

陈陆望,许冬清,殷晓曦,等. 华北隐伏型煤矿区地下水化学及其控制因素分析——以宿县矿区主要突水含水层为例[J]. 煤炭学报,2017,42(4):996-1004. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0685

Chen Luwang, Xu Dongqing, Yin Xiaoxi, et al. Analysis on hydrochemistry and its control factors in the concealed coal mining area in North China: A case study of dominant inrush aquifers in Suxian mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 996-1004. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0685

华北隐伏型煤矿区地下水化学及其控制因素分析

——以宿县矿区主要突水含水层为例

陈陆望,许冬清,殷晓曦,谢文萍,曾文

(合肥工业大学 资源与环境工程学院,安徽 合肥 230009)

摘要:采用宿县矿区主要突水含水层四含、煤系、太灰地下水样常规离子(K^+Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-})、pH值、TDS等数据,利用离子组合比和主成分分析方法探讨了水化学成分的形成机制,进一步通过研究主成分荷载得分与水化学类型的空间分布规律,分析了矿区地下水水化学形成及其控制因素。研究表明:宿县矿区主要突水含水层水化学数据差异是不同地下水化学成分形成作用的综合反映,其中煤系以阳离子交替吸附或脱硫酸作用最为显著,而四含、太灰以黄铁矿氧化或碳酸盐、硫酸盐溶解作用最为显著。宿县矿区采矿活动与地质背景条件不同程度地影响了主要突水含水层水化学成分形成作用与水化学类型的空间分布,其中四含主要受采矿活动控制,煤系主要受断裂(层)控制,太灰主要受采矿活动、断裂(层)与褶皱控制。

关键词:煤矿区;常规离子;水化学成分形成作用;水化学类型

中图分类号:TD74

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2017)04-0996-09

Analysis on hydrochemistry and its control factors in the concealed coal mining area in North China: A case study of dominant inrush aquifers in Suxian mining area

CHEN Lu-wang, XU Dong-qing, YIN Xiao-xi, XIE Wen-ping, ZENG Wen

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Based on the data such as the conventional ions (K^+Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-}), pH, TDS in dominant inrush aquifers including the fourth aquifer of unconsolidated formation, the fissured aquifer of coal measure and the karst aquifer of Taiyuan formation in the Suxian mining area, the ion ratio and the principal component analysis are combined and used to discuss the hydrochemical formation. Besides, the control factors of hydrochemical formation are further studied by observing the spatial distributions of principal component loading scores and hydrochemical types. The results show that the difference of hydrochemistry in the dominant inrush aquifers comprehensively reflects the different hydrochemistry actions in the Suxian mining area. The fissured aquifer is characterized by the cation exchange and adsorption or the sulfate reduction while the fourth aquifer and the karst aquifer are characterized by the pyrite oxidation or the carbonate and sulfate dissolution. The hydrochemical formation and hydrochemical type are effected by the mining activity and the geological background in various degree in the Suxian mining area. Obviously,

收稿日期:2016-05-24 修回日期:2016-08-31 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41372244)

作者简介:陈陆望(1973—),男,湖北蕲春人,教授,硕士生导师。Tel:0551-62901524, E-mail:luwangchen8888@163.com。通讯作者:许冬清(1991—),女,江苏南通人,硕士研究生。E-mail:jsntxdq@163.com

the fourth aquifer is controlled by mining activity, the fissured aquifer is controlled by faults and the karst aquifer is controlled by mining activity, faults and folds.

Key words: coal mining area; conventional ion; hydrochemical formation; hydrochemical type

我国华北隐伏型煤矿区地下水系统往往是由多类含水层构成的,且含水层间普遍存在不同程度的水力联系^[1]。在采矿活动等的影 响下,地下水系统输入、输出与系统结构势必发生改变,以致水文地质条件复杂化,煤矿突水事故频繁发生。为了“预测预报”突水,一些研究者另辟蹊径,通过捕捉突水预兆期内的水化学信息,从简单水质类型对比、标型组分识别、多元统计或非线性分析等方法识别突水水源类型,构建水源识别模型^[2-7]。此类成果只是把主要突水含水层地下水系统看作孤立含水层的简单组合,注重单一含水层的静态水化学场,很少从时空角度考虑地下水循环条件改变而导致的水化学变化,以致水源识别模型在煤矿后续生产过程中的适用性受到限制。而更甚者,华北型煤矿区地下水系统由于长期经受采矿扰动,地下水水质严重恶化,其引发的一系列新的生态环境问题亟待解决^[8-9]。

传统水化学研究一般热衷于分析特定地区水化学数据在天然或人为因素影响下的变化,进而揭示研究区不同循环深度下的水化学特征^[10-11]。然而,相关研究牵涉的数据量大且纷繁复杂,故多元统计学方法应用于水化学研究备受青睐。Güler 等通过多元统计联合水化学图解法对大量水化学数据进行了水化学分类^[12]; Cloutier 等运用多元统计中的系统聚类与主成分分析法分析了加拿大 Quebec 古生界 Basses-Laurentides 沉积砂岩地下水系统水化学演化规律^[13]; Laaksoharju 等通过多元统计中的主成分分析法分析了研究区不同时期积累下来的大量水化学数据,建立了由不同补给端元确定的地下水混合比的计算模型^[14]。但是,此类研究成果过于关注研究区水化学表观数据,未从水化学成分的形成作用入手阐明研究区水化学环境演化的本质,更未深入探讨水化学环境演化与人类工程活动和地质背景之间的联系及其联系程度等。

本次研究以安徽淮北煤田宿县矿区为研究示范,在该矿区主要突水含水层地下水样常规离子多元统计分析的基础上,结合离子组合比分析,揭示矿区地下水化学成分的形成作用,阐明水化学形成的控制因素。研究成果有望为华北隐伏型煤矿区矿井水害防治及地下水资源开发利用提供理论支持。

1 地质背景

安徽淮北煤田宿县矿区是华北隐伏型煤田的

重要组成部分,处于华北古大陆板块东南缘,豫淮坳褶带东部,徐宿弧形推覆构造南端。早期矿区先后发育有两条近东西向的深大断裂,分别为:北侧边界宿北断裂和南侧边界板桥断裂(图1),两者在矿区内延伸分别为13 km和36 km,落差均大于1 km。燕山期矿区构造集中发育,先有SEE—NWW向挤压应力形成了近南北轴向的宿南背斜和宿南向斜,再有东侧及南侧挤压应力以及郟庐断裂带左行平移,形成一系列断裂(层)及褶皱。典型断裂(层)有矿区东南侧边界固镇长丰断裂(矿区内延伸约16 km,落差>1 km)、东北侧边界东三铺断层(矿区内延伸约18 km,落差>1 km)、西侧边界南坪断层(矿区内延伸约38 km,落差>1 km),以及矿区内西寺坡逆冲断层(矿区内延伸约22 km,落差>0.33 km)和双堆断层(矿区内延伸约30 km,落差>1 km),典型褶皱主要有宿东向斜。已有研究资料表明宿县矿区周围的断裂构造控制了该区地下水循环条件,使其基本上形成了一个封闭半封闭水文地质单元^[15]。

