第 34 卷 第 5 期	中 国 岩 溶	Vol. 34 No. 5
2015 年 10 月	CARSOLOGICA SINICA	Oct. 2015

黄华诚,刘宏.昆明市黑龙潭岩溶泉氢氧稳定同位素分析[J].中国岩溶,2015,34(5):445-451. DOI:10.11932/karst20150504

昆明市黑龙潭岩溶泉氢氧稳定同位素分析

黄华诚1,刘宏1,2

(1.云南大学资源环境与地球科学学院,云南 昆明 650091;
2.云南大学国际喀斯特联合研究中心,云南 昆明 650223)

摘 要:黑龙潭位于昆明市北缘的五老山山麓,沿黑龙潭东支断裂带出露地表,该区分布三个岩溶泉,分别是: 清水潭、浑水潭、小水潭,文章运用氢氧稳定同位素方法对它们进行连续的观测研究。通过对大气降水和泉水 氢氧稳定同位素特征进行分析,揭示研究区岩溶泉水的来源及泉域含水层特征。得出以下结论:(1)通过大气 降水 δ¹⁸O - δD 关系建立当地大气降水线,大气降水线和泉水的稳定同位素分析表明泉水来源于大气降水, 而且主要来源于夏季降水。(2)高斯混合模型分析结果表明,清水潭的补给不仅来源于野猫山地区,还包括径 流过程中的入渗补给,而且入渗补给量并不小。浑水潭旱雨两季补给类型有所区别。小水潭除受北部二叠系 灰岩含水层补给之外,很有可能也受东北部玄武岩山地的孔洞裂隙水补给。

关键词:黑龙潭;岩溶泉;氢氧稳定同位素;高斯混合模型

中图分类号:P641.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-4810(2015)05-0445-07

0 引 言

岩溶水文系统的复杂性给岩溶地区的水资源调 查研究带来困难,加强对岩溶泉水来源及泉域含水层 特征的研究有利于深入认识岩溶水文系统。该领域 常传统的分析方法包括泉水流量过程线划分、泉水对 降水响应分析、利用荧光染料开展示踪试验并进行穿 透曲线分析^[1]等。环境同位素方法是目前应用于水 循环研究的一种重要手段。水体中的氢氧稳定同位 素因其是水分子组构成部分,最能代表水样特性,因 此,在研究地下水来源及含水层特征的过程中,利用 氢氧同位素含量变化开展研究是比较具有说服力的。

利用氢氧稳定同位素方法对岩溶泉开展的研究 主要集中在以下几个方面;含水层水体运移概念模型 的建立^[2-3];含水层补给过程研究^[4-7];各源水混合 方式^[2,9-10];确定补给区平均海拔^[11-13];识别岩溶泉 水的来源及污染来源[14-16]。

Jerome Perrin et al. 在瑞士 Milandre 利用流量、 降水和泉水同位素数据(包括三次洪水事件期间的同 位素数据)建立地下水体运移模型,并表明土壤和表 层岩溶带具有良好的蓄水能力^[17]。李玄等通过对重 庆芙蓉洞附近气象要素以及泉水、洞内滴水进行监 测,发现洞内滴水主要源于大气降水,并表明洞穴上 覆基岩的厚度和包气带含水层对洞内滴水的同位素 变化影响巨大^[17]。D. mance et al. 利用时间序列分 析的单变量方法和多变量方法来分析岩溶泉稳定同 位素序列,并以此研究含水层特征^[18]。另外,也有学 者基于氢氧稳定同位素特征,利用 NETPATH、 FLOWPC 等程序示踪地下水运移、计算岩溶系统中 多源水的混合比例以及地下水平均滞留时间^[20]。

本文对黑龙潭地区的降水和泉水稳定同位素特 征进行分析,以探求泉水来源及泉域含水层特征。该

基金项目:国家自然科学基金(41371040)

第一作者简介:黄华诚(1990-),男,云南大学自然地理专业硕士研究生,研究方向为喀斯特水文地质。E-mail:huachenghuang@yahoo.com。 通讯作者:刘宏(1963-),男,副研究员,主要从事喀斯特水文地质与洞穴研究。E-mail:447196215@qq.com。 收稿日期:2015-03-04

