

# 福州市大学城水厂设计及去除污染物效能

许仁星<sup>1</sup>, 范功端<sup>1,2</sup>, 苏昭越<sup>1</sup>, 魏忠庆<sup>2</sup>, 林茹晶<sup>1</sup>, 林修咏<sup>1</sup>

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福州城建设计研究院有限公司, 福建 福州 350001)

**摘要:** 针对福州市大学城地区供水设施及工艺落后、供水水质不稳定、供水量无法满足人口急速增长和用水量急剧增加的用水需求等问题,对福州大学城水厂进行改建,给出了设计方案与参数,并分析其建设特点及去除污染物效能。福州大学城水厂采用双水源,主体工艺为折板反应/平流沉淀池/V型滤池/二氧化氯消毒,并将清水池叠建于折板絮凝平流沉淀池和滤池下部。运行结果表明,该水厂出水水质满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)。经分析,有机物主要在混凝阶段去除,对TOC、UV<sub>254</sub>和COD<sub>Mn</sub>的总去除率分别为54.24%、68.07%和48.45%,出水TOC与UV<sub>254</sub>之间具有较大相关性。三维荧光光谱分析得出,对溶解性有机物中的色氨酸、紫外区富里酸和可见区富里酸的去除率分别为49.18%、59.41%和59.46%。

**关键词:** 大学城水厂; 清水池; 有机物; 三维荧光光谱

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)06-0073-06

## Design and Pollutant Removal Efficiency of Water Purification Plant in Fuzhou University Town

XU Ren-xing<sup>1</sup>, FAN Gong-duan<sup>1,2</sup>, SU Zhao-yue<sup>1</sup>, WEI Zhong-qing<sup>2</sup>,  
LIN Ru-jing<sup>1</sup>, LIN Xiu-yong<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fuzhou Urban Construction Design and Research Institute Co. Ltd., Fuzhou 350001, China)

**Abstract:** To solve the problems of the backwardness of water supply facilities and process, the instable supply water quality and imbalance between water supply and demand due to rapid growth of population and sharp increase in water demand in Fuzhou University Town, the waterworks in the town was reconstructed. The design scheme and parameters were given, and the construction characteristics and the pollutant removal efficiency were analyzed. Water purification plant in Fuzhou University Town has two water sources with the major water treatment structures of folded plate flocculation and horizontal sedimentation tank, V-filter and chlorine dioxide disinfection. The clean water tank was built under the folded plate flocculation horizontal sedimentation and V-filter. The operation results showed that the treated water quality could meet the *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2006). The organic matter was mainly removed in the stage of coagulation, the removal rates of TOC, UV<sub>254</sub> and COD<sub>Mn</sub> were

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308123); 中国博士后科学基金资助项目(2014M561856); 福建省住房和城乡建设系统科学技术项目(2014-K-05、2016-K-42); 福州大学贵重仪器设备开放测试基金(2014T041)

通信作者: 范功端 E-mail: fgdfz@fzu.edu.cn

54.24% , 68.07% and 48.45% , respectively , and there was a great correlation between TOC and  $UV_{254}$  in the treated water. Three-dimensional fluorescence spectra analysis concluded that the removal rates of tryptophan in dissolved organic matter , UV fulvic-like acid and visible fulvic-like acid were 49.18% , 59.41% and 59.46% , respectively.

**Key words:** water purification plant in university town; clean water tank; organic matter; three-dimensional fluorescence spectra

大学城由于占地范围广,人口密度大,建设选址一般为城乡结合地区,此类地区往往具有半城镇化特点,供水设施及工艺落后,多为分散式供水或老旧水厂小规模供水,不能满足发展迅速、人口急速增长、用水量急剧增加的新式大学城用水需求。以福州大学城水厂为例,探讨此类大学城水厂设计建设特点及去除污染物效能,为类似的水厂建设提供借鉴。

## 1 水厂介绍

福州大学城水厂位于福州市闽侯县上街镇榕桥村内。该水厂的主要供水区域为大学城核心区、高新区、生物园区、上街镇和南屿镇。原福州大学城区域用水主要由上街水厂和5座三元式一体化净水设备供给,由于上街水厂处理工艺相对落后,出厂水质较差,且供水量不满足此区域日益增长的用水需求,因而将其废除,在原厂址拆除改建新的福州大学城水厂,供水总规模为  $12.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  (分两期建

