ISSN 0250-3301　CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷　第4期

Vol.35　No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 35 卷　第 4 期
2014 年 4 月 15 日

目　次

重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究

杨平恒[1,2,3],卢丙清[4],贺秋芳[1,3],陈雪彬[1,3]

(1. 西南大学地理科学学院,三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆　400715; 2. 国土资源部岩溶动力学重点实验室,桂林　541004; 3. 国土资源部岩溶生态环境-重庆南川野外基地,重庆　408435; 4. 重庆市地质勘查开发局南江水文地质工程地质队,重庆　401121)

摘要:以重庆青木关岩溶地下水系统为例,分析了地下水系统入口地表水和出口地下水两年的水文过程、物理化学及部分 δD、$\delta^{18}O$ 数据,目的是掌握地下河系统地球化学在时间及空间上的特征及变化规律.结果表明,研究区地下水系统流量受降雨的影响存在丰水期和枯水期,地下水中化学组分在岩溶含水层运移的过程中受水岩作用、人类活动和雨水稀释作用的共同影响,并表现出较为明显的时间和空间规律性.地下河系统入口的地表水 δD、$\delta^{18}O$ 值分布于重庆大气降水线的下方,地表水蒸发作用强烈,且旱季 δD、$\delta^{18}O$ 值重于雨季,存在明显的季节效应;出口地下水的 $\delta^{18}O$、δD 值较入口偏负,且相对稳定,认为雨水主要是以通过落水洞直接灌入和通过岩溶非饱和带扩散流等两种形式转换为地下水.

关键词:岩溶;地下水系统;水文地球化学;$\delta^{18}O$;δD;青木关

中图分类号:X143　**文献标识码**:A　**文章编号**:0250-3301(2014)04-1290-07　**DOI**:10.13227/j.hjkx.2014.04.012

Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing

YANG Ping-heng[1,2,3], LU Bing-qing[4], HE Qiu-fang[1,3], CHEN Xue-bin[1,3]

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. The Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources, Guilin 541004, China; 3. Field Scientific Observation & Research Base of Karst Eco-environments at Nanchuan in Chongqing, Ministry of Land and Resources, Chongqing 408435, China; 4. Nanjiang Hydrogeological & Engineering Geology Brigade, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 401121, China)

Abstract: The two-year hydrologic process, hydrochemistry, and a portion of δD, $\delta^{18}O$ of both the surface water at the inlet and the groundwater at the outlet, were investigated to identify the spatial and temporal variations of hydrogeochemistry in the Qingmuguan karst groundwater system. Research results show that there are wet and dry periods in the groundwater system owing to the striking influence of seasonal rainfall. The evolution of the chemical compositions in the groundwater is significantly influenced by the water and rock interaction, anthropogenic activities and rainwater dilution. The variations of the chemical compositions in the groundwater exhibit obvious spatiality and temporality. The δD and $\delta^{18}O$ of the surface water beneath the local Meteoric Water Line of Chonqing indicate that the surface water is strongly evaporated. Furthermore, the δD and $\delta^{18}O$ of the surface water are more positive in the dry period than in the wet period, showing a distinct seasonal effect. The δD and $\delta^{18}O$ of the groundwater are quite stable and much negative compared with those of the surface water, which suggests that the rainwater recharge the groundwater via two pathways, one directly through sinkholes and the other via the vadose zone.

Key words: karst; groundwater system; hydrogeochemistry; $\delta^{18}O$; δD; Qingmuguan

水是生命之源、生产之要、生态之基,是自然系统中最积极、最活跃的要素之一,在国民经济建设中发挥着不可替代的作用.重庆市地下水天然资源量为 160.66 亿$m^3 \cdot a^{-1}$,其中岩溶地下水资源量为 118.33 亿$m^3 \cdot a^{-1}$,占地下水资源量的 73.65%[1].重庆市碳酸盐岩分布在 36 个区县,总面积达 3.3×10^4 km^2,约占土地面积的 40%,主要集中于渝东南、渝东北和都市经济圈的各区县,其中已知岩溶地下河总数约 380 条,总长约2 155 km[2].近年来重庆市经济社会迅速发展,对水资源的需求不断扩大,一些岩溶地区的地下水受到严重的污染,地下水中各种污染物质的浓度呈逐年上升的趋势,水质在逐年恶化,呈现污染源多样化,污染由点向面发展,有机污染与无机污染并存等特点[3],直接影响到当地人民群众的身体健康,逐渐成为制约重庆经济社会发展的瓶颈因素.

