

季节性缺氧水库铁、锰垂直分布规律及优化分层取水研究^{*}

徐毓荣¹ 徐钟际¹ 向 申² 胡其乐³ 封 珩¹ (1. 贵州省环境保护科学研究所, 贵阳 550002; 2. 贵州省冶金所; 3. 贵阳市来水公司)

摘要 经多年对阿哈水库 Fe、Mn 污染的研究表明, Fe、Mn 分布随着季节变化、水库水温分层而变化, 呈现明显的垂直分布规律, 高浓度 Fe、Mn 主要出现在水温分层期水库中、下层, 与库底缺氧、pH 下降、沉积物中的 Fe、Mn 向上覆水释放造成的二次污染等密切相关。为自来水厂优化分层取水提供了依据。

关键词 垂直分布; 水温分层; 季节性缺氧; 沉积物; 分层取水。

Vertical distribution of Fe and Mn and optimal pumping depth in a seasonal oxygen shortage reservoir

XU Yurong¹, XU Zhongji¹, XIANG Shen², HU Qile³, FENG Heng¹ (1. Guizhou Institute of Environmental Protection, Guiyang 550002; 2. Guizhou Institute of Metallurgical and Chemical Industry; 3. Water Company of Guiyang City)

Abstract Distribution of Fe and Mn along vertical profile in Aha Reservoir, a seasonal oxygen shortage water body with stratificated temperatures, was studied for evaluation of optimal pumping depth of a water supply plant. It was revealed that Fe and Mn distribution varies with different seasons and water states and show a typical vertical distribution. In summer and autumn, water of reservoir is stratificated. Upper stratum is in oxygen-enriched status, at which Fe and Mn concentrations are less than 0.3 mg/L and 0.1 mg/L respectively. The effect of oxygen shortage in middle and lower states of the water leads to release of Fe and Mn in deposit sediment to superjacent water. The effects of bioturbation as well as changes of hydraulic factors lead to acceleration for release of interstitial water to reservoir water through resuspended the suspended particle in deposit sediment. As a consequence, high concentrations of Fe and Mn in middle and lower strata of water are emerged. The concentrations of Fe and Mn pumped by a water plant is high since the pumping inlet is set in lower stratum of reservoir and would be reduced by moving the inlet to optimal stratum.

Keywords vertical distribution, stratification, water temperatures, oxygen shortage, pumping, Fe, Mn.

阿哈水库位于贵阳市西南郊 6 km 处(东经 106°39', 北纬 26°33')。流域面积 190 km², 正常水位 1108 m 时, 库容 0.445 亿 m³; 死水位 1090 m 时, 库容 270 万 m³, 是一个季节性缺氧人工湖泊。水库最深处可达 26 m, 是贵阳市的主要饮用水源地, 日供水量 23 万 t。分布在入库河流(游鱼河、白岩河、菜冲河)流域内的 4 个大煤矿和 261 个小煤窑, 排放的矿坑废水以及煤矸石

* 贵州省“八·五”攻关课题专题

等经雨水冲刷形成的面源废水,含有大量的悬浮物及 Fe、Mn 汇入水库,使水库受到严重污染,致使自来水厂取水水质 Fe、Mn 超过饮用水标准.对城市供水管网系统、人们生活、工业生产和城市建设可持续发展造成很大影响.因此,对水库 Fe、Mn 垂直分布规律研究,旨在为水厂寻找获得较好水质的取水方式提供依据.

1 实验部分

1.1 样点设置及采样

在距取水口约 500 m 的取水区域,向库中区方向呈 60°角设二条采样垂线,各垂线每隔 1 m 为取样点.于 1992 年在水温分层的夏秋季(7 月—10 月)及水温不分层的冬春季(1 月—4 月)进行取样分析,每月连续采样 2 天,以了解季节变化、水温分层对 pH、DO、Fe、Mn 垂直分布的影响.

1.2 分析方法

pH 值的测定采用玻璃电极法;DO 值的测定采用碘量法;Fe、Mn 值的测定采用原子吸收分光光度法^[1].

2 结果与讨论

2.1 分析结果

将水样分析数据按各季取算术平均值,结果见表 1.

