

活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池处理高藻水源水的研究

张声¹, 刘洋¹, 张晓健¹, 谢曙光²

(1. 清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 北京大学环境学院环境科学系, 北京 100871)

摘要: 活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池是一种采用气浮过滤一体化、活性炭石英砂双层深床过滤、常规处理和深度处理一体化的工艺。该工艺处理高藻原水的结果显示: 出水藻总数为 4.30×10^5 个/L, 总去除率为 95.1%; 出水叶绿素-a 为 $0.88 \mu\text{g/L}$, 总去除率为 92.2%; 出水浊度为 0.18 NTU; 出水 UV_{254} 为 0.016cm^{-1} , 总去除率为 54.3%; 出水耗氧量为 0.78mg/L , 总去除率为 63.6%; 出水没有臭味, 色度为 3 度, 总去除率为 86.4%。出水残留铝含量为 0.011mg/L , 满足饮用水水质标准。过滤单元运行周期为 36h, 滤柱产水能力 UFRV 为 $504 \text{m}^3/\text{m}^2$ 。

关键词: 溶气气浮; 活性炭; 石英砂; 高藻水源水

中图分类号: X520.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)05-0052-05

Treating of Algae Laden Raw Water with GAC-Sand Dual Media Deep Bed Dissolved Air Flotation/ Filtration

ZHANG Sheng¹, LIU Yang¹, ZHANG Xiao-jian¹, XIE Shu-guang²

(1. Department of Environmental Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Environmental Sciences, College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: GAC-sand dual media deep bed dissolved air flotation/ filtration (GSDDB-DAFF) is a new integrated process, its characteristics include: integration of dissolved air flotation and filtration, GAC-sand dual media deep bed filtration, integration of general treatment and advanced treatment. When algae-laden raw water was treated with the new process. The result showed that removal percentage of algae was 95.1%, outlet algae-count was 4.30×10^5 cell/L. Removal percentage of chlorophyll-a was 92.2%, outlet chlorophyll-a was $0.88 \mu\text{g/L}$. Outlet turbidity was 0.18 NTU, removal percentage of UV_{254} was 54.3%, outlet UV_{254} was 0.016cm^{-1} . Removal percentage of OC was 63.6%, outlet OC was 0.78mg/L ; outlet had no odor; removal percentage of color was 86.4%, outlet color was 3; outlet Al-residual was 0.011mg/L which accorded with the quality standard of drinking water. Run time of filter was 36h, UFRV (Unit Filter Run Volume) was $504 \text{m}^3/\text{m}^2$.

Key words: dissolved air flotation; activated carbon; sand; algae-laden raw water

目前,我国主要湖泊水库的富营养化问题依然突出,不少地区的水源水经常呈现高藻性状,在饮用水处理时,水体藻类滋生会产生很多问题^[1,2]。一般来说,仅用常规工艺无法达标,需增加预处理或强化常规工艺来改善处理效果。即增大能耗、药耗,缩短滤池运行时间,增加反冲频率和反冲水量,从而影响水厂供水可靠性,严重时可能引起水厂停产。增加水的臭味和色度,恶化饮用水的观感和口感,危害饮用水水质的安全性。藻类及其分泌物是水中天然有机物的重要来源,是消毒副产物的重要前体物,从而会产生饮用水消毒的化学风险,一些藻类会产生藻毒素,成为饮用水水质安全性的又一障碍,故有必要对高藻水源水的处理做深入研究。

