

doi:10.11835/j.jssn.1000-582X.2013.08.006

重庆主城区水源水质特征综合评价及聚类分期分析

向平¹, 张智¹, 张南²

(1. 重庆大学 a. 城市建设与环境工程学院; b. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045;
2. 重庆中法供水有限公司, 重庆 400021)

摘要:对三峡库区内长江、嘉陵江(重庆主城段)近年来水源水质研究发现,两江水源 pH 值偏高,高锰酸钾指数(COD_{Mn})值多数时期超过 4.5 mg/L,小分子量的溶解性有机物(DOM)比重较大,且在夏季洪水高浊期,有机物污染较严重。采用模糊加权水质质量系数法和系统聚类法对两江原水水质进行了综合评价和水质聚类分期,在研究期内,长江原水水质按类别分为夏季高浊污染期、春秋中温微污染期、冬季低温微污染期;嘉陵江原水水质按类别分为低浊水质期、初春高藻水污染期、夏季高浊污染期。两江水源在不同时期水源水质差别较大,属于难以通过常规处理达到《生活饮用水水质标准》(GB 5749-2006)水质要求的水体,因此应对不同时期重庆主城段的水源进行适宜的强化处理研究。

关键词:三峡库区;水质;聚类分析;分子量;有机物

中图分类号:X824

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2013)08-033-07

The water quality comprehensive evaluation and cluster analysis on drinking source water in Chongqing

XIANG Ping¹, ZHANG Zhi¹, ZHANG Nan²

(1a. Faculty of Urban Construction & Environmental Engineering,
Chongqing University, Chongqing 400045, China;

b. Key laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-environments, Ministry of Education;
2. Chongqing Sino French Water Supply Co., Ltd., Chongqing 400021, China)

Abstract: Recent researches on the Yangtze River and the Jialing River water in Chongqing section of the Three Gorges Reservoir indicate that the pH value is relatively high and the COD_{Mn} concentration is more than 4.5 mg/L in most of the time. Especially the proportion of dissolved molecule organic is high, as well as the high turbidity during the summer flood period. And the organic contamination is relatively serious. The fuzzy weighted water quality coefficient and hierarchical cluster analysis methods are applied to evaluate and sort the characteristic qualities of two-river water sources. During the research period, the results show that the Yangtze River water source quality is characterized by high turbidity and polluted of summer stage, middle temperature and micro-polluted of spring-autumn stage and low temperature and micro-polluted of winter stage. The Jialing River water source quality is characterized by low turbidity stage, high alga-polluted of early spring stage and high temperature and polluted of winter stage. Due to the various water qualities of two-river water sources at different periods, it is hard to meet the requirement

收稿日期:2013-03-12

基金项目:中共高校基本科研业务费资助项目(106112012CDJR210013)

作者简介:向平(1973-),女,重庆大学博士,主要从事给水处理理论及技术研究,(E-mail)xiangping74@cqu.edu.cn.

of Standards for Drinking Water Quality (GB 5749-2006) by using traditional water treatment technologies. So the research on enhanced treatment is necessary.

Key words: the Three Gorges Reservoir; water quality; cluster analysis; molecular weight; organic matter

重庆主城区位于三峡库区,以长江和嘉陵江为主要饮用水水源,水厂以常规处理工艺为主。《生活饮用水水质标准》(GB 5749—2006)于 2012 年 7 月 1 日全面实施,净水厂的处理工艺采取何种措施满足新的水质标准要求,这与原水水质状况紧密相关。因此有必要对重庆市两江水源的原水水质特征及变化情况进行系统地分析和评价,为净水厂的工艺改进提供必要的资料数据。

目前水质评价方法广泛采用综合评价方法和系统聚类法。综合评价方法分为模糊数学评价法、物元分析法、灰色关联法和人工神经网络法等。模糊数学评价法、物元分析法和灰色关联法都注意了水质的不确定性和水质等级界限的模糊性^[1],但上述 3 种方法权重的确定都有一定的人为因素。人工神经网络具有自适应性和自学习性,能通过水质标准本身的特点进行学习,从而产生连接权值矩阵和阈值矩阵,它的结果比人为确定权值的评价方法更客观,但需要的样本量较大^[2]。

