

文章编号:1001-4810(2000)01-0021-07

铀同位素混合比在岩溶水开采 演化研究中的应用*

吴爱民

(山东省地矿工程集团公司, 济南 250014)

摘 要:在论述铀放射系不平衡原理的基础上,提出了地下水三元补给体系混合比的面积坐标算法。地下水三元补给体系的各补给源补给的混合比率,其数值等于在 U 含量— ^{234}U 过剩直角坐标系中,以该三个端元为顶点围成的三角形内被补给点的面积坐标。在此基础上,以山东省双村岩溶地下水系统为例,说明了铀同位素技术在地下水开采演化研究中的应用方法、过程与效果。研究认为扩大岩溶水开采能够诱发岩溶地下水综合补给量的增加,但应同时注意地下水水质的变化。

关键词:铀同位素;岩溶地下水开采演化;三元补给体系;混合比;面积坐标算法

中图分类号:P641.3

文献标识码:A

0 引 言

应用铀同位素技术研究地下水问题始于 70 年代。Osmodn J. K.^[1]、Briel L. I. 等^[2]在美国加利福尼亚和佛罗里达碳酸盐岩分布区,开辟了应用铀同位素对地下水进行研究的先例。在我国地下水研究领域,自 80 年代初期以来,相继开展了氢、氧、碳、硫、氮等同位素的应用研究,取得显著效果,但对铀同位素的研究不多。80 年代末、90 年代初,赵树森^[3]、吴爱民等^[4],较早地把铀同位素技术应用于我国的岩溶水补给研究,并获得成功。直到目前,我国对铀同位素在地下水形成演化方面的应用研究仍然很少。

1 铀放射系不平衡的基本原理

1.1 铀的天然分布与铀同位素分馏

铀主要富集在地壳岩石中。由于其离子半径大,在岩浆作用中妨碍它们形成橄榄石、辉石一类的较早结晶的硅酸盐晶体,而更多地结合到后期岩浆结晶和残留溶液中,主要与花岗岩和

* 为国土资源部环境地质开放实验室资助项目(K98012)成果之一
作者简介:吴爱民,男,1963 年生,1983 年毕业于河北地质学院水工系,教授级高级工程师,享受国务院政府特殊津贴,现在中国地质科学院攻读博士学位。
收稿日期:1999-10-19

伟晶岩相伴生。对于沉积岩,由于在沉积过程中,经历了风化、搬运、分选等作用,其中的铀含量则趋于均一,但因泥炭、粘土、页岩中粘土矿物和有机质含最高,对铀有吸附作用,其铀含量相对高,碳酸盐岩、砂岩等则铀含量低。据涂里干、费德波、维诺格拉多夫的数据^[5],超基性岩中的铀含量为 0.003×10^{-6} ,酸性岩中的铀含量为 3.5×10^{-6} ,二者相差 1000 倍以上;页岩、碳酸盐岩、砂岩的铀含量分别为 3.7×10^{-6} 、 2.2×10^{-6} 、 0.45×10^{-6} 。

晶质铀在纯水中的溶解度很低。但是,当氧化成铀酰离子和有络合物存在时,其溶解度将大大增加。据水文地球化学热力学原理^[6],黄铁矿化、高岭土化、碳酸盐化等化学过程对铀的溶解与沉淀均有影响,区域地下水的排泄减压区对铀的聚积最有利。地下水中的铀含量主要取决于含水层位、含水介质的铀含量及水岩作用的时间,一般为 $0.1 \sim 50 \mu\text{g/l}$ 。

M. Gascoyne 在总结前人研究成果的基础上,阐明了铀同位素的分馏作用^[7];自然界中的两个铀衰变系母体— ^{238}U 、 ^{235}U ,在化学上是等效的,因为,尚未发现天然物质中的比值偏离 $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}=137.5 \pm 0.5$ 的情况,即二者是平衡的。正常情况下,重核的同位素分馏是微不足道的,但却发现 ^{238}U 、 ^{234}U 在岩石和它们的沥出液中的分馏很大,甚至在海水中也含有略微过量的 ^{234}U ,因此,可以说天然水和沉积物中 ^{238}U 、 ^{234}U 之间的不平衡是一种规律,而不是特例。造成 ^{238}U 、 ^{234}U 之间放射系不平衡规律的主要作用有:(1)辐射损伤部位的沥滤;(2)氧化作用;(3) α 反冲。正是这种不平衡规律使得应用铀同位素进行地下水研究成为可能。