1 材料与方 法

1.1 试验工艺

研究的试验装置见图 1,各工艺装置主要参数见表 1,活性炭主要参数见表 2。

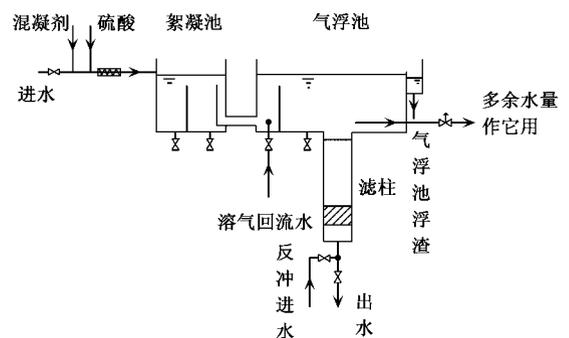


图 1 中试试验装置示意图

Fig. 1 The schematic of the pilot-scale experiment instrument

收稿日期: 2003-10-06; 修订日期: 2003-12-25

作者简介: 张声(1974~),男,湖北武穴人,博士研究生,主要从事水质净化技术与科学研究

絮凝池和气浮池合建在一起,均由不锈钢加工而成.絮凝池是两级机械搅拌池,G值均为 $70s^{-1}$.滤柱直接接在气浮池底部,滤柱是由有机玻璃加工而成,沿层每隔 100 mm 设置一个取样孔,以便测定沿层水样,试验过程中以下向流方式运行,采用滤后水反冲清洗.试验期间,原水水温 $21 \sim 23^{\circ}C$,pH 值 $7.6 \sim 7.8$.原水流量为 $12 m^3/h$,气浮池的溶气水回流比为 10%,溶气罐压力为 0.52 MPa,滤柱水力负荷为 $13.2 m^3/h$.采用“万水”混凝剂,投加量以 Al^{3+}

计为 $2.0 mg/L$.通过投加 H_2SO_4 以改变原水 pH 值,维持絮凝池中水的 pH 值为 6.60.

表 1 各工艺装置主要参数

处理单元	尺寸 / mm	滤料组成	停留时间 / min
絮凝池	$1500 \times 600 \times 2500$		10.1
气浮池	$1600 \times 600 \times 2500$		10.8
滤柱	200×2800	2000 mm 的颗粒活性炭 YF-3,300 mm 的石英砂	10.5

表 2 颗粒活性炭 YF3 的主要参数

Table 2 The principal parameters of YF3

碘值 / $mg \cdot g^{-1}$	磨损系数 / %	有效粒径 / mm	不均匀系数	湿度 / %	可溶性灰分 / %	密度 / $kg \cdot L^{-1}$
972.3	91.02	1.42	1.32	0.65	0.5	0.514

1.2 分析项目 测定方法及主要仪器

本研究的分析项目有:藻计数、叶绿素-a、浊度、 UV_{254} 、OC、嗅、色度、残留铝,采用仪器、测定方法如下:

藻计数:计数框法.叶绿素-a:分光光度法.浊度:Hach 公司的 2100P 便携式浊度计. UV_{254} :水样经 $0.45 \mu m$ 滤膜过滤,测定波长为 254nm,比色皿厚度为 1cm.测定仪器为 Hach 公司的 DR/4000 U 分光光度计.耗氧量:酸式高锰酸钾法(GB11892-89).嗅:嗅阈值(TON)方法.色度:Hach 公司的 DR/4000 U 分光光度计.残留铝:Hach 公司的 DR/4000 U 分光光度计.

2 活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池工艺

活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池工艺是常规浮滤池工艺的发展(如图 2),其主要特点有:

(1) 气浮过滤一体化 即将溶气气浮单元与过滤单元组合在一个构筑物中,溶气气浮单元在上方,过滤单元在其正下方,气浮单元分离区截面与过滤单元截面相同.

(2) 活性炭石英砂双层深床过滤 滤床由上面 2.0m 的活性炭和下面 0.3m 的石英砂构成,其主体滤料是粒径较大的活性炭.

(3) 常规处理和深度处理一体化 由于在本工艺中气浮单元之后直接是活性炭过滤,省掉了常规的砂滤池,所以本工艺是常规处理和深度处理一体化.

活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池具有以下优点:

(1) 节约占地面积.

(2) 在显著提高最终出水水质的同时,省掉了砂滤池,从而有可能节约初期投资和运行费用.

(3) 运行方式灵活.在原水水质条件较好时,本一体化工艺可以以直接过滤的形式运行.而在原水水质条件较差时,则以正常形式运行.并且,由于气浮工艺启动快,允许间歇运行,因此,比较容易实现两工艺的切换.

3 结果与讨论

活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池工艺实际上是溶气气浮工艺和过滤工艺的组合,本研究从 2 方面考察该工艺的性能:各工艺单元处理效果和过滤单元产水能力,考察的水质指标包括藻计数、叶绿素-a、浊度、 UV_{254} 、耗氧量、嗅、色度、残留铝.