表 1 阿哈水库 Fe、Mn 垂直分布状况

Table 1 Status of Fe、Mn vertical distribution in Aha Reservoir during summer, autumn, winter, spring

夏 季							秋 季						
水深, m	水温, °C	pH	DO		Fe, mg/L	Mn, mg/L	水深, m	水温, °C	pH	DO		Fe, mg/L	Mn, mg/L
			mg/L	饱和度, %						mg/L	饱和度, %		
1	25.0	7.92	9.00	>100	0.024	0.001	1	24.0	7.80	7.10	84.5	0.325	0.014
2	25.2	8.00	8.34	>100	0.008	0.001	2	22.0	7.85	6.70	76.7	0.299	0.058
3	25.0	8.04	8.30	>100	0.027	0.001	3	22.0	7.70	6.50	74.5	0.289	0.018
4	25.0	8.15	8.34	>100	0.049	0.001	4	22.0	7.81	6.35	72.7	0.280	0.031
5	23.0	7.63	4.65	54.3	0.094	-	5	22.0	7.76	6.65	75.7	0.268	0.016
6	21.5	7.48	4.05	46.1	0.026	-	6	21.0	7.54	4.56	51.1	0.483	0.495
7	21.0	7.47	4.06	45.6	0.010	0.001	7	21.0	6.91	4.55	51.1	0.748	0.303
8	20.0	7.43	4.46	49.1	0.061	-	8	21.0	7.47	5.00	58.2	0.297	0.343
9	20.0	7.47	4.36	48.0	0.039	-	9	21.0	7.65	5.10	57.3	0.261	0.045
10	19.5	7.42	3.96	42.1	0.022	0.006	10	20.0	6.85	5.15	56.7	0.345	0.193
11	18.0	7.46	3.37	35.7	0.023	0.0003	11	20.0	6.69	4.90	54.0	0.666	0.462
12	16.0	7.43	1.58	16.0	0.019	0.012	12	20.0	6.46	4.85	53.4	0.282	0.345
13	16.0	7.50	1.78	18.1	0.027	0.076	13	20.0	6.52	4.40	48.5	1.060	0.685
14	16.0	7.51	2.38	24.1	0.038	0.177	14	20.0	6.41	3.90	43.0	0.439	1.086
15	16.0	7.40	2.30	24.0	0.026	0.472	15	19.5	7.22	3.85	42.0	0.497	0.979
16	16.0	7.40	2.30	24.0	0.026	0.472	16	18.5	7.32	3.00	32.1	0.310	1.544

续表 1

冬 季							春 季						
水深, m	水温, °C	pH	DO		Fe, mg/L	Mn, mg/L	水深, m	水温, °C	pH	DO		Fe, mg/L	Mn, mg/L
			mg/L	饱和度, %						mg/L	饱和度, %		
1	12.0	8.22	8.92	82.8	<0.05	<0.01	1	12.0	8.20	8.92	82.8	<0.05	<0.01
2	12.0	8.21	8.82	81.9	<0.05	<0.01	2	12.0	8.20	8.90	82.6	<0.05	<0.01
3	12.2	8.21	9.14	85.3	<0.05	<0.01	3	12.0	8.22	9.10	84.5	<0.05	<0.01
4	12.2	8.14	9.03	84.2	<0.05	<0.01	4	12.4	8.10	9.05	84.8	<0.05	<0.01
5	12.2	8.10	8.82	82.3	<0.05	<0.01	5	12.4	8.14	8.82	82.6	<0.05	<0.01
6	12.4	8.13	8.82	82.6	<0.05	<0.01	6	12.5	8.13	8.82	82.8	<0.05	<0.01
7	12.4	8.13	9.35	87.6	<0.05	<0.01	7	12.4	8.13	8.85	82.9	<0.05	<0.01
8	12.2	8.10	9.28	85.6	<0.05	<0.01	8	12.2	8.13	9.14	86.3	<0.05	<0.01
9	12.2	8.11	8.71	81.2	<0.05	<0.01	9	12.4	8.15	9.14	85.6	<0.05	<0.01
10	12.5	8.10	8.38	78.7	<0.05	<0.01	10	12.6	8.11	8.40	79.1	<0.05	<0.01
11	12.2	8.10	8.71	81.2	<0.05	<0.01	11	12.6	8.10	8.71	82.0	<0.05	<0.01
12	12.4	8.11	9.09	85.2	<0.05	<0.01	12	12.6	8.06	8.98	84.5	<0.05	<0.01
13	12.4	8.06	9.03	84.6	<0.05	<0.01	13	12.8	8.09	9.03	85.4	<0.05	<0.01
14	12.4	8.06	8.82	82.6	<0.05	<0.01	14	12.8	8.10	9.07	85.7	<0.05	<0.01
15	12.4	8.13	8.82	82.6	<0.05	<0.01							

