

王 凯,郑秀清,贾振兴,等.基于 EOF 和 M-K 的晋祠泉域岩溶地下水水化学时空变化特征分析[J].中国岩溶,2018,37(5):690-697.
DOI:10.11932/karst20180506

基于 EOF 和 M-K 的晋祠泉域岩溶地下水 水化学时空变化特征分析

王 凯¹,郑秀清¹,贾振兴^{1,2},臧红飞¹

(1.太原理工大学水利科学与工程学院,太原 030024; 2.山西省水资源研究所,太原 030001)

摘 要:为研究晋祠泉域岩溶地下水水化学的时空变化规律,以 2001—2014 年该泉域内具代表性的岩溶水监测点水质资料为基础,以 pH 值、7 大主要离子及 TDS 作为因子,运用经验正交函数(EOF)分析与 Mann-Kendall(M-K)突变分析相结合的方法,对晋祠泉域 14 年的水化学场进行时空结构分离。结果表明:在空间分布特征上,pH 值由北向南逐渐减小,汾河中段以南出现低值区; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 TDS 的空间变化趋势相似,整体上均是由北向南逐渐增加,等值线在古交一带较周围地区升高; K^+ + Na^+ 和 Cl^- 含量在整个泉域普遍较低,但 K^+ + Na^+ 在泉域边界处的王封和西寨一带含量升高, Cl^- 在古交以及西华苑处增高。在时间演化特征上,从 2001—2014 年 pH 值、 Mg^{2+} 、 K^+ + Na^+ 、 HCO_3^- 和 Cl^- 含量基本在平均值上下波动; Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 含量逐年降低,且分别在 2008 年和 2009 年之后呈明显的下降趋势;TDS 在 2005—2007 年呈明显的下降趋势,在其它时段下降趋势不显著。

关键词:岩溶水水化学;时空变化特征;EOF;Mann-Kendall 突变分析;晋祠泉域

中图分类号:P641.3

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2018)05-0690-08

0 引 言

晋祠泉是山西省著名的岩溶大泉,自 20 世纪 60 年代以来,由于岩溶水大量开采及降雨量减少,泉水流量大幅度衰减。岩溶水位的变化以及人类活动必然会影响水化学场各要素的变化,研究岩溶地下水水化学的时空变化特征不仅可以揭示地下水现状及其与环境相互作用的形成机制,也可为地下水水质变化的预测提供科学依据^[1]。

地下水水化学的时空变化特征分析是研究区域地下水水化学场的重要途径。章光新等^[2]运用统计方法、离子比例系数和 Piper 三线图法,系统地研究了松嫩平原地下水水化学的时空演变规律。蒲俊兵等^[3]对重庆丰都雪玉洞地下河水和滴水的主要水化学指标进行监测,并分析了其时空变化规律。李霄等^[4]利用 Phreeqc 通过模拟方法进行水化学时空演

化规律分析。目前地下水水化学时空演化的研究成果多集中在浅层孔隙水,而对岩溶水的研究较少。由于岩溶地下水通常埋深较大,非均质性和各向异性显著,所以其水动力条件和水化学成分的形成与演化与孔隙水有很大差异。岩溶地下水系统的水化学场通常是由分布在不同位置的多个观测站点构成,如何从多年观测资料中,将水化学场的空间分布结构有效地分离出来给直接研究其时空变化特征带来了困难,经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析方法可以很好地解决这一问题。本文将该方法引入岩溶地下水水化学特征时空变化分析,旨在全面了解晋祠泉域岩溶水水化学的时空演化特点。

1 研究区概况

晋祠泉域位于山西省中部,太原盆地西北侧,总

基金项目:国家自然科学基金项目(41372247);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20131402110008)

第一作者简介:王凯(1990—),男,硕士研究生,研究方向为水文地质。E-mail:kaizi900223@163.com。

通信作者:郑秀清(1958—),女,教授,博士生导师,研究方向为水文地质、水资源与水环境。E-mail:zxq6818@sina.com。

收稿日期:2017-04-26

面积约 2 030 km²,全区干旱多风,降水集中,蒸发强烈。泉域全部属于黄河流域汾河水系,汾河自西向东穿过本区,在罗家曲镇池底和古交镇寺头村有两个渗漏段,全长 35 km。

区内地层从太古界到新生界均有出露,以汾河为界北面为奥陶系灰岩裸露区,该区裂隙岩溶发育,为良好的地下水补给区。受石千峰向斜的影响,汾河以南区域,中部上覆石炭二叠系碎屑岩。泉域东部和东南部边山断裂带附近,为石千峰向斜东翼,奥陶系灰岩埋深变浅,局部有灰岩出露。同时受到 NNE 向断裂带的影响,东南部奥陶系灰岩埋深较浅,岩溶发育。

