

文章栏目: 水污染防治

DOI: 10.12030/j.cjee.201807199 中图分类号 X522 文献标识码 A

林明意, 孙力平, 付传奇, 等. 以河道水为原水的高速过滤过程及其性能分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(1): 62-67.

LIN Mingyi, SUN Liping, FU Chuanqi, et al. High-speed filtration process of urban river raw water and its performance analysis[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(1): 62-67.

以河道水为原水的高速过滤过程及其性能分析

林明意^{1,2}, 孙力平^{1,2,*}, 付传奇³, 王栋^{1,2}, 邱春生^{1,2}, 王少坡^{1,2}, 张成若^{1,2}, 陈星宇^{1,2}

1. 天津城建大学环境与市政工程学院, 天津 300384

2. 天津市水质科学与技术重点实验室, 天津 300384

3. 中工国际工程股份有限公司, 北京 100080

第一作者: 林明意(1994—), 男, 硕士研究生。研究方向: 污水深度处理与资源化。E-mail: shmimy_123@163.com

*通信作者: 孙力平(1958—), 女, 学士, 教授。研究方向: 水处理工程技术。E-mail: slpyqs@vip.sina.com

摘要 针对平原城市缓流河道普遍存在的季节性水质恶化问题, 采用预氧化-微絮凝+高速过滤对天津市某缓流河道水体进行中试规模实验。结果表明, 该处理技术具有处理周期长(>24 h)、过滤滤速高(平均为 $43.26 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$)和出水效果好(出水水质优于地表水Ⅳ类水质标准)的特点。同时发现: 单位面积滤柱的产水率呈“阶梯”下降趋势; 高速过滤的堵塞特征曲线服从三次多项式分布; 系统过滤历经增长期、稳定期和衰减期, 其中增长期为3~4 h, 稳定期约14 h, 过滤系数 λ 为 $(0.020 \pm 0.0013) \text{ cm}^{-1}$ (置信度 $P=95\%$), 其可作为系统基本属性的定量参数。

关键词 高速过滤; 缓流水体; 过滤系数; 穿透曲线

近年来, 随着国家对水环境保护政策力度的提升^[1-2], 城市水体特别是城市缓流河道水体的黑臭现象受到了广泛关注^[3]。城市河道流速较缓, 滞留时间长, 水质易恶化, 会对城市总体环境质量与当地居民的健康构成严重威胁^[3-4]。因此, 相应的有效整治手段的研究具有重要意义。

高速过滤是一种集成了预氧化-微絮凝-高速过滤的强化过滤方法。研究发现, 高速过滤技术能够在保持超高平均滤速(约 $50 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$)与浊度去除率(约90%)的基础上, 同时保持对COD 40%~60%、TP > 90%的去除效率^[5-9]。因此, 高速过滤技术在处理大体量水体、降低浊度与富营养化控制等方面表现出显著优势。

本研究将高速过滤技术应用于缓流河道水体的治理。研究中考察了高速过滤对水体浊度、TP和COD等指标的处理效果; 构建了自然水体条件下过滤过程的水头损失与堵塞特性曲线; 分析了滤层内部颗粒截留情况与高速过滤的技术优势。相关研究结果可为城市河道水体整治提供一定的参考和技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验原水水质

实验原水取自天津市某缓流河道(平均流速 $\approx 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。河道水质指标如表1所示。各项指标的监测参考文献中的方法^[10]。

收稿日期: 2018-07-27; 录用日期: 2018-11-13

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07106001)

1.2 高速过滤实验装置

实验装置如图1所示。滤柱采用有机玻璃材质,滤柱高2.5 m、内径48 mm、承托层高20 cm,采用粒径为4~8 mm的鹅卵石,承托层以上依次为A滤料层和B滤料层,上部与大气连通,柱壁每隔15 cm设测压管和取样口。

1.3 实验系统运行参数

在进行过滤时,首先在400 L塑料蓄水桶中投加 $0.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的HFO氧化剂预氧化15 min。然后利用格兰仕ZG60-500型增压泵将预氧化后的原水与 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的混凝剂HCO注入静态混合器快速混合。混合后水样进入100 L的微絮凝塑料桶,再通过增压泵将混合水样注入滤柱,以变滤速方式过滤,每隔60 min读取测压管数值并采集出水水样。