由于环境水质涉及多个指标,而各个指标在不同的地区或时间又有不同的变量,系统聚类分析法目前在环境水质评价及水质时空分布的分析评价也有较多的应用,Reghunath、Lambrakis 等采用 R 型分类和 Q 型分类对地下水的流动和水质变化特性做了研究^[3-4],Astel 等采用欧式距离聚类分析方法对 7 年间 12 个地区饮用水中的氯、溴等消毒副产物的时空变化进行了研究^[5],Homa 等采用系统聚类法对 Jajrood 河水水质影响因素进行了研究^[6],任泽等采用欧式聚类法对洱河流域水质空间变化特征进行了研究^[7],周丰等利用系统聚类法等对香港东部近海水质时空分布模式进行了研究^[8]。

上述方法各有特点,都有较充分的理论依据,笔者采用模糊加权的水质质量系数法,评价过程中注重权值的合理性选定,对重庆市长江、嘉陵江水源水质进行综合评价。同时采用欧式系统聚类法对两江水质进行聚类分期,可为两江水质分期分类处理提供科学依据。

1 水源水质特性分析

1.1 浊度变化及特征

根据水利部长江水利委员会历年的《长江泥沙公报》数据,长江以寸滩为观测站、嘉陵江以北碛为观测站,以这 2 个观测站的监测值为代表分析整理主城区长江、嘉陵江段的含沙量变化和中值粒径变化,如图 1 所示。

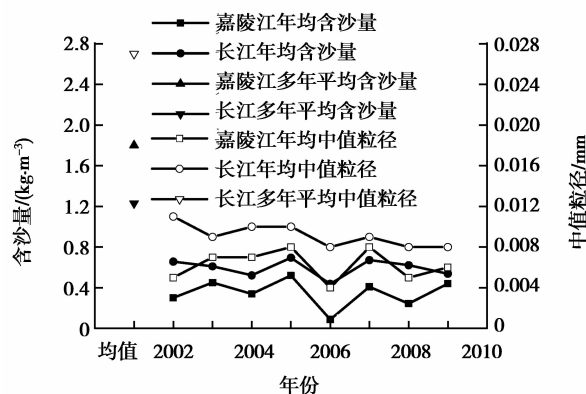


图 1 长江、嘉陵江重庆主城区河段含沙量和中值粒径变化

嘉陵江重庆主城段含沙量多年(1956—2000年)平均值为 1.8 kg/m^3 ;长江重庆主城段含沙量的多年(1950—2000年)平均值为 1.23 kg/m^3 ,中值粒径的多年(1955—2000年)平均值为 0.027 mm 。而 2002—2009 年,嘉陵江重庆主城段年平均含沙量变化范围为 $0.089 \sim 0.521 \text{ kg/m}^3$,平均值为 0.35 kg/m^3 ;年平均中值粒径变化范围为 $0.004 \sim 0.008 \text{ mm}$,平均值为 0.006 mm 。长江重庆主城段的年平均含沙量变化范围为 $0.438 \sim 0.696 \text{ kg/m}^3$,平均值为 0.59 kg/m^3 ;年平均中值粒径变化范围为 $0.008 \sim 0.011 \text{ mm}$,平均值为 0.009 mm 。因此从 2002—2009 年的监测数据可看出,在该时段内无论是年平均含沙量还是年均中值粒径变化范围都不大,但均大大低于该监测段面的多年平均值。出现此种现象与长江及嘉陵江上游梯级水库的修建,拦截了大量的泥沙是分不开的。