区内岩溶含水岩组主要是奥陶系碳酸盐岩,其中奥陶系中统是主要的含水岩组。岩溶地下水系统的补给来源主要有两部分,一为汾河以北大片裸露灰岩区的降水补给,二为汾河渗漏补给。由于构造的控水作用,地下水流动复杂,在垂向上具有多层网络式散流运动,在水平上总体则由西北向东南流动,边山断裂带上盘形成了泉域的东部地下水强径流带。边山断裂带使得奥陶系灰岩直接与太原盆地内第三系、第四系细粒沉积物接触而形成阻水屏障,水位壅高形成晋祠泉等天然排泄点。除天然排泄外,泉域岩溶水的排泄方式还包括人工开采、向太原盆地潜流和矿坑排水。

2 研究方法

经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析方法最早由统计学家 Pearson 在 1902 年提出,20 世纪 50 年代中期 Lorenz 将其引入大气科学研究中。EOF 的优点是没有固定的函数,能在有限区域对不规则分布的站点进行分解,且展开收敛速度快,分离出的空间结构具有一定的物理意义,这些优点使 EOF 在气候诊断研究中得以充分应用。随着计算机技术的迅速发展,以 EOF 为特征分析手段的研究成果颇丰,揭示了许多有价值的气候变化事实,在气候预测^[5]、干旱分析^[6]、降雨^[7]、洪涝^[8]以及地学^[9]等学科中得到了非常广泛的应用。地学数据分析中通常特征向量对应的是空间样本,所以也称空间特征向量或者空间模态;主成分对应的是时间变化,也称时间系数。因此地学中也称 EOF 分析称为时空分解。

EOF 根据大量实测数据把变量场分解为只依赖于时间函数和只依赖于空间函数的乘积^[10-12]。设有 m 个空间点,每个空间点有 n 个不同时间的观测值,

每个数据表示为 $x_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n, x_j$ 为第 j 个实际空间场,其矩阵形式为:

$$X = (x_{ij}) = (x_1, x_2, \dots, x_j) = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

将矩阵分解为时间特征函数 Z 和空间特征函数(即特征向量) V 两部分,分别可以表征研究要素在时间上整体的变化波动情况以及各监测点在空间上的分布特性。其计算过程为求得矩阵 X 的特征值组成的对角矩阵 U 和特征向量 V ,其中矩阵 U 中对角线上的元素 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ 为 X 的特征值; V 由对应的特征向量 $v_1, v_2, \dots, v_m$ 组成,时间特征函数 $Z = V^T X$, V^T 为 V 的转置矩阵。然后将特征值按照从大到小的顺序排列,计算每个特征值对应特征向量的方差贡献 D_k 以及前 p 个特征向量的累积方差贡献率 G ,计算公式如下:

$$D_k = \lambda_k / \sum_{i=1}^m \lambda_i, G = \sum_{i=1}^p \lambda_i / \sum_{i=1}^m \lambda_i \quad (2)$$

得到的第 1 特征向量最能代表各变量变化的分布特征,第 2 特征向量次之^[13],以此类推,当前 p 个特征向量的累积方差贡献率达到 80% 时,说明这 p 个特征向量已经代表了原变量场 80% 的信息,基本能够反映变量场的主要特征。通过分析前 p 个空间特征函数,即可得到该变量在研究时期内的空间变化特征;根据前 p 个特征向量计算得到对应的时间特征函数,它是一个列向量,也称其为时间序列,可以体现出研究变量在时间上的变化特性。

Mann-Kendall(M-K)突变检验分析是一种非参数检验方法,其优点在于不需要变量遵循一定的分布,同时也不受异常值的干扰。经世界气象组织推荐该方法已广泛应用于大气、水文等变量的趋势和突变检测^[14-16]。其基本原理如下:

对样本数量为 n 的时间序列 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$,构造一秩序列:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i, k = 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

其中, $r_i = \begin{cases} 1, x_i > x_j, \\ 0, x_i \leq x_j, \end{cases} j = 1, 2, \dots, i;$

计算顺序时间序列对应的 UF_k 统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{var}(S_k)}}, k = 1, 2, 3, 4, \dots, n, \quad (4)$$

其中, $UF_1 = 0, E(S_k)$ 与 $\text{var}(S_k)$ 分别是 S_k 的均值与方差, $E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4}, \text{var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}$,

$k=2,3,4,\dots,n$ 。

计算时间序列在逆序情况下对应的顺序列 S_k ：

将 n 个样本的顺序时间序列 x 倒置, 变为 $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$, 重复(3)计算逆序顺序列 S_k 。

计算逆序时间序列对应的 UB_k 统计量：

按照 $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$ 逆序时间序列重复式(4), 同时令 $UB_k = -UF_k$ ($k=n, n-1, \dots, 1$), 其中 $UB_1=0$ 。

