

水温分层型水库铁、锰垂直分布特征^{*}

徐毓荣 徐钟际 徐 玮 向 申 封 珩

(贵州省环境保护科学研究所, 贵阳 550002)

提 要 贵阳市主要饮用水源地阿哈水库系水温分层型季节性缺氧水库, 由于沉积物含高浓度 Fe, Mn, 至使库水受到污染. 经多年测定不同季节 20m 深垂直水柱结果表明, 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 下降沉积物高浓度 Fe, Mn 释放造成的二次污染等密切相关, 从而为自来水厂实施优化分层取水和污染控制提供了依据.

关键词 水温分层 季节性缺氧 Fe Mn 垂直分布 沉积物

分类号 P343.3 X524

对水质受污染的湖泊水库如何恢复和保持其使用功能, 是国内外十分关注的问题. 目前, 国际上对水库受 Fe, Mn 污染及污染控制的研究很少有报导, W. 大卫森对英国罗瑟恩湖 Fe, Mn 循环自然含量水平进行了研究^[1], 而对因大规模煤矿开采引起的湖库 Fe, Mn 污染及如何恢复原有使用功能的研究尚未见报导. 笔者自 1991 年来对水库沉积物 Fe, Mn 释放造成二次污染^[2], 水库 Fe, Mn 污染控制水平进行了研究^[3], 为保持阿哈水库饮用水源功能, 对水库 Fe, Mn 垂直分布规律进行了探讨, 旨在为水厂寻求获得较好水质的取水方式提供依据.

1 环境背景

阿哈水库(106°39'E, 26°33'N)地处苗岭山脉中段, 贵州高原第二级台地面上, 位于贵阳市西南郊 6km 处, 建成于 1963 年, 其流域面积 190km², 正常水位 1108m 时库容 4.45 × 10⁷m³, 死水位 1090m 时; 库容 2.7 × 10⁶m³. 阿哈水库水面略成 NE 向的鸡爪状, 是一个季节性缺氧人工湖泊, 水库最深可达 26m, 是贵阳市的主要饮用水源地, 日供水量 2.3 × 10⁵t.

1.1 阿哈水库水温结构

1.1.1 水库水温判别模式^[4] 水温结构判别, 采用库水替换次数的 α 指标和 β 指标.

$$\alpha = \frac{\text{多年平均径流量}}{\text{水库总库容}} \begin{cases} \text{当 } \alpha < 10 \text{ 时, 水库水温为稳定分层型} \\ \text{当 } 10 \leq \alpha \leq 20 \text{ 时, 水库水温为过渡型} \\ \text{当 } \alpha > 20 \text{ 时, 水库水温为混合型} \end{cases}$$
$$\beta = \frac{\text{一次洪水总量}}{\text{水库总库容}} \begin{cases} \text{当 } \beta < 0.5 \text{ 时, 洪水对水温结构无影响} \\ \text{当 } 0.5 < \beta < 1.0 \text{ 时, 呈过渡阶段} \\ \text{当 } \beta > 1.0 \text{ 时, 洪水对水温结构有影响} \end{cases}$$

1.1.2 水温结构判别 阿哈水库多年平均流量 3.298m³·s⁻¹, 蓄水位 1108m 时, 库容 4.45 ×

* 贵州省科委“八五”攻关课题专题.

收稿日期: 1997-11-28; 收到修改稿日期: 1998-04-02. 徐毓荣, 男, 1945 年生, 副研究员.

10^7 m^3 , $\alpha = 2.34$, 所以阿哈水库水温结构为稳定分层型. 根据阿哈水库管理处提供具有代表性的 50 年一遇的一次洪水总量. 汛期洪量(7d)为 $376.6 \times 10^4 \text{ m}^3$, $\beta = 0.085 < 0.5$. 即使将上述洪量放大 4 倍, β 仍小于 0.5, 因此洪水对阿哈水库水温结构基本没有影响.

