



强化原位生物接触氧化技术改善水源水质的试验研究

黄廷林^{1,*}, 丛海兵¹, 周真明¹, 何文杰², 阴沛军²

1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055

2. 天津自来水集团有限公司, 天津 300040

收稿日期: 2005-09-22

修回日期: 2006-02-24

录用日期: 2006-02-28

摘要:在扬水曝气条件下, 在原位进行了强化生物接触氧化技术改善滦河水源水质的试验研究, 分析测定其处理效果, 研究了生物填料悬挂于自然水体不同水深、不同水力停留时间下对生物预处理效果的影响。试验结果表明, 扬水曝气加原位采用生物接触氧化组合用于水源水质改善是可行的; 该技术对水中 COD_{Mn} 、氨氮、叶绿素 a、真实色度、TOC、 UV_{254} 、铁和锰平均的去除率分别可达 10.1%、64.1%、42.4%、48.6%、12.5%、9.5%、48.9% 和 41.9%; 生物填料可悬挂在水体 0~3 m 水深区, 停留时间应大于 2~3 h。

关键词:扬水曝气器; 水源水; 生物接触氧化; 滦河水

文章编号: 0253-2468(2006)05-0785-06

中图分类号: TU991.2

文献标识码: A

The onsite experiment study of enhanced bio-contact oxidation process for pretreatment of Luanhe River water

HUANG Tinglin^{1,*}, CONG Haibing¹, ZHOU Zhenming¹, HE Wenjie², YIN Peijun²

1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055

2. Tianjin Water Works Group Co. Ltd., Tianjin 300040

Received 22 September 2005;

received in revised form 24 February 2006;

accepted 28 February 2006

Abstract: Under the operation of Multifunctional Device for Water Lifting and Aeration (MDWLA), onsite experiment was made by use of the enhanced bio-contact oxidation process for pretreatment of Luanhe River water to remove COD_{Mn} , ammonia-nitrogen, chlorophyll-a, true color, TOC, UV_{254} , iron and manganese. It was mainly studied the effects of different depths of biological medium submerged under the water surface and different hydraulic residential times on the removal of above indexes. The experimental results showed that the combined technique of water-lifting aeration and bio-contact oxidation process was feasible, and the removal rate of COD_{Mn} , ammonia-nitrogen, chlorophyll-a, real color, TOC, UV_{254} , iron and manganese by the technique were 10.1%, 64.1%, 42.4%, 48.6%, 12.5%, 9.5%, 48.9% and 41.9% respectively. Biological medium could be suspended or fixed under the water surface 0~3 m, and the hydraulic residential time should be controlled more than 2~3 h.

Key word: water-lifting aerator; source water; bio-contact oxidation; Luanhe River water

弹性填料生物接触氧化技术用于微污染水源水预处理的研究已有不少成果(张东等, 2000)。在宁波梅林水厂、嘉兴石臼漾水厂、深圳东深水厂和上海惠南水厂的应用表明, 该技术在去除水源水中 COD_{Mn} 、氨氮、藻类、浊度、色度、铁和锰等方面有较好的效果(肖羽堂等, 1998; 查人光等, 1999; 陈汉辉等, 2000; 张华等, 2000)。但这些研究严格讲都不属于原位生物预处理。目前还未见国内外关于采用原

位生物接触氧化技术对水源水进行生物预处理的报道。分析其原因, 主要是原位生物预处理必须满足 3 个条件: 一是要有充足的溶解氧, 二是水体混合要较充分以持续不断地提供生物所需的基质(有机物), 三是水体对生物膜要有足够的冲刷强度使其不断更新以保持其生物活性。而在自然水体中这 3 个条件是很难保证的。而作者开发的扬水曝气技术则能满足上述原位生物所需的 3 个条件(丛海兵

等,2005)。本文就是针对这种情况,首次开展扬水曝气加原位生物接触氧化组合技术——强化原位生物接触氧化技术对水源水质改善的可行性研究。试验选取在天津市自来水公司某水厂的水源地进行。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 试验装置和材料

