

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2018.03.02

应用非参数的 MK 和 ITA 方法分析地下水 水质参数变化特征 ——以新三矿含水层为例

黄丹¹, 刘再斌^{1,2}, 蒋勤明³

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 3. 冀中能源集团有限责任公司, 河北 邢台 054000)

摘要: 矿区地下水水质变化是影响矿区生态环境和矿井安全生产的制约因素之一, 正确认识水质变化趋势是首要任务。根据以往实测水质参数 pH、COD、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 的数据, 采用 Mann-Kendall 检验法(MK)和 Innovative Trend Analysis(ITA)探讨新三矿由上而下 6 个不同含水层水质参数随时间的演变规律, 并且针对不同的数值变化范围选用不同的 ITA 指数。通过比较, 两种方法结果有很好的 consistency, 结论认为: 相比 MK 检测法, 定量的 ITA 法拥有更多的优点, 可以图形化地表示分析结果, 可以通过将水质参数值分为低、中、高水平更好地分析水质参数的趋势和次要趋势; 8 种水质参数中, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 相较其他离子能表现出更显著的变化趋势; 6 种含水层中, 大青灰岩含水层中 Cl^- 浓度的低、中值下降而高值上升, 煤层顶板山西组砂岩含水层和底板奥陶系灰岩含水层大部分水质参数显著下降, 矿化度逐渐降低。

关键词: 矿井地下水; 水质参数; 变化特征; Mann-Kendall 检验; ITA 法; 新三矿

中图分类号: X832

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)03-0007-07

Application of non-parametric Mann-Kendall and innovative trend method analysis to groundwater quality parameters variation:

a case study from aquifers in Xinsankuang Coal mine

HUANG Dan¹, LIU Zaibin^{1,2}, JIANG Qinming³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;
2. Xi'an Research Institute Co., Ltd of China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an 710054,
China; 3. Jizhong Energy Group Co., Ltd., Xingtai, 054000, China)

Abstract: The change of groundwater quality is one of the restricting factors affecting mining area ecological environment, and of coal mine safety in production. It is the first priority to correctly understand the trend of water quality change. In this paper, based on the data of measured water quality parameters, pH, COD, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} and HCO_3^- , for comparison purposes, Mann-Kendall test method and a new trend method recently proposed by Sen called Innovative Trend Analysis were used to investigate the evolution rules with the time of the water parameters at six different aquifers (sandstone water, Yeqing limestone water, Shanqing limestone water, Fuqing limestone water, Daqing limestone water and Ordovician limestone water) in New Three coal mine. A quantitative measurement of a trend for ITA was adopted, moreover, different ITA indicators were used for different variation ranges. By comparison, the results of the two methods are in good agreement. Results show that the quantitative ITA has more advantages than the MK detection method, and can graphically represent the analysis result, and

收稿日期: 2017-09-22; 修回日期: 2017-12-11

基金项目: 中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金项目(2015XAYMS17); 国家重点研发计划项目(2017YFC0804102)

作者简介: 黄丹(1984-), 女, 河南遂平人, 博士研究生, 研究方向为水文学与水资源。

通讯作者: 刘再斌(1982-), 男, 江苏徐州人, 博士(后), 副研究员, 主要从事矿井水文地质研究工作。

can better analyze the water quality parameters by dividing the water quality parameter values into low, medium and high levels. Among the eight water quality parameters, Ca^{2+} and Mg^{2+} have more significant trends than other water parameters. Among the six aquifers, it is seen that while the Cl^- in Daqing limestone water have a decreasing trend for low and medium values, the high values has an increasing trend. For the seam roof sandrock aquifer and floor limestone water, most water quality parameters show significant decreasing trend, and salinity has the same trend.

Key words: mine groundwater; water quality parameters; variation characteristics Mann – Kendall trend test; Innovative trend analysis(ITA); New Three coal mine

1 研究背景

矿井地下水是矿区生态环境的一个重要组成部分,其水质状况与当地居民生活及矿井生产息息相关,而且,在自然和人类活动的影响下,矿区含水层水质参数也必然受到影响^[1]。由于人口增加、工农业污染、全球气候变化、温室气体及臭氧层的消耗以及其他各种原因引起的水资源压力增大,评估水质参数的演变趋势对地下水演化特征、合理利用水资源、识别矿井突水水源、井下器材的保护等都具有重要的理论和实际意义^[2-3]。