收稿日期:2013-08-21;**修订日期**:2013-10-22

基金项目:2011 年度重庆市国土房管局科技计划项目;岩溶动力学重点实验室开放基金项目(KDL2012-08);中央高校基本科研业务费专项(XDJK2012B005);国家自然科学基金项目(41103068);重庆市院士专项(cstc2013jcyjys20001)

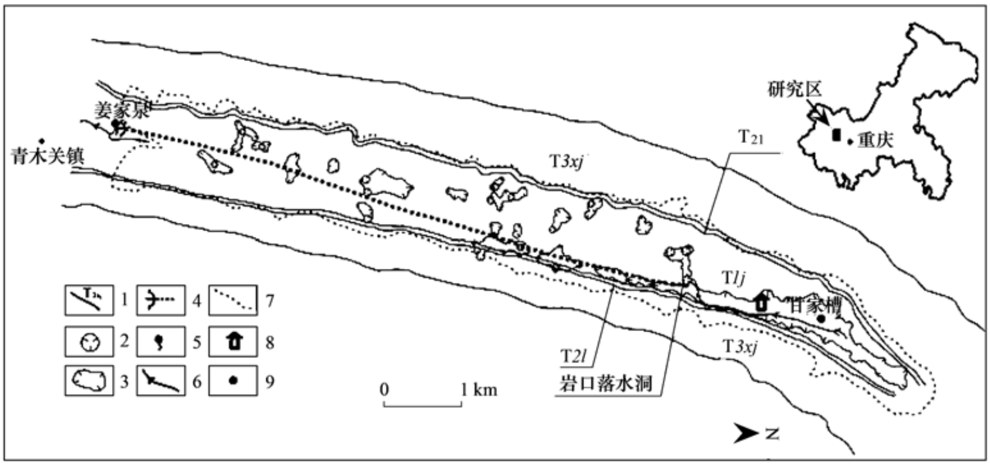
作者简介:杨平恒(1983 ~),男,博士,副教授,主要研究方向为岩溶环境学,E-mail:balacne@swu.edu.cn

岩溶地下河系统水文地球化学动态是地下水在降水、径流、岩性、地质构造等自然因素及人类活动因素[4~9]影响下，随时间和空间变化而演化的过程，它反映了岩溶地下河系统中水化学的形成和迁移变化规律. 由于蒸发和凝结等作用，自然界中水体在运移的过程中发生不同程度的同位素分馏，导致各种水体中的 δD、$\delta^{18}O$ 具有不同的特征值，故 δD、$\delta^{18}O$ 被广泛地应用在大气降水、地表水和地下水及其之间的相互转化的研究中[10~17]. 作为对地下河系统外界影响因素的反映，地下水物理、化学指标及 δD、$\delta^{18}O$ 的动态变化特征，是了解自然因素和人为因素对地下河系统影响程度的一个重要手段，是研究岩溶地球化学的一个重要途径.

本研究以重庆典型岩溶地下水系统——青木关地下河为例，对该地下河系统入口地表水和出口地下水的水文过程、水化学组分及 δD、$\delta^{18}O$ 等水文地球化学信息进行分析，旨在掌握地下河系统水文地球化学在时间及空间上的特征及变化规律，为宝贵的岩溶地下水资源开发和利用奠定理论基础.

1　研究区概况

青木关地下河系统位于川东平行岭谷区重庆境内的华蓥山帚状褶皱束缙云山山脉南延段，行政位置处于沙坪坝区、北碚区和璧山县的交界处. 区内碳酸盐岩地层主要由下三叠统嘉陵江组（T1*j*）厚层块状灰岩、白云岩、白云质灰岩夹角砾状灰岩，及中三叠统雷口坡组（T2*l*）白云质灰岩、白云岩及泥灰岩，夹角砾状灰岩及灰绿、黄绿色页岩组成. 碳酸盐岩地层被两侧上三叠统须家河组（T3*xj*）灰色长石石英砂岩及煤层包围. 碳酸盐岩地层为背斜核部，须家河组地层为背斜两翼. 由于岩性差异，导致背斜成山，向斜成谷，表现为“一山二岭一槽”的典型岩溶槽谷地貌. 区内地势呈北高南低，碳酸盐岩地层内发育有一条自 NNE 向 SSW 流动的地下河，直线距离长约 7.4 km（图 1）. 该地下河起源于流域北端甘家槽洼地南缘的岩口落水洞（海拔约 530 m），流域面积约 13.4 km^2. 地下河沿途不断接受两侧地表水通过落水洞灌入以及裂隙的补给. 地下河主要在流域南端的姜家泉以泉水的形式（海拔约 320 m）出露[18]，注入青木溪，最终流入长江.



