

冯亚伟,陈洪年,卜华,等.羊庄岩溶水系统水化学成因及同位素特征[J].中国岩溶,2019,38(3):394-403.  
DOI:10.11932/karst20190309

# 羊庄岩溶水系统水化学成因及同位素特征

冯亚伟<sup>1,2</sup>,陈洪年<sup>1,2</sup>,卜华<sup>1,2</sup>,贾德旺<sup>1,2</sup>

(1.山东省鲁南地质工程勘察院,山东 兖州 272100; 2.山东省地矿局岩溶地质重点实验室,山东 兖州 272100)

**摘 要:**以羊庄岩溶地下水系统为研究对象,通过水化学分析及同位素测试,旨在评价地下水资源,指导开发利用。结果显示:羊庄岩溶地下水系统以现代水为主,在径流过程中主要与灰岩发生水岩相互作用,人类活动对地下水水质的影响较大,岩溶地下水遭受一定程度污染,地下水化学场及水动力场发生不同程度改变。建议相关职能部门采取有效措施抑制地下水污染进一步发展。

**关键词:**羊庄;岩溶水系统;水化学;同位素;成因

**中图分类号:**X532 **文献标识码:**A

**文章编号:**1001-4810(2019)03-0394-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引 言

目前,我国北方地区 65%的生活用水、50%的工业用水和 33%的农业灌溉用水均来自地下水<sup>[1]</sup>。因此,在北方地区开展地下水资源的水化学特征和同位素特征研究尤为重要。

近年来,不断有专家学者运用水化学和同位素方法对岩溶地下水主要补给来源、形成作用、成因机理、不同性质地下水水力联系及人类活动对地下水的影响过程开展研究,取得了一系列研究成果,具有重要的实际意义<sup>[2-7]</sup>;Kodjo Apelete Raoul Kpegli 等<sup>[8]</sup>运用水化学与同位素数据分析了贝宁盆地地表水与地下水以及地下水各含水层之间的转换关系;Song Chao 等<sup>[9]</sup>以泉水为研究对象,利用水化学与同位素方法分析泉水特征及成因、研究其对地下水的补给意义;Carina Zang 等<sup>[10]</sup>对智利北部干旱山区开展水化学与同位素研究,认为这一地区地表水与地下水具有很强的水力联系,对地下水可持续开采、管理具有促进作用。但由于不同地区水文地质条件不同,水化学

特征与水同位素特征也存在明显差异。

对于在中国北方具代表性的水文地质系统——羊庄岩溶水系统来说,研究其水化学与同位素特征意义重大。基于此,本文用这两种方法相结合,分析羊庄岩溶水系统现阶段水化学及同位素特征,查明地下水循环模式及地下水系统内“三水”转化关系,对地区水资源保护和开发,以及生态环境的可持续发展具有重要意义。

## 1 研究区概况

羊庄岩溶水系统位于山东省枣庄市东北部,总面积 650 km<sup>2</sup>,为一大型山间构造盆地,盆地内地势总体东北高、西南低(图 1);属于暖温带半湿润大陆季风气候,多年平均降水量 767.7 mm;属淮河流域运河水系,主要地表水体为新薛河及其支流,其次为分布于边缘山区的中小型水库,新薛河多年平均径流量 2.11 亿 m<sup>3</sup>·a<sup>-1</sup>。

资助项目:山东省国土资源厅《山东省岩溶发育区地质环境调查》(鲁地环(2018)06号);山东省地矿局《山东省岩溶地下水资源可持续开发利用研究》(鲁地字[2014]85号);中国地质调查局《沂蒙山区羊庄盆地 1:5 万水文地质调查(山亭幅、陶庄幅、枣庄市幅)》(12120115045801);山东省地矿局《羊庄岩溶水系统地下水环境演化机理研究》(KY201513)

