DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2017.05.07

华蓥山隧道隧址区水文地球化学特征及涌水来源识别

林 云[1,2], 娄亚南[1], 武亚遵[1], 秦 成[3], 潘 磊[3]

(1.河南理工大学 资源环境学院,河南 焦作 454000; 2.中原经济区煤层(页岩)气
河南省协同创新中心, 河南 焦作 454000; 3.中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400016)

摘 要: 针对华蓥山隧道施工中可能存在的涌突水问题,本研究在现场水文地质调查,取样测试分析的基础上,对华蓥山隧道隧址区地表水、地下水和隧道涌水的水文地球化学特征进行了分析,并对隧道涌水水源进行了识别。结果表明:隧址区水体的水化学类型主要为 HCO_3-Ca 和 $HCO_3\cdot SO_4-Ca$ 型,水质偏弱碱性,水化学成分主要来源于岩石的风化作用;隧址区浅层地下水和地表水联系紧密,大气降水是各水体的主要补给来源;隧址区地下水补给高程为 315~1467 m,在东南区域,隧道涌水主要来自三叠系上统须家河组(T_3xj)碎屑含水层和侏罗系中统新田沟组(J_2x)碎屑岩含水层,西北部主要来自三叠系下统嘉陵江组(T_1j)灰岩岩溶含水层。

关键词: 稳定同位素; 水化学特征; 涌水来源; 含水层; 华蓥山隧道

中图分类号:U453.6+1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2017)05-0043-06

Hydrogeochemical characteristics and identification of water source in Huayingshan Tunnel District

LIN Yun[1,2], LOU Yanan[1], WU Yazun[1], QIN Cheng[3], PAN Lei[3]

(1. *Institute of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo* 454000, *China*; 2. *Collaborative Inbnovation Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains Economic Region, Henan Province, Jiaozuo* 454000, *China*; 3. *China Coal Technology Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing* 400016, *China*)

Abstract: In order to predict the potential water inrush problem produced during the construction of Huayingshan tunnel, the research analyzed the hydrogeochemical characteristics of the surface water, groundwater and inrush water of Huayingshan tunnel, and identified the inrush water resource based on the field investigations and hydrochemical analysis of water samples. The result shows that, in Huayingshan tunnel area the main hydrochemical types of regional water are HCO_3-Ca and $HCO_3\cdot SO_4-Ca$. The water quality is in alkalescency, and the hydrochemical origin of water is rock weathering. There is close relationship between shallow groundwater and surface water. Precipitation is main supply sources of all kinds of water. Replenishment elevation of study area is 315~1467m. In the southeast region the tunnel inrush water mainly comes from sandstone aquifers of upper Triassic Xujiahe formation (T_3xj) and middle Jurassic Xintiangou formation (J_2x), and the northwest comes from limestone karst aquifer of lower Triassic Jialingjiang formation (J_1x).

Key words: stable isotope; hydrochemistry; water inrush sources; aquifers; Huayingshan tunnel

在山岭岩溶发育区进行隧道施工时,不可避免地遭遇涌突水、突泥等问题,这不仅威胁着隧道的安全施工,同时也破坏了生态环境,甚至造成人员伤亡[1]。因此,结合隧址区水文地质条件,识别隧道潜在的涌突水来源,对隧道的安全开挖具有重要的指导意义。涌突水水源识别最早出现在矿井中,近些年来,随着隧道工程的日趋增多,隧道涌突水问题愈发突出,而解决隧道涌突水问题的前提和关键是正确识别涌突水来源。基于此,科技工作者借鉴了前人相关研究方面的经验,继承和发展了水源识别

收稿日期:2017-06-13; **修回日期**:2017-07-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41502224、41602265); 河南省高校科技创新团队支持计划(15IRTSTHN027); 河南省创新型科技人才队伍建设工程(CXTD2016053)

