

doi: 10.12029/gc20190210

陈松, 桂和荣. 2019. 淮北煤田太原组灰岩水年龄及同位素地球化学特征[J]. 中国地质, 46(2): 337–345.

Chen Song, Gui Herong. 2019. The age and isotopic characteristics of groundwater in Taiyuan Formation limestone aquifer of the Huaibei coalfield[J]. Geology in China, 46(2): 337–345(in Chinese with English abstract).

## 淮北煤田太原组灰岩水年龄及同位素地球化学特征

陈松<sup>1,2</sup>, 桂和荣<sup>1,2</sup>

(1. 宿州学院 资源与土木工程学院, 安徽 宿州 234000; 2. 国家煤矿水害防治工程技术研究中心, 安徽 宿州 234000)

**摘要:** 为了解淮北煤田太原组灰岩水年龄、水化学特征及演化, 采集了淮北煤田 29 个矿井地下水样品进行水常规、氢氧同位素及 <sup>14</sup>C 测试。利用传统图示及统计方法探讨了地下水化学特征及演化, 约束了地下水年龄及径流特征。结果表明: 淮北煤田太原组灰岩水年龄在 2900~21910 a 之间变化, 不同矿区之间灰岩水化学特征有明显差异。闸河矿区以较低的 TDS 浓度、最小的地下水年龄和最高的 δD 和 δ<sup>18</sup>O 值为特征, 为淮北煤田太原组灰岩水主要的补给区; 临涣矿区孙疃矿、宿县矿区桃园矿具有较大的地下水年龄、较高的 TDS 浓度和低的 δD 和 δ<sup>18</sup>O 值, 为主要排泄区。TDS 浓度等值线图 and 地下水年龄等值线图呈现一致的演化规律, 淮北煤田东北部闸河矿区为主要补给区。太原组灰岩水径流特征主要受构造背景的控制, 地下水补给条件及水岩相互作用程度决定了水体中 TDS 浓度和氢氧同位素富集特征。

**关键词:** 地下水年龄; <sup>14</sup>C; 太原组; 灰岩水; 淮北煤田

中图分类号: P641 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019)02-0337-09

## The age and isotopic characteristics of groundwater in Taiyuan Formation limestone aquifer of the Huaibei coalfield

CHEN Song<sup>1,2</sup>, GUI Herong<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, Anhui, China;

2. National Engineering Research Center of Coal Mine Water Hazard Controlling, Suzhou 234000, Anhui, China)

**Abstract:** For the purpose of understanding the age, hydrochemical characteristics and evolution of groundwater in Taiyuan Formation limestone aquifer in the Huaibei coalfield, twenty nine groundwater samples were collected from the Huaibei coalfield, and concentrations of major ions, hydrogen and oxygen isotopes and <sup>14</sup>C radio isotopes were analyzed. The traditional graphic and statistical methods were used to discuss the evolution of groundwater and hydrochemical characteristics as well as the age and runoff characteristics of groundwater. Some conclusions have been reached: the ages of groundwater samples in Taiyuan Formation limestone aquifer vary from 2900a to 21920a, the hydrochemical characteristics of groundwater are different in different mining areas. The groundwater samples in the Zhahe mining area have lower TDS concentrations, the minimum age and the highest values

收稿日期: 2017-04-04; 改回日期: 2019-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41373095)、安徽省自然科学基金(1708085QE125)、安徽高校自然科学基金项目(KJ2018A0450)和安徽省博士后研究项目(2016B093)共同资助。

作者简介: 陈松, 男, 1983 年生, 副教授, 博士, 从事水文地球化学方面的教学和科研; E-mail: szxychensong@163.com。

of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$ , and hence this area could be regarded as the recharge area in the Huaibei coalfield. The groundwater samples in the Suntuan mine and Taoyuan mine have largest age, higher concentrations of TDS and lower  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values, and such areas could be considered to be the drainage areas. The contour diagrams about TDS concentrations and groundwater age show consistent patterns, suggesting that the main recharge area of groundwater in Taiyuan Formation limestone aquifers lies in the northeast area of the Huaibei coalfield. The groundwater runoff characteristics in Taiyuan Formation are mainly controlled by the tectonic setting, and the recharge conditions and water-rock interaction degrees of groundwater are main factors for the concentrations of TDS and hydrogen and oxygen isotopes.

**Key words:** groundwater age;  $^{14}C$ ; Taiyuan Formation; limestone groundwater; Huaibei coalfield

**About the first author:** CHEN Song, male, born in 1983, associate professor, doctor, engages in the study of hydrogeochemistry; E-mail: szxychensong@163.com.

**Fund support:** Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41373095), Natural Science Foundation of Anhui Province (No. 1708085QE125), Natural Science Projects of Colleges and Universities in Anhui Province (No. KJ2018A0450) and Postdoctoral Research Project of Anhui Province (No. 2016B093).

## 1 引 言

由于长期水岩作用的影响,深层地下水资源蕴藏大量的地质信息,对于理解区域水文地质条件、地下水演化、区域构造背景等具有重要的意义。尤其深层地下水具有更新缓慢、不易污染等特点,常作为区域宝贵的水资源,在利用地下水化学特征探讨区域地下水形成与演化、水化学过程、评价和示踪地下水污染的成果颇为丰富(Chen et al., 2014; 袁建飞等, 2016; 孙厚云等, 2018)。随着深部煤炭资源的开采,煤矿区一直被煤矿突水和水资源匮乏等问题困扰。因此,有关煤矿区深层地下水化学场演化、地下水径流特征、水文地球化学过程及地下水水质评价等成果丰富(黄平华等, 2012; Chen et al., 2014)。这些成果从一定程度上揭示了地下水的水化学组成及演化、地下水循环特征,或是约束了煤矿开采影响下地下水径流特征及径流规律,为煤矿区水害防治及地下水资源开发利用奠定基础。