宿县矿区具有华北隐伏型矿区典型沉积地层及含煤地层,地质钻探结果显示宿县矿区主要发育寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系以及第四系地层,主要含煤地层为石炭系和二叠系,其中含煤地层被新生界松散层全覆盖。根据地层的岩性、厚度、含水空间及埋藏条件,矿区主要突水含水层自上往下分别为:①松散层第4含水层(以下简称“四含”);②二叠系煤系砂岩裂隙含水层(以下简称“煤系”);③石炭系太原组岩溶裂隙含水层(以下简称“太灰”);④奥陶系岩溶裂隙含水层(以下简称“奥灰”),由于奥灰缺少水化学资料,暂不研究。其中四含直接覆盖在煤系及太灰、奥灰之上,与下伏含水层发生一定的水力联系,主要突水含水层共同构成具有不同程度水力联系的复杂地下水系统。

宿县矿区境内煤矿集中,主要包括钱营孜矿、邹庄矿、桃园矿、祁东矿、祁南矿、芦岭矿和朱仙庄矿等,自投入生产以来,积累了丰富的地质、水文地质资料,具有研究的典型性。

2 水化学数据

收集与整理了宿县矿区钱营孜、邹庄、桃园、祁东、祁南、芦岭和朱仙庄等矿主要突水含水层(四含、

煤系、太灰)1970—2014年地下水样的常规离子以及pH值、矿化度(TDS)等数据,其中常规离子主要包括 $K^+ + Na^+$ (由于 K^+ 含量少且与 Na^+ 化学性质相似,以 Na^+ 代替), Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} 。水样

数合计218个,其中2010年前各类含水层水样44个(用作对比分析),2010—2014年四含水层48个,煤系水样96个,太灰水样30个。2010—2014年水样点分布如图1所示。

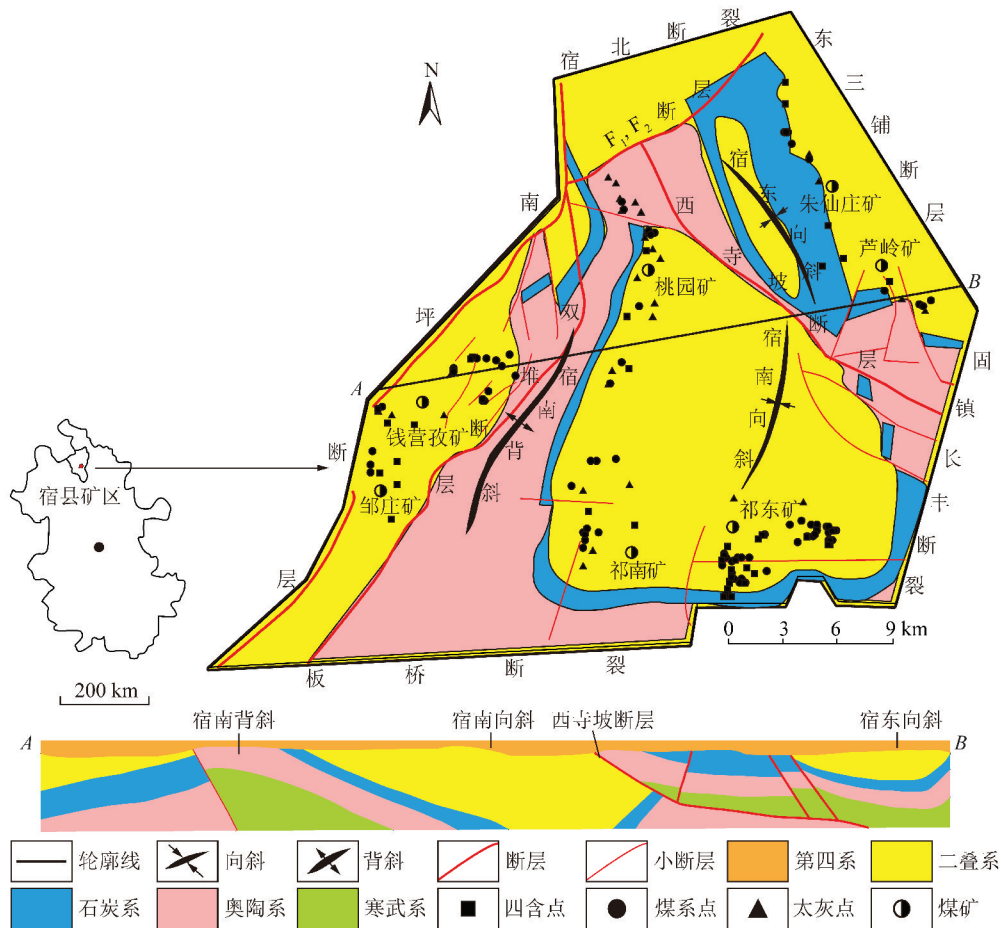


图1 宿县矿区地质及采样点分布

Fig. 1 Distribution of geology and sampling points in the Suxian mining area

通过对宿县矿区2010—2014年174个水样进行统计,得地下水样水化学指标,见表1,其中变异系数为标准差与平均值的比值,反映单位均值上的离散程度。宿县矿区地下水总体呈碱性,四含、煤系、太灰pH均值分别为7.81,8.51,7.79,其中煤系pH均值最高;TDS均值分别为1732.82,1426.44,1836.35 mg/L,均为中等矿化度水。宿县矿区地下水阳离子均以 Na^+ 为主,煤系较四含、太灰更为富集 Na^+ ;阴离子四含、太灰以 SO_4^{2-} 为主,煤系以 HCO_3^- 为主。宿县矿区3个主要突水含水层阳离子质量浓度关系均为 $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$,四含、太灰阴离子质量浓度关系均为 $SO_4^{2-} > HCO_3^- > Cl^-$,煤系阴离子质量浓度关系为 $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$ 。常规离子变异系数大于0.5的,四含有 Na^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- ,煤系有 Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- ,太灰有 Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} 。常规离子变异系数越大,其在水化学组成中越不稳定,是不