1. 地层界线及代号；2. 落水洞；3. 洼地；4. 青木关地下河展布及出口；5. 泉点；6 地表水流向；7. 地表分水岭；8. 气象站；9. 地物名

图 1　研究区水文地质示意

Fig. 1　Sketched map of hydrogeology at the study site

研究区地下河岩溶管道介质的平均直径 2.27 ~2.72 m[19]，但其储水空间占整个研究区地下空间的比例不到 10%；而岩溶非饱和带扩散流（裂隙）含水介质形态非常发育，其比例达 90% 以上[19,20]，在水资源的存储和调节上起到了非常重要的作用.

研究区属于亚热带湿润季风型气候，多年平均降水量为1 250 mm，多年平均气温为 18.5℃. 土地利用类型主要为林地，占流域面积的 82%，主要分布在山坡两侧；水田面积占流域面积的6%，主要分布在流域上游的甘家槽洼地；旱地面积占流域面积的 8%，主要分布在上中游的洼地内或其边缘的坡地上. 区内土壤覆盖以地带性黄壤和非地带性石灰土为主.

在研究区内人类活动以农业活动为主. 由于历史原因，曾经开采过小型煤矿.

2 研究方法

2.1 野外仪器在线记录

在姜家泉出口安装 WGZ-1 型光电数字水位计(重庆华正水文仪器有限公司)实时监测水位,精度为 1 mm,根据经验公式[19]将水位换算成流量. 在甘家槽洼地设有 HOBO 小型自动气象站(美国 ONSET 公司),观测区内的降雨量,精度为 1.0%.

2.2 野外水样采集和保存

选取地下河系统入口岩口落水洞地表水和出口姜家泉地下水为研究载体. 岩口落水洞地表水主要来自大气降水、甘家槽洼地水田排水(来源于大气降水)及洼地周边居民的生活废水. 每月于岩口落水洞和姜家泉采集水样,雨季适度加密取样,并避开雨天. 阴离子水样采样方法:将水样装于洁净的 1 L 聚乙烯样瓶中; 阳离子水样取样方法:将水样装于洁净的 60 mL 聚乙烯样瓶中,加 1∶1硝酸溶液若干滴,调 pH <2. δD 和 $\delta^{18}O$ 水样采样方法:在水下装满 10 mL 离心管,使离心管内不留气泡,用胶带纸密封. 所有水样在采集当日内运至实验室,4℃保存直到测试.

2.3 测试分析方法

电导率、pH 值和水温由 HQ40 d 便携式多参数水质分析仪(美国 Hach 公司)野外现场测定,精度分别为1 $\mu S \cdot cm^{-1}$、0.01 和 0.1℃. 阴离子测试方法参考文献[21]. NO_3^- 测定采用紫外分光光度法, SO_4^{2-} 测定采用硫酸钡比浊法, PO_4^{3-} 测定采用钼酸铵比色法,使用仪器为 UV2450 紫外-可见分光光度计(Shimadzu 公司); Cl^- 测定采用硝酸银滴定法; HCO_3^- 采用碱度试剂盒(德国 Merck 公司)现场测定. 所有阳离子使用 ICP-OES Optima 2100DV (PerkinElmer 公司)检测,仪器 1 h 内相对标准偏差 ≤0.5%.

δD 和 $\delta^{18}O$ 值用连有 Gas Bench Ⅱ装置的 Delta V plus 测定. δD 值的测定方法:取 200 μL 水样加入样品反应试管中, 在 2% H_2 + He 的混合气体和 25℃的条件下,用 Pt 棒作为催化剂平衡 40 min, H_2 气在 He 气流的载带下去除水汽后,进入质谱仪进行测定分析; 每隔 5 个样品,放置一组有 2 种国际标准和 5 种不同 δD 值的工作标样; 样品与国际标准和实验室工作标准同时测定分析; 同位素值表示为相对于 V-SMOW. 重复样品的分析显示外精度为 <1‰. $\delta^{18}O$ 值的测试方法:取 200 μL 水样加入样品反应试管中,在 2% CO_2 + He 的混合气体环境下和 25℃条件下,使水汽平衡 18 h, CO_2 在 He 气流的载带下,除去水汽,进入质谱仪进行分析; 每隔 5 个样品,放置一组有 2 种国际标准和 5 种不同 $\delta^{18}O$ 值的工作标样. 样品与国际标准和实验室工作标准同时测定分析; 同位素值表示为相对于 V-SMOW,样品分析内精度优于 0.2‰,重复样品的分析测试显示外精度 <0.5‰.

