

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

太原东山地下水的三种混合模式

王怀颖 王瑞久

(地质矿产部环境地质中心, 北京)

文章利用水文地球化学和同位素水文学的原理和方法, 识别出太原东山地下水的三种不同混合模式。在杨兴、大方山岩溶洼地, 受污染的浅层第四系地下水向深部灰岩含水层的入渗混合。在东山煤矿, 因矿坑突水引起灰岩地下水的侧向补给和径流, 使原滞流区的灰岩地下水受到不断混合和淡化。在谷旦附近, 煤系地层和灰岩地下水沿隐伏断裂带朝上向第四系含水层排泄, 形成三种水的混合。

混合作用是水流系统中一种常见的现象。它是由分子(或离子)扩散、水动力弥散两种作用引起的。在天然条件下, 降水入渗和地下水混合是最常见的, 其结果导致地下水化学组分含量的季节性变化。在补给来源、水化学性质、温度不同的水体发生水力联系的地方, 不同水体混合会引起水温、水化学、甚至同位素组成的明显异常。矿床和地下水开采过程中, 也常常会引起水的混合, 并出现水化学成分的改变。这是因为人工降低水位破坏了天然的水动力环境, 使原本不相联系的水体发生水力联系, 致使开采层地下水的天然化学成分分布遭到破坏。识别混合作用, 判明混合水源和混合形式, 能够有效地解答地下水补给条件、水流型式以及各水体间相互关系等重要的水文地质问题。而用常规方法去解决上述问题, 则往往耗资很大还难以得到满意的结果。

1984—1985年我们在太原东山工作期间, 应用水文地球化学和同位素水文学的原理和方法, 识别出三个发生明显混合作用的地区(图1), 下面分别进行讨论。

1. 杨兴、大方山地区

位于太原市东北部山区, 奥陶—寒武系灰岩大片裸露地表(图2), 是太原东山岩溶水的补给区。杨兴至南温川, 大方山至东梁, 分别有杨兴河和东凌井河两个河谷岩溶洼地。洼地内有新生界松散层直接覆盖在灰岩上, 其最大厚度可达100—200m, 但一般厚度不大, 故沟谷中仍不时有灰岩出露。洼地内村落密集, 并有大片农田。松散层和灰岩地下水的化学成分分别见表1和表2。

松散层水的矿化度由381mg/l至1115mg/l, 都属于 $\text{HCO}_3\text{-CaMg}$ 型水, 它们有两个突出的特点。一是都有很高的 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 离子浓度, 这是因为入渗水通过植物根系时得到了较多的二氧化碳, 并溶解土壤中碳酸钙造成的; 二是都检出了很高的 NO_3^- 离子浓度, 显然已受到污染。

采自灰岩的水几乎都是 $\text{HCO}_3\text{-CaMg}$ 或 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水, 只有黄场峪407号泉属 $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-CaMg}$ 型水。从矿化度来看可以分成两组。第一组水包括表2中的前九件样, 其矿化度很低, 介于197—273mg/l之间, Na^+ 和 Cl^- 离子浓度也很低, 平均含量分别为6.4mg/l和9.0mg/l; 第二组水包括表2的后五件样, 它们的矿化度达到339—610mg/l, 明显高于第一组水。在矿化度普遍很低的补给区为什么会出现矿化度偏高的第二组水, 它们是如何形成的, 将在下面做进一步研究。