淮北煤田是华北聚煤盆地的重要组成部分,随着深部煤炭资源开采及区域地下水资源开发利用,淮北煤田深层地下水的组成、演化及径流特征受到密切关注。近年来,不少学者在淮北煤田开展了一系列深层地下水化学特征、煤矿突水水源识别、水文地球化学过程及含水层水体质量评价等研究(桂和荣等, 2007; Gui et al., 2011; Chen et al., 2014)。不足之处在于,这些成果往往针对煤田地下水化学场或径流场进行研究,对深层地下水年龄、更新及演化方面的研究存在不足。而基于深层地下水中

放射性同位素资料,探讨地下水年龄信息,有助于理解水化学场演化和地下水径流特征。基于这种思考,本文以淮北煤田太原组灰岩水为研究对象,在对煤田不同水文地质单元内矿井进行系统取样的基础上,通过对水样中同位素及常规组分含量测试分析,基于水化学基本方法,探讨了淮北煤田太原组灰岩水化学特征,约束了地下水年龄及演化,并揭示了其空间演化特征。

## 2 区域概况

淮北煤田位于安徽省西北部,为新生界松散层覆盖的全隐蔽煤田。在地貌单元上属华北大平原的一部分,除濉溪、肖县和宿州市北部符离集—徐州一带为震旦、寒武、奥陶系等基岩裸露的剥蚀低山、残丘和山间谷地外,其余地区皆为黄淮河冲积平原。其低山、残丘海拔高程一般为+80~408 m,平原区海拔高程一般为+20~50 m,地势总体上呈现西北高而东南略低的微微倾斜,坡降万分之一左右。区内河渠纵横,河流较多,多属淮河水系,各河大致自西北流向东南,大部分汇入淮河(新汴河直接汇入洪泽湖),流经洪泽湖然后入海。各河均属中小型季节性河流,河水受大气降水控制。雨季各河水位上涨,流量突增;枯水期间河流水位回落,流量减少甚至干涸。各河年平均流量3.52~72.10 m<sup>3</sup>/s,年平均水位标高为+14.73~26.56 m。

淮北煤田位于华北型中朝准地台东南部,北接丰沛隆起,南与蚌埠隆起相邻(谭静强等, 2009),区内分布有众多与郯庐断裂近于平行的北东向褶皱、

深大断裂和逆冲推覆构造(王桂梁等,1992),东北部的徐宿弧形双冲叠瓦扇逆冲断层系统是淮北煤田标志性的构造形态。以宿北断裂为界,淮北煤田划分为北部和南部两个大矿区,其中北部又分为濉萧、闸河矿区,南部宿北断裂和板桥—固镇断层之间包含3个矿区,自东至西依次为宿县、临涣和涡阳矿区,本次研究共采集水样29个,具体采样位置见图1。

淮北煤田地下水是区域工农业及生活用水的主要水源,与煤矿安全开采直接相关的含水层自上而下主要分为4个,分别为松散层孔隙水第四含水层、二叠系砂岩裂隙水含水层、石炭系太原组和奥陶系灰岩岩溶含水层(图2)。其中,第四含水层直接覆盖在煤层和灰岩露头之上,太原组灰岩和奥陶系含水层受古构造及沉积条件影响,横向埋深差别较大,在局部地区可见露头。

### 3 样品采集与测试

为保证太原组灰岩水样品采集的代表性,并排

除时间因素造成的水化学场变化等问题,项目组于同一时间段集中对淮北煤田各矿井进行集中取样。地下水采集均通过井下放水孔进行,采样直接在矿井下进行,样品采集时,用水样将2.5 L聚乙烯桶冲洗3次,迅速装满并密封,贴好标签,记录采样点、经纬度、时间,并用便携式水质检测仪测量水温、pH值、电导率、TDS等参数,采样层位及具体水位标高见图2,表1。

水样带回实验室后利用抽滤装置(0.45 μm膜)进行过滤处理,随后送往安徽省煤田地质局第三勘探队进行常规离子测试,测试依据中华人民共和国地质矿产行业标准(地下水水质检验方法:DZ/T 0064-93)进行,测试结果见表1。氢氧同位素分析在国家煤矿水害防治工程技术研究中心进行,测试仪器为LGR水汽同位素分析仪,测试结果以维也纳平均海水(VSNOW)为标准;地下水中<sup>14</sup>C测试在国土资源部岩溶地质资源环境监督检测中心测试完成,仪器为超低本底液体闪烁能谱仪(型号:

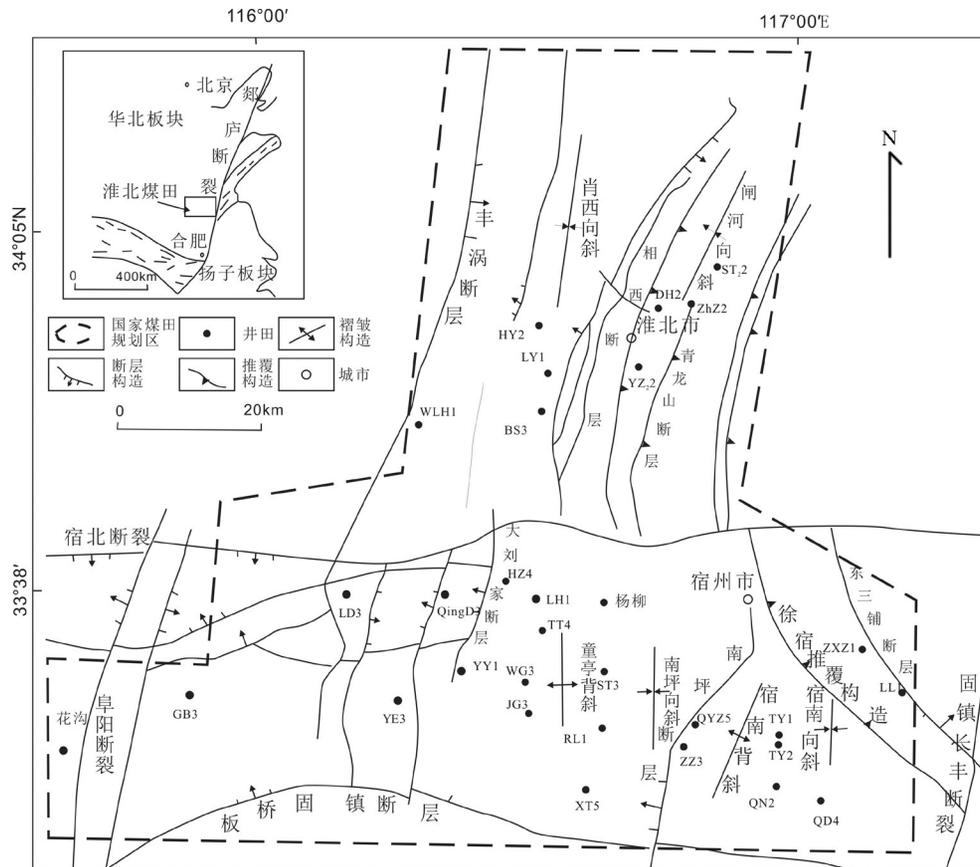


图1 淮北煤田采样点位置及地质简图  
Fig.1 Sampling location simplified geological map of the Huaibei coalfield

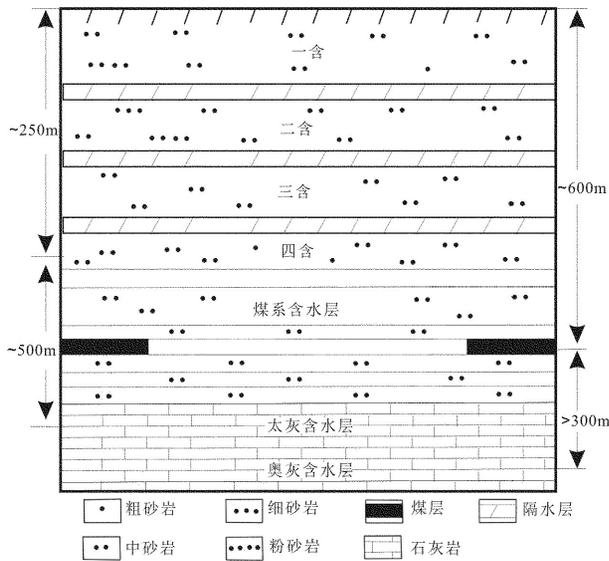


图2 淮北煤田水文地质柱状图  
Fig.2 Hydrogeological column of the Huaibei coalfield

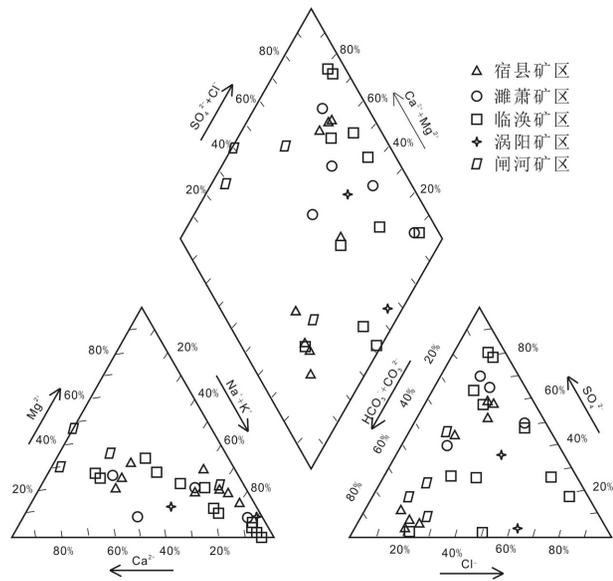


图3 淮北煤田太原组灰岩水Piper三线图  
Fig.3 Piper diagram of groundwater from Taiyuan Formation limestone in the Huaibei coalfield

表1 淮北煤田太原组灰岩水化学含量(mg/L)特征  
Table 1 Compositions of hydrochemical components (mg/L) in groundwater from Limestone aquifer in Taiyuan Formation, the Huaibei coalfield

样品号	水位 标高/m	K <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	TDS	pH	水化学 类型
LL1	24	28.06	4.45	7.12	15.44	4.53	49.36	24.03	123	9.40	HCO <sub>3</sub> -Na
TY1	-400	174.36	210.50	76.10	205.91	680.99	267.18	0.00	1900	7.86	SO <sub>4</sub> -Ca
TY2	-800	197.36	266.36	77.81	212.77	806.53	335.88	0.00	2190	7.70	SO <sub>4</sub> -Ca
ZXZ1	-130	413.73	111.98	68.88	155.24	540.02	451.55	187.71	1530	7.80	SO <sub>4</sub> -Na
QYZ5	-5.04	95.36	5.26	9.08	34.32	2.47	221.37	20.02	333	8.62	HCO <sub>3</sub> -Na
QD4	-17	50.49	4.86	6.38	20.59	7.41	104.33	17.52	172	9.26	HCO <sub>3</sub> -Na
QN2	-538	194.58	204.83	108.99	248.81	676.67	399.49	0.00	1950	7.82	SO <sub>4</sub> -Ca
ZZ3	0.56	43.05	4.83	6.35	13.95	15.64	73.22	21.61	150	10.10	CO <sub>3</sub> -Na
HY2	-245	200.19	285.99	102.59	146.52	1043.41	339.27	0.00	2060	7.42	SO <sub>4</sub> -Ca
LY1	-460	119.16	103.63	12.27	63.49	219.18	305.34	0.00	1230	8.18	HCO <sub>3</sub> -Na
BS3	-22	292.10	12.08	13.68	204.08	341.63	53.70	21.61	1480	9.19	SO <sub>4</sub> -Na
WLH1	-430	634.53	149.78	117.83	314.01	1380.51	447.84	0.00	3240	7.41	SO <sub>4</sub> -Na
ST3	-535	261.41	57.20	46.90	218.04	226.79	441.78	0.00	1290	8.05	HCO <sub>3</sub> -Na
XT5	-160	160.22	3.22	8.79	123.84	9.06	92.75	79.23	562	9.78	HCO <sub>3</sub> -Na
RL1	-843	426.70	245.71	146.55	957.62	527.26	300.22	0.00	3690	7.78	Cl-Na
HZ4	-996	951.95	4.53	7.56	351.76	537.55	994.91	150.17	3350	8.92	HCO <sub>3</sub> -Na
TT4	-400	644.29	107.95	51.78	198.85	1153.71	493.04	0.00	2860	8.00	SO <sub>4</sub> -Na
LH1	-470	268.19	586.97	186.56	253.96	2178.19	234.10	0.00	4380	7.57	SO <sub>4</sub> -Ca
QingD3	-580	270.26	538.39	164.46	260.82	1967.45	234.10	0.00	3190	7.40	SO <sub>4</sub> -Ca
YY1	-780	1237.91	65.58	39.77	1570.07	510.38	343.51	0.00	5520	7.66	Cl-Na
YE3	11	56.74	10.04	6.19	25.74	4.94	152.67	5.01	186	8.38	HCO <sub>3</sub> -Na
GB3	19	251.08	2.43	6.38	250.52	12.76	104.33	87.60	924	9.84	Cl-Na
LD3	-410	294.07	153.07	36.64	315.72	397.61	380.76	0.00	1840	7.83	Cl-Na
WG3	-610	491.31	181.26	112.36	584.34	931.86	256.28	0.00	3070	7.91	SO <sub>4</sub> -Na
JG3	-425	217.17	158.71	108.94	193.62	731.00	344.15	0.00	1840	7.55	SO <sub>4</sub> -Na
ST	-424	149.94	16.11	25.89	78.49	43.63	388.09	0.00	716	7.83	HCO <sub>3</sub> -Na
DH2	10	11.30	106.87	33.87	36.03	62.97	371.50	0.00	520	7.41	HCO <sub>3</sub> -Ca
ZhZ2	-495	39.58	73.67	38.29	44.61	184.40	211.20	0.00	399	8.02	SO <sub>4</sub> -Ca
YZ <sub>2</sub>	-325	0.18	94.26	53.74	52.33	100.84	339.27	0.00	455	7.56	HCO <sub>3</sub> -Ca