区曾开展过一些水文地质调查,但数学模型所需要的 水文参数仍不完整,数学统计方法常用在基于流量、 降水量、温度、电导率等水文参数的水文研究 中^[21-24],但未曾在岩溶地区基于时间序列的稳定同 位素数据进行分析研究,本研究应用数学统计方法对 稳定同位素数据进行解读分析。

1 研究区概况

本研究选择的岩溶泉位于昆明断陷盆地北缘,取 样点位置及研究区水文地质特征见图 1、2。黑龙潭 地区属北亚热带高原季风气候,主风向为西南风,降 雨充沛,但分配不均,干湿季分明,干湿比达 1:9。 每年 5 月至 10 月为湿季,10 月至次年 4 月为干季。 据昆明气象站多年平均年降水量为 1 027.70 mm。 本区的地貌形态主要受地质构造和地层岩性的控制, 为溶蚀地貌、垄脊山地与岩溶谷地、洼地相间的岩溶 低中山地貌。谷地中常常发育有洼地、漏斗和落水 洞。漏斗多呈盆形、碟形,底部有少量松散物充填,山 脊上溶槽、溶沟发育。

本区水文地质条件较为复杂,地下水主要受地层 岩性、地质构造和地貌条件控制,不同的地层岩性富 水性差异很大。区内有小水潭、清水潭、浑水潭三泉, 据水文地质调查^[25],清水潭是地层深部石炭系、二叠 系含水层的岩溶水通过黑龙潭东支断裂切割而涌出 地表的上升泉,它的主要补给区位于北部山区小哨一 野猫山一带,泉流量 82.78~365.5 L/s,年均流量 17 997.4m³/d,动态系数 4.4,很少出现浑水,水温较 高,一般在 18~20 °C,水质良好,水化学类型为 HCO₃ - CaMg型。浑水潭属于埋藏型岩溶水,岩溶 含水层有部分玄武岩裂隙水越流补给,储水和导水系 统埋藏比清水潭浅,径流循环深度浅于排泄基准面, 主要呈潜水性质,于山麓地形低洼处出露成泉^[26],泉 水流量小,枯季流量 3.75 L/s。小水潭与浑水潭相 连,流量非常小。

2 样品采集和分析方法

在收集研究区相关资料和前人研究成果的基础 上,于2014年3月至2015年1月在研究区采集大气 降水和泉水样品,共采集降水样10个,泉水样105 个。泉水样品每周采集一次,分别采集清水潭、浑水 潭和小水潭水样,取样点尽量相互远离,用5 mL 采 样瓶采集5 mL 泉水,然后用封口胶密封并放置在阴 凉处保存。

在研究区放置自制降水样收集器收集降水样,自 制降水样收集器制作过程为:首先将漏斗插入热水瓶 的瓶口塞中,然后用瓶口塞塞住瓶口,并把乒乓球放 在漏斗中,以防止雨水蒸发。收集器收集的水样几乎 与外界完全隔离,避免了因蒸发机时影响同位素组 成,能较好地反映当地降水同位素组成状况。每月采 集一次降水样,用5 mL采样瓶采集5 mL雨水,然后 用封口胶密封并放置在阴凉处保存。取样期间未出 现降雪天气。

大气降水和泉水样品送至云南大学云南省地理 研究所喀斯特国际联合研究中心水分析实验室进行 分析测试。测试仪器为 TIWA-45EP 型 LGR 液态 水同位素分析仪。分析结果以相对于 V-SMOW 的 千分差表示,记作 δ:

$$\delta(\%) = \frac{R_{\text{measured}} - R_{V-\text{SMOW}}}{R_{V-\text{SMOW}}}$$

其中 R 为² H/¹ H 或者¹⁸ O/¹⁶ O, V-SMOW 为维也 纳标准平均大洋水。 δ^{18} O 和 δ^{2} H 值测试精度分别为 ±0.1‰和±0.2‰。

3 结果和讨论

3.1 氢氧稳定同位素测定结果分析

利用大气降水样品的 δ¹⁸ O 和 δD 确定研究区的 当地大气水线(LMWL 为:

 $\delta D = 7.63\delta^{18} O + 2.08(R^2 = 0.97)$

这与章新平等^[28]所得昆明市大气水线比较相似 (δD=7.34δ¹⁸O+2.56),与柳鉴容等^[28]计算的我国 整个东部季风区的大气水线相似(δD=7.34δ¹⁸O+ 4.18),而与全球大气水线以及我国大气水线(δD= 7.9δ¹⁸O+8.2)相比,研究区的大气水线斜率和截距 都更小,这与凝结物在未饱和大气中降落时重同位素 的蒸发富集作用有关。一般情况下,大气越干热,蒸 发作用越强烈,大气水线的斜率也就越小,大气水线 的截距也越小。由此可知研究区气候相对全球和全 国平均状况较干热,降水过程中受二次蒸发影响较 大。

泉水样 δ^{18} O 和 δ D 值的相关系数很大 ($R^2 = 0.97$),因此只需分析泉水样品的 δ^{18} O 值。各泉 δ^{18} O 值如图 3 所示。



图1 黑龙潭泉域水文地质图

(小图为清水潭、浑水潭、小水潭相对位置示意图;蓝线为地表分水岭;绿线区域为水文地质报告所划定清水潭补给范围) Fig. 1 The hydrogeological map of Heilongtan spring basin



图 2 清水潭岩溶泉域剖面示意图(据云南省环境地质监测院) Fig. 2 The diagrammatic cross-section of Qingshuitan karst spring basin



图 3 各泉 δ^{18} O 值 Fig. 3 The δ^{18} O value of the spring water

图 3 表明,清水潭 δ¹⁸ O 值变化范围为-12.60‰ ~-11.64‰,平均值为-12.17‰,其中雨季平均值 为-12.20‰,旱季平均值为-12.15‰;浑水潭 δ¹⁸ O 值变化范围为-12.22‰~-10.81‰,平均值为-11.69‰,其中雨季平均值为-11.62‰,旱季平均值 为-11.74‰;小水潭 δ¹⁸ O 值变化范围为-12.19‰ ~-11.27‰,平均值为-11.80‰,其中雨季平均值 为-11.86‰,旱季平均值为-11.75‰。

各泉水氧同位素最大值和最小值均分别出现在 旱季和雨季,总体上表现出与降水氧同位素特征相同 的雨季偏轻、旱季偏重的趋势,说明泉水受降水水汽 源地季节性差异的影响。但也有例外,比如清水潭雨 季平均值比旱季平均值大,而且泉水同位素值变化幅 度比大气降水小很多,这说明泉域含水层对水体氢氧 同位素特征具有调节作用。

从图 3 可以发现三泉水氢氧同位素年变化规律 十分相似,尤其是小水潭和浑水潭,这可能是由于各 泉之间有水道相连,导致泉水之间相互影响。像各泉 水化学参数存在差异一样,它们的氢氧同位素组成也 存在明显差异。清水潭同位素值普遍比浑水潭和小 水潭小,说明其重同位素贫化,这可能是由于清水潭 面积较小,而且水深更深,导致其蒸发量较小。而浑 水潭面积较大,潭水深度较小,水温较高,相对蒸发量 较大,重同位素更易富集。需要指出的是,这些因素 不足以造成三泉水之间同位素组成所表现出的差异, 各泉的补给来源及补给方式才是问题的根本。

将三泉水氢氧同位素值投影到 δ¹⁸O-δD 图上 (图 4),三泉水的同位素值均落在研究区的大气水线 附近,说明各泉的补给来源相同,均为大气降水补给。 泉水同位素比大部分降水同位素值的位置低,而夏季 降水的同位素值也大多位于左下方,这说明含水层的 补给主要来自夏季降水。结合前述雨季大气水线和 旱季大气水线,作者发现泉水同位素值均沿雨季大气 水线分布,说明泉水的补给主要来自夏季降水。