第一作者简介:冯亚伟(1990-),助理工程师,主要从事水文地质环境地质方面研究。E-mail:1102844258@qq.com。

通信作者:陈洪年(1977-),男,研究员,主要从事水工环地质方面研究。E-mail:327895712@qq.com。

收稿日期:2018-03-15

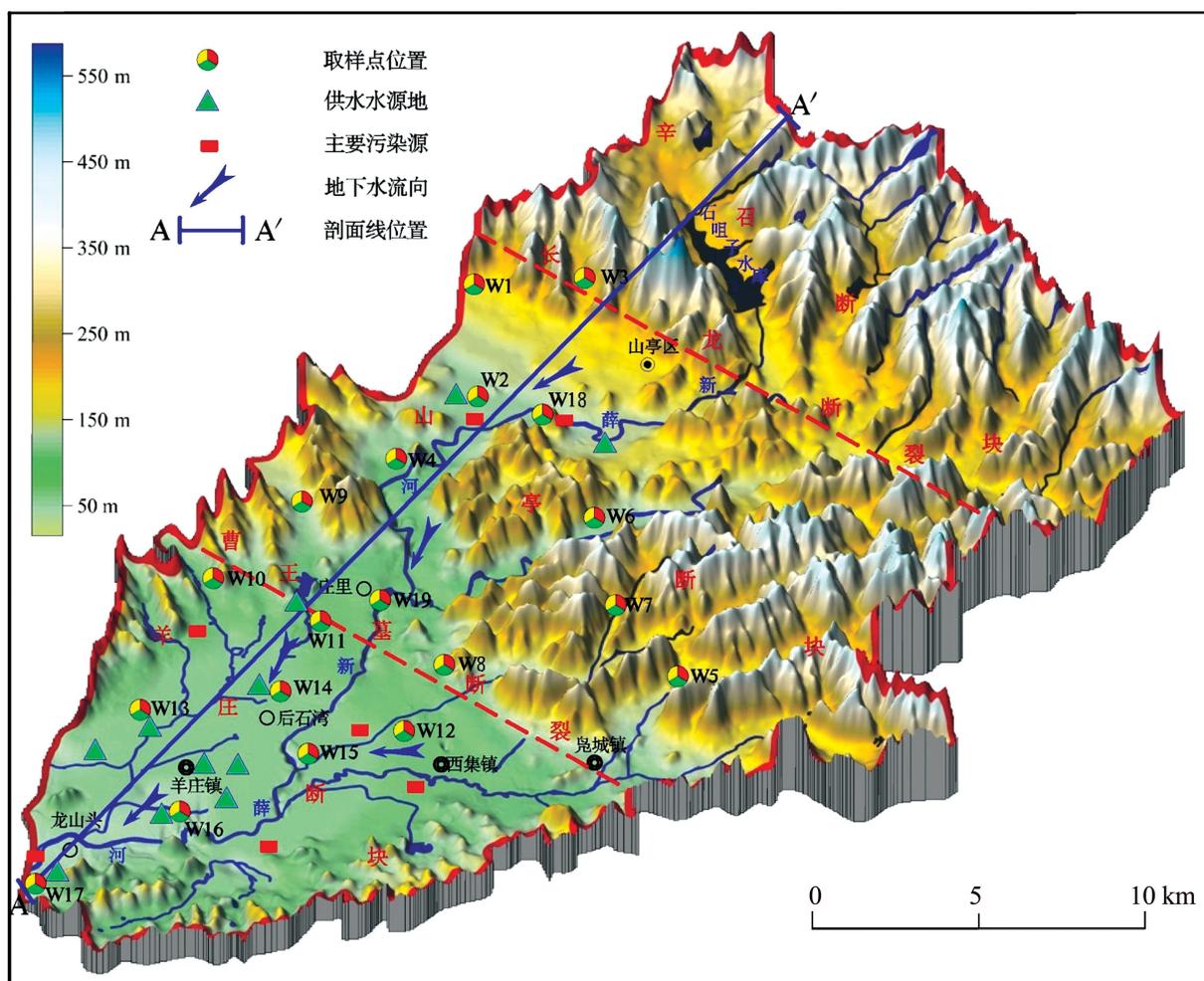


图 1 羊庄岩溶水系统水文地质分区及地下水流向图

Fig. 1 Distribution of hydrological area and groundwater flow field of Yangzhuang karst water system

羊庄岩溶水系统被长龙断裂和曹王墓断裂分割为三个断块,即辛召断块、山亭断块和羊庄断块,各断块之间水力联系密切(图 1、图 2)。辛召断块出露岩性主要为下寒武统页岩夹灰岩和中生代侵入岩,东部地区为泰山群变质岩,地下水赋存空间小,运移环境条件差,地下水资源相对贫乏。山亭断块出露地层以中、上寒武统白云质灰岩为主,基岩大部分裸露;张夏组灰岩是山亭断块子系统主要的含水岩组,由于较大断裂及其影响带裂隙发育,富水性较强。羊庄断块是整个羊庄岩溶水系统的腹地,区内隐伏奥陶系灰岩、白云岩,为羊庄岩溶水系统地下水排泄区;该区块富水性好,水源地多,人口相对集中,是本次研究的重点区域。

辛召断块、山亭断块地形以低山丘陵为主,地下水接受补给后,呈分散状从山脚谷地处排出,转化为地表水;地下水循环深度浅,多以小流域为基本单元,

具有就地补给就地排泄等特征,表现为孤立、分散,无统一完整的地下水面。地下水流经曹王墓断裂后进入系统腹地(羊庄断块),与周边丘陵区具有承压性质的潜水一起向羊庄—魏庄一带含水层汇流,并以泉形式集中排泄。羊庄断块内,地下水具有统一的水面和地下水动力场,流场形态总体呈扇形分布,岩溶水运动方向总体与新薛河流向近似一致,并与新薛河地表水存在多次互补互排水力联系,并随季节变化,转化形式有所不同;此外,该区地下岩溶发育带是地下水强径流带。

自 20 世纪 80 年代以来,羊庄岩溶水系统地下水集中开采量急剧增加,由 1980 年的  $7.8 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  上升到 2016 年的  $21.97 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。伴随着经济发展,人口及工矿企业大量增加,污染源也随之而来,主要包括工业、城市及农业污染三种类型。图 1 为研究区内主要集中供水水源地与污染源。

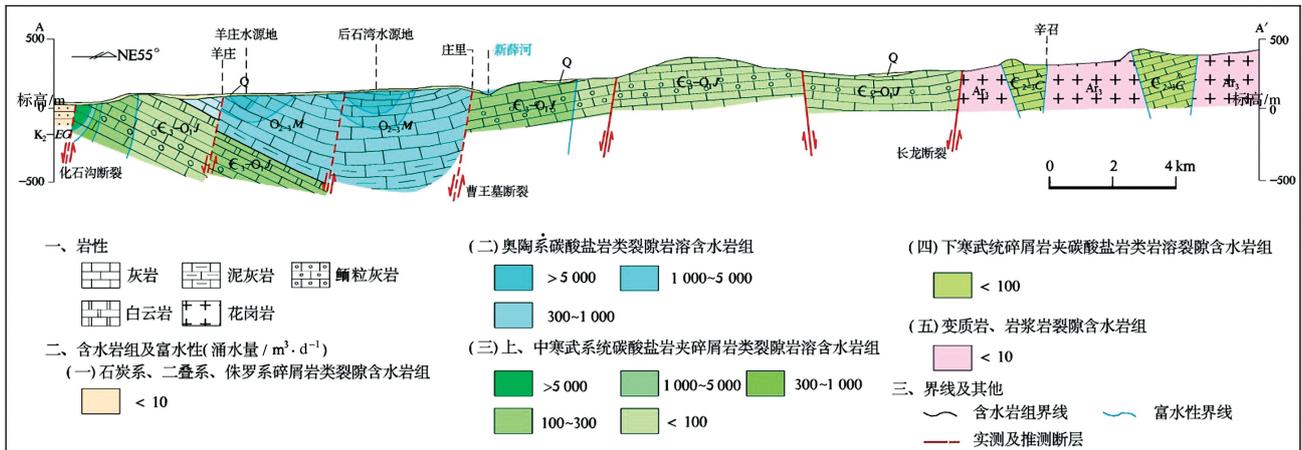


图 2 羊庄岩溶水系统水文地质剖面图

Fig. 2 Hydrogeological section of Yangzhuang karst water system

## 2 水样采集与分析

2016 年枯水期,在研究区内,按照“重点突出,均匀布设”的原则,完成 19 个水化学和 13 组氢氧同位素取样工作。

### 2.1 取样步骤

(1)观察记录其颜色、气味等物理指标;

(2)采用美国生产的 SMAR TROLL MP 便携式水质分析仪,测试取样水体的 pH、EH、TEP、TDS 和电导率等;

