

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.21.007

武汉市汉江原水悬浮物浓度与浊度对应关系的研究

史志皓^{1,2}, 朱海涛³, 欧阳卓明¹, 罗凡¹, 沈中明³, 周艳春³

(1. 华中科技大学 环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 深圳能源环保股份有限公司, 广东 深圳 518000; 3. 武汉市给排水工程设计院有限公司, 湖北 武汉 430012)

摘要: 为了确定武汉市A、B两座给水厂原水悬浮物(SS)与浊度的换算关系,在一年半的时间内每周两次对原水SS和浊度进行检测,通过线性拟合获得两座水厂原水SS与浊度的线性回归系数分别为1.698 1和1.722 5。根据多年原水浊度数据,采用对数正态分布曲线计算出75%保证率下两座水厂原水浊度设计值分别为32.61和35.38 NTU,与采用《室外给水设计标准》(GB 50013—2018)推荐的原水设计浊度取值系数计算结果较为接近;但95%保证率下分别为61.39和77.00 NTU,低于规范计算值。当保证率为75%和95%时,A厂SS的95%置信区间为(55.37±20.50)和(104.24±20.94) mg/L,B厂为(60.96±20.69)和(132.67±22.27) mg/L。季节变化对原水SS设计值影响较大,采用不同季节回归系数和历史浊度数据得到秋季的SS浓度最高,在75%和95%保证率下A厂秋季原水SS预测值比采用常规方法获得的计算值分别高15.48%和21.11%,而B厂则分别高24.52%和31.85%。

关键词: 给水厂; 悬浮物; 浊度; 线性回归

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)21-0051-06

Relationship between Suspended Solid and Turbidity in Raw Water from Han River in Wuhan

SHI Zhi-hao^{1,2}, ZHU Hai-tao³, OUYANG Zhuo-ming¹, LUO Fan¹,
SHEN Zhong-ming³, ZHOU Yan-chun³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Shenzhen Energy Environment Co. Ltd., Shenzhen 518000, China; 3. Wuhan Water & Wastewater Engineering Design Institute Co. Ltd., Wuhan 430012, China)

Abstract: To determine the conversion relationship between SS and turbidity in raw water from A and B water supply plants in Wuhan, SS and turbidity in raw water were tested twice a week for one and a half years, and the linear regression coefficients of SS and turbidity in raw water from the two plants were obtained by linear fitting (1.698 1 and 1.722 5, respectively). According to the turbidity data of raw water for many years, lognormal distribution curve was used to calculate the design turbidity of A and B plants at guarantee rate of 75%, which were 32.61 NTU and 35.38 NTU, respectively. The values were close to those calculated by the turbidity coefficient of raw water recommended by *Standard for Design of Outdoor Water Supply Engineering* (GB 50013-2018). However, the design turbidities were 61.39 NTU and 77.00 NTU at guarantee rate of 95%, which were lower than the calculated values. When the guarantee rate was

75% and 95%, the 95% confidence intervals of SS of plant A were (55.37 ± 20.50) mg/L and (104.24 ± 20.94) mg/L, and those of plant B were (60.96 ± 20.69) mg/L and (132.67 ± 22.27) mg/L. Seasonal variation had a greater influence on SS design value of raw water. SS was the highest in autumn calculated by the regression coefficients of different seasons and the historical turbidity, the predicted SS in raw water of plant A at guarantee rates of 75% and 95% in autumn were 15.48% and 21.11%, higher than those calculated by conventional methods. By contrast, the predicted values were 24.52% and 31.85% higher in plant B.