同地下水化学成分形成作用的综合反映。

3 讨 论

3.1 水化学成分形成作用

3.1.1 离子组合比分析

离子组合比可用来探究水化学成分形成作用及离子来源^[16]。 Cl^- 在地下水中相对稳定, $\rho(Na^+)/\rho(Cl^-)$ 常用来揭示 Na^+ 的来源。盐岩溶解生成的 $\rho(Na^+)/\rho(Cl^-) = 1$,由图2(a)可以看出,随着TDS的增加,宿县矿区大部分水样 $\rho(Na^+)/\rho(Cl^-) > 1$,说明盐岩溶解不是矿区地下水 Na^+ 的惟一来源;特别是煤系水 $\rho(Na^+)/\rho(Cl^-)$ 远大于1,由于 Ca^{2+} , Mg^{2+} 吸附于颗粒表面的能力强于 Na^+ ,地下水在以静储量为主的煤系含水层中存在阳离子交替吸附作用从而更加有利于TDS增加过程中的 Na^+ 富集;四含与太灰含水层中的阳离子交替吸附作用相对煤系含水层较弱。

表1 宿县矿区2010—2014年地下水水样水化学指标统计

Table 1 Statistical result of hydrochemical indexes for groundwater samples in the Suxian mining area in 2010—2014

指标	四含			煤系			太灰		
	平均值	标准差	变异系数	平均值	标准差	变异系数	平均值	标准差	变异系数
pH	7.81	0.49	0.06	8.51	0.43	0.05	7.79	0.46	0.06
TDS/(mg·L ⁻¹)	1 732.82	737.15	0.43	1 426.44	784.05	0.55	1 836.35	844.85	0.46
$\rho(\text{Na}^+)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	347.40	201.99	0.58	490.99	210.80	0.43	355.38	176.10	0.50
$\rho(\text{Ca}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	131.28	59.65	0.45	24.17	37.68	1.56	150.96	104.26	0.69
$\rho(\text{Mg}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	82.94	36.08	0.44	22.31	37.22	1.67	86.43	50.26	0.58
$\rho(\text{Cl}^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	226.94	51.62	0.23	191.37	71.74	0.37	239.89	69.60	0.29
$\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	731.25	555.36	0.76	328.84	559.42	1.70	794.64	600.53	0.76
$\rho(\text{HCO}_3^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	415.74	276.78	0.67	662.22	411.53	0.62	409.19	107.99	0.26

如果地下水中的 Ca²⁺, Mg²⁺ 主要来源于碳酸盐、硫酸盐的溶解, 则有 $[\rho(\text{Ca}^{2+}) + \rho(\text{Mg}^{2+})] / [\rho(\text{SO}_4^{2-}) + 0.5\rho(\text{HCO}_3^-)] = 1$ [17], 由图 2(b) 可以看出, 宿县矿区一部分水样落在 $[\rho(\text{Ca}^{2+}) + \rho(\text{Mg}^{2+})] / [\rho(\text{SO}_4^{2-}) + 0.5\rho(\text{HCO}_3^-)] = 1$ 线及其附近, 可知碳酸盐、硫酸盐的溶解不是矿区地下水 Ca²⁺, Mg²⁺ 唯一来源, 四含、太灰特别是煤系水 $[\rho(\text{Ca}^{2+}) + \rho(\text{Mg}^{2+})] / [\rho(\text{SO}_4^{2-}) + 0.5\rho(\text{HCO}_3^-)]$ 明显小于 1, Ca²⁺, Mg²⁺ 势必有其他来源, 从而说明上述阳离子交替吸附作用的存在具有合理性。当 Ca²⁺, Mg²⁺ 与 SO₄²⁻ 主要来源于硫酸盐的溶解时有 $[\rho(\text{Ca}^{2+}) + \rho(\text{Mg}^{2+})] / \rho(\text{SO}_4^{2-}) = 1$, 由图 2(c) 可以看出, 宿县矿区地下水相对较多的水样落在 $[\rho(\text{Ca}^{2+}) + \rho(\text{Mg}^{2+})] / \rho(\text{SO}_4^{2-}) = 1$ 线及其附近, 说明

硫酸盐的溶解不是矿区地下水 Ca²⁺, Mg²⁺ 与 SO₄²⁻ 的唯一来源; 当 $[\rho(\text{Ca}^{2+}) + \rho(\text{Mg}^{2+})] / \rho(\text{SO}_4^{2-}) > 1$, Ca²⁺ 与 Mg²⁺ 有其他来源, 如碳酸盐的溶解作用; 当 $[\rho(\text{Ca}^{2+}) + \rho(\text{Mg}^{2+})] / \rho(\text{SO}_4^{2-}) < 1$, SO₄²⁻ 有其他来源, 如黄铁矿氧化作用。当 Ca²⁺, Mg²⁺ 与 HCO₃⁻ 主要来源于碳酸盐的溶解时有 $[\rho(\text{Ca}^{2+}) + \rho(\text{Mg}^{2+})] / 0.5\rho(\text{HCO}_3^-) = 1$ [17], 由图 2(d) 可看出, 宿县矿区地下水大部分水样 $[\rho(\text{Ca}^{2+}) + \rho(\text{Mg}^{2+})] / 0.5\rho(\text{HCO}_3^-)$ 明显大于 1 或小于 1, 碳酸盐的溶解不是矿区地下水 Ca²⁺, Mg²⁺ 与 HCO₃⁻ 的唯一来源; 当 $[\rho(\text{Ca}^{2+}) + \rho(\text{Mg}^{2+})] / 0.5\rho(\text{HCO}_3^-)$ 大于 1, Ca²⁺ 与 Mg²⁺ 有其他来源, 如硫酸盐的溶解作用; 当 $[\rho(\text{Ca}^{2+}) + \rho(\text{Mg}^{2+})] / 0.5\rho(\text{HCO}_3^-) < 1$, HCO₃⁻ 有其他来源, 如脱硫酸作用。