(3)用待采水对 2 L 聚乙烯瓶润洗 2~3 次,采集水样,保证取样瓶内不残留气泡,完成后密封保存,用野外记号笔对其编号并注明取样日期、取样地点和化验项目;

(4)用滴定法测定  $\text{HCO}_3^-$  含量,测试应在取样后 24 h 内完成。 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{Cl}^-$  等含量测试送山东省鲁南地质工程勘察院甲级实验测试中心,采用火焰光度计和紫外可见分光光度计测试完成;

(5) $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  测定在挂靠于中国地质科学院水文地质环境地质研究所的自然资源部地下水科学与工程重点实验室完成,采用同位素分析仪(型号 L2320i),利用波长扫描-光腔衰荡光谱法,在特定测试环境(温度 25 °C、湿度 40%)下测定; $^3\text{H}$  在中国地质科学院水文地质环境地质研究所地下水及环境监测中心测试,采用超低本底液体闪烁谱仪,以 DZ/T0064-93 地下水水质质检方法为检测依据,在特定测试环境(温度 24 °C、湿度 48%)下测定。

## 2.2 测试结果

主要测试结果如表 1 所示。

## 3 水化学分析

20 世纪 80 年代始,山东省鲁南地质工程勘察院及其前身先后在系统内开展了多年地下水水质监测工作,相关工作成果表明:系统内地下水各主要离子组含量波动性较大,但整体呈现逐年增高的趋势<sup>[11]</sup>。

### 3.1 六成分图分析

在日本的地下水水质研究中,六成分图法被广泛采用<sup>[12]</sup>,该图形简明易懂,从图中可直接掌握地下水质特征及不同溶解组分的含量,还可对不同水样进行水质比较。将地下水中的主要溶解离子当量浓度画在 3 根水平轴上,三根水平轴从上往下分别代表  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  和  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  当量浓度,将各点用直线联结制成图形。根据表 1 数据做出羊庄岩溶水系统各断块六成分图,结果如图 3 所示。

由图 3(W3)分析可知:辛召断块  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  含量均较小, $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  含量较大,说明水化学特征主要受碳酸盐岩风化控制,地下水水质尚未受到明显的人类活动影响。山亭断块(W1、W2、W4-9)岩溶水  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  含量均比辛召断块高,说明人类活动已经对区内水质产生了明显影响,尤其是农业活动(硫氨类化肥的使用)对水质影响较大。羊庄断块(W10~17) $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  含量相对最高,主要是因为这一地区地形平坦,人口稠密,农业发达,生产及

表 1 水化学及同位素分析结果 (mg·L<sup>-1</sup>)  
Table 1 Analysis results of hydrochemistry and isotope (mg·L<sup>-1</sup>)

编号	子单元	位置	井深 / m	含水层	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	TDS	舒卡列夫分类	$\delta D_{V-SMOW}$ / ‰	$\delta^{18}O_{V-SMOW}$ / ‰	T (T.U)	地下水年龄 / a
W1	山亭断块	西鲁村	200	寒武	0.67	8.0	130.72	0	52.22	54.27	28.80	245.34	397.35	HCO <sub>3</sub> -Ca	-54	-8.1	16.2±1.8	10
W2	山亭断块	南庄水源地	260	寒武	1.11	41.82	151.61	11.46	155.87	38.35	54.73	293.94	426.21	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca	-64	-9.1	5.6±0.8	560
W3	羊庄断块	官庄	152	寒武	0.89	5.60	113.29	3.96	52.22	32.91	19.20	258.9	367.66	HCO <sub>3</sub> -Ca	-63	-8.8	6.7±1.0	380
W4	山亭断块	善固村	153	寒武	0.80	17.22	81.27	64.85	164.02	61.95	39.65	289.97	590.92	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Mg·Ca	-78.8	-10.69	15.2±1.5	20
W5	山亭断块	涝坡村	240	寒武	0.60	5.20	104.58	10.57	71.02	25.3	11.52	265.06	370.51	HCO <sub>3</sub> -Ca	-58	-8.2	5.4±1.0	500
W6	山亭断块	岩底村	270	寒武	7.38	18.75	148.15	19.03	69.97	65.41	43.01	357.53	550.46	HCO <sub>3</sub> -Ca	-60	-8.5	4.7±0.7	600
W7	山亭断块	牛角峪村	400	寒武	1.11	6.80	144.23	8.46	107.57	34.7	15.36	302.05	469.26	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca	-	-	-	-
W8	山亭断块	文王峪村	180	奥陶	0.67	6.40	134.65	4.23	93.99	36.54	19.20	262.6	426.97	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca	-	-	-	-
W9	山亭断块	中黄沟村	150	寒武	0.67	13.13	175.17	15.33	83.55	46.9	72.97	357.53	586.47	HCO <sub>3</sub> -Ca	-56	-7.9	5.5±0.9	290
W10	羊庄断块	尤山子村	120	寒武	0.40	10.00	117.65	2.64	73.11	32.63	23.04	234.24	385.96	HCO <sub>3</sub> -Ca	-58	-7.9	7.0±0.9	215
W11	羊庄断块	小赵庄水源地	100	奥陶	0.89	13.13	99.35	21.67	97.13	27.03	30.72	246.57	413.2	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca	-62	-8.5	5.8±1.2	245
W12	羊庄断块	冯庄	120	奥陶	0.67	13.13	117.65	38.32	93.99	45.9	65.28	295.88	522.88	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca	-	-	-	-
W13	羊庄断块	王杭村	150	奥陶	0.67	11.88	108.94	18.50	26.11	56.97	23.04	295.88	394.04	HCO <sub>3</sub> -Ca	-75.07	-10.44	8.3±1.1	180
W14	羊庄断块	后石湾水源地	200	奥陶	1.0	18.75	126.8	6.34	114.88	34.68	31.87	256.43	473.95	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca	-56	-7.7	15.4±1.8	15
W15	羊庄断块	东薛河村	140	奥陶	0.4	19.38	115.47	9.25	31.33	29.69	23.04	372.32	522.85	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca	-25	-4.5	13.0±1.3	20
W16	羊庄断块	东于水源地	200	奥陶	1.0	12.50	111.12	19.82	73.11	45.62	26.88	265.06	433.95	HCO <sub>3</sub> -Ca	-59	-8.3	6.3±1.2	240
W17	羊庄断块	龙山头水源地	200	寒武	0.67	10.00	153.8	19.99	142.18	50.28	26.39	345.06	588.23	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Ca	-	-	-	-
W18	新薛河	华润纸厂污水	-	污水	32.4	469.6	566.47	55.49	1733.64	14.81	299.5	432.73	3388.28	-	-	-	-	
W19	新薛河	庄里段河水	-	河水	13.6	208.7	188.24	17.97	532.63	1.97	136.3	265.06	1237.33	-	-	-	-	