试验测试槽是一个带有进出水装置的水槽,见图1。测试槽体分左右2格;每格设计尺寸(长×宽×高)为:80 cm×20 cm×50 cm,有效尺寸为80 cm×20 cm×45 cm,有效体积为0.072 m³,池体为PVC塑料材料。

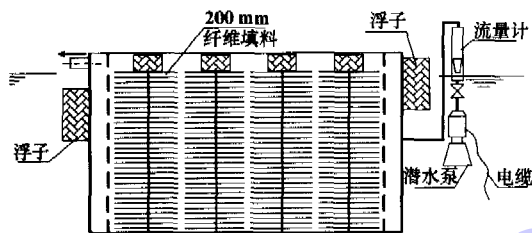


图1 原位生物接触氧化试验系统图

Fig. 1 The system chart of the onsite experiment of bio-contact oxidation

生物填料为YDT弹性波纹立体填料,由中心绳和丝条组成,丝条固定在中心绳上呈辐射状向四周伸展;填料高度为50 cm,直径为200 mm;中心绳、丝条都选用聚烯烃类优质塑性材料,丝条直径为0.3~0.5 mm,比表面积为50~300 m²·m⁻³,孔隙率为98%,成品质量为3~15 kg·m⁻³,挂膜后质量为55~110 kg·m⁻³。

1.2 试验条件

安装于蓄水池中的扬水曝气器直径为400 mm,总高度6.3 m,共2台。该蓄水池平面尺寸为200 m×200 m,水深为6~9 m,有效容积为30×10⁴ m³,水力停留时间为24 h。两台扬水曝气器总提水量约为3×10⁴ m³·d⁻¹,占蓄水池体积的10%。该实验研究主要是考察生物接触氧化装置置于蓄水池不同平面位置、水深和不同生物接触氧化反应器水力停留时间(HRT)条件下的水质改善效果。试验期间的水源水为滦河水。

1.3 试验方法

水源水的水位生物接触氧化预处理是否可行,其关键是生物填料表面能否在自然水体条件下形成活性生物膜。为此,将不同编号的生物填料悬挂在自然水体

距水面0~3 m水深区,使其在扬水曝气条件下挂膜。悬挂在0~0.5 m、2.5~3.0 m水深区的填料用绳子连接在一起,统编为1[#],其目的就是比较填料悬挂在0~1.5 m与1.5~3.0 m水深区的水处理效果;2[#]填料悬挂在距水面0.5~1.0 m、2.0~2.5 m水深区,3[#]填料悬挂在距水面1.0~1.5 m、1.5~2.0 m水深区,测试其水处理效果时,将生物填料从自然水体中移入测试槽中。不同编号填料轮流放入测试槽,填料每次在测试槽中的HRT为3~6 d,其余时间放回原位(自然水体中),保证其原位自然生长条件。通过控制测试槽的进水流量改变HRT,比较不同的HRT对水处理效果的影响,试验控制的HRT分别为2.0、2.4、3.0、4.0 h。由于试验条件的限制,某些测试项目中的HRT没有比较完全。采用连续通水,试验期间,COD_{Mn}、氨氮、叶绿素a每天测1次,真实色度、UV₂₅₄、TOC、总Fe、总Mn则是2~4 d测一次。

1.4 项目测试方法

溶解氧和温度:HI 9141型溶解氧测定仪;pH值:pHS-25型pH计;COD_{Mn}:酸性法;氨氮:水杨酸-次氯酸盐光度法;叶绿素a:0.45 μm醋酸纤维膜过滤,90%乙醇萃取光度法;TOC:日本TOC5000A总有机碳分析测定仪;UV₂₅₄:将水样经0.45 μm滤膜过滤,采用紫外分光光度计,测定波长254 nm处的吸光度值,比色皿厚度为1 cm;真实色度:将水样经0.45 μm滤膜过滤后,采用铂钴标准色液,在420 nm波长下测定,比色皿厚度为1 cm;总Fe:邻菲林啉分光光度法;总Mn:高碘酸钾氧化光度法;生物量:生物量的脂磷分析方法(于鑫,2002)。