1.2 地下水铀同位素研究的适用条件

一般情况下,据地球化学性质将地下水的铀系不平衡方法分成两类:保守状态和非保守状态^[8]。

所谓保守状态,是指当水从一个地区向另一地区运动时,地下水和地表水中各种核素的相对比例和绝对含量是不变的,或者说发生的任何变化都解释成水体间的混合。此时,把地下水中的铀同位素作为天然示踪剂,或称为铀同位素指纹。这种情况适用于溶解到地下水中的核素与固相状态的核素已达到平衡;或水的运动速度很快,其运动时间远远短于放射性同位素的寿命。它通常用于地下水的示踪与混合研究。

所谓非保守状态,是指水在流动过程中,因经历着不同的地球化学环境变化,从而导致元素浓度的变化。实际上,因放射性核素的衰变速度与寿命的不同,时间本身就能单独引起这种变化。铀同位素指纹的这种变化虽然降低了其在示踪与混合研究方面的价值,但却为追踪含水层的历史、进行水岩作用研究提供了条件。

2 地下水三元补给体系混合比的面积坐标算法

Briel L. I. ^[2]、王怀颖等^[9]曾经提出过地下水三元补给体系混合比的计算方法与求解公式。为便于计算机编程处理,笔者通过数学几何原理分析,提出地下水三元补给体系混合比计算的一种新方法——面积坐标算法。

2.1 面积坐标的概念

三角形面积坐标^[10],系指以三角形内部任一点 P 与其三个角点相连形成的三个子三角形面积,分别与整个大三角形面积相比的比值。若把大三角形面积记为 A ,三个子三角形的面积分别记为 A_i 、 A_j 、 A_m ,如图 1 示,则 $L_i=A_i/A$ 、 $L_j=A_j/A$ 、 $L_m=A_m/A$ 称为 P 点的面积坐标。 P 点的位置可由这三个比值来唯一确定,记作 $P(L_i, L_j, L_m)$ 。其中有:

$$A_i + A_j + A_m = A$$

面积坐标具有其特殊的性质: (1) 三角形内与结点 i 的对边 $j-m$ 平行的直线上的诸点有相同的 L_i 坐标。三角形三个角点的面积坐标是 $i(1,0,0), j(0,1,0), m(0,0,1)$; 三角形三条边的边方程是: $L_i=0$ ($j-m$ 边); $L_j=0$ ($m-i$ 边); $L_m=0$ ($i-j$ 边)。(2) 三个面积坐标并不相互独立, 它们中只有两个是相互独立的。三个面积坐标间满足:

$$L_i + L_j + L_m = 1$$

由于三角形的面积坐标与该三角形的具体形状及其在总体坐标 X, Y 中的位置无关, 因此, 它是三角形的一种自然坐标。若三角形的三个角点在直角坐标系中的位置是 $i(x_i, y_i), j(x_j, y_j), m(x_m, y_m)$, 其中任一点 P 在直角坐标中的位置为 $P(x, y)$, 则 P 点的面积坐标矩阵为:

$$\begin{Bmatrix} L_i \\ L_j \\ L_m \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} a_i & b_i & c_i \\ a_j & b_j & c_j \\ a_m & b_m & c_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ x \\ y \end{Bmatrix}$$

其中 $a_i = x_j y_m - x_m y_j$

$b_i = y_j - y_m$

$c_i = x_m - x_j$

$a_j, b_j, c_j, a_m, b_m, c_m$ 与之类似。

2.2 面积坐标与混合比的对应关系

根据面积坐标的概念与特性, 三角形内部任一点的面积坐标与三元混合补给体系内三角形内部任一点的混合比具有一一对应关系。三角形的三个顶点对应于地下水的三个补给源, 顶点坐标对应于三个补给水源的两种独立组分, 面积坐标对应于三个补给源的混合比。当被补给点位于三元混合补给体系的某一端源顶点时, 该端源的混合比为 100%, 其它两端源的混合比为 0, 对应的面积坐标为 (1, 0, 0); 当被补给点位于三元混合补给体系的某两端源连线时, 该两端源的混合比之和为 100%, 第三端源的混合比为 0, 对应的面积坐标为 ($u, 1-u, 0$); 当被补给点位于三元混合补给体系中的任一点时, 三个端源的混合比之和为 100%, 对应的面积坐标为 ($u, v, 1-u-v$)。因此, 可以用面积坐标理论直接求取三元混合补给体系的混合比。面积坐标法的最大特点是数学概念清楚, 便于计算机的批处理, 通过简单的计算程序, 便可计算处理大批的混合比计算。