一般情况下,由于岩溶含水层具有较高的水力联 系,地下水能够快速响应外界降雨,故雨季泉水的同 位素值一般沿当地大气水线分布。而旱季降雨较少, 地下水系统受储存在岩溶裂隙、孔隙中的地下水体补 给,且旱季时地下水在岩溶含水层中的运动较雨季时 慢,因此在岩溶含水层中水-岩-气作用时间较长, 造成泉水同位素值偏离当地大气水线。但本研究区 各泉旱季的同位素值同样沿当地大气水线分布,说明 地下水体的渡越时间相对较短,在旱季它们同样也能 够较快速地响应外界降变化。





水文地质研究中,若已经确定地下水是由大气降 水补给的,就可进一步确定补给区的位置范围。大气 降水的氢氧同位素组成具有高程效应。所谓高程效 应是指地形起伏比较大的地区,大气降水中 ôD 和 δ¹⁸O 随着地面高程的增加而逐渐降低的现象。正因 为这种效应,使得同位素水文地质研究中,常常借助 于研究区内大气内降水的同位素高程效应,推测地下 水补给区位置高度^[30]。计算公式如下:

$$H = \frac{\delta_G - \delta_P}{\mathrm{K}} + h$$

式中:H为同位素入渗高度(m); δ_G 为泉水 δ^{18} O 或

δD;δ_P 为取样点附近大气降水 δ¹⁸ O 或 δD;K 为大气 降水 δ¹⁸ O 或 δD 值得高度梯度(-δ/100m);h 为取 样点高程(m)。本次研究未对研究区进行不同高程 的大气降水同位素样品采集,也末收集到前人在本区 针对高程效应的研究资料,故无法获取高度梯度 (K)。但由于各泉相对位置非常接近,故基于各泉水 与大气降水的同位素,可以对各泉补给高程作出对 比。综合所测数据,发现清水潭的补给高程最大,而 小水潭和浑水潭的补给高程十分接近。

3.2 高斯混合模型分析

高斯混合模型的目的是获取基于平均值、标准差 和权重的各高斯模型,以实现对初始数据的聚类。泉 水中 δ¹⁸O的概率密度可进一步认识泉水的来源以及 泉域含水层岩溶发育程度。假设概率密度表示系统中 不同水体 δ¹⁸O的聚合,单峰的概率密度曲线说明水体 来自单一属性的含水层,而多峰的概率密度曲线说明 水体来自不同属性的含水层,比如多孔基岩(基流)和 岩溶管道(管道流)。所得高斯模型的标准差较小,代 表单一水体补给(如基流或者单次降水事件),而较大 的标准差则表示其具有多重水体(如来自不同降水事 件的水体或者单次降水事件的不断累计)补给的特征。

图 5 可见,小水潭、清水潭和浑水潭双峰高斯混 合模型的拟合优度最佳(K-S检验 P>0.8)。其中 清水潭的 P1 峰和 P2 峰的标准差都较大(见表 1),数 据的离散度较大,表明系统拥有多源水补给特征。由 清水潭泉域的水文地质特征可知,其主要补给区位于 野猫山附近,从补给区到排泄区地下水体运移距离较 大,而且地下水径流路径上覆大面积二叠系玄武岩地 层,其具有一定的透水性,故推测清水潭的补给不仅 来源于野猫山地区,径流过程中的入渗对其也有影 响。从 P2 峰的权重来看,入渗补给量并不少。





表 1 通过高斯混合模型获取的泉水δ¹⁸Ο值的参数估计

Table 1 Parameter estimates of the δ^{18} O values of spring water derived from Gaussian mixture modelling

泉	峰	平均值/‰	标准差/‰	权重
清水潭	P1	-11.94	0.29	0.67
	P2	-12.23	0.29	0.33
浑水潭	P1	-11.32	0.11	0.56
	P2	-12.23	0.24	0.44
小水潭	P1	-11.65	0.15	0.54
	P2	-11.93	0.22	0.46

浑水潭受东北部玄武岩山地的孔洞裂隙水补给, 于山麓地形低洼处出露并汇集而。其 P1 峰对应的 δ¹⁸O出现在旱季,相对应的标准差很小,与测量误差 值很接近,说明 P1 峰代表基流。P2 峰的δ¹⁸O值更 小,而且标准差大于 0.2‰,可能是雨季降水形成了 较快速的孔洞裂隙流,表明浑水潭旱雨两季补给类型 有所区别。从图 5、表 1 中可发现浑水潭和小水潭两 峰的平均值、标准差、权重都比较接近,故小水潭除受 北部二叠系灰岩含水层补给之外,可能也接受东北部 玄武岩山地的孔洞裂隙水补给。