2 结果与分析 (Results and analysis)

2.1 生物挂膜

自2004年4月下旬开始,在水温为20~23℃的条件下,生物填料经15 d自然挂膜后,将不同编号的生物填料从自然水体中轮流移入测试槽中测试其水处理效果,约10 d后测试槽中生物填料对COD_{Mn}去除率达到7%~10%,氨氮去除率达50%以上,认为挂膜成功,处理系统进入正常运行测试。测试时间从5月中旬到10月中旬。

2.2 试验期间测试槽进水水质

试验期间水源水质见表1。滦河水的主要污染物是藻类和有机物,其中藻类污染更为突出,在7~9月份期间,水体富营养化现象比较严重,藻类计数高达4000×10⁴个·L⁻¹。藻类在5~6月份期间主要

以绿藻、硅藻为主,在7~9月份期间主要以蓝藻、绿藻为主,10月中旬后期主要以硅藻为主.其它藻类有黄藻、褐藻、金藻等.在5~8月份期间,水源水中COD_{Mn}基本上都在5 mg·L⁻¹以上,最高达8 mg·L⁻¹.另外,水源水中氨氮含量不高,仅在7~8月份可以测得,最高值为0.37 mg·L⁻¹,其它月份氨氮在0.04 mg·L⁻¹以下.

表1 试验期间水源水质
Table 1 The quality of source water during the experiment

水温/℃	pH	溶解氧/(mg·L ⁻¹)	浊度/NTU	COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	叶绿素 a/(μg·L ⁻¹)	真实色度/度
16~30	7.2~8.6	5.1~9.4	3~14	3.88~8.00	0.04~0.37	5.1~61.8	5~15

2.3 污染物去除效果

2.3.1 COD_{Mn}去除效果 COD_{Mn}去除效果见表2.由表中可见,在2~4h范围内改变HRT, COD_{Mn}的去除率9.8%~10.4%,说明HRT对COD_{Mn}的去除影响较小.相同HRT条件下,悬挂在距水面0~1.5m水深区生物填料对COD_{Mn}的平均去除率略高于悬挂在距水面1.5~3.0m水深的生物填料,去除率分别为10.3%和9.9%,差别很小.这说明,由于扬水曝气器的混合充氧作用,均化了DO、COD_{Mn}、水温沿垂向的分布,一方面增强了生物接触氧化预处理的稳定性,另一方面大大削弱了水深对生物接触氧化的影响.

表2 COD_{Mn}去除效果
Table 2 The removal effect of COD_{Mn}

生物填料悬挂位置	测试条件			去除效果			
	水温/℃	溶解氧/(mg·L ⁻¹)	HRT/h	进水COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	出水COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	去除率	平均去除率
距水面0~1.5m水深区	23~29	5.36~9.38	4.0	5.27~7.58	4.90~6.78	5.2%~24.5%	10.7%
	16~30	5.60~9.40	3.0	4.41~8.00	4.10~7.23	5.0%~17.6%	10.5%
	19~24	7.30~8.96	2.4	4.72~7.35	4.24~6.79	5.6%~13.2%	10.0%
	23~30	6.40~8.04	2.0	3.96~7.29	3.45~6.77	6.2%~12.9%	9.8%
	23~29	5.36~9.38	4.0	5.27~7.58	4.94~6.67	5.0%~25.0%	10.0%
距水面1.5~3m水深区	6~30	5.60~9.40	3.0	4.41~8.00	3.98~7.15	5.0%~13.8%	10.0%
	19~24	7.30~8.96	2.4	4.72~7.35	4.33~6.46	5.3%~12.1%	9.8%
	23~30	6.40~8.04	2.0	3.96~7.29	3.61~6.25	5.0%~14.3%	9.7%