2007—2011 年,以长江、嘉陵江为水源的主城区 2 个水厂的原水水质数据分析整理其浊度变化如图 2、3 所示。

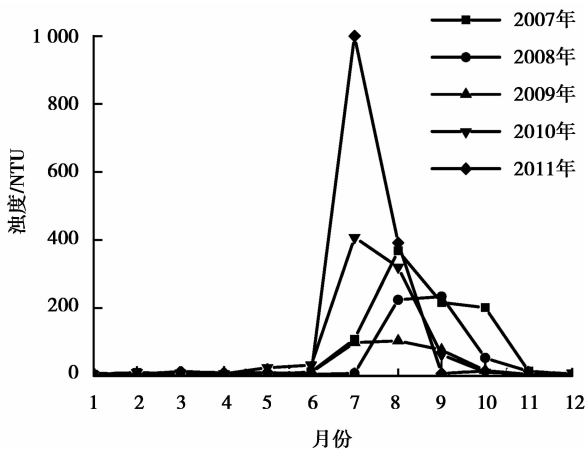


图2 嘉陵江水源水浊度变化

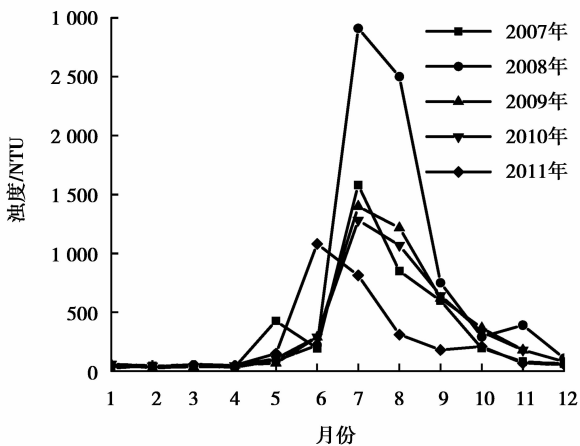


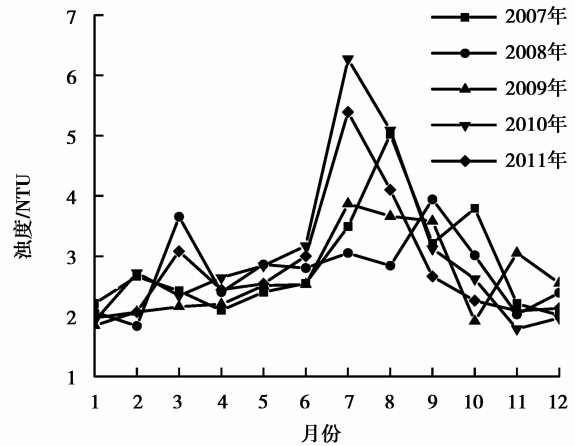
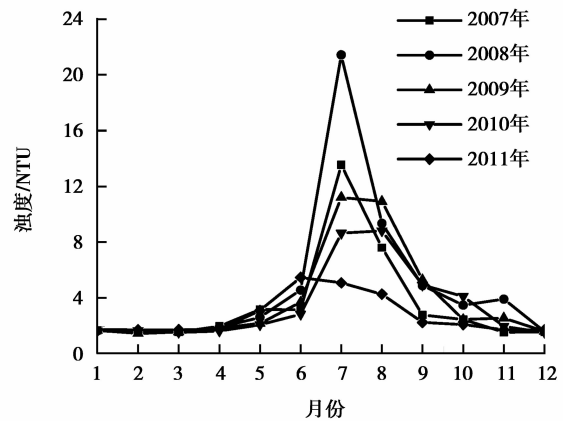
图3 长江水源水浊度变化

在监测年份内,嘉陵江水源的浊度平均值为63 NTU,月均浊度最大值为1 000 NTU,最小为1.88 NTU。长江水源的浊度平均值为383 NTU,月均浊度最大值为2 910 NTU,最小为26 NTU。在测试期间嘉陵江、长江在夏季洪水期浊度均会达到5 000 NTU以上。相比全年浊度较高的月份在夏季7、8月份,浊度值一般会在200 NTU以上,洪水期甚至会出现超过数千 NTU 的高浊水,其他月份浊度均较低。总体来看,长江水源浊度高于嘉陵江水源。

从上述含沙量、中值粒径以及浊度的数据表明,长江、嘉陵江水源相比往年含沙量减少,中值粒径偏低,而浊度的变化呈现出明显的季节特征,在秋冬季,两江水源的浊度都偏低,具有常规混凝差、沉淀困难的特点;而在夏季洪水期两江水源浊度均较高,会出现数千 NTU 的高浊水,这也给常规处理带来较大影响。

1.2 耗氧量变化及特征

新国标中规定水厂出水高锰酸盐指数(COD_{Mn})小于3.0 mg/L,而常规水处理工艺对于 COD_{Mn} 的去除是有限的,因此有必要考察和评价原水中的 COD_{Mn} ,以确定处理工艺的选择。图4、图5为2007—2011年主城区以长江、嘉陵江为水源的2个水厂的原水耗氧量变化。