3.1 活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池工艺处理效果的考察

3.1.1 藻计数

试验原水藻总数为 8.71×10^6 个/L,经溶气气浮单元后水中藻总数降为 7.63×10^5 个/L,去除率为 91.2%,经过滤单元后水中藻总数降为 4.30×10^5 个/L,总去除率升至 95.1%,相对于气浮出水过滤单元对藻的去除率为 43.6%(图 3).试验显示在试验混凝条件下,气浮单元对藻有较好的去除效果,原水中藻大部分是通过气浮去除,但过滤单元对藻仍有一定的去除效果,这说明在本混凝条件下藻细胞表面特性得到了较大的改善.过滤单元活性炭运行了近 4 个月,所以过滤单元对藻的去除还有赖于生物作用,其可能包括:生物膜的吸附、附着,微生物的氧化分解,颗粒填料机械截留以及生物絮凝,原生动物等的捕食作用,脱落生物膜对藻类的生物絮凝、

沉淀等,至于其中何种起主导作用目前还没有定论.

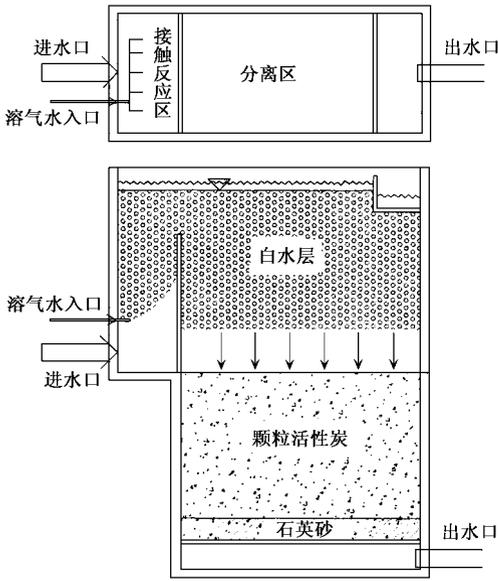


图 2 活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池示意图

Fig.2 The schematic of GAC-sand dual media deep bed dissolved air flotation/filtration

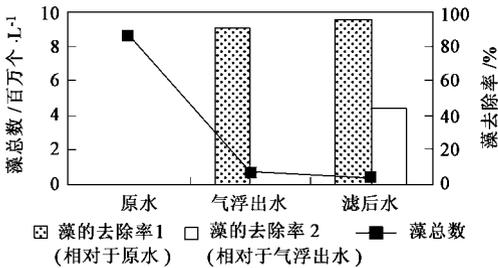


图 3 活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池对藻的去除

Fig.3 The algae removal by GAC-sand dual media deep bed dissolved air flotation/filtration

3.1.2 叶绿素-a

试验原水叶绿素-a 为 $11.33 \mu\text{g/L}$,经溶气气浮单元后叶绿素-a 降为 $1.20 \mu\text{g/L}$,去除率为 89.4% ,经过滤单元后叶绿素-a 降为 $0.88 \mu\text{g/L}$,总去除率升至 92.2% ,相对于气浮出水过滤单元对叶绿素-a 的去除率为 26.7% (图 4).试验显示在试验混凝条件下,气浮单元和过滤单元对叶绿素-a 有良好的去除效果,但均略小于对藻总数的去除.藻总数包括死藻和活藻,叶绿素-a 则是间接表征水中活藻的含量,试验工艺对叶绿素-a 的去除率相对较低,这可能是由于活藻的机动性,使得其不容易为微絮体和微气泡所捕捉.

3.1.3 浊度

试验原水浊度为 3.67NTU ,经溶气气浮单元后浊度降为 0.31NTU ,经过滤单元后浊度降为 0.18NTU ,试验显示,溶气气浮对于低浊水有良好的浊度去除效果(图 5).低浊水源水含颗粒物较少,投加絮凝剂量较低时形成的絮体少、细、轻,从而使絮体之间的碰撞几率小,难于沉淀,而采用气浮工艺的实质是通过引入大量的微气泡强化了其与絮体的碰撞,提高了处理效果,从而保证对浊度有较高的去除率.