反冲洗程序采用气-气水联合-水冲洗。单独气反冲洗阶段强度为 $10\sim 15 \text{ L} \cdot (\text{s} \cdot \text{m}^2)^{-1}$,历时4 min;气水联合反冲洗阶段气冲强度不变;水反冲洗强度为 $20\sim 25 \text{ L} \cdot (\text{s} \cdot \text{m}^2)^{-1}$,历时4~5 min。

2 结果与讨论

2.1 高速过滤对浊度、TP和COD的去除效果

实验考察了高速过滤系统对河道水浊度、TP和COD的处理效果。如图2所示,高速过滤出水平均浊度为0.79 NTU、TP为 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、COD为 $39.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,优于地表水IV类水质标准^[11]。高速过滤对河道水浊度和TP表现出良好的去除效果,出水COD随时间呈波动变化。随过滤的进行,出水浊度呈先降低后升高的趋势,如图2(a)所示,过滤开始后浊度即可达到较高的去除率(79.92%);至第10小时,浊度去除率(95.87%)最高,出水浊度(0.21 NTU)最佳;19 h之后,过滤出水浊度逐渐升高,去除率下降。过滤周期内出水平均浊度为0.74 NTU,平均浊度去除率为85.47%。如图2(b)所示,高速过滤对TP的去除效果稳定,平均去除率为94%,最高达到95.59%,出水TP平均含量为 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,能达到地表水II类水质标准^[11]。而系统对河道水COD的去除率呈先升高后降低的趋势,如图2(c)所示,COD的去除率在43.97%~60.26%之间,平均去除率为51.17%,平均出水浓度为 $39.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水达到地表水IV类水质标准^[11]。

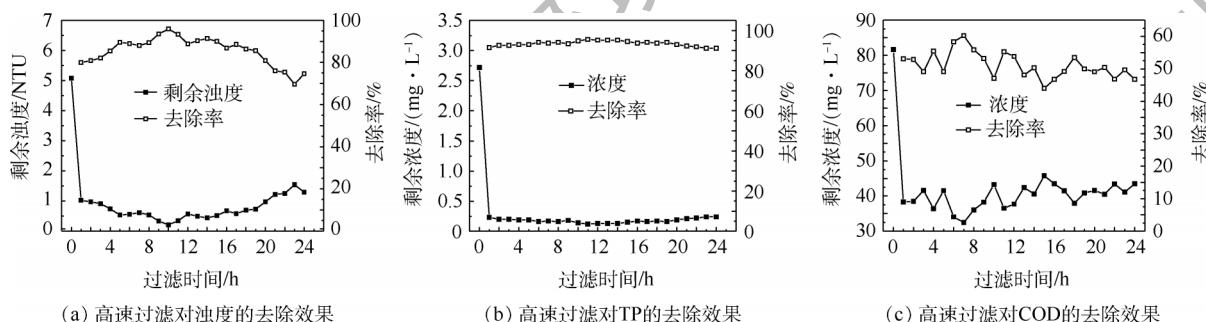


图2 高速过滤对浊度、TP和COD的去除效果

Fig. 2 Effect of high-speed filtration on turbidity, TP and COD removal

表1 实验期间河道水质指标

Table1 River water quality during the experiment

浊度/ NTU	温度/°C	pH	透明度/ cm	溶解氧/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
5.08	20.6	7.00	82	5.37	2.72	81.65

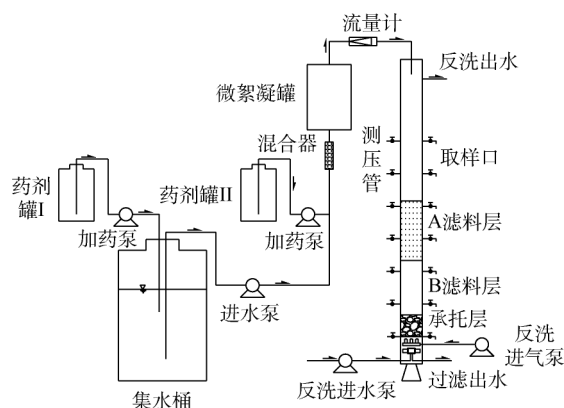


图1 实验装置示意图

Fig.1 Sketch of experiment equipment

对比剩余浊度的变化规律,发现过滤周期内高速过滤对TP和浊度的去除趋势基本一致,但对TP的去除率高于浊度的去除率。这表明大部分磷随着浊质颗粒被滤层截留而去除,因为颗粒物本身可成为污染物,而更重要的是又可与微污染物相互作用成为其载体^[12],剩下的部分可能被滤料和滤料表面截留的浊质颗粒吸附去除。而出水COD的变化规律与浊度和TP的变化规律存在较大差异,因为COD含量受颗粒性COD和溶解性COD含量的影响^[13-14],颗粒性COD能随水中悬浮颗粒的去除被大部分去除,而溶解性COD的去除效果可能更取决于HFO的氧化作用。