以上室内测试工作在西南大学岩溶环境实验室完成.

3 结果与分析

3.1 降雨和水文过程

图 2 为 2007 年 4 月 ~2009 年 4 月期间青木关地下河系统地下河入口地表水及出口地下水水文地球化学过程. 根据气象站记录的降雨量数据统计, 2007 年 4 月 ~2009 年 4 月研究区的总降雨量为 2 306 mm,其中2007 年4 月 ~2008 年4 月的降雨量为1 273 mm,2008 年 4 月 ~2009 年 4 月的降雨量为 1 033 mm. 从图 2 还可以看出,研究区降雨比较集中的时段在 4 ~11 月,尤其是 6 ~9 月,这 4 个月的降雨量占全年降雨量的 50% 以上,研究区的这种降雨时间分布充分体现了季风气候的特点.

地下河入口和出口的流量存在丰水期和枯水期两个不同的水文阶段,其中丰水期约占全年流量的 80% 以上. 另外,虽然地下河入口的流量小于同期出口的流量,但二者的变化趋势基本一致(图 2).

综合以上降雨量和地下河系统流量的特点,表明地下河系统流量对降雨的响应具有及时、迅速的特点.

3.2 地下河系统入口地表水与出口地下水的地球化学动态变化

3.2.1 水物理化学特征对比分析

包括 K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^-、NO_3^-、SO_4^{2-}、Cl^- 在内的常量成分是地下水中分布最广、含量最高的 8 种离子,在很大程度上决定了地下水的物理性质和化学特征. 在岩溶区高钙弱碱性的环境下,这些离子的相对含量和绝对含量随着水文地质条件和其他外界环境的变化而变化,从而形成各种不同的水质特点.

水温:岩口落水洞处由于是地表水,其水温受气温影响大,表现为夏秋季节高,冬春季节低(图 2),与当地气温变化规律一致. 而姜家泉为地下水,水温常年基本稳定在 18.5℃左右(图 2),与当地的年均气温基本一致,表明姜家泉为浅层岩溶地下水,也反