当给定显著性水平 α (本文取 $\alpha=0.05$) 时, 将 UF_k 和 UB_k 两个统计量序列曲线和显著性水平 α 临界值的两条直线均会在一张图上, 若 $|UF_i| > U_\alpha$,

则表明时间序列在这段期间存在显著的变化趋势, 当 UF 与 UB 在两临界值线之间相交时, 交点对应时间则为突变开始时间。

3 时空特征分析及结果讨论

本文分析研究的基础资料包括野外取样获得的岩溶水水质资料以及太原市晋祠泉域水资源管理处提供的岩溶地下水水质历史监测资料, 据此分析 7 大阴阳离子、pH 值以及 TDS 的时空变化规律。岩溶水样点分布见图 1。

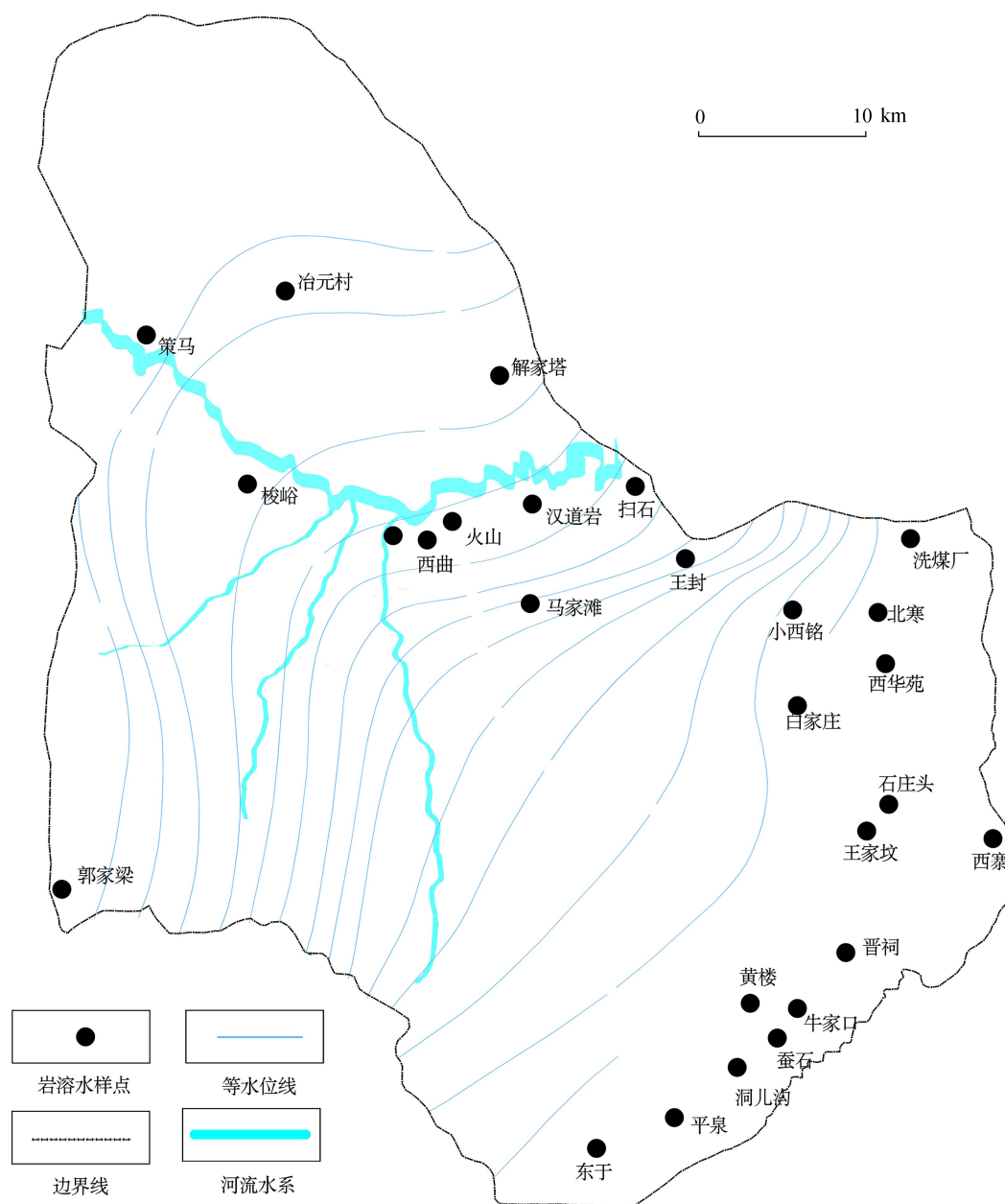


图 1 水样点分布图

Fig. 1 Water sample distribution map in Jinci spring area

3.1 地下水化学空间变化特征分析

晋祠泉域属于典型的北方岩溶水系统,由于地质构造和水文地质条件的差异,水化学场中各要素在泉域内的变化具有明显的区域性分布特征。利用 Matlab 软件根据式(1)~(2)对 2001—2014 晋祠泉域岩溶地下水的 7 大阴阳离子($K^+ + Na^+$ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^-)、pH 值以及 TDS 进行 EOF 分解,特征值及累计贡献率的计算结果见表 1。由表 1