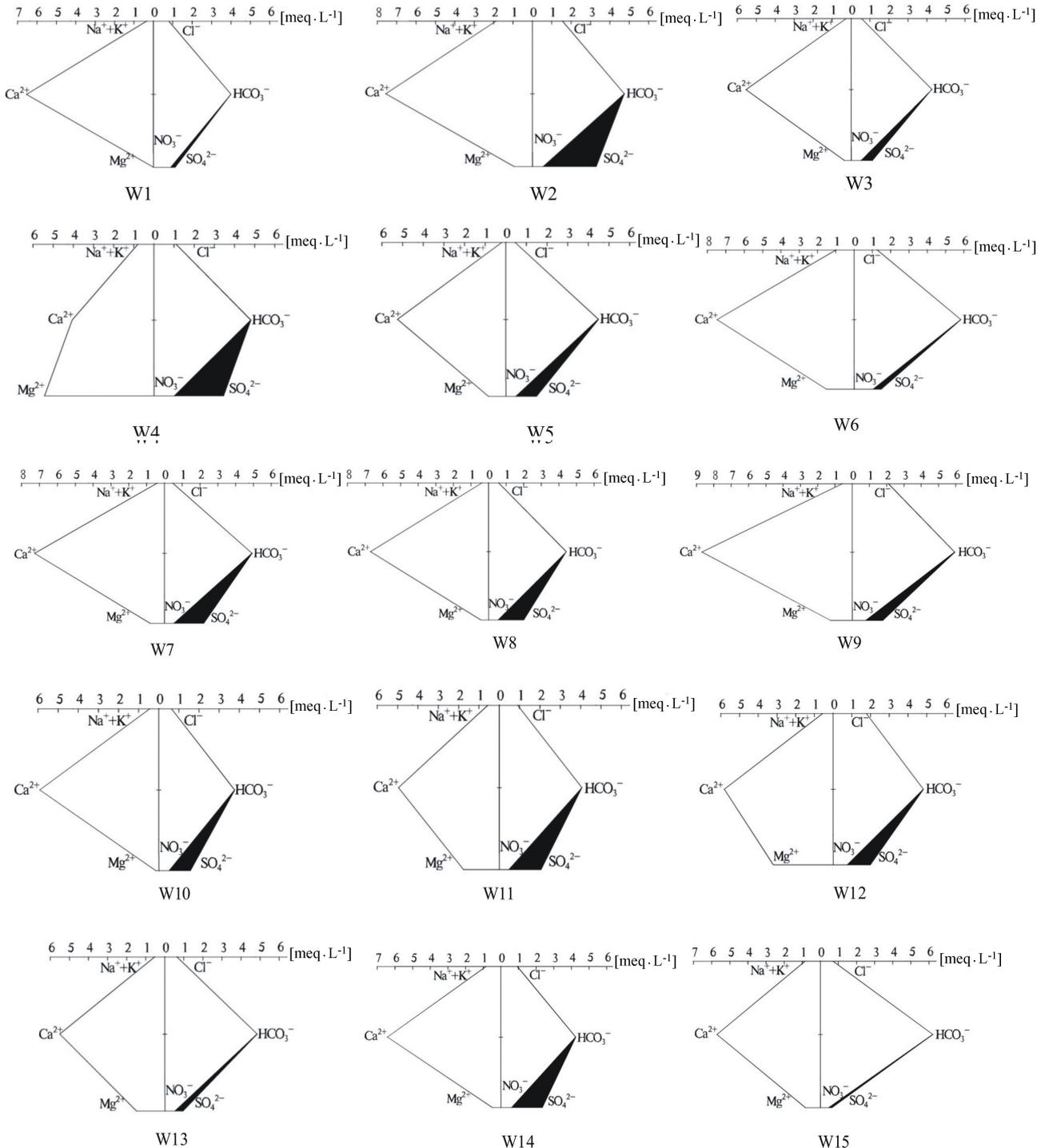
生活废水排放、大量使用化肥农药等因素影响着水质。受工厂排放污水的影响,相对周边地区地下水来说,新薛河水离子组分明显增加,表现出异于常态的六成分图类型(W18、W19)。

### 3.2 比例系数分析

地下水化学中许多化学组分之间存在着某种相关关系(或共生关系)<sup>[13]</sup>。因此,依据地下水水化学组成,可对其成因、所处环境和水岩作用强度等做出

分析和判断。区内地下水水化学比例系数见表2(W18、W19为污水及地表水,不参与本次分析)。

标准海水中的  $\gamma_{Na}/\gamma_{Cl}$  系数平均值为 0.85。在地质历史过程中,如果海相沉积水中的  $Na^+$  与地层水中的交换性钙离子产生阳离子交换,则  $Na^+$  含量下降,  $\gamma_{Na}/\gamma_{Cl}$  小于 0.85;如果地下水主要是含岩盐地层溶滤而成,则  $\gamma_{Na}/\gamma_{Cl}$  应接近于 1<sup>[13]</sup>。本次 82.35% 样品的水化学分析结果  $\gamma_{Na}/\gamma_{Cl}$  小于 0.85,