2.2 水温分层与 pH 溶解氧的变化关系

从表 1 看出,在夏季气温升高,水体呈现稳定分层状态,上层水温 1—4 m 为 25 °C,由于大气复氧及藻类的光合作用吸收 CO₂ 放出氧气,因此 DO、pH 较高,DO 为 9.00—8.34 mg/L、pH 7.92—8.15。温跃层 5—11 m 水温为 23—18 °C、DO 4.65—3.37 mg/L、pH 7.63—7.46,下层 12 m 以下水温为 16 °C,上下水体被温跃层分开而缺少对流运动,导致溶解氧无法穿过温跃层,原有的溶解氧被有机物分解,底栖生物和还原性污染物所消耗,使中下层水体缺氧呈现还原状态,DO 降至 1.58—2.38 mg/L。这时厌氧细菌活跃,有机物分解产生 CO₂,下部水体 pH 值逐渐下降,到夏末秋初,pH 由中性偏碱降至偏酸(pH 6.41)。秋末冬初表层水温随气温逐渐下降,库水形成对流,这种对流可到达底部,带去的溶解氧也能到达这一层,为中下部水体增加了溶解氧,使中下部水体逐渐转入氧化状态。随冬季向春季过渡,水体 pH 值逐渐回升,恢复到中性偏碱性水平,水体各项指标基本呈均匀分布状态。与库水对流运动相对应的是,库水的中下部水体一年四季周而复始地呈现出了氧化状态—还原状态。上层水体由于风的混合,大气复氧及浮游植物的光和作用,一年四季富氧且 pH 值较高。

2.3 水库铁、锰季节性垂直分布特征

表 1 表明,冬春季水温上、下层大致趋于等温状态时,库水溶解氧及 pH 高,这时整个水体处于氧化状态。在氧化环境条件下,Fe、Mn 处于高价态而形成难溶化合物,迁移能力很低,逐步沉积于库水底部,在沉积物与水界面附近沉淀^[2],并储积于沉积物表层,导致沉积物 Fe、Mn 含量的增高(Fe:166000 mg/kg、Mn:18800 mg/kg)。

冬季及初春由于水体富氧且水动力稳定,Fe、Mn 的氧化还原反应循环在沉积物内部完成,而不会向上覆水体释放,此时库水 Fe、Mn 上下层趋于一致,达 GB3838—88 地面水二类水

标准 (Fe 0.3 mg/L、Mn < 0.1 mg/L)。

在夏季及初秋,由于温跃层的形成,温跃层以下的水体逐渐因缺氧而呈现还原状态,这时沉积于库底沉积物中的高价态 Fe、Mn 还原为低价态而溶于水中,同时由于夏季暴雨使水库水力学变化引起沉积物表层微粒再悬浮,使沉积物间隙水中的 Fe、Mn 向上覆水释放,另外有机物腐烂产生的气泡、生物扰动悬浮物微粒,使其迁移能力增强,从而使库区中、下层 Fe、Mn 含量超过地面水二类水标准。但水面至温跃层顶部的水体由于风力搅动、大气复氧及藻类光合作用增氧,始终处于氧化状态,故 Fe、Mn 浓度仍低于地面水二类水标准。

3 阿哈水库取水区优化分层取水技术及实施

南郊水厂 1993 年前直接从阿哈水库底层以固定取水口方式取水,其进厂水质见表 2。

表 2 南郊水厂进水 Fe、Mn 浓度年均值

Table 2 Average Fe and Mn Concentrations in water take by Nanjiao water plant

	1986 年	1988 年	1989 年	1990 年	1991 年	GB3838—88 二类水
Fe, mg/L	0.123	0.358	0.256	0.573	0.40	0.3
Mn, mg/L	0.367	0.489	0.150	1.04	1.60	0.1

从表中看出,进厂水质年均值点源和面源均超过地面水二类水标准,要在短期内全面实施水库流域 Fe、Mn 的污染控制,在经济技术和实施上还存在相当大的困难。因此,为了能尽快改善进厂水质,在对阿哈水库 Fe、Mn 垂直分布规律研究的基础上,提出优化分层的取水技术,贵阳市政府已于 1993 年批准实施。