设)。一期工程于2014年9月建成通水。水厂设计采用双水源供水,水源分别取自溪源泵站(溪源水库)和侯官泵站(闽江水),以溪源原水为主,不足时由侯官泵站补充闽江水。对比分析显示,闽江水浊度高于溪源原水。

## 2 处理工艺及其特点

### 2.1 工艺流程

为提供优质的自来水,本工程采用混凝+沉淀+过滤+消毒工艺,主要水处理构筑物为折板反应平流沉淀池+V型滤池。常规运行投加聚合氯化铝(PAC)。由于原水藻类数量较高,故投加聚丙烯酰胺(PAM)强化混凝,远期在原水水质恶化或藻类含量激增的时候另行投加粉末活性炭和高锰酸钾。考虑到今后原水水质存在恶化的可能性,以及居民生活水平的不断提高对饮用水水质要求的提高,设计中预留臭氧+生物活性炭处理工艺。

具体工艺流程见图1。

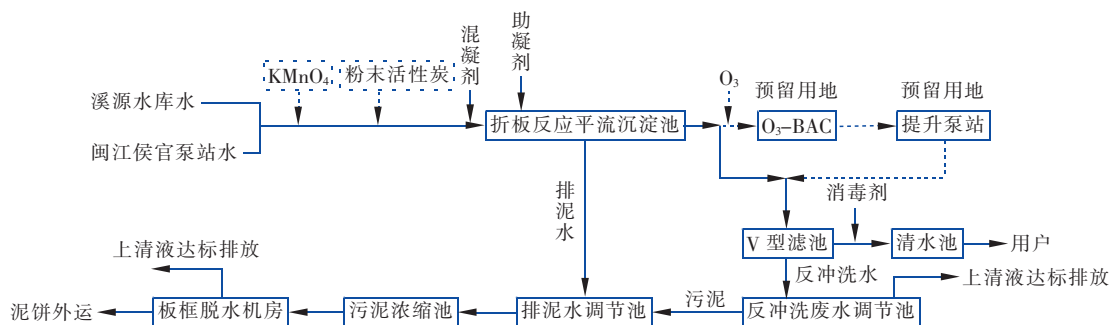


图1 工艺流程示意

Fig.1 Flow chart of treatment process

原水经过加药及机械混合池充分混合后进入折板絮凝池,达到紊流状态,使能量损失得到充分利用,以缩短停留时间;而后处理水经过配水花墙自流进入平流式沉淀池,沉淀池采用水下刮泥机排泥,排泥水最终排至排泥水调节池,进入污泥浓缩系统;沉淀池出水进入清水总渠,通过连通渠进入滤池,滤后水进入清水池加二氧化氯消毒后通过二级泵房输送

至用户。

水厂工艺主要特点有:

① 采用双水源进水,在满足进水水量不变的条件下,可根据原水水质自由分配进水比例,保证进水水质。

② 清水池叠建于折板絮凝平流沉淀池和滤池下部,有效减少了水厂占地面积,节约土地资源。

## 2.2 进水水质

水厂水源取自溪源泵站(溪源水库)和侯官泵站(闽江水)。对混合后原水进行多次取样测定,2015年6月—12月进水水质见表1。大学城水厂

进水中浊度、氨氮、粪大肠菌群指标波动较大,但总体进水水质良好,除粪大肠菌群数在7、8月洪水期超出Ⅲ类标准限值以外,其余水质指标均符合Ⅱ类水质标准。

表1 2015年6月—12月进水水质平均值

Tab.1 Average influent quality from June 2015 to December 2015

项 目	检测时间						
	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
浊度/NTU	14.5	9.62	24.3	15.0	3.04	8.69	4.62
色度/度	20	25	5	20	15	15	10
pH值	7.10	7.06	6.98	6.99	6.88	7.10	6.98
COD <sub>Mn</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	1.45	1.52	1.60	1.52	1.52	1.50	1.52
粪大肠菌群/(个·L <sup>-1</sup> )	2 500	21 000	10 300	5 600	1 340	1 740	5 300
铁/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.20	—	0.31	0.29	0.06	<0.05	—
锰/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.17	—	0.16	0.12	0.05	<0.05	—
氨氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.11	0.00	0.17	0.07	0.06	0.04	0.06

