

设计经验

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.22.008

# 喀斯特山区大型水厂迁建工程设计

杨华仙

(中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610081)

**摘要:** 遵义南郊水厂为喀斯特山区大型水厂,由于喀斯特山区地形崎岖、岩溶发育、赋水条件差、水质易受污染,故需迁建。迁建新厂设计规模 $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,依照Ⅰ类反恐设计技术标准,采用臭氧-活性炭深度处理工艺,净水单元首次采用了网格絮凝平流沉淀池底“W”型泥槽倒角并叠建清水池、炭滤池与砂滤池共用反冲洗泵房并嵌入炭滤池两项关键技术。运行结果表明,新厂出水水质优良,有机物去除效果好,出水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 为 $0.87\sim 1.97\text{ mg/L}$ ( $<3\text{ mg/L}$ )、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 $0.04\sim 0.19\text{ mg/L}$ ( $<0.5\text{ mg/L}$ )、浊度为 $0.17\sim 0.3\text{ NTU}$ ( $<1\text{ NTU}$ )、色度 $<5$ 度( $<15$ 度),稳定达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006),属于优质水范畴。

**关键词:** 臭氧-活性炭工艺; 泥槽倒角; 共用反冲洗泵房; 反恐设计; 喀斯特山区; 迁建工程

中图分类号: TU991 文献标识码: B 文章编号: 1000-4602(2022)22-0047-07

## Design of Large-scale Waterworks Relocation Project in Karst Mountainous Area

YANG Hua-xian

(Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610081, China)

**Abstract:** Nanjiao waterworks in Zunyi is a large waterworks in Karst mountainous area, which needs to be relocated due to rugged terrain, Karst development, poor groundwater occurrence and easy pollution of water quality. The design scale of the new plant is  $10\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ , and the project is required to conform to class I anti-terrorism design technical standard. The advanced treatment process is ozonation and activated carbon adsorption. Two key technologies, namely W-type sludge slot chamfering at the bottom of the flocculation horizontal flow sedimentation tank and stacking the clear water tank, and carbon filter and sand filter sharing backwash pump house and embedding carbon filter, were firstly adopted in the purification units. The operation results showed that the effluent quality of the new plant was good, and high removal efficiency of organic matter was obtained. The  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  in effluent was  $0.87\sim 1.97\text{ mg/L}$  (less than  $3\text{ mg/L}$ ),  $\text{NH}_3\text{-N}$  was  $0.04\sim 0.19\text{ mg/L}$  (less than  $0.5\text{ mg/L}$ ), turbidity was  $0.17\sim 0.3\text{ NTU}$  (less than  $1\text{ NTU}$ ) and chroma  $<5$  degrees (less than  $15$  degrees). The product water quality stably met the limits specified in *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749—2006), which belonged to the category of high quality water.

**Key words:** ozonation and activated carbon adsorption process; sludge slot chamfering; sharing backwash pump house; anti-terrorism design; Karst mountainous area; relocation project

喀斯特山区地形崎岖,碳酸盐岩分布广泛,岩溶发育,具有赋水条件差、水源易漏失、蓄水保水困难、水质易受污染等特点<sup>[1-2]</sup>。喀斯特山区水厂多以水库为水源。喀斯特山区水库具有表层水  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  浓度分别显著低于深层水 20%、16% 的水化学分布特征<sup>[3-4]</sup>,故又以表层水取用为主。

遵义南郊水厂属喀斯特山区水厂,受自然环境、社会经济影响,存在城市发展包围、卫生防护形势严峻、设备设施陈旧、净水工艺落后、难以应对日益恶化的原水水质等问题,水厂迁建日益紧迫。

## 1 项目背景

根据贵州省政府关于遵义集中式饮用水水源保护区调整方案的批复,对南郊水厂实施整体迁建,新厂投用之后,接替老厂供水。新厂设计规模  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  (同老厂)。取水水源由南郊水库溯洛江河逆流而上迁移至红岩水库,水源相距 9.2 km。水厂厂址由遵义市南城体育馆西侧迁移至红花岗区巷口镇南侧,厂址相距 4.7 km。