关于水质参数的趋势分析,国内外的许多学者大多采用了参数的和非参数的方法,例如回归分析法^[4]、MK 检验法^[5]、SR 检验法^[6]和小波分析法^[7]等。利用这些方法研究者可以得到大部分水质参数的趋势,比如径流量、pH、溶解氧、温度、电导率、生物耗氧量、化学耗氧量以及各种化学元素和化合物。KURUNC 等^[8]利用 EC、 Na^+ 、 K^+ 、 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和钠吸收率(SAR)的月记录数据研究 Yesilirmak 盆地的水质参数趋势变化以及突变规律。KISI 等^[9]通过比较 MK 检验法和改进趋势法对土耳其的克则勒尔马克河 1970 至 2010 年的 5 个站点进行水质参数研究,包括 pH、T、EC、 Na^+ 、 K^+ 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 B^{3+} 和流量 Q ,得出电导率是研究该河水质参数变化的关键参数之一。

在我国,王文科等^[10]针对人类活动影响下的地下水与地表水的水质演化的研究,对关中盆地地下水环境演化与可再生维持途径进行了研究,阐述了自然演化叠加人类活动所引起的水化学环境在不同时空尺度上的演变。刘冬青^[11]利用非参数检验研究水质变化趋势,王小焕等^[12]运用 R/S 法查明入、出库水质的未来变化趋势。此类相关研究使得地下水水化学参数变化趋势的研究方法不断丰富。

本文在收集峰峰矿区新三矿实测水化学资料的基础上,采用 ITA 法^[13](Innovative Trend Analysis)对砂岩水、野青灰岩水、山青灰岩水、伏青灰岩水、大

青灰岩水和奥陶灰岩水的水质参数进行分析,并将该方法以定量的形式(ITA 指数: D)应用在水质参数分析上,按照百分位数划分为低、中、高以图形的形式表示出来。然后,对 MK 检验以及 ITA 两种分析法的结果进行比较,得到最近 8 年的矿区含水层水质参数变化特征和趋势分析结果,为新三矿水资源保护合理利用提供依据。

2 研究区概况及数据来源

新三矿位于邯郸市西南部 45 km 处,地处太行山东麓,低丘陵垄岗地貌,井田内地表水系不发育,仅发育部分西南~北东向的冲沟,为雨季泄洪通道。半干旱大陆性季风气候,降水主要集中在 7、8 月份。隶属于邯邢水文地质南单元,矿区内地层由老到新为奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系、第三系和第四系地层,由下到上为奥陶系灰岩含水层(奥陶系灰岩水)、太原组大青灰岩含水层(大青灰岩水)、太原组伏青灰岩含水层(伏青灰岩水)、太原组山青灰岩含水层(山青灰岩水)、太原组野青灰岩含水层(野青灰岩水)、山西组砂岩含水层(砂岩水)。本文数据来源于矿方实测含水层,选用地下水中分布最广、含量较多的 7 种离子 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 以及 pH、COD 值。数据序列从 2009 至 2016 年,更新频率为每半年监测一次。其统计概况见表 1。

表 1 列出了 6 个含水层水质参数的数据范围、长度以及基本的统计量。由表 1 可以看出,砂岩水和野青灰岩水的 pH、山青灰岩水的 SO_4^{2-} 、伏青灰岩水的 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、大青灰岩水的 Cl^- 以及奥陶灰岩水的 COD 具有较高的偏度。地下水中一些主要的离子如 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 的浓度值,随着地质、气候和地形条件的变化是不断变化的。例如:含钾的岩石耐风化,所以 K^+ 一般出现在浓度较低的水中;COD 反映了水中受还原性物质污染的程度。

