

研究与探索

## 黄浦江上游引水渠道中的生物氧化作用研究

陈国光<sup>1</sup> 乐林生<sup>2</sup> 吴今明<sup>3</sup> 芮友仁<sup>4</sup> 岳舜琳<sup>5</sup>

(1. 上海市供水调度监测中心, 上海 200002; 2. 上海市自来水市北有限公司, 上海 200086;  
3. 上海市水务局, 上海 200001 4. 上海市城镇供水协会, 上海 200002;  
5. 上海市自来水市南有限公司, 上海 200002)

**摘要** 该文对黄浦江上游引水管渠中的  $\text{NH}_3\text{-N}$  及  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  衰减速率进行了研究, 所得  $\text{NH}_3\text{-N}$  衰减系数  $K_{\text{NH}_3}$  较一般河流大得多, 而  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的衰减系数  $K_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$  则与一般河流接近。文中对管渠中的耗氧及复氧进行了计算, 提出在大桥水中  $\text{NH}_3\text{-N}$  不大于  $2\text{mg/L}$  时依靠管渠中的自净能力, 到达各厂的原水  $\text{NH}_3\text{-N}$  可不大于或等于  $1\text{mg/L}$ , 但大于  $2\text{mg/L}$  甚至  $3\text{mg/L}$  时, 需在大桥有预处理措施,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  在管渠中的衰减量不大, 要在水厂中着力解决。

**关键词** 生物氧化 衰减系数 氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) 耗氧量( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )

## Research on the Bio-oxidation in the Channel for Diversion of Upstream Water of Huangpu River

Chen Guoguang<sup>1</sup> Le Linsheng<sup>2</sup> Wu Jinmin<sup>3</sup> Rui Youren<sup>4</sup> Yue Shunlin<sup>5</sup>

(1. Shanghai Water Supply Dispatching and Monitoring Center, Shanghai 200002, China;  
2. Shanghai Municipal Waterworks Shibe Co. Ltd., Shanghai 200086, China; 3. Shanghai Municipal  
Water Affairs Bureau, Shanghai 200001, China; 4. Shanghai Town Water Supply Association,  
Shanghai 200002, China; 5. Shanghai Municipal Waterworks Shinan Co. Ltd., Shanghai 200002, China)

**Abstract** Research on degradation of  $\text{NH}_3\text{-N}$  and  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  in Channel Water diverted from upstream of Huangpu River were conducted. The coefficients of degradation of  $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $K_{\text{NH}_3}$  obtained are much higher than those obtained from rivers, whereas those of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  obtained are approximately the same as rivers'. In this paper, consumption and regeneration of oxygen in channel water were calculated, the results obtained were: depending upon the self-purification,  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentration in the influent water of each water plant could be less than  $1\text{mg/L}$ , during  $\text{NH}_3\text{-N}$  concentration of the outlet water of Daqiao raw water station less than  $2\text{mg/L}$ , nevertheless pretreatment facilities must be carried out during  $\text{NH}_3\text{-N}$  in the Daqiao water higher than 2 or  $3\text{mg/L}$ ; only a little amount of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  removed in the channel water, this problem must be solved in each water plant.

**Keywords** bio-oxidation degradation coefficient ammonia-nitrogen( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) oxygen consumption ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )

为解决黄浦江临江水厂原水水质污染问题, 黄浦江上游引水第一期工程于 1987 年投产, 第二期工程于 1998 年投产迄今已 7 年, 对保障上海市居民饮水健康发挥了重要作用。由于水源保护工作跟不上