Quantulus 1220), 具体依据参考 DZ/T0184.9-1997, 同位素测试结果见表2。

所有水化学数据利用Excel2003 进行整理, 离子平衡、Piper 三线图及水质类型划分等由AQqa 软件完成, 相关性分析采用SPSS19 软件完成, 等值线图由Surfar8 完成, 所有图件均采用Coreldraw12 绘制。

## 4 结果与分析

### 4.1 常规水化学特征

淮北煤田太原组灰岩水中常规组分测试结果见表1。整体看来, 该区灰岩水呈弱碱性, pH 值在7.40~10.10, 平均值为8.22。水样中溶解性总固体(TDS)变化较大, 最小为123 mg/L, 最大为5520 mg/L, 平均为1763.4 mg/L。阳离子中, Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup> 含量较高, 平均值为281.9 mg/L, 其次为Ca<sup>2+</sup>, 平均含量为130.0 mg/L, Mg<sup>2+</sup> 含量最低, 平均值为57.9 mg/L; 阴离子中, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量较高, 平均值分别为527.6 mg/L 和301.1mg/L, 其中Cl<sup>-</sup> 和CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 含量较低, 平均值为246.6 mg/L 和21.2 mg/L。淮北煤田太原组灰岩水 Piper 三线图(图3) 及水质类型划分结果(表1), 可见该区灰岩水化学类型较为复杂。

具体到各矿区, 闸河矿区太原组灰岩水中具有含量最低的TDS, 4个矿井地下水样中TDS 平均值为522.5 mg/L, 其次为宿县矿区, 8个地下水样品中

TDS 平均含量为1043.5 mg/L, TDS 含量最高的矿区为临涣矿区, 11个矿井地下水样平均TDS 含量为2721.6 mg/L, 涡北矿区和濉萧矿区地下水中TDS 平均值分别为1382 mg/L 和2002 mg/L。

### 4.2 氢氧同位素特征

地下水中 δD 和 δ<sup>18</sup>O 值相对稳定, 常用来示踪地下水的运动状况和地下水演化, 有关氢氧同位素探讨地下水环境演化等成果颇多(顾慰祖, 2001)。淮北煤田太原组灰岩水中氢氧同位素特征见表2, 灰岩水中 δD 在-71.83‰~-49.09‰之间变化, 平均值为-62.93‰; δ<sup>18</sup>O 在-10.15‰~-6.64‰之间变化, 平均值为-8.50‰。δD-δ<sup>18</sup>O 分布曲线与大气降水线、全球和区域地方标准线进行对比, 可以更好地解释地下水的形成和运移。因此, 搜集了全球大气降水线(Craig, 1961)、当地降水线(张洪平, 1989)和区域地表水线(桂和荣等, 2005)进行对比(图4), 其拟合方程斜率分别为8、7.9和6.74。该区灰岩水样品点拟合线方程为 δD=7.15\*δ<sup>18</sup>O-2.12, R<sup>2</sup>=0.96。可见, 淮北煤田太原组灰岩水样品多落在全球大气降水线以下, 灰岩水表现出与区域地表水大致相当的斜率, 灰岩水受到大气降水和地表水体补给。

具体到各矿区, 闸河矿区地下水中有最高的 δD 和 δ<sup>18</sup>O 值, 分别为-57.98‰和-7.87‰, 临涣矿区地下水 δD 和 δ<sup>18</sup>O 最低, 分别为-66.07‰和-8.94‰, 宿县矿区、涡北矿区和濉萧矿区地下水中 δD 和 δ<sup>18</sup>O 值分别为-60.14‰和-8.15‰, -61.39‰和-8.28‰

表2 淮北煤田太原组灰岩水同位素特征  
Table 2 Isotopic composition in groundwater from Taiyuan Formation aquifer in the Huaibei coalfield