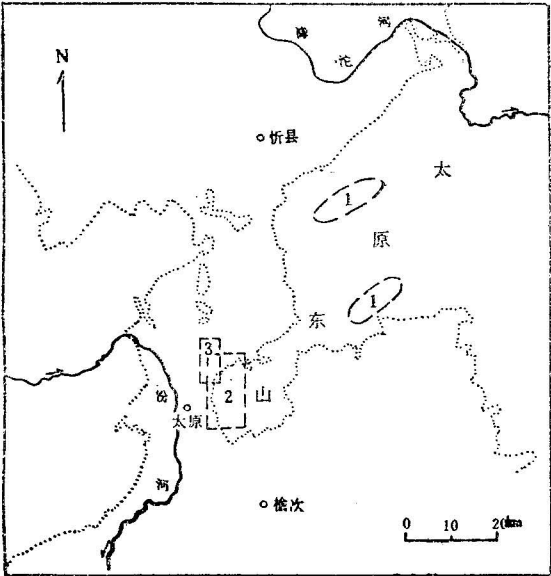


图 1 研究地区位置图

Fig. 1 Location of the study area
1—杨兴、大方山；2—东山矿煤；3—谷旦村
1—Yangxing and Dafangshan; 2—The East Mountain coal mine; 3—Gudan

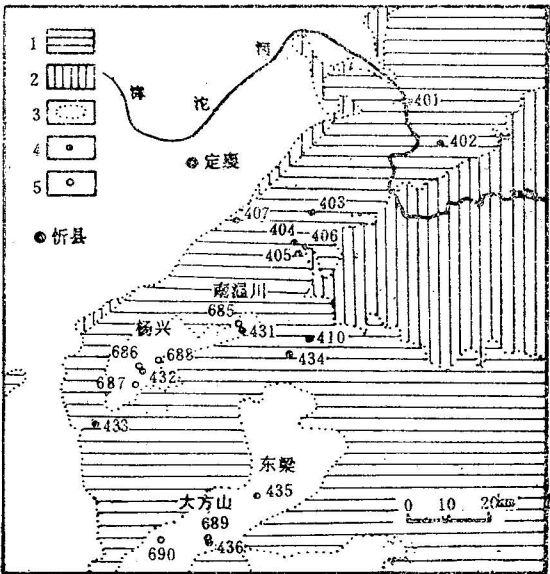


图 2 取样点位置图

Fig. 2 Location of the sampling points
1—灰岩；2—变质岩；3—松散层；4—灰岩水点；5—松散层水点
1—Limestone; 2—Metamorphic rock; 3—Unconsolidated deposit; 4—Sampling points in limestone; 5—Sampling points in unconsolidated deposit

表 1 杨兴、大方山地区松散层水化学分析资料

Table 1 Chemical data of the water in unconsolidated deposits

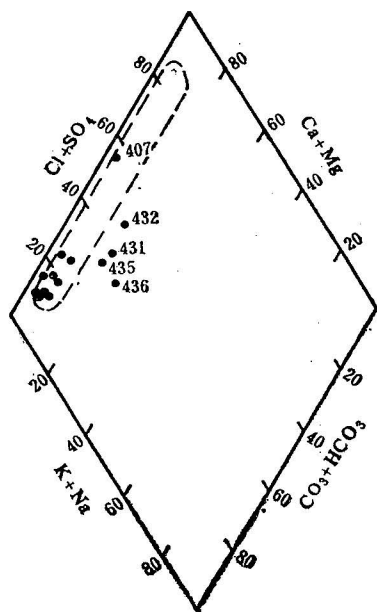
样 号	离 子 浓 度 (mg/l)							矿 化 度 (mg/l)
	K ⁺ + Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	
685	35.2	286.5	56.2	144.4	67.2	585.7	249.8	1115
686	27.1	132.2	26.7	67.3	45.6	311.2	109.9	656
687	25.2	142.2	26.7	56.7	31.2	433.2	39.9	539
688	17.7	131.2	21.8	39.8	46.8	381.2	50.0	498
689	16.5	88.7	27.7	26.5	24.0	334.7	25.4	381
690	45.8	165.3	35.2	66.6	79.2	433.2	160.0	760

从灰岩水三线图解(图3)可以看出:

- (1) 第一组水和第二组的407号样,都落在虚线圈出的东山地区灰岩水的演化范围内,证明了这些水的矿化度虽有差别,但都属于正常的灰岩地下水。
- (2) 第一组水(图3上未编号点)都落在图的左角,是典型的补给区灰岩淡水。其Ca²⁺、Mg²⁺离子浓度都随矿化度升高而增加,反映了水对碳酸盐矿物的溶解过程。水中的Na⁺和Cl⁻离子的平均浓度,则代表着东山灰岩水的背景值。
- (3) 407号样的矿化度偏高,Ca²⁺和SO₄²⁻离子的浓度也明显升高。表明其流经路程较长,在流动过程中不仅溶解了碳酸盐矿物,而且还有硫酸盐矿物(如石膏)被溶解^[1]。

表 2 杨兴、大方山地区灰岩水化学分析资料
Table 2 Chemical data of the water in limestone

样 号	离 子 浓 度 (mg/l)							矿 化 度 (mg/l)
	$K^+ + Na^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	
401	6.5	53.1	13.9	10.6	19.2	207.4	7.0	214
402	9.8	60.1	14.5	10.6	31.2	216.6		253
403	4.8	49.5	13.0	10.6	19.2	198.3	0.0	197
404	4.3	55.6	22.1	8.8	14.4	270.0		241
405	3.7	57.6	20.0	7.0	27.6	254.7		244
406	3.8	67.1	11.5	7.0	14.4	257.8	0.0	233
410	6.6	54.9	23.9	7.4	20.6	267.2		247
433	9.3	66.1	14.6	10.6	28.0	250.2	5.0	228
434	8.9	64.7	20.7	8.1	10.0	283.7	17.9	273
407	7.9	112.8	27.4	8.9	181.6	210.5	19.8	464
431	34.5	65.1	26.1	42.6	28.4	244.1	43.0	366
432	48.4	105.2	49.8	61.7	108.1	341.7	68.0	610
435	32.8	75.2	26.1	23.1	43.2	296.0	55.0	406
436	42.3	54.1	22.5	27.5	57.6	251.7	10.0	339



图·3 灰岩水化学三线图
Fig. 3 Trilinear diagram for the limestone water.

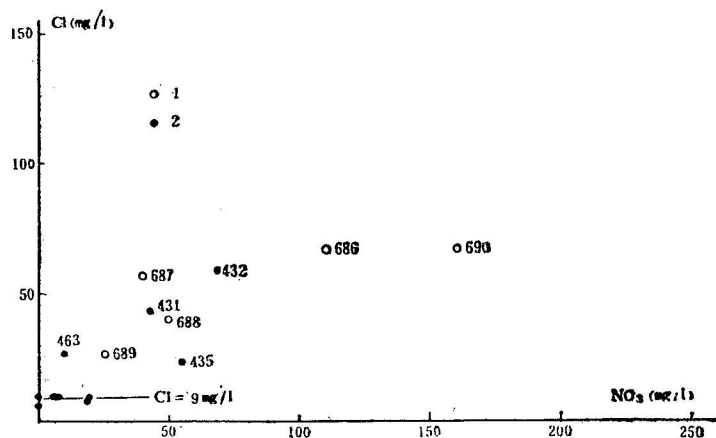


图 4 Cl^- — NO_3^- 关系
Fig. 4 Map showing the relation between Cl^- and NO_3^-

1—松散层水；2—灰岩水
1—Water samples in unconsolidated deposit; 2—Water samples in limestone

(4) 第二组水余下的四件样,即431、432、435和436号样,明显偏离了正常的灰岩水。其 Na^+ 和 Cl^- 离子浓度远高于正常灰岩水的背景值,故它们应是受到某种附加作用影响的异常灰岩水。

进一步的分析表明,异常灰岩水的 Cl^- 离子浓度,大都随 NO_3^- 离子浓度增加而升高,并与松散层中受污染水的 Cl^- — NO_3^- 浓度关系相同(图4)。而且异常水的矿化度, Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 离子浓度也大都介于第一组灰岩水和松散层水之间。上述情况提示我们,异常水中的 Cl^- 离子主要来自污染,这四件水应是浅部污染水,包括受污染的松散层水和地表水,入渗到灰岩中,并与灰岩淡水相混合的产物。