3.1 优化分层取水技术

根据上述研究可知,如果水厂采用传统的将取水口固定在水库底部的取水方式,当水温分层时,水厂所取到的是含高浓度 Fe、Mn 的下层水;当水温不分层时,库水下层 Fe、Mn 浓度虽达地面水二类水标准,但库底沉积物由于取水口高速水流的水力搅动作用,使沉积微粒再悬浮,间隙水中高浓度 Fe、Mn 向上覆水释放,水厂取到的仍是 Fe、Mn 浓度超标的水。优化分层取水则要解决:取水口固定在水库下层所碰到的水质问题;取水口随水位变化,在水温分层时,如何获得优质的上层水,在水温不分层时怎样获得 Fe、Mn 达标、藻类和悬浮物低的中上层水;有利于沉积于取水口周围的沉积物排出,以减少 Fe、Mn 向上覆水的释放总量。

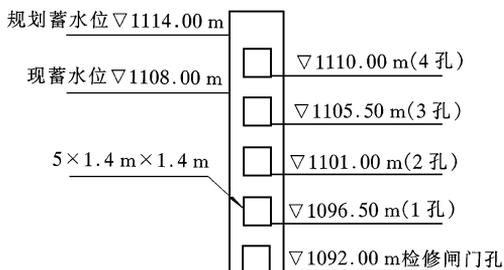


图 1 水库分层取水塔水孔的设置

Fig. 1 The layout of water in pumping tower at optimum depth

3.1.1 分层取水塔 分层取水塔水孔位置示意图见图 1。为取水库优质水,在高程 1096.5 m、1101.0 m、1105.5 m、1110.0 m 上设 4 个取水窗口,在 1092.0 m 高程设放水底孔,使库水能从底孔流入泄水隧洞,水位在 1110.0 m 下可由泄水隧洞泄洪,并将沉积于附近含高浓度 Fe、Mn 的淤泥排出。

3.1.2 分层取水塔优化取水分析 分层取水塔取水层位的水质状况,与取水塔的构造密切相关,也即是其取水孔的大小形状,取水孔的垂直分布,将决定取水层位及进厂的水质,为此对

设计的分层取水塔可能出现的取水层位进行预测分析.

(1) 分层取水塔取水范围计算

取水流量(见图 1):在单孔口全开时,采用下式^[3]:

$$Q = \mu A \sqrt{2gH}$$

Q ——取水口流量, m^3/s ; μ ——流量系数, 取 0.61; A ——取水口过流面积 ($1.4 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$);
 g ——重力加速度, 9.8 m/s^2 ; H ——取水口中心线以上水头.

$$\text{筒口吸出高度: } h_1 = \left(0.342 \frac{Q^2}{gB^2} \right)^{1/3}$$

h_1 ——取水口吸出高度, m ; Q ——取水口流量, m^3/s ; g ——重力加速度, 9.8 m/s^2 ; B ——取水口宽度, 为 1.4 m .

取水范围为:水位—— $H \pm h_1$.

根据 Fe、Mn 垂直分布,在夏、秋季库水中下层水质最差时,为使优化分层取水工程能保证获取较好水质的水,对在各级水位下取水孔运行程序进行了计算,计算结果见表 3.

表 3 优化取水塔取水程序表

Table 3 Pumping Proccs of Pumping fower at optimum depth

水位, m	1105.5 m 孔位				1101.0 m 孔位				1096.5 m 孔位			
	H , m	Q , m^3/s	h , m	取水范围, m	H , m	Q , m^3/s	h , m	取水范围, m	H , m	Q , m^3/s	h , m	取水范围, m
1108	1.8	7.1	0.96	1105.24—1107.24								
1107	0.8	4.73	0.74	1105.46—1106.94	开启此孔							
1106	关闭此孔				4.3	10.97	1.29	1100.41—1102.99				
1105					3.3	9.6	1.18	1100.52—1102.88				
1104					2.3	8.03	1.05	1100.65—1102.75				
1103					1.3	6.04	0.87	1100.83—1102.57	开启此孔			
1102					关闭此孔				4.8	11.6	1.34	1085.9—1088.54
1101									3.8	10.31	1.24	1096.0—1098.4
1100									2.8	8.85	1.12	1096.1—1083.3
1099									1.8	7.1	0.96	1096.24—1098.16
1098									0.8	4.73	0.74	1086.46—1097.94
1097									关闭此孔			