样品号	δD/‰	δ <sup>18</sup> O/‰	<sup>14</sup> C 年龄/a	样品号	δD/‰	δ <sup>18</sup> O/‰	<sup>14</sup> C 年龄/a
L1	-71.83	-10.15		HZ4	-65.18	-8.93	
TY1	-62.10	-8.31		TT4	-66.32	-8.95	
TY2	-62.16	-8.37	21910±230	LH1	-68.31	-9.09	
ZXZ1	-63.15	-8.44	13180±160	QingD3	-68.46	-9.19	
QYZ5	-54.45	-7.46		YY1	-66.85	-9.00	
QD4	-54.45	-7.49		YE3	-70.41	-10.11	
QN2	-63.91	-8.33		GB3	-52.04	-7.17	
ZZ3	-49.09	-6.64		LD3	-70.74	-9.39	
HY2	-64.21	-8.68	10500±100	WG3	-66.12	-8.86	11960±80
LY1	-60.75	-8.26	11170±160	JG3	-64.71	-8.67	
BS3	-67.20	-9.06		ST	-60.59	-8.17	
WLH1	-70.18	-9.12	9230±290	DH2	-59.89	-8.21	
ST3	-66.06	-8.80	21410±220	ZhZ2	-54.47	-7.36	2900±70
XT5	-57.94	-7.76		YZ <sub>2</sub>	-56.98	-7.74	
RL1	-66.35	-8.94	9150±70				

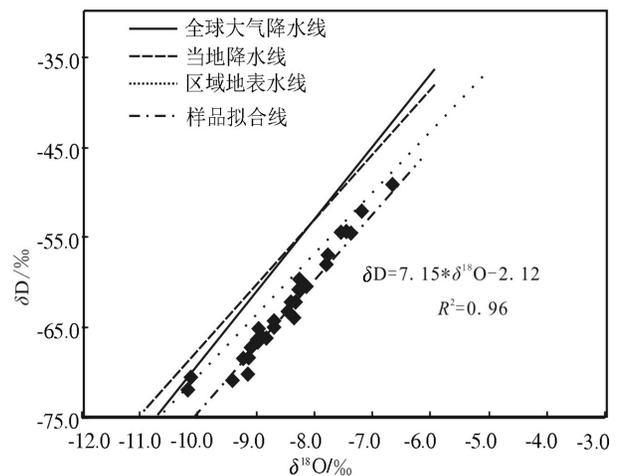


图4 淮北煤田太原组灰岩水中 δD-δ<sup>18</sup>O 同位素特征  
Fig.4 Variations of δD and δ<sup>18</sup>O values of groundwater from limestone aquifer in the Huaibei coalfield

和 $-65.58\%$ 和 $-8.78\%$ ,这种变化规律和TDS浓度具有相似性。即地下水中TDS浓度越大, $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 同位素值越小,TDS浓度越小, $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值越大。图5显示淮北煤田太原组灰岩水中TDS浓度和 $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 具有一定的负相关关系。这种现象揭示了在地下灰岩水流动过程中,溶解了含水介质中大量含氧矿物成分,使得地下水咸化加重,反映了地下水和围岩之间发生了一定程度的水岩作用,地下水流速度缓慢。在此过程中,含氧矿物中较轻的氧原子与较重氧原子发生同位素交换反应,稀释了重同位素。

#### 4.3 地下水年龄及演化

地下水水体年龄是评价其更新能力的一项重要指标。年龄越小的地下水更新速度就越快,再生性也越好。利用环境同位素技术可以实现水体年龄的测定,其中受大气中 $CO_2$ 溶解的影响, $^{14}C$ 方法测定只适用于地下水,其测年上限为35~40 ka,下限为500~1000 a(顾慰祖等,2001;卫文等,2011)。自然界中 $^{14}C$ 产生与其在自然界的交换处于平衡状态,一旦含碳物质停止与外界发生交换, $^{14}C$ 得不到补充,原来的放射性 $^{14}C$ 按一定规律减少,因此根据测试 $^{14}C$ 减少程度就可以计算样品的年龄。地下水中年龄要利用地下水中碳酸盐岩含量得到沉淀固体碳酸盐,然后进行测试,一般地,液体闪烁计数法测定 $^{14}C$ 年龄,所需样品含纯碳在4 g以上。对于20000年以内的样品,测定 $^{14}C$ 年龄不确定度在 $\pm 1\%$ 左右,年龄大于20000年的样品,由于大气中 $^{14}C$ 浓度大变化,不确定度要大于 $\pm 1\%$ 。

由于地下水样品采集需求量较大(60 L左右),受条件限制,淮北煤田太原组灰岩水共测试9个样品,具体结果见表2。可见,淮北煤田太原组灰岩水年龄变化范围较大,年龄最小的位于闸河矿区的朱庄矿,测试年龄为2900 a,年龄较大的为桃园矿和孙疃矿,其地下水年龄分别为21910 a和21410 a,其他样品水体年龄在10000年左右变化。根据淮北煤田地下水年龄绘制该区等值线图,具体见图6。整体看来,淮北煤田太原组灰岩水在南坪向斜和宿南向斜两个位置为明显的峰,地下水年龄较大,在淮北煤田东北部闸河矿区年龄最小,揭示了灰岩水体现出以东北方向闸河矿区为补给区,向西、向南径流的特征,但水体径流缓慢,地下水更新不畅,这种结论和区域地质背景及其他资料揭示的特征一致。2

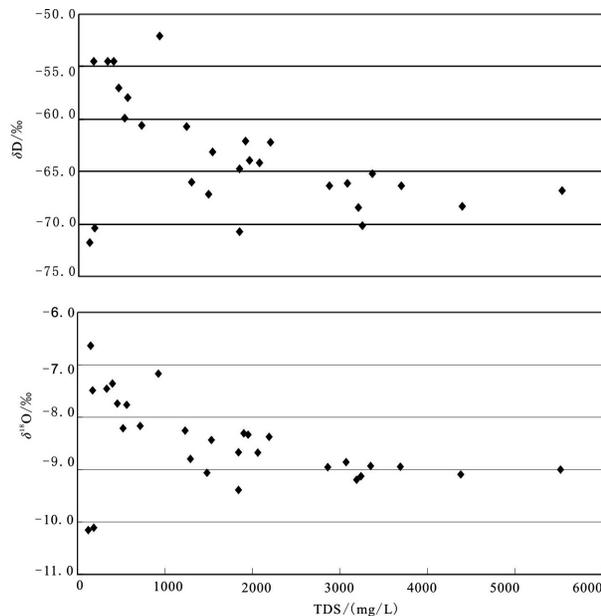


图5 淮北煤田太原组灰岩水TDS- $\delta D$ 、TDS- $\delta^{18}O$ 图  
Fig.5 Variations of TDS- $\delta D$  and TDS- $\delta^{18}O$  of groundwater from limestone aquifer in the Huaibei coalfield