新厂位于洛江河河谷东侧台地,临近水源地,既可依托镇区的交通、排水设施,又与场镇街区保持了一定的距离。新厂西临洛江河,南倚高山,两面形成天然的防护屏障,是喀斯特山区不可多得的水厂理想选址。新厂占地面积  $5.97 \text{ hm}^2$ ,其位置见图 1。



图1 新南郊水厂位置

Fig.1 Location of new Nanjiao waterworks

## 2 项目难点分析

① 原水为山区水库水,夏季泥砂重、浊度高,偶有泥腥味,冬季为低温低浊水,且已受到微污染,原有的常规处理工艺已难以满足出水水质要求。

② 红岩水库后期要实施大坝加高工程,取水方案需要远近结合,还要兼顾岸边陡崖和水位涨落

条件。

③ 原水管途经线路山高坡险、道路狭窄,存在边坡溜塌、损毁管道的风险,还需要考虑坝肩防渗问题,外部设计因素复杂。

④ 水厂用地形状极不规则,用地红线凹凸曲折,呈“游戏机手柄”型,且场地中央还有一条出入当地小学的唯一公路需要保通,总平布置需要高度集约化。

⑤ 为沿用老厂的相关执照和维持多年的使用习惯,新厂采用液氯消毒,水厂周边有两座学校,需要评估安全距离、制定危化品运输路线和采取防护措施。

⑥ 项目位于贵州喀斯特山区,山高坡陡,怪石嶙峋,地下溶洞(槽)发育,地层复杂多变,构筑物基础形式复杂多样,部分构(建)筑物基础需根据现场开挖实际情况做二次设计。

⑦ 项目按贵州省无人机投毒演练测试标准进行反恐设计,反恐标准高。

## 3 总体思路

### 3.1 工艺路线

红岩水库水质基本达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水标准,原水存在季节性  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、TN 超标,经常性  $\text{NH}_3\text{-N}$  超标,微有泥腥味,属于微污染水范畴。因此,净水工艺推荐采用臭氧-活性炭深度处理工艺,通过臭氧化学氧化,活性炭物理吸附、化学吸附、生物降解作用去除原水中的有机物、臭味物质和浊度。

根据活性炭滤池工艺位置不同,存在“先砂后炭”和“先炭后砂”两种形式,各有优劣<sup>[5-6]</sup>,具体比较见表 1。

表1 工艺对比

Tab.1 Comparison of processes

项 目	“先砂后炭”	“先炭后砂”
对沉淀出水要求	低	高
炭滤池负荷	小	大
运行周期	长	短
生物降解效果	好	差
出水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$	低	高
出水浊度	高	低
生物泄漏风险	大	低
活性炭使用寿命	长	短
管理要求	高	低

“先砂后炭”工艺既有出水浊度高、生物泄漏风险大、管理要求高的缺点,又有运行周期长、生物降解效果好、出水 $COD_{Mn}$ 低、活性炭寿命长等技术优势。考虑本工程原水“两虫”检测(每半年1次)结果均为0个/10 L的低水平生物致病风险,“先砂后炭”工艺更有利于水厂高效运行,故推荐采用“先砂后炭”工艺。水厂工艺流程见图2。