1.1.3 水库水温分层特征 由于阿哈水库水温结构属分层型, 春季升温期, 随着气温上升, 日照量增加, 使得水库表层变暖, 这种上层水温较下层高而引起的垂直方向的梯度, 使水体不易上下对流混合, 在夏季高温期尤为典型, 上层水温高达 25°C , 下层水温至 16°C . 随着秋季向秋末过度, 气温下降, 水表面温度也不断下降, 当上层水温低于下层, 上层水的密度大于下层时, 由此造成的不稳定状态引起秋季倒转, 破坏了分层状态. 阿哈水库冬季库水表层温度为 12°C 左右. 这期间上、中、下层水温基本处于等温状态, 这种情况持续到春初. 随着夏季的到来, 上层水温逐渐上升, 直至重新出现水温分层状态. 这样库水一年四季周而复始地形成夏、秋季水温分层, 秋末冬初水体翻转大对流, 冬季至初春库水温近似等温的阿哈水库特定的循环规律. 这种库水体的对流运动, 其重要意义在于为中、下层水体带来了溶解氧. 溶解氧的存在与否, 决定着水体的氧化还原特征及铁、锰的垂直分布规律.

2 实验及分析

2.1 样点设置采样时间、频率

在距取水口约 500m 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 1m 为取样点. 于 1992 年在水温分层的春秋季(7-10 月)及水温不分层的冬春季(1-4 月)进行取样分析, 每月连续采样两天, 以了解季节变化, 水温分层对 pH, DO, Fe, Mn 垂直分布的影响.

2.2 分析方法^[5]

pH 值、DO 值的测定采用常规分析方法, Fe, Mn 值的测定采用原子吸收法, Fe, Mn 的检出线分别为 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 标准偏差分别为 0.86% 和 0.85%.

2.3 取样分析结果

将水样分析数据按各季取算术平均值, 结果见表 1-表 4.

3 结果与讨论

3.1 水温分层与 pH 溶解氧的变化关系

从表 1、表 2 看出, 在夏季气温升高, 水体呈现稳定分层状态而缺少对流运动, 上层库水 1-4m 水温为 25°C , 库水由于大气复氧及藻类的光合作用吸收 CO_2 放出氧气, 因此 DO、pH 较高, DO 达 $9.00 - 8.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH $7.92 - 8.15$, 在 5-11m 温跃层, 水温逐渐下降至 $23 - 18^\circ\text{C}$, 由于有机物的分解耗氧, 大气复氧被上层稳定的温水层分隔, DO 下降至 $4.65 - 3.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随着水深的增加藻类数量减少, 光照强度减弱, 光合作用由强变弱乃至停止, 有机物分解产生的 CO_2 , 使水体 pH 逐渐下降, pH 降至 $7.47 - 7.42$. 在库水深 12m 以下水温 16°C 为冷水层, 上下层水体被温跃层分开, 导致溶解氧无法穿过, 原有的溶解氧被还原性污染物有机物分解和底栖的生物所消耗而使水体缺氧, 底部至中部水体逐渐因缺氧而呈现还原状态, DO 进一步降至 $2.38 - 1.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 这时厌氧细菌活跃, 有机物分解产生 CO_2 使部水体 pH 值逐渐下降, 到夏末秋初, pH 由弱碱性降至中性及偏酸(pH 6.41). 当秋末冬初气温逐渐下降, 库水形成对流状态, 这种对流可达底部, 带去的溶解氧及上层较高的 pH 值水也能到达这一层, 为中下部水体

增加了溶解氧,这时中下部水体逐渐转入氧化状态,冬季至春季,水体的 pH 值回升,恢复到中性偏碱性水平,水体各项物理化学指标基本呈均匀分布状态.值得注意的是,特定海拔高度、水面面积及水温只能增加相应的溶解氧量,因此,与库水运动相应的是,库水的中、下部水体一年四季周而复始地呈现出氧化 \leftrightarrow 还原状态.

