

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.24.013

中外典型下沉式再生水厂对比分析

张璐晶¹, 侯 锋¹, 高 嵩², 张 婷¹, 庞洪涛¹, 张翼峰³,
鞠庆玲⁴, 袁 菊¹, 曹效鑫¹

(1. 信开环境投资有限公司, 北京 101101; 2. 清华大学 环境学院, 北京 100084;
3. 丹麦技术大学 环境学院, 丹麦; 4. 西原环保<上海>股份有限公司, 上海 201204)

摘 要: 下沉式再生水厂具有土地集约、环境友好、资源利用率高等优势,近年来在国内外受到广泛关注,已成为城镇污水处理设施建设的重要选择之一。以我国贵阳七彩湖厂与丹麦Hillerød厂这两个典型下沉式再生水厂为例,对比分析了二者的处理流程、关键单元与设备、处理效果等,发现相比于传统地上污水厂,两座下沉厂的节地效果均非常显著;两厂在水线、泥线和气线方面都比较完备,均体现出高标准的特点。在不同的国家政策下,两厂的出水水质整体优良,Hillerød厂出水TN低至1.96 mg/L。总体来说,两座下沉厂均有较好的综合效益,在此基础上,进一步探讨了下沉厂高质量发展的3点启示。

关键词: 下沉式再生水厂; 工艺对比; 工程实例; 前景展望

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)24-0076-06

Comparison and Analysis of Underground Reclaimed Water Plants in China and Abroad

ZHANG Lu-jing¹, HOU Feng¹, GAO Song², ZHANG Ting¹, PANG Hong-tao¹,
ZHANG Yi-feng³, JU Qing-ling⁴, YUAN Ju¹, CAO Xiao-xin¹

(1. Xinkai Environment Investment Co. Ltd., Beijing 101101, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. College of Environment, Technical University of Denmark, Denmark; 4. Xiyuan Environment <Shanghai> Co. Ltd., Shanghai 201204, China)

Abstract: Underground reclaimed water plant has the advantages of small footprint area, environmental friendliness and high resource utilization rate, thus has attracted wide attention at home and abroad in recent years, and has become one of the important choices for the construction of urban sewage treatment facilities. The treatment processes, key units, equipment and treatment performances between two typical underground reclaimed water plants, the Guiyang Qicaihu plant and Denmark Hillerød plant, were compared. The two plants both showed significant land saving performance compared with the conventional wastewater treatment plants. The two plants were relatively complete in terms of sewage treatment line, sludge treatment line and odor treatment line, which reflected the characteristics of high standards. Under different national policies, the effluent quality of the two plants was generally good, and the TN in effluent from Hillerød plant was as low as 1.96 mg/L. On the whole, the two underground

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200600)

通信作者: 曹效鑫 E-mail: caoxiaoxin@cwewater.com

plants showed better comprehensive benefits. On this basis, three inspirations for the high quality development of underground reclaimed water plant were further discussed.

Key words: underground reclaimed water plant; process comparison; project case; prospect

城镇污水处理厂是重要的市政及环保基础设施,在生态环境保护、水资源节约等方面发挥了非常重要的作用。随着全球城镇化的发展和人口的增长,传统地上式污水处理厂普遍存在占地面积大以及臭气、噪声等二次污染问题,邻避效应日益突出。通过处理工艺和建筑结构创新,将污水厂主要构筑物下沉,对上部空间进行综合利用,形成下沉式再生水厂,其具有土地集约、环境友好、资源利用率高的突出优势,近年来在国内外都得到了广泛关注,成为城市污水处理设施改造更新的重要选择之一^[1-4]。

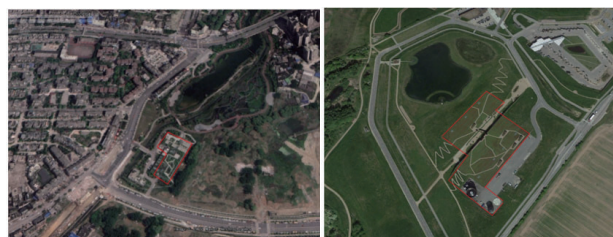
下沉厂在全球已有80多年的发展历史,最早应用的国家是芬兰。我国对下沉厂的相关研究和建设主要在2010年之后,北京、上海、广州、贵阳等地陆续建造了一批示范项目^[2]。结合近年来的研究和实践成果,中国环境保护产业协会、中国工程建设标准化协会等组织国内多家科研院所和龙头企业,编制发布了《地下式城镇污水处理厂工程技术指南》(T/CAEPI 23—2019)、《城镇地下式污水处理厂技术规程》(T/CECS 729—2020)等指导性技术文件,促进了行业的健康发展。