Key words: water supply plant; suspended solid; turbidity; linear regression

在城市给水厂设计过程中,要确定污泥处理设施的规模,需要预测污泥量。《室外给水设计标准》(GB 50013—2018)中10.1.4规定,给水厂的排泥水干污泥量根据原水SS和投药量确定。原水SS对正确计算排泥水干污泥量、合理确定排泥水处理系统的规模十分重要。给水厂日常检测数据通常采用浊度来表征水中悬浮物浓度,但是浊度并不等同于悬浮物浓度。悬浮物浓度一般是指单位水体中可以用滤纸截留的物质的质量,而浊度则是一种光学效应,它表征的是光线透过水层时受到阻碍的程度。悬浮物浓度直接影响水体浊度的大小^[1]。浊度与悬浮物浓度之间既有内在的联系,但相关关系又相当复杂^[2]。因此,需要了解各水厂原水SS与浊度

的换算关系。

1 材料与方法

武汉市A、B两座给水厂均采用汉江水源,A厂位于汉江南岸,B厂位于汉江北岸。两座水厂均采用浮船取水,取水点相距9 km。为了给武汉地区以汉江为水源的给水厂污泥量预测提供依据,分别检测两座水厂原水的SS浓度和浊度,并通过数理统计法研究各水厂原水SS与浊度的换算关系。

在一年半的时间内,平均每周对两座水厂的原水取样1次,各水厂均获得36个原水水样。采用《水质 悬浮物的测定 重量法》(GB 11901—89)检测SS浓度,采用《水质 浊度的测定》(GB 13200—91)检测浊度,结果见表1。

表1 浊度和SS的检测结果

Tab.1 Detection results of turbidity and SS concentration

序号	A厂原水		B厂原水		序号	A厂原水		B厂原水	
	SS/(mg·L ⁻¹)	浊度/NTU	SS/(mg·L ⁻¹)	浊度/NTU		SS/(mg·L ⁻¹)	浊度/NTU	SS/(mg·L ⁻¹)	浊度/NTU
1	4	1.98	8	1.78	19	244	145.00	94	130.00
2	4	1.89	8	2.66	20	33	19.90	33	18.10
3	9	2.06	10	2.48	21	45	11.50	42	11.90
4	10	6.44	8	3.87	22	29	17.30	27	14.30
5	11	5.07	12	5.34	23	49	23.90	44	19.80
6	19	11.50	34	16.10	24	50	15.20	46	13.70
7	11	5.11	14	5.02	25	14	7.81	14	8.69
8	7	3.40	8	3.88	26	45	17.20	55	16.70
9	194	130.00	199	131.00	27	21	8.55	13	7.65
10	14	7.76	11	6.24	28	44	10.60	6	9.21
11	19	12.30	13	8.10	29	27	14.30	22	7.22
12	38	11.50	12	12.50	30	31	9.57	45	8.04
13	83	48.10	96	49.80	31	18	9.71	35	6.86
14	64	38.90	85	48.90	32	22	12.50	33	18.40
15	85	39.50	96	51.80	33	43	19.50	36	10.10
16	63	28.60	56	26.80	34	16	5.12	7	5.63
17	60	18.70	45	27.00	35	28	13.60	20	11.30
18	58	20.10	49	21.50	36	5	2.57	16	2.48

2 结果与讨论

2.1 数据筛选及拟合曲线

2.1.1 数据筛选

A、B两座水厂的水样均为同日采集,原水SS与浊度应基本一致,但个别水样的浊度、SS浓度及两者的比例系数具有较大差异。为排除误差,将两座水厂的数据进行筛选,发现第12、19、28、36组SS浓度数据存在较大差异,A、B两座水厂原水的SS分别相差3、2.5、7、3倍左右。与其他类似浊度相应的SS浓度相比,第12组数据A厂偏高、B厂偏低;第19组数据B厂偏低;第28组数据A厂偏高、B厂偏低;第36组数据B厂偏高。因此,将第12、28组A厂数据和第12、19、28、36组B厂数据作为无效数据进行删除,则A厂可用数据为34组,B厂为32组。筛选数据后,两座水厂原水中SS与浊度的关系如图1所示。

