毛坝向斜核部岩溶水绕轴径流的同位素示踪分析

高志 $友^{1}$) 尹 \mathcal{M}^{1}) 蒋良 χ^{2}) 侯 \mathcal{H}^{3})

 (1)成都理工大学,四川成都 610059 2) (株道部第二勘测设计院, 四川成都 610031;3) 桂林工学院,广西桂林 541004)

摘 要 本文针对圆梁山隧道毛坝向斜段岩溶地下水问题 利用环境同位素及地下水氘过量参数示踪原理 探讨了该区深层 岩溶水的形成、补给、循环交替等信息。结果表明 向斜核部的深部承压水 同时接受向斜东翼和西翼大气降水的补给。T₁d 含水层 受垂直入渗的影响较大 :P₂w+c 含水层 受上覆地层水和向斜东翼层间水入渗的影响明显 :P₁q+m 含水层与上覆地 层含水层不存在直接的水力联系 ,但受到来自 F₀₂断层和不整合面有限渗流的影响。向斜核部水的渗流方向是从两翼指向核 部 ,且流速较慢 ,不存在绕轴迳流。

关键词 同位素示踪 岩溶水 绕轴迳流 毛坝向斜

Isotopic Tracing Analysis of Round-Axis Flow of Karst Water in Maoba Syncline

GAO Zhiyou¹) YIN Guan¹) JIANG Liangwen²) HOU Ming³)

 (1) Chengdu University of Technology , Chengdu , Sichuan , 610059 ; 2) No. 2 Reconnaissance and Designing Institute , Ministry of Railways , Chengdu , Sichuan , 610031 ; 3) Guilin Institute of Technology , Guilin , Guangxi , 541004)

Abstract Aiming at solving the problem of karst groundwater in Maoba syncline of Yuanliangshan Tunnel, this paper deals with the formation, supply and cycling of the water by using the tracing theory of environmental isotope and deuterium excess (d-excess) parameter of groundwater. The result shows that the deep confined karst water is supplied by the water from both the east wing and the west wing of Maoba syncline. The T_1d aquifer is mainly affected by the vertical seeping, the $P_2w + c$ aquifer is affected by water from the upper strata and the west wing of the syncline, and the $P_1q + m$ aquifer is affected by the water from F_{02} fault and the finite seepage along the unconformable side instead of having direct hydraulic relations with the upper strata. The direction of flowing water in the syncline is from the wings to the core. The velocity of flow is slow, and there exists no round-axis flow.

Key words isotopic tracing karst water round-axis flow Maoba syncline

毛坝向斜为圆梁山深埋特长隧道穿越的主要地 段。该隧道是新建铁路重庆—怀化线的关键性控制 工程,全长11.06 km;其穿越的主要地质构造为 NE—SSW 向的毛坝向斜和桐麻岭背斜及其伴生或 次生断裂等构造(蒋良文等,2001)。

1 地质概况

毛坝向斜系燕山期和喜马拉雅期构造运动的产物。伴随着燕山期构造运动,形成一系列 NW 向左 旋横张断层,在向斜中部最为发育。喜马拉雅期构 造运动叠加在早期向斜的中南段和中段,其强度相 对燕山期弱,向斜轴向由 NE18°偏转为 NE35°向的 向 NW 凸出的弧形段,形成以泡桐坝-毛坝-犀牛洞 为中心和毛家院子-木叶一带为中心的地堑式构造, 两地堑构造之间为以桃子坳-笔架山-水淹沱-王家顶 1 405 m 高地一带为中心的地垒式构造,圆梁山隧 道就穿越属该地垒式构造的、NW 向茨竹坝断层与 水淹沱断层之间的向斜断块,断块 NW 向构造节理 裂隙和纵向顺层滑动裂隙较发育,西翼发育 F₀₂等纵 向层间滑动逆断层(蒋良文等,2001)。

毛坝向斜地下水以裂隙型岩溶水为主,局部存 在裂隙-溶洞(暗河型岩溶水);基岩裂隙水次之,有 少量松散岩层孔隙水分布于第四系松散堆积物中。

本文为铁道部'渝怀线圆梁山深埋特长隧道工程地质勘测'项目的成果。

责任编辑 :宮月萱。

第一作者 高志效据,1972年生,在读博士研究生,主要从事同位素地球化学研究;E-mail cdannie@163.com。

岩溶水多以泉或暗河等形式出露地表,水化学 类型主要为 HCO₃⁻·Ca²⁺,HCO₃⁻·Ca²⁺ + Mg²⁺型, 矿化度多在 0.1~0.2 g/L _iPH 值为 7.5~8.4 ,流量 达 0.0001~1.0 m³/s 以上,雨季最大流量可达 4.55 m³/s(毛家院子暗河)⁹。