作者简介:林 云(1983-),女,湖北襄阳人,博士,讲师,主要从事水文地质、工程地质的教学研究工作。

通讯作者:武亚遵(1981-),男,河南鲁山人,博士,讲师,主要从事水文地质、工程地质的教学研究工作。

技术,诸如多元矩阵模型[2]、BP 神经网络模型[3]、三元混合模型[4]、支持向量机[5-6]、模糊聚类分析[7-8]、水化学同位素分析[9-10]、稳定环境同位素质量平衡模型[11]、灰色关联模型[12]等被应用到涌突水水源识别中,取得了较好的效果。上述涌突水水源识别方法大都是基于研究区水文地球化学资料的,因此,就目前来说,水文地球化学法仍是正确识别涌突水水源的主要手段。

重庆渝北至四川广安高速公路(重庆段)华蓥山隧道左线长 5 018 m,右线长 5 000 m,双向 6 车道。隧道横穿华蓥山观音峡背斜山脉,背斜核部发育有 F1、F2 和 F4 压扭性逆冲断层,同时隧址区可溶的碳酸盐岩广泛出露。前期勘探资料显示,隧道开挖过程中可能遭遇断层破碎带、岩溶、软弱夹泥等不良地质问题,其中岩溶涌突水风险极大,针对这一问题,本研究在野外水文地质调查、取样分析测试的基础上,采用水化学和氢氧同位素方法,分析隧址区不同水体水文地球化学特征,识别隧道开挖过程中的涌水来源,为隧道的安全施工和正常运营提供科学参考。

1 研究区基本概况

华蓥山隧道地处长江一级支流嘉陵江流域观音峡背斜范围内,背斜 SE 翼地表水属嘉陵江支流黑水滩河;西侧有大量冲沟汇聚进入嘉陵江;北面冲沟汇入大沔溪,经渠江排入嘉陵江;南侧地表水系为嘉陵江。受区域构造控制,区内横向冲沟发育,平面上多属树枝状水系。黄家坟一带为本区地表水分水岭。

区域内构造较发育,以川东隔档式构造为框架,形成具有明显特征的"重庆褶皱束",其间在背斜中发育各期断层。重庆褶皱束由一系列平行雁行排列的隔挡式梳状褶皱构造和走向压性断裂组成,成 NNE 向展布,包括沥鼻峡、温塘峡和观音峡背斜。区内构造陡窄,向斜,宽缓。背斜翼部岩层倾角在 45°以上,局部直立或倒转,宽约 4 ~ 6 km。向斜地层倾角在 35°以内,宽 10 ~ 20 km。

二叠系上统长兴组(P_2c)背斜核部纵张节理发育,地下水丰富,为岩溶裂隙水和管道水。三叠系飞仙关组(T_1f)页岩与可溶岩互层,页岩相对隔水,地下水主要为基岩裂隙水和岩溶水,可溶岩段地下水丰富。三叠系雷口坡组(T_2l)、嘉陵江组(T_1j)可溶岩地层中岩溶十分发育,落水洞、洼地遍布,大气降雨通过负地形直接补给地下水,北西翼沟谷切穿可溶岩,可溶岩中一部分地下水向沟谷排泄,西翼煤矿开采较多,也排泄了一部分地下水。该地层涌突水危险性总体较高。三叠系上统须家河组(T_3xj)的砂泥岩不等厚互层,砂岩为主要含水层,泥岩相对隔水,以基岩裂隙水为主,地下水运移局部受采空区和煤巷道连通影响较大。背斜西翼煤矿开采较多,煤矿的排泄高程低于隧道,已排泄了部分地下水,水位较低,涌突水危险性较低。侏罗系中、下统新田沟组(J_2x)、自流井组($J_{1-2}z$)、珍珠冲组(J_1z)砂泥岩不等厚互层,以泥岩为主,含水条件差,岩层入渗系数小,大气降雨主要沿山岭、斜坡地形汇入溪沟之中,局部地下水主要受溪沟切割,地下水分散排泄。地下水不发育,主要为基岩裂隙潜水。