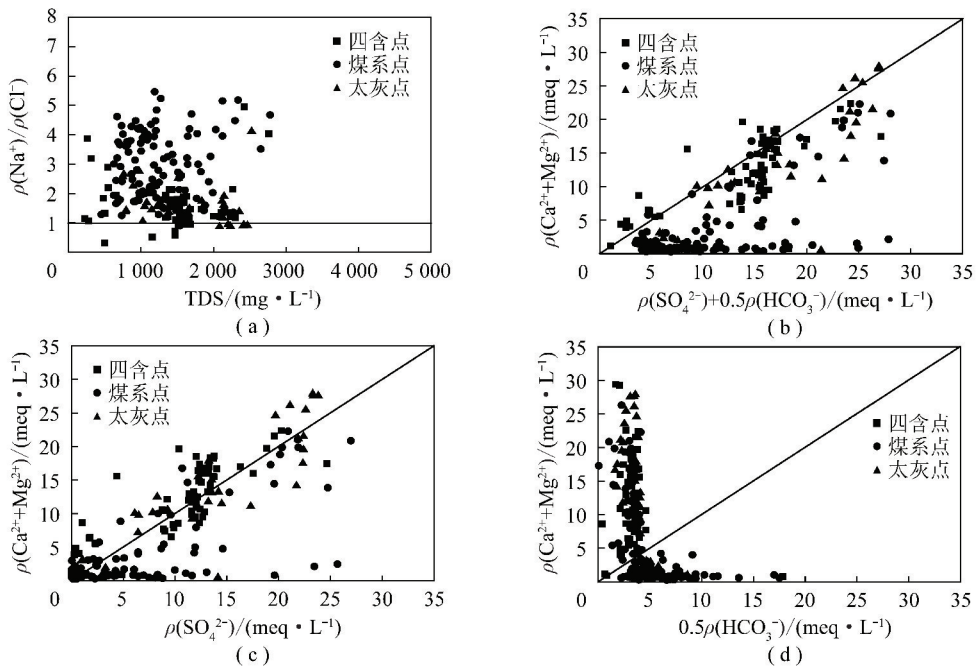


图2 宿县矿区地下水主要离子关系

Fig. 2 Correlation of major ions in the groundwater from the Suxian mining area

根据上述典型离子组合比分析,宿县矿区地下水化学环境相对复杂,受区域地质背景条件与采矿活动影响,主要突水含水层水化学成分的形成作用主要有黄铁矿氧化、碳酸盐、硫酸盐溶解,阳离子交替吸附以及脱硫酸作用等。宿县矿区主要突水含水层地下水化学成分形成作用的离子组合比分析结果与课题组曾经开展过的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, ^{34}S , ^{13}C 等同位素的示踪结果一致^[18]。

3.1.2 主成分分析

为了提高数据分析效率,压缩冗余数据,减小噪声影响,实现数据缩减,需要采用一种新的统计分析方法:主成分分析。主成分分析是在保证数据信息丢失最少的原则下,对高维变量进行降维处理的一种分析方法^[19]。该方法研究过程中的基本思想是在不损失或很少损失原有水化学信息的情况下,将宿县矿区主要突水含水层 218 个地下水样中具有相关性分析变量 Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} 重新组合成新的少数几个相互无关的综合变量,来代替原来分析变量,这些新的综合变量称之为主成分(F_1, F_2, \dots, F_n)。主成分与分析变量之间的相关系数称为荷载值,将地下水样的原始分析变量值代入主成分表达式(荷载值与对应分析变量乘积的累加和),可以得到每个地下水样的主成分荷载得分($S_{F_1}, S_{F_2}, \dots, S_{F_n}$)。根据上述荷载值与荷载得分,易于挖掘矿区地下水化学信息^[13],用于分析主要突水含水层水化学成分形成作用。

通过矿区 218 个地下水样的主成分分析,主成分 F_1 与主成分 F_2 方差贡献率分别为 41.181%, 32.023%, 累计方差贡献率达 73.203%, 基本涵盖了矿区地下水化学信息,可用于解释主要突水含水层水化学成分的形成作用。图 3 为采用方差最大旋转法得到的各分析变量在主成分 F_1 与主成分 F_2 上的荷载值分布图。由图 3 可知,主成分 F_1 上 Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} 有较高的正荷载值。根据矿区钻孔资料,

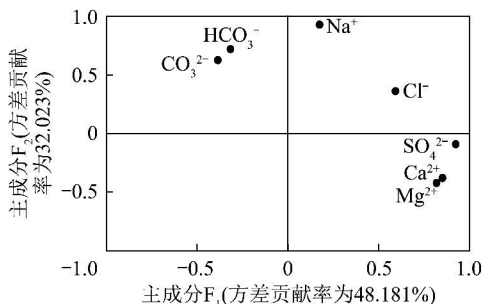
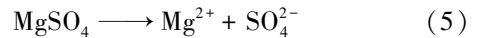
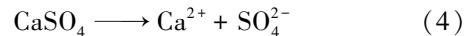
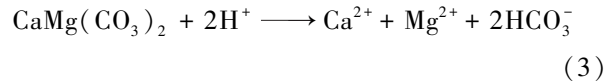
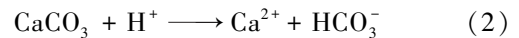
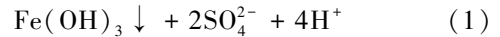
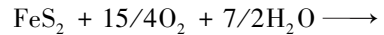


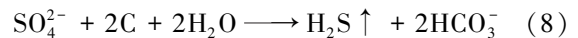
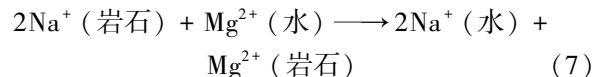
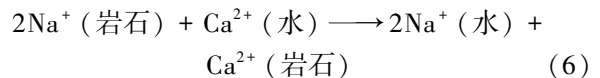
图3 宿县矿区地下水分析变量在 F_1 - F_2 上的荷载值分布

Fig. 3 Loading distribution of analysis variables in F_1 - F_2 in the groundwater from the Suxian mining area

煤系地层中约 1/3 含有数量不等的块状、霉状、片状及星点状黄铁矿,采矿活动使含水层由封闭变得相对开启,以致黄铁矿氧化产生 H^+ , SO_4^{2-} , Fe^{2+} , 地下水呈弱酸性。当地下岩层有碳酸盐或硫酸盐存在时,这类酸性地下水会加速碳酸盐或硫酸盐的溶解, pH 值升高,从而使得 Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} 荷载值较高,因此 F_1 轴可用于表示黄铁矿氧化与碳酸盐、硫酸盐溶解作用。相关化学反应方程式如下:



主成分 F_2 上 Na^+ 和 HCO_3^- 荷载值较高, Na^+ 荷载值高是由于含 Ca^{2+} , Mg^{2+} 的地下水在流经吸附有 Na^+ 的岩石颗粒时发生了交替吸附作用所致; HCO_3^- 荷载高是由于在封闭条件下氧气耗尽, SO_4^{2-} 在脱硫酸菌作用下产生还原作用所致。因此, F_2 可用于表示阳离子交替吸附与脱硫酸作用。相关化学反应方程式如下:



将宿县矿区 218 个地下水样的 Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} 作为分析变量分别代入主成分表达式 ($S_{F_1} = 0.175x_1 + 0.852x_2 + 0.819x_3 + 0.593x_4 + 0.925x_5 - 0.316x_6 - 0.386x_7$, $S_{F_2} = 0.930x_1 - 0.379x_2 - 0.422x_3 + 0.362x_4 - 0.09x_5 + 0.722x_6 + 0.628x_7$), 可得宿县矿区地下水样主成分 F_1 -主成分 F_2 荷载得分散点图 4(a), 结合水化学类型 Piper 三线图 4(b) 可知:

(1) 图 4(a) 中四含水样大部分位于第 4 象限, 说明四含水中存在相对显著的黄铁矿氧化或碳酸盐、硫酸盐溶解作用。对比 2010 年前与 2010—2014 年数据, 后期受采矿活动影响, 四含水样右移, 黄铁矿氧化或碳酸盐、硫酸盐溶解作用相对显著, 表现在图 4(b) 上, 2010—2014 年四含水阳离子 Ca^{2+} , Mg^{2+} 有所增加, 阴离子逐渐以 SO_4^{2-} 为主。

(2) 图 4(a) 中煤系水样主要沿 F_2 轴左侧分布, 说明煤系水中的黄铁矿氧化或碳酸盐、硫酸盐溶解作用不明显, 水化学作用以阳离子交替吸附或脱硫酸作

用为主。对比2010年前与2010—2014年数据,煤系水样有沿 F_2 轴下移但不明显,阳离子交替吸附或脱硫酸作用弱,以致水化学性质基本不变,后期采矿活动对煤系水化学影响不大。表现在图4(b)上,2010年前与2010—2014年煤系水阳离子均以 Na^+ 为主,阴离子均以 SO_4^{2-} 或 HCO_3^- 为主。

(3) 图4(a)中太灰水样主要沿 F_1 轴分布,同时

一定程度沿 F_2 轴分布,说明太灰水存在黄铁矿氧化或碳酸盐、硫酸盐溶解作用的同时伴随着一定程度的阳离子交替吸附或脱硫酸作用。对比2010年前与2010—2014年数据,后期受采矿活动影响,太灰水样明显右移,黄铁矿氧化或碳酸盐、硫酸盐溶解作用增强。表现在图4(b)上,2010—2014年太灰水阳离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主,阴离子则以 SO_4^{2-} 为主。

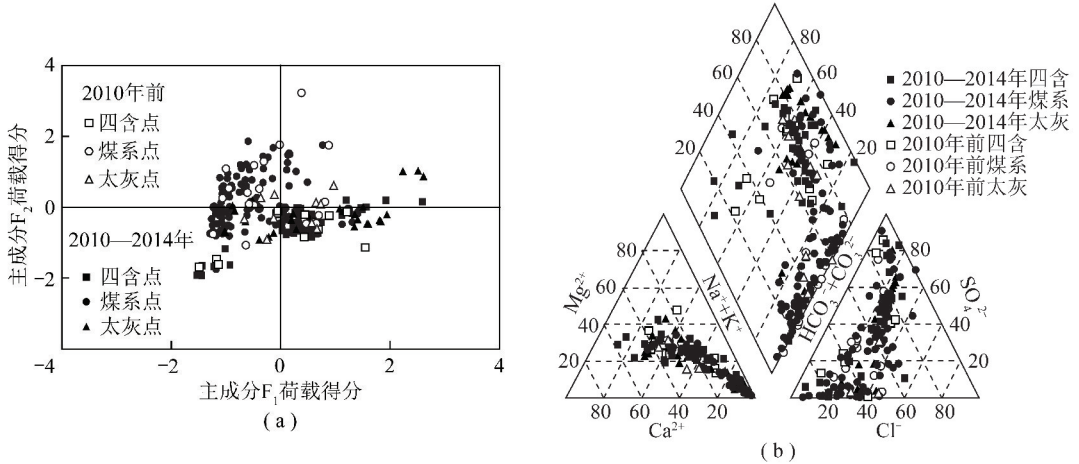


图4 宿县矿区地下水主成分荷载得分及水化学 Piper 三线图

Fig. 4 Diagram of the principal component loading scores and Piper diagram of hydrochemistry in the groundwater from the Suxian mining area

3.2 水化学控制因素

将宿县矿区主要突水含水层地下水样分析变量(Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-})利用 Arc-GIS 克里金插值生成栅格图层,进一步叠加分析得到矿区主要突水含水层舒卡列夫水化学类型空间分布^[20]。再利用 ArcGIS 克里金插值得到宿县矿区地下水主成分 F_1 荷载得分 S_{F1} 与主成分 F_2 荷载得分 S_{F2} 的空间分布,依此阐明矿区主要突水含水层水化学的控制因素。

宿县矿区基于水化学类型空间分布的四含 S_{F1} 与 S_{F2} 等值线如图5所示。 S_{F1} 在矿区范围内分布绝大部分为正值,整体由南北两侧往中部增大。东部芦岭矿 S_{F1} 出现最高值,西部钱营孜矿 S_{F1} 也出现高值,仅次于芦岭矿,但西部邹庄矿 S_{F1} 出现最低值。中部祁南矿和桃园矿 S_{F1} 分布较均匀,其值在 0.6 ~ 1.2 间变化,中部祁东矿受南侧板桥断裂影响, S_{F1} 略低。 S_{F2} 在矿区范围内分布绝大部分为负值,整体由东往西逐渐增大。东部芦岭矿 S_{F2} 出现最低值,西部钱营孜矿 S_{F2} 出现最高值,但西部邹庄矿 S_{F2} 较低,略高于芦岭矿。中部桃园矿、祁南矿及祁东矿 S_{F2} 分布较均匀,其值在 -1 ~ -0.1 间变化。从四含 S_{F1} 和 S_{F2} 等值线分布看,四含水化学成分形成作用的强弱主要受采矿活动控制,从而影响了水化学类型的空间分

布。西部钱营孜矿和邹庄矿开采时间短,采矿活动使部分区域黄铁矿氧化或碳酸盐、硫酸盐溶解作用有所增强,而阳离子交替吸附或脱硫酸作用有所减弱,以致 S_{F1} 和 S_{F2} 在该区域变化梯度大,水化学类型主要为 $SO_4-HCO_3-Ca-Mg-Na$ 型、 $SO_4-Na-Ca$ 型与 SO_4-Na 型。中部桃园矿、祁南矿及祁东矿开采时间较长,但矿区南北侧地下水补给充分,水化学的采矿活动影响被削弱,以致 S_{F1} 与 S_{F2} 分别接近平均值且分布较均匀,水化学类型主要为 $SO_4-HCO_3-Na-Ca-Mg$ 型、 SO_4-Na 型与 $SO_4-Cl-Na-Ca$ 型。东部尤其是芦岭矿开采时间久远,采矿活动影响最为显著,黄铁矿氧化或碳酸盐、硫酸盐溶解作用明显增强,而阳离子交替吸附或脱硫酸作用明显减弱,以致 S_{F1} 表现极高值, S_{F2} 表现极低值,水化学类型主要以 $SO_4-Cl-HCO_3-Na-Ca-Mg$ 型、 SO_4-Ca 型与 $SO_4-Na-Ca$ 型为主。