图4 嘉陵江水源水 COD_{Mn} 变化图5 长江水源水 COD_{Mn} 变化

在检测期内,除夏季外嘉陵江和长江水源的月均 COD_{Mn} 一般在2~4 mg/L和1~5 mg/L之间变化,每年7、8月份 COD_{Mn} 较高,尤其长江在2007、2008、2009年7、8月份检测的 COD_{Mn} 均达到了10 mg/L以上的较高值。7、8月份 COD_{Mn} 值偏高,与夏季洪水期上游来水携带大量有机物有关。普遍认为 COD_{Mn} 值超过4.5 mg/L,采用常规处理工艺,出水水质就很难达到新国标要求^[9]。

1.3 pH值、水温变化及特征

越来越多的研究表明,pH值和水温是水处理过程中影响混凝效果的重要因素,测得重庆主城段两江水源的pH值、水温变化如图6所示。

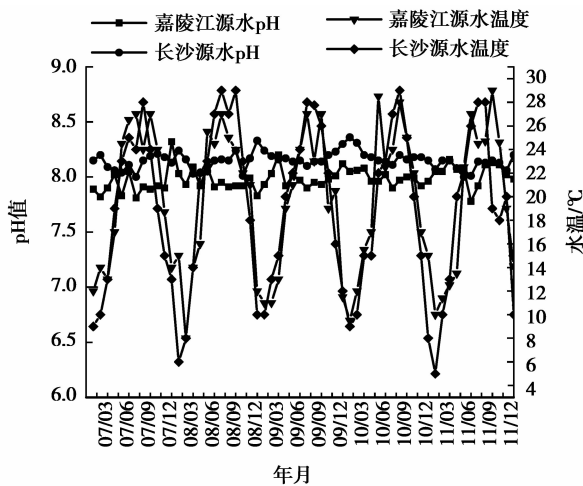


图6 长江、嘉陵江水源水pH值和温度变化

可以看出两江水源pH值偏高,均在8左右,且长江水源的pH值高于嘉陵江。水温呈现明显的季节变化,1年中的水温在5~29℃变化,冬季水温约在10℃左右变化,夏季水温均在20℃以上。

1.4 分子量分析

2012年2月采用膜滤法^[10]对重庆主城区长江、嘉陵江原水中有有机物分子量分析结果如图7所示。

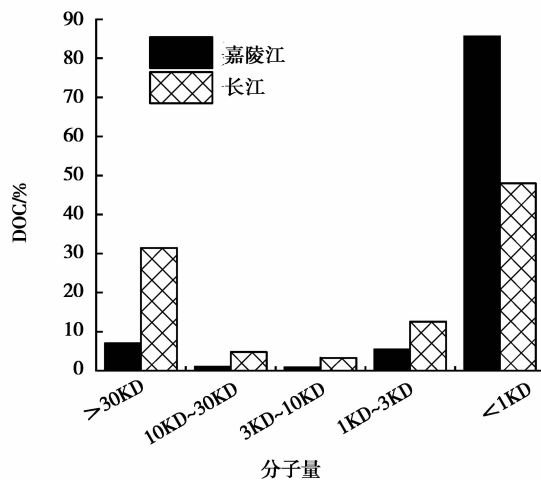


图7 长江、嘉陵江水体中不同分子量

1.5 有机物的DOC比例

从图7可看出,长江、嘉陵江水源中小于1kD

的有机物分别占总溶解性有机物48%和86%;而大于10kD的有机物占总溶解性有机物36%和8%。即长江、嘉陵江水源中小分子有机物含量均高于大分子有机物,且嘉陵江水源中小分子有机物占原水中溶解性有机物(DOM)半数以上。一般认为天然水体中DOM是微污染物的潜在载体,也是消毒副产物的主要前体物,水中小分子量的DOM难以通过常规混凝有效去除^[11]。

2 水源水质综合评价

2.1 模糊加权水质质量系数法

模糊综合评价系数FP表示水体中各种污染物的综合污染程度,计算公式为

$$FP = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{oi}} W_i, \quad (1)$$

式中: C_i 为各种污染物的实测含量; C_{oi} 为水源规定的各种污染物的最高允许值。Ⅱ类水体经过常规处理可以到达新国标饮用水水质要求,因此 C_{oi} 取值以Ⅱ类水水质指标为参考,同时考虑重庆两江水源的实际情况,总大肠菌群的指标值以Ⅲ类指标为参考。 W_i 为*i*要素的权重,FP为污染等级,FP值与污染等级的关系^[12]如下:

$$\left. \begin{aligned} &FP \leq 0.1 \\ &0.1 < FP \leq 0.2, \text{水体微污染} \\ &0.2 < FP \leq 0.5, \text{水体轻污染} \\ &0.5 < FP \leq 1, \text{水体中污染} \\ &1 < FP \leq 5, \text{水体重污染} \\ &FP > 5, \text{水体严重污染} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