毛坝向斜主要由可溶性灰岩构成,为一个相对 独立的水文地质单元,四周被厚达 2 000 m 的志留 系(砂质)泥页岩区域性相对隔水层完全圈闭。出露 二叠系栖霞组(P₁q),茅口组(P₁m),吴家坪组 (P2w)长兴组(P2c)与三叠系大冶组(T1d)嘉陵 江组(T₁i)的灰岩夹薄层泥页岩地层●。其中以向 斜核部的 $T_1 i$ 、 $T_1 d$ 和两翼的 P_1 等层位岩溶较为发 育 赋存有丰富的地下水 而向斜区域内的降水除蒸 发外,几乎全部渗入地下,岩溶水补给条件良好。若 隧道通过的地段附近存在高压富水深部岩溶承压水 系统,将可能出现大规模的隧道涌突水,严重危害 隧道正常施工和营运。因此,毛坝向斜两翼深部岩 溶承压水是否存在绕轴迳流 即西翼的岩溶水绕过 核部补给东翼 成为圆梁山隧道工程地质最为关注 的问题之一。针对突出情况,本文采用同位素示踪 的技术方法进行研究 取得了良好的效果。

2 同位素示踪分析

为揭示毛坝向斜核部深层岩溶承压水的基本情况 在圆梁山隧道定测剖面上施工了 $Ddz-y-1(1^{\#}$ 孔), $Ddz-y-2(2^{\#} 孔)$, $Ddz-y-3(3^{\#} 孔)$, $Ddz-y-4(4^{\#} 孔)$ 站孔(图1), 钻孔从上至下分别穿越了 T_1d 、 $P_2w + c$ 和 $P_1q + m$ 等3 套地层(铁道部第二勘测 设计院 2001),发现3 套地层内存有保持相对独立的岩溶水。

三层岩溶含水层中 , $P_2w + c$ 和 $P_1q + m$ 为承 压水 ,下层水的水头高于上层水^①。同位素样品分 别在不同钻孔内分层采集 ,测定了水的 $\delta D_{*} \delta^{18} O$ 和 *T*值 ,并计算出各样品的氘过量参数(*d*值 ;尹观 , 1988 ;王恒纯 ,1991 ;尹观等 ,2001a ,2001b 表 1)。



图 1 毛坝向斜区域位置图 Fig. 1 Regional Location of Maoba syncline 1-暗河出口 2-泉 3-河流 4-公路 5-隧道 1-under river exit 2-spring 3-river 4-highroad 5-tunnel



\$\$\$\$\$1 **\$\$\$\$**2 ****3 ****4 ****5 ****=6 ****7

图 2 毛坝向斜地质剖面示意图

Fig. 2 Geologic Profile of Maoba Syncline 1-灰岩 2.砂质泥岩 3.不整合线 4.钻孔 5.断层 か.隧道 7.地层界线 1-limestone 2-sand-mudstone 3-line of unconformity 4-drillhole; 5-fault 为-tunnel 7-strata boundary

该区地下水主要来源于大气降水。由于毛坝向斜主 要由可溶岩构成,大气降水渗入地下后,水/岩的氧 同位素交换导致水体富含¹⁸O。因此在 ∂D-ð¹⁸O 关 系图上 3 层岩溶水都出现一定程度的" 氧漂移 ",尤 其是 P₁q + m 层水,其大多数样品的同位素组成都 落在" 氧漂移 "线上,表明水/岩作用相对较其他地层 强。

2.1 大冶组(T₁d)含水层

春季在该含水层 1[#]、2[#]钻孔内各取了一次抽水样品,2个钻孔水的 δD、*T* 值和氘过量参数(*d*



值 相差不大 表明两孔水来源于同一补给源区 ,且 补给高度和水在地下的滞留时间近于相同。3[#]孔 先后取了 5 次样品,水的 bD、T 值和 d 值经历了一 个动态的变化过程(表1):6月9日开始试抽时,水 的 δD 、T、d 均为该层水样的最低值 表明其补给源 最高 滞留时间长 系原始储存的地下水 6月10日 抽水取样,水的 δD 、T、d 均有明显升高, δD 升至 -60‰, d 值高达 11.08, T 为 23 Tu, 完全呈现出近 期大气降水的特征,表明补入水的源区高度明显下 降,这是由于抽水导致上覆地表水垂直补入的结果, 且垂直补入或向斜东翼的侧向补给的速度较快 因 而这种补入水占优势 6月18日,正抽开始,因层间 渗流水与垂直入渗的水相混合 层间渗流水的比例 增加,导致水的 bD、T 和 d 值下降 i6 月 20 日,受连 续抽水的影响 垂直入渗或向斜东翼侧向补入速度 高于西翼的层间入渗,水的同位素组成明显比正抽 开始富重 6月22日 正抽结束时 水的同位素组成 则表明向斜西翼层间水入渗的比例逐渐增加。