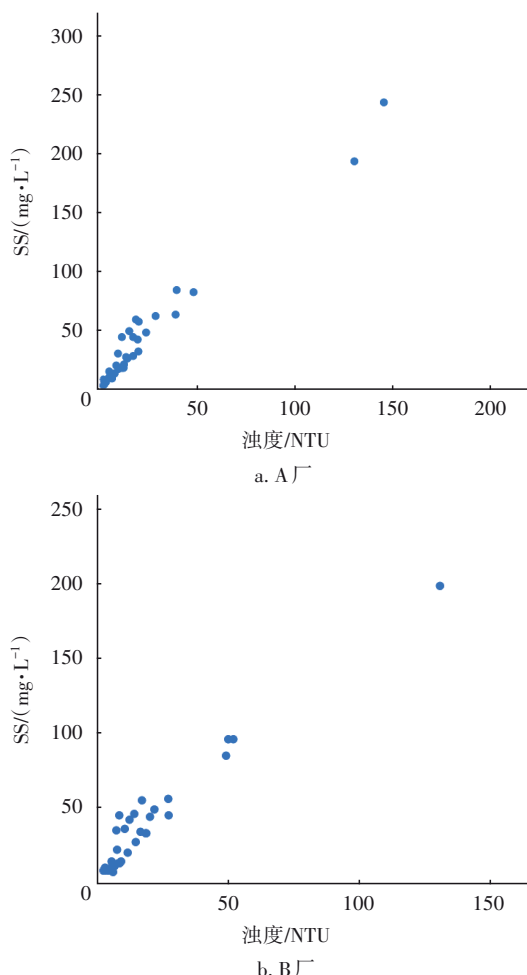


图1 筛选数据后两座水厂原水中SS与浊度的关系

Fig.1 Relationship between SS and turbidity in raw water of two water supply plants after screening data

2.1.2 SS和浊度拟合曲线类型的选择

对于自然界中的各种水体,其浊度与散射光的量、色度,以及微粒的大小、形状、组成有关。一般来说,当水中固体悬浮物的浓度增加或减少时,其浊度也随之上升或下降。但是由于水体中悬浮物组成复杂,这个关系通常不能被准确量化^[3]。悬浮物浓度通常与浊度的相关性较好,曹引等^[1]发现,南四湖水体悬浮物浓度和浊度的相关系数为0.939 1;Petus等^[4]对法国阿杜尔河水体实测的悬浮物浓度和浊度进行相关性分析,发现两者的相关系数达到0.976;孙广军等^[3]采用线性拟合法描述SS与浊度的关系;翟世奎等^[2]对SS与浊度进行双对数线性拟合,取得了较好的效果。

将两座水厂的数据分别采用线性和双对数线性进行拟合后发现,A、B两座水厂的线性拟合系数 R^2 分别为0.944 4和0.891 4,双对数线性拟合系数 R^2 分别为0.929 5和0.843 6。由于两座水厂的线性拟合相关系数均高于双对数线性拟合系数,因此采用线性拟合方法处理数据。

2.2 SS与浊度的换算关系

2.2.1 SS与浊度的线性拟合

对原水SS和浊度数据采用线性拟合,拟合方程为 $y=a+bx$ 。根据SS与浊度的物理意义,令 $a=0$,则A、B两座水厂原水SS浓度和浊度的线性拟合关系如图2所示。

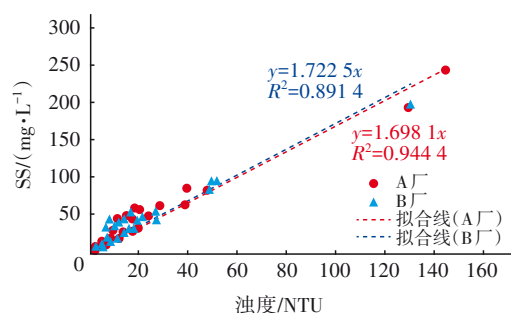


图2 A、B两座水厂原水SS浓度与浊度的线性拟合关系

Fig.2 Linear fitting relationship between SS concentration and turbidity of raw water in A and B plants