污染的发展, 黄浦江上游水质较原先有所恶化, 作为解决这一问题的前期工作, 研究黄浦江上游引水渠道中的生物氧化作用是十分必要的。

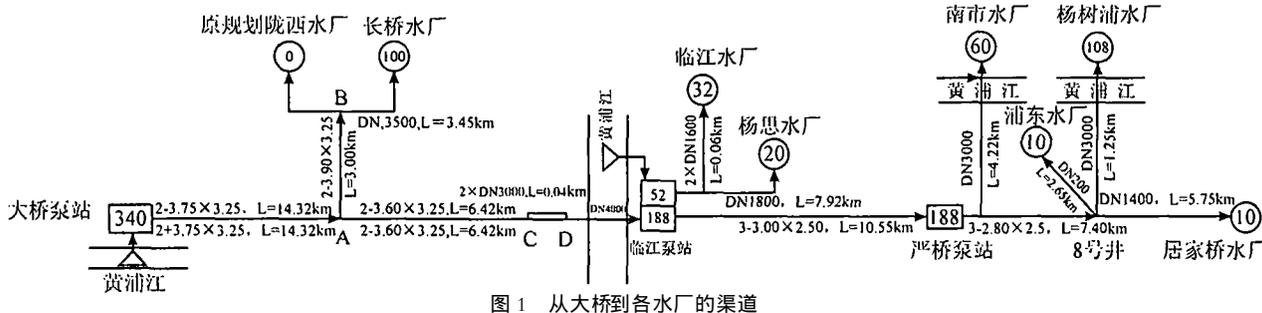
### 1 黄浦江上游引水渠道概况

\* 基金项目: 国科发(863)2002-AA601130

黄浦江上游引水工程规模  $540 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 原水经水泵提升至调压池, 通过钢筋混凝土暗渠自流至临江泵站, 中途部分水量送至长桥水厂, 临江泵站将原水再提升至调压池, 再通过暗渠自流至严桥泵站, 再向下游送至南市水厂、杨树浦水厂, 目前大桥原水供水量一般为  $380 \times 10^4 \sim 420 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。从大桥到各水厂的渠道见图 1, 黄浦江原水输送至各水厂的渠道距离及水在渠道中的停留时间见表 1。

表 1 输水距离及停留时间  $t$

输水渠道	渠道距离 km	供水 $420 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 停留时间		供水 $380 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 停留时间	
		h	d	h	d
大桥~长桥	20.77	5.93	0.247	6.69	0.279
大桥~临江	27.36	6.61	0.275	7.23	0.301
大桥~南市	39.22	10.17	0.424	11.21	0.467
大桥~杨厂	45.00	11.67	0.486	12.71	0.529



2 试验方法

黄浦江是潮感河流, 一昼夜涨落潮 2 次, 水质随潮汐有变化, 故从大桥泵站起沿输水渠道的各主要水厂设一取样点, 每 1h 采样一次, 每 4 h 的混合样

测量溶解氧 DO、氨氮  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、耗氧量  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、水温 T 各一次, 如此得到测定结果求得月平均值, 测定结果见表 2。

表 2 2002 年引水渠道中水质 DO、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 变化(月平均) (mg/L)

月份	水温 ℃	大桥			长桥			临江			南市			杨厂		
		DO	$\text{NH}_3\text{-N}$	$\text{COD}_{\text{Mn}}$												
1	7.8	-	1.60	-	-	0.98	-	-	1.20	-	-	0.81	-	-	0.84	-
2	9.3	-	1.70	-	-	0.90	-	-	1.01	-	-	0.66	-	-	0.44	-
3	13.2	-	1.40	-	-	0.60	-	-	0.80	-	-	0.39	-	-	0.22	-
4	17.3	4.4	1.10	6.3	2.7	0.46	5.7	3.1	0.64	5.8	4.8	0.33	5.6	3.6	0.35	5.7
5	19.4	4.0	0.83	6.2	3.0	0.38	5.9	2.8	0.37	5.7	4.9	0.28	5.5	4.2	0.23	5.3
6	25.6	3.0	0.92	6.0	3.3	0.20	6.5	2.1	0.27	5.6	3.9	0.15	5.5	3.4	0.18	4.8
7	27.4	1.8	0.98	6.1	2.6	0.31	-	2.2	0.29	6.3	3.4	0.21	5.9	2.6	0.17	5.4
8	28.2	1.7	0.38	6.2	2.9	0.23	-	2.7	0.18	6.4	3.9	0.13	6.4	3.9	0.16	5.7
9	26.2	2.9	0.28	6.1	4.3	0.19	-	3.9	0.17	6.1	4.3	0.14	6.1	4.8	0.13	5.6
10	22.4	3.8	0.33	5.8	3.6	0.18	-	3.3	0.21	5.9	5.3	0.14	6.1	5.4	0.12	5.9
11	10.7	5.8	1.20	5.8	4.0	0.44	-	3.1	0.41	5.8	6.0	0.33	6.0	6.0	0.33	5.8
12	11.1	7.3	1.60	5.9	6.1	1.00	-	5.6	0.95	6.0	7.2	0.81	6.4	6.3	0.65	5.4