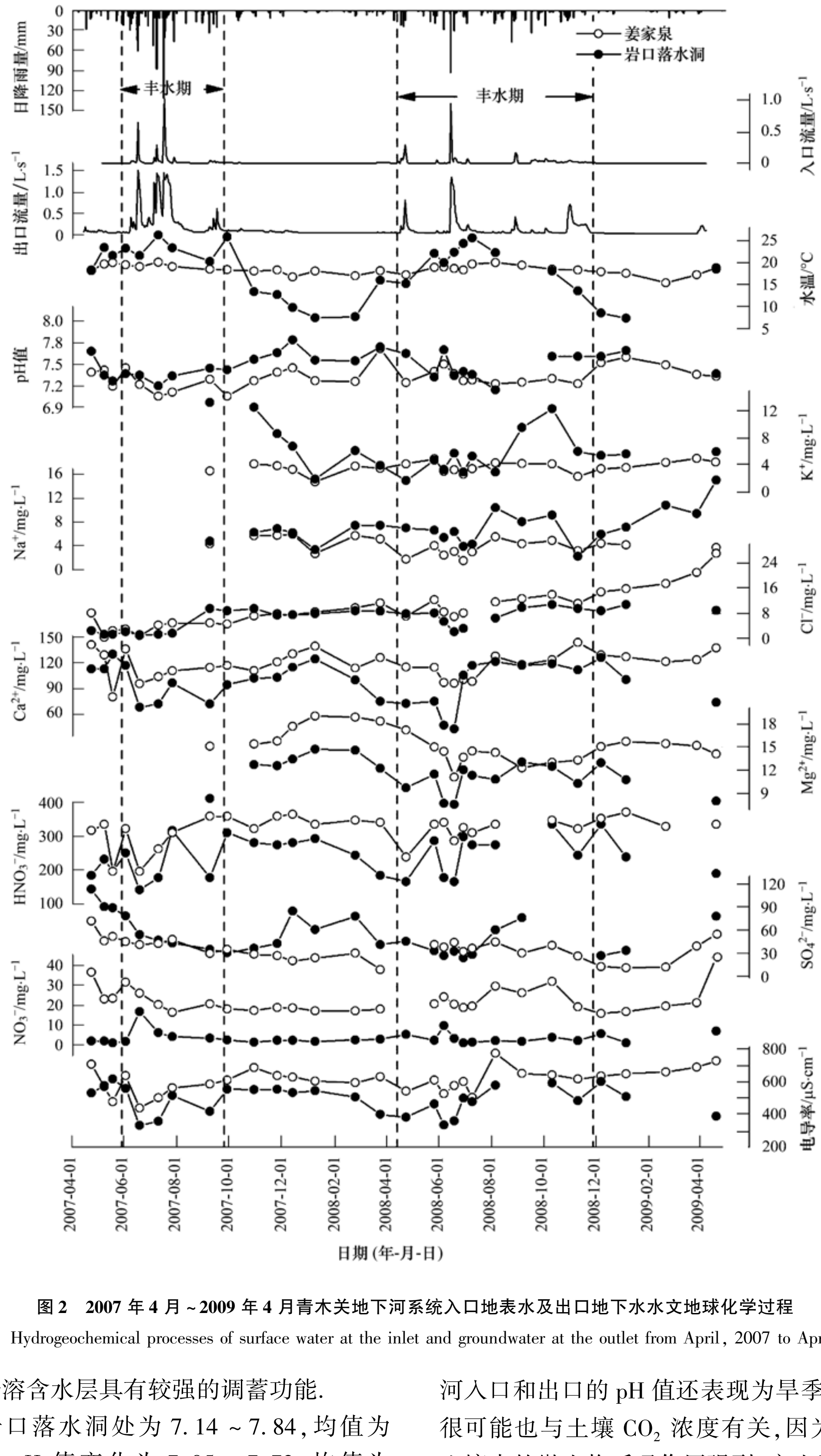


图 2　2007 年 4 月 ~ 2009 年 4 月青木关地下河系统入口地表水及出口地下水水文地球化学过程

Fig. 2　Hydrogeochemical processes of surface water at the inlet and groundwater at the outlet from April, 2007 to April, 2009

映了研究区岩溶含水层具有较强的调蓄功能.

pH 值: 岩口落水洞处为 7.14 ~ 7.84, 均值为 7.49; 姜家泉 pH 值变化为 7.05 ~ 7.72, 均值为 7.33(表 1). 总体上姜家泉的 pH 值要低于岩口落水洞处的值(表 1、图 2), 主要是因为地下水在运动的过程中不断接受溶有土壤 CO_2 的扩散流补给. 地下河入口和出口的 pH 值还表现为旱季高, 雨季低, 这很可能也与土壤 CO_2 浓度有关, 因为雨季气温高, 土壤中的微生物呼吸作用强烈, 产生了大量的 CO_2, 雨水经土壤淋滤, 溶解了呼吸作用产生的 CO_2 的缘故.

K^+: 岩口落水洞处的变化较大(图 2), 变化范

围为 1.65 ~ 13.29 $mg\cdot L^{-1}$,其均值为 6.23 $mg\cdot L^{-1}$(表 1);姜家泉变化相对较为稳定(图 2),变化范围为 1.42 ~ 4.94 $mg\cdot L^{-1}$,其均值为 3.64 $mg\cdot L^{-1}$(表 1).

Na^+:岩口落水洞处的浓度明显要高于姜家泉(图 2),二者的均值分别为 7 $mg\cdot L^{-1}$ 和 4.03 $mg\cdot L^{-1}$(表 1).

K^+、Na^+ 主要来源于生活废水和农业施肥,岩口落水洞处汇集甘家槽洼地大部分的人畜废水和农业施肥残余组分,而甘家槽洼地及其附近为流域内人畜和水田最集中处.因此,岩口落水洞处 K^+、Na^+ 含量高,下游浓度低,表明 K^+、Na^+ 随地下水快速的运移过程中可能是一个稀释的过程.

Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^-:这 3 种离子主要是碳酸盐岩溶解的产物.岩口落水洞处 Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^- 浓度均值分别为 97、11.37 和 242 $mg\cdot L^{-1}$(表 1),而姜家泉的浓度均值分别为 117、15.23 和 321 $mg\cdot L^{-1}$(表 1),后者比前者分别高了 20.6%、33.9% 和 32.6%.说明由于基岩的溶解,地下水中这些与碳酸盐岩溶解有关的离子在地下水的运动过程中,不断接受围岩溶解的成分而富集.另外,从图 2 中可以看出,Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度在夏季相对较低,主要受季风气候的影响,受雨水的稀释作用表现得尤为明显[22].

表 1 水物理化学统计信息1)

Table 1 Statistics of physical and chemical data

指标	地表水(岩口落水洞)			地下水(姜家泉)		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
pH 值	7.84	7.14	7.49	7.05	7.72	7.33
水温	7.3	26.3	18.1	15.4	20.1	18.5
K^+	1.65	13.29	6.23	1.42	4.94	3.64
Na^+	2.20	15.10	7.00	1.42	5.92	4.03
Ca^{2+}	43	129	97	80	142	117
Mg^{2+}	7.63	14.74	11.37	11.15	19.04	15.23
HCO_3^-	140	336	242	195	372	321
SO_4^{2-}	25.35	114.07	54.31	9.83	121.12	40.90
NO_3^-	1.10	16.73	3.69	15.84	43.77	22.29
Cl^-	1.14	10.82	6.34	0.33	27.07	9.46
电导率	619	337	493	775	444	612

1)单位:电导率:$\mu S\cdot cm^{-1}$,水温:℃,其他离子和元素:$mg\cdot L^{-1}$

SO_4^{2-}:岩口落水洞处 SO_4^{2-} 的浓度比姜家泉高(图 2),二者的均值分别为 54.31 $mg\cdot L^{-1}$ 和 40.9 $mg\cdot L^{-1}$(表 1).其主要是原因可能是岩口落水洞上游甘家槽洼地两侧须家河组地层中分布着一些废弃的煤洞,且其地下水(SO_4^{2-} 浓度 > 200 $mg\cdot L^{-1}$)源源不断地补岩口落水洞的地表水.

NO_3^-:姜家泉和岩口落水洞处分别为 22.5 $mg\cdot L^{-1}$ 和 3.85 $mg\cdot L^{-1}$(表 1),前者约为后者的 6 倍,说明地下水在运移的过程中不断富集,其可能的来源是沿途不断接受农业施肥、土壤硝化作用产生的 NO_3^- 随土壤水下渗进入地下河,并指示地下河水可能受到一定程度的硝酸盐污染[23].

Cl^-:岩口落水洞处、姜家泉的浓度变化趋势基本一致,但总体上前者比后者低(图 2),其均值分别为 6.34 $mg\cdot L^{-1}$ 和 9.46 $mg\cdot L^{-1}$(表 1),说明地下水在运移的过程中不断富集.

电导率:是衡量水体导电性的综合指标,是水体中电解质数量的表征,电解质愈多,往往电导率越高,反之亦然.姜家泉的电导率高于岩口落水洞处(图 2),二者均值分别为 612 $\mu S\cdot cm^{-1}$ 和 493 $\mu S\cdot cm^{-1}$(表 1).这主要是因为地下水在含水层运移的过程中,溶解了大量围岩中的碳酸盐岩可溶性组分,同时接受含有地表农业活动产生的高浓度营养成分扩散流的补给.受夏天雨水的稀释作用的影响,岩口落水洞和姜家泉 6、7 月的值较低,冬春季较高(图 2).

3.2.2 δD 和 $\delta^{18}O$ 值的对比分析

Craig[13] 通过研究发现大气降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 之间存在密切的线性关系,全球平均大气降水线的方程为 $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$,被称为全球大气降水线.全球各地大气降水氢氧同位素组成的线性关系因各自然环境及气候条件的不同,而表现出不同的斜率和截距.郑淑蕙等[14] 于 1983 年给出了中国现代大气降水线方程为 $\delta D = 7.9\delta^{18}O + 8.2$,随后有学者研究了不同地区的大气降水氢氧同位素的关系[16,17].

