

山东省主要城市重点供水水源地水质变化趋势检验方法探讨

于志强¹, 张乃鹏², 刁艳芳³, 李佩⁴

(1. 山东省水文局, 山东 济南 250002; 2. 东营市水文局, 山东 东营 257000;

3. 山东农业大学, 山东 泰安 271018; 4. 临沂市水文局, 山东 临沂 276002)

摘要:城市供水水源地在促进城市的发展, 解决城市水资源供需矛盾等方面发挥着重要的作用。目前山东省主要城市重点供水水源地共 25 处, 采用水质综合指数法对 2016 年的水质状况进行评价, 并根据 2007~2016 年期间水源地水质指标和水质指数 *WQI* 值分别进行了季节性 Kendall 检验和趋势线直观分析, 通过两种评价结果的对比综合分析山东省水源地水质变化趋势, 结果表明, 山东省水源地现状水质较好。采用两种检验方法所得出的水源地水质变化趋势基本一致, 避免了采用单一分析方法进行趋势分析的局限性, 互为补充和验证, 分析结论合理可靠。

关键词:供水水源地; 季节性 Kendall 检验; 趋势线直观分析法; 水质变化趋势

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2019)01-0099-08

城市化建设的加快和人民生活水平的提高对城市供水的水量和水质均提出了高标准和高要求, 如何保障日益增长的城市用水是我国水资源管理部门的重要任务之一^[1-2]。山东省是一个严重缺水的省份, 人均水资源仅是全国平均水平的 1/6。随着山东省经济的快速发展, 各重点城市城市人口不断增加, 城市工业经济持续增长, 对水资源的需求量亦日益递增^[3], 供水水质安全受到一定威胁, 但近年来供水水源环境综合整治以及生态建设效益逐渐显现。

为全面了解和掌握山东省城市供水水源地的水质现状, 本文采用水质综合指数法对全省 25 处水源地 2016 年的水质状况进行评价; 并根据 2007~2016 年全省水源地水质指标及水质指数 *WQI* 值分别进行季节性 Kendall 检验和趋势线直观分析, 通过两种检验结果的对比来综合分析全省水源地水质变化趋势。

1 山东省主要城市供水水源地概况

按照行业和地方有关文件和政策的要求, 山东省水文局自 2003 年起组织开展全省主要城市重点

供水水源地监测工作。本文水质监测实测资料来源于山东省水文局, 评价结果来源于《山东省主要城市重点供水水源地水质通报》(山东省水利厅)。截止 2016 年, 水源地共达 25 处, 其中地表水水源地 20 处, 地下水水源地 5 处, 详见图 1。

2 水源地水质现状评价

2.1 评价方法

针对饮用水功能特征, 以《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) 为基础, 参照《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006) 对水源地进行评价^[4]。采用水质综合指数评价法, 将评价指标分为三类: a) 水源地易污染项目, 包括氨氮、溶解氧、高锰酸盐指数和总大肠菌群共 4 项 (地下水水源地不包括溶解氧); b) 饮用水一般化学指标, 包括 pH 值、总硬度、硫酸盐、氯化物、溶解性铁、锰、铜、锌和挥发酚共 9 项; c) 第三类为饮用水中毒性项目, 包括氟化物、氰化物、砷、汞、镉、铅、铬 (六价)、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮共 9 项。评价步骤^[7]如下。



图 1 山东省主要城市重点供水水源地分布图

Fig. 1 Distribution map of key water supply sources in major cities of Shandong

- 1)求得各单项水质指标的指标数 I_{iok} ;
- 2)分别求出三类项目的分类指数 (I_{II} 、 I_{III} 、 I_{LIII});

①第一类项目的分类指数 (I_{II}) 为各单项水质指标的指数和的平均值,即:

$$I_{II} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{iok} \quad (n=1,2,3,4), \quad (1)$$

②第二类、第三类项目的分类指数 (I_{LII} 、 I_{LIII}) 分别为各单项水质指标的指数最高者。

- 3)水源地水质指数 (WQI) 为上述三类项目分类指数中的最高者,即:

$$WQI = \max(I_{II}, I_{LII}, I_{LIII}) \quad (2)$$

根据水源地的 WQI , 即可确定其水资源质量

等级和水质状况。根据相应水质标准中的评价级别,将具体水质评价指标换算为 1、2、3、4、5 级水质指数,分别对应优、良、中、差、劣等 5 类水质状况;水质指数为 4、5 级的水源地为水质不合格水源地,相应的水源地供水量为水质不合格供水量^[5]。