个年龄较大的水样来自桃园矿和孙疃矿,结合区域构造图示可知,桃园矿位于宿南背斜和宿南向斜的转折端,孙疃矿位于童亭背斜和南坪向斜的转折端,这种特殊的构造位置与较大的地下水年龄揭示了,两个矿井太原组灰岩水整体径流不畅,应为相应水文地质单元的排泄区,这种认识也得到了其他资料的证实(陈松,2014)。

#### 4.4 聚类分析

聚类分析能够将一批样本数据根据变量特征,按照在性质上亲缘程度在没有先验知识的情况下进行分类,产生多个分类结果(曹雪春等,2010;袁建飞等,2016)。为此,利用SPSS软件对淮北煤田太原组灰岩水样品进行聚类分析,聚类变量为水常规组分、TDS浓度及 $\delta D$ 、 $\delta O$ 同位素值,聚类结果见图7。可见,29个太原组灰岩水样被分为3个组。其中第一组包括闸河矿区所有4个矿井、宿县矿区4个水样和临涣矿区2个水样,水化学特征以较低的TDS含量(平均361.2 mg/L)为特征,水化学类型主要为 $HCO_3-Na$ 型,其中朱庄矿地下水年龄为2900 a,因此第一组水样代表淮北煤田太原组灰岩水的补给区。第二组包括11个水样,其中宿县矿区4个、濉萧矿区3个、临涣矿区2个和涡北矿区2个,水样

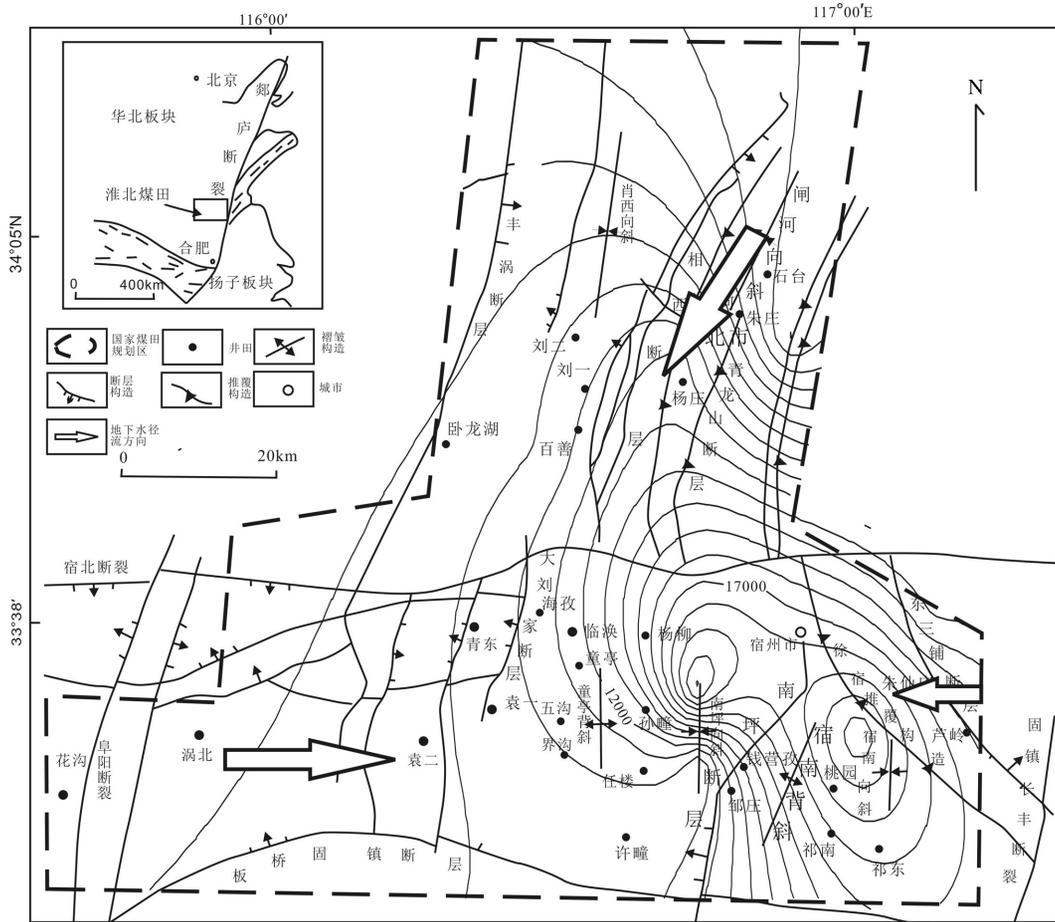


图6 淮北煤田太原组灰岩水年龄等值线图

Fig.6 Contour map of groundwater ages in limestone groundwater from Taiyuan Formation in the Huaibei coalfield

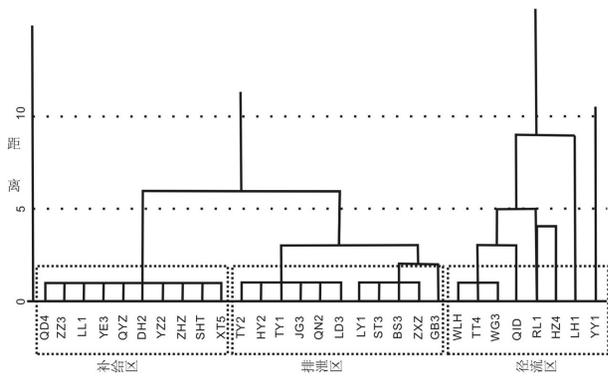


图7 淮北煤田太原组灰岩水系统聚类图

Fig.7 Cluster diagram of groundwater in limestone groundwater from Taiyuan Formation in Huaibei coalfield