由图2可知,同以汉江为水源的两座水厂,其回归系数分别为1.698 1和1.722 5,两者仅相差1.45%,而 R^2 分别可达到0.944 4和0.891 4。

采用 F 检验法验证SS与浊度线性相关的显著性,见式(1)。

$$F = (n - 2) \frac{R^2}{1 - R^2} \sim F_{1-\alpha}(1, n - 2) \quad (1)$$

式中: n 为样本个数; R^2 为线性回归系数; α 为显著性水平。

对于 A 厂, $n=34$, 则 $F=543.54$; 对于 B 厂, $n=32$, 则 $F=246.24$ 。当 $\alpha=0.001$ 时, 查表得 $F_{0.999}(1, 32) = 13.15$, $F_{0.999}(1, 30) = 13.29$ 。可见, 计算所得的 F 值均大于所对应的 $F_{1-\alpha}(1, n - 2)$ 值, 表明 A、B 两座水厂原水中 SS 浓度与浊度的线性回归关系是极高度显著的。

2.2.2 不同保证率下原水浊度的取值

在水厂设计过程中, 不同保证率下需设计不同规模的污泥处理设施, 因此需要综合考虑不同发生概率下的设计规模。原水浊度的频率分布可以采用皮尔逊 III 型曲线^[5]。某些水质指标, 如粪大肠杆菌、污水处理厂不同构筑物出水浊度及污染物更服从对数正态分布。根据 A、B 两座水厂多年原水浊度的检测数据, 分别采用皮尔逊 III 型曲线和对数正态分布曲线计算两座水厂原水在 75% 和 95% 保证率下的浊度, 结果见表 2 和表 3。分别将皮尔逊 III 型曲线和对数正态分布曲线作为频率分布曲线的拟合进行 χ^2 检验, χ^2 计算公式见式(2)。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{x_i - e_i}{e_i} \quad (2)$$

式中: x_i 为观测值, NTU; e_i 为期望值, NTU。

表2 不同保证率下的浊度(皮尔逊 III 型曲线)

Tab.2 Turbidity range under different guarantee rates (Pearson III curve)

项 目	A 厂		B 厂	
	75% 保证率	95% 保证率	75% 保证率	95% 保证率
设计频率 $P/\%$	25	5	25	5
样本数量 n	3 438	3 438	4 363	4 363
算术平均值 \bar{x}/NTU	26.34	26.34	28.86	28.86
与期望误差平方和 A	1 681 000	1 681 000	4 189 431	4 189 431
均方差 σ	22.12	22.12	30.99	30.99
离差系数 C_v	0.84	0.84	1.07	1.07
相对系数 b	3	3	3	3
偏态系数 C_s	2.52	2.52	3.22	3.22
离均系数 Φ_p	0.29	2.01	0.15	1.99
取值倍数 K_p	1.24	2.69	1.17	3.14
特征值 x_0/NTU	32.71	70.85	33.66	90.59

表3 不同保证率下的浊度(对数正态分布曲线)

Tab.3 Turbidity range under different guarantee rates (lognormal distribution curve)

项 目	A 厂		B 厂	
	75% 保证率	95% 保证率	75% 保证率	95% 保证率
设计频率 $P/\%$	25	5	25	5
样本数量 n	3 438	3 438	4 363	4 363
算术平均值 \bar{x}/NTU	26.34	26.34	28.86	28.86
对数期望值 μ	3.045	3.045	3.026	3.026
与期望误差平方和 A	1 461	1 461	2 801	2 801
对数均方差 σ	0.652	0.652	0.801	0.801
分位数 l_α	3.485	4.117	3.566	4.344
特征值 x_0/NTU	32.61	61.39	35.38	77.00
取值倍数 K_p	1.24	2.33	1.23	2.67