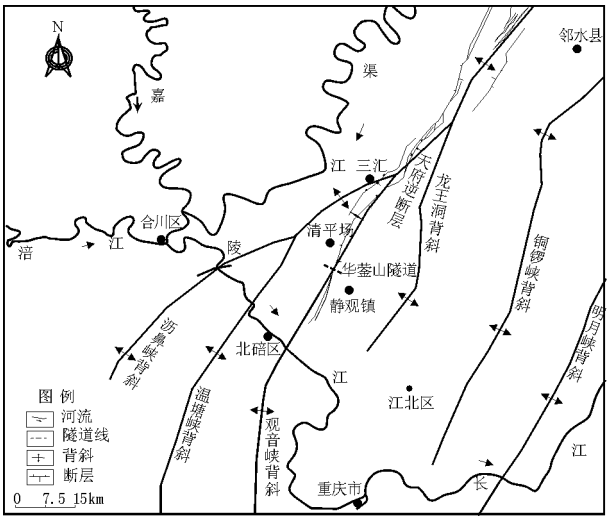

图 1 隧址区区域构造纲要图

2 水样采集与测试

为分析隧道区不同水体的水文地球化学特征,识别隧道涌水来源,于 2015 年 5 - 8 月在隧道附近采集了 19 个水样,其中地表水样 2 个,分别于 5 月 29 日与 6 月 10 日在龙神洞处取得;地下水样 10 个,取自钻孔和泉井;隧道不同位置涌水水样 7 个。19 个水样均进行了水化学成分分析,其中 7 个水样同时进行了氢氧稳定同位素分析。具体采样地点见图 2。

装水样用的玻璃瓶(连同瓶盖)先以铬酸洗液或肥皂水洗去油污或污垢,再用清水洗净,最后用蒸馏水洗两遍。装水样前,用所采取水样冲洗 2 ~ 3 次。在钻孔中取样时,钻孔内不用水冲洗,停钻并待水位稳定后再取水样。水样装瓶时留 10 ~ 20 mm 空间,瓶塞盖好,检查无漏水现象后,用石蜡封口。在水样瓶上贴好标签,并注明水样编号。19 个水样

送往重庆 136 测试中心进行常规水化学测试,7 个水样送往西南大学地理科学院进行同位素测试。水化学分析利用 50 mL 浓度 0.05 mol/L 的 HCl 标准溶液测试 OH^-、碳酸盐碱度 CO_3^{2-}、重碳酸盐碱度 HCO_3^- 和总碱度(以 $CaCO_3$ 计),50 mL 浓度0.05 mol/L 的 EDTA 标准溶液测试总硬度(以 $CaCO_3$ 计)、Ca^{2+}、Mg^{2+} 和 SO_4^{2-},0.03 mol/L 的 $AgNO_3$ 标准溶液测试 Cl^-。pH 值用玻璃电极法测定。环境同位素 D 和^{18}O 应用同位素比值质谱仪(IRMS)测定,测定结果以相对于维也纳标准平均海水(VSMOW)的千分差(‰)表示,测定精度分别为 ±1.05‰和 ±0.15‰。

3　水文地球化学特征

3.1　水化学特征

研究区地表水阳离子以 Ca^{2+} 为主(表 1),浓度为 28.06 ~92.18 mg/L,平均值为 60.12 mg/L,阴离子以 HCO_3^- 为主,浓度为 115.94 ~244.08 mg/L,平均值为 180.01 mg/L,pH 平均值为 7.51,偏弱碱性,TDS 平均值为 201.84 mg/L,属低矿化度水;地下水阳离子以 Ca^{2+} 为主,浓度为 52.10 ~ 136.27 mg/L,平均值为91.78 mg/L,阴离子以 HCO_3^- 为主,浓度为 231.88 ~ 341.71 mg/L,平均值为277.03 mg/L,pH 平均值为 7.56,偏弱碱性,TDS 平均值为 305.11mg/L,属低矿化度水;隧道涌水阳离子以 Ca^{2+} 为主,浓度为 36.07 ~132.26 mg/L,平均值为 78.44 mg/L,阴离子以 HCO_3^- 为主,浓度为 91.53 ~396.63 mg/L,平均值为 237.11 mg/L,pH 平均值为 7.46,偏弱碱性,TDS 平均值为 269.68 mg/L,属低矿化度水。地表水中主要离子的浓度普遍小于地下水和隧道涌水的离子浓度,这主要与地表水流动速度快、更新速度快、水岩相互作用弱有关。