## 3 主要处理单元及设计参数

### ① 机械混合池

折板絮凝池前端设置一座机械混合池,设计规模为 $12.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,水厂自用水量系数取5%,净尺寸为 $2.8 \text{ m} \times 2.8 \text{ m} \times 3.70 \text{ m}$ 。设机械混合搅拌机1台,搅拌机变频调速。转速可调,以适应进水流量和水质变化,从而能达到较好的混合效果。混合时间为 $39.5 \text{ s}$ , $G$ 值最高日为 $575 \text{ s}^{-1}$ ,一般为 $500 \sim 1\,000 \text{ s}^{-1}$ 。主要设备为1台变频搅拌机( $N=7.5 \text{ kW}$ )。混合池至絮凝池采用配水渠道。

### ② 投药系统

水厂预处理系统主要包括PAC投加系统及PAM投加系统。PAC投加系统共设置2台计量泵( $Q \geq 800 \text{ L/h}$ ,  $H=0.3 \text{ MPa}$ ,  $N=1.5 \text{ kW}$ ),一用一备,其加矾设备按 $12.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 规模安装,加矾设计最大投加量为 $30 \text{ mg/L}$ ,平均投加量为 $15 \text{ mg/L}$ ,PAC投加浓度为5%。由于原水藻类数量较高,为了提高折板絮凝池的混凝效果,采用聚丙烯酰胺(PAM)作为助凝剂,设计最大投加量为 $0.15 \text{ mg/L}$ ,平均投加量为 $0.1 \text{ mg/L}$ ,PAM投加浓度为0.5%,投加规模为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,投加点为折板絮凝池的后半段。

### ③ 折板絮凝池

絮凝池采用折板絮凝池(1座),单座絮凝池分为2组。单池平面尺寸为 $124.8 \text{ m} \times 16.92 \text{ m}$ ,有效水深为 $3.6 \text{ m}$ 。总处理水量为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,每组 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。折板絮凝池分三档反应,其流速分别

为 $0.3$ 、 $0.2$ 和 $0.1 \text{ m/s}$ ,总GT值为 $6.5 \times 10^4$ 。池底设排泥槽和穿孔排泥管排泥,排泥管出口设快开式排泥阀。絮凝池至沉淀池出口采用配水花墙。

### ④ 平流式沉淀池

平流式沉淀池(1座)平面尺寸为 $20.35 \text{ m} \times 16.92 \text{ m}$ ,有效水深为 $3.2 \text{ m}$ 。平流式沉淀池与折板絮凝池合建。沉淀池进水采用穿孔墙配水,出水采用不锈钢穿孔集水槽。沉淀池采用水下刮泥机排泥,排泥水最终排至排泥水调节池,进入污泥浓缩系统。

### ⑤ V型滤池

V型滤池(1座)平面尺寸为 $49.5 \text{ m} \times 38.02 \text{ m}$ ,设计规模为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。采用双排布置,本期工程单侧排五格,中间为管廊,另一排五格预留给二期工程。单格滤池有效过滤面积为 $69.96 \text{ m}^2$ ,滤速为 $7.5 \text{ m/h}$ ,采用石英砂均质滤料, $d_{10}=1.0$ 、 $K_{80}=1.4$ ,滤层厚为 $1.15 \text{ m}$ 。

滤池运行方式:滤池反冲洗自动控制根据过滤前后水位差或工作周期(时间可调)实现,同时设手动控制。反冲洗方式为先气冲,再气水同时反冲,后水冲,冲洗过程采用进水表面扫洗,以提高反冲洗效果,反冲洗废水通过排水槽收集后排放管汇至反冲洗废水调节池。滤池反冲洗强度:水冲 $6 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ,气冲 $15 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ,表面扫洗 $2.1 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 。

### ⑥ 清水池

清水池叠建于折板絮凝平流沉淀池和滤池下

部,其中反应沉淀池下叠容积为  $7\,300\text{ m}^3$  的清水池,滤池下叠容积为  $1\,100\text{ m}^3$  的清水池,总容积为  $8\,400\text{ m}^3$ 。

#### ⑦ 二级泵房

按  $12 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$  规模设计,泵房平面尺寸为  $33.4\text{ m} \times 12.4\text{ m}$ ,设置4台离心泵(含备用), $Q = 2\,500\text{ m}^3/\text{h}$ , $H = 420\text{ kPa}$ ,转速为  $990\text{ r/min}$ 。二级泵房出厂压力为  $0.32\text{ MPa}$ 。