这种混合作用,还可以由下列资料得到进一步证实:

(1) 异常水的 pH 值较高,432号样为 $29.04 \pm 0.68 \text{ TU}$,436号样 pH 值为 $60.67 \pm 0.93 \text{ TU}$,显见有浅部近代水混入;

(2) 因河水、松散层水渗入灰岩,使杨兴河和东凌井河成为干谷,仅大雨后有短时水流;

(3) 杨兴至南温川地处河谷洼地,地势很低,但这里的灰岩水位却很高,出现了一个水位标高 $981.77-1\ 015.95 \text{ m}$ 的地下水丘,水丘的形成当归因于浅部水的渗入补给。

2. 东山煤矿区

位于太原市以东的丘陵区(图5),地面标高 $850-1\ 000 \text{ m}$ 。煤矿分布在东山背斜西南倾伏部位,地层走向由北西转向北东,均向太原盆地方向倾斜,倾角一般 $10^\circ-20^\circ$ 。区内近东西走向的断裂发育,并伴有顺走向的波状褶皱,矿区西侧被山前断裂所截。巨厚的奥陶系中统灰岩是主要含水层,其上依次覆盖着石炭系本溪组砂页岩及铝土岩,太原组煤系和山西组煤系,最上面是二叠系砂页岩互层。本溪组相对隔水,其上的煤系和砂页岩互层含有裂隙水,但富水性都很弱。

近三十年来,煤矿开采逐渐扩大,目前已建有三处矿井和很多小煤窑。涧河以北大多是社队经营的小窑,上山部位的煤窑日排水量仅 $20-30 \text{ m}^3$;下山小窑水量略大,日排水量为 $100-700 \text{ m}^3$ 。规模最大的东山煤矿位于涧河以南,已建有银山、杨家峪、观家峪三处矿井,日排水量一般为 $300-1\ 600 \text{ m}^3$,最大日排水量可达到 $2\ 466 \text{ m}^3$ 。随着开采范围和采掘深度逐渐加大,矿井突水现象时有发生,记录在案的突水事件已有八次。特别是1982年10月19日六斜坡下山突然溃水,日出水量达 $10\ 000 \text{ m}^3$ 以上,一度淹没大巷和下山采区,引起了人们的关注。太原市自来水公司和山西煤管局148队都曾对这次突水做过调查。都认为如此大的突水量,并长期保持稳定,只可能来自奥陶系灰岩。但水的矿化度、水化学类型又和煤系水有些相似,故觉得从水质上看,还不能确认是灰岩水,需要做进一步工作。

在太原东山工作期间,我们收集了煤矿区的有关资料,补充测定了灰岩水、矿井水的化学成分和氢、氧同位素组成。下面将对矿井突水来源做一些补充研究和预测。

从图6上可以得出:

(1) 灰岩水、煤系水、第四系松散层水,三者的水化学性质有明显差别。

(2) 灰岩水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子占绝对优势。阴离子则由 HCO_3^- 离子占优势渐变为 SO_4^{2-} 离子占优势。在涧河以北,分布着矿化度小于 300 mg/l 的 HCO_3^- 型淡水。向南出现矿化度大于 400 mg/l 的 HCO_3^- — SO_4 和 SO_4 — HCO_3^- 型水。北沙河以南,因无明显排泄,地下水相对停滞,出现了矿化度超过 $1\ 600 \text{ mg/l}$ 的 SO_4 型水。上述水化学的演变趋势,反映了灰岩水天然状态下的水化学分布规律。

(3) 灰岩之上的煤系和砂岩水,其矿化度低者不足 300 mg/l ,高者可达 $2\ 000 \text{ mg/l}$ 。也出现有 HCO_3^- — SO_4 、 SO_4 — HCO_3^- 和 SO_4 型水。它们的矿化度范围、水化学类型虽同灰岩水有相似之处,但煤系水中 Na^+ 离子的相对浓度更高,而 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子的相对浓度更低。故而,煤系和砂岩水