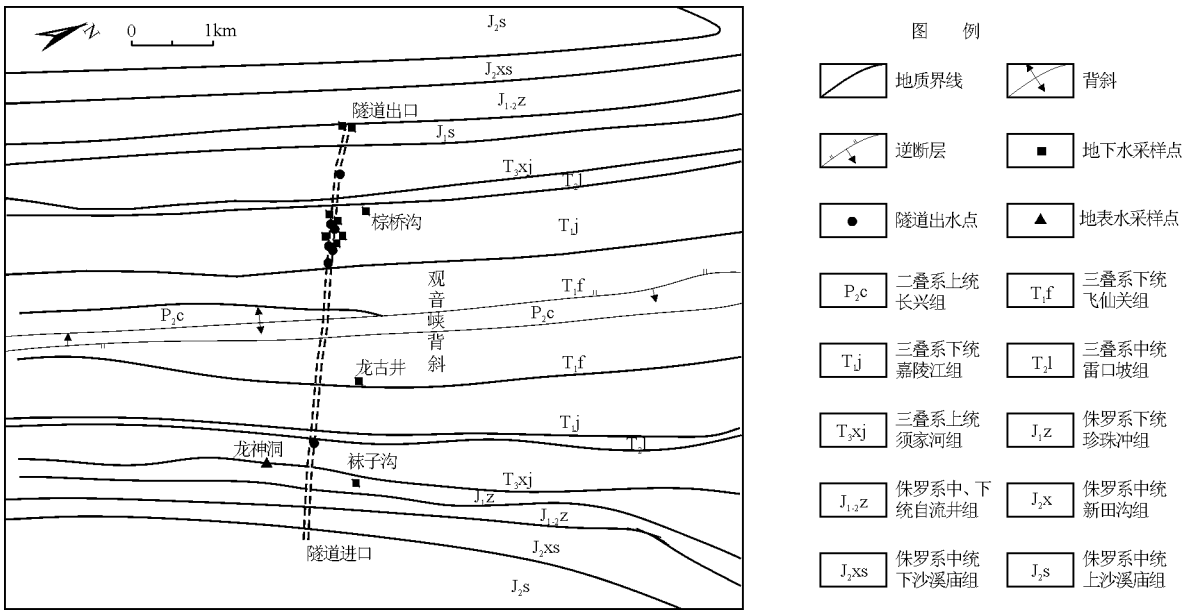

图 2　隧址区水文地质示意图

表 1　研究区不同水体水化学统计特征　　mg/L

类型	特征值	水温/℃	pH	TDS	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$K^+ + Na^+$	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}
地表水	最小值	24.0	7.37	152.42	28.06	2.43	0.50	115.94	6.38	19.21
	最大值	25.0	7.65	251.26	92.18	14.59	7.00	244.08	14.89	38.42
	平均值	24.5	7.51	201.84	60.12	8.51	3.75	180.01	10.64	28.82
地下水	最小值	19.0	7.30	239.92	52.10	2.43	0.00	231.88	10.64	9.61
	最大值	25.0	7.78	392.27	136.27	36.48	26.50	341.71	19.14	86.45
	平均值	22.9	7.56	305.11	91.78	10.70	8.55	277.03	14.25	41.31
隧道涌水	最小值	23.0	7.18	166.98	36.07	2.43	4.00	91.53	12.76	9.61
	最大值	27.0	7.65	438.79	132.26	21.89	21.50	396.63	17.02	67.24
	平均值	24.3	7.46	269.68	78.44	9.38	10.14	237.11	13.37	39.80