从开始抽水时 3 个钻孔所取水样的 d 值变化 情况来看 $1^{\#}$ 、 $2^{\#}$ 孔水的 d 值相近(0.28,0.36), $3^{\#}$ 孔水的 d 值为 -11.12 ,反映了这一含水层内层 间水的径流是从 $1^{\#}$ 、 $2^{\#}$ 孔向 $3^{\#}$ 孔方向渗流 ,由于钻 孔之间的 d 值相差很大 ,说明径流的速度较慢 ,低 于垂直渗流速度。

由抽水过程中钻孔水的同位素组成的动态变化 特点可以得知,T₁d 地层岩溶水,主要受3个方向的 水补给,即查查提参的地表水、向斜东翼的层间水和 向斜西翼的层间水;且垂直入渗水和向斜东翼层间 水的补给因水量大,速度快而相对占优势,但来自向 斜西翼的层间渗流水具有承压性,且补给源区相对 较高。

2.2 长兴组和吴家坪组(P₂c+w)含水层

1[#]钻孔取样 1 次,水样的 δD 为 – 58.4‰、d 值 为 – 5.52, T 值为 21 Tu。d 值小,表明系滞留时间 较长的地下岩溶水; T 值较上覆 T₁d 层水高,根据 该区天然水的 T 含量(卫克勤,1980),结合 T 的半 衰期(12 a)和 d 值分析,估算其是 10 a 前补给的 水。从该水样的同位素分析结果看,几乎没有垂直 入渗地表水的补入,显然其补给主要来自向斜西翼 地层水。

2[#] 钻孔取样 5 次。试抽开始和结束在同一天 内进行 2 次水样的同位素值近于一致 ,反映出同一 天内 ,受其他水入渗的影响小。正抽从开始到结束 , 每隔 2 d 取一次样 ,水样的 *d* 值呈逐渐下降的趋势 , 表明其受向斜西翼不整合面或向斜轴向入渗水的影 响比较大。

 $3^{\#}$ 钻孔取样 2 次。试抽开始时未取样,试抽中 间水样的同位素组成(δ D 为 - 80.6‰, *T*小于 3 Tu, *d*为 - 4.92)表明其仍是来自较高补给源区且 滞留时间很长的地下水。而正抽结束时,所取水样 的同位素值明显升高(δ D 升高为 - 65.4‰, *T*为7.8 Tu, *d*为 7.64),表明有其他近期水的混入,混入途 径可能是沿三叠系与二叠系的整合面或向斜轴线方 向,也可能是沿 P_1w 与 P_1m 不整合面渗入, 但入渗 速度远比同一钻孔 T_1d 地层内相同类型的入渗水 慢。

2.3 茅口组和栖霞组(P₁m + q)含水层

1[#]钻孔从试抽中间到正抽开始,两次采样时限 相隔不到 8 h,但两次水样的同位素值相差明显(试 抽中间: δ D 为 - 72.6‰, T 为 39.2 Tu, d 为 -0.12 证抽开始: δ D 为 - 75‰, T 为 23.4 Tu, d 为3.9),这一变化表明有来自向斜西翼层间水的补 入,这可能与地层内的 F_{02} 断层有关。从正抽开始至 正抽结束,时隔2d采一次样,水的 δ D, T 和 d 值呈 下降的趋势。这种变化表明,从试抽开始,经由断层 F_{02} 补入的近晚期水体,开始时速度快、数量大,但断 层内储存的水量毕竟有限,因而后续补入量越来越 少,而地层内原来储存的相对滞留时间长的地下水 则向 1[#]孔渗流。