研究区地表水 $\delta^{18}O$ 值的变化范围在 −3.23‰

~ −6.61‰，平均值为 −4.65‰，δD 值的变化范围在 −19.26‰ ~ −41.60‰，平均值为 −30.57‰. δD 和 $\delta^{18}O$ 值主要集中于重庆大气降水线（$\delta D = 8.3\delta^{18}O + 15.46$）[11] 的右下方，其拟合而成的线性方程为 $\delta D = 5.63\delta^{18}O - 4.41$ 的直线（蒸发线），相关系数 $r = 0.92$（图 3）. 这主要是由于蒸发作用所致，特别是 2007 年 10 月后（旱季）的数据，这表明地表水经历了不同程度的蒸发. 另外从图 3 可以看出，δD、$\delta^{18}O$ 值从 8 月至次年 1 月逐渐变大，表明在旱季由于地表水很少有雨水补给，水体未得以快速更新，导致地表水停留久，其水体大量蒸发，进而引起地表水的 δD 与 $\delta^{18}O$ 同位素的季节效应非常明显.

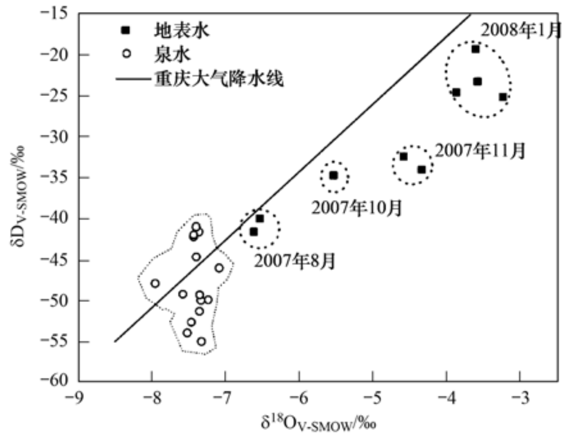


图 3　地表水、地下水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 值的关系

Fig. 3　δD and $\delta^{18}O$ of surface water vs. groundwater

而地下水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值相对于地表水较稳定，δD 值的变化范围在 −46.08‰ ~ −49.86‰，平均值为 −48.13‰，$\delta^{18}O$ 值的变化范围在 −7.08‰ ~ −7.95‰，平均值为 −7.41‰. $\delta^{18}O$ 和 δD 值大致落在重庆大气降水线的两侧（图 3），表明地下水基本未发生蒸发或发生蒸发作用的强度较小. 另外，地下水的 $\delta^{18}O$ 和 δD 值比地表水明显偏负（图 3），表明地下水接受强烈蒸发作用后的地表水的补给较少. 结合流量衰减法[19] 和示踪试验[20] 的结果，可以推断出研究区地下水主要存在两种主要的补给方式：一是降雨形成的地表径流快速通过落水洞灌入地下河，二是雨水快速通过土壤层渗入岩溶非饱和带的裂隙中，以扩散流的形式补给地下河，而很少接受滞留地表较长时间的地表水补给.

4　结论

（1）研究区存在丰水期和枯水期两个水文阶段，地下河系统含水介质的特征决定了地下河流量对降雨的响应具有及时、迅速的特点.

（2）地下水中化学组分在岩溶含水层运移的过程中受水岩作用、人类活动和雨水稀释作用的共同影响. 与碳酸盐岩溶解有关的离子表现出两种效应：一是在岩溶管道的运移过程中，不断地接受围岩溶解的成分而富集，二是在雨季叠加了稀释效应；K^+、Na^+ 和 SO_4^{2-} 在岩溶管道地下水的运移过程逐步被稀释；NO_3^- 和 Cl^- 在地下水运移的过程中不断富集.

（3）地表水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分布于重庆当地大气降水线的右下方，表明地表水蒸发作用强烈，且旱季地表水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 值比雨季明显偏正，存在明显的季节效应；地下水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分布于重庆当地大气降水线的两侧，且比地表水明显偏负，表明地下水基本未接受经过强烈蒸发的地表水的补给，而主要是来自降雨快速通过落水洞集中灌入及岩溶非饱和带扩散流的补给.

参考文献：

[1] 朱永琴，彭先孚. 重庆市岩溶地下水的开发与利用[J]. 中国岩溶，2000，**19**(2)：147-151.

[2] 蒲俊兵，袁道先，蒋勇军. 重庆市地下河的空间分布及水资源[J]. 水文地质工程地质，2009，**36**(2)：34-39.

[3] 李晓明. 袁道先院士研究表明：西南岩溶区地下水环境告急[N]. 科学时报，2009-2-19 A1.

[4] Yang P H, Yuan D X, Yuan W H, *et al.* Formations of groundwater hydrogeochemistry in a karst system during storm events as revealed by PCA[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, **55**(14): 1412-1422.