类型较为复杂以SO<sub>4</sub>-Na·Ca为主,代表着淮北煤田太原组灰岩水的排泄区,其中也兼具径流区的特征,且地下水年龄较高的桃园矿和孙疃矿均在此

组,也表明了这一特征。第三组包括8个水样,其中以临涣矿区为主,只有卧龙湖1个水样,揭示了该组为淮北煤田太灰水径流区。值得注意的是,由于特殊的地质条件,临涣矿区含有较高的TDS含量,揭示了该区太原组灰岩水径流速度缓慢,滞留时间长。

#### 4.5 空间分布特征

地下水在循环过程中不断与周围介质相互作用,导致水化学组分发生变化,尤其常规离子更为活跃。溶解性总固体(TDS)是地下水浓度的综合反映,TDS等值线图常用来模拟地下水水质浓度梯度场,分析含水层水循环特征。在地下水循环系统中,TDS越小水流补给越充分,地下水滞留时间短,与围岩相互作用微弱。地下水流从TDS小的区域向TDS大的区域径流,等值线密集程度反映地下水与围岩发生溶滤作用的程度。宿县矿区灰岩水TDS等值线图见图8,可见TDS显示的矿区地下水

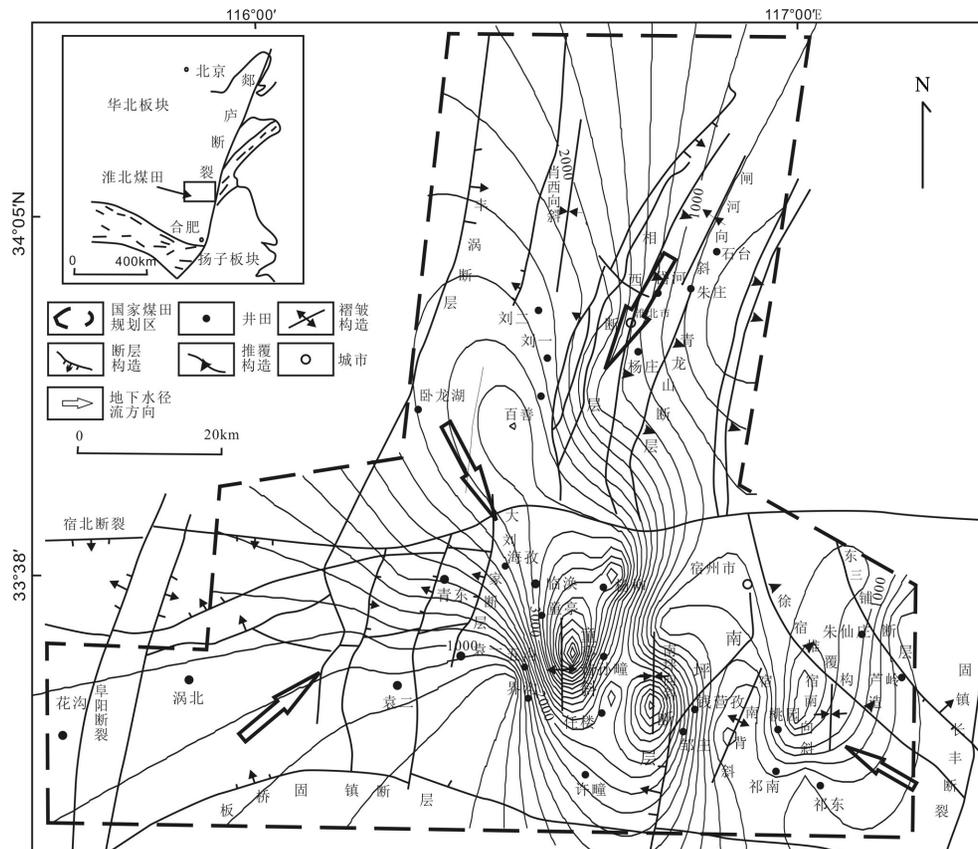


图8 淮北煤田太原组灰岩水TDS浓度等值线图

Fig.8 Contour map of TDS concentration in limestone groundwater from Taiyuan Formation in the Huaibei coalfield

径流特征表现为自矿区两边向中间径流的特征,这与前述资料描述一致。

## 5 结论

受长时间水岩作用及地下水径流影响,淮北煤田太原组灰岩水化学类型较为复杂。各矿区TDS浓度不一,其中闸河矿区TDS浓度最低,其次为宿县矿区、涡北矿区和濉萧矿区,临涣矿区具有最高的TDS浓度。TDS空间分布特征对于揭示太原组灰岩水径流及地下水演化具有一定意义。

灰岩水中氢氧同位素在各矿区也表现出不同的特征,且 $\delta D-\delta^{18}O$ 拟合方程表现出与区域地表水大致相当的斜率,受到一定程度地表水的补给。而地下水中 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值和TDS浓度呈现出一定的负相关关系,且 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 在不同矿区之间的分布特征也与TDS有着规律性的变化。揭示了在地下水径流过程中,总溶解固体在不断增加的同时,水体与围岩的作用过程稀释了重同位素。

以水常规、TDS浓度及 $\delta D$ 、 $\delta O$ 值进行聚类分析,29个水样被分为3个组。第一组以较低的TDS含量和地下水年龄为特征,代表淮北煤田太灰水的补给区。第二组以最大的地下水年龄为特征,代表了淮北煤田的排泄区;第三组以临涣矿区为主,以较高的TDS含量为特征,代表了径流缓慢的径流区。

