

东阿地下水源地水质综合评价方法研究

刘月, 于翠松, 曹升乐, 宋美华, 林洁
(山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061)

摘要: 针对地下水水质越来越受到人类活动影响的状况, 本文以聊城东阿地下水源地水质评价为例, 结合 Matlab 编程, 引入时间序列分析方法, 对水质参数监测值序列进行分析。分析结果表明: 总硬度序列在 2013 年初发生跳跃且跳跃后呈上升趋势, 序列无周期成分, 说明 2013 年初存在导致总硬度含量上升的开采行为, 但无周期性影响总硬度变化的开采活动。根据分析结果对地下水水质变化进行短期预测, 预测结果显示, 现状水质状况下若不加治理, 总硬度将于 2018 年达到Ⅳ类水范畴。本文为地下水水质综合评价提供新的思路, 也为地下水生态环境评价和地下水源地管理提供技术支撑。

关键词: 地下水源地; 水质综合评价; 水质预测; 时间序列; 聊城

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)04-0099-05

Study on comprehensive assessment method of water quality in Dongé groundwater source

LIU Yue, YU Cuisong, CAO Shengle, SONG Meihua, LIN Jie

(School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In light of the situation that the influence of human activities on groundwater quality is more and more serious the paper took comprehensive water quality assessment of Dong – E groundwater source for example , combined with matlab and introduced time series analysis theory to analyze the series of monitoring value of water quality. The results show that total hardness monitoring series jumped in early 2013 and then kept rising. There was not periodic component. There was unreasonable and random mining actives which led to the increase of total hardness content in early 2013 , but there was not periodical mining actives which affected the change of total hardness. In addition , this article also made short – term prediction based on the analysis. The result showed that if the management of water quality is not strengthened , the total hardness content will reach 451 mg/L in early 2018 which means Ⅳ – class water quality. The paper can offer new idea for the comprehensive assessment of groundwater quality and provide technical support for the assessment of groundwater ecological environment and management of groundwater source.

Key words: groundwater source; comprehensive assessment of water quality; water quality forecast; time series; Liaocheng

1 研究背景

自 20 世纪 80 年代以来, 人口迅速增长和社会经济的快速发展, 导致人们对水资源的过度使用和破坏, 使我国水生态环境普遍恶化。因此, 如何科学地评价水生态环境成为当前水资源及水环境管理的

重要问题之一。地下水是水资源的重要组成部分, 地下水水质在一定程度上可反映地下水生态状况。通过对地下水水质变化成因的分析, 可侧面反映地下水生态状况, 进而为合理开发利用地下水和改善地下水生态环境提供依据。目前人类活动对地下水的影响越来越明显, 地下水水质变化呈现出与时间

收稿日期: 2015-03-24; 修回日期: 2015-04-07

基金项目: 山东省省级水利科研及技术推广项目 (SDSLSK201302)

作者简介: 刘月 (1990-), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 研究方向: 水资源评估、调度方案的配置、雨洪水利用研究等。。

通讯作者: 曹升乐 (1960-), 男, 陕西蒲城人, 博士, 教授, 博导。研究方向: 水资源优化配置及管理。

变化的密切相关性,例如,某段时间化肥农药使用量增加,可导致此后一段时间地下水相关污染物含量上升等。

水质评价最早起源于 20 世纪 60 年代的美国。国内外用于水质评价的主流方法可分为指数法、聚类法和其他方法。指数评价法大都由 GB/T14848-93《地下水质量标准》中的评价方法改进而来。单因子指数法^[1]、霍顿指数法^[2]和内梅罗法^[3-4]等都属于指数评价法,其评价模式简单,计算方便,评价结果清晰直观。聚类法是在有各指标、质量级别标准的条件下,通过样品各指标监测值,对质量标准的各级别进行综合聚类,以判别水质质量级别的方法,主要有模糊聚类^[5]、灰色聚类^[6-8]和系统聚类^[9-10],聚类法计算较为繁琐,但其结果与水质级别对应明显,适合较高层次的定量水质评价工作使用。除上述方法之外,水质评价的方法还有神经网络法^[11-12]、投影寻踪法^[13]、模糊综合评判法^[14-15]和物元分析法^[16]等。神经网络法应用较多的为 BP 神经网络法,模糊综合评判需要比较严谨的数学基础,物元分析法的原理是建立物元模型进行分析。以上所列众多水质评价方法中,均不考虑时间变化对水质造成的影响。

针对以上问题,本文以聊城东阿地下水源地水质综合评价为例,利用时间序列分析方法分析地下水水质参数序列的变化规律,科学评价与预测地下水生态环境状况,为地下水源地管理提供技术依据。