#### ⑧ 生产废水调节池

将沉淀池排泥水、滤池反冲洗水合流排入生产废水调节池(总容积为  $800\text{ m}^3$ ),经污泥泵提升至浓缩池。进入浓缩池的高浊度废水含水率约  $98\% \sim 99\%$ ,浓缩后污泥含水率降至  $95\%$  左右。调节池与浓缩池的上清液经排水管排入厂区雨水系统。浓缩后污泥重力流至污泥库中自然干化。干化污泥定期清挖外运。远期考虑浓缩后的污泥输入脱水机房,形成泥饼后外运出厂。污泥库占据地块用于布置深度处理建(构)筑物等。

### 4 运行效果

#### 4.1 出水水质分析

大学城水厂一期投产至今已经两年,设备运行正常,出水水质满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)。

2016年6月平均出水水质见表2。

表2 稳定运行后各工艺单元出水水质

Tab.2 Effluent quality of each process unit after stable operation

项 目	耗氧量 $\text{COD}_{\text{Mn}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	浊度/ NTU	氨氮/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	总氮/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
原水	2.061	26.20	0.047	1.281
混合池	1.830	25.80	0.044	1.283
絮凝池	1.354	24.80	0.042	1.299
沉淀池	1.062	1.79	0.004	1.225
滤池	1.062	0.14	0.003	1.230
清水池	1.062	0.51	0.013	1.210
标准限值	5.000	3.00	0.500	—

#### 4.2 有机物去除能力分析

分别分析混合末端、絮凝末端、沉淀池、滤池和清水池等出水水样的 TOC、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  及  $\text{UV}_{254}$ ,以考察对有机物的去除能力。此外,还利用三维荧光光谱分析各工艺流程单元对溶解性有机物的去除效果。

##### ① TOC 去除效果

各工艺出水单元的 TOC 浓度变化见图2。可

见,混凝阶段对 TOC 的去除效果明显,去除率为  $36.52\%$ 。而沉淀、过滤阶段对 TOC 的去除效果较差,平均去除率仅为  $6.60\%$ 。消毒阶段对于 TOC 也有一定的去除效果,去除率达到  $21.94\%$ 。可见对于 TOC 的去除主要在混凝阶段完成。水厂 TOC 总去除率为  $54.24\%$ 。

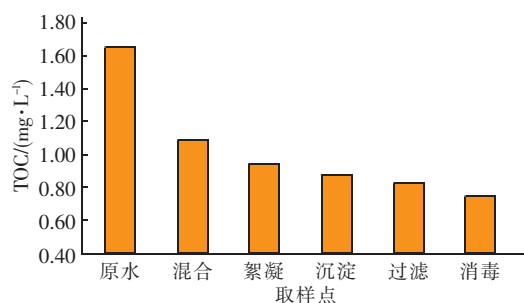


图2 TOC 沿程变化情况

Fig.2 Variety of TOC along the process

##### ② $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 去除效果

各出水单元的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度变化见图3。可见,混凝沉淀工艺对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  去除效果较好,混凝阶段去除率为  $34.29\%$ ,沉淀阶段去除率为  $21.57\%$ 。而滤池出水的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  与沉淀池出水相比基本没有改变(皆为  $1.062\text{ mg/L}$ ),说明此水厂过滤工艺对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除率效果不佳。水厂  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  总去除率为  $48.45\%$ 。

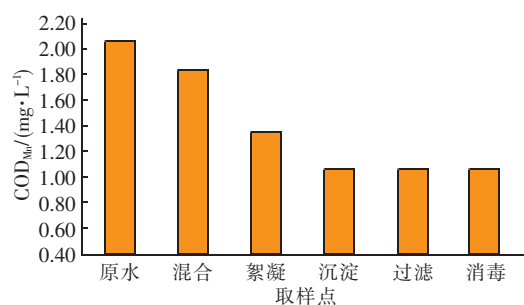


图3  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  沿程变化情况

Fig.3 Variety of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  along the process

##### ③ $\text{UV}_{254}$ 去除效果

各工艺单元  $\text{UV}_{254}$  值变化见图4。由图4可见,混凝阶段  $\text{UV}_{254}$  值下降较快,混合、絮凝阶段  $\text{UV}_{254}$  去除率分别为  $23.08\%$ 、 $55.90\%$ ,在混凝阶段  $\text{UV}_{254}$  总去除率为  $66.13\%$ 。而沉淀、过滤、消毒工艺对  $\text{UV}_{254}$  基本没有去除效果。水厂  $\text{UV}_{254}$  总去除率为  $68.07\%$ 。因而此水厂对于  $\text{UV}_{254}$  的去除主要在混凝阶段。