宿县矿区基于水化学类型空间分布的煤系 S_{F1} 与 S_{F2} 等值线如图6所示。 S_{F1} 在矿区范围内分布不均,绝大部分为负值,仅西部钱营孜矿、东部朱仙庄矿及中部桃园矿部分出现正值区,总体而言 S_{F1} 空间分布西部>东部>中部。 S_{F2} 在矿区范围内同样分布不均,绝大部分为正值,仅矿区西南局部分地区出现负值,总体而言 S_{F2} 空间分布为中部>西部>东部。从煤

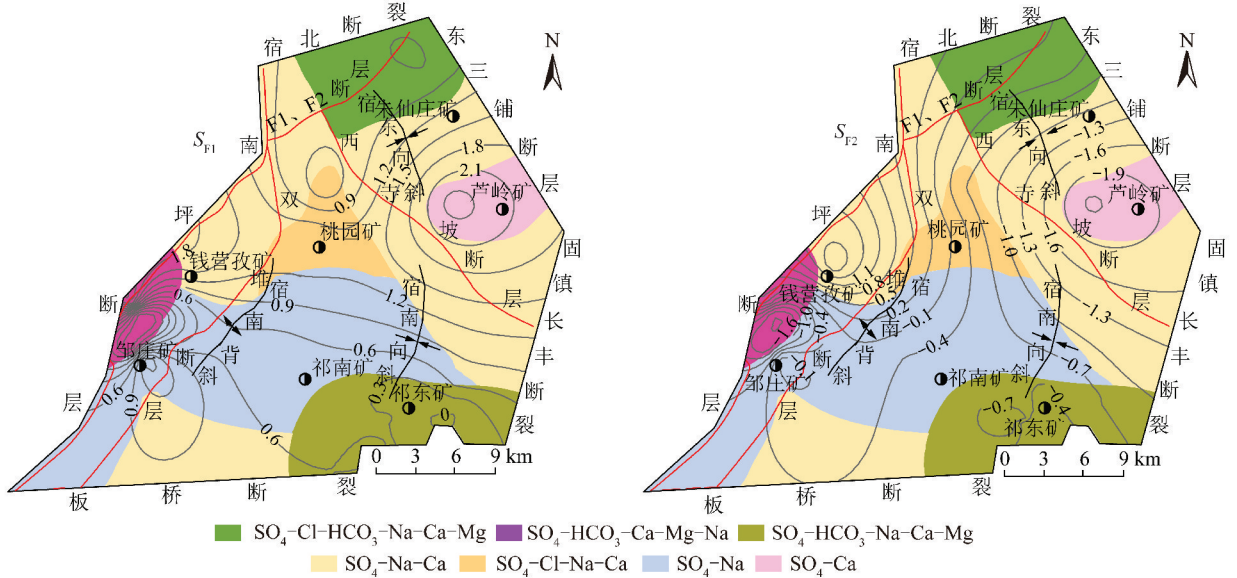


图 5 基于宿县矿区四含水化学类型分布的主成分荷载得分 S_{F1} , S_{F2} 等值线

Fig. 5 Isolines of principal component score S_{F1} , S_{F2} based on hydrochemical type distribution in the fourth aquifer of unconsolidated formation in the Suxian mining area

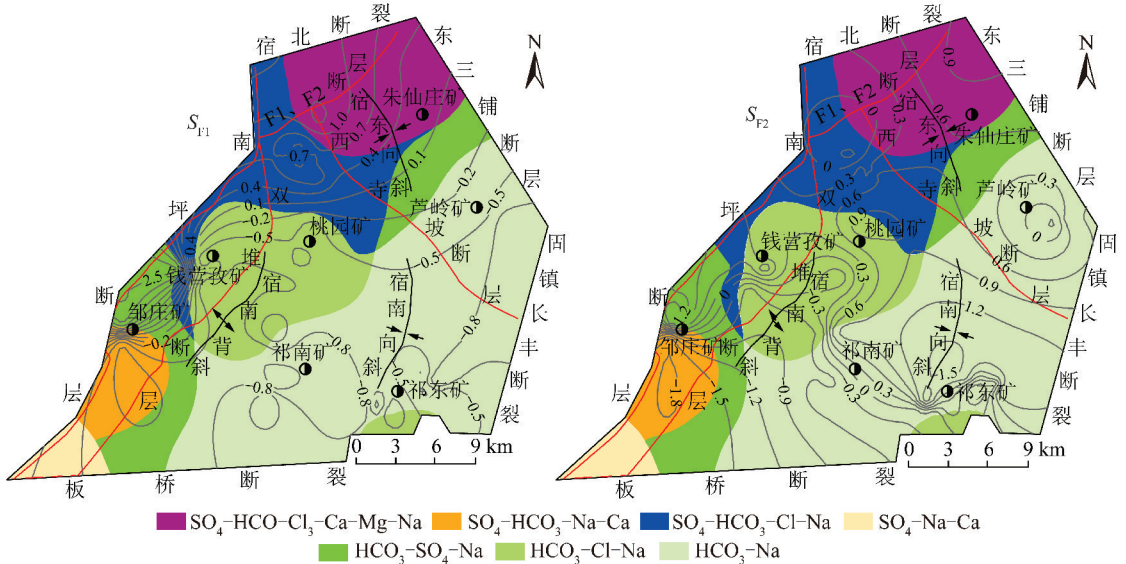


图 6 基于宿县矿区煤系水化学类型分布的主成分荷载得分 S_{F1} , S_{F2} 等值线

Fig. 6 Isolines of principal component score S_{F1} , S_{F2} based on hydrochemical type distribution in the fissured aquifer of coal measure in the Suxian mining area

系 S_{F1} 和 S_{F2} 等值线分布看,煤系水化学成分形成作用的强弱主要受断裂(层)控制,从而影响了水化学类型的空间分布。西部钱营孜矿和邹庄矿介于南坪断层与双堆断层之间,南坪断层具有一定的导水性使得整个西部封闭性一般,水化学成分不仅受到相对活跃的黄铁矿氧化或碳酸盐、硫酸盐溶解作用的影响,也受到相对活跃的阳离子交替吸附或脱硫酸作用的影响, S_{F1} 与 S_{F2} 均较高,水化学类型主要为 $SO_4-HCO_3-Na-Ca$ 型、 HCO_3-SO_4-Na 型以及 $SO_4-HCO_3-Cl-Na$ 型。中部祁南矿和祁东矿被双堆断层,板桥断