2 水质参数监测值序列分析方法^[17]

本文认为水质参数监测值序列由确定性成分和随机性成分两部分组成,其中确定性成分包括跳跃成分、趋势成分和周期成分。跳跃成分是指水质参数监测值序列两种状态的界点;趋势成分是指序列的变化趋势,分为线性趋势成分和非线性趋势成分;周期成分是序列呈现出的周期性规律,分为简单周期和复合周期;随机性成分是指由不规则的振荡和随机影响等造成的成分。分析得到水质监测序列各成分可对水质状况进行短期预测。水质参数监测值序列的组成见下式:

$$X_t = J_t + T_t + C_t + \delta_t \tag{1}$$

式中: X_t 为水质参数在 t 时刻的监测值; J_t 、 T_t 、 C_t 和 δ_t 分别为水质参数在 t 时刻的跳跃成分值、趋势成分值、周期成分值和随机性成分值。

2.1 跳跃成分的检验及排除

识别跳跃成分的方法有成因识别分析法、时序

累计值相关曲线法和有序聚类分析法等。有序聚类分析法对要点如下:

对于水质参数监测值序列 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 设可能的突变点为 τ , 则突变前后的总离差平方和 $S_n(\tau)$ 最小时的 τ 即为跳跃点。

$$S_n(\tau) = \sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x}_{\tau})^2 + \sum_{i=\tau+1}^n (x_i - \bar{x}_{n-\tau})^2$$
$$(2 \leq \tau \leq n - 1) \tag{2}$$

式中: $\bar{x}_{\tau}$ 、 $\bar{x}_{n-\tau}$ 分别为 τ 前后两部分的均值。

得到突变点 τ 后,需检验跳跃成分是否显著。假设水质参数监测值序列 $x_1, x_2, \dots, x_{\tau}, x_{\tau+1}, x_{\tau+2}, \dots, x_n$, 突变点前后各有 n_1, n_2 个值($n = n_1 + n_2$), 将前后两部分分别用不同字母 A、B 表示,再将原序列值以升序排序并用对应符号代替,形成以 A 和 B 组成的符号序列。统计游程(连续出现同字母的序列)总个数 k , 构造统计量:

$$U = \frac{k - (1 + \frac{2n_1n_2}{n})}{\sqrt{\frac{2n_1n_2(2n_1n_2 - n)}{n^2(n - 1)}}} \sim N(0, 1) \tag{3}$$

给定显著性水平 α 后,查算 $U_{\alpha/2}$ 。当 $|U| < U_{\alpha/2}$ 时,跳跃不存在;反之,跳跃显著。

存在显著跳跃的序列,跳跃点前、后两段序列分别除以该段的均方差排除跳跃成分。

2.2 趋势成分的检验及提取

识别趋势成分的方法有滑动平均法和 Kendall 秩次相关检验法等,本文介绍后者。对跳跃点两侧序列分别检验。设序列 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 确定所有对偶值 (x_i, x_j) ($j > i$) 中 $x_i < x_j$ 的出现个数 k 。构造统计量:

$$U = \frac{\tau}{\sqrt{D(\tau)}}$$
$$\tau = \frac{4k}{n(n - 1)} - 1$$
$$D(\tau) = \frac{2(2n + 5)}{9n(n - 1)}$$
 (4)

式中: n 为序列长度。给定显著性水平 α 后,查算 $U_{\alpha/2}$ 。当 $|U| < U_{\alpha/2}$ 时,趋势不显著;反之,趋势显著。

用多项式 $T_t = a + b_1t + b_2t^2 + \dots + b_pt^p$ ($p \geq 1$) 描述趋势成分, $p = 1$ 时为线性趋势,否则为非线性趋势。相关系数 $R(R^2 = 1 - \frac{\sum (X(t) - T(t))^2}{\sum (X(t) - \bar{X}(t))^2}, t = 1, 2, \dots, n, \bar{X}(t)$ 为序列均值, n 为序列个数) 越接近 1, 序列线性关系越

密切。由于趋势成分是从纯数学角度考虑,无明确物理意义^[18-19],本文以线性趋势为例进行介绍著。则

$$b_1 = \frac{\sum_{t=1}^n (t - \bar{t})(X_t - \bar{x})}{\sum_{t=1}^n (t - \bar{t})^2}$$
$$a = \bar{x} - b_1 \bar{t}$$

(5)