表 1 水质参数值统计概况

含水层	水质参数	数据长度/a	平均值/ (mg · L ⁻¹)	标准差/ (mg · L ⁻¹)	偏度系数	含水层	水质参数	数据长度/a	平均值/ (mg · L ⁻¹)	标准差/ (mg · L ⁻¹)	偏度系数
砂岩水	pH	16	8.13	0.17	1.42	野青灰岩水	pH	16	7.32	0.15	0.72
	COD	16	1.20	0.10	0.63		COD	16	3.10	0.14	1.70
	Na ⁺ + K ⁺	16	649.67	69.42	0.44		Na ⁺ + K ⁺	16	608.92	100.47	-0.68
	Ca ²⁺	16	38.39	26.29	0.34		Ca ²⁺	16	618.11	83.85	0.05
	Mg ²⁺	16	16.91	10.22	-0.19		Mg ²⁺	16	144.94	34.16	-0.03
	Cl ⁻	16	519.94	102.34	-0.19		Cl ⁻	16	657.40	60.92	-0.03
	SO ₄ ²⁻	16	168.92	38.66	-0.43		SO ₄ ²⁻	16	1800.09	195.31	-0.18
HCO ₃ ⁻	16	733.10	44.95	0.37	HCO ₃ ⁻	16	115.76	58.86	-0.10		
山青灰岩水	pH	15	7.25	0.20	0.17	伏青灰岩水	pH	15	7.72	0.48	0.41
	COD	15	7.37	0.25	0.84		COD	15	3.97	0.07	0.38
	Na ⁺ + K ⁺	15	1227.14	291.89	0.33		Na ⁺ + K ⁺	15	851.18	108.37	1.07
	Ca ²⁺	15	682.44	147.96	-0.63		Ca ²⁺	15	127.96	47.77	-0.25
	Mg ²⁺	15	312.64	111.25	0.57		Mg ²⁺	15	209.19	201.16	0.16
	Cl ⁻	15	1804.87	221.39	0.22		Cl ⁻	15	885.19	234.71	0.42
	SO ₄ ²⁻	15	1146.67	263.05	1.64		SO ₄ ²⁻	15	593.53	159.93	-0.47
HCO ₃ ⁻	15	100.86	43.72	0.86	HCO ₃ ⁻	15	421.21	37.67	-0.24		
大青灰岩水	pH	15	7.41	0.19	0.18	奥陶灰岩水	pH	16	7.38	0.25	0.95
	COD	15	5.47	0.29	-0.02		COD	16	0.81	0.06	-1.46
	Na ⁺ + K ⁺	15	871.81	111.50	-0.41		Na ⁺ + K ⁺	16	521.40	149.24	-0.22
	Ca ²⁺	15	472.04	126.72	0.52		Ca ²⁺	16	632.68	42.99	0.49
	Mg ²⁺	15	144.81	42.99	-0.63		Mg ²⁺	16	65.59	11.29	-0.06
	Cl ⁻	15	393.24	286.63	2.06		Cl ⁻	16	548.28	127.26	0.63
	SO ₄ ²⁻	15	1673.13	234.06	0.05		SO ₄ ²⁻	16	552.63	55.44	0.40
HCO ₃ ⁻	15	502.29	113.35	-0.46	HCO ₃ ⁻	16	484.20	144.21	-0.43		

3 研究方法

3.1 MK 检验法

Mann - Kendall 检验法是被世界气象组织承认的广泛应用于非参数型趋势检测方法,其优点是样本可以不服从正态分布,也不受少数异常值的干扰,一般用于水文、气象和一些非正态分布的时间序列的趋势分析及突变检验。基本公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{if } (x_j - x_i) > 0 \\ 0, & \text{if } (x_j - x_i) = 0 \\ -1, & \text{if } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_i 和 x_j 为在时间 i 和 j 时的数据值,且 $j > i$; n 为序列长度,且 $n > 10$ 。

$$\text{Var}(S) =$$

$$\frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^m t_k(t_k-1)(2t_k+5)}{18} \quad (3)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{if } S > 0 \\ 0, & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

在双边的趋势检验中,在给定的 α 置信水平上,如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则原假设是不可接受的,即在 α 置信水平上,时间序列数据存在明显的上升或下降趋势^[14]。文中采用三类显著性水平:0.01,0.05 和 0.1。

3.2 ITA 方法

相较于 MK 和 SR 检验法, ITA 并不要求数据是独立的或者是正态分布的, 该方法把时间序列分为 2~3 个部分, 并且每 1 个小部分按照升序排列。然后将 1:1 这条线也置于同样坐标系内, 如果时间序列靠近这条线并且不超过 10% 的差, 则认为该序列无增减趋势。若数据序列在 1:1 这条线上方或下方, 则认为该序列呈上升或下降趋势^[15]。文中将每一个参数的数值根据百分位数分为低、中、高 3 部分, 分别以 40 百分位数和 60 百分位数为界, 并根据 ITA 指数 D 来表征趋势增减性^[16], 见公式(5)。当数值变化范围较小但变化趋势对生活影响较大不能忽略时, 该指数值不足以清楚显示变化趋势, 这时可参考公式(6)。