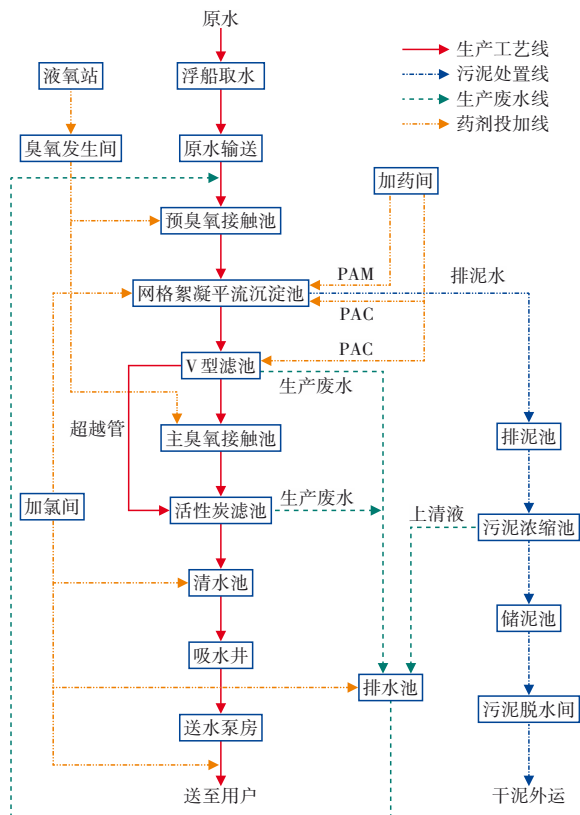


图2 新南郊水厂工艺流程

Fig.2 Flow chart of water treatment process of new Nanjiao waterworks

### 3.2 总平布置

以巷口小学出入公路为自然分界线,将水厂用地范围一分为二,公路以东区域用于水厂全部单体集中布置(占地面积 $4.47\text{ hm}^2$ ),公路以西区域用作水厂绿化苗圃基地,既能保证小学出入通畅,又能实现水厂围合封闭、用地集约。

水厂主、次出入口道路与现状巷三公路连接线垂直相接,综合楼、水质检测中心则平行并紧贴该道路布置,既方便水厂的日常出入管理,又能避免社会性公共事务干扰水厂生产区。

臭氧发生间、液氧站、加氯间等危险单元布置在厂区西南侧,远离巷口小学,以厂界南侧高山为

天然屏障,与巷口小学形成天然阻隔,保证了与巷口小学及周边民居的安全距离大于 $50\text{ m}$ 。液氧、液氯的厂外运输由第三方专业公司承担,依托巷三公路及连接线进厂。水厂总平面布置见图3。



图3 新南郊水厂总平面布置

Fig.3 General layout of new Nanjiao waterworks

### 3.3 风貌塑造

水厂既要满足工艺功能,又要塑造鲜明特征。以城市名片——遵义会址为原型,提炼出“歇山屋顶、半圆拱廊、青砖灰瓦”等元素,塑造建筑风格。景观绿化选用当地乔灌木及地被,移植老水厂精品花木,利用植物色差刻字,四季有景,生动有趣。

## 4 工程设计

### 4.1 取水设计

红岩水库枯水位 $874.66\text{ m}$ ,正常蓄水位 $884.66\text{ m}$ ,校核( $P=0.2\%$ )洪水位 $886.66\text{ m}$ ,大坝加高后蓄水位 $895\text{ m}$ ,水位变幅 $\pm 10\text{ m}$ ,故采用浮船取水。

配电间置于浮船上,浮船主墩浇筑在水库左岸陡崖上,并通过 $\varnothing 40\text{ mm}$ 、 $L=5\text{ m}$ 锚杆嵌固于后背石壁内。浮船船体长 $\times$ 宽 $=41\text{ m}\times 13\text{ m}$ ,摇臂输水管及栈桥长 $40\text{ m}$ ,在库区上游地势开阔处完成船体浮箱焊接拼装后,通过小船拖拽(见图4),顺流牵引至指定水域,再通过 $90^\circ$ 转体完成与岸边支墩的固定。



图4 浮船拖移实况

Fig.4 Actual condition of pontoon dragging



## 4.2 原水输水设计

该工程原水输水管起于浮船支墩万向接头处,沿896 m等高线布设,穿过左岸坝肩后,逐渐向下切至污水处理站门前,通过镇区背街道路缓缓上抬,引至巷三公路连接线,最后接入水厂,线路总长880 m。

喀斯特山区山高坡险,道路狭窄,群众出行诉求高,双管敷设困难,加之水厂服务区域内还有其他水源水厂能保证事故用水量,故采用单管架空输水(见图5),管径DN1200。



a. 实施前

b. 实施后

图5 原水管穿越红岩水库左岸坝肩前、后对照

Fig.5 Comparison before and after raw water pipe passing through the left abutment of Hongyan reservoir dam