有趋势序列减掉趋势项,无趋势的序列减本序列均值以保持统一。

2.3 周期成分的识别与提取

识别周期成分的方法有周期图法、方差谱密度图法、累计解释方差图法等。本文采用方差谱密度图法,结合 Matlab 编程绘制方差谱密度图。方差谱密度图其方程为:

$$S(f_j) = 2(1 + \sum_{k=1}^m D_k r_k \cos 2\pi f_j k)$$
$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (x_{t+k} - \bar{x})(x_t - \bar{x})}{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2}$$
$$D_k = 0.5 + 0.5 \cos(\frac{\pi k}{m}), (k = 1, 2, \dots, m)$$

(6)

式中: f_j 为频率; r_k 为样本自相关系数; D_k 为谱窗; k 为滞时; m 为最大滞时,本文取 $m = 15$ 。

若方差谱密度图上有较高较陡的峰值说明序列含有周期,峰值个数即为周期个数,峰值对应的频率的倒数即为周期,峰值越高,周期越显著。本文以一个简单周期为例说明提取和排除周期成分的方法。简单周期公式为:

$$C_t = u + a \cos \omega t + b \sin \omega t$$
$$\omega = 2\pi/T;$$
$$a = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n X_t \cos \omega t;$$
$$b = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n X_t \sin \omega t$$

(7)

式中: μ 为 X_t 的均值; T 为周期; ω 为谐波的角频率; a, b 为谐波的傅氏系数(振幅)。

2.2 所得序列减掉周期项 C_t , 得到随机性成分序列。

2.4 排随机性成分序列检验

为检验监测值序列的确定性成分是否提取充分,需分别计算原始监测值序列和排除确定性成分后的监测值序列在不同滞时下的自相关系数 r_k (公式见 2.3) 并进行对比,若与前者相比,后者前 3 阶自相关系数的绝对值明显减小,则认为确定性成分已较好提取。

3 东阿地下水源地水质参数监测值序列变化分析

3.1 研究区概况

东阿地下水源地位于聊城东部、泰山脚下的东阿县境内,东经 116°02′~116°33′,北纬 36°07′~36°33′。其地下水发源于泰山和太行山两山脉的地下潜流,地下水类型以浅层松散岩类孔隙水和深层碳酸盐类岩溶水为主,地下水中钙镁等金属含量丰富。

本次选取 2003 年 1 月~2013 年 12 月监测值水质资料序列,以总硬度为例说明。

3.2 趋势成分和跳跃成分检验及排除

采用上述方法,取显著性水平 $\alpha = 5\%$,对总硬度监测值序列(见图 1)进行趋势成分和跳跃成的检验,检验结果见表 1 和表 2。

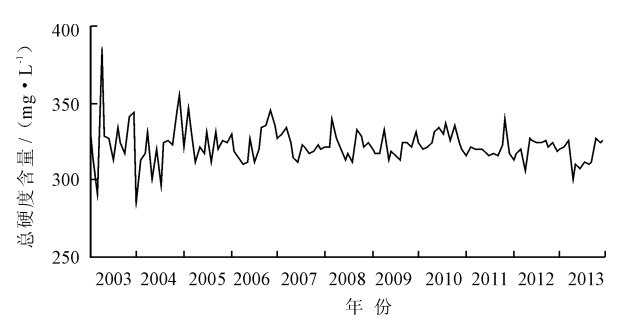


图 1 东阿地下水源地总硬度监测值序列

表 1 东阿地下水源地总硬度监测值序列
跳跃成分识别及检验结果

指标	跳跃时间	k/个	n ₁ /个	n ₂ /个	n/个	U
总硬度	2013-03	14	123	9	132	-2.66

表 2 东阿地下水源地总硬度监测值序列
Kendall 秩次检验结果及趋势方程

指标	k/个	n/个	U	趋势	趋势方程
总硬度	3450	123	1.32		
	30	9	2.50	上升	y = 0.349x + 33.652

排除趋势和跳跃成分后的总硬度监测值序列见表 3。

3.3 周期成分的识别与提取

对排除趋势和跳跃成分的总硬度监测值序列,按上述方法进行周期成分识别,识别结果见图 2。由于监测值资料序列较短,本文仅考虑年周期及半年周期。由图 2 可见,总硬度序列无周期成分。