可见,除 $K^+ + Na^+$ 外,其它分析要素的第 1 特征向量的方差贡献率均达到了 84% 以上; $K^+ + Na^+$ 的前 2 个特征向量的累积方差贡献率达到 91.94%,第 1 场型的方差贡献率为 77.67%,为主要场型。图 2 为各分析要素第 1 特征向量的空间分布特征图,图中各要素的第 1 特征向量均呈现正值,说明各要素含量在泉域内的空间变化趋势相同。

表 1 累积贡献率统计表

Table 1 Statistical table of cumulative contribution rate

	pH	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$K^+ + Na^+$	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	TDS
特征值	8.43E+03	2.29E+06	2.21E+05	4.49E+05	9.13E+06	2.75E+05	1.19E+07	6.47E+07
	3.33E+00	1.84E+04	2.28E+04	8.26E+04	7.36E+04	7.03E+03	2.04E+05	1.28E+06
贡献率 D_k	99.92	98.32	84.80	77.67	98.22	95.91	96.63	96.23
	0.04	0.79	8.76	14.28	0.79	2.45	1.65	1.90
累积贡献率 G	99.92	98.32	84.80	77.67	98.22	95.91	96.63	96.23
	99.96	99.11	93.56	91.94	99.02	98.36	98.28	98.13

由图 2 可知,pH 值的第 1 特征向量从西北部向南部逐渐减小,在山前排泄区由东北向南西逐渐减小,汾河北岸为高值区,古交及平泉一带为低值区,表明地下水由碱性水向酸性水过度。 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的空间分布规律相似,其含量均是由北向南呈现增大的趋势,在山前排泄区由东北向西南逐渐增大,汾河北岸为低值区,平泉处为高值区,汾河中段以南的古交地区较周围地区略高; $K^+ + Na^+$ 由西向东逐渐升高,大部分区域钾钠离子的含量均较低,只有在泉域边界处的王封和西寨一带含量较高。阴离子中 HCO_3^- 由西北向东南呈现逐渐升高的趋势,其含量在北部及中部地区含量均较低,然而在山前排泄区明显升高且趋势明显,高值区出现在西寨一带; SO_4^{2-} 的空间分布特征与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 相似,也是由西北向东南逐渐升高,其低值区为汾河北岸灰岩裸露区,高值区位于平泉一带; Cl^- 的空间分布在古交以及西华苑处呈现高值,在其他区域含量则较低。TDS 由北向南逐渐增大,平泉一带含量达到最高,汾河中段以南的古交地区含量较周围地区高。

晋祠岩溶地下水的水化学成分主要受自然演化以及人类活动两方面因素的影响。从上述各要素的空间分布特征及变化规律可以看出, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、

HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 的空间变化趋势相似,地下水流动过程中方解石、白云石以及石膏等矿物不断溶解,使这些离子含量由北向南逐渐增加;等值线在古交一带较周围地区升高,这是由于在该地区汾河地表水对岩溶含水层存在直接渗漏补给且补给量较大,含水层中水发生强烈地脉动,使矿物溶解明显加快。 Cl^- 的主要来源是生活废水,而岩石中吸附的钾钠离子被水中的钙镁离子置换是 $K^+ + Na^+$ 富集的主要原因。汾河中段以南 pH 值出现低值区是由于该区域存在多条断层,构造的破坏使不同层位的岩层出现渗水通道,使煤矿开采过程中酸性矿坑水涌入岩溶含水层;pH 值由北向南逐渐减小的变化原因是由于随着地下水的流动和含水层埋深逐渐加深,水循环交替作用越来越弱,水动力条件越来越差,地下水由氧化环境向还原环境转变。矿化的变化趋势与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 的变化趋势相似,表明这四种离子是影响该区 TDS 大小的主要因素, $K^+ + Na^+$ 以及 Cl^- 含量较低,对 TDS 影响不大。

3.2 地下水化学时间变化特征分析

利用 EOF 分解得到各要素随时间的变化曲线(图 3)。从图 3 可以看出各要素随时间的变化情况差异不明显,除 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 $K^+ + Na^+$ 在 2008 年出