2.3.2 氨氮去除效果 由表3可见,当HRT为2h和3h时,氨氮的去除率分别为62.5%和65.7%,说明HRT对氨氮去除的影响也较小.相同HRT条件下,悬挂在距水面1.5~3.0m水深和0~1.5m水深的生物填料对氨氮的平均去除率分别为68.8%和59.4%,前者的除氨氮效果略优于后者,说明不同水深对氨氮去除有一定影响,这主要是由于深水层填料生物膜上自养型硝化细菌较表层填料为多,硝化作用比较明显.但总的来看,水深的影

表3 氨氮去除效果
Table 3 The removal effect of ammonia-nitrogen

生物填料悬挂位置	测试条件			去除效果			
	水温/℃	溶解氧/(mg·L ⁻¹)	HRT/h	进水氨氮/(mg·L ⁻¹)	出水氨氮/(mg·L ⁻¹)	去除率	平均去除率
距水面0~1.5m水深区	25~30	5.10~8.04	2.0	0.036~0.371	0.019~0.205	33.3%~79.4%	54.0%
距水面1.5~3m水深区	27~30	5.80~8.40	3.0	0.055~0.247	0.007~0.151	38.9%~89.5%	64.7%
距水面1.5~3m水深区	25~30	5.10~8.04	2.0	0.036~0.371	0.009~0.171	48.7%~88.3%	71.0%
距水面1.5~3m水深区	27~30	5.80~8.40	3.0	0.055~0.247	0.015~0.114	43.6%~91.8%	66.6%

2.3.3 叶绿素 a 的去除效果 去除藻类的机理主要包括生物膜的吸附附着、微生物的氧化分解、填料间的生物絮凝和机械截留,以及异氧菌、原生动物等捕食作用、脱落生物膜对藻类的生物絮凝和沉淀等. 叶绿素 a 去除效果见表 4.

表 4 叶绿素 a 去除效果
Table 4 The removal effect of chlorophyll-a

生物填料 悬挂位置	测试条件			去除效果			
	水温/℃	溶解氧/ (mg·L ⁻¹)	HRT/h	进水叶绿素 a/ (μg·L ⁻¹)	出水叶绿素 a/ (μg·L ⁻¹)	去除率	平均 去除率
距水面 0 ~ 1.5m 水深区	23 ~ 29	5.84 ~ 9.36	4.0	18.6 ~ 61.8	5.9 ~ 17.7	22.6% ~ 87.2%	50.1%
	16 ~ 30	5.92 ~ 9.42	3.0	20.8 ~ 53.0	9.6 ~ 27.4	21.0% ~ 73.3%	44.4%
	19 ~ 24	7.40 ~ 8.90	2.4	18.2 ~ 36.3	14.0 ~ 26.4	20.9% ~ 43.8%	31.7%
	23 ~ 30	6.50 ~ 8.25	2.0	5.6 ~ 63.3	3.1 ~ 25.7	21.4% ~ 81.4%	46.2%
距水面 1.5 ~ 3m 水深区	23 ~ 29	5.84 ~ 9.36	4.0	18.6 ~ 61.8	7.6 ~ 21.6	23.0% ~ 73.3%	48.0%
	6 ~ 30	5.92 ~ 9.42	3.0	20.8 ~ 53.0	9.8 ~ 28.7	23.9% ~ 68.7%	43.6%
	19 ~ 24	7.40 ~ 8.90	2.4	18.2 ~ 36.3	12.3 ~ 27.3	21.5% ~ 35.0%	30.1%
	23 ~ 30	6.50 ~ 8.25	2.0	5.6 ~ 63.3	3.2 ~ 27.3	21.4% ~ 72.1%	45.3%

由表 4 可见,在 2 ~ 4 h 内改变 HRT 对叶绿素 a 去除效果影响不大(平均去除率 42.4%). 在本试验中影响叶绿素 a 去除效果的主要因素不是 HRT 而是藻种,因为不同时期水体中的藻种不同,生物接触氧化对不同藻种去除效果不一样,一般情况下蓝藻去除率最高,硅藻其次,绿藻最低(陈伟等, 1997). 从水深的影响来看,悬挂在距水面 0 ~ 1.5 m 水深和 1.5 ~ 3 m 水深的生物填料对叶绿素 a 的平均去除率分别为 43.1% 和 41.8%,两者略有差别,但差别很小,从而说明,扬水曝气对水质的混合均化作用效果显著,基本消除了水深对生物氧化降解叶绿素的影响.