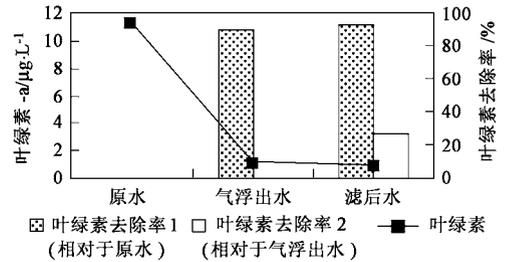


图 4 活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池对叶绿素的去除

Fig.4 The chl-a removal by GAC-sand dual media deep bed dissolved air flotation/filtration

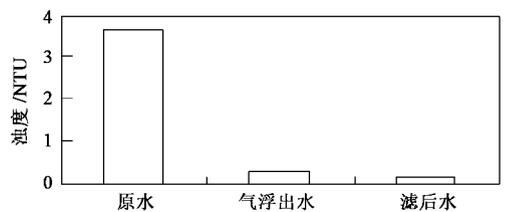


图 5 活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池对浊度的去除

Fig.5 The turbidity removal by GAC-sand dual media deep bed dissolved air flotation/filtration

3.1.4 UV_{254}

一般的饱和有机物在近紫外区无吸收,含共轭双键或苯环的有机物在紫外区有明显的吸收或特征峰,水处理中经常用 UV_{254} 来反映该类有机物在水中的含量.活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池对 UV_{254} 的去除见图 6.试验原水 UV_{254} 为 0.035cm^{-1} ,经溶气气浮单元后 UV_{254} 降为 0.024cm^{-1} ,去除率为 31.4% ,经过滤单元后 UV_{254} 降为 0.016cm^{-1} ,总去除率升至 54.3% ,相对于气浮出水过滤单元对 UV_{254} 的去除率为 33.3% .

3.1.5 耗氧量

试验原水耗氧量为 2.14mg/L ,经溶气气浮单元后耗氧量降为 1.04mg/L ,去除率为 51.4% ,经过滤单元后耗氧量降为 0.78mg/L ,总去除率升至

63.6%, 相对于气浮出水过滤单元对耗氧量的去除率为 25.0% (图 7)。

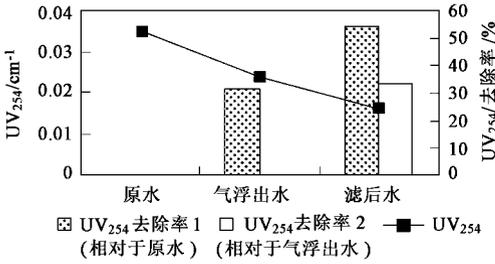


图 6 活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池对 UV₂₅₄ 的去除

Fig. 6 The UV₂₅₄ removal by GAC-sand dual media deep bed dissolved air flotation/filtration

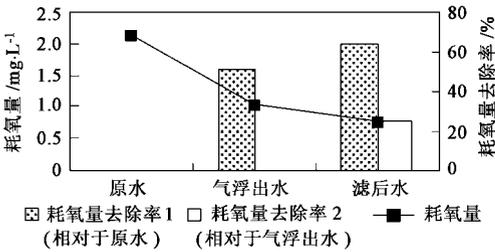


图 7 活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池对耗氧量的去除

Fig. 7 The OC removal by GAC-sand dual media deep bed dissolved air flotation/filtration

活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池对 UV₂₅₄、耗氧量的去除结果显示,在试验混凝条件下,气浮单元和过滤单元对水中有机物均有较好的去除效果,溶气气浮对耗氧量的去除效果要明显优于对 UV₂₅₄ 的去除,过滤单元对耗氧量的去除效果要稍弱于对 UV₂₅₄ 的去除.耗氧量反映的有机物包括悬浮、胶态部分和溶解性有机物,UV₂₅₄ 反映的有机物是溶解性的,而作为常规工艺的溶气气浮的去除对象主要是悬浮、胶态物质,所以溶气气浮对耗氧量的去除效果要明显优于对 UV₂₅₄ 的去除.试验采用了强化混凝,投加 H₂SO₄ 改变原水 pH 值使絮凝池中水的 pH 值为 6.60,投加量以 Al³⁺ 计为 2.0 mg/L.在此条件下,天然有机物与混凝剂一起形成不溶性的络合物(铝的腐殖酸盐和富里酸盐),然后与微气泡粘附实现固液分离.另外,混凝剂生成氢氧化物(Al(OH)₃)絮体对天然有机物吸附而将其去除,并且由于溶气气浮的高效性,去除水中悬浮、胶态有机物很有效,所以试验中溶气气浮单元对有机物有较好的去除效果.过滤单元活性炭运行了近 4 个月,该单元主要是通过活性炭的吸附作用和炭表面生物膜的作用来去除