[5] 罗鉴银，杨平恒，袁道先，等. 岩溶洼地消水流量的推算——以重庆市青木关地下河甘家槽洼地为例[J]. 中国岩溶，2010，**29**(1)：70-74.

[6] Panagopoulos G. Application of MODFLOW for simulating groundwater flow in the Trifilia karst aquifer, Greece[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, **67**(7): 1877-1889.

[7] Hess J W, White W B. Groundwater geochemistry of the carbonate karst aquifer, southcentral Kentucky, USA[J]. Applied Geochemistry, 1993, **8**(2): 189-204.

[8] Mohammadi Z, Raeisi E, Bakalowicz M. Evidence of karst from behaviour of the Asmari limestone aquifer at the Khersan 3 Dam site, southern Iran[J]. Hydrological Sciences Journal, 2007, **52**(1): 206-220.

[9] Long D T, Voice T C, Niagolova N D, *et al.* Effects of human activities on karst groundwater geochemistry in a rural area in the Balkans[J]. Applied Geochemistry, 2012, **27**(10): 1920-1931.

[10] Araguás L, Froehlich K, Rozanski K. Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture[J]. Hydrological Processes, 2000, **14**(8): 1341-1355.

[11] 李廷勇，李红春，沈川洲，等. 2006 ~ 2008 年重庆大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 特征初步分析[J]. 水科学进展，2010，**21**(6)：757-764.

[12] Dutton A, Wilkinson B H, Welker J M, *et al.* Spatial distribution and seasonal variation in $^{18}O/^{16}O$ of modern precipitation and river water across the conterminous USA[J]. Hydrological Processes, 2005, **19**(20)：4121-4146.

[13] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, **133**(3465)：1702-1703.

[14] 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，**28**(13)：801-806.

[15] 于津生，虞福基，刘德平. 中国东部大气降水氢、氧同位素组成[J]. 地球化学，1987，(1)：22-26.

[16] 刘东生，陈正明，罗可文. 桂林地区大气降水的氢氧同位素研究[J]. 中国岩溶，1987，**6**(3)：225-231.

[17] 章新平，姚檀栋. 我国江水中的 $\delta^{18}O$ 的分布特点[J]. 地理学报，1998，**53**(4)：356-363.

[18] 杨平恒，罗鉴银，彭稳，等. 在线技术在岩溶地下水示踪试验中的应用——以青木关地下河系统岩口落水洞至姜家泉段为例[J]. 中国岩溶，2008，**27**(3)：215-220.

[19] 杨平恒. 重庆青木关地下河系统的水文地球化学特征及悬浮颗粒物运移规律[D]. 重庆：西南大学，2010.

[20] 扈志勇. 不同降雨过程下岩溶水文系统信息的响应研究——以重庆青木关岩溶槽谷为例[D]. 重庆：西南大学，2010.

[21] GB/T 8538-2008，饮用天然矿泉水检测方法[S].

[22] Liu Z H, Li Q, Sun H L, *et al.* Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China：soil CO_2 and dilution effects [J]. Journal of Hydrology, 2007, **337**(1-2)：207-223.

[23] 杨平恒，袁道先，任幼蓉，等. 川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中 NO_3^- 的存储和运移[J]. 环境科学，2012，**33**(9)：3124-3131.

HUANJING KEXUE Vol. 35 No. 4
Environmental Science (monthly) Apr. 15, 2014

CONTENTS

（HUANJING KEXUE）
（月刊　1976 年 8 月创刊）
2014 年 4 月 15 日　35 卷　第 4 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE
（Monthly　Started in 1976）
Vol. 35　No. 4　Apr. 15, 2014

主　管	中国科学院	**Superintended**	by	Chinese Academy of Sciences
主　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored**	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	**Co-Sponsored**	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　编	欧阳自远	**Editor-in -Chief**		OUYANG Zi-yuan
编　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号,邮政编码:100085) 电话:010-62941102,010-62849343 传真:010-62849343 E-mail:hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn	**Edited**	by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102,010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail:hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出　版	科学出版社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	**Published**	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	**Printed**	by	Beijing Bei Lin Printing House
发　行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail:journal@mail.sciencep.com	**Distributed**	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail:journal@mail.sciencep.com
订购处	全国各地邮电局	**Domestic**		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 （北京 399 信箱）	**Foreign**		China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN　0250-3301 / CN　11-1895/X　　国内邮发代号：2-821

国内定价：90.00 元　　国外发行代号：M 205

国内外公开发行