2.2 评价结果

山东省 25 处重要供水水源地监测频次每月监测 1 次,年度共 12 次。锦绣川水库 2 月份由于冰冻未能取样,故年度监测 11 次;尹府水库 8 ~ 12 月库干,故年度监测 7 次。利用水质综合指数评价法求得水质评价结果见表 1。

表 1 2016 年山东省主要供水水源地水质评价结果统计表

Table 1 Water quality evaluation results of main water supply sources in Shandong province in 2016

水源地名称	年度 测次数	1 级(水质优良)		2 级(水质良好)		3 级(水质尚好)		4 级(已受污染)	
		次数	比重/%	次数	比重/%	次数	比重/%	次数	比重/%
锦绣川水库	11	6	54.5	4	36.4	1	9.1		
引黄水库	12	10	83.3	2	16.7				
东阿地下水源地	12	12	100						
岸堤水库	12	10	83.3	1	8.3			1	8.3
东郊水库	12	12	100						

续表 1:

水源地名称	年度	1 级(水质优良)		2 级(水质良好)		3 级(水质尚好)		4 级(已受污染)	
	测次数	次数	比重/%	次数	比重/%	次数	比重/%	次数	比重/%
蒲城水库	12	12	100						
耿井水库	12	9	75.0	1	8.3	2	16.7		
门楼水库	12	10	83.3	2	16.7				
雷泽湖水库	12	9	75.0	2	16.7	1	8.3		
黄前水库	12	8	66.7	4	33.3				
东武 6 号井	12	1	8.3			11	91.7		
乔店水库	12	12	100						
鹏泉水源地	12	11	91.7			1	8.3		
沟盘河水库	12	12	100						
丁东水库	12	12	100						
济宁城区水源地	12	12	100						
峡山水库	12			12	100				
眉村水源地	12	12	100						
米山水库	12	12	100						
崮山水库	12	12	100						
产芝水库	12	12	100						
尹府水库	7	7	100						
崂山水库	12	12	100						
棘洪滩水库	12	12	100						
日照水库	12	11	91.7	1	8.3				

由表 1 看出,2016 年 25 处水源地中有 13 处水源地全部测次的评价级别均为 1 级(水质优良),占评价总数的 52%;有 24 处水源地全部测次的评价级别符合 3 级(水质尚好),占水源地总数的 96%;仅有岸堤水库 9 月份由于亚硝酸盐氮超标导致评价级别为 4 级。

综上所述,2016 年山东省主要城市重点供水水源地水质状况整体良好,水质较为稳定,绝大部分水源地均能满足城市集中式供水水质要求。

3 水质变化趋势分析

3.1 分析方法

水质变化趋势分析的主要目的是了解和判断水中污染物随时间和空间的变化。季节性 Kendall 检验由 Rebert 等^[6]于 1982 年提出,并由 Smith 等^[7]和 Van 等^[8]做了进一步的修正。该方

法是一种仅考虑数据相对排列的非参数检验方法,其主要优点是不受水质资料的非正态性、季节性变化、流量相关、出现漏测值或小于检测限值等的影响。该检验方法的思路是收集多年的监测数据,分别计算各月份(或季节)的统计量及方差,再把各月份(或季节)的统计量相加,计算总统计量。如果季节数和年份数足够大,可通过总统计量与标准正态分布表之间的比较来进行显著性趋势检验。不过,该方法也有其局限性,主要有以下几点。①该方法要求的季节数与年份数要足够大,过短的水质序列不能准确判定是否存在趋势,选择过长的水质序列则会出现一种趋势掩盖或抵消另一种趋势的现象。一般认为,用季节性 Kendall 检验判断水质趋势时,序列长度一般以选择 5~8 年为宜。②该方法检验时,若出现污染物浓度变化趋势分别为升高、降低类数目相同的情况,则无法判断污染物的总体变化趋势。③该方法在分析污染物年内季节变化趋势时,个别不合理的