注: (1) 7~ 10 月, 大桥在调压池中曝气, 大桥 DO 系曝气前的数据

3 数据分析

黄浦江上游引水输水渠道在输水过程中沿途每 2km 设有检查井, 通大气。另外经临江、严桥调压池可能提供复氧条件, 故输水渠道中发生复氧和耗氧作用。

3.1 硝化作用

在硝化菌和亚硝化菌的作用下水中氨氮和亚硝酸盐氮在有氧存在时转化成亚硝酸盐氮和硝酸盐

氮, 由于水中亚硝酸盐氮较之氨氮浓度极低, 这里只考虑氨氮的氧化, 其反应速率与水中  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度呈正比:

$$-\frac{dC_{\text{NH}_3}}{dt} = K_{\text{NH}_3} \cdot C_{\text{NH}_3} \text{ 或 } C_{(\text{NH}_3)_t} = C_{(\text{NH}_3)_0} \cdot e^{-K_{\text{NH}_3} \cdot t} \quad (1)$$

此处:  $C_{(\text{NH}_3)_t}$  —  $\text{NH}_3\text{-N}$  在 t 时的浓度 mg/L;  
 $C_{(\text{NH}_3)_0}$  —  $\text{NH}_3\text{-N}$  起始浓度 mg/L;

$K_{NH_3}$ —反应速率常数  $d^{-1}$ ;  
利用表 1 数据用(1)式可计算得 2002 年各月大

桥到各水厂渠道中  $NH_3-N$  的反应速率常数(见表 3)。

表 3  $K_{NH_3}$  及  $K_{COD_{Mn}}$  值计算表  $d^{-1}$

月份	水温 ℃	长桥	临江	南市	杨厂	长桥	临江	南市	杨厂
		$K_{NH_3}$				$K_{COD_{Mn}}$			
1	7.8	1.75	0.95	1.48	1.21	-	-	-	-
2	9.3	2.26	1.73	2.01	2.55	-	-	-	-
3	13.2	3.03	<b>1.86</b>	2.73	3.49	-	-	-	-
4	17.3	3.11	<b>1.80</b>	2.57	2.16	0.358	0.274	0.252	0.189
5	19.4	2.79	2.68	2.31	2.42	0.177	0.279	0.256	0.202
6	25.6	4.63	3.25	3.35	2.62	-	0.229	0.186	<b>0.420</b>
7	27.4	4.12	4.04	3.29	3.30	-	-	0.0713	0.229
8	28.2	<b>1.80</b>	<b>2.48</b>	<b>2.29</b>	<b>1.64</b>	-	-	-	0.158
9	26.2	<b>1.39</b>	<b>1.66</b>	<b>1.48</b>	<b>1.43</b>	-	-	-	0.161
10	22.4	2.17	1.50	1.83	1.91	-	-	-	-
11	15.7	<b>3.59</b>	<b>3.56</b>	<b>2.76</b>	<b>2.43</b>	-	-	-	-
12	11.1	1.68	1.73	1.45	1.69	-	-	-	0.167

注: (1) 按供水量  $380 \times 10^4 m^3/d$  时, 水在渠道中的停留时间  $t(d)$  计算, 若  $\times 1.08$  即为  $420 \times 10^4 m^3/d$  时  $K_{NH_3}$  值, 相差不大, 用表中  $K$  值即可。

(2) 黑体字部分数据不合理, 略去。

由于数据是 4 个水厂分别测定不可避免地存在实验室内和实验室之间的误差, 又由于从大桥到各厂水流过的渠道水力学条件如润周、水力半径等有所变化, 池壁的附着物有所差异, 影响  $K_{NH_3}$  的测定结果, 个别不合理数据(在表 3 中黑体字部分)不参加  $K_{NH_3}$  与水温的回归计算, 回归所得关系式见表 4。

表 4  $NH_3-N$  反应速率系数  $K_{NH_3}$  与水温  $T$  的关系式

输水渠道	关系式	相关系数 $r$	$r$ 理论值
大桥~长桥	$K_{NH_3} = 0.939 + 0.110T$	0.783	0.666 $n=9$
大桥~临江	$K_{NH_3} = 0.341 + 0.110T$	0.811	0.754 $n=7$
大桥~南市	$K_{NH_3} = 1.087 + 0.073T$	0.739	0.666 $n=9$
大桥~杨厂	$K_{NH_3} = 1.200 + 0.0592T$	0.692	0.666 $n=9$