采用层次分析法确定权重,确定权重的步骤如下。

1)评价因素集 $R, R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 。根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的指标限值和重庆市长江、嘉陵江的原水特征,选择综合评价的指标有8个,分别为氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、 COD_{Mn} 、铁(Fe)、总大肠菌群、锰(Mn)、总氮(TP)、氯化物(Cl^-)、硝酸盐(NO_3^-),初步拟定评价因素集 r 。 $r = \{\text{NH}_3\text{-N}, \text{COD}_{\text{Mn}}, \text{Fe}, \text{总大肠菌群}, \text{Mn}, \text{TP}, \text{Cl}^-, \text{NO}_3^-\}$

2)判断矩阵 P 。

$$P = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

有 $r_{ij} = \frac{1}{r_{ji}}$,且:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{若 } r_i \text{ 与 } r_j \text{ 同等重要;} \\ 3, & \text{若 } r_i \text{ 与 } r_j \text{ 稍微重要;} \\ 5, & \text{若 } r_i \text{ 与 } r_j \text{ 明显重要;} \\ 7, & \text{若 } r_i \text{ 与 } r_j \text{ 非常重要;} \\ 9, & \text{若 } r_i \text{ 与 } r_j \text{ 极端重要;} \end{cases} \quad (4)$$

研究水质评价的目的主要是为后续强化处理的需求提供参考。根据在水处理过程中各个水质参数对水处理影响的重要性的经验判断,认为重要性从大到小共分为 5 组,其顺序为:高锰酸盐指数;总大肠菌群;氨氮、总氮、硝酸盐;铁、锰;氯化物。因此判断矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0.2 & 3 & 0.3 & 3 & 1 & 5 & 1 \\ 5 & 1 & 7 & 3 & 7 & 5 & 9 & 5 \\ 0.3 & 0.14 & 1 & 0.2 & 1 & 0.3 & 3 & 0.3 \\ 3 & 0.3 & 5 & 1 & 5 & 3 & 7 & 3 \\ 0.3 & 0.14 & 1 & 0.2 & 1 & 0.3 & 3 & 0.3 \\ 1 & 0.2 & 3 & 0.3 & 3 & 1 & 5 & 1 \\ 0.2 & 0.11 & 0.3 & 0.14 & 0.3 & 0.2 & 1 & 0.2 \\ 1 & 0.2 & 3 & 0.3 & 3 & 1 & 5 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3) 权重计算。求出上述判断矩阵 P 的最大特征根对应的特征向量 W , $W = (W_1, W_2, W_3, \dots, W_n)^T$, W 的各分量为因素集中,各因素的权重分配为

$$W_i = \frac{\sqrt{\prod_{j=1}^n r_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\prod_{j=1}^n r_{ij}}} \quad (6)$$

一致性检验,求判断矩阵 P 的最大特征根 λ_{\max}

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(PW)_i}{W_i} \quad (7)$$

检验值 CR , $CR = \frac{CI}{RI}$, 其中

$$CI = \frac{1}{n-1} (\lambda_{\max} - n), \quad (8)$$

RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标,其取值见文献[13],确定值见表 1。

表 1 平均随机一致性指标

n	RI	n	RI
1	0	6	1.24
2	0	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12	—	—

若 $CR < 0.10$, 则认为判断矩阵有满意的一致性,权重的分配是合理的,否则调整判断矩阵,直至取得满意的一致性为止。

采用 2010 年长江、嘉陵江水厂原水水质数据,进行上述分析评价,计算工具采用 Matlab7.1。计算结果见表 2,并且 $CR = 0.017 < 0.1$, 认为判断矩阵具有满意的一致性,权重分配合理。

2.2 评价结果分析

《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)要求地表水Ⅲ类及以上水质可作为饮用水水源,但大量研究表明,仅有Ⅰ、Ⅱ类水质通过常规处理可达到饮用水水质的新国标要求^[9,14]。因此研究以Ⅱ类水体的水质标准作为非常规处理的参考分界线,即当 FP 大于 0.1 就表明水中各种污染物的总和已超过拟定的常规处理对应的水体综合指标要求,从评价结果显示重庆主城区两江原水在 1 年中的各月份 FP 均大于 0.1,表明采用常规处理方式不能到达新国标要求,所以应根据两江水质实际情况采用相应的处理工艺。结果表明,在污染不太严重时,强化常规处理无疑是一种较经济适用的水处理工艺^[15-16]。