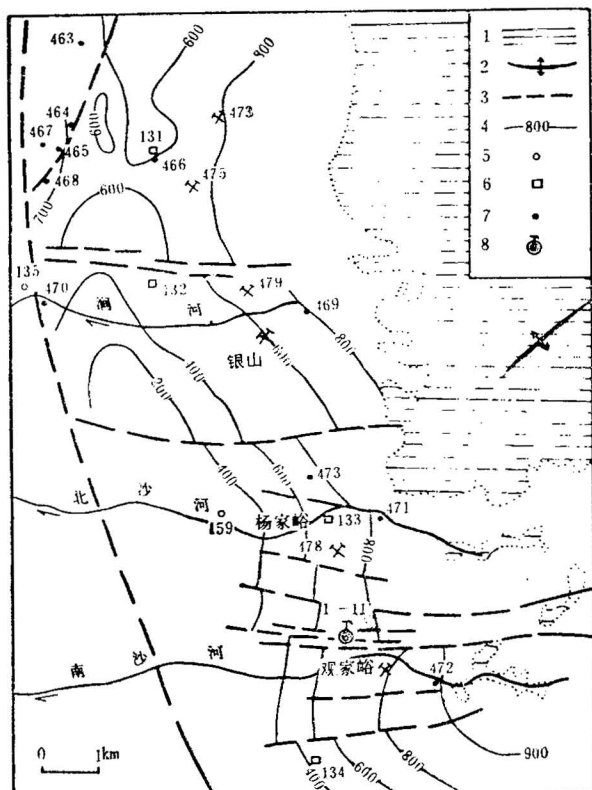


图 5 取样点位置图

Fig. 5 Location of the sampling points

1—灰岩露头；2—东山背斜；3—断层；4—灰岩顶板等高线；5,6,7—分别为松散层水、煤系水、灰岩水采样点；8—六斜坡突水点
 1—Outcrop of limestone; 2—The East Mountain anticline; 3—Fault; 4—Elevation of the top surface of limestone; 5,6,7—Sampling points in unconsolidated deposit, coal-bearing strata and limestone; 8—Location of water bursting in the sixth slope

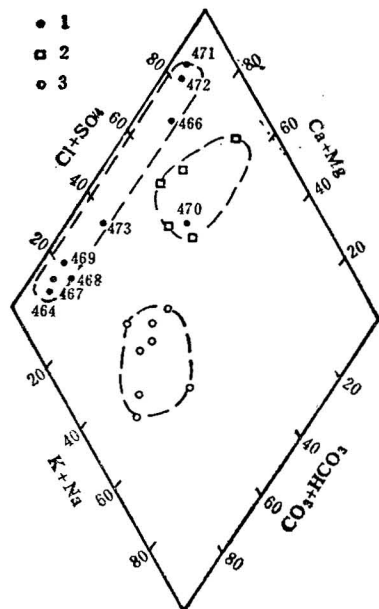


图 6 煤矿区水化学三线图解

Fig. 6 Trilinear diagram for water in the coal mine area

1—灰岩水；2—煤系水；3—松散层水
 1—Water samples in limestone; 2—Water samples in coal-bearing strata; 3—Water samples in unconsolidated deposit

都偏在灰岩水的右边。

(4) 松散层水属 $\text{HCO}_3\text{-CaNa}$ 或 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型，矿化度介于290—530mg/l之间，与前述两种基岩水明显不同。

(5) 中涧河470号样虽然也采自灰岩，却明显偏离了灰岩水的化学成分，而与煤系水成分非常相似。该取样点靠近山前断裂，煤系水位高于灰岩水位，上部的煤系水可沿断裂带进入灰岩中，可能是造成407号样水化学局局部异常的原因。