为推动下沉厂的持续改进,以我国贵阳七彩湖厂与丹麦 Hillerød 厂两座新建下沉厂为典型案例,详细比较分析了二者的工艺流程、关键单元与设备、处理效果,以期为我国未来下沉式再生水厂的高质量发展提供参考。

1 案例厂概况与特点

1.1 占地面积

七彩湖厂位于我国贵州省贵阳市白云区,设计规模为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,占地面积为 $5\,588 \text{ m}^2$,对应的吨水占地面积为 $0.28 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ 。七彩湖厂周边居民众多,卫星图见图1(a)。可见七彩湖厂距离最近的小区不过百米,通过下沉建设,减少了土地占用以及对周边居民环境的影响。七彩湖厂出水补给至湿地公园,从实景图[图2(a)]中可以看出,七彩湖厂已与周边环境融为一体。



a. 七彩湖厂

b. Hillerød 厂

图1 我国贵阳七彩湖厂和丹麦 Hillerød 厂的卫星图

Fig.1 Satellite imagery of Guiyang Qicaihu plant in China and Hillerød plant in Denmark

Hillerød 厂位于丹麦 Hillerød 市的气候与环境公园内,设计规模亦为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,占地面积为 $12\,800 \text{ m}^2$,对应的吨水占地为 $0.64 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ 。该公园远离居民区且周边面积较大,卫星图见图1(b),实景图见图2(b)。其在节地方面需求不大,相比于七彩湖厂,其吨水占地面积偏大。但根据《城镇污水处理厂节地技术导则》(T/CECS 511—2018)中对400余座污水厂的调研,污水厂用地面积与处理规模可用函数分析测算^[5],Hillerød 厂实际占地面积为该用地标准的37%。可见,相较于传统地上污水厂,下沉厂的节地效果非常显著。



a. 七彩湖厂

b. Hillerød 厂

图2 我国贵阳七彩湖厂和丹麦 Hillerød 厂的实景图

Fig.2 Actual view of Guiyang Qicaihu plant in China and Hillerød plant in Denmark

1.2 出水标准

七彩湖厂和 Hillerød 厂设计出水水质见表1。可以看出,两厂都达到了较高的出水标准。在水环境保护要求日趋严格的背景下,我国部分重点区域及流域相继颁布并实施了严于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A的地方标准,这些标准均对污水处理厂的处理效果提出了更

高要求。

表 1 设计出水水质

Tab.1 Design effluent quality $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	SS	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	TP
七彩湖厂	30	10	1.5	15	0.3
Hillerød 厂	75	5	3	3.66	0.18

七彩湖厂出水 TN 执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,其他指标均执行地表水 IV 类标准。在丹麦,国家环保政策是“污染者付费”,污水处理设施的运营单位即为污染物的排放者,“付费”是支付一种排污“税”,按照排放的 BOD_5 、TN、TP 这三大污染物的量进行折算。在这种国家政策的约束下,污水处理设施的运营单位会尽量减少对水体的污染物排放总量。所以 Hillerød 厂出水 SS、TN、TP 指标相较于七彩湖厂更加严格,分别为 5、3.66 与 0.18 mg/L ;而设计出水 COD 则较高,为 75 mg/L 。