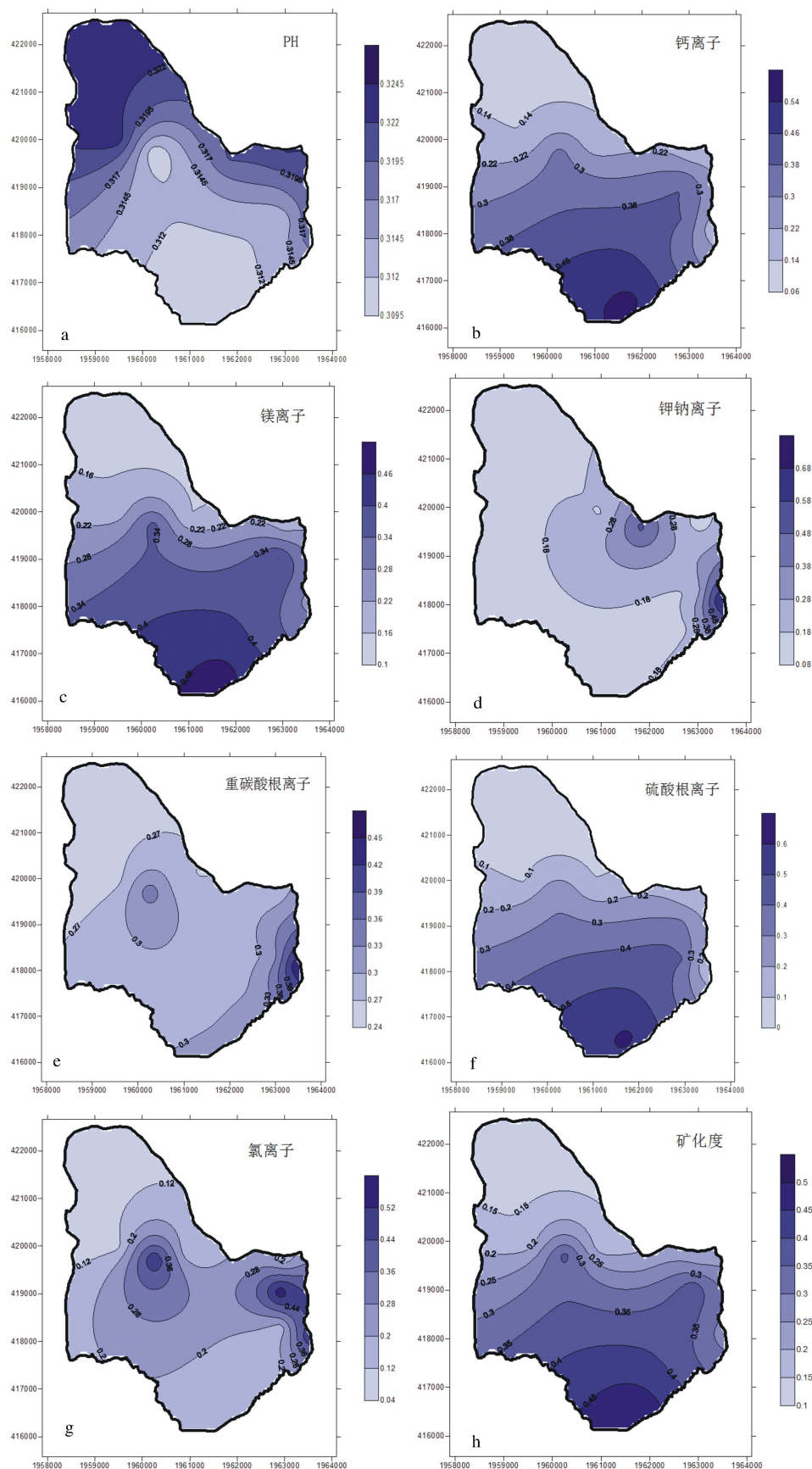


图 2 各分析要素第一特征向量空间分布图

Fig. 2 The spatial distribution map of first eigenvector for each analysis factors

现异常值外,其余要素从 2001 到 2014 年均呈现轻微波动变化。为了更好的分析各要素的时间变化趋势,对得到的第一主成分进行 Mann-Kendall 突变检验分析, Mann-Kendall 分析统计量曲线见图 4。图中 UF 为按时间正序列构造的统计量, UB 为按时间逆序列构造的统计量,二者均服从标准正态分布,给定显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