掌握了各层地下水的差别和规律后，就可对矿井突水来源做出判断。将六斜坡突水点水样(1—11号)放到图7上，可清楚地看到，所有突水样都落在图6圈出的灰岩水域内。而且六斜坡10号突水样在图8上也落入灰岩水域。说明矿坑突水的化学性质和同位素组成都与灰岩水相同，而不同于煤系和松散层水，故可以判定突水水源应是奥陶系灰岩水，并可排除其他来源的可能。突水前，观家峪附近灰岩水位标高为815m左右，其水压虽高于灰岩顶面，并有一些断层和裂隙与煤系相通，但由于煤系水位远高于灰岩水位，故在天然状态下，灰岩水不能进入煤系。矿坑排水已将煤系水位降低到750m标高，致使灰岩承压水沿断裂带向上运动，形成众多的“测压管”。在断层发

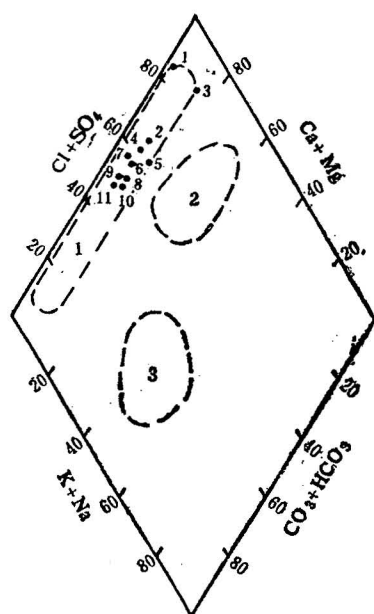


图 7 六斜坡突水点三线图解

Fig. 7 Trilinear diagram for water bursting in the sixth slope

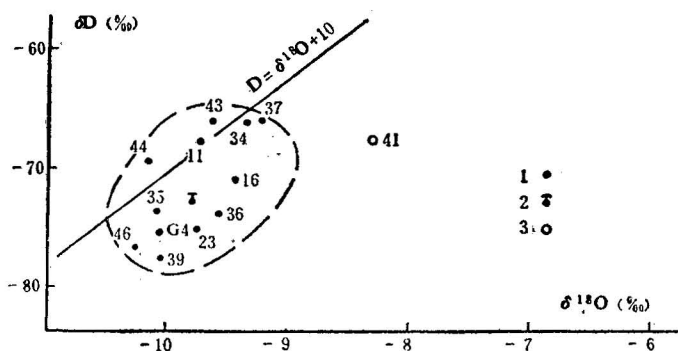
图 8 δD - $\delta^{18}O$ 关系图

Fig. 8 Map showing the relation between δD and $\delta^{18}O$

1—东山灰岩水; 2—六斜坡突水; 3—松散层水

1—Water samples in limestone; 2—Water samples in the sixth slope; 3—Water samples in unconsolidated deposit

育、掘深最大的六斜坡下山部位大量渗入矿坑。

不同时间突水样的分析资料表明, 其矿化度和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 离子浓度, 均随排水时间延长而降低, 且大体呈直线关系 (图9)。图上各样号下面的数字为取样日期。这种线性的淡化趋势, 可以看成是高矿化的A水, 同低矿化B水两者的简单混合过程, 并可用下式表达^[2]:

$$Y = aX_B + (1-a)X_A$$

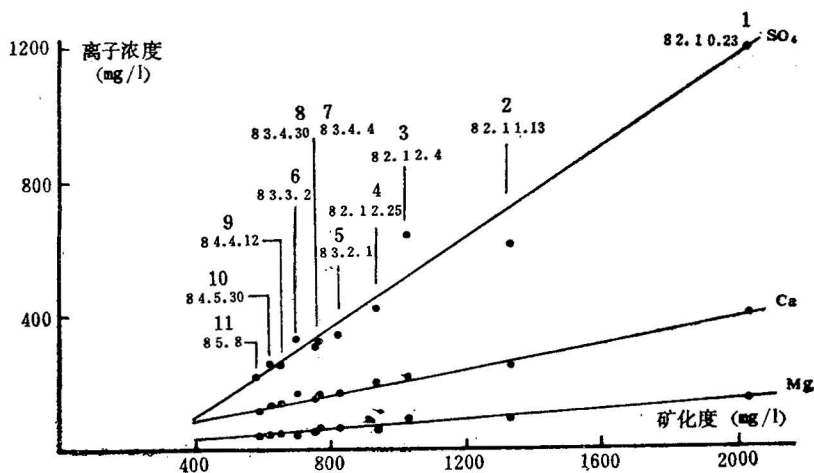


图 9 六斜坡突水点水质淡化图

Fig. 9 Desalination of water quality in the sixth slope

式中: Y 代表混合水的矿化度或某一离子成分的浓度; X_B 和 X_A 分别代表B水和A水的矿化度或某一离子浓度; a 和 $(1-a)$ 分别代表混合水中B水和A水所占的比率。

一开始涌入矿坑的灰岩水, 是位于背斜倾伏端滞流区的高矿化水, 矿化度为 2041mg/l, 相当于A水。持续的排水, 使矿坑灰岩水位降至 760m 标高左右, 导致北部和东北部径流带的低矿化水(矿化度300mg/l 左右, 相当于B水)混入滞流区。随着时间的推移, B水的混入比率逐渐增加, 从而引起水质逐步淡化。至1985年8月, 突水点的矿化度已降低到 578mg/l, 淡化速度已明显减缓, 正逐渐向新的平衡状态趋近。

3. 谷旦村附近

位于煤矿区的西北边缘。1984年山西省地质局第一水文地质队在这里打了两个钻孔。其中 G_3 号孔只揭露松散层并做了抽水。 G_4 孔揭穿了松散层和煤系, 并揭露了370m奥陶系灰岩, 做了灰岩分层抽水。

表3列出了两钻孔水样和附近41号松散层水样的同位素测定值。 G_4 和41号样已标在图8上, G_4 号样的同位素组成与东山区内的灰岩水相当, 并落在灰岩水域内。41号松散层水样有更高的 $\delta^{18}O$ 和 δD 值, 与灰岩水的同位素组成明显不同。 G_3 号样虽然也取自松散层, 但其同位素值完全

表 3 地下水 $\delta^{18}O$ 和 δD 数据表

Table 3 Isotopic composition of the ground water

样 号	取 样 层 位	$\delta^{18}O$ (‰)	δD (‰)
G_4	灰 岩	-10.05	-75.67
G_3	松 散 层	-10.08	-76.22
41	松 散 层	-8.30	-67.13

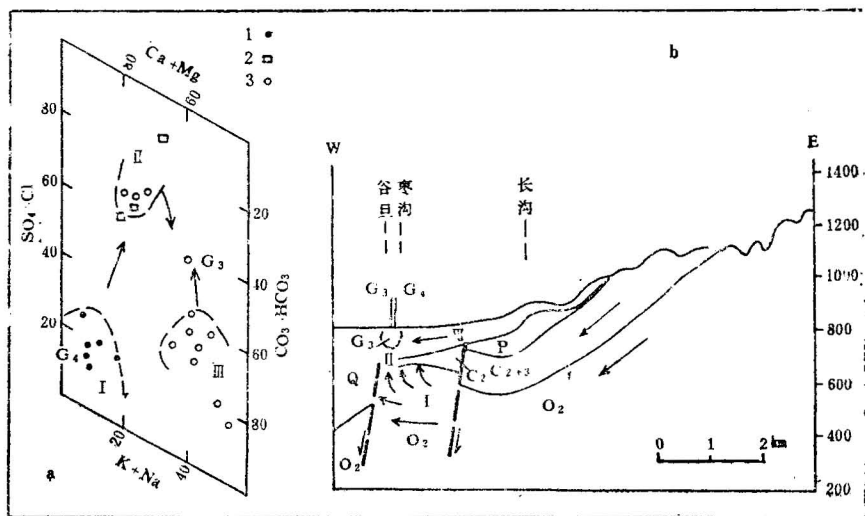


图 10 水化学及水流型式图

Fig. 10 Water chemistry and pattern of water flow

1—灰岩水; 2—煤系水; 3—松散层水

1—Water samples in limestone; 2—Water samples in coal-bearing strata; 3—Water samples in unconsolidated deposit