2 工艺设备的对比分析

七彩湖厂与 Hillerød 厂的工艺流程见图 3。整体来看,两厂在水线、泥线和气线方面都比较完备,均体现出高标准的特点。

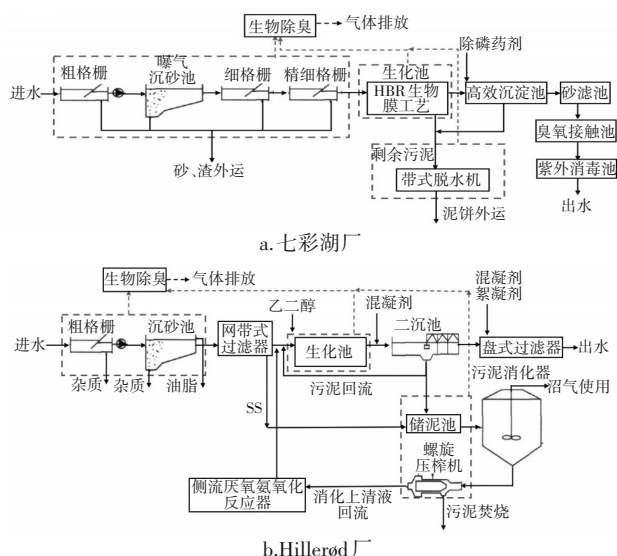


图 3 我国贵阳七彩湖厂和丹麦 Hillerød 厂的工艺流程

Fig.3 Process flow of Guiyang Qicaihu plant in China and Hillerød plant in Denmark

在水线方面,七彩湖厂采用节地型的工艺路线以实现集约建设,主体生化单元采用复合生物膜技术,省去二沉池,深度处理单元采用高效沉淀池、臭氧接触池等,对出水水质提供更好的保障。在泥线

方面,七彩湖厂与我国多数项目类似,整体比较简单,污泥脱水后采用外运集中处置方式,而 Hillerød 厂的污泥则采用厌氧消化产气工艺,并与周边的厨余垃圾等协同处理。在气线方面,两厂均采用生物除臭技术,大大减轻了臭气的二次污染。下面就具体单元技术和设备进行对比分析。

2.1 预处理单元

七彩湖厂主体生化单元采用复合生物膜工艺,为了减少杂质对填料拦截筛网的堵塞,相比于常规污水厂,该厂在预处理系统增设了精细格栅,其网孔尺寸为 1 mm,用于拦截直径大于 1 mm 的固体物,保证生物处理及污泥处理系统稳定运行。

Hillerød 厂在预处理部分设置了孔径更小的网带式过滤器(Salsnes Filter),以期进一步回收原水中的碳源,优化沼气生产和反硝化碳源的分配。在不同的网带转速下,Salsnes Filter 对原水中 SS 的去除效果不同。有报道称,该过滤器在筛目尺寸为 350 μm 、滤速为 116 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的条件下,SS 去除率为 78%^[6]。据此估算,Hillerød 厂的 SS 去除率应为 70%~80%。

2.2 主体生化单元

七彩湖厂进水 C/N 为 10.3,碳源较为充足,由于该厂出水 TN 执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,无需外加碳源即可满足排放要求,因此主体生化工艺采用了更为节地的 HBR 复合生物膜工艺。该厂设生化池 2 座,每座包括缺氧池、一级好氧池、二级好氧池,其设计水力停留时间分别为 2.0、1.7、1.7 h,投加轻质生物填料,填充率分别为 60%、70%、70%。HBR 生物膜技术采用高填充率结构,为菌体提供更多生长空间,提高了处理负荷;另外,当其正常运行时,高填充率填料易形成固定床结构,可以有效截留微生物和悬浮物,出水 SS 较低,从而节省了二沉池;当截留的污染物达到一定程度时,通过加大曝气量进行反洗,污水仍连续进入系统,在曝气和水流的共同作用下,填料混合碰撞,截留的悬浮物和老化的生物膜脱落随水排走^[7]。七彩湖厂运行和反洗交替进行,缺氧池一般每天反洗 0.5 h。HBR 技术原理^[7]如图 4 所示。

Hillerød 厂进水 C/N 为 11.7,碳源充足,但是由于该厂出水 TN 排放要求严格($<3.66 \text{ mg/L}$),因此采用了脱氮效率较高的 Bardenpho 工艺(见图 5),设生