表 2 长江、嘉陵江(重庆主城段)原水 FP 值

月份	长江	嘉陵江	月份	长江	嘉陵江
1	1.401	0.407	7	2.902	2.987
2	1.179	0.491	8	2.739	2.984
3	1.349	0.508	9	1.740	1.250
4	1.525	0.530	10	1.742	0.813
5	1.746	0.638	11	1.397	0.401
6	1.716	0.743	12	1.385	1.095

3 水源水质聚类分期

3.1 系统聚类法

系统聚类法主要步骤有:

1) 建立数据矩阵 $[x_{ij}]_{n \times p}$, 表示为 n 个样本数,每个样本有 p 个测量指标, x_{ij} 表示第 i 个样本的第 j 个指标值; n 个样本表示 n 类。

2) 计算样本 $i(i \geq 1)$ 和样本 $j(j \leq n)$ 之间的距离 d_{ij} , 其值计算选用欧式距离:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{t=1}^p (x_{it} - x_{jt})^2} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

3)按 Ward 法,合并使整个类内离差平方和增加最小的两类为一新类。

4)若合并后类的个数等于1,转到第5步,否则计算新类与当前各类的距离并回到第3步,选最短距离法作为聚类方法。

5)画出聚类谱系图。

6)根据聚类谱系图的形状与实际问题要求,合理确定分类数目并分析。

3.2 系统聚类期结果分析

选用对常规处理效果影响较显著的水质指标: $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 、溶解氧、TP、浊度、总氮(TN)、温度和总藻数,采用2011年长江水厂、2011年嘉陵江水厂原水水质数据,建立分析样本,进行系统聚类分析,计算工具采用 Matlab 7.10对重庆主城区嘉陵江、长江原水聚类分析结果如图8、图9所示。

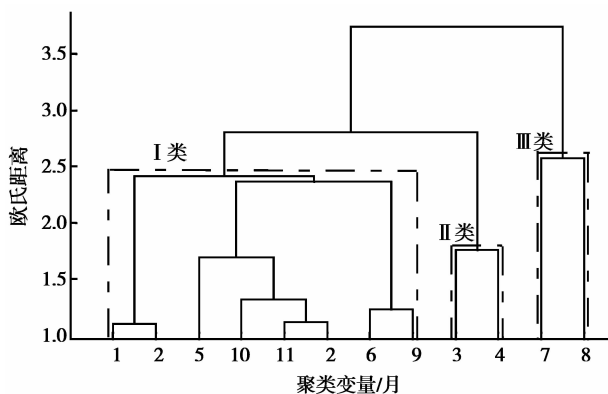


图8 嘉陵江原水水质聚类分期结果

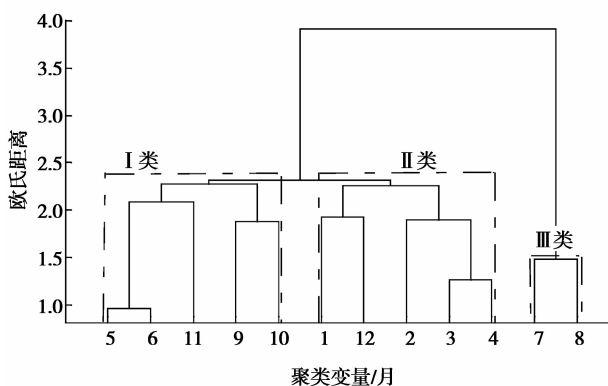


图9 长江原水水质聚类分期结果

从分析结果可看出,嘉陵江原水水质按类别分为3类,分别是1、2、5、10、11、12、6、9月份为第1类;3、4月份为第2类;7、8月份为第3类。从分

类区间中水质和季节的特点可分为低浊水水质期、初春高藻水污染期、夏季高浊污染期。长江原水水质按类别分为3类,分别是5、6、11、9、10月份为第1类;1、12、2、3、4月份为第2类;7、8月份为第3类。从分类区间中水质和季节的特点可分为春秋中温微污染期、冬季低温低浊期、夏季高浊污染期。