水中的有机物,活性炭主要是吸附水中小分子量、疏水性有机物,生物作用包括生物絮凝、生物降解等作用,去除对象以小分子量、亲水性有机物为主.

3.1.6 嗅

原水藻量较大时,藻类是主要的致嗅物质,蓝藻中的梭线藻、胶鞘藻、鱼腥藻、颤藻、蓝纤维藻等是主要的致嗅藻种^[3].藻类致嗅物质浓度较低,仅为几个 ng/L,虽对人畜健康无多大危害,但气味强烈仅需很少数量即可改变水的正常气味^[4].水处理中通常使用嗅阈值(TON)作为评价水嗅的指标,一般来说,要是饮水者满意,水的嗅阈值应小于 5^[5].表 3 是本工艺对嗅阈值的去除效果.结果显示,气浮单元去除了水中较大部分的致嗅物质,并且气浮单元出水的嗅味接近饮水者要求.这主要是因为在本强化混凝条件下,气浮单元有较高的除藻和去除有机物的效果.经过滤单元后水没有嗅味是因为活性炭能够有效地去去除水中的致嗅物质.

表 3 活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池对嗅阈值的去除

Table 3 The TON removal by GAC-sand dual media deep bed dissolved air flotation/filtration

水样	原水	气浮单元出水	过滤单元出水
嗅阈值	24	6	无嗅味
嗅阈值去除率/%		75	

3.1.7 色度

试验原水色度为 22 度,经气浮单元后色度降为 4 度,去除率为 81.8%,经过滤单元后色度降为 3 度,总去除率升至 86.4%,相对于气浮出水过滤单元对色度的去除率为 25.0% (图 8).水中形成色度的物质主要是胶体有机物和分子量大于 1000 的有机物^[1],由于溶气气浮的高效性,使得对于水中胶体有机物有较高的去除率,这与气浮单元对色度的高效去除是相符的,而且这也反映了水源水中的主体致色物质是胶体有机物.由于生物活性炭对于水

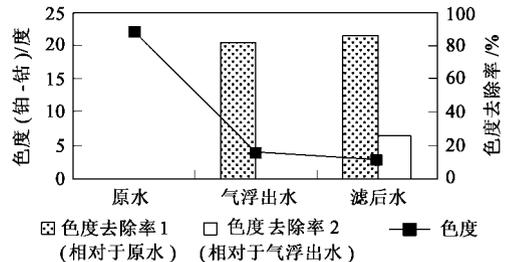


图 8 活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池对色度的去除

Fig. 8 The color removal by GAC-sand dual media deep bed dissolved air flotation/filtration

中分子量较大的有机物的去除效果相对较弱,所以过滤单元对于气浮出水中的致色物质并没有较好地去除。

3.1.8 残留铝

如果饮用水处理中采用的是铝盐混凝剂,则最终出水中一般都有一定的残留铝存在。铝是一种导致神经中毒的物质,铝在血液中的长期积累会导致严重脑部疾病,使人痴呆、神经错乱。虽然人体从食物中摄取的铝的量要大于从饮水中摄取的,但饮水中的铝更容易被生物利用,即更容易为肠道吸收而进入血液中,所以饮水中的铝对血液中铝的含量的贡献更大^[6,7]。活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池的各单元出水中残留铝含量见表4。气浮出水和过滤出水中残留铝含量均小于0.2 mg/L,满足饮用水水质标准,这同时也反映投加的混凝剂得到了较充分的利用。过滤单元对水中残留铝的去除效果较好,去除率为90.4%。过滤单元一方面通过去除水中微絮体来去除水中不溶性残留铝,另一方面,铝对活性炭的吸附势为中等,活性炭通过吸附作用可以去除一部分溶解性残留铝。