从 piper 三线图可以看出,区内各水体水化学类型无太大差异,主要为 HCO_3 - Ca 和 HCO_3 · SO_4 - Ca 型,各水体均为低矿化度水,初步推测地表水与地下水补给来源相同。研究表明,阴、阳离子含量上的差异与地下水的滞留时间及循环途径有关[13],从而可揭示各水体接受补给后径流条件及循环途径不同。由表 1 可知,地下水的阴、阳离子平均值均大于地表水,其主要原因为水与岩层长期作用,岩石中的离子溶滤进入地下水,导致地下水中总体离子含量高于地表水。

天然水体中的可溶性离子主要来源于岩石和土壤的风化分解以及部分大气输入或沉降[14]。为了更直观地比较各类水体的化学组成、形成原因以及彼此间的相互关系,吉布斯设计了一种半对数坐标图。该图的纵坐标为对数坐标,代表水体中溶解性总固体 TDS;横坐标为普通直线坐标,代表水中阴、阳离子比值[15]。将研究区取样点的水化学数据投绘到 Gibbs 图上(图 4),可以看出,地下水、地表水和隧道涌水的 $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$ 的比值为 0.005 ~ 0.3,$Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$ 比值为 0.035 ~ 0.122,集中分布在 Gibbs 图的中部的风化作用区,为“岩石风化类型”,说明各水体的离子成分主要来源于岩石的风化作用。