## 4.3 水厂设计

### 4.3.1 网格絮凝平流沉淀池叠建清水池设计

网格絮凝平流沉淀池与清水池叠建构造见图6。

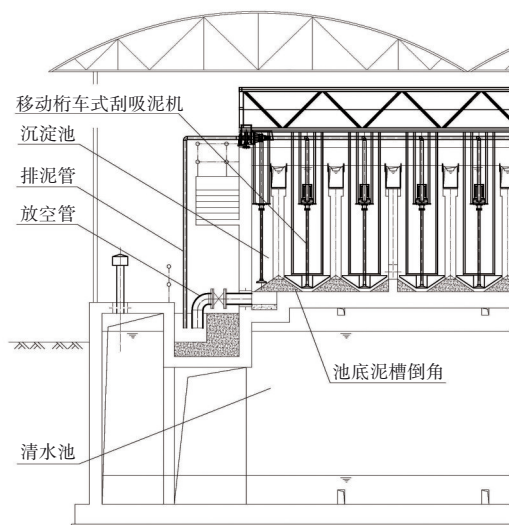


图6 沉淀池底泥槽倒角并叠建清水池剖面示意

Fig.6 Section diagram of sludge slot chamfering at the bottom of sedimentation tank and stacking the clean water tank

为减少占地,采用网格絮凝平流沉淀池与清水池叠建设计。上部设絮凝沉淀池,共2座,每座分组,单组土建尺寸为90.85 m×7.85 m×4.0 m;下部设清水池,共2座,不分组,单座平面尺寸为90.85 m×21.95 m,池深为3.45~5.45 m,有效水深为4.8 m。

#### ① 混合池

混合池采用方池、机械混合,平面尺寸为2.4 m×2.4 m,有效水深6.0 m,超高0.4 m,水力停留时间40 s。

#### ② 絮凝区

絮凝区单组土建尺寸为15.9 m×7.85 m×6.4 m,平均有效水深4.5 m,泥斗深1.25 m,采用液动排泥角阀排泥。

絮凝区分为三段,前段停留时间6 min,  $G$  值  $60 \text{ s}^{-1}$ ;中段停留时间6 min,  $G$  值  $52 \text{ s}^{-1}$ ;后段停留时间8 min,  $G$  值  $26 \text{ s}^{-1}$ ,絮凝区总反应时间20 min,  $G=48 \text{ s}^{-1}$ ,  $GT=5.5 \times 10^4$ 。竖井流速0.12 m/s,过网流速前段为0.25 m/s,中段为0.22 m/s。孔洞流速:第一段8格,流速0.3~0.2 m/s;第二段8格,流速0.2~0.15 m/s;第三段10格,流速0.14~0.1 m/s。

每组絮凝区采取7排布置,单排4格,共分28格(前2格空置),单格平面尺寸1.8 m×1.8 m。絮凝区前段8格,每格设人字网格5层,网格孔眼80 mm×80 mm;中段8格,每格设人字网格3层,网格孔眼100 mm×100 mm;后段10格,不设网格;单组网格总数64块。

#### ③ 沉淀区

沉淀区池长74.7 m,水平流速11.7 mm/s,停留时间1.73 h。为克服传统沉淀池死区积泥厌氧上浮的难题,采用了平流沉淀池底“W”型泥槽倒角工艺技术,并采用移动桁车泵吸式刮吸泥机,行走速度1.0 m/min,轨距16.35 m。沉淀池排泥浓度高,出水均匀、清澈,抗冲击负荷高,运行稳定。