淮北煤田太原组灰岩水年龄在2900~21910 a之间变化,最小的年龄在闸河矿区,最大的在临涣矿区孙疃矿和宿县矿区桃园矿。TDS浓度等值线图和地下水年龄等值线图呈现一致的演化规律,揭示了淮北煤田太灰水在涡北矿区和宿县矿区东南部也有不同程度的补给。太原组灰岩水径流特征主要受构造背景的控制,地下水补给条件及水岩相互作用程度决定了水体中TDS浓度和氢氧同位素含量。

## References

- Cao Xuechun, Qian Jiazong, Sun Xingping. 2010. Hydrochemical classification and identification for groundwater system by using

- integral multivariate statistical models: A case study in Guqiao Mine[J]. Journal of China Coal Society, S1:141–144 (in Chinese with English abstract).
- Chen Luwang, Yin Xiaoxi, Xie Wenpin, Feng Xiaoqing. 2014. Calculating groundwater mixing ratios in groundwater intruding aquifers based on environmental stable isotopes (D,  $^{18}\text{O}$ ) and hydrogeochemistry[J]. Nat. Hazards, 71, 937–953.
- Chen Song. 2014. Evolution and Recognition of Groundwater Based on 3D Geological Structure Model in Sunan Mining Area[D]. China University of Mining and Technology (in Chinese with English abstract).
- Chen S, Gui H R, Sun L H. 2014. Quality evaluation and its controlling factors of groundwater from Wolonghu Mining area, northern Anhui Province, China[J]. Nature Environment and Pollution Technology, 13(3): 577–582.
- Craig H. Isotopic variation in meteoric water[J]. Science, 1961, 133: 1702–1703.
- Gu Weizu, Pang Zhonghe, Wang Quanju. 2001. Isotope Hydrology[M]. Beijing: Science Press, 10–18 (in Chinese).
- Gui Herong, Chen Luwang, Song Xiaomei. 2005. Drift feature of oxygen and hydrogen stable isotopes in deep groundwater in mining area of Northern Anhui[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 37(1):111–114 (in Chinese with English abstract).
- Gui Herong, Chen Luwang. 2007. Hydrogeochemistic Evolution and Discrimination of Groundwater in Mining District [M]. Beijing: Geological Publishing House, 156–168 (in Chinese).
- Gui Herong, Sun Linhua, Chen Luwang, Chen Song. 2011. Rare earth element geochemistry of groundwater from a deep seated sandstone aquifer, northern Anhui Province, China[J]. Mining Science and Technology, 21:477–482.
- Huang Pinghua, Chen Jiansheng, Ning Chao. 2012. The analysis of hydrogen and oxygen isotopes in the groundwater of Jiaozuo mine area [J]. Journal of China Coal Society, 37(5):770–775 (in Chinese with English abstract).
- Sun Houyun, Mao Qigui, Wei Xiaofeng, Zhang Huiqiong, Xi Yuze. 2018. Hydrogeochemical characteristics and formation evolutionary mechanism of the groundwater system in the Hami basin[J]. Geology in China, 45(6): 1128–1141 (in Chinese with English abstract).
- Tan Jingqiang, Ju Yiwen, Hou Quanlin, Zhang Wenyong, Tan Yongjie. 2009. Distribution characteristics and influences factors of present geotemperature field in Su–Lin mine area, Huaibei coalfield[J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(3):732–739 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiliang, Cao Daiyong, Jiang Bo. 1992. Thrust Nappe, Extensional Gliding Nappe and Gravity Gliding Structures in the Southern Part of North China[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 18–25 (in Chinese).
- Wei Wen, Chen Zongyu, Zhao Hongmei, Liu Jun, Wang Yin. 2011. Comparison of  $^4\text{He}$  and  $^{14}\text{C}$  dating of groundwater from Quaternary confined aquifers in Hebei Plain[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 41(4):1144–1150 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Jianfei, Deng Guoshi, Xu Fen, Tang Yeqi, Li Pengyue. 2016. The multivariate statistical analysis of chemical characteristics and influencing factors of karst groundwater in the northern part of Bijie City, Guizhou Province[J]. Geology in China, 43(4): 1446–1456 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongping. 1989. Study on the background value of stable isotopes in precipitations of China[J]. Site Investigation Science and Technology, 6:6–12 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 曹雪春, 钱家忠, 孙兴平. 2010. 煤矿地下水系统水质分类判别的多元统计组合模型——以顾桥煤矿为例[J]. 煤炭学报, (S1):141–144.
- 陈松. 2014. 基于三维地质结构模型的宿南矿区地下水演化与识别[D]. 中国矿业大学.
- 顾慰祖, 庞忠和, 王全九. 2001. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社.
- 桂和荣, 陈陆望, 宋晓梅. 2005. 皖北矿区地下水中氢氧同位素的漂移特征[J]. 哈尔滨工业大学学报, 37(1):111–114.
- 桂和荣, 陈陆望. 2007. 矿区地下水水文地球化学演化与识别[M]. 北京: 地质出版社.
- 黄平华, 陈建生, 宁超. 2012. 焦作矿区地下水中氢氧同位素分析[J]. 煤炭学报, 37(5):770–775.
- 孙厚云, 毛启贵, 卫晓锋, 张会琼, 蕙玉泽. 2018. 哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化[J]. 中国地质, 45(6): 1128–1141.
- 谭静强, 琚宜文, 侯泉林, 张文永, 谭永杰. 2009. 淮北煤田宿临矿区现今地温场分布特征及其影响因素[J]. 地球物理学报, 52(3):732–739.
- 王桂梁, 曹代勇, 姜波. 1992. 华北南部的逆冲推覆、伸展滑覆与重力滑动构造[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 卫文, 陈宗宇, 赵红梅, 刘君, 王莹. 2011. 河北平原第四系承压水  $^4\text{He}$  与  $^{14}\text{C}$  测年对比[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 41(4):1144–1150.
- 袁建飞, 邓国仕, 徐芬, 唐业旗, 李鹏岳. 2016. 毕节市北部岩溶地下水水化学特征及影响因素的多元统计分析[J]. 中国地质, 43(4): 1446–1456.
- 张洪平. 1989. 我国大气降水稳定同位素背景值的研究[J]. 勘察科学技术, 6:6–12.