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{10(y_i - x_i)}{\bar{x}} \quad (5)$$

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{100(y_i - x_i)}{\bar{x}} \quad (6)$$

4 水质参数特征分析结果与讨论

在做 MK 检验和 ITA 方法之前, 首先采用箱线图进行探索性分析, 它能反映数据的左或右偏态分布。箱线图由最小值、最大值、中值、上四分位数、下

四分位数、极值和异常值组成。

图 1(a~h) 是不同水质参数在砂岩水、野青灰岩水、山青灰岩水、伏青灰岩水、大青灰岩水和奥陶灰岩水(简称为砂岩、野青、山青、伏青、大青、奥陶)的箱线图, 可以看出大多数的参数显示或左或右的偏态, pH、COD、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 出现个别异常值, 基本位于最大值一侧, 各个含水层水质参数变化较大。

各个含水层的 MK 趋势检验结果见表 2, 包括每一个参数的 Z 值, 并与 90%、95% 和 99% 的双边置信水平的临界 Z 值进行了比较, 可以看出一些参数呈显著的上升或下降趋势, 一些则无趋势。

对于砂岩水, COD、 HCO_3^- 无统计意义上的显著趋势, 但是, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Cl^- 均呈显著下降趋势, pH 则呈显著上升趋势; 对于野青灰岩水, Mg^{2+} 呈显著下降趋势, Ca^{2+} 、 Cl^- 和 HCO_3^- 呈显著上升趋势; 山青灰岩水中 pH、 Ca^{2+} 和 Cl^- 均呈显著下降趋势; 伏青灰岩水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 均呈显著下降趋势, pH 则呈显著上升趋势; 大青灰岩水中 pH、COD、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 呈显著下降趋势; 对于奥陶灰岩水, pH 显著上升, Mg^{2+} 无显著趋势, 其余水质参数均呈显著下降趋势。

表 2 各水质参数在各含水层的 MK 趋势检验结果统计表

含水层	pH	COD	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
砂岩水	2.08**	-0.05	-3.47***	-1.76*	-2.61***	-1.85*	-1.58	0.95
野青灰岩水	-0.36	0.54	-1.22	2.57**	-3.61***	1.94*	-0.86	3.56***
山青灰岩水	-1.79*	1.19	0.69	-2.67***	-0.30	-2.77***	0.99	1.39
伏青灰岩水	1.64*	0.05	-0.94	-2.87***	-2.38**	-0.69	-2.08**	-1.39
大青灰岩水	-1.98**	-1.68*	0.00	-0.59	-3.17***	0.40	-3.27***	-3.42***
奥陶灰岩水	2.07**	-1.81*	-3.02***	-2.39**	-1.22	-2.21**	-2.48**	-1.71*

注: ***表示通过 99% 置信度检验; **表示通过 95% 置信度检验; * 通过 90% 置信度检验。

综上所述, 根据 MK 趋势检验, 6 个含水层一共有 28 个参数具有统计意义上的显著趋势, 6 个上升, 22 个下降。Z 的最大正值 3.56 为野青灰岩含水层的 HCO_3^- 离子, 显著上升; Z 的负值绝对值最大值为 3.61 出现在野青灰岩含水层的 Mg^{2+} 离子, 即显著下降。同时, 砂岩水中的 SO_4^{2-} 和伏青灰岩水中的 HCO_3^- 接近下降趋势, 山青灰岩水中的 HCO_3^- 接近上升趋势, 其变化趋势也值得注意。

各个含水层的每一个水质参数的 ITA 图反映了每一个参数在 6 个含水层的变化特征, 篇幅所限文

中仅显示了 6 个含水层的 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 和 HCO_3^- 含量趋势变化 ITA 的结果图(图 2,3)。其中 pH 和 COD 值域变化范围较小 D 值套用公式(6)。但这些趋势并不是一成不变的, 而是随着取样点、污染或者其他原因而发生改变。各含水层的每一个参数的变化均依照低、中、高分列于表 3。

图 2,3 中的每一个图表示将时间序列均分为两部分, 其中横坐标表示时间序列前半部分数据即 2009 年上半年至 2012 年下半年统计的该水质参数的浓度, 纵坐标表示时间序列后半部分数据即 2013