表4 活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池的各单元出水中残留铝含量

Table 4 The Al-residual content in outlet from each treating unit of GAC-sand dual media deep bed dissolved air flotation/filtration

水样	气浮单元出水	过滤单元出水
残留铝/ mg·L ⁻¹	0.114	0.011
残留铝去除率/ %		90.4

3.2 活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池工艺过滤单元产水能力的考察

作为活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池工艺的一个重要单元,过滤单元的产水能力也是一个重要的考察目标。采用UFRV(Unit Filter Run Volume,单位周期内单位滤柱面积产水量, m³/m²)来表征过滤单元的产水能力。试验从2个方面控制滤柱的过滤周期:当滤柱总水头损失达到1.5 m或滤后水浊度超过0.3 NTU时即停止过滤,本试验工艺过滤单元的停止是因为总水头损失达到1.5 m。图9是过滤单元总水头损失随运行时间变化的曲线。当工艺运行到36 h时,过滤单元总水头损失达到147.1 cm,过滤终止并开始反冲,过滤单元运行周期为36 h,滤柱产水能力UFRV为504 m³/m²,而一般给水处理工艺流程中过滤单元运行周期、产水能力UFRV分别为24 h和240 m³/m²,可见本工艺过滤单元的运行

周期和产水能力比较理想。

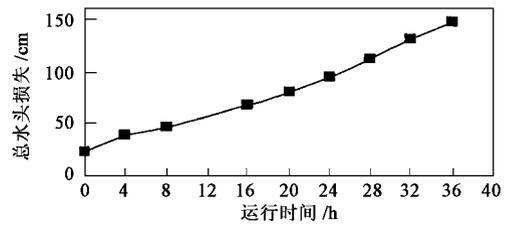


图9 过滤单元水头损失随时间的变化

Fig. 9 The variation of total head loss of filter unit with operation time

4 结论

(1) 本工艺特点为气浮过滤一体化,活性炭石英砂双层深床过滤,常规处理和深度处理一体化。该工艺节约占地面积,在显著提高最终出水水质的同时省掉了砂滤池,运行方式灵活。

(2) 利用活性炭石英砂双层深床滤料浮滤池处理高藻原水效果比较理想,出水藻总数为 4.30×10^5 个/L,总去除率为95.1%。出水叶绿素-a为0.88 μg/L,总去除率为92.2%。出水浊度为0.18 NTU。出水UV₂₅₄为0.016 cm⁻¹,总去除率为54.3%。出水耗氧量为0.78 mg/L,总去除率为63.6%。出水没有臭味,色度为3度,总去除率为86.4%。出水残留铝含量为0.011 mg/L,满足饮用水水质标准。过滤单元运行周期为36 h,滤柱产水能力UFRV为504 m³/m²。

致谢:感谢 Purac AB 公司和 Jan Dahlquist 先生在设备和技术上提供的帮助。

参考文献:

- [1] 王占生,刘文君. 微污染源水饮用水处理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999. 175~178.
- [2] 余国忠. 纤维除藻机过滤分离原水藻类的试验研究[D]. 北京:清华大学环境科学与工程系,2002.
- [3] Hoson T. Growth characteristics of the musty odor producing algae[J]. Wat. Sci. Tech., 1989, 25(2): 81~88.
- [4] 蒋展鹏,祝万鹏. 环境工程检测[M]. 北京:清华大学出版社,1990. 23~24.
- [5] 罗晓鸿. 绍兴市富营养化水源饮用水净化工艺研究[D]. 北京:清华大学环境科学与工程系,1996. 74~75.
- [6] Jennifer L Stauber, T Mark Florence, Cheryl M Davies, et al. Bioavailability of Al in alum-treated drinking water [J]. J. AWWA, 1999, 91(11): 84~93.
- [7] Steve Reiber, Walter Kukull, Perri Standish Lee. Drinking water aluminium and bioavailability [J]. J. AWWA, 1995, 87(5): 86~97.