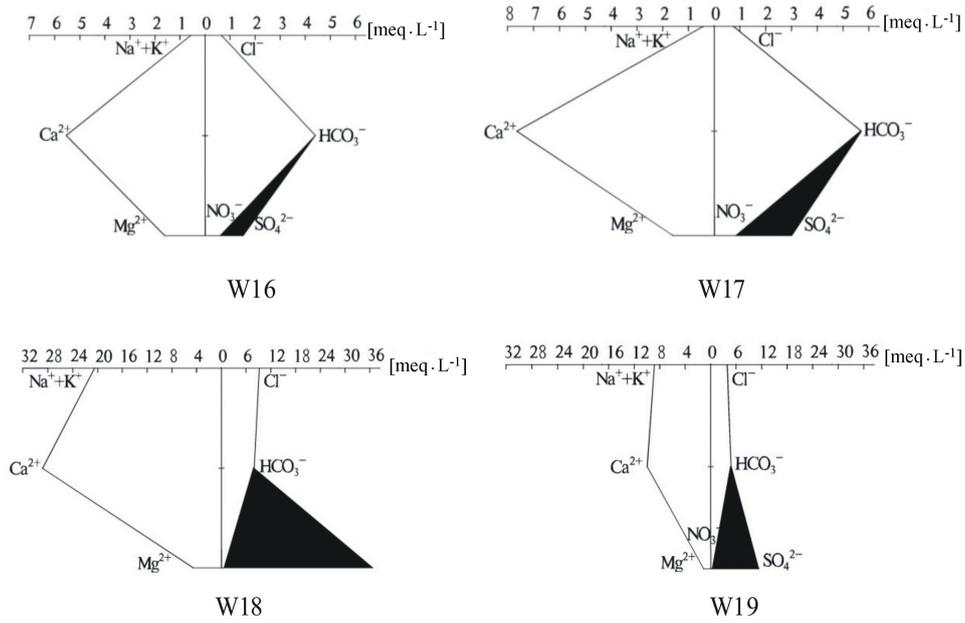


图 3 羊庄岩溶水系统各断块六成分图

Fig. 3 Six component diagrams of fault blocks in Yangzhuang karst water system

表 2 比例系数分析结果

Table 2 Proportional coefficient analysis result

编号	位置	$\gamma_{Na}$	$\gamma_{Cl}$	$\gamma_{Mg}$	$\gamma_{Ca}$	$\gamma_{Na}/\gamma_{Cl}$	$\gamma_{Mg}/\gamma_{Ca}$
W1	西鲁村	0.348	0.811	0.000	6.536	0.429	0
W2	南庄水源地	1.818	1.542	0.955	7.581	1.179	0.126
W3	官庄	0.243	0.541	0.330	5.665	0.450	0.058
W4	善崮村	0.749	1.117	5.404	4.064	0.670	1.330
W5	涝坡村	0.226	0.325	0.881	5.229	0.697	0.168
W6	岩底村	0.815	1.212	1.586	7.408	0.673	0.214
W7	牛角峪村	0.296	0.433	0.705	7.212	0.683	0.098
W8	文王峪村	0.278	0.541	0.353	6.733	0.514	0.052
W9	中黄沟村	0.571	2.055	1.278	8.759	0.278	0.146
W10	尤山子村	0.435	0.649	0.220	5.883	0.670	0.037
W11	小赵庄水源地	0.571	0.865	1.806	4.968	0.660	0.364
W12	冯庄	0.571	1.839	3.193	5.883	0.310	0.543
W13	王杭村	0.517	0.649	1.542	5.447	0.796	0.283
W14	后石湾水源地	0.815	0.898	0.528	6.340	0.908	0.083
W15	东薛河村	0.843	0.649	0.771	5.774	1.298	0.134
W16	东于水源地	0.543	0.757	1.652	5.556	0.718	0.297
W17	龙山头水源地	0.435	0.743	1.666	7.690	0.585	0.217

占绝大多数,说明羊庄岩溶水系统中,地下水与灰岩作用强烈,具有较强的  $Na^+ - Ca^{2+}$  交换作用。

$\gamma_{Mg}/\gamma_{Ca}$  系数可用来判断地下水是来自灰岩还是白云岩含水层。如来自灰岩含水层,  $\gamma_{Mg}/\gamma_{Ca}$  应小

于 1;如来自白云岩含水层,  $\gamma_{Mg}/\gamma_{Ca}$  系数可能接近于 1<sup>[13]</sup>。本次水化学分析 94.12% 的水样  $\gamma_{Mg}/\gamma_{Ca} < 1$ , 说明羊庄岩溶水系统中,地下水主要来自灰岩含水层,这与  $\gamma_{Na}/\gamma_{Cl}$  系数分析结果相吻合。

### 3.3 Piper 三线图分析

根据表 1 水化学分析结果作出 Piper 三线图(图 4)。

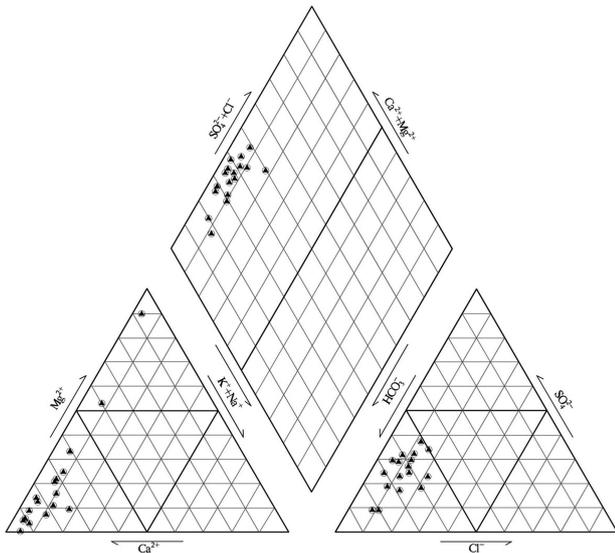


图 4 羊庄岩溶水系统地下水水化学 Piper 三线图

Fig. 4 Piper three-line map of groundwater chemistry in Yangzhuang karst water system

钙离子含量介于  $81.27 \sim 175.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间,毫克当量百分数介于  $20\% \sim 47\%$  之间;重碳酸根含量介于  $234.24 \sim 372.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间,毫克当量百分数介于  $23\% \sim 40\%$  之间;硫酸根含量相对偏大,最大含量为  $164.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,最大毫克当量百分数为  $17\%$ 。

由图 4 可知,地下水阳离子主要为  $\text{Ca}^{2+}$ ,而石灰岩风化产物就应落在  $\text{Ca}^{2+}$  一端,这与羊庄岩溶水系统主要含水介质为碳酸盐岩这一地质条件相吻合;阴离子主要为重碳酸根,说明这一地区地下水含水层以碳酸盐岩风化物质为主。

### 3.4 舒卡列夫分类

由于舒卡列夫分类方法简明易懂,适合水化学资料的初步分析<sup>[14]</sup>,且利用舒卡列夫分类整理水化学资料时,从分类表的左上角向右下角与地下水总的矿化作用过程一致,所以,本文选择该方法对羊庄岩溶水系统水样进行分类,W18、W19 为污水及地表水,不参与本次分类。