3 研究应用实例

3.1 双村岩溶水系统概况

万丹数据

双村岩溶水系统位于山东省南部的南四湖畔(微山湖、昭阳湖、南阳湖、独山湖), 为一单斜

图 1 面积坐标与直角坐标关系示意图
Fig. 1 Area coordinate and right-angle coordinate

构造式地下水系统。岩溶水自 80 年代初开采以来,目前已形成 25 万 m³/d 的开采能力,形成了我国北方少有的特大型岩溶水源地。区内寒武、奥陶系碳酸盐岩地层分布面积 553.25km²,其中南部山区裸露面积 246.75 km²,构成地下水的补给区;北部平原第四系覆盖区面积 306.5 km²,厚度 20~60m,为地下水径流、排泄区。以往勘察工作初步查明^[11],自然状态下,岩溶水主要接受南部山区大气降水入渗的唯一补给,流经双村、黄路屯、两城富水地段,最终向白马河与独山湖排泄。目前,因对岩溶水的大量开采,改变了天然的补排状况,使得岩溶水接受山区大气降水、平原第四系孔隙水、地表河湖水的混合补给,且不同开采阶段具有不同的补给特征。由于混合补给作用,岩溶水水质也发生了明显变化,如阴、阳离子含量普遍增高,矿化度由 0.2~0.4g/l 增高到 0.6~0.8g/l,目前仍保持增高趋势。因此,详细查明岩溶水与各类型水之间的水力联系、查明各开采阶段岩溶水的补给构成与环境演化,是确定岩溶水允许开采量、指导岩溶水合理开发的重要内容。

3.2 铀同位素采样测试

为进行岩溶水补给构成与环境演化研究,分别于 1988、1998 年对补给山区岩溶水、上覆第四系孔隙水、地表白马河与独山水,以及径流、排泄与开采区岩溶水进行了两次系统采样。由中国科学院地质研究所铀同位素实验室负责制样、测试。为获得可靠分析结果,要求采集流动的具代表性的水样,水样体积 10 l,通过 α 能谱来测定其铀同位素值。样品送交中国科学院地质研究所进行测试,铀同位素测试结果见表 1、图 2。

表 1 双村岩溶水系统典型水样铀同位素测试结果

Tab. 1 Uranium isotopic data of typical water samples in Shuangcun karst water system

水样号	水样位置产状	U 含量 ($\mu\text{g/l}$)	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 放射性活度比	^{234}U 过剩	取样时间
8825	双村岩溶水	1.29 $\pm$ 0.04	3.85 $\pm$ 0.09	3.70	1988.6
8834	黄路屯岩溶水	1.29 $\pm$ 0.04	2.79 $\pm$ 0.08	2.30	1988.6
88L1	两城岩溶水	1.64 $\pm$ 0.004	4.12 $\pm$ 0.08	5.13	1988.6
88N1	山区岩溶水	0.58 $\pm$ 0.02	2.42 $\pm$ 0.08	0.83	1988.6
88B1	独山水	4.92 $\pm$ 0.15	1.66 $\pm$ 0.03	3.24	1988.6
88D3	白马河水	2.60 $\pm$ 0.07	1.79 $\pm$ 0.04	2.06	1988.6
9825	双村岩溶水	1.02 $\pm$ 0.03	3.52 $\pm$ 0.08	2.57	1998.4
98L1	两城岩溶水	1.35 $\pm$ 0.04	3.69 $\pm$ 0.1	3.62	1998.4
98N1	山区岩溶水	0.49 $\pm$ 0.01	1.6 $\pm$ 0.04	0.29	1998.4
98B3	独山水	4.26 $\pm$ 0.11	1.82 $\pm$ 0.03	3.49	1998.4
9834	黄路屯岩溶水	1.49 $\pm$ 0.04	3.39 $\pm$ 0.08	3.57	1998.4
98D3	白马河水	2.95 $\pm$ 0.06	1.86 $\pm$ 0.03	2.55	1998.4
98L2	马坡岩溶水	1.27 $\pm$ 0.03	4.72 $\pm$ 0.06	4.72	1998.4