裂及西寺坡断层包围,含水层封闭程度好,阳离子交替吸附或脱硫酸作用增强, S_{F1} 普遍为负, S_{F2} 普遍为正,最终形成 HCO_3-Na 为主导型的地下水。与此类类似的还有东部芦岭矿与朱仙庄矿,在西寺坡断层、固镇长丰断裂、东三铺断层以及 F_1, F_2 断层环绕下形成较好的封闭环境,有利于阳离子交替吸附或脱硫酸作用,水化学类型主要为 HCO_3-Na 型。

宿县矿区基于水化学类型空间分布的太灰 S_{F1} 与 S_{F2} 等值线如图 7 所示。 S_{F1} 在矿区范围内分布绝大部分为正值,整体由东往西、由南向北逐渐增大;西

部邹庄矿 S_{F1} 出现最高值,东部芦岭矿 S_{F1} 出现最低值;中部桃园矿 S_{F1} 高于祁东矿和祁南矿。 S_{F2} 在矿区范围内分布绝大部分为负值,整体变化趋势与 S_{F1} 类似,西部邹庄矿 S_{F2} 出现最高值,东部芦岭矿东南 S_{F2} 出现最低值;但中部桃园矿、祁南矿及祁东矿 S_{F2} 分布相对较均匀。从太灰 S_{F1} 和 S_{F2} 等值线分布看,除受采矿活动影响外,太灰水化学成分形成作用的强弱还受断裂(层)与褶皱控制,水化学类型空间分布具有较为明显的分带性。西部邹庄矿和钱营孜矿位于宿南背斜西南翼,背斜轴部受双堆断层影响地下水循环条件较好,黄铁矿氧化或碳酸盐、硫酸盐溶解作用增强,背斜西南翼含水层埋深逐渐加大,阳离子交替吸附或脱硫酸作用增强,以致 S_{F1} 和 S_{F2} 均表现最高值,水化学类型主要为 $SO_4-HCO_3-Ca-Mg-Na$ 型、 $SO_4-Ca-Mg$ 型与 SO_4-Na 型。矿区中部桃园

矿、祁南矿及祁东矿被双堆断层、板桥断裂、西寺坡断层及 F_1, F_2 断层包围并受宿南背斜和宿南向斜影响,含水层埋深逐渐加大,水流相对滞缓,水化学形成作用趋于稳定,黄铁矿氧化或碳酸盐、硫酸盐溶解作用以及阳离子交替吸附或脱硫酸作用逐渐减弱,以致 S_{F1} 与 S_{F2} 有所减小,水化学类型自西向东变化为 HCO_3-Na 型 \rightarrow SO_4-HCO_3-Na 型 \rightarrow $SO_4-HCO_3-Na-Mg$ 型 \rightarrow $SO_4-HCO_3-Na-Mg-Ca$ 型 \rightarrow $SO_4-HCO_3-Ca-Mg-Na$ 型。矿区东部芦岭矿及朱仙庄矿位于宿东向斜内、西寺坡断层、宿北断裂、东三铺断层以及固镇断裂使得含水层封闭,水流滞缓,水化学成分的形成作用更为稳定,以致 S_{F1} 和 S_{F2} 均表现最低值,水化学类型自东向西主要为 HCO_3-Na 型 \rightarrow SO_4-HCO_3-Na 型 \rightarrow $HCO_3-SO_4-Na-Mg$ 型 \rightarrow $SO_4-HCO_3-Ca-Mg-Na$ 型。

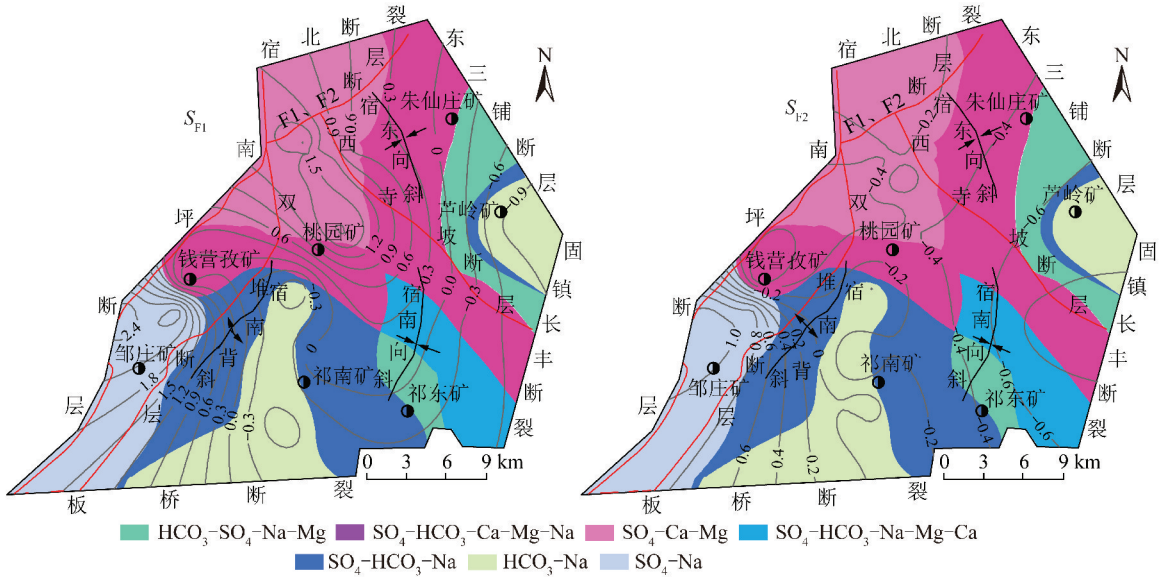


图7 基于宿县矿区太灰水化学类型分布的主成分荷载得分 S_{F1}, S_{F2} 等值线

Fig. 7 Isolines of principal component score S_{F1}, S_{F2} based on hydrochemical type distribution in the karst aquifer of Taiyuan formation in the Suxian mining area

4 结 论

(1)对宿县矿区 2010—2014 年常规水化学数据统计,矿区 3 个主要突水含水层阳离子含量关系均为 $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$,四含、太灰阴离子含量关系均为 $SO_4^{2-} > HCO_3^- > Cl^-$,煤系阴离子含量关系为 $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$ 。四含变异系数较大的有 Na^+, SO_4^{2-}, HCO_3^- ,煤系变异系数较大的有 $Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-}, HCO_3^-$,太灰变异系数较大的有 $Ca^{2+}, Mg^{2+}, SO_4^{2-}$ 。不同含水层离子组成差异是不同地下水化学成分形成作用的综合反映。