2.3.4 TOC 和 UV₂₅₄ 的去除效果 TOC 是以碳含量表示水体中有机物质总量的综合指标,比 COD 更能直接表示有机物的总量;UV₂₅₄测定的是水体中含有共轭双键或者苯环的有机物,它可作为消毒副产物三卤甲烷 THMs 前体物的代用参数. TOC、UV₂₅₄ 去除效果见表 5.

表 5 TOC 和 UV₂₅₄ 去除效果
Table 5 The removal effect of TOC and UV₂₅₄

生物填料悬挂位置 (距水面水深)	测试条件			TOC 去除效果			
	水温/℃	溶解氧/ (mg·L ⁻¹)	HRT/h	进水	出水	去除率	平均去除率
0 ~ 1.5m	19 ~ 27	6.96 ~ 9.40	2.4 ~ 3.0	4.190 ~ 6.190	3.900 ~ 5.400	5.8% ~ 23.3%	10.7%
1.5 ~ 3.0 m	19 ~ 27	6.96 ~ 9.40	2.4 ~ 3.0	4.190 ~ 6.190	3.670 ~ 5.270	7.6% ~ 21.8%	14.2%
0 ~ 1.5m	16 ~ 29	7.0 ~ 9.4	2.4 ~ 3.0	0.054 ~ 0.069	0.051 ~ 0.061	5.4% ~ 11.2%	8.70%
1.5 ~ 3.0 m	16 ~ 29	7.0 ~ 9.4	2.4 ~ 3.0	0.054 ~ 0.069	0.048 ~ 0.062	7.4% ~ 14.3%	10.3%

由表 5 可见,悬挂在距水面 1.5 ~ 3.0 m 水深的生物填料对 TOC、UV₂₅₄ 去除率均略高于悬挂在距水面 0 ~ 1.5 m 水深的生物填料. 其原因有待于通过进一步的试验研究分析. 但总的来看,水深的影响并不显著.

2.3.5 真实色度的去除效果 构成色度的主要物质是腐殖质(腐殖酸、富里酸等),腐殖质目前被认为是三卤甲烷 THMs 前体物. 真实色度的去除主要是通过通过对构成色度的有机物的生物降解作用、生物膜吸附作用、微生物的生物絮凝作用和沉淀作用来实现. 真实色度去除效果见表 6.

表6 真实色度去除效果
Table 6 The removal effect of true color

生物填料悬挂位置 (距水面水深)	测试条件			去除效果			
	水温/℃	溶解氧/ (mg·L ⁻¹)	HRT/h	进水真实色度/ 度	出水真实色度 度	去除率	平均 去除率
0~1.5 m	18~24	7.30~9.40	2.4	5~15	2~9	21.5%~79.4%	44.7%
	16~24	6.96~9.40	3.0	6~15	3~8	32.2%~72.3%	54.4%
1.5~3.0 m	18~24	7.30~9.40	2.4	5~15	2~9	21.5%~79.4%	44.8%
	16~24	6.96~9.40	3.0	6~15	2~8	24.0%~84.3%	50.6%

由表6可见,HRT对真实色度的去除效果影响较为显著,HRT越大,真实色度的去除效果越好.悬挂在距水面0~1.5 m水深和1.5~3.0 m水深的生物填料对真实色度的平均去除率分别为49.6%和47.7%,前者略高于后则,但差别不大.

2.3.6 总铁和总锰的去除效果 由于滦河水 pH

值为7.2~8.6,平均值8.1,偏碱性;溶解氧为4~10mg·L⁻¹,平均值为7.65mg·L⁻¹,处于好氧状态;使得水体中Fe、Mn主要是以Fe³⁺、Mn⁴⁺形式存在,这样原位生物接触氧化去除Fe、Mn的机理主要依靠生物絮凝沉淀和直接沉淀去除,总Fe、总Mn去除效果见表7.