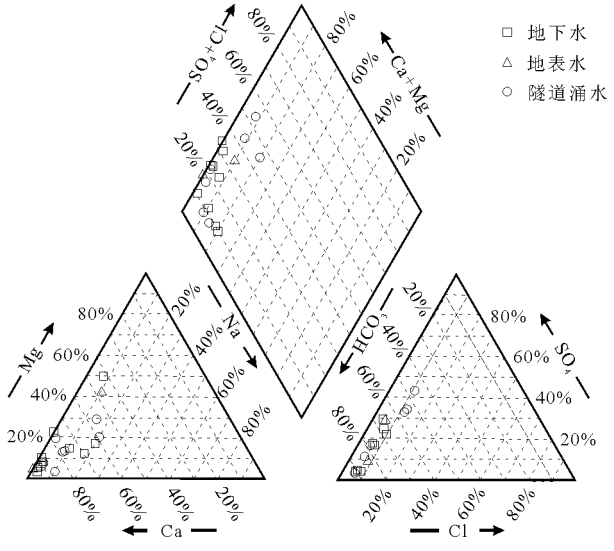

图 3 华蓥山隧址区不同水体 piper 三线图

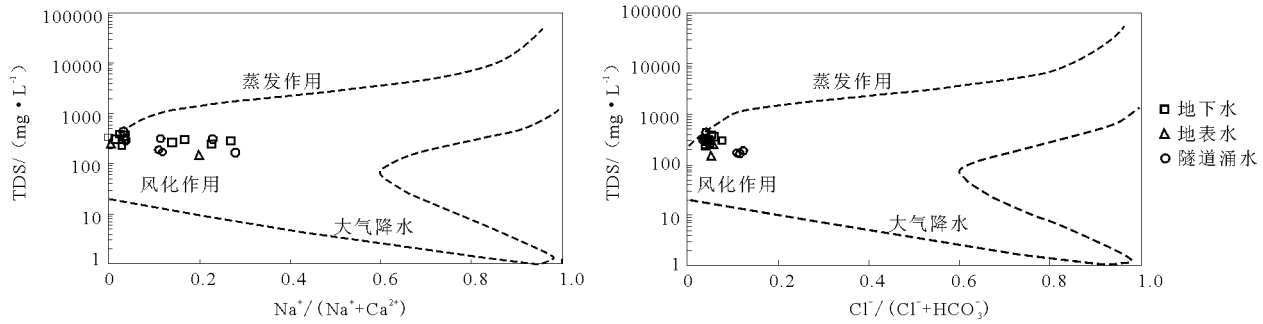

图 4 华蓥山隧址区不同水体的 Gibbs 图

3.2 氢氧稳定同位素特征

将采集的 7 个水样品化验测试,得到 ^{18}O 和 D 同位素测试结果(表 2)。做样品的 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系图,并将重庆大气降水线方程 $\delta D = 8.73\delta^{18}O + 15.73$[16] 绘制到图上(图 5),从图 5 可以看出,7 个采样点的 δD 和 $\delta^{18}O$ 组成均位于重庆大气降水线附近,说明区内地表水、地下水和隧道涌水均来自大气降水的入渗补给。

表 2 华蓥山隧道不同水体同位素统计特征

编号	采样地点	取样点高程/m	水样类型	δD_{V-SMOW}/‰	$\delta^{18}O_{V-SMOW}$/‰
1	袜子沟平石硐	485	地下水	-46.65	-7.46
2	龙神洞	587	地表水	-45.65	-7.47
3	棕桥沟水井	590	地下水	-42.66	-6.91
4	K24 +767	368	隧道涌水	-65.09	-9.61
5	Z2K27 +179	370	隧道涌水	-40.61	-6.39
6	K27 +207 -1 号孔	370	地下水	-39.98	-6.16
7	K27 +207 -2 号孔	370	地下水	-41.34	-6.46

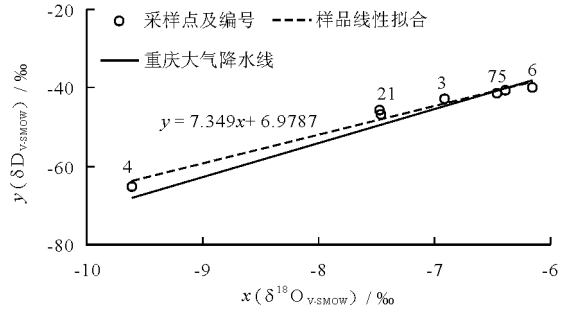

图 5　隧址区 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系图

华蓥山隧道的岩溶系统分为浅层水平循环系统和中深层水平循环系统,其中,中深层水平循环系统主要发育在 180 ~ 420 m 标高范围,浅层水平循环系统主要标高在 580 ~ 650 m 之间。袜子沟平石洞取样点和龙神洞(暗河水)的取样点 δD 和 $\delta^{18}O$ 含量基本一致,说明两者补给来源基本一致。龙神洞的水属于地表水,袜子沟平石洞处的属于浅层地下水,由此见浅层地下水和地表水联系紧密。

Z2K27 + 179 m 处隧道涌水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 含量介于 K27 + 207 m 处的 1 号孔和 2 号孔水样之间,说明该处隧道涌水与 K27 + 207 m 处水样具有相同的补给来源。K24 + 767 m 处隧道涌水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 含量明显低于其他水样,推测其原因一是该水样采集于隧道西南端,地理环境与其他采样点不同,二是由于大气降水对地下水直接但不均匀入渗补给造成的,三是与地下水的循环交替条件有关。

4　隧道涌水补给高程

氧同位素分馏理论表明,大气降水氢氧稳定同位素 δD 和 $\delta^{18}O$ 随着高程的增大而减小,具有高程效应[17],据此可以确定各取样点地下水的补给高程。公式为:

$$H = \frac{dG - dP}{K} + h$$

式中:H 为同位素入渗高度,m; h 为取样点(井、泉)高程,m; dG 为地下水(泉水)的 $\delta^{18}O$(或 δD)值; dp 为取样点附近大气降水的 $\delta^{18}O$(或 δD)值; K 为大气降水 $\delta^{18}O$(或 δD)值的高度梯度($\delta^{18}O$ 和 δD 的高度梯度分别取 - 0.31 ‰/100m[18] 和 -2.1‰/100m[19])。