表 3 东阿地下水源地排除趋势和跳跃成分后的总硬度监测值序列 mg/L

年 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2003	0.57	-0.74	-2.83	5.35	0.48	0.31	-0.83	0.91	0.13	-0.48	1.52	1.78
2004	-3.26	-0.91	-0.48	0.65	-1.96	-0.22	-2.39	0.13	0.22	-0.04	1.87	2.83
2005	-0.13	2.05	0.91	-1.00	-0.13	-0.56	0.65	-1.00	0.74	-0.22	0.22	0.04
2006	0.57	-0.39	-0.74	-1.17	-1.00	0.31	-1.00	-0.30	0.91	1.09	1.87	1.09
2007	0.31	0.57	0.91	0.13	-0.74	-1.00	-0.04	-0.13	-0.56	-0.39	-0.04	-0.22
2008	-0.13	-0.13	1.44	0.31	-0.30	-0.91	-0.48	-1.00	0.83	0.48	-0.13	0.04
2009	-0.30	-0.56	-0.48	0.83	-0.83	-0.39	-0.65	-0.83	0.13	0.04	-0.13	0.74
2010	0.04	-0.22	-0.13	0.04	0.65	0.91	0.57	1.18	0.22	1.09	0.04	-0.30
2011	-0.65	-0.13	-0.30	-0.30	-0.30	-0.48	-0.65	-0.48	-0.65	-0.04	1.44	-0.48
2012	-0.83	-0.48	-0.30	-1.52	0.31	0.22	0.04	0.04	0.22	-0.13	0.04	-0.39
2013	-0.22	-0.13	0.22	-0.23	0.55	-0.03	0.07	-0.50	-0.62	0.83	0.03	-0.10

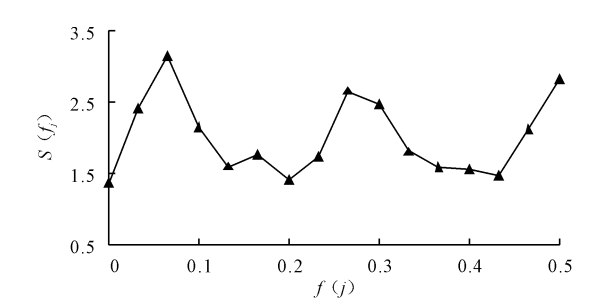


图 2 东阿地下水源地排除趋势和跳跃成分的总硬度监测值序列方差谱密度曲线

3.4 随机性成分序列检验

对随机性成分序列进行检验,结果见表 4。由表 4 可见,各水质指标参数监测值序列的确定性成分已较好提取。

表 4 东阿地下水源地总硬度两序列前三阶滞时自相关系数

滞时	1	2	3
前	0.09	0.08	0.07
后	0.04	0.04	0.03

3.5 总硬度含量短期预测

通过以上分析可见,总硬度监测值序列各成分均较好提取。考虑时间变化的同时,将各成分叠加,对未来总硬度变化做短期预测。预测结果见表 5。

3.6 研究结果分析

(1)由图 1 可见,2003 – 2013 年总硬度监测值变化相对平稳,无周期性波动,含量属Ⅲ类水范畴;序列在 2003 年初有较小范围波动,2013 年初,总硬度含量先下降然后上升,推测在此处存在跳跃,且跳跃后可能有上升趋势。

(2)由表 1 可见,2013 年 3 月为总硬度序列的跳跃点,且 $|U| > U_{\alpha/2} = 1.96$,跳跃显著。

(3)表 2 中,跳跃点前后的 U 值分别为 -1.32 和 2.5,说明跳跃点前序列无明显变化趋势,跳跃点后存在上升趋势。可见东阿地下水源地在 2013 年初某些开采使用行为导致总硬度开始上升。

(4)图 2 未见明显周期成分,说明东阿地下水源地开采使用过程中不存在周期性的影响总硬度含量的活动。

(5)表 4 结果显示,排除确定性成分的剩余序

表 5 2013 年 1 – 12 月东阿地下水源地总硬度含量预测结果 mg/L

年 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2014	302.00	305.00	308.00	311.00	314.00	318.00	321.00	324.00	327.00	330.00	333.00	336.00
2015	339.00	342.00	345.00	349.00	352.00	355.00	358.00	361.00	364.00	367.00	370.00	373.00
2016	376.00	380.00	383.00	386.00	389.00	392.00	395.00	398.00	401.00	404.00	407.00	411.00
2017	414.00	417.00	420.00	423.00	426.00	429.00	432.00	435.00	438.00	442.00	445.00	448.00
2018	451.00	454.00	457.00	460.00	463.00	466.00	469.00	473.00	476.00	479.00	482.00	485.00