2[#]钻孔试抽开始时水样的同位素值(&D 为 -80‰, T为24.7Tu, d值为-14.08)具储存时间

表 1 隧迫通过地段各层岩溶水同位素分析结果 Table 1 The isotopic measuring results of karst water in different section of tunnel							
取样层位	地点	∂D _{SMOW} ∕‰	δ ¹⁸ O _{SMOW} 7‰	T ∕Tu	$d = \delta D - 8 \delta^{18} O$	取样日期 /年.月.日	备注
三叠系 大冶组 (T ₁ d)岩溶水	1#孔-1	-64.6	-8.11	14	0.28	2000.03.29	1 [#] 孔正抽开始
	2#FL-3	-66.6	-8.37	10	0.36	2000.03.22	2 [#] 孔正抽开始
	3#孔-1	- 79.7	-8.56	10	-11.22	2000.06.09	3 [#] 孔试抽开始
	3 # ₹L -2	-60.6	-8.96	23	11.08	2000.06.10	3#孔试抽结束
	3#孔-3	-63.5	-8.73	12	6.34	2000.06.18	3 [#] 孔正抽开始
	3#孔-4	- 54.1	-8.75	11	15.9	2000.06.20	3 [#] 孔正抽中间
	3#孔-5	-74.7	-8.85	25	-3.9	2000.06.22	3 [#] 孔正抽结束
二叠系 长兴组和 吴家坪组 岩溶水 (P ₂ w+c)	1#孔-2	- 58.4	-6.61	21	-5.52	2000.05.23	1 [#] 孔正抽开始
	2#孔-1	-64.9	-8.74	31	5.02	2000.05.29	2 [#] 孔试抽开始
	2#孔-3	-65.0	-8.97	32	6.76	2000.05.29	2 [#] 孔试抽结束
	2#孔-4	-60.7	-8.87	25	10.26	2000.05.31	2 [♯] 孔正抽开始
	2#孔-5	-64.2	-8.89	30	6.92	2000.06.02	2 [#] 孔正抽中间
	2#孔-6	-63.4	-8.28	28	2.84	2000.06.04	2 [#] 孔正抽结束
	3#孔-1	-80.6	-9.46	<3	-4.92	2000.09.06	3#孔试抽中间
	3#孔-4	-65.4	-9.13	7.8	7.64	2000.09.16	3 [#] 孔正抽结束
二叠系 茅口组 (P ₁ m 和 栖霞组 (P ₁ q) 岩溶水	1#孔-1	-72.6	-9.06	39.2	-0.12	2000.10.12	1#孔试抽中间
	1#孔-2	-75.3	-9.90	23.4	3.9	2000.10.12	1#孔正抽开始
	1#孔-3	-78.2	-9.96	19.3	1.48	2000.10.14	1 [#] 孔正抽中间
	1#孔-4	- 79.6	-9.82	4.1	-1.04	2000.10.16	1#孔正抽结束
	2#孔-1	-80.8	-8.34	24.7	-14.08	2000.07.02	2 [#] 孔试抽第一次开始
	2#孔-2	-69.6	-8.51	19	-1.52	2000.07.19	2 [#] 孔试抽最后一次结束
	2 [#] 孔-4	-69.3	-8.21	6.8	-3.62	2000.07.21	2 [#] 孔正抽中间
	2#孔-5	-62.9	-8.42	27	4.46	2000.07.26	2 [#] 孔正抽结束
	3#孔-1	- 73.3	-8.83	28	-2.66	2000.10.29	3 [#] 孔试抽开始
	3#孔-2	-64.1	-8.71	12.2	5.58	2000.10.29	3#孔试抽结束
	3#孔-3	-63.3	-8.72	21.6	6.46	2000.10.31	3 [#] 孔正抽中间
	3#孔-4	-80.2	-8.66	10	- 10.92	2000.10.31	3 [#] 孔正抽结束

分析者:成都理工大学同位素室张孝林,中国地质大学测试中心黄俊华;实验方法:CO,平衡法(氧同位素),金属铀还原法(氢同位 素)测量仪器:MAT251 精度: 8D: ±0.01% &¹⁸O: ±0.002%, T: ±0.5 TU。

6.0

-0.12

较长的地下水的特征;试抽结束时水的 δD 和 d 值 都在上升,T值下降(3D为-69.6‰,T为19Tud 值为-1.52) 表明有近晚期水的补入,最大可能是 地层内的 F02断层水的渗入;正抽中间水样的 T 值 和d 值都降低(&D 为 – 69.3‰, T 为 6.8 Tu, d 为 -3.62),说明地层内原先储存的地下水的比例有所 增加;正抽结束时水样的同位素值(&D 为 - 62.9‰, T 为 27 Tu <u>d</u> 值为 4.46)相对正抽中间的水样有异 万方数据

-69.8

-8.71

4♯孔

常升高 有悖于正常的变化规律 需进一步查明其原 因。

4[♯]孔抽水结束

2000.08.08

3[#]钻孔试抽开始水样的同位素值(δD 为 -73.3‰, T为28 Tu, d为-2.66) 同样显示其为 滞留时间较长的地下水;试抽结束时水的同位素值 (8D 为 - 64.1‰, T 为 12.2 Tu, d 为 5.58)相对试 抽开始变化很大 明显有近晚期水的混入 且速度较 快、最大可能是来自该地层内不整合面上的入渗水。