4 结 论

(1)大气降水和泉水的氢氧稳定同位素分析表明,泉水主要来源于大气降水,而且夏季降水在含水 层补给中占主导地位。清水潭的补给高程最大,而小水潭和浑水潭的补给高程十分接近。

(2)利用高斯混合模型对泉水氧稳定同位素数据 开展进一步分析研究,结果表明清水潭的补给不仅来 源于野猫山地区,还包括径流过程中的入渗补给,而 且入渗补给量并不小。浑水潭旱雨两季补给类型有 所区别。小水潭除受北部二叠系灰岩含水层补给之 外,可能也受东北部玄武岩山地的孔洞裂隙水补给。

参考文献

- [1] Taylor C J, Greene E A. Hydrogeologic characterization and methods used in the investigation of karst hydrology[J]. Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water. USGS, Techniques and Methods, 2008; 4-D2.
- [2] Perrin J, Jeannin P Y, Zwahlen F. Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland[J]. Journal of Hydrology, 2003, 279(1): 106-124.

- [3] 戴爱德,袁道先,蔡五田,等.门限自回归模型在预测岩溶泉水 流量中的应用:桂林岩溶试验场[J].中国岩溶,1988,7(3):259 -264.
- [4] Kohfahl C, Sprenger C, Benavente Herrera J, et al. Recharge sources and hydrogeochemical evolution of groundwater in semiarid and karstic environments: a field study in the Granada Basin(SouthernSpain)[J]. Applied Geochemistry, 2008, 23(4), 846-862.
- [5] Vandenschrick G, VanWesemael B, Frot E, et al. Using stable isotope analysis(δD-δ¹⁸ O) to characterise the regional hydrology of the Sierra de Gador, southeast Spain[J]. Journal of Hydrology. 2002, 265(1):43-55.
- [6] 严小龙,陈喜,张志才,等.基于多元线性回归的表层岩溶泉流量 预测[J].中国岩溶,2012,31(2):154-159.
- [7] Long A J, Putnam LD. Linear model describing three components of flow in karst aquifers using ¹⁸O data[J]. Journal of Hydrology,2004,296(1):254-270.
- [8] Maloszewski P.Stichler W.Zuber A, et al. Identifying the flow systems in a karstic-fissured-porous aquifer, the Schneealpe, Austria, by modelling of environmental ¹⁸O and 3H isotopes[J]. Journal of Hydrology,2002,256(1):48-59.
- [9] Schwarz K, Barth J A C, Postigo-Rebollo C, et al. Mixing and transport of water in a karst catchment: a case study from precipitation via seepage to the spring. Hydrology&. Earth System Sciences& Discuccion, 2009, 13(3), 285-292.
- Barbieri M, Boschetti T, Petitta M, et al. Stable isotope (2H, ¹⁸O and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, Central Italy) [J]. Applied Geochemistry, 2005, 20 (11):2063-2081.
- [11] Charideh A, Rahman A. Environmental isotopic and hydrochemical study of water in the karst aquifer and submarine springs of the Syrian coast[J]. Hydrogeology Journal,2007,15 (2),351-364.
- Mandić, M, Boji ć, D, Roller-Lutz Z, et al. Note on the spring region of Gacka River(Croatia) [J]. Isotopes in Environmental & Health Studies, 2008, 44(2):201-208.
- [13] 于正良,杨平恒,谷海华,等.基于在线高分辨率示踪技术的岩 溶泉污染来源及含水介质特征分析:以重庆黔江区鱼泉坎为例 [J].中国岩溶,2014,33(4):498-503.
- [14] Andreo B, Liñán C, Carrasco F, et al. Influence of rainfall quantity on the isotopic composition (¹⁸ O and ² H) of water in mountainous areas. Application for groundwater research in the Yunquera-Nieves karst aquifers (S Spain)[J]. Applied Geochemistry, 2004, 19(4);561-574.
- [15] Einsiedl F, Maloszewski P, Stichler W, 2009. Multiple isotope approach to the determination of the natural attenuation potential of a high-alpine karst system[J]. Journal of Hydrology, 2009,365(1),113-121.
- [16] Perrin J, JeanninP Y, Zwahlen F. Implications of the spatial variability of infiltration-water chemistry for the investigation of a karst aquifer: a field study at Milandre test site, Swiss Jura[J]. Hydro-

geology Journal, 2003,11(6):673-686.