3.3 地下水混合比计算结果与环境演化特征分析

依据混合比的面积坐标算法公式,利用表 1 中的测试数据,计算出的地下水混合比结果列于表 2。据图 2、表 2,不难得出本区地下水在大规模开采条件下的环境演化规律与趋势。



图 2 U 含量—²³⁴U 过剩关系图

Fig. 2 Relation between U content and ²³⁴U excess

表 2 双村岩溶水系统典型水样混合比计算成果表

Tab. 2 Mixing ratios of typical water samples in Shuangcun karst water system

水样号	水样产状	混合比(%)			备注
		山区岩溶水	西部岩溶水	地表河湖水	
88N1	山区岩溶水	100	0	0	补给源 A
88L1	两城岩溶水	0	100	0	补给源 B
88B1	独山湖水	0	0	100	补给源 C
8825	双村岩溶水	33.24	66.70	0.06	
8834	黄路屯岩溶水	61.74	28.98	9.28	
88D3	鲁桥白马河水	51.26	2.91	45.83	
98N1	山区岩溶水	100	0	0	补给源 A
98L2	马坡岩溶水	0	100	0	补给源 B
98B3	独山湖水	0	0	100	补给源 C
9825	双村岩溶水	47.43	48.57	4.00	
9834	黄路屯岩溶水	22.31	64.52	13.17	
98L1	两城岩溶水	22.47	69.00	8.53	
98D3	鲁桥白马河水	31.14	4.56	64.30	

(1)从 1988 年到 1998 年,虽然经历了 10 年时间,取样的位置也略有变化,但三个补给源位置相对保持不变。说明双村岩溶水系统是一个三元补给地下水系统,其接受南部山区岩溶水、西部岩溶水与地表河湖水共同补给的事实存在,且符合铀系不平衡法的适用条件。其中,南部山区岩溶水实际为大气降水,西部岩溶水实际为白马河沿岸及以西地区的岩溶水与浅部第四系孔隙水的混合水,地表河湖水则为从白马河引入的独山湖水。

(2)双村水源地位于研究区东部,靠近南部山区补给区,为地下水系统上游区的富水地段。自 80 年代初开始开采,1988 年开采量为 $10 \text{ 万 m}^3/\text{d}$,1998 年开采量 $16 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。地下水的混合比变化为:山区岩溶水由 33.24% 上升到 47.43% ,西部岩溶水由 66.74% 下降到 48.57% ,地表河湖水由 0.06% 上升到 4.00% 。从补给量值上看,1988 年接受山区岩溶水补给 $3.32 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 、西部岩溶水补给 $6.59 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 、地表河湖水补给 $0.01 \text{ 万 m}^3/\text{d}$;1998 年接受山区岩溶水补给 $7.59 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 、西部岩溶水补给 $7.77 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 、地表河湖水补给 $0.64 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。说明 1988 年以前,双村水源地补给以西部来水为主、南部来水为辅;双村水源地开采的扩大,诱发了南部山区降水入渗补给的增加,但对西部来水的袭夺量并不大;扩大开采对河湖水补给有一定诱发作用,但总体影响较小。

(3)两城水源地位于研究区西部,靠近独山湖、白马河,为地下水系统下游区的富水地段。1997 年开始开采,1998 年开采量 $4 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。两城水源地的开采,改变了两城地段的地下水环境条件。1988 年,该地段岩溶水构成地下水系统的三个补给源之一;而 1998 年,该补给源被其北部的马坡岩溶水所取代,自身成为受补给者,其受山区岩溶水、西部岩溶水、地表河湖水的补给比率分别为 22.47% 、 69.00% 、 8.53% 。在这里,山区岩溶水为来自上游东北部的来水,实际上是从双村水源地补给水中袭夺来的,这也是双村水源地扩大开采后没有增加西部来水的原因所在。

(4)黄路屯地段位于研究区中部,处在双村水源地与两城水源地之间,为地下水系统中游区的富水地段,一直未开采。1988 年到 1998 年地下水的混合比变化为:山区岩溶水由 61.74% 下降到 22.31% ,西部岩溶水由 28.98% 上升到 64.52% ,地表河湖水由 9.28% 上升到 13.17% 。说明随着双村、两城水源地开采的扩大,该地段受西部岩溶水与地表河湖水的补给份额在大量增加。本区地表河湖水已经遭受污染,西部岩溶水与浅部第四系孔隙水及地表河湖水有密切水力联系,目前岩溶水水质已经开始变差。这些事实提醒人们,在以后开采过程中,必须密切关注地下水的水质变化,防止开采层岩溶水受到污染。