从表 1 可看,本研究区基本分为 3 类,分别为  $\text{HCO}_3-\text{Ca}$  型水(占  $47.1\%$ )、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Ca}$  型水(占  $47.1\%$ )和  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Mg} \cdot \text{Ca}$  型水(占  $5.8\%$ )。结合图 1 看, $\text{HCO}_3-\text{Ca}$  型水主要分布在低山丘陵区,远离新薛河主干道,这一地区人口和工矿企业相对较少,水化学组成主要受水岩相互作用控

制,且这一地区主要含水介质为碳酸盐岩,因此,地下水类型为  $\text{HCO}_3-\text{Ca}$  型; $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Ca}$  型水和  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Mg} \cdot \text{Ca}$  型水取样点主要分布在新薛河主干道周边,该区域人口稠密、厂矿较多,生产、生活污水、废水排入新薛河主干道,加之蒸发浓缩作用,导致新薛河河水  $\text{SO}_4^{2-}$  等离子浓度超标严重(W19)。该区域地下水化学成分形成作用以混合作用为主。

受地势影响,地下水径流顺地形坡向由高处往低处运移,且羊庄岩溶水系统下游地区具有统一的地下水径流场,地下水与岩土之间,存在较强的水岩相互作用。

羊庄岩溶水系统新薛河河道及周边地区,基岩裸露,第四系过滤作用较差,地表水与地下水之间相互融合,人类活动对地下水类型影响较大。从污染防治角度来说,地下水污染防治在地下水与地表水污染防治中具有重要的双重意义<sup>[15]</sup>。

### 3.5 水化学类型形成机理

依据上述分析结果,做出羊庄岩溶水系统水化学类型形成作用图(图 5)。

由图 5 可知,羊庄岩溶水系统补给区水文地球化学反应以水岩相互作用为主,TDS 平均含量为  $419 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,地下水化学类型以  $\text{HCO}_3-\text{Ca}$  为主。由于人类活动等影响,径流区水文地球化学反应除水岩相互作用外,还有混合作用和  $\text{Na}^+-\text{Ca}^{2+}$  交换作用,TDS 平均含量为  $590 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,水化学类型以  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Ca}$  为主,小部分地区为  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 。羊庄岩溶水系统排泄区为地下水强径流带,水文地球化学反应以水岩相互作用为主,TDS 平均含量为  $461 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,地下水化学类型以  $\text{HCO}_3-\text{Ca}$  为主。

## 4 同位素特征分析

### 4.1 D、 $^{18}\text{O}$ 同位素分析

1961 年,克雷格通过世界上一些河流、湖泊、降雨和雪的水样测定,得出全球大气降水基本上都近似符合关系式(即通常所称的大气降水线): $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$ <sup>[16]</sup>。但是,由于气候、地区降水水汽来源、地形地貌等原因导致不同地区的大气降水线有很大的差别<sup>[17]</sup>。据郑淑慧等<sup>[18]</sup>研究,我国大气降水线(CM-WL)方程为: $\delta\text{D}=7.9\delta^{18}\text{O}+8.2$ 。

本次监测结果显示:羊庄岩溶水系统  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  值范围分别介于  $-78.8\% \sim -25\%$  和  $-10.69\% \sim -4.5\%$ ,平均值分别为  $-59.1\%$  和  $-8.4\%$ ,最大值

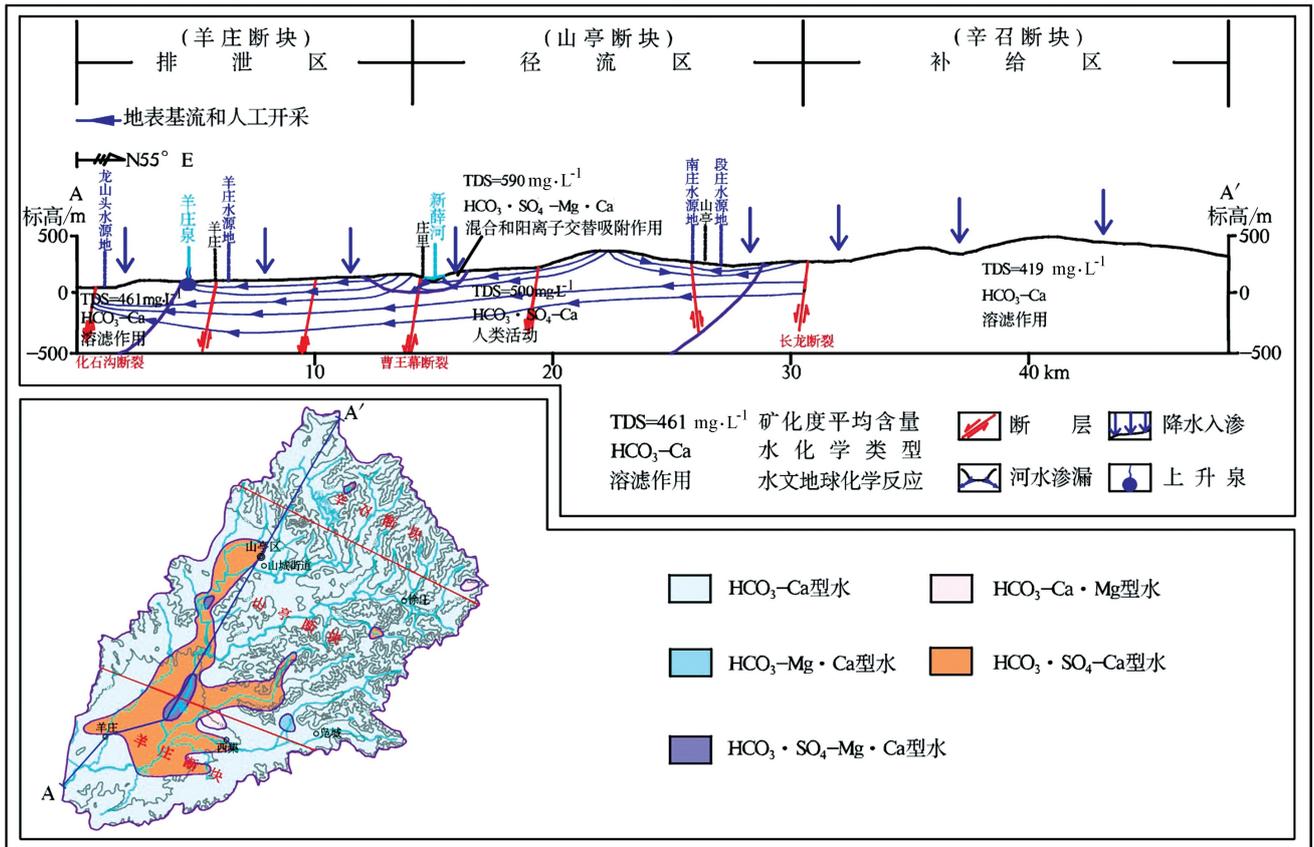


图 5 羊庄岩溶水系统水化学类型成因机理图

Fig. 5 Genesis mechanism map of hydro-chemical type of Yangzhuang karst water system