极值对总趋势的影响等方面存在较大不足,不利于分析水环境变化趋势的成因。为弥补季节性 Kendall 检验分析的不足,本次趋势分析增加趋势线直观分析法评价全省主要城市重点供水水源地 2007 ~ 2016 年的水质变化趋势。

1) 季节性 Kendall 检验法

季节性 Kendall 检验法的原理见参考文献^[9],模型的构建见参考文献^[10-13]。本文采用彭文启等开发的 PWQTrend2010 软件进行分析, PWQTrend2010 是基于季节性 Kendall 检验方法的水质趋势分析专业软件,能够定量描述水质趋势。

2) 趋势线直观分析法

趋势线直观分析法^[14]是通过已知的历史资

料与相应时间点拟合而成的一条曲线,反映指标本身的变化趋势。趋势线直观分析法的趋势分析结果与季节性 Kendall 检验法相同,分为三类五级,趋势线斜率的正负表示上升或下降趋势,相关系数 R 的平方判断其趋势的显著程度。当 $R^2 < 0.2$,水质变化无趋势; $0.2 \leq R^2 < 0.4$,水质变化趋势显著; $R^2 \geq 0.4$,水质变化趋势高度显著。

3.2 水质指数 WQI 值变化趋势分析

对 2007 ~ 2016 年共 10 年 25 处水源地逐月水质指数 WQI 值采用季节性 Kendall 检验法和趋势线直观分析法进行趋势分析,列入表 2,并将结果进行对比。

表 2 季节性 Kendall 法与趋势线直观分析法检验结果对比表

Table 2 Comparison of results from seasonal Kendall method and trend line visual analysis

序 号	水源地名称	季节性 Kendall 法		趋势线直观分析法	
		显著性水平	评价结论	R^2	评价结论
1	锦绣川水库	45.91%	无明显升降趋势	0.020 5	无明显升降趋势
2	引黄水库	0.00%	高度显著下降	0.560 3	高度显著下降
3	东阿地下水源地	100%	无明显升降趋势		无明显升降趋势
4	岸堤水库	7.28%	显著下降	0.107 9	无明显升降趋势
5	东郊水库	0.00%	高度显著下降	0.768 6	高度显著下降
6	蒲城水库	0.00%	高度显著下降	0.532 7	高度显著下降
7	耿井水库	0.00%	高度显著下降	0.356 5	显著下降
8	门楼水库	3.10%	显著上升	0.150 5	无明显升降趋势
9	雷泽湖水库	0.00%	高度显著下降	0.748 2	高度显著下降
10	黄前水库	3.65%	显著下降	0.099 7	无明显升降趋势
11	东武 6 号井	0.18%	高度显著上升	0.068 5	无明显升降趋势
12	乔店水库	0.00%	高度显著下降	0.418 3	高度显著下降
13	鹏泉水源地	8.24%	显著上升	0.082 9	无明显升降趋势
14	沟盘河水库	0.00%	高度显著下降	0.788 8	高度显著下降
15	丁东水库	0.00%	高度显著下降	0.820 2	高度显著下降
16	济宁城区水源地	100%	无明显升降趋势	0.001 9	无明显升降趋势
17	峡山水库	4.25%	显著上升	0.002 0	无明显升降趋势
18	眉村水源地	0.00%	高度显著下降	0.672 5	高度显著下降
19	米山水库	0.01%	高度显著下降	0.304 5	显著下降
20	崮山水库	0.00%	高度显著下降	0.230 6	显著下降
21	产芝水库	0.00%	高度显著下降	0.789 7	高度显著下降
22	尹府水库	0.00%	高度显著下降	0.607 6	高度显著下降
23	崂山水库	0.00%	高度显著下降	0.303 5	显著下降
24	棘洪滩水库	0.03%	高度显著下降	0.466 8	高度显著下降
25	日照水库	1.29%	显著下降	0.111 1	无明显升降趋势

由表2可以看出,采用季节性 Kendall 检验法,2007~2016 年全省 25 处水源地中有 3 处水源地水质指数 WQI 值检验结果为无明显升降趋势,占总数的 12.0%;有 4 处为上升趋势,占总数的 16.0%,其中有 1 处为高度显著上升,3 处为显著上升;有 18 处为下降趋势,占总数的 72.0%,其中有 15 处为高度显著下降,3 处为显著下降。