2.2 系统产水量与过滤特性

在探究高速过滤对河道水浊度、TP和COD去除效果基础上,实验考察了过滤周期内系统产水量及过滤过程水头损失与滤床截污特性。如图3所示,高速过滤系统单位面积产水率随时间呈“阶梯”下降趋势。过滤开始时,滤柱单位面积产水率为 $71.841 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,之后整体随过滤时间线性降低;至过滤结束时,产水率降低至 $16.579 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,过滤周期内整体下降趋势明显。每段“阶梯”上,单位面积产水率平均维持1~3 h。周期内产水量为 1.88 m^3 ,将产水量与过滤时间进行二次多项式拟合,发现产水量与过滤时间呈二次函数关系($R^2=0.999$)。

由于单位面积产水率下降稳定,故可以排除滤层内产生负压的可能性,因为当滤层内产生负压时,水中溶解的气体会析出,滤层的过滤面积会急剧减小,导致产水率急剧变化。单位面积产水率线性下降及产水量与时间的二次关系表明,高速过滤系统对颗粒截留与堵塞特性呈现更为缓和的趋势。针对这一过程,实验对过滤过程水头损失与系统堵塞特性进行了探讨,结果如图4所示。可见,系统水头损失与滤柱深度呈三次多项式分布,沿滤柱深度方向,水头损失呈先迅速增大后趋于平稳的趋势。过滤开始时,系统的总水头损失为75 cm;至过滤周期结束,系统水头损失达到最大,为214 cm。由此可知,随着过滤的进行,滤料间孔隙逐渐减小,水力梯度逐渐增大,水头损失相应增大。其中A滤料层($L < 50 \text{ cm}$)水头损失增长梯度大于B滤料层($L > 50 \text{ cm}$),表明水头损失受滤料粒径影响显著,而与滤速基本无关^[15]。

此外,实验探讨了高速过滤的堵塞特征曲线。曲线由各时段水头损失曲线的拐点定义,通过数值拟合求得,它是相较于干净滤床水头损失的显著偏差值点^[15],可作为絮体颗粒的穿透深度和滤层堵塞的表征。数值拟合发现,高速过滤的堵塞特性曲线服从三次多项式分布,特性曲线方程为:

$$\Delta h = 0.0004h^3 - 0.02h^2 + 1.4974h \quad (1)$$

式中: h 为滤柱深度,cm; Δh 为水头损失,cm。

该曲线上,水头损失的增长梯度变化最剧烈,即该点处滤层发生“堵塞”。如图4所示,沿滤柱深

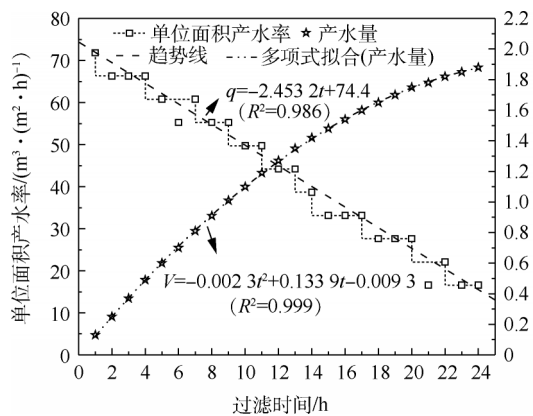


图3 高速过滤产水量与产水曲线

Fig. 3 Water production and production curves for high-speed filtration

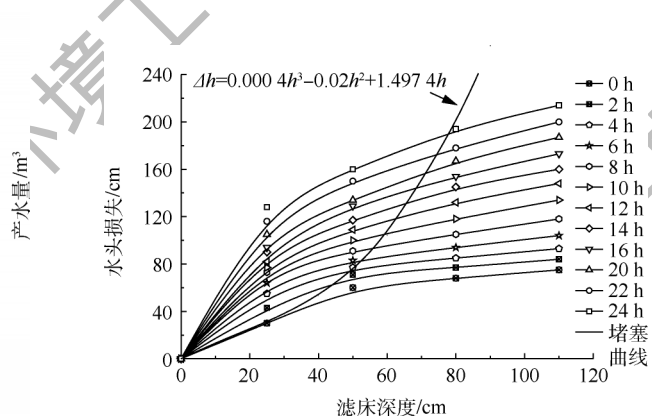


图4 高速过滤水头损失与系统堵塞特性

Fig. 4 Head loss and system plugging characteristics for high-speed filtration

度方向, 浊质颗粒的穿透深度随时间逐渐增加, 滤柱的“工作层”开始逐渐下移。即浊质颗粒穿透一定距离后发生“堵塞”, 滤层饱和, 失去过滤负荷, 继续向下穿透。浊质颗粒穿透曲线如图5所示, 在0~4 h, 浊质颗粒的穿透速率最快, 约达到45~50 cm, 而后穿透速率减缓。至过滤结束时, 浊质颗粒最大穿透深度约为80 cm, 表明滤层深度大于80 cm的部分, 滤料对浊度的去除不起作用。

2.3 系统过滤系数

过滤系数(filtration coefficient)是指过滤过程各部分出水效果(常以浊度表示)斜率的绝对值, 由IWASAKI方程定义^[16], 用于表征过滤过程的系统效能。IWASAKI方程为忽略流体动力扩散的颗粒传输与截留的基本过滤方程, 适用于构建过滤过程截留颗粒与悬浮粒子的平衡方程^[16-17]。IWA-SAKI方程基本表达式如下:

$$\frac{\partial C}{\partial L} = -\lambda C \tag{2}$$

式中: C 为悬浮物浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; L 为滤床深度, cm ; λ 为过滤系数, cm^{-1} 。

对上式两边同时积分, 整理得:

$$\ln(C_i + 1/C_i) = -\lambda(L_{i+1} - L_i) \tag{3}$$

$$\lambda = \frac{\ln(C_i/C_{i+1})}{L_{i+1} - L_i} \tag{4}$$

由此可得不同过滤时间的过滤系数, 如表2所示。结果表明, 系统过滤系数 λ 历经增长期、稳定期和衰减期, 其中增长期为3~4 h。从19 h开始, 系统过滤系数显著降低, 实验中观察到滤柱上液面下降缓慢, 此段对应过滤周期的衰减期。运用 t 分布对0~18 h内过滤系数分布规律进行分析。

t 分布平均值的置信区间表达式如下:

$$\mu = \bar{X} \pm t_{\text{表}} \cdot S_x \tag{5}$$

式中: \bar{X} 为过滤系数的平均值; S_x 为过滤系数平均值的标准偏差。

自由度 $f=n-1(n=15)$, 置信度为95%时, 由 t 值表查得 $t_{\text{表}}=2.145$, 可求得置信区间为 $(0.02015 \pm 0.00135) \text{ cm}^{-1}$, 如图6所示。即以河道水为原水的高速过滤实验中, 系统过滤系数有95%的可能稳定在 $0.0188 \sim 0.0215 \text{ cm}^{-1}$ 之间。此外, 在以天津市某污水厂二沉池出水为原水的高速过滤实验中发现, 其过滤系数与图6呈相似分布, 见图7, 其置信区间为 $(0.0199 \pm 0.0011) \text{ cm}^{-1}$, 在分别以河道水和污水厂二沉池出水为原水的高速过滤实验中, 过滤系数的实验数值均良好地(置信度 $P=95\%$)落在其取值区间内。过滤系数 λ 可作为滤床的基本参数, 用来定量描述系统的过滤性能。本实验系统的 λ 值稳定在 0.02 cm^{-1} 左右, 不受进水的影响。此外, 过滤初期3~4 h内, 系统过滤系数 λ 达到稳定, 如图6和图7所示, 该结果与孙力平等^[6]研究的滤床成熟期相当。