化池3座并配套辐流式二沉池。每座生化池由选择区、厌氧区、缺氧区、好氧区、缺氧区、缺/好氧切换区组成,生化池总体积为12 940 m³,设计水力停留时间为15.5 h。二沉池容积为10 250 m³。通过曝气,使生化池好氧区溶解氧控制为2~3 mg/L,缺氧区溶解氧低于0.2 mg/L。污泥浓度控制为3~5 g/L,内、外回流比分别控制为200%~300%与50%~100%,充分利用原水碳源进行脱氮。另外,为了进一步保障出水TN浓度,该厂在生化池外加乙二醇碳源,投加浓度为20~40 mg/L,通过以上操作实现了系统良好的脱氮效果。

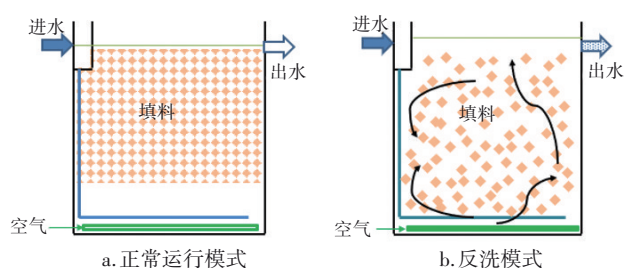


图4 HBR技术原理

Fig.4 Principle of HBR technology

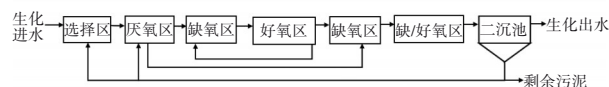


图5 Hillerød厂生化处理流程

Fig.5 Biochemical treatment process of Hillerød plant

2.3 深度处理单元

七彩湖厂进水C/P为55.5,碳源较为充足,因主体生化工艺采用生物膜工艺,生化除磷效果较活性污泥工艺差,故深度处理单元采用“高效沉淀池+臭氧接触池+紫外消毒池”工艺,确保系统的除磷效果与出水安全。其中高效沉淀池混合池的混合时间为2.5 min,絮凝池的反应时间为12 min,斜管区表面负荷为9.3 m³/(m²·h)。高效沉淀池中混凝剂与絮凝剂的投加量分别为40、0.7 mg/L,实现了深度除磷。后续臭氧接触池中设计臭氧投加量为5 mg/L,接触时间为30 min,结合紫外强度≥25 mJ/cm²的消毒措施,保障了出水水质安全。

Hillerød厂进水C/P为63.7,碳源充足,其生化主流工艺采用了Bardenpho工艺,包括厌氧、缺氧、好氧环境,为除磷菌提供了良好的生存环境与条件。另外,该厂在二沉池投加混凝剂同步进行化学

除磷,生化池出水TP控制在0.5 mg/L以下。因此Hillerød厂的深度处理单元仅采用了过滤孔径为0.1 mm的盘式过滤器。相比于七彩湖厂,Hillerød厂虽没有单独的除磷单元,但其通过生化池的生物除磷与同步化学除磷,以及在盘式过滤器前端再投加混凝剂与絮凝剂,进一步降低了出水TP浓度,实现了系统深度除磷,混凝剂与絮凝剂投加量分别为25与0.3 mg/L。

2.4 污泥及臭气处理

七彩湖厂污泥脱水机房采用带式浓缩脱水一体机,污泥脱水至含水率<80%后,被外运送至污泥深度处理中心进行深度处理。我国城市排水管网尤其是南方地区,在修建与使用过程中普遍存在雨污混接、地下水渗入的问题^[8];另外,城市化发展过程中大量的基建、施工建设使泥砂水排入污水管网系统等,导致我国剩余污泥中无机质含量高(50%~70%),而有机质含量低(30%~50%),因此,目前我国污泥的厌氧消化推广应用程度较低^[9]。

Hillerød厂的污泥处理系统在丹麦城市污水处理厂中较为典型,污泥首先经过厌氧消化、稳定脱水后再进行焚烧处理。厌氧消化器容积为2 500 m³,一般控制污泥消化器停留时间为30 d,产甲烷量约5 000 m³/d,可用于热电联产,实现再生水厂能源回收率在20%以上。污泥消化上清液进入侧流厌氧氨氧化反应器,可大大降低高氨氮废水回流至污水主流生物处理单元造成的能耗和外加碳源消耗。该侧流厌氧氨氧化反应器平均停留时间为42.5 h,平均氨氮去除负荷可达80 kg/d。