4 结论

1)三峡库区长江、嘉陵江(重庆主城段)的水源水质具有高pH值、高硬度的特征,水源水质随季节变化明显,在夏季洪水期,浊度显著升高,同时 COD_{Mn} 、等指标也显著升高,表现出较严重的有机物污染特征,初春季节有机物物理分级显示,初春两江水源中的有机物以小分子物质为主。

2)采用模糊加权水质质量系数法对2010年长江、嘉陵江(重庆主城段)原水水质进行综合评价显示,两江水体属于难以通过常规处理达到新国标要求的水体;水质聚类分期研究表明2011年长江(重庆主城段)水源分为夏季高浊污染期、春秋中温微污染期、冬季低温微污染期;嘉陵江(重庆主城段)水源分为低浊水质期、初春高藻水污染期、夏季高浊污染期。

3)三峡库区内重庆主城区两江水源难以通过常规处理达到新国标水质要求,而且在不同时期水源水质差别较大,因此有必要对不同时期重庆主城段的水源开展强化处理的试验研究。

参考文献:

- [1] 张军, 梁川. 基于灰色关联系数矩阵的 TOPSIS 模型在水环境质量评价中的应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(4): 97-101.
ZHANG Jun, LIAN Chuan. Application of TOPSIS model based on gray correlation coefficient matrix in the evaluation of water environmental quality[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(4): 97-101.
- [2] 张成燕, 徐望, 赵冬冬, 等. 基于神经网络的水厂原水水质的综合评价[J]. 冶金分析, 2008, 28(5): 44-47.
ZHANG Chengyan, XU Wang, ZHAO Dongdong, et al. Comprehensive assessment of quality of raw water from water factory based on neural network model[J]. Metallurgical Analysis, 2008, 28(5): 44-47.
- [3] Reghunath R, Murthy T R S, Raghavan B R. The utility of multivariate statistical techniques in

- hydrogeochemical studies: An example from Karnataka, India [J]. *Water Research*, 2002, 36(10):2437-2442.
- [4] Lambrakis N, Antonakos A, Panagopoulos G. The use of multicomponent statistical analysis in hydrogeological environmental research [J]. *Water Research*, 2004, 38(7):1862-1872.
- [5] Astel A, Biziukb M, Przyjaznyc A, et al. Chemometrics in monitoring spatial and temporal variations in drinking water quality [J]. *Water Research*, 2006, 40(8):1706-1716.
- [6] Razmkhah H, Abrishamchi A, Torkian A. Evaluation of spatial and temporal variation in water quality by pattern recognition techniques: A case study on Jajrood River (Tehran, Iran) [J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(4):852-860.
- [7] 任泽, 杨顺益, 汪兴中, 等. 洱海流域水质时空变化特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(4): 14-20.
REN Ze, YANG Shunyi, WANG Xingzhong, et al. Spatial and temporal variation of water quality of Erhai basin[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(4):14-20.
- [7] 周丰, 郝泽嘉, 郭怀成. 香港东部近海水质时空分布模式[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(9):1517-1524.
ZHOU Feng, HAO Zejia, GUO Huaicheng. Temporal and spatial distribution patterns of marine water quality in Eastern Hong Kong[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(9):1517-1524.
- [9] 刘文君, 王占生. 积极推动我国给水深度处理技术的研究和应用[J]. *给水排水*, 2009, 35(3):1-3.
- LIU Wenjun, WANG Zhansheng. Actively promote the research and application of our water supply advanced treatment technology [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 35(3):1-3.
- [10] 王东升. 微污染原水强化混凝技术[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- [11] Matilainen A, Vepsalainen M, Sillanpaa M. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2010, 159(2):189-197.
- [12] 任树梅. 水资源保护[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.
- [13] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京:中国人民大学出版社, 1989.
- [14] 王占生, 刘文君. 饮用水标准及水环境安全[J]. *建设科技*, 2009, 23:44-46.
WANG Zhansheng, LIU Wenjun. The drinking water standards and the safety of water environment [J]. *Construction Science and Technology*, 2009, 23:44-46.
- [15] Fabris R, Chowa C W K, Drikas M, et al. Comparison of NOM character in selected Australian and Norwegian drinking waters[J]. *Water Research*, 2008, 42(15): 4188-4196.
- [16] Yan M Q, Wang D S, You S J, et al. Enhanced coagulation in a typical North-China water treatment plant[J]. *Water Research*, 2006, 40(19):3621-3627.

(编辑 陈移峰)