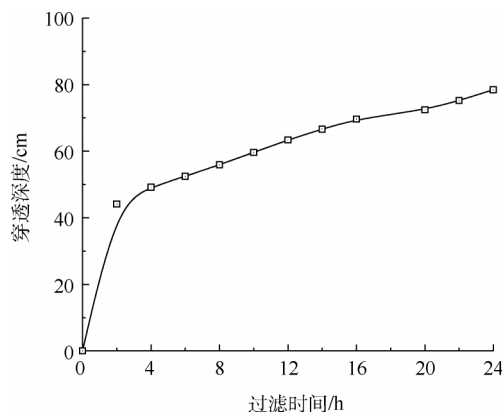


图5 高速过滤滤层内浊质颗粒的穿透曲线
Fig. 5 Turbidity particle penetration curve in high speed filter

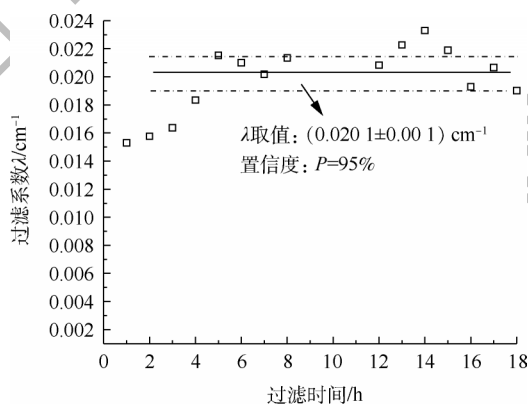


图6 过滤系数分布质量控制图
Fig. 6 Filtration coefficient distribution quality control

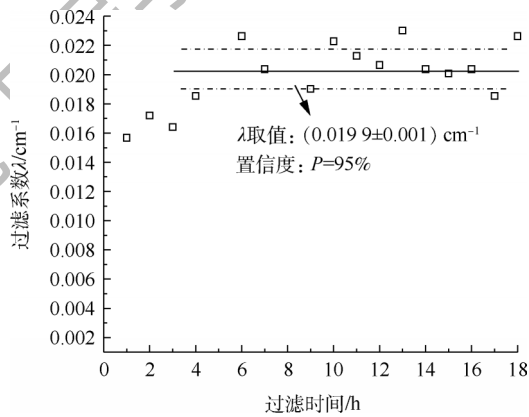


图7 污水厂二沉池出水过滤系数分布质量控制图

Fig. 7 Filtration coefficient distribution quality control of sewage plant secondary effluent

表2 不同过滤时间的过滤系数

Table 2 Filtration coefficients in different periods

过滤周期	过滤时间/h	过滤系数
增长期	1	0.015 3
	2	0.015 8
	3	0.016 4
	4	0.018 3
稳定期	5	0.021 5
	6	0.021 0
	7	0.020 2
	8	0.021 3
	9	0.026 0
	10	0.030 3
	11	0.025 8
	12	0.020 8
	13	0.022 3
	14	0.023 3
	15	0.021 9
	16	0.019 3
	17	0.020 7
	18	0.019 0
衰减期	19	0.018 5
	20	0.015 8
	21	0.013 6
	22	0.013 4
	23	0.011 4
	24	0.013 1

3 结论

1) 以河道水为原水的预氧化、微絮凝+高速过滤的处理过程, 处理周期长(>24 h), 过滤滤速高(平均为 $43.26 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$), 出水效果好, 对浊度、TP 和 COD 的平均去除率分别为 85.47%、94% 和 51.17%。

2) 高速过滤产水量与过滤时间的关系曲线服从 $V = -0.002 3t^2 + 0.133 9t - 0.009 3 (R^2 = 0.999)$ 的二次多项式分布, 其堵塞特性曲线服从 $\Delta h = 0.000 4 h^3 - 0.02h^2 + 1.497 4h$ 的三项多项式分布。