两厂的臭气处理流程均为“臭气源密闭系统—臭气收集系统—风机—输送系统—生物滤池”。七彩湖厂设置炭质填料生物除臭塔一座,除臭风量为14 800 m³/h;Hillerød厂的除臭风量为2 500 m³/h。

3 运行效果

3.1 处理效果

七彩湖厂和Hillerød厂2021年的实际处理效果见表2。可知,两厂的运行效果较为稳定,出水COD、BOD₅、氨氮、TN、TP均能达到各自的排放标准。

在污染物去除技术方面,两厂通过生化处理和物化处理的结合,出水各项指标浓度均较低。尤其在脱氮方面,Hillerød厂为了达到更低的TN排放浓

度,通过良好的工艺参数控制与生化池外加乙二醇碳源等手段,其2021年出水TN平均浓度仅为1.96 mg/L。

表2 实际进、出水水质

Tab.2 Actual influent and effluent quality

mg·L⁻¹

项目		COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP
七彩湖厂	进水	350	127	22.3	34	6.3
	出水	14	1.9	0.98	11.5	0.10
Hillerød厂	进水	478	159	32	41	7.5
	出水	24	1.8	0.13	1.96	0.11

3.2 环境生态效益

两厂的环境生态效益对比见表3。下沉式再生水厂利用地面空间与周边社区融合,将污水处理与提供生态景观、湿地绿化、休闲娱乐、科普教育、科技研发等公共服务有机融合,地上、地下统筹规划,改善周边环境质量,为居民提供各类便民服务,具有良好的环境、生态、社会效益。

表3 环境生态效益对比

Tab.3 Comparison of environmental and ecological benefits

项目		七彩湖厂	Hillerød厂
位置		居民区周边	郊野公园
占地面积/(m ² ·m ⁻³ ·d)		0.28	0.64
出水用途		公园生态补水	湖泊生态补水
污染物削减量/(t·a ⁻¹)	COD	2 453	2 651
	TN	165	228
	TP	45	43
资源利用		再生水	再生水/产甲烷/热电联产
附属功能		生态景观、休闲娱乐、科技研发	生态景观、科技研发

4 下沉厂发展的一些思考

近年来,下沉式再生水厂在我国得到了快速发展,据不完全统计,目前已经有近2 000×10⁴ m³/d的处理规模,占我国污水处理总量的1/10。本研究中的两座案例厂各有特色,实现了土地集约、环境友好、资源利用率高的目的,成为了所在城市基础设施的一张亮丽名片。如何进一步推动下沉厂的高质量发展,需要从建设理念、运行管理和技术装备上开展进一步研究。

① 从被动选择到主动建设,并因地制宜开发。最初国外建设地下污水厂是特殊条件下的被

动选择,而随着城市化的发展和人们对生活品质的追求,越来越多的城市主动将污水厂建设为下沉式,并在此基础上因地制宜地拓展出各类社会功能。欧美国家由于人均土地资源丰富,下沉式污水厂主要将地上空间扩展为郊野公园和科普教育基地;而我国由于人口密度大,空间更为紧凑,下沉式污水厂的地上空间主要服务于城市空间拓展和产业发展。

② 系统化思维下的精细管理。从本研究的案例分析可以看出,我国和欧洲在污水处理管理的机制方面存在较大差异,即以排放标准和排污量为核心的两种不同的管理思路。以排放标准为核心的管理机制整齐划一,有利于在短时期迅速完成污水处理厂的设计和建设工作;以排污量为核心的管理机制则相对灵活,会推动水务管理者不断地寻求技术革新,从而提升效率,为污水处理资源能源回收新技术提供应用推广平台。两种管理机制各有优缺点,随着我国污水处理厂规模的不断扩大,提升水务资产运营效率成为行业的普遍需求,而欧洲的管理经验可作为我国的有益借鉴。