采用趋势线直观分析法,25 处水源地中有 10 处为无明显升降趋势,占总数的 40.0%;有 15 处为下降趋势,占总数的 60.0%,其中有 11 处高度显著下降,4 处为显著下降;无上升趋势水源地。

对比两种检验结果可以看出,2007~2016 年 25 处水源地的水质指数 WQI 值变化趋势均以下降趋势为主,比例为 60.0%~72.0%;无明显升降趋势的比例为 12.0%~40.0%;上升趋势比例

为 0.0%~16.0%。全省 25 处水源地中有 18 处水源地两种检验结果的变化趋势相一致,占水源地总数的 72.0%。由此可见,两种检验方法所得结论较为一致。

综上所述,全省 25 处水源地水质指数 WQI 值变化趋势总体较好,有 84.0%~100% 的水源地水质指数呈下降或无升降趋势,仅有 0.0%~16.0% 的水源地水质指数呈上升趋势。

3.3 各类水质指标变化趋势分析

对 2007~2016 年 25 处水源地的三类 22 项水质指标(其中 5 处地下水水源地监测指标为 21 项)分别进行季节性 Kendall 检验和趋势线直观分析,并将评价结果进行比较。

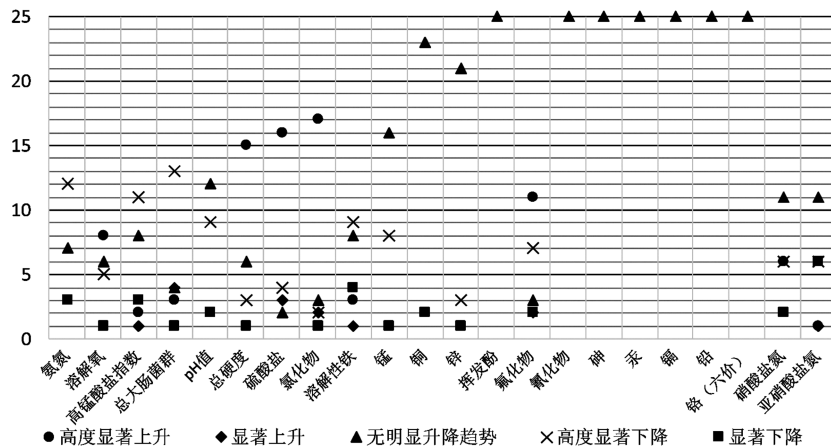


图2 Kendall 法五级类别统计图

Fig. 2 Five classes statistics through Kendall method

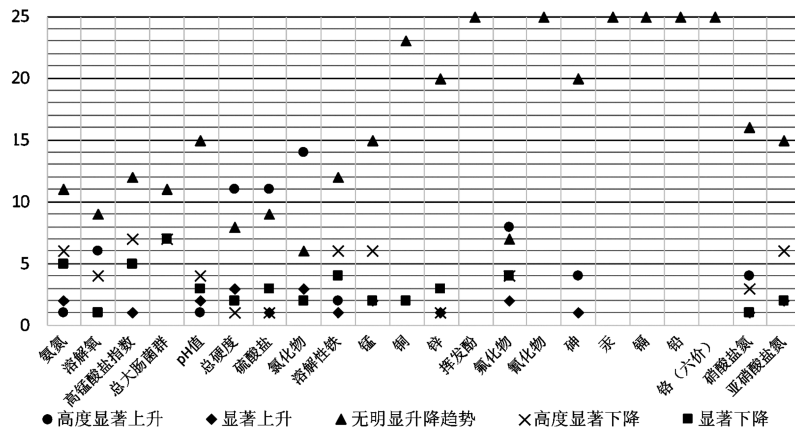


图3 趋势线直观法五级类别统计图

Fig. 3 Five classes statistics through trend line visual analysis

1) 三类指标的评价结果

采用季节性 Kendall 检验法和趋势线直观分析法计算水质指标的变化趋势,图 2、图 3 列出了两种方法计算的 25 处水源地中五级类别(高度

显著上升、显著上升、无趋势、显著下降和高度显著下降)所占的个数,图 4、图 5 列出了两种方法计算的 25 处水源地中三种类别(上升、下降和无趋势)所占的百分比。