- [17] 李玄,王建力,李俊云,等. 重庆芙蓉洞上覆泉水一滴水的氢氧 稳定同位素变化研究[J]. 地下水, 2013, 35(2):8-12.
- [18] Mance D, Hunjak T, Lenac D, et al. Stable isotope analysis of the karst hydrological systems in the Bay of Kvarner (Croatia)
 [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2014, 90: 23-34.
- [19] Bailly-Comte V, Martin J B, Screaton E J. Time variant cross correlation to assess residence time of water and implication for hydraulics of a sink-rise karst system[J]. Water Resources Research, 2011, 47(5):143-158.
- [20] Benavente J, PulidoBosch A, Mangin A. Application of correlation and spectral procedures to the study of discharge in a karstic system (Eastern Spain)[J]. KarstWater Resources(Proceedings of the Ankara-Antalya Symposium), IAHSPubl, 1985, 161:67-75.
- [21] Panagopoulos G, Lambrakis N. The contribution of time series analysis to the study of the hydrodynamic characteristics of the

karst systems: application on two typical karst aquifers of Greece(Trifilia, AlmyrosCrete)[J]. Journal of Hydrolgy, 2006,329 (3-4), 368-376.

- [22] 詹炳善,王乃泰,郭风武. 郭庄岩溶泉形成规律及其流量随机 模拟[J]. 中国岩溶,1989,8(3):242-248.
- [23] 云南省地质矿产局.昆明市黑龙潭地区水文地质环境初步研究 报告[R].2002.
- [24] 王宇.滇东地区断陷盆地裸露-覆盖型岩溶水系统特征剖析: 以吴家营岩溶水系统为例[J].云南地质,1993,12(3):301-315.
- [25] 章新平,姚檀栋.我国降水中δ¹⁸O的分布特点[J].地理学报, 1998,53(4):356-364.
- [26] 柳鉴容, 宋献方, 袁国富,等. 中国东部季风区大气降水 8180 的特征及水汽来源[J]. 科学通报, 2009, (22):3521-3531.
- [27] 王恒纯.同位素水文地质概论[M]北京:地质出版社,1991,39 -57.

The hydrogen and oxygen stable isotope analysis of the karst spring in Heilongtan

HUANG Hua-cheng¹, LIU Hong^{1,2}

School of Resource Environment and Earth Science , Yunnan University , Kunming , Yunnan , 650091;
Joint International Research Center of Karst , Yunnan University , Kunming , Yunnan , 650223)

Abstract Heilongtan areais located at foothill of Wulao Mountains in the northern suburb of Kunming City, emerges along east branch of Heilongtan Fault. There are three karst springs distributed in this area, i. e. Qingshuitan, Hunshuitan and Xiaoshuitan. In this paper, hydrogen and oxygen stable isotope method is used to analyze the samples of precipitation water and spring water periodically to investigate the origin of the springs and the characteristics of the aquifer in the area. The following conclusions have been made: 1) the isotope analysis of precipitation water and spring water shows that the spring is originated from precipitation, especially in summer; 2)Gaussian mixture model shows that the recharge of Qingshuitan is not only from the Yemao mountain, but also from runoff infiltration which is not minor in quantity. Recharge types are different in wet season and dry season for the Hunshuitan karst system. The Xiaoshuitan karst system receives recharge mainly from the northern Permian limestone aquifer, and sparingly from the fissure water from the northeastern basalt mountain.

Key words Heilongtan, karst spring, hydrogen and oxygen stable isotope, Gaussian mixing model

(编辑 张玲)