本次研究分别利用 δD 值和 $\delta^{18}O$ 值进行计算并相互验证,根据李廷勇等[16]在其对重庆地区氢氧同位素含量的统计数据,计算时取大气降水 $\delta^{18}O$ = -6.5‰,δD = -40‰。计算可得隧址区补给高程为 315 ~ 1 467 m。袜子沟平石洞地下水的补给高程为 790 m,其位于隧道进口附近东北侧,结合华蓥山隧道剖面示意图(图 6)以及采样点分布图(图 2),可知该处地下水补给层位为三叠系上统须家河组(T_3xj)砂岩含水层。棕桥沟水井补给高程为 719 m,其位于华蓥山隧道东北端约 K27 里程处北侧,补给层位为二叠系上统长兴组(P_2c)岩溶裂隙水。K24 + 767 m 处求得的补给高程偏高,推测其接受三叠系上统须家河组(T_3xj)碎屑含水层和侏罗系中统新田沟组(J_2x)碎屑岩含水层的混合补给,此处为分水岭。Z2K27 + 179 m、K27 + 207 m - 1 号孔及 K27 + 207 m - 2 号孔处补给区均为三叠系嘉陵江组(T_1j)可溶岩含水层。

由此可知隧址区东南区域补给区为三叠系上统须家河组(T_3xj)碎屑含水层和侏罗系中统新田沟组(J_2x)碎屑岩含水层,西北部补给区为三叠系下统嘉陵江组(T_1j)灰岩岩溶含水层。

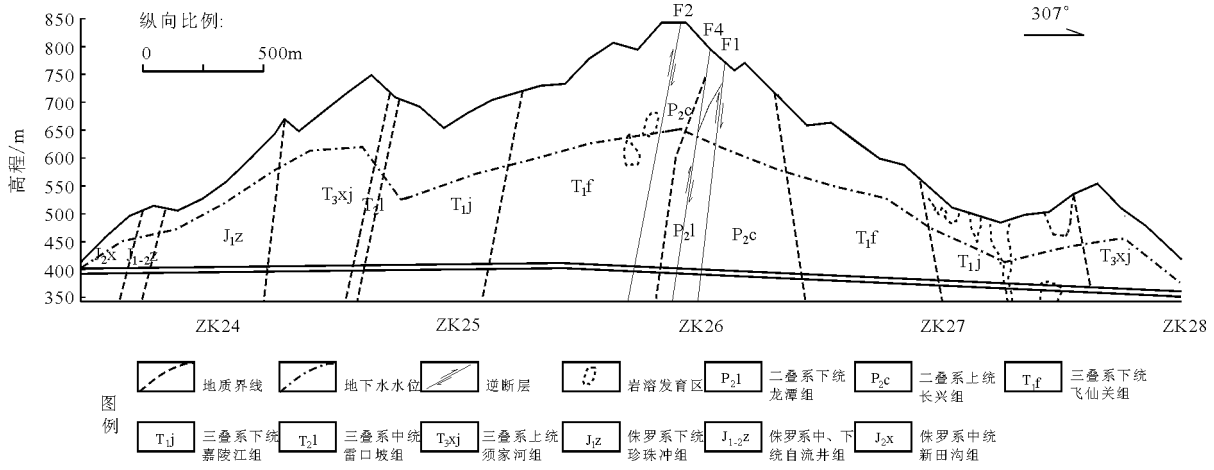

图 6　华蓥山隧道剖面示意图

5 结 论

通过环境同位素和常规水化学方法对隧址区水文地球化学特征和隧道涌水来源进行了分析研究，得到如下结论：

(1)隧址区水体水化学类型主要为 HCO_3 - Ca 和 $HCO_3 \cdot SO_4$ - Ca 型，水质偏弱碱性，属于低矿化度水，各水体离子成分主要来源于岩石的风化作用。