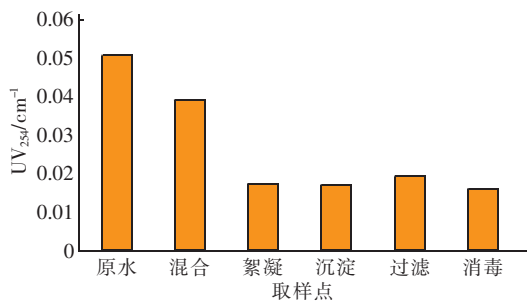


图 4 UV<sub>254</sub> 沿程变化情况

Fig. 4 Variety of UV<sub>254</sub> along the process

④ 有机物指标相关性分析

水中有机物的成分十分复杂,若逐一测出这些物质的浓度既不可能也没有必要。由于部分有机物之间具有相似的性质,因而可以考虑用某个有机物指标来代表。其中最典型的为以 UV<sub>254</sub> 作为 TOC 的替代参数。利用 SPSS 软件对 UV<sub>254</sub> 与 TOC 进行相关性分析,其结果显示 UV<sub>254</sub> 值与 TOC 各取样点浓度之间的双变量皮尔森相关系数为 0. 918,其在 0. 01 层级上具有显著相关性。由于 TOC 仪器复杂,测定流程繁琐,而利用紫外分光光度仪测定 UV<sub>254</sub> 相对简单。因而该水厂在条件有限且精度要求不高时可以考虑用 UV<sub>254</sub> 值作为 TOC 的替代参数进行水质检验。

分别利用 SPSS 软件对各取样点 COD<sub>Mn</sub> 浓度与 TOC 浓度、UV<sub>254</sub> 值进行相关性检验,结果其各自的双变量皮尔森系数仅为 0. 730 与 0. 711,无明显相关性,因而此水厂在分析有机物指标时不可使用 COD<sub>Mn</sub> 作为 TOC 与 UV<sub>254</sub> 的替代参数。

⑤ 溶解性有机物的三维荧光光谱分析

将各单元出水水样通过 0. 45 μm 滤膜过滤后,利用三维荧光光谱(3D - EEMs) 进行分析,结果见图 5。3D - EEMs 揭示了溶解性有机污染物的分类及其含量信息<sup>[1]</sup>,Wu 等研究表明,天然水体中主要

存在五种荧光峰<sup>[2]</sup>,3D - EEMs 等高线图上显示出的不同荧光峰值位置主要归因于不同的荧光素强度,根据峰值位置可以确定溶解性有机物的种类,另外,荧光峰值的变化显示了有机物浓度的变化<sup>[3~5]</sup>。

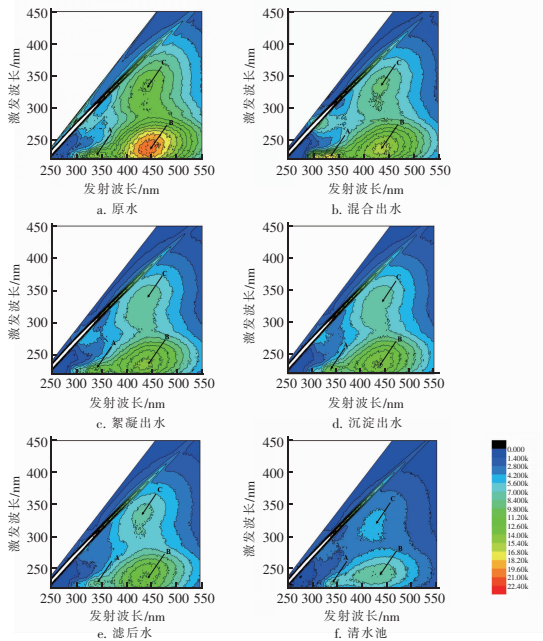


图 5 各工艺流程单元出水三维荧光光谱图

Fig. 5 Three-dimensional fluorescence spectra of effluent in each process unit

由图 5 可见,在整个净水过程中,每个出水单元的水样都有 3 个明显的荧光峰:第一个峰中心位置为  $E_x/E_m = 220 \sim 235/320 \sim 350$  nm,定义为 A 峰,主要为色氨酸类蛋白荧光。第二个峰中心位置为  $E_x/E_m = 225 \sim 250/425 \sim 450$  nm,定义为 B 峰,主要为紫外区类富里酸荧光。第三个峰中心位置为  $E_x/E_m = 325 \sim 350/425 \sim 450$  nm,定义为 C 峰,主要为可见区类富里酸荧光,强度相对较弱,这与吕洪刚等人结论相同<sup>[6]</sup>。将各峰荧光素强度及峰值位置变化列于表 3,荧光素强度由光子数量大小表示。