### 4.3.2 滤池共用反冲洗泵房设计

据相关报道<sup>[7-8]</sup>,采用包含反冲洗泵房在内的多单体叠合设计,可以减少占地。但缺乏炭滤池、砂滤池反洗工况分析和反洗设施共用方面的研究。

炭滤池与砂滤池池型相同,但两者的接触时间、正常滤速、滤料厚度、冲洗周期、冲洗强度、冲洗历时等各有不同(见表2),炭滤池为膨胀冲洗,砂滤池为微膨胀冲洗。

表2 滤池工艺参数对比

Tab.2 Comparison of filter technical parameters

项 目		活性炭滤池	砂滤池
分格数/格	规范值	≥4	≥4
	设计值	6	8
接触时间/min	规范值	6~20	
	设计值	12.4	
正常滤速/(m·h <sup>-1</sup> )	规范值	8~20	6~10
	设计值	9.6	7.2
滤料厚度/m	规范值	1.0~2.5	1.2~1.5
	设计值	2.0	1.2
冲洗周期/d	规范值	3~6	1~1.5
	设计值	5	1
水冲洗强度/(L·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	规范值	7~12	4~8
	设计值	8~12	4~8
气冲洗强度/(L·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	规范值	15~17	13~17
	设计值	16	16
膨胀率/%	规范值	15~20	
	设计值	20	
气冲历时/min	规范值	3~5	1~2
	设计值	4	2
水冲历时/min	规范值	8~12	5~8
	设计值	10	6

从反洗强度、冲洗历时来看,炭滤池的反洗量大于砂滤池;从反洗周期来看,炭滤池的反洗频率又低于砂滤池,炭滤池和砂滤池具备共用反冲洗设施的条件。按照最小公倍数原理,每5天出现一次反冲洗时间重叠,共用反洗设备(离心泵、罗茨风机)应按“滤池双输出”工况来配置,通过调配设备“备用”台数来匹配输出需求,降低设备闲置率。

项目共用反冲洗泵房,并将反冲洗泵房嵌入炭滤池,就近利用炭滤池出水总渠内承压水作为反洗水源,滤池使用效果良好。实测砂滤池进水浊度为0.49~1.5 NTU,出水浊度为0.23~0.48 NTU。

4.3.3 加药设计

加药设计是保证水厂工艺效果的重要环节。有研究<sup>[9-10]</sup>考察了不同臭氧投量对浊度、有机物的去除效果,单纯沉淀及砂滤对COD<sub>Mn</sub>、DOC及UV<sub>254</sub>几乎没有去除效果,臭氧氧化对浊度、氨氮及蛋白质、腐殖质、富里酸类有机物具有明显的去除作用,臭氧投加量以1~1.5 mg/L为最佳。

本项目投药种类多,投药作用复杂,控制要求高,各工序加药参数见表3。其中,前加氯控制沉淀出水余氯为0;后加氯控制出厂水余氯≥0.3 mg/L;主

臭氧控制进炭滤池余臭氧≤0.2 mg/L。

表3 加药设计参数

Tab.3 Design parameters of chemical dosing

项 目	投加位置	投药作用	设计投加量/(mg·L <sup>-1</sup> )
前加氯	预臭氧池后	季节性投加,防止浮游生物孳生	1.0
后加氯	炭滤池后、清水池前	水厂消毒	2.0
补加氯	清水池后	管网消毒	0.5
废水加氯	排水排泥池前	回流废水消毒	1.0
加矾	混合池	混凝、助凝	PAC:30; PAM:1.0
预加氨 <sup>[11]</sup> (原水含溴离子时)	砂滤池后、主臭氧池前	减少和抑制溴酸盐产生	0.5
预臭氧	混凝沉淀池前	辅助絮凝沉淀	1.0
主臭氧	炭滤池前	氧化、断链	2.0

4.3.4 构(建)筑物基础设计

喀斯特山区山高坡陡,怪石嶙峋,地下溶洞(槽)发育,地层复杂多变,构(建)筑物基础形式复杂多样。鉴于此,设计采用了筏板基础、机械旋挖灌注桩基础和独立柱基础,甚至同一单体采用2种基础的结合。对于基础未进入持力层且基底距离持力层(中风化灰岩)厚度不超过3 m的溶槽和裂隙,挖除后用C15毛石混凝土进行换填(见图7)。