表 1 阿哈水库夏季 Fe, Mn 垂直分布

Tab.1 Status of Fe, Mn vertical distribution in Aha Reservoir during summer

水深/m	水温/℃	pH	DO/mg·L ⁻¹	DO 饱和度/%	Fe/mg·L ⁻¹	Mn/mg·L ⁻¹
1	25.0	7.92	9.00	>100	<0.03	<0.01
2	25.2	8.00	8.34	>100	<0.03	<0.01
3	25.0	8.04	8.30	>100	<0.03	<0.01
4	25.0	8.15	8.34	>100	<0.03	<0.01
5	23.0	7.63	4.65	54.3	<0.03	<0.01
6	21.5	7.48	4.05	46.1	<0.03	<0.01
7	21.0	7.47	4.06	45.6	<0.03	<0.01
8	20.0	7.43	4.46	49.1	<0.03	<0.01
9	20.0	7.47	4.36	48.0	<0.03	<0.01
10	19.5	7.42	38.6	42.1	<0.03	<0.01
11	18.0	7.46	3.37	35.7	0.03	<0.01
12	16.0	7.43	1.58	16.0	0.03	<0.01
13	16.0	7.50	1.78	18.1	0.03	0.08
14	16.0	7.51	2.38	24.1	0.038	0.18
15	16.0	7.40	2.30	24.0	0.03	0.47

表 2 阿哈水库秋季 Fe, Mn 垂直分布

Tab.2 Status of Fe, Mn vertical distribution in Aha Reservoir during autumn

水深/m	水温/℃	pH	DO/mg·L ⁻¹	DO 饱和度/%	Fe/mg·L ⁻¹	Mn/mg·L ⁻¹
1	24.0	7.80	7.10	84.5	0.225	0.014
2	22.0	7.85	6.70	76.7	0.299	0.058
3	22.0	7.70	6.50	74.5	0.289	0.018
4	22.0	7.81	6.35	72.7	0.280	0.031
5	22.0	7.76	6.65	75.7	0.268	0.016
6	21.0	7.54	4.55	51.1	0.268	0.495
7	21.0	6.91	4.55	51.1	0.248	0.303
8	21.0	7.47	5.00	58.2	0.297	0.343
9	21.0	7.65	5.10	57.3	0.261	0.045
10	20.0	6.85	5.15	56.7	0.345	0.193
11	20.0	6.69	4.90	54.0	0.480	0.462
12	20.0	6.46	4.85	53.4	0.482	0.345
13	20.0	6.52	4.40	48.5	0.439	0.695
14	20.0	6.41	3.90	43.0	0.439	1.096
15	19.5	7.22	3.85	42.0	0.497	0.979

须强调的是,库水浅表层水体由于风等因素的影响,一年四季均存在混合作用而为浅表层水体增氧,浅表层浮游植物可通过光合作用吸收 CO₂ 使 pH 升高同时为水体增氧.在夏季由于温跃层的隔离作用,这些富含溶解氧高 pH 值的浅表层水仅局限在库水体上部,不会影响中下

部水体.

表 3 阿哈水库冬季 Fe, Mn 垂直分布状况

Tab.3 Status of Fe, Mn vertical distribution in Aha Reservoir during winter

水深/m	水温/℃	pH	DO/mg·L ⁻¹	DO 饱和度/%	Fe/mg·L ⁻¹	Mn/mg·L ⁻¹
1	12.0	8.22	8.92	82.8	<0.03	<0.01
2	12.0	8.21	8.82	81.9	<0.03	<0.01
3	12.2	8.21	9.14	85.3	<0.03	<0.01
4	12.2	8.14	9.03	84.2	<0.03	<0.01
5	12.2	8.10	8.82	82.3	<0.03	<0.01
6	12.4	8.13	8.82	82.6	<0.03	<0.01
7	12.4	8.13	9.35	87.6	<0.03	<0.01
8	12.2	8.10	9.28	85.6	<0.03	<0.01
9	12.2	8.11	8.71	81.2	<0.03	<0.01
10	12.5	8.10	8.38	78.7	<0.03	<0.01
11	12.2	8.10	8.71	81.2	<0.03	<0.01
12	12.4	8.11	9.09	85.2	<0.03	<0.01
13	12.4	8.06	9.03	84.6	<0.03	<0.01
14	12.4	8.06	8.82	82.6	<0.03	<0.01
15	12.4	8.13	8.82	82.6	<0.03	<0.01