表7 总Fe和总Mn去除效果
Table 7 The removal effect of total iron and total manganese

生物填料 悬挂位置	测试条件			总Fe去除效果			
	水温/℃	溶解氧/ (mg·L ⁻¹)	HRT/h	进水	出水	去除率	平均 去除率
0~1.5 m	17~24	7.3~9.08	2.4~3	0.36~0.63	0.13~0.33	18.4%~69.2%	51.7%
1.5~3.0 m	17~24	7.3~9.08	2.4~3	0.36~0.63	0.19~0.41	13.2%~63.5%	46.1%

生物填料 悬挂位置	测试条件			总Mn去除效果			
	水温/℃	溶解氧/ (mg·L ⁻¹)	HRT/h	进水	出水	去除率	平均 去除率
0~1.5 m	16~24	7.3~9.15	2.4~3	0.55~1.15	0.16~0.67	21.3%~70.9%	44.5%
1.5~3.0 m	16~24	7.3~9.15	2.4~3	0.55~1.15	0.29~0.75	24%~55.1%	39.3%

由表7可见:悬挂在距水面0~1.5m水深的生物填料对总Fe、总Mn去除率均略高于悬挂在距水面1.5~3m水深的生物填料.

2.4 生物填料上的脂磷生物量

脂磷中的磷(脂磷,Lipid-P)含量可采用比色法

测定,以它表示生物量已经在许多饮用水生物处理的研究中得到应用(于鑫等,2002),并证明是行之有效的方法.测得生物填料上的脂磷生物量如表8所示.

表8 悬挂在距水面0~3.0 m水深区生物填料上的脂磷生物量
Table 8 The phospholipids biomass of Biological medium be suspend under the water surface 0~3 m

填料距水面 水深/m	吸光度	脂磷总量 /nmol	填料总 长度/cm	填料质量 /g	填料生物量 /(nmol·g ⁻¹)	填料密度 /(g·cm ⁻³)	填料体积 /cm ³	填料生物量 /(nmol·cm ⁻³)	填料质量 /(mg·L ⁻¹)
0.1	0.122	22.38	52.8	0.124	180.5	0.87	0.143	156.5	2.34
0.4	0.116	21.12	44.2	0.104	203.1		0.120	176	
0.6	0.116	21.12	57	0.134	157.6		0.154	137.1	
0.9	0.102	18.17	63.8	0.150	121.1		0.172	105.6	
1.1	0.091	15.85	65.1	0.153	103.6		0.172	90.1	
1.4	0.080	13.53	61.7	0.145	93.3		0.167	80.0	
1.6	0.075	12.48	66.6	0.157	79.5		0.180	69.3	
1.9	0.051	7.42	60.6	0.142	52.3		0.163	45.5	
2.1	0.052	7.63	71.6	0.168	45.4		0.193	39.5	
2.4	0.048	6.78	58	0.136	49.9		0.156	43.5	
2.6	0.036	4.26	49.2	0.116	36.7		0.133	32.0	
2.9	0.021	1.09	41.1	0.097	11.2		0.111	9.8	

由表 8 可见,生物填料上的生物量随着生物填料悬挂距水面水深的增大而减小,而且差别相对比较显著.该结果似乎与上述水深对水质净化效果影响较小的结果相矛盾,分析原因,应该是表层水体填料上藻类附着生长所致,从对生物填料的观察可予以定性证明,另外,从对藻类沿水深分布的测定结果也能充分说明这一点(何文杰等,2006).

3 结论(Conclusion)

1)扬水曝气加原位生物接触氧化组合技术改善水源水质是可行的.

2)水深对该组合技术净化水质的效果影响较小.HRT 应大于 2~3 h,生物填料可以悬挂在距水面 0~3 m 水深区.

3)在温度为 16~30℃、溶解氧为 5.1~9.4 mg·L⁻¹、HRT 为 2~4h 条件下,距水面 0~3 m 水深的生物填料对 COD_{Mn}、氨氮、叶绿素 a、真实色度、TOC、UV₂₅₄、铁、锰平均去除率分别为 10.1%、64.1%、42.4%、48.6%、12.5%、9.5%、48.9%、41.9%.