(5)鲁桥白马河水受山区岩溶水的补给由 51.26% 降至 31.14% ,受独山湖水的补给由 45.83% 升至 64.30% ,说明白马河水下渗补给地下水造成河水倒流的趋势越来越明显,其受独山湖水的影响越来越大。

总之,双村岩溶水系统的开采演化可概括为:在东部双村水源区,岩溶水开采诱发了南部山区降水入渗补给的增加,受西部岩溶水与地表河湖水的影响不大;在中西部黄路屯—两城水源区,岩溶水开采主要袭夺上覆第四系孔隙水与地表河湖水,其次袭夺上游的岩溶水,受西部岩溶水与地表河湖水的影响大。岩溶水的大规模开采,激发了地下水补给量的增加,也必将带来地下水质的变化。怎样处理好岩溶水开采、补给量增加与水质变化之间的关系,科学合理地确定岩溶水允许开采量,是今后岩溶水开发利用过程中有待研究的问题。

4 结 语

铀放射系不平衡理论是应用铀同位素进行地下水研究的基础。本文在此指导下,用铀同位素方法分析研究了双村岩溶水系统的开采演化,取得了水文地质条件认识的新进展。该方法具有灵敏度高、稳定性强、结果可靠等特点,必将在今后的地下水研究领域得到广泛运用。

致 谢:感谢我的博士导师、国际水文地质学家协会中国国家委员会主席费瑾研究员的悉心指导,感谢中国科学院地质研究所赵树森研究员的有益帮助。

参考文献:

[1] Osmond, J. K., Kaufan, M. I., and Cowart, J. B. Mixing volume calculations, sources and aging trends of Floridan aquifer water by uranium isotopic methods[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1976, 38: 1083~1100.

[2] Briel, L. I., Investigation of the $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ disequilibrium in the natural water of the Santa Fe river basin in North Central Florida[M]. Florida State Univ. Ph. D. thesis, 1976.

[3] 赵树森, 刘明林. 太原岩溶水的铀同位素研究[A]. 岩溶地下水系统的研究[C]. 北京: 科学出版社, 1990: 194~210.

[4] 吴爱民. 铀同位素研究在两城水源勘探中的应用[J]. 山东地质, 1994, 1: 79~84.

[5] 赵伦山, 张本仁. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 41~43.

[6] 李宽良. 水文地球化学热力学[M]. 北京: 原子能出版社, 1993: 309~317.

[7] M. Gascoyne. Geochemistry of the actinides and their daughters[A]. Uranium—series Disequilibrium: Applications to Earth, Marine, and Environmental Sciences[C]. New York: Oxford Science Publication, 1992: 35~61.

[8] J. K. Osmond and J. B. Cowart. Groundwater [A]. Uranium-series Disequilibrium: Applications to Earth, Marine, and Environmental Sciences[C]. New York: Oxford Science Publication, 1992: 290~333.

[9] 王怀颖, 袁志梅, 王瑞久. 岩溶地下水系统和同位素地球化学研究[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 91~104.

[10] 王勳成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 69~70.

[11] 吴爱民. 山东双村水源地岩溶水资源系统研究[A]. 走向 21 世纪环境地质学问题研究论文集[C]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 304~311.

APPLICATIONS OF URANIUM ISOTOPIC MIXING RATIOS IN STUDY OF KARST GROUNDWATER

WU Ai-min

(Geological and Mineral Engineering Group of Shandong Province, Jinan 250014, China)

Abstract: According to the basic principle in uranium-series disequilibrium, a calculating method for the mixing ratio of a three-source recharge system of groundwater is raised. In the three-source recharge system, the mixing ratios originating from every recharge source, equals the area-coordinate value of the triangle that is enveloped by the three sources as top-points in the right angle coordinate of the U content- ^{234}U excess. In the case of the Shuangcun karst water system, Shandong province, the method, the procedure, and the effect of the application are demonstrated. It is suggested that the enhancement of the exploitation of karst water will bring out the increase of the overall recharges, but will probably result in the changes of the groundwater quality.

Key words: Uranium isotope; Evolution of karst groundwater exploitation; Three-source recharge system; Mixing ratio; Area-coordinate method

万方数据