不同方法拟合结果的 χ^2 值如表 4 所示。可以看出, 原水浊度的分布采用这两种方法进行拟合无显著差异, 但采用对数正态分布曲线作为频率分布曲线拟合更优。采用对数正态分布法进行计算, 在原水保证率为 75% 的条件下, A、B 两座水厂的原水浊度分别 32.61 和 35.38 NTU; 而当原水保证率为 95% 时, 原水浊度分别为 61.39 和 77.00 NTU。75% 保证率下设计浊度的取值倍数 K_p 分别为 1.24 和 1.23, 与规范中的取值 1.39 基本一致, 但 95% 保证率下取值为 2.33 和 2.67, 远低于规范取值 4.0。

表4 不同拟合曲线的 χ^2 值

Tab.4 χ^2 value of different fitting curves

项 目	$n-1$	$\chi^2_{0.05}(n-1)$	皮尔逊 III 型分布	对数正态分布
A 厂	3 574	3 574.5	1 429.1	819.9
B 厂	4 517	4 516.8	3 011.5	1 390.6

2.2.3 不同保证率下 SS 的取值范围

当线性回归效果显著时, 与已知点 x_0 对应的 y 的 $1-\alpha$ 置信区间为 $(\hat{y} - \delta_n, \hat{y} + \delta_n)$ 。其中:

$$\delta_n = t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-2) \cdot s \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{l_{xx}}} \quad (3)$$

$$s = \sqrt{\frac{l_{xx}l_{yy} - l_{xy}^2}{(n-2)l_{xx}}} \quad (4)$$

$$l_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5)$$

$$l_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (6)$$

$$l_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \tag{7}$$

式中: x 为浊度, NTU; x_0 为浊度特征值, NTU; \bar{x} 为浊度算数平均值, NTU; y 为 SS, mg/L; \bar{y} 为 SS 的算数平均值, mg/L; n 为样本数。

不同概率下, 原水浊度对应的 SS 计算结果如表 5 所示。

表 5 原水浊度对应的 SS 计算结果
Tab.5 Calculation results of SS corresponding to turbidity of raw water

项目	回归系数	保证率/%	SS 预测值/ (mg·L ⁻¹)	δ_n		
				$\alpha = 10\%$	$\alpha = 5\%$	$\alpha = 1\%$
A 厂	1.698	75	55.37	17.05	20.50	27.56
		95	104.24	17.41	20.94	28.15
B 厂	1.723	75	60.96	17.19	20.69	27.85
		95	132.67	18.50	22.27	29.98

当选择较为适中的 $\alpha = 5\%$ 时, A、B 两座水厂在保证率为 75% 的条件下, SS 的取值范围分别为 34. 87~75. 87 和 40. 27~81. 69 mg/L; 在保证率为 95% 的条件下, SS 的取值范围分别为 83. 30~125. 18 和 110. 4~154. 94 mg/L。当设计保证率为 75% 时, 取值系数按规范取 1. 39, 计算出来的 SS 分别为 62. 32 和 68. 11 mg/L, 与两座水厂原水 SS 预测值接近; 当设计保证率为 95% 时, 取值系数按规范取 4. 0, 计算出来的 SS 分别为 181. 54 和 196. 02 mg/L, 已超过各厂原水 SS 预测范围的上限值。

2. 3 不同季节对浊度与 SS 关系的影响

根据包卫彬等^[6]的研究, 不同季节浊度与 SS 的回归系数有所差异, 在长江下游段, 春冬季回归系数为 1. 08、夏季为 1. 15、秋季为 1. 3。根据历史气温对月份进行季节划分, 3 月—5 月为春季、6 月—8 月为夏季、9 月—11 月为秋季、12 月—次年 2 月为冬季。对不同季节的原水浊度进行线性回归拟合后发现, 春季 A、B 两座水厂的回归系数分别为 2. 089 8、2. 316 3; 夏季分别为 1. 497 6、1. 539 6; 秋季分别为 1. 770 6、1. 890 3; 冬季分别为 2. 286 4、2. 700 1。可以发现, A、B 两座水厂的回归系数在夏秋季较低、冬春季较高。