相隔 2 d 后,正抽中间采集的水样的同位素值(δ D 为 -63.3‰, T为 21.6 Tu, d为 6.46)表明地层不 整合面的入渗水仍占一定比例。正抽结束时水的同 位素值(δ D为 -80.2‰, T为 10 Tu, d为 -10.92) 明显下降,表明来自不整合面的入渗水逐渐减少,而 地层内滞存时间较长的地下水占主导优势。

综上所述,向斜核部该层岩溶水,主要是来自两 翼的补给。核部 2[#] 孔试抽开始时水的 *d* 值最小, 1[#]、3[#] 孔的水的 *d* 值较高,说明水渗流的方向是从 向斜两翼指向核部。核部和两翼水的 *d* 值差别较 大 表明水从两翼补给到核部的径流速度不是很快。

纵观 3 层岩溶水的同位素资料,可以看出,三叠 系大冶组含水层和二叠系长兴组、吴家坪组含水层 存在一定的水力联系,这主要是通过垂向断裂带和 向斜轴向层之间的渗漏进行的;二叠系茅口组、栖霞 组含水层与上覆地层含水层没有直接的水力联系, 且在一定程度上受 F₀₂断层和不整合面入渗水的影 响,但入渗量十分有限。

3 结论

向斜核部的深部承压水,同时接受向斜东翼和 西翼大气降水的补给,东翼的补给量稍大。浅层的 三叠系大冶组含水层受垂直入渗的影响较大;二叠 系长兴组和吴家坪组含水层内,存在上覆地层水和 向斜西翼层间水入渗的明显影响;二叠系茅口组和 栖霞组含水层与上覆地层含水层不存在直接的水力 联系,但受到来自F02断层和不整合面有限渗流的影 响。这一含水层内储存有滞留时间较长的承压水, 是否存在大的岩溶库有待于进一步工作。

同位素资料表明,向斜核部水的渗流方向是从 两翼指向核部,且流速较慢,整个深部承压岩溶水不 存在西翼绕过核部补给东翼的可能性。

参考文献

- 蒋良文,王科,黄润秋等.2001.圆梁山隧道毛坝向斜段深部承压岩溶 水系统浅析.成都理工学院学报,28(2):125~129.
- 王恒纯.1991.同位素水文地质概论.北京 地质出版社 46~56,73~83.
- 卫克勤.1980.我国天然水含量分布特征.科学通报(10):411~415.
- **尹观**.1998.同位素水文地球化学.成都 成都科技大学出版社,192~193.
- 尹观,倪师军,张其春.2001a. 氘过量参数及其水文地质学意义. 成都 理工学院学报 众 3) 251~254.
- 尹观,倪师军.2001b.地下水氘过量参数的演化.矿物岩石地球化学 通报,10(4):487~494.
- 张洪平,刘恩凯,王东生等.1991.中国大气降水稳定同位素组成及影响因素.中国地质科学院水文地质工程地质研究所所刊(7): 101~110.

References

- Jiang Liangwen , Wang Ke , Huang Runqiu et al. 2001. Analysis of the system of deep confined karst water of Yuanliangshan tunnel in the Maoba syncline. Journal of Chengdu University of Technology ,28 (2):125~129(in Chinese with English abstract).
- Wang Hengchun. 1991. General theory of isotope hydrogeology. Beijing Geology Press A5~56 ,73~83(in Chinese).
- Wei Keqin. 1980. Distribution feature about the tritium content of the natural water in our country. Science Bulletin (10) 411 415.
- Yin Guan. 1988. Isotope hydrologic geochemistry. Chengdu : Chengdu University of Science and Technology Press ,192 \sim 193(in Chinese).
- Yin Guan , Ni Shijun , Zhang Qichun. 2001a. Deuterium excess(d-excess) parameter and it 's hydrogeology significance. Journal of Chengdu University of Technology ,28(3):251 \sim 254(in Chinese with English abstract).
- Yin Guan , Ni Shijun. 2001b. Evolution of deuterium excess d-excess) parameter of groundwater. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry ,10(4):487~494.
- Zhang Hongping , Liu Enkai , Wang Dongsheng et al. 1991. The stable isotopic composition of precipitation and it 's influencing factors in China. Publication of Institute of Hydrogeology and Engineering Geology CAGS (7):101~110(in Chinese).