和最小值差值分别为 53.8‰和 6.19‰。根据  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  关系图(图 6),羊庄岩溶水系统 13 个氢氧同位素水样检测结果基本分布在我国大气降水线附近,且基本位于我国大气降水线上或右下方,说明此系统内岩溶水主要接受大气降水补给。

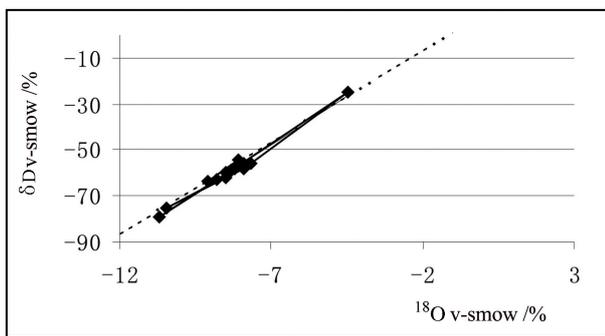


图 6 研究区  $\delta D$  与  $\delta^{18}O$  关系图

Fig. 6 Relationship between  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  in the study area

氡盈余参数  $d$  值( $d = \delta D - 7.9\delta^{18}O$ )主要受空气相对湿度控制,蒸发作用越强,氡盈余值越偏负<sup>[6]</sup>;水岩作用越强,氡盈余值越趋于零。羊庄岩溶水系统氢

氧同位素  $d$  值集中分布在 4.41‰~10.55‰,表明,系统内岩溶水除了受水岩相互作用影响外,还一定程度上受蒸发作用的影响。

### 4.2 $^3H$ 同位素分析

氡的来源主要有天然和人工两种方式,天然氡的含量基本是稳定的,人工氡的来源主要是 1952 年以来进行的核试验,这种方式使大气中的氡含量急剧增加。氡测年方法是确定年轻地下水年龄中最为常用的一种放射性同位素方法<sup>[19]</sup>。

通常来讲, $^3H$  地下水同位素测年方法,只适用于 1952 年以来补给的地下水;而  $^{14}C$  地下水同位素测年法由于具有方法比较成熟、测年范围较大等优点,许多实验室都可以测试,是目前针对年老地下水最常用的测年方法<sup>[20]</sup>。羊庄岩溶水系统面积较小,而  $^{14}C$  半衰期较长(5 730 a),故此方法不适用于本系统,故本次研究选用  $^3H$  同位素测年方法。

由于补给径流区接受大气降水补给后再次以泉的形式排泄到地表,并与雨水混合,径流,再次补给到下游排泄区,如果将补给径流区与排泄区作为一个整体,计算地下水年龄,结果会产生较大误差,基于此,

本文采取分别计算补给径流区和排泄区地下水年龄的方式。

利用<sup>3</sup>H同位素获取地下水年龄,首先将<sup>3</sup>H输入浓度和输出浓度代入“指数-活塞”模型,通过迭代法确定模型关键参数值(η),然后将参数η回代入“指数-活塞”模型,最终确定补给径流区 η=1.29,排泄区 η=2.12,输出<sup>3</sup>H浓度和地下水平均滞留时间(τ<sub>m</sub>)的关系曲线(图7),最后利用配线法读取各个取样点的地下水平均滞留时间,即可获得地下水年龄(表1),并根据最终计算结果做出羊庄岩溶水系统上下游岩溶水<sup>3</sup>H年龄剖面(图8)。

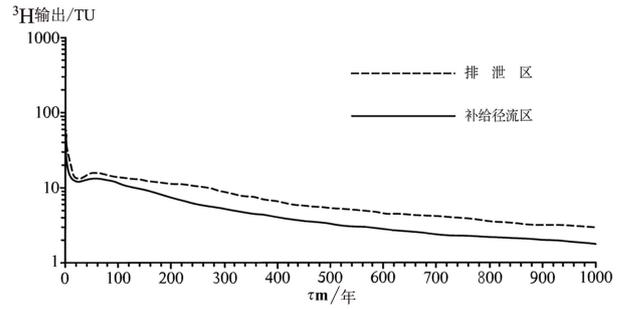


图7 <sup>3</sup>H浓度和地下水平均滞留时间(τ<sub>m</sub>)关系曲线  
Fig. 7 Relationship between <sup>3</sup>H concentration and underground mean residence time (τ<sub>m</sub>)

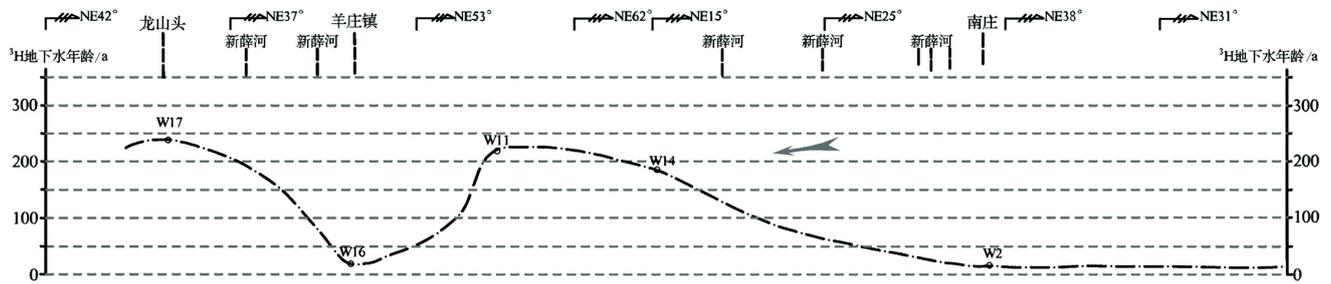


图8 羊庄岩溶水系统上、下游岩溶水<sup>3</sup>H年龄剖面  
Fig. 8 Profile of <sup>3</sup>H age of karst water in upper and lower reaches