由图 4 可知, pH 值、 Mg^{2+} 、 $K^{+}+Na^{+}$ 、 HCO_3^{-} 、 Cl^{-} 的 UF 统计量和 UB 统计量均在 0.05 显著水平线之间,说明 pH 值、 Mg^{2+} 、 $K^{+}+Na^{+}$ 、 HCO_3^{-} 、 Cl^{-} 在 2001—2014 年间,其含量虽有升降趋势,但基本上在平均值上下波动,其中 pH 值呈上升趋势; Mg^{2+} 含量基本不变; $K^{+}+Na^{+}$ 呈下降趋势; HCO_3^{-} 在 2006 年之前呈上升趋势, 2006 年之后逐渐下降; Cl^{-} 在 2004—2006 年有所降低,其余时间段均呈升高趋势。 Ca^{2+} 的 UF 统计量曲线均小于 0, 在 2008 年曲线超出 0.05 显著水平, UB 线与 UF 线在 2005 年处相交,表明 Ca^{2+} 含量逐年降低,在 2008 年之前变化不明显, 2008 年之后呈明显的下降趋势,突变开始于 2005 年。 SO_4^{2-} 的 UF 线在 0 值以下, 2009 年处超出 0.05 显著水平线,与 UB 线在 2006 年处相交,表明 SO_4^{2-} 从 2001—2014 年呈下降趋势, 2009 年之前趋势不是很明显, 2009 年之后发生突变呈明显的下降趋势,突变开始于 2006 年。 TDS 的 UF 线在 2005—2007 年超出 0.05 显著水平线,呈明显下降,其余时间均在 0 值线以下和显著水平之间,下降趋势不明显。

4 结 论

在空间分布特征上,泉域各水化学指标由北向南呈现出一定的规律性,体现了自然演化规律和人类活动的双重影响。总体上看, pH 值由北向南逐渐减小, TDS、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^{-} 、 SO_4^{2-} 的空间变化趋势相似, $K^{+}+Na^{+}$ 和 Cl^{-} 含量在整个泉域普遍较低,整体上均是自北向南逐渐增加。

从时间演化特征上来看, pH 值、 Mg^{2+} 、 $K^{+}+Na^{+}$ 、 HCO_3^{-} 、 Cl^{-} 从 2001 年到 2014 年间,其含量基本在平均值上下波动; Ca^{2+} 含量总体上逐年降低, 2008 年之后呈明显的下降趋势; SO_4^{2-} 含量亦逐年下降, 2009 年之后呈明显的下降趋势; TDS 在 2005 年到 2007 年明显下降,其他时间则变化不明显。