由于两座水厂取水口位置、上游排口等影响因素的不同, 两座水厂的回归系数也略有不同。另外发现, A 厂的回归系数略低于 B 厂, 在冬季尤为突出。浊度的多年检测数据表明, 虽然两座水厂原水

的平均浊度在秋冬季明显高于春夏两季, 但较高浊度通常出现在夏秋季(见图 3)。

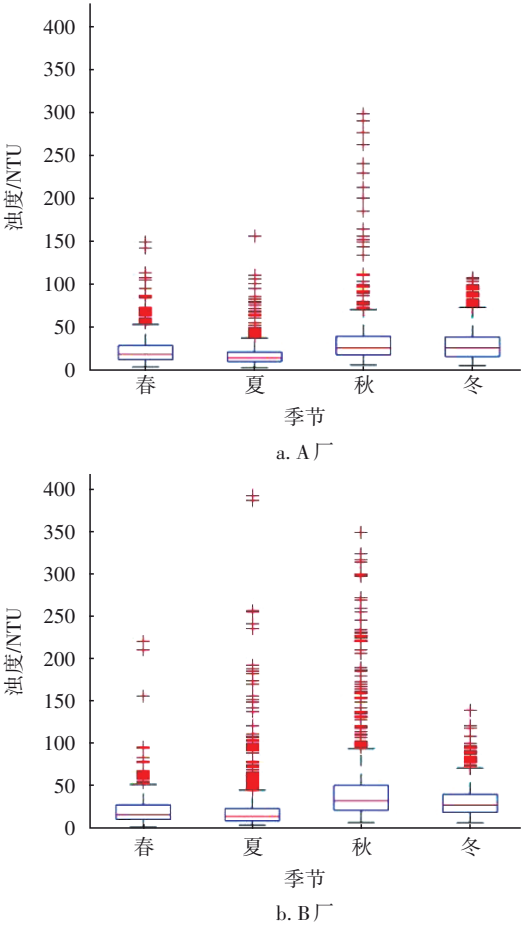
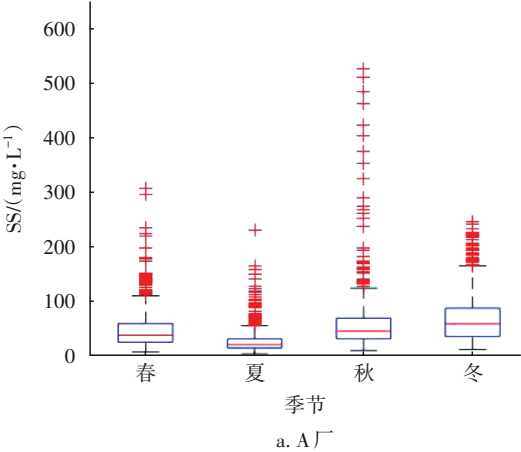


图 3 两座水厂不同季节浊度的历史数据
Fig.3 Turbidity historical data of two water supply plants in different seasons