全厂共21个单体,目前状态良好,使用正常。



a. 浅覆盖型岩溶                      b. 深埋藏型溶槽

图7 浅覆盖型岩溶及深埋藏型溶槽换填现场

Fig.7 Replacement site of shallow overburden type Karst and deep buried Karst

4.4 反恐设计

项目根据贵州省无人机投毒演练测试标准进行反恐设计,依照《城市供水行业反恐怖防范工作标准》(建城[2016]203号)Ⅰ类标准,全面落实了人防、物防、技防配置,具备相当强的抵御恐怖事件的能力。

① 人防

配备安全巡查分队,设固定警卫人员2名。出入口、中控室、氯库等危险品库房实行24 h值守,每

班次2人值班。

## ② 物防

沉淀池采用钢结构屋盖及墙;滤池采用钢混屋盖及墙;臭氧接触池采用钢混池壁及盖板。其余敞开式水池(如污泥浓缩池、排水排泥池)远离围墙(>30 m)。

水厂出入口设置自动升降柱阻止车辆冲撞;出入口周围、围墙设置警示标志;门卫室配备防爆毯、钢叉、警棍、对讲机、应急灯等应急用品。

按厂区不同部位对应配置防护门、安全门、带锁盖板(人孔)、防护网、过滤网、网罩等实体防护设施。

地下车库及机修仓库内配备工程车、水质检测车、送水车、水质快速检测仪、发电机、水泵等应急装备。

## ③ 技防

在厂界、出入口、主通道、加氯间、泵房设置摄像头;中控室设置记录与显示电脑。

厂界设置入侵探测器;中控室设置紧急报警器。

中控室、配电间、加氯间设置出入门禁。

浮船、预臭氧接触池前端、送水泵房设置生物监测鱼缸。

## 5 运行效果

项目于2020年11月30日进行全厂联动调试并投入使用,运行结果表明,出水水质优良,有机物去除效果好,各项指标均稳定达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)要求。

实际进、出水水质月度均值见表4。

表4 实际进、出水水质

Tab.4 Actual influent and effluent quality

项 目	进水	出水	GB 5749—2006
水温/℃	1~30.1	1~24	
浊度/NTU	0.98~33.86	0.17~0.3	1
COD <sub>Mn</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	2~18	0.87~1.97	3
NH <sub>3</sub> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.15~1.2	0.04~0.19	0.5
总硬度(CaCO <sub>3</sub> 计)/(mg·L <sup>-1</sup> )	206~264	140~182	450
色度/度	15~20	<5	15
臭和味	偶有泥腥味	无异臭、异味	无异臭、异味

## 6 技术经济分析

本项目总投资51 361.40万元,工程费用35 397.26万元(其中取水工程1 275.01万元,净水

厂工程24 161.40万元)。单位投资指标3 540元/m<sup>3</sup>,经营成本2 249.41万元/a,单位经营成本0.8元/m<sup>3</sup>。

## 7 结语

南郊水厂迁建成功,不仅大大缓解了老城区水源保护的严峻压力、释放出城市建设用地指标,而且还为城市安全供水和社会经济持续发展提供了强大支持。

工程采用“先砂后炭”深度处理工艺,并融入网格絮凝平流沉淀池底“W”型泥槽倒角并叠建清水池、炭滤池与砂滤池共用反冲洗泵房并嵌入炭滤池技术,取得了较好的社会效益和环境效益,为喀斯特山区水厂建设提供了借鉴。