(2)宿县矿区 2010 年前与 2010—2014 年水样常规离子组合比和主成分分析结果均表明,受矿区地质

背景条件与采矿活动影响,宿县矿区水化学成分的形成作用主要有黄铁矿氧化,碳酸盐、硫酸盐溶解,阳离子交替吸附以及脱硫酸作用等。其中煤系以阳离子交替吸附或脱硫酸作用最为显著,而四含、太灰以黄铁矿氧化或碳酸盐、硫酸盐溶解最为显著。

(3)宿县矿区 2010—2014 年水样主成分荷载得分与水化学类型的空间分布规律分析表明,宿县矿区采矿活动与地质背景条件不同程度地影响了主要突水含水层水化学成分形成作用与水化学类型的空间分布,其中四含主要受采矿活动控制、煤系主要受断裂(层)控制,太灰主要受采矿活动、断裂(层)与褶皱控制。

参考文献(References):

- [1] 武强,赵苏启,董书宁,等.《煤矿安全规程》(防治水部分)修改技术要点剖析[J].中国煤炭地质,2012,24(7):34-37.
Wu Qiang,Zhao Suqi,Dong Shuning,et al. Dissection of main technical points in "Coal Mine Safety Regulations" (water control part) modification[J]. Coal Geology of China,2010,24(7):34-37.
- [2] 姜谔男,梁冰.地下水化学特征组分识别的粒子群支持向量机方法[J].煤炭学报,2006,31(3):310-313.
Jiang Annan,Liang Bing. The particle swarm optimization support vectors machine method of identifying standard components of ions groundwater[J]. Journal of China Coal Society,2006,31(3):310-313.
- [3] 桂和荣,陈陆望.矿区地下水水文地球化学演化与识别[M].北京:地质出版社,2007:77-105.
- [4] 杨永国,黄福臣.非线性方法在矿井突水水源判别中的应用研究[J].中国矿业大学学报,2007,36(3):283-286.
Yang Yongguo,Huang Fuchen. Water source determination of mine inflow based on Non-Linear method[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2007,36(3):283-286.
- [5] 钱家忠,杜奎,赵卫东,等.基于投影寻踪技术的矿井突水水源判别模型——以新庄孜煤矿为例[J].地质论评,2012,58(6):1175-1179.
Qian Jiazhong,Du Kui,Zhao Weidong,et al. Discrimination model of mine water-inrush source based on projection pursuit method: A case study in Xinzhuangzi coal mine[J]. Geological Review,2012,58(6):1175-1179.
- [6] 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.
Wang Xinyi,Xu Tao,Huang Dan. Application of distance discrimination in identifying water inrush resource in similar coalmine[J]. Journal of China Coal Society,2011,36(8):1354-1358.
- [7] Sun Linhua,Gui Herong. Establishment of water source discrimination model in coal mine by using hydrogeochemistry and statistical analysis: A case study from Renlou Coal Mine in northern Anhui Province,China[J]. International Journal of Coal Science & Technology,2012,18(4):385-389.
- [8] Singh A K,Mahato M K,Neogi B,et al. Hydrogeochemistry, elemental flux,and quality assessment of mine water in the Pootkee-Balihari mining area,Jharia Coalfield,India[J]. Mine Water and the Environment,2011,30(3):197-207.
- [9] Yao Duoxi,Meng Jun,Zhang Zhiguo. Heavy metal pollution and potential ecological risk in reclaimed soils in Huainan mining area[J]. International Journal of Coal Science & Technology (China),2010,16(3):316-319.
- [10] 董维红,苏小四,侯光才,等.鄂尔多斯白垩系地下水盆地地下水水化学类型的分布规律[J].吉林大学学报(地球科学版),2007,37(2):288-292.
Dong Weihong,Su Xiaosi,Hou Guangcai,et al. Distribution law of groundwater hydrochemical type in the Ordos Cretaceous artesian basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2007,37(2):288-292.
- [11] Yousafzai A,Eckstein Y,Dahl P S. Hydrochemical signatures of deep groundwater circulation in a part of the Himalayan foreland basin[J]. Environmental Earth Sciences,2010,59(5):1079-1098.
- [12] Güler C,Thyne G D,McCray J E,et al. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data[J]. Hydrogeology Journal,2002,10(4):455-474.
- [13] Cloutier V,Lefebvre R,Therrien R,et al. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system[J]. Journal of Hydrology,2008,353(3):294-313.
- [14] Laaksoharju M,Skärman C,Skärman E. Multivariate mixing and mass balance(M3) calculations, a new tool for decoding hydrogeochemical information[J]. Applied Geochemistry,1999,14(7):861-871.
- [15] 许光泉,沈慧珍,魏振岳,等.宿南矿区新生界底部沉积物特征与沉积模式[J].煤田地质与勘探,2005,33(6):10-13.
Xu Guangquan,Shen Huizhen,Wei Zhendai,et al. Sedimentary characteristics and model of cenozoic bottom sediments of Sunan mining area[J]. Coal Geology & Exploration,2005,33(6):10-13.
- [16] 沈照理,朱宛华,钟佐桑.水文地球化学基础[M].北京:地质出版社,1993:94-123.
- [17] Narany T S,Ramli M F,Aris A Z,et al. Identification of the hydrogeochemical processes in groundwater using classic integrated geochemical methods and geostatistical techniques, in Amol-Babol plain, Iran[J]. Scientific World Journal,2014,2014(2):983-990.
- [18] 陈陆望,殷晓曦,桂和荣,等.矿区深部含水层水-岩作用同位素与水化学示踪分析[J].地质学报,2013,87(7):1021-1030.
Chen Luwang,Yin Xiaoxi,Gui Herong,et al. Water-rock interaction tracing and analysis of deep aquifers in the mining area using isotope and hydrochemistry methods[J]. Acta Geologica Sinica,2013,87(7):1021-1030.
- [19] 虞鸿,吴中如,包腾飞,等.基于主成分的大坝观测数据多效应量统计分析研究[J].中国科学:技术科学,2010,40(7):830-839.
Yu Hong,Wu Zhongru,Bao Tengfei,et al. Multivariate analysis in dam monitoring data with PCA[J]. Scientia Sinica Technologica,2010,40(7):830-839.
- [20] 马雷,钱家忠,赵卫东.基于GIS的地下水化学类型空间分区方法[J].煤炭学报,2012,37(3):490-494.
Ma Lei,Qian Jiazhong,Zhao Weidong. GIS-based approaches for spatially dividing groundwater chemical types[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(3):490-494.