列的前三阶自相关系数绝对值均小于初始监测值序列的自相关系数,说明监测值序列的确定性成分已提取完全。

(6)从表5的预测结果可见,现状水质状况下若不加治理,自2014年初起,东阿地下水源地总硬度含量将持续上升,2018年初将上升到Ⅳ类水范畴。

4 结 语

(1)应用时间序列分析方法,结合 Matlab 编程,对东阿地下水源地总硬度监测序列进行分析,并对其未来变化做短期预测,结果表明,东阿地下水源地总硬度含量于2013年初起变大且此后有上升趋势,说明2013年初有不合理的开采活动或相应的地质变化对总硬度含量造成影响;总硬度整体序列无周期性变化,说明无影响总硬度变化的周期性活动;短期预测结果显示,总硬度含量持续增加,与上升趋势相一致。

(2)采用时间序列分析方法对水源地水质参数监测序列进行分析和短期预测,考虑到时间变化的影响因素,计算简单,可帮助人们了解地下水水质参数含量的变化情况及未来短期内可能达到的程度,为地下水水质综合评价及地下水生态环境评价提供参考。

(3)由于时间序列分析法是对历史资料进行分析,将其应用于地下水水质评价时需要较长序列的资料,增加了数据资料搜集的难度。由于资料序列较短,本次周期成分研究不够精确,还需要进一步深化。

(4)基于时间序列分析的结果预测地下水水质参数短期内含量变化,未考虑未来的突变情况,如预测期内的地质变化等,因此长期预测精度不高,仅可做短期内的预测使用。及时补充新的监测数据,完善应用时间序列分析法进行长期水质预测,这是以后工作的重点^[20]。

参考文献:

- [1] 翟敏,王连顺,李印龙,等.用单因子和综合指数法评价农村小型集中式供水水质[J].环境与职业医学,2010,27(7):432-434.
- [2] 张凤娥,马登军,吴泊人.应用霍顿水质指数法评价官厅水库水质[J].江苏石油化工学院学报,2002,14(4):28-31.

- [3] Nemerow N L. Scientific stream pollution analysis [M]. McGraw Hill,1974.
- [4] 关云鹏.利用内梅罗指数法模型评价地下水水质的探讨[J].山西水利科技,2012(1):81-84.
- [5] 马丽平,杨立春.模糊聚类法在水质评价中的应用——以贵州三岔河某监测断面为例[J].贵州科学,2006,24(1):63-66.
- [6] 沃飞,陈效民,吴华山,等.灰色聚类法对太湖地区农村地下水水质的评价[J].安全与环境学报,2006,6(4):38-41.
- [7] 王洪梅,卢文喜,辛光,等.灰色聚类法在地表水水质评价中的应用[J].节水灌溉,2007(5):20-22.
- [8] 张祖亮.灰色聚类法在地下水质量评价中的应用[J].云南环境科学,2004,23(1):60-62.
- [9] 张子安,齐雨藻,林宗振.应用系统聚类分析的方法评价珠江流域北江水系的水质状况[J].生态学报,1987,7(1):1-11.
- [10] 胡雷芳.五种常用系统聚类分析方法及其比较[J].浙江统计,2007(4):11-13.
- [11] 孙涛,潘世兵,李永军.人工神经网络模型在地下水水质评价分类中的应用[J].水文地质工程地质,2004,31(3):58-61.
- [12] HONG Yoon-seok, MICHAEL R R. Intelligent characterisation and diagnosis of the groundwater quality in an urban fractured-rock aquifer using an artificial neural network [J]. Urban Water, 2001, 3(3):193-204.
- [13] 彭坤泉,张平.投影寻踪模型在水环境质量评价中的应用[J].江苏环境科技,2007,20(Z1):59-62.
- [14] 李进,陈益滨,师伟,等.模糊综合评价法在地下水水质评价中的应用[J].地下水,2006,28(2):4-5+22.
- [15] 潘峰,付强,梁川.模糊综合评价在水环境质量综合评价中的应用研究[J].环境工程,2002,20(2):58-61.
- [16] 樊引琴,刘婷婷,李娜,等.物元分析法在黄河水质评价中的应用[J].水资源与水工程学报,2013,24(2):166-169.
- [17] 王文圣,丁晶,金菊良.随机水文学(第二版)[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [18] 李勇海.时间序列分析法在延吉市地下水动态预测的应用[J].吉林地质,2013,32(3):86-89.
- [19] 赵杰,卞玉梅,周晓君.时间序列分析法在沈阳市地下水位动态预报中的应用[J].东北水利水电,2007,25(8):31-34.
- [20] 杨佳,钱会.时间序列分析在地下水位动态预测中的应用[J].水资源与水工程学报,2015,26(1):58-62.