年上半年至 2016 年下半年统计的该水质参数的浓度;若时间序列长度为奇数则去掉最早的一个数据。通过表 3 及图 2、3 可以看出,虽然根据 MK 检验法有些参数无趋势,但是通过 ITA 方法可以看出明显的上升或下降趋势。对于砂岩含水层,Na⁺ + K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 两种方法都显示了相同的下降趋势,pH 均呈上升趋势。

野青灰岩含水层中,Na⁺ + K⁺、Mg²⁺ 呈下降趋势,而 Ca²⁺ 和 HCO₃⁻ 呈上升趋势,与 MK 检验法结果基本一致,但 Na⁺ + K⁺ 高值无增减趋势,Cl⁻ 中值明显上升。山青灰岩含水层中,pH、Ca²⁺、Cl⁻、HCO₃⁻ 两种方法都显示了相同的变化趋势,然而,HCO₃⁻ 低值无变化趋势而高值增加明显。对于伏青

灰岩含水层,Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻ 两种方法都显示下降趋势,pH 呈上升趋势。对于大青灰岩含水层,pH、Mg²⁺、SO₄²⁻、HCO₃⁻ 两种方法都显示下降趋势,Ca²⁺ 低值和中值与整体趋势均显示下降趋势但高值无趋势,Cl⁻ 呈上升趋势但低值和中值呈下降趋势,高值和整体变化趋势一致。对于奥陶灰岩含水层,COD、Na⁺ + K⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻ 两种方法整体下降,pH 均呈上升趋势。

总的来说,两种方法有显著趋势的参数个数一致,说明两种方法有很好的一致性。若要准确判断地下水水质参数变化趋势,仍需增加水质监测点位和提高时间分辨率,基于月或日的数据可能会得到更有价值的信息。

表 3 各水质参数在各含水层的 ITA 指数统计表

含水层	水质参数	D	低	中	高	含水层	水质参数	D	低	中	高
砂岩水	pH	2.60	0.75	1.62	4.20	野青灰岩水	pH	0.80	-0.32	0.82	1.65
	COD	3.40	0.28	1.70	6.15		COD	2.70	0.33	1.96	4.66
	Na ⁺ + K ⁺	-1.06	-0.92	-0.80	-1.22		Na ⁺ + K ⁺	-1.07	-2.34	-2.09	0.13
	Ca ²⁺	-5.37	-5.29	-5.70	-5.35		Ca ²⁺	1.40	0.81	1.85	1.74
	Mg ²⁺	-6.03	-6.89	-7.02	-5.14		Mg ²⁺	-2.66	-3.05	-3.18	-2.23
	Cl ⁻	-1.70	-2.25	-1.81	-1.25		Cl ⁻	0.97	0.89	1.35	0.93
	SO ₄ ²⁻	-1.69	-1.59	-3.38	-1.35		SO ₄ ²⁻	-0.21	0.01	-0.18	-0.39
HCO ₃ ⁻	0.14	0.52	0.55	-0.26	HCO ₃ ⁻	9.45	6.20	11.18	11.44		
山青灰岩水	pH	-3.80	-3.11	-4.73	-3.70	伏青灰岩水	pH	7.90	1.28	10.38	10.74
	COD	4.30	-0.69	5.67	6.69		COD	-0.72	-0.25	-1.13	-0.75
	Na ⁺ + K ⁺	-0.99	0.50	-2.05	-1.28		Na ⁺ + K ⁺	-0.21	-0.82	-1.19	0.86
	Ca ²⁺	-2.78	-3.65	-3.64	-1.63		Ca ²⁺	-4.30	-4.89	-5.21	-3.31
	Mg ²⁺	-1.65	-2.37	-2.79	-0.42		Mg ²⁺	-5.98	-1.18	-11.94	-5.19
	Cl ⁻	-1.93	-1.83	-1.96	-1.98		Cl ⁻	-1.90	-1.94	-2.21	-1.68
	SO ₄ ²⁻	2.02	-0.60	0.15	5.01		SO ₄ ²⁻	-3.23	-4.07	-4.39	-1.90
HCO ₃ ⁻	7.95	-0.54	9.16	12.8	HCO ₃ ⁻	-0.88	-1.10	-0.76	-0.81		
大青灰岩水	pH	-1.30	-1.61	-1.41	-1.07	奥陶灰岩水	pH	3.60	1.61	3.58	5.07
	COD	-0.10	-1.19	-0.46	0.92		COD	-6.10	-10.40	-3.59	-3.59
	Na ⁺ + K ⁺	0.59	-0.20	0.80	0.97		Na ⁺ + K ⁺	-3.17	-3.64	-4.18	-2.57
	Ca ²⁺	-1.59	-1.92	-2.71	-0.62		Ca ²⁺	-0.48	-0.44	-0.66	-0.47
	Mg ²⁺	-3.47	-4.45	-4.16	-2.35		Mg ²⁺	0.11	-0.31	0.15	0.41
	Cl ⁻	3.84	-4.89	-2.29	13.76		Cl ⁻	-2.52	-1.81	-2.73	-2.99
	SO ₄ ²⁻	-1.64	-1.48	-1.45	-1.88		SO ₄ ²⁻	-1.28	-1.05	-1.47	-1.4
HCO ₃ ⁻	-3.17	-3.93	-3.55	-2.41	HCO ₃ ⁻	-3.22	-4.09	-4.63	-2.21		