## 参考文献:

- [1] 赵先进,周创兵,张华. 喀斯特山区地下水资源特点及其开发利用问题——以贵州省为例[J]. 中国农村水利水电,2015(6):52-55,65.  
ZHAO Xianjin, ZHOU Chuangbing, ZHANG Hua. Characteristics and utilization of groundwater resources in Karstified mountainous zones in Guizhou Province [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(6):52-55,65(in Chinese).
- [2] 凌明阁,刘方,朱健,等. 贵州省中部喀斯特山区城镇化对浅层地下水氮磷的影响及评价[J]. 水土保持通报,2012,32(5):141-144.  
LING Mingge, LIU Fang, ZHU Jian, et al. Influence of urbanization on concentrations of N and P in shallow groundwater and its evaluation in Karst hilly area of Guizhou Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012,32(5):141-144(in Chinese).
- [3] 王万发,钟君,李彩,等. 喀斯特地区梯级水库建造对水化学分布的影响[J]. 湖泊科学,2020,32(3):713-725.  
WANG Wanfa, ZHONG Jun, LI Cai, et al. The influence of cascade reservoir construction on water chemistry Karst area [J]. Journal of Lake Sciences, 2020,32(3):713-725 (in Chinese).
- [4] 马松,魏榆,韩翠红,等. 喀斯特水库水化学特征及对无机碳沉积通量的指示[J]. 湖泊科学,2021,33(6):1701-1713.  
MA Song, WEI Yu, HAN Cuihong, et al. Hydrochemical characteristics in Karst reservoirs and its implication for inorganic carbon deposition fluxes [J]. Journal of Lake Sciences, 2021,33(6):1701-1713 (in



- Chinese).
- [5] 蔡璇. 饮用水深度处理技术研究进展及应用现状[J]. 净水技术, 2015, 34(s1): 44-47.
- CAI Xuan. Research and application of advanced treatment process in drinking water treatment [J]. Water Purification Technology, 2015, 34 (s1): 41-47 (in Chinese).
- [6] 张振秀, 杨凯, 于建伟, 等. 臭氧活性炭-后置砂滤工艺对水中农药的控制效能[J]. 环境工程学报, 2016, 10(5): 2315-2320.
- ZHANG Zhenxiu, YANG Kai, YU Jianwei, *et al.* Pesticides removal evaluation for O<sub>3</sub>/BAC with post filtration process in drinking water [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10 (5): 2315-2320 (in Chinese).
- [7] 任中佳. 常州第一水厂臭氧活性炭深度处理改造工程设计[J]. 中国给水排水, 2018, 34(18): 69-72.
- REN Zhongjia. Reconstruction design of Changzhou No. 1 waterworks for ozone/activated carbon advanced treatment [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (18): 69-72 (in Chinese).
- [8] 毛峰. 净水厂砂滤池与臭氧活性炭滤池集约化组合的设计[J]. 中国市政工程, 2015(3): 78-79, 85.
- MAO Feng. Design of intensive combination of sand filter and ozone activated carbon filter in water works [J]. China Municipal Engineering, 2015 (3): 78-79, 85 (in Chinese).
- [9] 李学艳, 马垚, 徐飞飞, 等. 预臭氧氧化强化常规工艺去除黄浦江原水中污染物[J]. 中国给水排水, 2013, 29 (23): 38-41.
- LI Xueyan, MA Yao, XU Feifei, *et al.* Conventional treatment process enhanced by pre-ozonation for removing pollutants in raw water from Huangpu River [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29 (23): 38-41 (in Chinese).
- [10] 张雪, 蒋福春, 林涛. 南方某水厂活性炭滤池滤料更换评价及管理应用[J]. 净水技术, 2019, 38(7): 89-95, 120.
- ZHANG Xue, JIANG Fuchun, LIN Tao. Evaluation and management application of filter material replacement for activated carbon filter of a water treatment plant in south China [J]. Water Purification Technology, 2019, 38 (7): 89-95, 120 (in Chinese).
- [11] 强志民, 陆晓巍, 张涛. 饮用水臭氧氧化处理过程中溴酸根的产生及控制[J]. 环境工程学报, 2011, 5 (8): 1689-1695.
- QIANG Zhimin, LU Xiaowei, ZHANG Tao. Formation and controlling measures of bromate during ozonation of drinking water [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5 (8): 1689-1695 (in Chinese).
- 
- 作者简介:** 杨华仙(1982- ), 男, 四川雅安人, 硕士, 高级工程师, 副总工程师, 注册公用设备工程师, 主要从事市政给排水、市政水处理技术的设计与研究工作, 多次获得省部级、国家级优秀勘察设计奖。
- E-mail:** huaxiancq@163.com
- 收稿日期:** 2022-02-14
- 修回日期:** 2022-05-25

(编辑: 孔红春)

保护生态环境就是保护生产力  
改善生态环境就是发展生产力