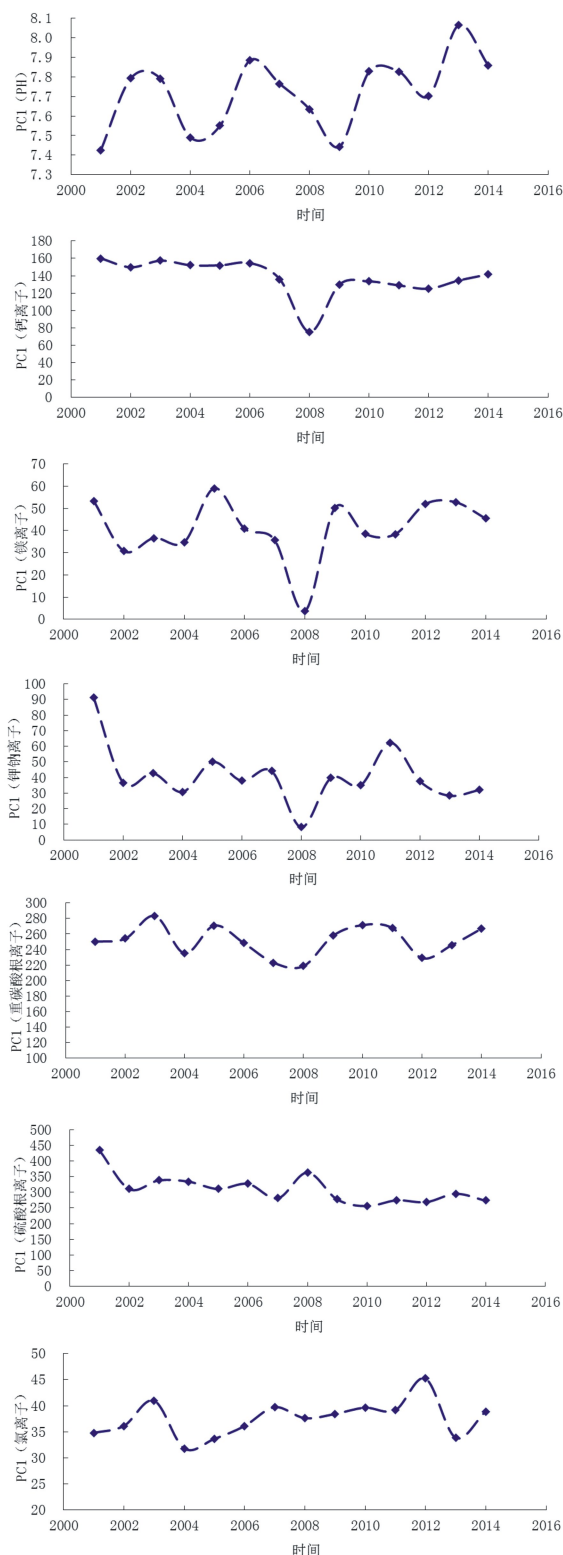


图 3 各分析要素第一时间系数曲线图

Fig. 3 The first time coefficient curve for each analysis factors

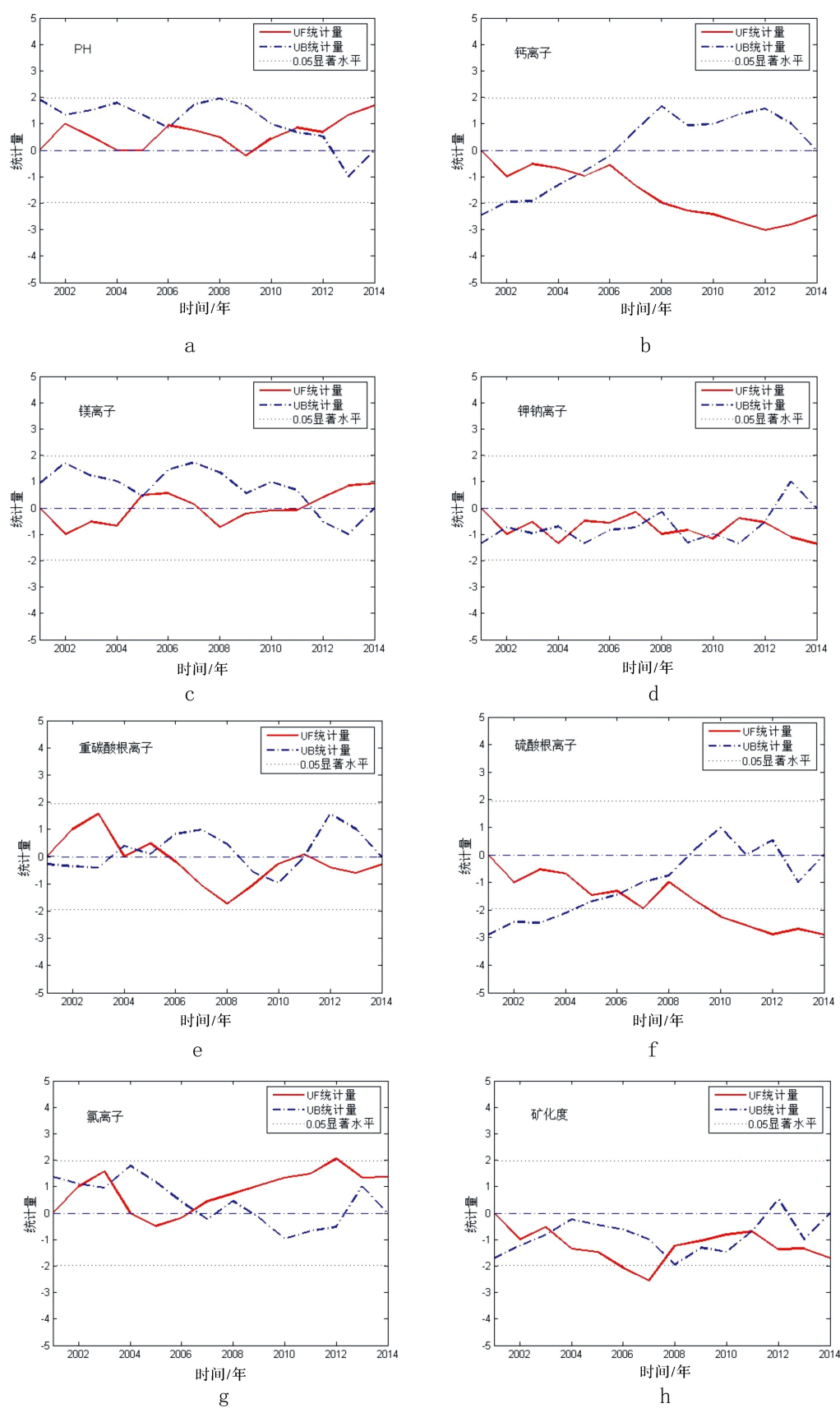


图 4 各分析要素第一时间序列的 Mann-Kendall 统计量曲线图

Fig. 4 The Mann-Kendall statistical curve of first time coefficient for each analysis factors

本文将经验正交函数分解方法应用于岩溶地下水水化学时空变化的分析研究中,从大量数据中深度挖掘了研究区水化学场的时空变化规律,表明该方法在岩溶水水化学时空变化特征的分析中具有一定的实用价值。