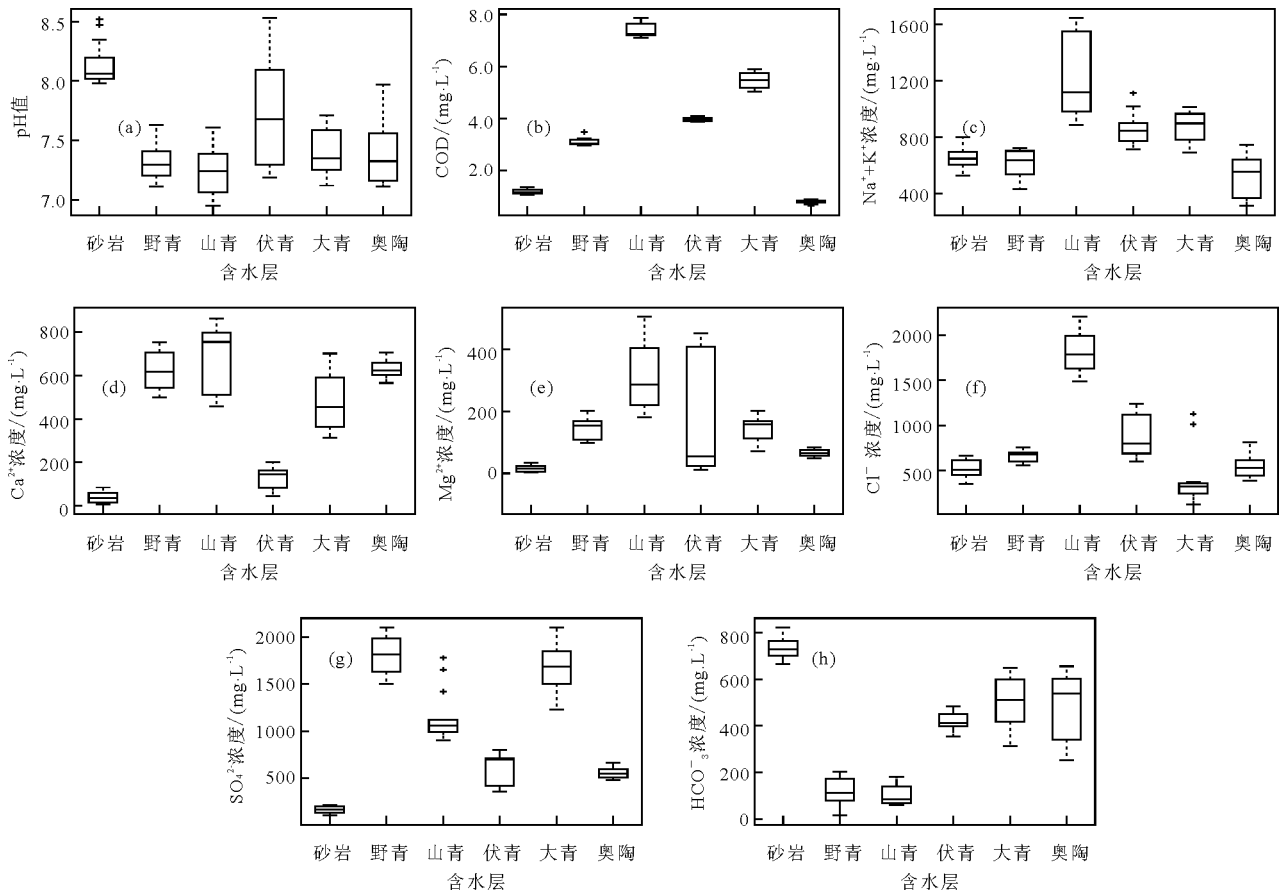


图1 8种水质参数值在6个含水层的箱线图

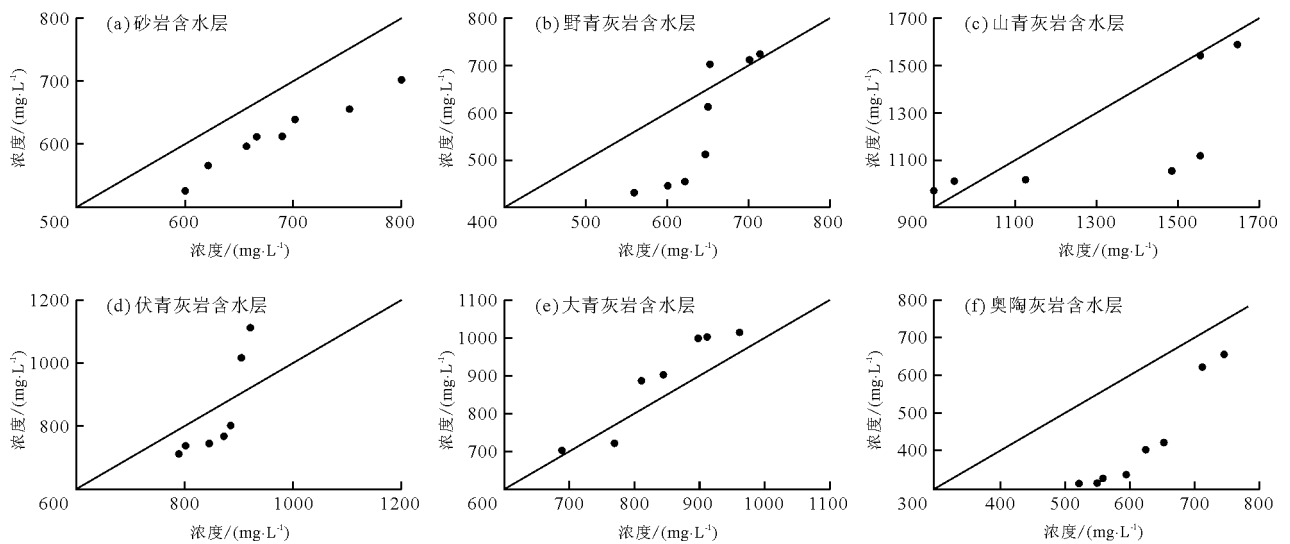


图2 Na⁺ + K⁺含量 ITA 结果图

5 结论

(1)通过对新三矿含水层水质参数进行趋势分析得出随着时间(2009 - 2016年)和含水层的不同,水质参数亦发生变化。Ca²⁺是对含水层水质变化最重要的参数之一,5/6的含水层均存在显著趋势,

Mg²⁺同样在多数含水层中为显著下降趋势,地下水的总硬度逐渐降低对新三矿的生产活动是一个非常重要的方面,并且其他参数与平均值相比大多在正常范围内。

(2)6个含水层中,奥陶灰岩水和顶板砂岩水大部分水质参数表现显著趋势,pH显著上升其余参数

显著下降,说明该含水层矿化度逐渐降低。作为煤层底板含水层的野青灰岩水, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 均显著