4)受试验规模的限制,置于自然水体中的测试槽生物接触氧化条件与下一步实际应用的敞开式生物接触氧化条件不是完全一致,因此,下一步研究的重点将是该技术在水源水中完全敞开式条件下的生产性试验研究.

References:

Chen H H, Sun G S. 2000. Analysis on water quality purifying effect in biofilm formation and start process of Dongshen source water biological pretreatment project[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 3(2): 59—61 (in Chinese)

Chen W, Fan J C. 1997. The summarization on bio contact oxidation pretreatment technology for the micropolluted raw water[J]. Water Purification Technology, 25(4): 5—7 (in Chinese)

Cong H B, Huang T L, Miao J G, et al. 2005. Development of rehabilitation device for water body - water lifting aerator[J]. China Water & Wastewater, 21(3): 41—45 (in Chinese)

Gong M S, Yin Y L, Wang Z S, et al. 1999. Study on pilotscale of bio - pretreatment for source water in intake[J]. Water & Wastewater Engineering, 25(4): 5—7 (in Chinese)

He W J, Li W G, Zhang X J, Huang T L, Han H D. 2006. Technology

for drinking water safety [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 141—142 (in Chinese)

Wang Z S, Liu W J. 1999. The treatment for the micropolluted raw water and the drinking water [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 95—130 (in Chinese)

Xiao Y T, Xu J H, Wang G P. 1998. Research of a full scale application on strengthening the treatment effect of the micropolluted raw water [J]. Environmental Science, 19(3): 28—30 (in Chinese)

Yu X, Zhang X J, Wang Z S. 2002. The phospholipids mensuration of biomass of biological treatment for drinking water [J]. Water & Wastewater Engineering, 28(5): 1—4 (in Chinese)

Zha R G, He Y J, Xu B. 1999. Application of bio contact oxidation pretreatment in Shijiuyang waterworks [J]. Water & Wastewater Engineering, 25(3): 9—11 (in Chinese)

Zhang D, Xu J H, Liu H. 2000. Bio - contact oxidation pretreatment and conventional process for polluted raw water [J]. Water & Wastewater Engineering, 26(10): 25—27 (in Chinese)

Zhang H. 2000. The treatment effect of biological pretreatment process in Shanghai Huinan waterworks [J]. China Water & Wastewater, 16(8): 12—14 (in Chinese)

中文参考文献:

陈汉辉,孙国胜. 2000. 东深源水生物预处理工程挂膜启动过程水质净化效果变化的分析[J]. 环境污染治理技术与设备, 3(2): 59—61

陈伟,范瑾初. 1997. 微污染原水的生物接触氧化预处理技术综述[J]. 净水技术, 60(2): 43—46

丛海兵,黄廷林,缪晶广,等. 2005. 水体修复装置——扬水曝气器的开发[J]. 中国给水排水, 21(3): 41—45

龚明树,殷云兰,王占生,等. 1999. 取水口水源水生物预处理中试研究[J]. 给水排水, 25(4): 5—7

何文杰,李伟光,张晓建,等. 2006. 安全饮用水保障技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 141—142

王占生,刘文君. 1999. 微污染水源饮用水处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 95—130

肖羽堂,许建华,王冠平. 1998. 强化微污染原水净化效果的生产性研究[J]. 环境科学, 19(3): 28—30

于鑫,张晓键,王占生. 2002. 饮用水生物处理中生物量的脂磷法测定[J]. 给水排水, 28(5): 1—4

查人光,贺尧基,徐兵. 1999. 生物接触氧化预处理在石臼漆水厂中的应用[J]. 给水排水, 25(3): 9—11

张东,许建华,刘辉. 2000. 用生物接触氧化预处理与常规工艺净化受污染原水[J]. 给水排水, 26(10): 25—27

张华. 2000. 上海惠南水厂生物预处理工艺的运行效果[J]. 中国给水排水, 16(8): 12—14