(2) 取水范围计算结果分析

从表 3 中看出,当水位在 1108—1107 m 间变化时,开启第三门,水位在 1106—1103 m 间变化时,关闭第三门,开启第二门,水位在 1101—1098 m 间变化时,关闭第二门,开启第一门,在上述水位以下 5 m 内,能保证取到优质水;而当水位在 1107—1106 m、1103—1101 m 间变化时,取水范围超过 5 m,也能取到较好水质,但是,这时既取了部分优质水,又取了部分水质稍差层位的水.

通过分析,采取分层取水塔式进行优化分层取水,将会使取水水质有所提高.

3.2 分层取水塔优化取水效果分析

分层取水塔于 1993 年底实施运转监控,将其水质与未实施分层取水前的水质进行比较(见表 4),从表中可看出,在未实施分层取水前,进厂水质 Fe 有 5 个月超标,最高超标倍数为 2.7 倍, Mn 最高超标倍数为 22.1 倍,除 5 月和 12 月未超标外,其它 10 个月都超标. 实施分层取水后,进厂水质大有好转, Fe 全年达饮用水标准, Mn 9 个月全部达饮用水标准,进厂水质的改善,效果是非常明显的. 7—9 月 Mn 超标或稍超标,主要是当时水位处于 1107—1106 m,开启 1101.0 m 孔位,所取水为优质水和稍差水的混合水所致,这可通过泄水隧洞适当泄洪,排出含高浓度 Fe、Mn 沉积物污泥,并控制水位在 1106m,从而获得优质水. 因此,把优化分层取水运行与泄洪排出含 Fe、Mn 沉积物的措施结合起来,进厂水质将进一步提高.

表 4 南郊水厂优化取水前后进厂水质比较

Table 4 Comparison of water quality pumped from different depth

月 份	1990 年进厂水质(底层取水)				1995 年进厂水质(优化取水)			
	Fe, mg/L	超标倍数	Mn, mg/L	超标倍数	Fe, mg/L	超标倍数	Mn, mg/L	超标倍数
1 月	0.03	达标	0.14	0.4	0.02	达标	0.01	达标
2 月	0.13	达标	0.23	1.3	0.02	达标	0.07	达标
3 月	0.12	达标	0.30	2.0	0.06	达标	0.06	达标
4 月	0.10	达标	0.25	2.5	0.02	达标	0.06	达标
5 月	0.09	达标	0.08	达标	0.04	达标	0.04	达标
6 月	0.15	达标	0.2	1.3	0.07	达标	0.03	达标
7 月	1.08	2.6	1.87	17.7	0.06	达标	0.90	8.0
8 月	0.66	1.2	2.00	19.0	0.05	达标	0.21	1.1
9 月	0.64	1.1	2.31	22.1	0.03	达标	0.15	0.5
10 月	0.87	2.0	0.43	3.3	0.02	达标	0.02	达标
11 月	1.10	2.7	0.31	2.1	0.22	达标	0.07	达标
12 月	0.05	达标	0.10	达标	0.04	达标	0.03	达标

4 结 语

1 阿哈水库夏秋季水温分层,上层富氧,其 Fe、Mn 浓度分别低于 0.3 mg/L、0.1 mg/L,中下层由于缺氧,致使沉积物 Fe、Mn 向上覆水释放,由于水力学的条件变化、生物扰动等因素,使沉积的悬浮微粒产生再悬浮,加速沉积物中的间隙水向库水释放,导致中下层 Fe、Mn 出现高浓度值. 水厂取水口固定在水库底层取水,必然使进厂水质含高浓度 Fe、Mn.

2 根据水库 Fe、Mn 垂直分布随季节变化规律,采取改变下层固定取水方式为优化分层取水,经工程实施证明,效果是显著的.

参 考 文 献

- 1 水和废水监测分析方法. 北京:中国环境科学出版社,1989
- 2 Forstner U, Wittman G T W. Metal pollution in the aquatic environment. West Germany:Spring press. 1988. 2
- 3 张书农. 环境水力学. 南京:河海大学出版社. 1988. 12

1997-12-02 收到原稿

1998-03-16 收到修改稿