计算所得相关系数均大于理论值, 说明前四关系式有显著性相关, 因此可用于输水渠道到各厂的水中  $NH_3-N$  的计算。文献(1)中报导的关系式有  $K_{NH_3}(T) = K_{NH_3}(20^\circ) \cdot 1.017^{(T-20)}$  及  $\log K_{NH_3} = 0.0255T - 0.492$  这里不做详细比较。

### 3.2 氧化作用

输水渠道中水的耗氧量有所降低, 可以视为水中的有机物在异养菌的作用下被氧化的结果。耗氧量的降低速率亦为一级反应可表达如下:

$$-\frac{dC_{COD_{Mn}}}{dt} = K_{COD_{Mn}} \cdot C_{COD_{Mn}}$$

$$C_{(COD_{Mn})_t} = C_{(COD_{Mn})_0} \cdot e^{-K_{COD_{Mn}}t} \quad (2)$$

此处:  $C_{(COD_{Mn})_0}$ ,  $C_{(COD_{Mn})_t}$  分别为起始及  $t$  时间后的  $COD_{Mn}$  值,  $K_{COD_{Mn}}$ —氧化作用速率常数  $d^{-1}$ 。

$COD_{Mn}$  降低速率大大低于  $K_{NH_3}$ , 又由于耗氧量

测定的误差一般说来较  $NH_3-N$  为大, 加之所测定水样非混合水样, 而是当日的单个水样, 因之测定值除杨厂外, 其余水厂  $COD_{Mn}$  有时等于或略大于大桥水的  $COD_{Mn}$  值(见表 2), 利用表 1  $t$  值, 表 3 列出计算获得的  $K_{COD_{Mn}}$  值, 所得不多的  $K_{COD_{Mn}}$  值与水温  $T$  难以获得相关关系, 仅可求得在水温为  $11.1 \sim 28.2^\circ C$  时的平均  $K_{COD_{Mn}}$  值(如表 5), 今后需作进一步研究。

表 5  $COD_{Mn}$  氧化速率  $K_{COD_{Mn}}$  ( $11.1 \sim 28.2^\circ C$ )

水厂	长桥	临江	南市	杨厂
$K_{COD_{Mn}} d^{-1}$	0.268	0.260	0.491	0.184

### 3.3 渠道中的复氧作用

渠道中的水流向各厂的过程中由于硝化作用、氧化作用以及其他物质可被氧氧化的作用, 使水中溶解氧  $DO$  不断降低, 另一方面水在流动中不断溶入空气中的氧, 使水中溶解氧  $DO$  又不断增加, 将表 2 中  $DO$  数值沿长桥、临江、南厂、杨厂按距离作联线, 可得一  $DO$  曲线; 曲线的中部下垂与一般受到点污染的河流  $DO$  下垂曲线相似。

渠道中的耗氧总量为:

$$Y = 4.57(NH_3-N)_0(1 - e^{-K_{NH_3}}) + C_{(COD_{Mn})_0}(1 - e^{-K_{COD_{Mn}}}) \quad (3)$$

空气中的氧通过自然曝气进入水中的量, 即复氧量为:

$$O = Y - (DO_0 - DO_t) \quad (4)$$

$DO_0$ ,  $DO_t$  分别为起始及  $t$  时间的  $DO$ 。

从表 2 实测数据可直接算出到达各水厂时自然曝气复氧量(如表 6)。

表 6 自然曝气复氧量

(mg/L)

大桥到水厂	5月 (19.4℃)				12月 (11.1℃)			
	长桥	临江	南市	杨厂	长桥	临江	南市	杨厂
(1) $C_{NH_3-N}$ 降低	0.45	0.46	0.55	0.60	0.60	0.65	0.79	0.95
耗氧	2.06	0.10	2.51	2.74	2.74	2.97	3.61	4.34
(2) $C_{COD_{Mn}}$ 降低	0.30	0.50	0.70	0.90	-	-	-	0.50
(3) $DO_0 - DO_t$	1.00	1.20	-0.90	-0.20	1.20	1.70	0.10	1.00
复氧量 (1) + (2) - (3)	1.36	1.40	4.10	3.84	1.54	1.27	3.51	3.84