表 3 各峰荧光素强度及峰值位置变化

Tab. 3 Variety of fluorescence intensity and peak position

项 目	色氨酸 peak A		紫外区富里酸 peak B		可见区富里酸 peak C	
	$E_x/E_m$	光子数	$E_x/E_m$	光子数	$E_x/E_m$	光子数
原水	226/336	15 538. 37	242/442	21 536. 73	330/442	11 571. 27
混合池	224/334	19 826. 44	230/432	16 579. 59	332/436	8 922. 88
絮凝池	226/340	13 290. 24	236/430	14 908. 76	336/430	8 252. 30
沉淀池	226/338	11 734. 28	240/432	14 795. 18	328/432	8 249. 05
滤池	230/342	9 412. 45	238/430	12 993. 23	334/428	7 658. 10
清水池	230/340	7 897. 08	242/438	8 740. 76	328/432	4 691. 42

由表3可知,随着工艺流程的进行,荧光素强度逐渐减弱,因而常规净水工艺对于溶解性有机物有一定的去除效果,对色氨酸、紫外区富里酸和可见区富里酸的去除率分别为49.18%、59.41%和59.46%。

## 5 结论

① 福州地区常年受台风、强降雨等洪涝灾害影响,原水水质变化明显。水厂采用双水源进水,分别取自溪源水库水及闽江水,可依据原水水质合理分配进水比例,既可满足供水水量,又可满足进水水质条件,提高水厂供水可靠性,提升了水厂对恶劣气候的适应性。

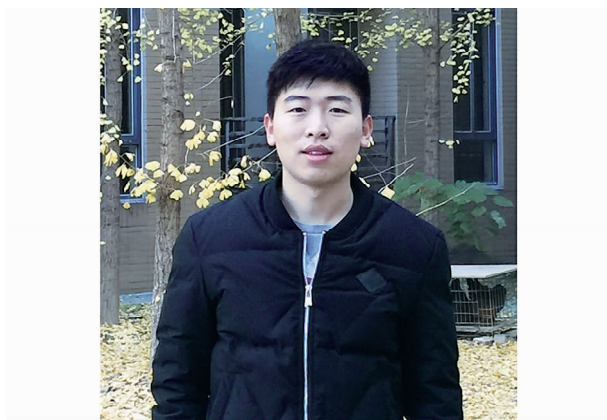
② 水厂将清水池叠建于折板絮凝平流沉淀池与滤池之下,减小了水厂的占地面积,缓解了大学城用地紧张的问题。

③ 水厂对有机物的去除主要在混凝阶段,对于TOC、 $UV_{254}$ 和 $COD_{Mn}$ 的总去除率分别为54.24%、68.07%和48.45%,且TOC与 $UV_{254}$ 去除率之间具有较大相关性。对于溶解性有机物的去除率约为50%~60%。

## 参考文献:

- [1] Matilainen A, Gjessing E T, Lahtinen T, *et al.* An overview of the methods used in the characterisation of natural organic matter (NOM) in relation to drinking water treatment[J]. *Chemosphere*, 2011, 83(11): 1431-1442.
- [2] Wu F C, Tanoue E. Isolation and partial characterization of dissolved copper-complexing ligands in streamwaters[J]. *Environ Sci Technol*, 2001, 35(18): 3646-3652.

- [3] Lee N, Amy G, Croué J. Low-pressure membrane (MF/UF) fouling associated with allochthonous versus autochthonous natural organic matter[J]. *Water Res*, 2006, 40(12): 2357-2368.
- [4] Her N, Amy G, Plottu-Pecheux A, *et al.* Identification of nanofiltration membrane foulants[J]. *Water Res*, 2007, 41(17): 3936-3947.
- [5] Baker A. Fluorescence properties of some farm wastes: implications for water quality monitoring[J]. *Water Res*, 2002, 36(1): 189-195.
- [6] 吕洪刚, 欧阳二明, 郑振华, 等. 三维荧光技术用于给水的水质测定[J]. *中国给水排水*, 2005, 21(3): 91-93.



作者简介:许仁星(1992-),男,福建福州人,硕士研究生,主要从事水处理理论与技术研究。

E-mail: n150527048@fzu.edu.cn

收稿日期:2016-10-20

推行节水灌溉方式和节水技术,提高农业用水效率