. 黑龙江环境通报, 2022(2): 73-75.
- KANG K, LI Y. Optimization of ventilation and deodorization design for underground sewage plant [J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2022(2): 73-75.
- [3] 邹博源, 陈广. 城镇污水处理厂臭气污染与除臭技术研究进展[J]. 净水技术, 2020, 39(5): 109-115.
- ZOU B Y, CHEN G. Research progress of odor pollution and deodorization technology in urban WWTP [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(5): 109-115.
- [4] 丁海燕. 某城镇污水处理厂除臭工艺案例分析[J]. 山西建筑, 2021, 47(23): 145-147.
- DING H Y. Case study of town sewage treatment deodorization process [J]. Shanxi Architecture, 2021, 47(23): 145-147.
- [5] 刘国华. 生物除臭技术研究进展[J]. 广东化工, 2009, 36(8): 102-103 .
- LIU G H. Research progress of biological deodorization technology [J]. Guangdong Chemical Industry, 2009, 36(8): 102-103.
- [6] 赵韬, 王世霞, 江霜英. 城镇污水处理厂除臭技术研究[J]. 科学技术创新, 2020(36): 6-10.
- ZHAO T, WANG S X, JIANG S Y. Research on deodorization technology for urban sewage treatment plants [J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(36): 6-10.
- [7] REN B, ZHAO Y, LYCZKO N, et al. Current status and outlook of odor removal technologies in wastewater treatment plant [J]. Waste and Biomass Valorization, 2019, 10: 1443-1458. DOI: 10.1007/s12649-018-0384-9.
- [8] 鞠庆玲. 高要求下污水处理厂臭气深度处理工艺发展方向思考[J]. 给水排水, 2022, 48(s1): 139-144.
- JU Q L. Thoughts on the development direction of odor advanced treatment process in sewage plant under high requirements[J]. Water and Wasterwater Engineering, 2022, 48(s1): 139-144.
- [9] 郑龙行, 张飞, 林梅山, 等. 污水处理厂全过程除臭工艺及应用[J]. 山东化工, 2022(3): 196-197.
- ZHENG L X, ZHANG F, LIN M S, et al. Whole process deodorization technology and application of sewage treatment plant [J]. Shangdong Chemical Industry, 2022(3): 196-197.
- [10] 王助贫, 唐群才, 安洋, 等. 高能离子除臭工艺及组合工艺的除臭效果[J]. 节能与环保, 2019(4): 47-49.
- WANG Z P, TANG Q C, AN Y, et al. Deodorizing effect of energeticion process and combined process [J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2019(4): 47-49.
- [11] 孙素艳, 刘金璐, 杨曦. 化学洗涤+生物过滤除臭组合工艺在港区污水处理厂中的应用[J]. 清洗世界, 2022, 38(12): 38-40.
- SUN S Y, LIU J L, YANG X. Application of chemical washing and biological filtration deodorization combination process in port sewage treatment plants [J]. Cleaning World, 2022, 38(12): 38-40.

(上接第 142 页)

- [11] 储文强, 陈功, 胡鸿昊. 结合粗糙集属性约简和夜间用水量分析的漏损识别研究[J]. 科技通报, 2021, 37(9): 94-98, 108.
- CHU W Q, CHEN G, HU H H. Leakage identification based on neighborhood rough sets reduction and nighttime water consumption analysis[J]. Bulletin of Science and Technology, 2021, 37(9): 94-98, 108.
- [12] 茆诗松, 程依明, 濮晓龙. 概率论与数理统计教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 102-107.
- MAO S S, CHENG Y M, PU X L. Probability theory and mathematical statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 102-107.
- [13] 赵新斌, 李斌. 异常值检测方法在民航告警中的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(4): 524-530.
- ZHAO X B, LI B. Application of outlier detection method in civil aviation alarm [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(4): 524-530.
- [14] 刘宇. 基于分区计量的漏失诊断与管网改造研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- LIU Y. Research on leakage detection and pipe network rehabilitation based on district metered area[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.