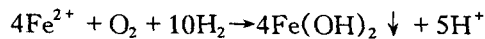
表 4 阿哈水库春季 Fe, Mn 垂直分布状况

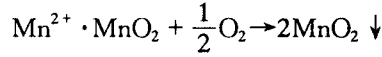
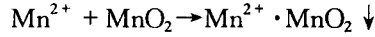
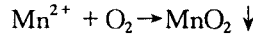
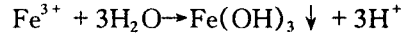
Tab.4 Status of Fe, Mn vertical distribution in Aha Reservoir during spring

水深/m	水温/℃	pH	DO/mg·L ⁻¹	DO 饱和度/%	Fe/mg·L ⁻¹	Mn/mg·L ⁻¹
1	12.0	8.20	8.92	82.8	<0.03	<0.01
2	12.0	8.20	8.90	82.6	<0.03	<0.01
3	12.0	8.22	9.10	84.5	<0.03	<0.01
4	12.4	8.10	9.05	84.8	<0.03	<0.01
5	12.4	8.14	8.82	82.6	<0.03	<0.01
6	12.5	8.13	8.82	82.8	<0.03	<0.01
7	12.4	8.13	8.85	82.9	<0.03	<0.01
8	12.2	8.13	9.14	85.3	<0.03	<0.01
9	12.4	8.15	9.14	85.6	<0.03	<0.01
10	12.6	8.11	8.40	79.1	<0.03	<0.01
11	12.6	8.10	8.71	82.0	<0.03	<0.01
12	12.6	8.06	8.98	84.5	<0.03	<0.01
13	12.8	8.09	9.03	85.4	<0.03	<0.01
14	12.8	8.10	9.07	85.7	<0.03	<0.01

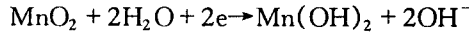
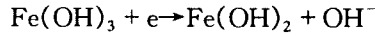
3.2 Fe, Mn 季节垂直分布特征

表 3、表 4 表明,冬春季水温上、下层大致趋于等温一致时,库水 DO 含量高, Fe, Mn 的垂直分布上、下也趋于一致,这时整个水体处于氧化状态,水体偏碱性,在氧化环境条件下, Fe, Mn 等变价金属元素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,并储积于沉积物表层,导致表层沉积物 Fe, Mn 含量的增高 (Fe166000mg·kg⁻¹, Mn18800mg·kg⁻¹),其反应式为^[6,7]:



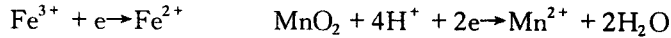


沉积物及间隙水中的 Fe, Mn 氧化还原反应随季节性溶解氧的变化而变化, 冬季及初春水体富氧, pH 值较高, 水体偏碱性, 水库水动力学稳定, Fe, Mn 的氧化还原反应循环在沉积物内部完成, 而不会向上覆水体释放, 其反应式为:



因此, 上下层水的 Fe, Mn 含量均未超过 GB3838-88《地面水质环境质量标准》中 II 类水标准, 也未超过 GB5749-85《生活饮用水卫生标准》。

在夏季至初秋, 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, 水体偏酸, 沉积物中的 Fe, Mn 的氧化还原反应在沉积物与界面水之间进行, 这时沉积物中的高价 Fe, Mn 被有机物还原为低价而溶于上覆水中, 其迁移能力很强:



释放过程从夏季开始, 与沉积物接触的界面水及底层水 Fe, Mn 浓度逐渐增高, 从而使库区中下层 Fe, Mn 含量超过地面水 II 类水标准. 到秋季水体翻转以前 Fe, Mn 释放扩散达到高峰, 中下层 Fe, Mn 浓度大大超过地面水 II 类水标准, 但水面至温跃层顶部的水体由于仍是处于氧化状态, 故 Fe, Mn 两元素的浓度很低, 基本不超标。