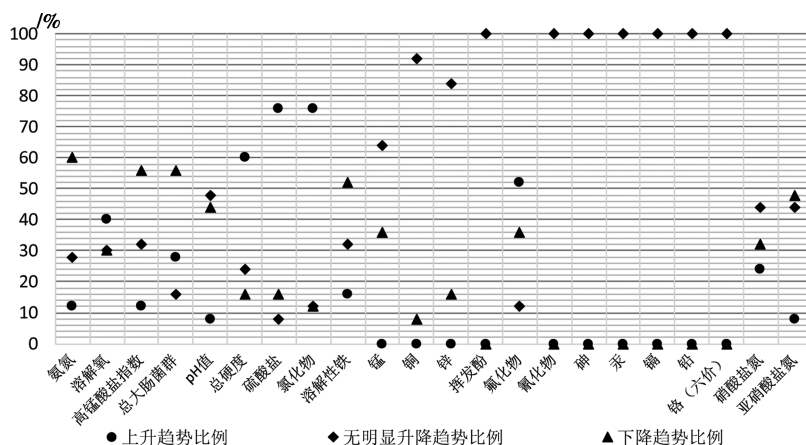


图 4 Kendall 法三类类别统计图

Fig. 4 Three classes statistics through Kendall method

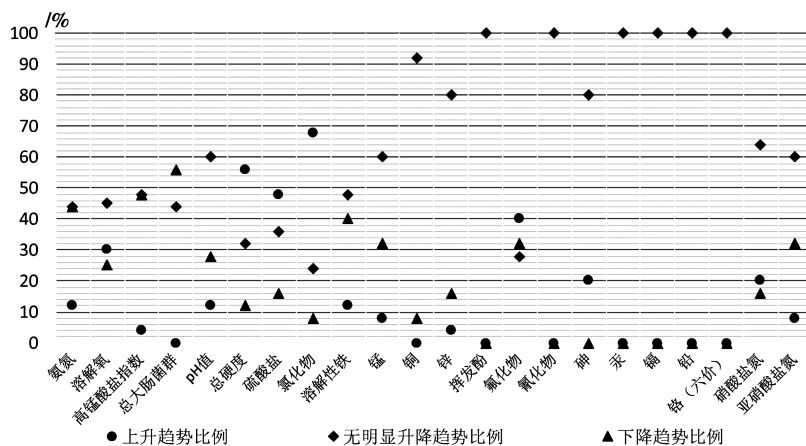


图 5 趋势线直观法三类类别统计图

Fig. 5 Three classes statistics through trend line visual analysis

a) 第一类—污染指标

采用季节性 Kendall 检验法,污染指标的 4 个参数中,氨氮、高锰酸盐指数和总大肠菌群均以下降趋势为主,下降的比例分别为 60.0%、56.0% 和 56.0%,上升的比例分别为 12.0%、12.0% 和 28.0%;而溶解氧则以上升趋势为主,上升的比例为 40.0%,下降和无趋势的比例各占 30.0%。采用趋势线直观分析法,污染指标的 4 个参数在 25 处水源地中氨氮和高锰酸盐指数的无明显升降趋势和下降趋势(包括高度显著下降和显著下降)

的水源地个数所占比例均为 44.0%;溶解氧以无明显升降趋势的比例最多,为 45.0%,其次是上升趋势的比例较多为 30%;总大肠菌群以下降趋势的比例最多,占 56.0%,其次是无明显升降趋势的比例为 44.0%。氨氮、高锰酸盐指数和总大肠菌群呈下降趋势的水源地明显多于上升趋势的水源地(溶解氧则相反)。

b) 第二类—饮用水一般化学指标

采用季节性 Kendall 检验法,一般化学指标中总硬度、硫酸盐、氯化物以上升趋势为主,上升

的比例分别为 60.0%、76.0% 和 76.0%，下降比例分别为 16.0%、16.0% 和 12.0%；溶解性铁以下降趋势为主，下降比例占 52.0%，上升比例仅占 16.0%；pH 值、锰、铜、锌、挥发酚则以无明显升降趋势为主，无明显升降趋势的水源地比例分别为 48.0%、64.0%、92.0%、84.0% 和 100%。采用趋势线直观分析法，一般化学指标中总硬度、硫酸盐、氯化物均以上升趋势的比例最多，其次是无明显升降趋势的比例，其它参数均以无明显升降趋势为主。