19.4℃时的复氧量大于 11.1℃时的量,这是因为 19.4℃时各点的亏氧量较 11.1℃为大的缘故。再曝气涉及的问题较复杂另题研究。

### 3.4 大桥原水到达各厂 $NH_3-N$ 及 $COD_{Mn}$ 值预估

表 7 计算下游各水厂  $NH_3-N$  及  $COD_{Mn}$  值(供水量  $380 \times 10^4 m^3/d$ )

水厂 项目	$NH_3-N$					$COD_{Mn}$				
	大桥	长桥	临江	南市	杨厂	大桥	长桥	临江	南市	杨厂
$K d^{-1}$	-	2.79	2.68	2.31	3.65	-	0.268	0.260	0.191	0.184
t d	-	0.279	0.301	0.467	0.529	-	0.279	0.301	0.467	0.529
K t	-	0.778	0.807	1.079	1.28	-	0.0748	0.0783	0.0892	0.0973
e-Kt	-	1/2.177	1/2.241	1/2.938	1/3.596	-	1/1.0777	1/1.0814	1/1.0933	1/1.102
计算值 (mg/L)	2.0	0.92	0.89	0.68	0.55	7.0	6.50	6.47	6.40	6.35
	3.0	1.38	1.14	1.02	0.83	8.0	7.42	7.40	1.31	7.26
	4.0	1.83	1.78	1.36	1.12	9.0	8.35	8.32	8.23	8.16

比较表 2、表 7 数值可见就  $NH_3-N$  而言,  $NH_3-N$  不大于 2 mg/L 时到达各厂的  $NH_3-N$  一般小于 1mg/L, 尚可接受, 但当大桥  $NH_3-N$  大于 2 mg/L 甚至 3.0 时(如表 7 所示), 到达南市、杨厂的  $NH_3-N$  浓度可接受, 但到达长桥及临江的  $NH_3-N$  则高达 1.38 和 1.14mg/L。若大桥  $NH_3-N$  为 4.0mg/L 则长桥、临江、南市、杨厂分别为 1.83、1.78、1.36 mg/L 及 1.12mg/L 需预处理。

由于氧化 1mg/L  $NH_3-N$  需耗 DO 4.57 mg/L, 当大桥水中  $NH_3-N$  为 2~4 mg/L 时, 要达到表 7 所计算的到达各厂的水中的  $NH_3-N$  值, 必须保证水中有足够的 DO。为此需在沿渠道适当地点如临江、严桥等泵站进行曝气。

对于  $COD_{Mn}$  由于  $K_{COD_{Mn}}$  只有  $K_{NH_3}$  的 1/10 左右, 其衰减速度很慢, 需在水厂强化水处理工艺, 才能使出厂水的  $COD_{Mn}$  小于 3.0 mg/L。

## 4 讨论与结论

4.1 图 1 所示黄浦江上游引水渠道由大桥泵站调压池出来到各厂管渠较复杂, 本文在计算 K 值时对管渠做了简化, 即按 4 条从大桥直接输水到 4 个水厂的暗渠考虑, 两个 K 值的计算结果 4 个水厂虽有差异, 尚较接近。

4.2 一般河水中  $NH_3-N$  浓度不高, 硝化过程氨氮、亚硝酸盐氮衰减过程可以认为符合一级反应动力学<sup>[1]</sup> 如前(1)式所示, 根据美国水质污染研究所实

利用(1)、(2)式及表 1、表 3、表 4 的  $t$ 、 $K_{NH_3}$  及  $K_{COD_{Mn}}$  值, 可以预估到达各厂时水中的  $NH_3-N$  及  $COD_{Mn}$  值(见表 7)。

实验室试验所得  $K_{NH_3-N}$  与水中 DO 含量有一定关系, 但当 DO 浓度高于 3 mg/L 时  $K_{NH_3}$  基本不随 DO 含量变化。表 2 数据除个别情况外都符合 DO 大于 3.0 mg/L 的条件(大桥 7~10 月 DO 系曝气前测定值, 曝气后肯定大于 3.0mg/L)。当  $NH_3-N$  浓度较高时, 此时硝化反应符合零级反应动力学, 按文献(1)于  $NH_3-N$  10 mg/L 时仍按一级反应考虑,  $K_{NH_3}$  值一般河流测得为 0.10~0.50  $d^{-1}$ , 本文所测定值在 1.21~4.63  $d^{-1}$ , 说明输水渠道中的硝化作用较一般河流强烈, 与渠壁附着生物有关。