3) 通过 IWASAKI 方程定义的过滤系数 λ 是过滤系统的基本性能参数, 其值不受进水水质的影响。高速过滤过程历经增长期、稳定期和衰减期, 增长期 3~4 h, 稳定期约 14 h, 稳定期的过滤系数 λ 取值为 0.02 cm^{-1} 左右。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市黑臭水体整治工作指南[S]. 北京, 2015.
- [2] 石效卷, 李璐, 张涛. 水十条水实条: 对《水污染防治行动计划》的解读[J]. 环境保护科学, 2015, 41(3): 1-3.
- [3] 申茜, 朱利, 曹红业, 等. 城市黑臭水体遥感监测与筛查研究进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28(10): 3433-3439.
- [4] 沈烁, 王育来, 杨长明, 等. 南淝河不同排口表层沉积物 DOM 光谱特征[J]. 中国环境科学, 2014, 34(9): 2351-2361.
- [5] 贾仁勇, 孙力平, 韦立, 等. 氧化-微絮凝-高速过滤应用于再生水生产的研究[J]. 环境工程, 2009, 27(2): 58-62.
- [6] 孙力平, 贾仁勇, 齐兆涛, 等. 污水超高速过滤的水质过程[C]//全国给水排水技术信息网. 全国给水排水技术交流会暨全国水网理事会换届大会论文集. 成都, 2008: 115-119.
- [7] 孙力平, 韦立, 于静洁, 等. HFO 强化微絮凝高速过滤用于污水再生处理效能研究[C]//中国城市科学研究会, 中国城镇供水排水协会. 第四届中国城镇水务发展国际研讨会暨中国城镇供水排水协会年会论文集. 北京, 2009.
- [8] 史忠伟, 孙力平, 向传宝, 等. S-K 型管式混合器-微絮凝高速过滤的实验研究[J]. 环境工程学报, 2014, 8(2): 471-476.
- [9] 王喆, 孙力平, 付传奇, 等. Mg^{2+} 助凝 PAC 对城市二沉池出水的作用及机理研究[J]. 水处理技术, 2018, 44(2): 100-104.

- [10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB3838-2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [12] 汤鸿霄, 钱易. 水体颗粒物和难降解有机物的特性与控制技术原理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.
- [13] BAQUERO-RODRIGUEZ G A, LARA-BORRERO J A, MARTELO J. A simplified method for estimating chemical oxygen demand (COD) fractions[J]. *Water Practice & Technology*, 2016,11(4): 838-848.
- [14] CHOUBERT J M, RIEGER L, SHAW A, et al. Rethinking wastewater characterisation methods for activated sludge systems: A position paper[J]. *Water Science & Technology*, 2013, 67(11): 2363-2373.
- [15] ADIN A, REBHUN M. High-rate contact flocculation-filtration with cationic polyelectrolytes[J]. *Journal American Water Works Association*, 1974, 66(2): 109-117.
- [16] IWASAKI T. Some notes on sand filtration[J]. *Journal American Water Works Association*, 1937, 29(10): 1591-1602.
- [17] ALTOE J E, BEDRIKOVETSKY P, SIQUEIRA A G, et al. Correction of basic equations for deep bed filtration with dispersion[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2006, 51(1/2): 68-84.

(本文编辑:金曙光,郑晓梅,张利田)

High-speed filtration process of urban river raw water and its performance analysis

LIN Mingyi^{1,2,*}, SUN Liping^{1,2,*}, FU Chuanqi³, WANG Dong^{1,2}, QIU Chunsheng^{1,2}, WANG Shaopo^{1,2}, ZHANG Chengruo^{1,2}, CHEN Xingyu^{1,2}

1. School of Environment and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

2. Tianjin Key Laboratory of Aquatic Science and Technology, Tianjin 300384, China

3. China CAMC Engineering Co. Ltd., Beijing 100080, China

* Corresponding author, E-mail: slpyqs@vip.sina.com

Abstract This study focused on the seasonal water quality deterioration problem of urban slow-flow rivers in the plain cities. A pilot scale process of pre-oxidation and micro-flocculation-high-speed filtration was applied to purify the slow flow river water in Tianjin. The results showed that this process was characterized as long treatment cycles (>24 h), high filtration speeds ($43.26 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ on average) and good effluent quality, being superior to the class IV standard according to environmental quality standard for surface water. Furthermore, the water production rate per unit area in the filter column showed a “stepwise” downward trend and the plugging characteristic curve of the high-speed filtration followed a third order polynomial distribution. The system included the growth period of 3 to 4 hours, the stable period of 14 hours and the decay period during filtration. The filtration coefficient λ was $(0.020 \pm 0.0013) \text{ cm}^{-1}$ (confidence $P=95\%$) in the stable period and it can be used as an essential quantitative parameter of the system.

Keywords high-speed filtration; slow flow river; filtration coefficient; penetration curve