③ 适应下沉厂体系的技术装备创新。早期建设的污水厂普遍存在二次污染、“重水轻泥”等现象,而下沉厂的建设更加注重统筹考虑水、泥、气、声,要求同步达标,尤其是臭气的收集处理,已经成为下沉式再生水厂的标配。下沉厂结构复杂、空间密闭的特点对节能减碳、环境安全等提出了更高的科技需求。案例中的预处理过滤器、HBR复合生物膜技术就是适用于下沉厂的节地型、短流程的新型技术装备。此外,国外污水厂的污泥厌氧消化产甲烷实现热电联产、能源回收的做法,为我国双碳背景下的下沉厂发展提供了参考。

5 结语

通过介绍两座下沉式案例厂的工艺、设备,充分展现出了下沉式再生水厂土地集约、环境友好、资源利用率高的特点。针对我国大城市人口规模大、土地资源紧张的问题,下沉厂的建设符合现代化城市地下、地上空间高效开发利用的趋势和政策导向。未来,提升水务资产运营效率以及双碳背景下先进的能源回收技术应用将会成为行业的普遍需求,国外先进的管理经验与技术装备值得我们借鉴。

参考文献:

- [1] QU J H, WANG H C, WANG K J, *et al.* Municipal wastewater treatment in China: development history and future perspectives [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2019, 13(6): 3-9.
- [2] 侯锋. 地下式污水处理厂关键技术研究 with 工程实践 [D]. 北京:清华大学, 2017: 13-14.
HOU Feng. Key Technologies Research and Engineering Practice of Underground Municipal Wastewater Treatment Plant [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017: 13-14 (in Chinese).
- [3] 杨一烽, 杜炯, 张欣. 国内地下式污水处理厂的发展现状和关键技术分析[J]. *净水技术*, 2021, 40(10): 101-106, 117.
YANG Yifeng, DU Jiong, ZHANG Xin. Development status and key technology analysis of underground wastewater treatment plants (UWWTPs) at home [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40 (10) : 101-106, 117 (in Chinese).
- [4] 邵彦青, 侯锋, 薛晓飞, 等. 马来西亚 Pantai 地下式污水处理厂工程设计特点[J]. *给水排水*, 2014, 40 (9): 24-27.
SHAO Yanqing, HOU Feng, XUE Xiaofei, *et al.* Characteristics of the design of Pantai underground wastewater treatment plant in Malaysia [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2014, 40 (9) : 24-27 (in Chinese).
- [5] 中国工程建设标准化协会. 城镇污水处理厂节地技术导则: T/CECS 511—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018: 32-34.
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Guidelines for Land Saving in Municipal Wastewater Treatment Plant: T/CECS 511—2018[S]. Beijing: China Planning Press, 2018: 32-34 (in Chinese).
- [6] RUSTEN B, ODEGAARD H. Evaluation and testing of fine mesh sieve technologies for primary treatment of municipal wastewater[J]. *Water Science & Technology*, 2006, 54(10): 31-38.
- [7] 刘彦君, 蒋崇德, 曹效鑫, 等. 节地型 HBR 生物膜技术在贵阳金百再生水厂的应用[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(4): 87-91.
LIU Yanjun, JIANG Chongde, CAO Xiaoxin, *et al.* Application of a land-saving hybrid biofilm reactor (HBR) in Guiyang Jinbai Reclaimed Water Plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37 (4) : 87-91 (in Chinese).
- [8] 陈思思, 杨殿海, 庞维海, 等. 我国剩余污泥厌氧转化的主要影响因素及影响机制研究进展[J]. *化工进展*, 2020, 39(4): 1511-1520.
CHEN Sisi, YANG Dianhai, PANG Weihai, *et al.* Main influencing factors and mechanisms of anaerobic transformation of excess sludge in China [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39 (4) : 1511-1520 (in Chinese).
- [9] 杭世珩, 刘旭东, 梁鹏. 污泥处理处置的认识误区与控制对策[J]. *中国给水排水*, 2004, 20(12): 89-92.
HANG Shijun, LIU Xudong, LIANG Peng. Misunderstanding of sludge disposal and treatment and control strategy [J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20(12): 89-92 (in Chinese).

作者简介: 张璐晶(1984—), 女, 山东莱州人, 硕士, 主要从事下沉式再生水厂相关研究工作。

E-mail: zhanglujing@cwewater.com

收稿日期: 2023-03-09

修回日期: 2023-04-18

(编辑: 沈靖怡)