在考虑硝化反应时忽略了有机氮的脱氨基作用及亚硝酸盐的硝化作用, 在今后的研究予以考虑。

4.3 耗氧量  $COD_{Mn}$  的衰减是在 DO 存在的条件下异养菌作用的结果,  $COD_{Mn}$  的衰减量与生化需氧量 BOD 的衰减量所代表的有机物应是相同的有机物, 并且都以耗氧量表示, 两者在数值上应是相等的, 其衰减的速率亦应是属于一级动力学范畴, 即(2)式所示  $K_{COD_{Mn}}$  应为 BOD 衰减系数  $K_1$ , 某些河流的 18.1℃时  $K_1$  值为 0.161~0.358  $d^{-1}$  表 3  $K_{COD_{Mn}}$  值与之相近。

4.4 所获得的  $K_{NH_3}$  及  $K_{COD_{Mn}}$  值可用于沿渠道各厂进水的  $NH_3-N$  及  $COD_{Mn}$  的计算, 试验及计算证明在大桥原水  $NH_3-N$  不大于 2 mg/L 到达各厂的  $NH_3-N$  一般小于 1 mg/L, 但当大桥  $NH_3-N$  大于 2 mg/L 甚至 3mg/L 时, 到达南市及杨厂的  $NH_3-N$

## 景观水原位修复的生物激活剂研究

方一丰 黄光团 林逢凯 陆柱

(华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237)

**摘要** 由酵母膏、氨基酸和维生素等组成的生物激活剂,能刺激水体中土著微生物的生长和提高微生物的活性。配制模拟废水研究生物激活剂对微生物生长的刺激作用,在投加生物激活剂后,COD<sub>Cr</sub>、氨氮和磷等的去除都有显著的增加。还对实际景观水样的修复进行了实验研究,结果表明:投加生物激活剂的水样,与空白相比,COD<sub>Cr</sub>去除率增加了27.3%,溶解氧提升21.2%,浊度的去除率增加了23.6%,氨氮的去除率增加了11.5%。生物激活剂原位修复技术具有易于操作、成本低、无二次污染等优点,预期在住宅小区的人工湖、园林池塘等封闭或半封闭的景观水体修复方面,将具有良好的推广应用前景。

**关键词** 生物激活剂 土著微生物 原位生物修复

## Study on the Biostimulant for the In-situ Remediation of the Scenic Water

Fang Yifeng Huang Guangtuan Lin Fengkai Lu Zhu

(College of Resource & Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract** Biostimulant is composed of yeast extract, amino-acid, vitamin etc. The research was made to verify the great promotion to the vitality and growth of microorganism by biostimulant in simulated wastewater. After adding the biostimulant, the COD<sub>Cr</sub>, NH<sub>3</sub>-N and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P were removed effectively. In the pilot experiment, the test on bioremediation for wastewater was carried out by employing biostimulant. The result showed that compared with the control experiment, the removal rate of COD<sub>Cr</sub>, turbidity and NH<sub>3</sub>-N were increased 27.3%, 23.6%, 11.5% respectively, and the concentration of DO was also increased 21.2%, when 7mg/L of biostimulant was added. This in-situ remediation technology is easily manipulated, cost-efficient and without secondary pollution. It is also convinced that remediation has promising prospect in the field of bioremediation of polluted scenic waters, such as ponds & lakes in parks, man-made lakes in resident districts and other relatively close and semi-close waters.

**Keywords** biostimulant indigenous microorganism in-situ bioremediation

可接受,但到达长桥及临江的NH<sub>3</sub>-N则高达1.38和1.14mg/L,需在大桥有预处理,以去除一定量的NH<sub>3</sub>-N及COD<sub>Mn</sub>。渠道中COD<sub>Mn</sub>的衰减速率很低,需在水厂中适当解决。

4.5 为提高引水渠道中的生物氧化作用,建议在临江、严桥二泵站增加曝气设施以提高水中DO,从而提高NH<sub>3</sub>-N及COD<sub>Mn</sub>的去除效率。

感谢原水公司、上海市自来水市北公司、市南公司水厂化验室参

加了本试验研究。

### 参考文献

- 1 傅国伟. 河流水质数学模型及其模拟计算[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987年7月

收稿日期: 2005-4-14

第一作者简介: 陈国光,男,1950年出生,华东师范大学化学系毕业,现任国家城市供水水质监测网上海监测站常务副站长,实验室计量认证国家级评审员、教授级高级工程师。