(2)隧址区内浅层地下水和地表水联系紧密，地表水、地下水、隧道涌水均来源于大气降水的入渗补给。K24 + 767 m 处 δD 和 $\delta^{18}O$ 含量明显低于其他水样，推测其主要原因一是该水样采集于隧道西南端，地理环境与其他采样点不同，二是由于大气降水对地下水直接但不均匀入渗补给造成的，三是与地下水的循环交替条件有关。

(3)根据计算，隧址区地下水的补给高程为 315 ~ 1467m，在隧址区的东南区域，隧道涌水主要来自三叠系上统须家河组(T_3xj)碎屑含水层，西北部主要来自三叠系下统嘉陵江组(T_1j)灰岩岩溶含水层。

参考文献：

[1] 王 莹. 玉京山隧道工程地下水环境影响预测及保护措施研究[D]. 四川：西南交通大学，2015.

[2] 孙希奎，施现院，梁丽鹏，等. 矿井涌水水源分析的多元矩阵模型及应用[J]. 煤炭技术，2016，35(12)：167 - 169.

[3] 陈文飞，刘启蒙，刘 瑜，等. 矿井涌水水源的主成分分析和 BP 神经网络判别[J]. 黑龙江科技大学学报，2014，24(6)：642 - 646.

[4] 刘爱华，刘银朋，程 力. 三元混合模型在地下矿山涌水水源计算分析中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2014，45(8)：2768 - 2773.

[5] 钱家忠，潘 婧，赵卫东，等. 基于 SVM 的潘三矿 B8 组与 C13 组煤开采中突水水源判别模型[J]. 系统工程理论与实践，2011，31(12)：2425 - 2430.

[6] 刘 建，刘 丹. 基于 SVM 的隧道涌水来源识别[J]. 水文地质工程地质，2012，39(5)：26 - 30.

[7] 李春霞，赵志怀，程子龙. 用水化学特征的模糊聚类分析方法判别煤矿涌水来源——以潘家窑矿副斜井为例[J]. 工程勘察，2014，42(10)：36 - 38.

[8] 高 飞，刘 丹. 模糊聚类分析法在叙岭关隧道涌水来源识别中的应用[J]. 现代隧道技术，2013，50(2)：52 - 57 + 65.

[9] 罗明明，黄 荷，尹德超，等. 基于水化学和氢氧同位素的峡口隧道涌水来源识别[J]. 水文地质工程地质，2015，42(1)：7 - 13.

[10] Peng T R, Lu Wanchung C, Chen Kuanyu, et al. Groundwater - recharge connectivity between a hills - and - plains´area of western Taiwan using water isotopes and electrical conductivity[J]. Journal of Hydrology, 2014, 517：226 - 235.

[11] 刘 建，刘 丹. 基于稳定环境同位素质量平衡模型的隧道涌水来源识别[J]. 现代隧道技术，2015，52(6)：106 - 110.

[12] 王志杰，李 昭，马德林，等. 基于灰色理论的雪山梁隧道施工过程渗漏水水源识别研究[J]. 隧道建设，2017，37(1)：24 - 29.

[13] 张应华，仵彦卿，温小虎，等. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. 水科学进展，2006，17(5)：738 - 747.

[14] 李梦婕，江 韬，何仁江，等. 岩石风化对三峡库区农业小流域水化学特征的影响[J]. 中国环境科学，2012，32(8)：1495 - 1501.

[15] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970, 170(3962)：1088 - 1090.

[16] 李廷勇，李红春，沈川洲，等. 2006 - 2008 年重庆大气降水 δD 和 δ18O 特征初步分析[J]. 水科学进展，2010，21(6)：757 - 764.

[17] 杨晓新，徐柏青，杨 威，等. 藏东南不同季节水体中氧同位素的高程递减变化研究[J]. 科学通报，2009，54(15)：2140 - 2147.

[18] 蒲俊兵. 重庆岩溶地下水氢氧稳定同位素地球化学特征[J]. 地球学报，2013，34(6)：713 - 722.

[19] 郑淑蕙，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，1983，18(13)：801 - 806.