4 结论

(1) 阿哈水库 Fe, Mn 垂直分布随着季节变化, 水库水温分层而变化, 从冬季至初春, 库水垂直水温基本是等温状况, 库水为富氧高 pH 状态, 此时库水 Mn 浓度小于 $0.01\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Fe 小于 $0.05\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在夏秋季水库水温分层, 上层处于富氧状态, Mn 小于 $0.1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Fe 小于 $0.3\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 中下层则处于缺较低 pH 值状态, Fe 小于 $0.3\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Mn 则高达 $2.8\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这与沉积物中高浓度 Fe, Mn 的氧化还原、溶出密切相关。

(2) 根据 Fe, Mn 垂直分布特征, 可将水厂取水口固定于水库库底取水方式改为优化分层取水, 在冬春库水富氧, Fe, Mn 浓度很低, 此时可根据水位取上中层水; 在夏秋季水温分层, 中下层水 Fe, Mn 浓度超过地面水 II 类水标准, 此时可取距水面 5m 以内的上层水, 从而可获得符合饮用水标准的水质, 为水库污染控制提供依据。

参 考 文 献

- 1 水利部水资源司, 长江水利委员会. 水资源保护译文集, 1993
- 2 徐毓荣等. 阿哈水库沉积物中 Fe, Mn 的二次污染研究. 贵州环保科技, 1998, 4(1): 6-10
- 3 徐钟际, 徐毓荣等. 阿哈水库 Fe, Mn 污染控制水平研究. 贵州环保科技, 1998, 6(3): 9-12
- 4 水利水电工程水文计算规范(SDJ214-83)附录 5. 北京: 水利电力出版社, 1984
- 5 水利废水监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社, 1989

- 6 Forstner U, Wittman G T W. Metal Pollution in the Aquatic Environment. West Germany: Springer, 1988. 170 - 171
- 7 Angino E E Magnuson L M, Waugh T C. Mineralogy of suspended sediment and concentration of Fe Mn Ni Zn Cu and Pb in water and Fe Mn and Pb in suspended load of selected Kansas stream. *Water Res Res*, 1974, **10**:1187 - 1191

Characteristics of Fe, Mn Vertical Distribution in a Thermal Stratified Reservoir

XU Yurong XU Zhongji XU Wei XIANG Sheng FENG Heng

(*Environmental Protection Institute of Guizhou Province, Guiyang 550002*)

Abstract

Aha reservoir, 6 kilometers away from southwest Guiyang City, Guizhou Province, is major source for drinking water of Guiyang City. Normal stage of this reservoir is 1108.0 m; reservoir capacity 44.5 million m³; and the water depth 26m. The dead stage and reservoir capacity of dead water are 1090m and 2.7 million m³ respectively. As an artificial lake, seasonal oxygen shortage is one of vivid characteristics of Aha reservoir polluted by waste water containing Fe, Mn from coal mine. Results from years measuring of vertical water column of 20m depth in different seasons show that Fe and Mn distributions vary with different seasons and different temperature strata of water, and the vertical water temperature is in isothermal status from winter to earlier stage of spring, during which concentration of Mn and Fe in water is less than 0.01 mg·L⁻¹ and 0.05 mg·L⁻¹ respectively. During summer and autumn, reservoir will be stratified according to different temperatures. Upper stratum is in oxygen rich status, with Mn and Fe concentration of less than 0.1 mg·L⁻¹ and 0.3 mg·L⁻¹ respectively, and the middle and lower strata are in status of low pH, oxygen shortage or lower oxygen, at which, Fe concentration is more than 0.3 mg·L⁻¹ while Mn concentration is as high as 1.086 mg·L⁻¹, which is identified to be closely relevant to oxidation and reduction reaction of high concentration of Fe(166000 mg·L⁻¹) and Mn(18800 mg·L⁻¹) contained in the reservoir sediment. The study provides a guideline of pumping at the optimum depth according to the optimum quality of water for water plant.

Key Words Fe, Mn, vertical distribution, thermal stratification, seasonal oxygen shortage, sediment