上升,但是中等程度 Cl^- 也有上升趋势,碳酸盐析出后矿化度可能上升,应密切关注该层水质变化情况。

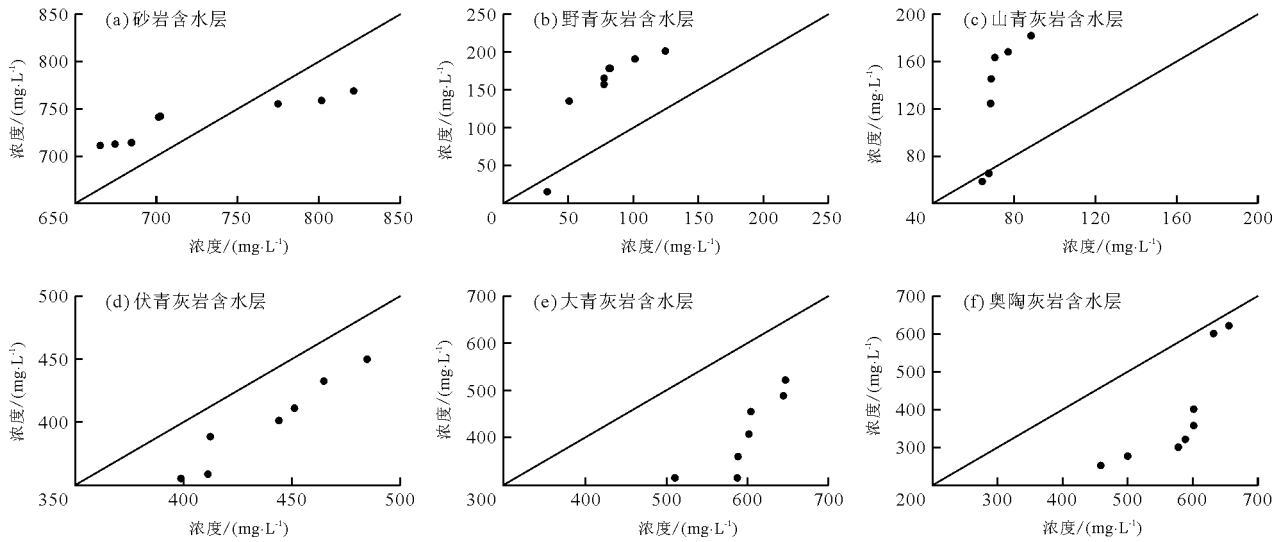


图3 HCO_3^- 含量 ITA 结果图

(3)将定量化的 ITA 指数 D 应用在水质分析上,并针对不同变化范围的时间序列采用不同的公式计算,结果显示,与 MK 检验法相比计算结果基本一致。

(4)虽然一些参数通过 MK 方法没有明显的趋势,但是借助于 ITA 可以通过图形的方式观测到一些隐性的次级趋势。相比 MK 趋势分析,ITA 方法以图像的方式更易于理解和计算,不需要一系列假设,它可以用更少的数据进行分析且允许数据有偏态,可以检测趋势变化中的低、中、高参数值不同阶段的微趋势,为水质参数趋势分析提供了更详细的方法。

参考文献:

- [1] WRIGHT I A, MCCARTHY B, BELMER N, et al. Subsidence from an underground coal mine and mine wastewater discharge causing water pollution and degradation of aquatic ecosystems[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2015, 226(10):348.
- [2] 孙一博,王文科,段磊,等. 关中盆地浅层地下水地球化学的形成演化机制[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(3):29-35.
- [3] 王心义,徐涛,黄丹. 距离判别法在相似矿区突水水源识别中的应用[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(8):1354-1358.
- [4] 魏征,吴彬,侯利军,等. 古尔班通古特沙漠地下水水质现状及变化趋势分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(4):175-179.
- [5] 舒媛媛,李娜,周维博. 澜河流域近50年径流量变化特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(1):102-105.
- [6] 何自立. 气候变化对流域径流的影响研究——以美国加州圣华金河上游源区为例[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- [7] 李琦. 渭河流域地下水对气候变化的响应研究[D]. 西安:长安大学, 2015.
- [8] KURUNC A, YUREKLI K, YURTSEVEN E. Determination of sudden changes in time series of yesilirmak river - durucasu water quality records[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2005, 5(1):122-126.
- [9] KISI O, AY M. Comparison of Mann - Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 513(5):362-375.
- [10] 王文科,王雁林,段磊等. 关中盆地地下水环境演化与可再生维持途径[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2006.
- [11] 刘冬青. 水质变化趋势的非参数检验研究[D]. 兰州:兰州财经大学, 2015.
- [12] 王小焕,邵景安,王金亮,等. 三峡库区长江干流入库水质评价及其变化趋势[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(2):554-565.
- [13] ŞEN Z. Innovative trend analysis methodology[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 17(9):1042-1046.
- [14] 刘梅. 我国东部地区气候变化模拟预测与典型流域水文水质响应研究[D]. 杭州:浙江大学, 2015.
- [15] ŞEN Z. Innovative trend methodologies in science and engineering[M]. New York:Springer International Publishing AG, 2017.
- [16] WU Hao, QIAN Hui. Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall and extreme values in Shaanxi, China, since the 1950s[J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 37(5):2582-2592.