采用不同季节回归系数和历史浊度数据推算原水 SS 的预测值, 结果如图 4 所示。可知, 秋季为 SS 高值出现最频繁的季节。



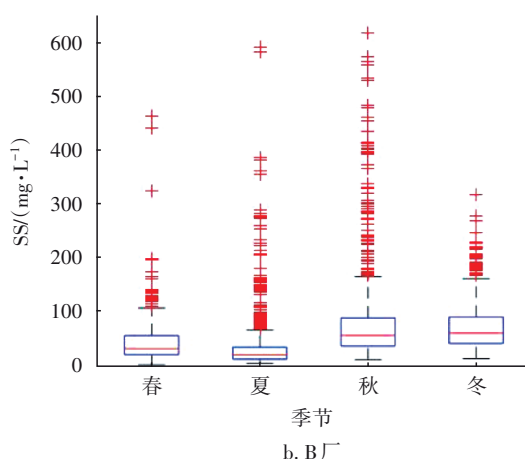


图4 不同季节回归系数预测的SS值

Fig.4 Prediction values of SS using different seasonal regression coefficients

采用对数正态分布曲线计算保证率为75%和95%下原水SS的预测值,结果表明,在75%和95%保证率下,A厂原水SS预测值分别为63.94和126.25 mg/L,比常规方法计算值分别高15.48%和21.11%;B厂原水SS预测值分别为75.91和174.92 mg/L,比采用常规方法得到的计算值分别高24.52%和31.85%。

3 结论

同以汉江为原水的武汉市A、B两座给水厂原水浊度在75%保证率下的特征值较为接近,规范中设计浊度取值系数的推荐值较为适用;95%保证率下A厂特征值低于B厂,规范取值系数的推荐值明显偏高。两座水厂原水SS与浊度线性回归关系具有极高度的显著性,季节变化对回归系数有明显影响,冬春季明显高于夏秋季。采用不同季节回归系数与实测原水浊度推算的原水SS设计值更接近实际情况,两座水厂原水SS的最不利季节为秋季,不同保证率下原水SS预测值均高于采用固定设计浊度和单一回归系数方法的计算值,设计过程中应重视季节变化对原水SS设计值的影响。

参考文献:

- [1] 曹引,冶运涛,赵红莉,等. 南四湖水体实测高光谱与悬浮物浓度及浊度关系分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(1): 40-44.
CAO Yin, YE Yuntao, ZHAO Hongli, *et al.* Analysis of relationship between field hyperspectrum and

suspended solid concentration and turbidity of water in Nansi Lake[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(1): 40-44(in Chinese).

- [2] 翟世奎,张怀静,范德江,等. 长江口及其邻近海域悬浮物浓度和浊度的对应关系[J]. 环境科学学报, 2005, 25(5): 693-699.
ZHAI Shikui, ZHANG Huaijing, FAN Dejiang, *et al.* Corresponding relationship between suspended matter concentration and turbidity on Changjiang Estuary and adjacent sea area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(5): 693-699(in Chinese).
- [3] 孙广军,郭欣岩. 浊度和浊度仪在盐水悬浮物测量中的应用[J]. 中国氯碱, 2003(1): 40-42.
SUN Guangjun, GUO Xinyan. Application of turbidity and turbidimeter for determination of suspended substance content in brine[J]. China Chlor-Alkali, 2003(1): 40-42(in Chinese).
- [4] PETUS C, CHUST G, GOHIN F, *et al.* Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery[J]. Continental Shelf Research, 2010, 30(5): 379-392.
- [5] 陈彦明. 广东省中小型水厂扩建工程方案研究——以中山黄圃水厂为例[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
CHEN Yanming. Research on Expansion Project Scheme of Small and Medium Waterworks in Guangdong Province—Take Zhongshan Huangpu Waterworks as an Example[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020(in Chinese).
- [6] 包卫彬,张怡,张玉先. 长江水源净水厂排泥水特性研究[J]. 给水排水, 2010, 36(8): 24-27.
BAO Weibin, ZHANG Yi, ZHANG Yuxian. Study on the characteristics of sludge discharging wastewater of water treatment plants with raw water from Yangtze River[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(8): 24-27(in Chinese).

作者简介:史志皓(1998—),男,安徽合肥人,硕士研究生,主要研究方向为给水污泥处理节能技术。

E-mail: 1617363751@qq.com

收稿日期: 2021-07-21

修回日期: 2022-02-12

(编辑:任莹莹)