c) 第三类—饮用水毒性指标

采用季节性 Kendall 检验法，饮用水毒性指标中氟化物以上升趋势为主，上升的比例占 52.0%，下降的比例占 36.0%；硝酸盐氮和亚硝酸盐氮以无明显升降趋势最多，所占比例均为 44.0%，下降趋势所占比例也不低，分别占 32.0% 和 48.0%；而总氰化物、砷、汞、镉、铅、铬（六价）全部为无明显升降趋势。采用趋势线直观分析法，饮用水毒性指标中氟化物、砷、汞、镉、铅、铬（六价）、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮 8 项指标以无明显升降趋势最多，且比例多在 60% 以上，而氟化物上升趋势、下降趋势和无明显升降趋势的比例各占 1/3 左右。

2) 两种方法结果对比

对全部 22 项水质指标可作季节性 Kendall 检验和趋势线直观分析对比。

a) 两种检验方法下氨氮、高锰酸盐指数、pH 值、总硬度、氯化物、锰、铜、锌、挥发酚、氟化物、氰化物、砷、汞、镉、铅、铬（六价）等 16 个项目的三种变化趋势次序完全一致，占指标总数的 72.7%；总大肠菌群、硫酸盐和硝酸盐氮等 3 个项目的主要变化趋势一致，占指标总数的 13.6%；溶解氧、溶解性铁和亚硝酸盐氮等 3 个项目的三种变化趋势次序均不一致，但是变化幅度均不大，相对偏差范围为 0.0% ~ 20.0%。

b) 两种检验方法下除了总硬度、硫酸盐、氯化物和氟化物 4 个指标外，其余 18 项水质指标均以下降趋势和无明显升降趋势所占比例较大，并且远大于上升趋势比例，占指标总数的 81.8%，与现状水质状况吻合。

3) 变化趋势原因分析

氨氮、高锰酸盐指数趋势下降原因与点源、面

源污染源治理、生态环境治理及水源地保护效果显现、水质得到改善有关。根据 2012 ~ 2016 年度山东省入河排污口入河污水量、COD、氨氮三指标（简称三指标，下同）监测数据变化情况，入河污水量历年较稳定，COD、氨氮入河总量呈现逐年下降趋势，同时表明 COD、氨氮污染物入河浓度在下降，水质逐步改善（图 6）。

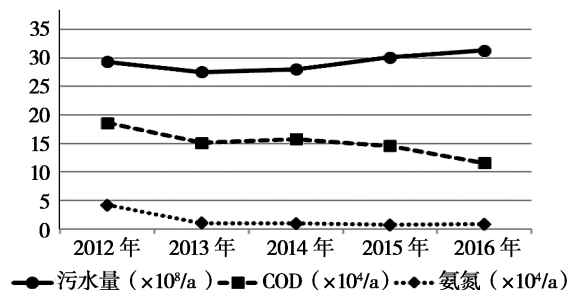


图6 2012~2016年度山东省入河排污口三指标趋势示意图

Fig. 6 Variations in three indicators from sewage discharge outlets in shandong for the 2012 - 2016 period

总硬度、硫酸盐、氯化物趋势上升原因与滨海地区地下水过度开发利用造成区域性超采，引发了地下水位持续下降、海（咸）水入侵等一系列生态环境问题有关；氟化物呈现上升趋势，与地下水开采量加大，深度开采，导致水体中氟化物含量增加；其余无明显升降趋势的指标主要为在水体中含量很低或未检出的原因。

4 结 论

通过综合分析，得出如下结论。

1) 全省水源地水质指数 WQI 值的季节性 Kendall 检验中呈下降趋势、无明显升降趋势和上升趋势比例分别为 72.0%、12.0% 和 16.0%；全省水源地水质指数 WQI 值的趋势线直观分析中呈下降趋势、无明显升降趋势和上升趋势比例分别为 60.0%、40.0% 和 0.0%。因此，全省水源地水质指数 WQI 值主要以下降趋势和无明显升降趋势为主，比例占到 84.0% ~ 100%，与现状水质状况整体良好相吻合。