参考文献

- [1] 苗迎,孔祥胜,宋朝静. 南宁市区地下水水化学特征及形成机制[J]. 中国岩溶, 2015, 34(3): 228-233.
- [2] 章光新,邓伟,何岩,等. 中国东北松嫩平原地下水水化学特征与演变规律[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 20-28.
- [3] 蒲俊兵,沈立成,王翔宇,等. 重庆丰都雪玉洞水文地球化学指标的时空变化研究[J]. 中国岩溶, 2009, 28(1): 49-54.
- [4] 李霄,林学钰,都基众,等. 齐齐哈尔市潜水水化学演化规律分析[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 815-827.
- [5] 徐桂玉,杨修群. 中国南方冰雹气候特征的三维 EOF 分析[J]. 热带气象学报, 2002, 18(4): 383-392.
- [6] Limsakul A, Paengkaew W, Kummueang A, et al. PDSI-Based Variations of Droughts and Wet Spells in Thailand: 1951-2005 [J]. EnvironmentAsia, 2011, 4(1): 12-20.
- [7] Yu H L, Lin Y C. Analysis of space-time non-stationary patterns of rainfall- groundwater interactions by integrating empirical orthogonal function and cross wavelet transform methods [J]. Journal of Hydrology, 2015, 525: 585-597.
- [8] 王新龙,钟平安,万新宇,等. 淮河流域洪涝时空分布规律[J]. 水电能源科学, 2013, 31(3): 45-49.
- [9] 夏非,张永战,吴蔚. EOF 分析在海岸地貌与沉积学研究中的应用进展[J]. 地理科学进展, 2009, 28(2): 174-186.
- [10] 崔笃信,刘文义. 经验正交函数分解在地壳垂直形变场分析中的应用[J]. 地震, 2000, 20(3): 82-86.
- [11] Singh C V. Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis of monsoon rainfall and satellite-observed outgoing long-wave radiation for Indian monsoon: a comparative study[J]. Meteorology and atmospheric physics, 2004, 85(3): 227-234.
- [12] Hisdal H, Tallaksen L M. Estimation of regional meteorological and hydrological drought characteristics: a case study for Denmark[J]. Journal of Hydrology, 2003, 281(3): 230 - 247.
- [13] 孙崇智,梁骏,王超球,等. 基于 EOF 分析的广西酸雨时空分布特征研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(7): 4306-4308.
- [14] 张永勇,张士锋,翟晓燕,等. 三江源区径流演变及其对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 71-82.
- [15] 年雁云,王晓利,蔡迪花. 黑河流域下游额济纳三角洲气候及生态环境变化分析[J]. 干旱气象, 2015, 33(1): 28-37.
- [16] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.

Analysis on temporal and spatial variation characteristics of karst groundwater hydrochemistry in Jinci spring area based on EOF and M-K Models

WANG Kai¹, ZHENG Xiuqing¹, JIA Zhenxing^{1,2}, ZANG Hongfei¹

(1. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

2. Shanxi Institute of Water Resources, Taiyuan, Shanxi 030001, China)

Abstract In order to study the temporal and spatial variation of karst groundwater hydrochemistry in Jinci spring area, based on the water quality data of representative monitoring points of karst groundwater in the study area from 2001 to 2014, pH, the seven major ions (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) and TDS were selected as the factors for the water quality assessment. The methods combining Empirical Orthogonal Function (EOF) decomposition with Mann-Kendall (M-K) mutation analysis were used to separate the temporal and spatial structure of 14 years' hydrochemistry fields in Jinci spring area. The results show that, (1) In terms of spatial distribution, pH decrease from north to south in Jinci spring area, the low value region appears in the south of middle reaches of Fenhe River. The spatial variation trends of Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} and TDS are similar to that of the pH values, which gradually increase from north to south, and the contour line of high value appears in Gujiao region. Although the contents of $K^+ + Na^+$ and Cl^- are generally low in the whole spring area, the contents of $K^+ + Na^+$ are relative high in Wangfeng and Xizhai areas at the boundary of the spring area, and the content of Cl^- increase in Gujiao and Xihuayuan area. (2) In terms of temporal evolution, from 2001 to 2014, the contents of pH, Mg^{2+} , $K^+ + Na^+$, HCO_3^- and Cl^- fluctuated in the mean value. The contents of Ca^{2+} and SO_4^{2-} decreased yearly, and showed a obviously downward trend after 2008 and 2009. TDS showed a significant downtrend from 2005 to 2007, while the downward trend was not remarkable at other periods.

Key words karst water hydrochemistry, temporal and spatial variation characteristics, EOF, Mann-Kendall mutation analysis, Jinci spring area

(编辑 张 玲)