本次检测结果显示,研究区内岩溶水氡含量基本介于4.7~16.2 T. U,表明研究区内岩溶水基本为年轻的现代水,地下水年龄介于10~600 a之间,也就是说地下水的主要补给来源为大气降水,这与羊庄岩溶水系统良好的补径排条件相互吻合。

由图8可知,从整个岩溶水系统分布来讲,沿着地下水的径流方向,地下水年龄总体呈逐渐增长趋势;仅在局部地区同位素特征与这一规律相反,说明系统内存在多个级次的地下水流动系统;在地下水开采强度较大地区(W16点附近),地下水年龄相对偏小,说明人类开采活动对地下水补径排条件的影响越来越大。综合来看,羊庄岩溶水系统岩溶水基本都为现代水。

### 5 结论

通过分析羊庄岩溶水系统中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup> 和氢氧同位素等测试指标,结合六成分图分析、比例系数分析、Piper 三线图分析、舒卡列夫分类分析、水文地球化学作用分析以及氢氧同位素分析,得出以下结论:

(1)水化学特征分析表明,在离新薛河干流较远地区,地下水成分形成作用主要以水岩相互作用为主,化学成分主要来源于碳酸盐岩风化物质;而在新薛河干流两侧,受人类活动以及混合作用影响,地下水中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 等的含量呈现明显的上升趋势。

(2)据氢氧同位素特征分析,羊庄岩溶水系统内地下水主要受大气降水的补给,岩溶水的形成除了受水岩相互作用影响外,还受蒸发作用的影响;从上游到下游,地下水年龄总体呈逐渐增长趋势,部分地区因地下水的大量开采,呈现出相反特征。

(3)羊庄岩溶水系统内补径排蓄条件良好,区内岩溶水(特别是新薛河主河道周边)已经受到了一定程度的污染,急需采取相关措施抑制这一趋势。

### 参考文献

- [1] 鲁垠涛,刘芳,姚宏,等.北京密云水库小流域地下水硝酸盐污染源示踪[J].环境化学,2016,35(1):180-188.
- [2] 袁建飞,邓国仕,徐芬,等.毕节市北部岩溶地下水水文地球化学特征[J].水文地质工程地质,2016,43(1):12-21.
- [3] 邓启军,李方红,李伟,等.蒲阳河流域地下水水化学及同位素特征[J].水文地质工程地质,2017,44(2):8-14.
- [4] 苗迎,孔祥胜,宋朝静,等.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.
- [5] 隋海波, 康凤新, 李常锁, 等. 水化学特征揭示的济北地热水与济南泉水关系[J]. 中国岩溶, 2017, 36(1): 49-58.
- [6] 贾新生, 张东, 赵志琦, 等. 南太行山山前平原地下水和地表水氢氧同位素组成及环境意义[J]. 地球与环境, 2016, 44(3): 281-289.
- [7] 王洁青, 周训, 李晓露, 等. 云南兰坪盆地羊吃蜜温泉水化学特征与成因分析[J]. 现代地质, 2017, 31(4): 822-831.
- [8] Kodjo Apelete Raoul Kpegli, Abdoukarim Alassane, Rim Tra-belsi, et al. Geochemical processes in Kandi Basin, Benin, West Africa: A combined hydrochemistry and stable isotopes approach [J]. Quaternary International, 2015, 369: 99-109.
- [9] SONG Chao, HAN Guilin, WANG Pan, et al. Hydrochemical and isotope characteristics of spring water discharging from Qiushe Loess Section in Lingtai, northwestern China and their implication to groundwater recharge [J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2017, 5(4): 364-373.
- [10] Carina Zang, Juliane Dame, Marcus Nisser. Hydrochemical and environmental isotope analysis of groundwater and surface water in a dry mountain region in Northern Chile [J]. Environ Monit Assess, 2018, 190: 334.
- [11] 沂蒙山区羊庄盆地 1:5 万水文地质调查(山亭幅、陶庄幅、枣庄市幅)综合评价报告[R]. 山东省鲁南地质工程勘察院, 2016.
- [12] 三上英敏. 地下水硝酸污染に係わる污染源简易判定について [EB/OL]. <http://www.hokkaido-ies.go.jp/new/2009/pdf/seika/hozen.pdf>, 2010-3-8.
- [13] 沈照理, 朱宛华, 钟佐燊. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [14] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
- [15] 薛禹群, 张幼宽. 地下水污染防治在我国水体污染控制与治理中的双重意义[J]. 环境科学学报, 2009, 29(3): 474-481.
- [16] 张秋霞, 周建伟, 康凤新, 等. 淄博矿区地下水污染水动力和同位素解析[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(8): 116-122.
- [17] 陈新明, 甘义群, 刘运德, 等. 长江干流水体氢氧同位素空间分布特征[J]. 地质科技情报, 2011, 30(5): 110-114.
- [18] 郑淑慧, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1982, 13: 801-806.
- [19] 李惠娣. 测年方法在地下水中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(1): 1-6.
- [20] 中国地质调查局. 水文地质手册(第二版)[M]. 北京: 地质出版社, 2012.

## Hydro-chemical genesis and isotope characteristics of Yangzhuang karst water system

FENG Yawei<sup>1,2</sup>, CHEN Hongnian<sup>1,2</sup>, BU Hua<sup>1,2</sup>, JIA Dewang<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Lunan Institute of Geological Engineering Survey, Yanzhou, Shandong 272100, China;

2. Key Laboratory of Karst Geology, Shandong Provincial Bureau of Geology and Mining Resources, Yanzhou, Shandong 272100, China)

**Abstract** Taking Yangzhuang karst groundwater system as the research object, this paper aims at evaluating groundwater resources and guiding the resource development and utilization through hydrochemical analysis and isotope test. The results show that the karst groundwater system in Yangzhuang is dominated by modern water, which mainly interacts with limestone in the course of runoff. Human activities have a great impact on groundwater quality. The karst groundwater is polluted to a certain extent, and groundwater chemical field and hydrodynamic field have changed to different degrees. It is suggested that the relevant functional departments take effective measures to restrain the further development of groundwater pollution.

**Key words** Yangzhuang, karst water system, hydro-chemistry, isotope, genesis

(编辑 张玲)