2) 在水源地水质指标的季节性 Kendall 检验和年均值趋势线分析中，两种检验方法下全省水

源地均有 81.8% 的水质指标值以下降趋势和无明显升降趋势为主,远高于上升趋势。两种趋势检验方法均可用于山东省供水水源地水质变化趋势分析,可单独使用,亦可互为趋势检验方法的补充和验证,同步使用。

3) 水质指标值的下降会使得水源地水质好转,因而使水源地水质指数 WQI 值也同样下降,全省主要水源地水质主要向稳定和趋好方向转换。从上述水源地水质指数和水源地水质指标的趋势变化来看,两者相辅相成,互相起到验证作用和良性推动。

4) 全省水源地监测项目中总硬度、硫酸盐、氯化物和氟化物 4 个指标均以上升趋势为主,且所占比例较大,应采取相应措施加以改善。

参考文献:

- [1] 唐克旺,王研.我国城市供水水源地水质状况分析[J].水资源保护,2001,(2):30-31.
- [2] 杜霞,彭文启.我国城市供水水源地水质状况分析及其保护对策[J].水利技术监督,2004,(3):50-52.
- [3] 刘志文,叶进霞,史启朋,等.山东省重点城市供水水源地环境地质问题及开采潜力分析[J].中国农村水利水电,2009,(11):100-102+106.
- [4] 朱党生,张建永,程红光,等.城市饮用水水源地安全评价(Ⅰ):评价指标和方法[J].水利学报,2010,41(7):778-785.
- [5] 邢文洁,刘洪林,刘云刚,等.供水水源地水质评价指数方法及应用[J].山东水利,2002,(5):25-26.
- [6] Hirsch R M, Slack J R, Smith R A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data[J]. Water Resources Research, 1982, 18(1):107-121.
- [7] Smith R A, Hirsch R M, Slack J R. A study of trends in total phosphorus measurements at NASQAN stations[C]//Reston: US Geological Survey Water-Supply, 1982.
- [8] Belle G V, Hughes J P. Nonparametric Tests for Trend in Water Quality[J]. Water Resources Research, 1984, 20(1):127-136.
- [9] 彭珂,董晓钢,张晓范,等.季节性 Kendall 检验分析湘江长沙段水质变化趋势[J].中国环境监测,2014,30(1):82-85.
- [10] 夏桂敏,张思瑶.基于季节性 Kendall 检验法的白石水库水质变化趋势[J].南水北调与水利科技,2015,13(6):1069-1073+1079.
- [11] 冯健,周怀东,彭文启,等.基于 Kendall 法的三门峡水库水质趋势分析[J].中国农村水利水电,2015,(3):68-70+75.
- [12] 郭丽峰,郭勇,罗阳,等.季节性 Kendall 检验法在滦河干流水质分析中的应用[J].水资源保护,2014,30(5):60-67.
- [13] 彭文启,张祥伟.现代水环境质量评价理论与方法[M].北京:化学工业出版社,2005.151-159.
- [14] 何军,陈鹏,冯睿,等.三峡工程建成前后宜昌市气候变化研究[J].中国农村水利水电,2016,(6):26-28.

Discussion on Water Quality Status and Evolution Trend of Key Water Supply Sources in Major Cities of Shandong

YU Zhi-qiang¹, ZHANG Nai-peng², DIAO Yan-fang³, LI Pei⁴

(1. Shandong Hydrology Bureau, Jinan, 250002, China; 2. Dongying Hydrology Bureau, Dongying, 257000, China; 3. Shandong Agricultural University, Tai'an, 271018, China; 4. Linyi Hydrology Bureau, Linyi, 276002, China)

Abstract: The source of urban water supply plays an important role in promoting the development of cities and solving the contradiction between supply and demand of water resources in cities. At present, there are 25 main water supply sources in main cities of Shandong province. The water quality of these sources in 2016 is evaluated by the comprehensive water quality index method. The seasonal Kendall test and the trend line analysis are carried out according to the water quality indicators and the water quality index WQI values of the 2007~2016 years, and the difference between two evaluation results is given. The trend of water quality in Shandong is also analyzed. The results show that the water quality of the water sources in Shandong is good. The water quality change trend of the water source area obtained by the two methods is similar. Using the two methods avoids the limitation of the single analysis method and they can complement and validate each other, making the evaluation reasonable and reliable.

Key words: Water supply source area; Seasonal Kendall test; Water quality index; Evolution trend