不同于41号样, 而与G₄号灰岩水的测定值基本相同, 这说明G₃松散层水是由灰岩水补给的。但是, G₃和G₄两件样的水化学性质却有明显不同, 似乎与上述认识不符。为解释这一矛盾, 需要对不同层位地下水的化学特性做进一步研究。通过图10-a的分析可以看出, 这里的松散层水有两种, 一种出现在沟谷附近, 是矿化度高的SO₄-HCO₃-CaNa型水, 这种水与煤系水(II)的化学成分类似, 明显受煤矿排水影响。另一种是HCO₃-NaCa型水(III); 其矿化度低, 分布广, 代表正常松散层水的化学性质。灰岩水(I)的矿化度最低, 都属于HCO₃-Ca型水。G₃水是矿化度较高的HCO₃-CaNa型水, 其各种主要离子的浓度, 都介于灰岩水、煤系水和正常松散层水之间, 应是三者的混合水。深部灰岩水向上补给松散层的过程中, 与煤系水、松散层水发生混合, 形成了化学成分特殊的G₃水。故水化学的分析同样可以证明G₃水系受灰岩水补给, 并可以认为谷旦附近是东山岩溶水的一个隐伏排泄带。从构造上看, 混合区位于基岩隐伏断裂带附近(图10-b), 水位观测证实灰岩水位高于松散层水位, 灰岩水和煤系水都要沿断层带朝上向第四系松散层排泄。所以这种混合在地质条件和水动力学上都是可能的。而同位素和水化学资料证实了混合的存在以及混合发生的位置。

本文着重论述了三种混合型式, 即补给区上层水渗入下层水的混合, 滞流带水因排泄量增大引起的淡化混合, 及排泄带下层水顶托补给上层水的混合。文中使用了山西省煤管局148队, 太原市自来水公司, 太原市地下水观测站的一些资料, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Hanshaw, B. B. and Back, W., 1979, Major geochemical processes in the evolution of carbonate aquifer systems, *Contemporary hydrogeology*, Elsevier, Amsterdam.
- [2] Walton, W. C., 1970, *Ground water resource evaluation*, McGraw-Hill Book Company.

THREE MIXED PATTERNS OF THE GROUND WATER OF THE EAST MOUNTAIN IN TAIYUAN

Wang Huaiying and Wang Ruijin

(Centre of Environmental Geology, MGMR, Beijing)

Abstract

In the karstic depression of Yangxing and Dafangshan the karst ground water from the deeper limestone aquifer is characterized by a Cl⁻ content of less than 10 mg/l and a NO₃⁻ content of less than 25 mg/l, while the ground water from the upper shallow aquifer has been polluted by human activities. The mixing of the ground water bodies with different Cl⁻ and NO₃⁻ contents is brought about by the downwards recharge of shallow water into the deeper karst water. In the East Mountain coal mine the karst ground water located in the perched water zone is discharged owing to water bursting in the mine, and then is recharged by the lateral movement of water through the thick limestone aquifer. Continual mixing of the perched water with the recharge water has resulted in desalination of the gr-

ound water in the perched water zone. Near Gudan there is a fault zone composed of some small parallel faults. Recharge of the ground water in the Quaternary aquifer involves the vertical downward infiltration of precipitation and surface water and the vertical upward leakage of water from the limestone aquifer and coal-bearing strata. It will be seen from this that the mixing of waters from the two different sources occurs in the Quaternary aquifer.