

垂直气候带岩溶动力系统特征研究

——以重庆金佛山国家级自然保护区为例

章 程^{1,2)} 蒋忠诚²⁾ 何师意²⁾ 蒋勇军¹⁾ 李林立¹⁾ 王建力¹⁾

1) 西南大学地理科学学院, 重庆, 400715;

2) 中国地质科学院岩溶地质研究所国土资源部岩溶动力学重点实验室, 广西桂林, 541004

摘 要 利用 CTDP300 多参数自动记录仪对重庆金佛山国家级自然保护区碧潭泉和水房泉的降雨量、水位、水温、pH 值、电导率进行了监测。结果表明, 不同海拔高度的表层岩溶泉水化学对环境变化十分敏感, 且具不同的表现形式, 气温和土壤 CO₂ 浓度是引起水化学动态变化的两个重要因子。位于海拔较低的碧潭泉气温, 土壤 CO₂ 浓度相对较高, 岩溶作用也相对强, 位于海拔较高的水房泉则相对较弱。受气温控制, 前者的水温、pH 表现出明显的白天高, 夜间低的昼夜变化规律。降雨过程中, 至少有两种效应在影响水化学性质: 雨水的稀释效应和 CO₂ 效应, 前者对碧潭泉水化学变化影响较大, 降雨可引起泉水电导率、水温及 pH 的显著下降, 降雨强度越大, 下降速度与幅度越大, 而从泉水电导率下降、pH 值略有上升看, 两者均对水房泉的水化学变化产生了影响。

关键词 岩溶动力系统 水化学变化 垂直气候分带 重庆金佛山

The Karst Dynamic System of Vertical Zoned Climate Region: A Case Study of the Jinfo Mountain State Nature Reserve in Chongqing

ZHANG Cheng^{1,2)} JIANG Zhongcheng²⁾ HE Shiyi²⁾ JIANG Yongjun¹⁾ LI Linli¹⁾ WANG Jianli¹⁾

1) School of Geographic Sciences, Southwest China University, Chongqing, 400715

2) Institute of Karst Geology, CAGS, Karst Dynamics Laboratory, MLR, Guilin, Guangxi, 541004

Abstract Using data loggers recording with 15 minutes resolution, the authors made high resolution measurements of such ground-water parameters as the stage, pH, conductivity, temperature, and hydrochemistry at two locations within the vertical zoned climate region of the Jinfo Mountain Nature Reserve in Chongqing. The Bitan spring 700m a. s. l. represents subtropic climate, while the Shuifang spring 2000m a. s. l. represents plateau temperate climate. The results show that hydrochemical parameters of epikarst springs at different altitudes seem very sensitive to environmental change and are mainly controlled by two factors: air temperature and soil CO₂ concentration. Lower altitude means higher air temperature and CO₂ concentration, thus more active karst processes. Water temperature and pH of the Bitan spring show a remarkable diurnal variation with high value in the day and low value at night. During flood pulse, there are at least two effects influencing hydrochemistry of groundwater: dilution effect and CO₂ effect. As a result, the pH of the Bitan spring drops while the conductivity falls. At the same time, the pH of the Shuifang spring rises, while the conductivity falls. These phenomena may indicate that the Bitan spring represents conduit-fissure flow and the Shuifang spring represents fissure media.

Key words karst dynamic system hydrochemical variation vertical zoned climate Jinfo Mountain in Chongqing

金佛山自然保护区位于四川盆地南缘川黔交接 地带, 重庆市东南边缘的南川县南部(图1), 属于大

本文由中国博士后科学基金项目(编号: 2005038473)、国家自然科学基金项目(编号: 40231008, 90202016)、国土资源部岩溶动力学重点实验室及西南大学地理科学学院博士点基金项目联合资助。

改回日期: 2006-09-05; 责任编辑: 刘志强。

第一作者简介: 章程, 1965 年生, 男, 博士, 研究员。现为西南大学地理科学学院博士后, 主要从事岩溶生态环境、水文地质与土地利用等方面的研究; 电话: 0773-5837343; 讯址: 541004, 广西桂林市七星路 50 号; E-mail: chzhang@karst.edu.cn。

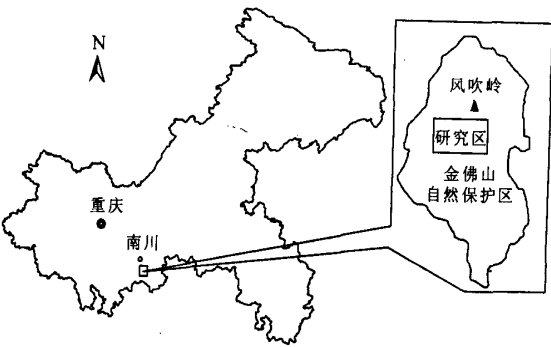


图 1 研究区地理位置图
Fig. 1 Location map of study area

娄山东段的一部分(钟章成, 1997)。地理座标北纬 $28^{\circ}50' \sim 29^{\circ}20'$, 东经 $107^{\circ}00' \sim 107^{\circ}20'$ 。保护区面积 441 km^2 。主峰风吹岭海拔 2251 m , 是大娄山脉的最高峰, 山势高峻、切割强烈、多陡崖峡谷。金佛山在地质构造上处在一宽缓向斜的轴部。山体上部由二叠纪栖霞组灰岩构成, 形成了海拔 2000 m 左右的较大面积的缓坡与平台, 溶蚀洼地、大型溶洞发育; 山体中部由志留纪的页岩、粉砂岩构成, 出露标高为 $1000 \sim 1500 \text{ m}$; 山体下部由寒武纪、奥陶纪的石灰岩、白云岩构成, 小型、微型岩溶形态发育, 钙华沉积大面积出露。金佛山属亚热带湿润季风性气候区, 夏暖冬凉、湿润多雨、少日多雾。山体上部多年平均气温为 8.2°C , 降雨量 1434.5 mm , 山体下部平均气温为 16.6°C , 降雨量 1286.5 mm 。由于垂直高度的变化, 金佛山气候带的垂直分异明显, 从山脚到山顶温度差可达 $8 \sim 9^{\circ}\text{C}$ 。土壤和植物分布也具有明显的垂直分带性。从山脚向山顶土壤依次为黄壤、暗棕壤、黄棕壤、棕壤, 植物依次为偏湿性常绿阔叶林带、偏暖性针叶林带、偏暖性针阔叶混交林带及

落叶常绿阔叶、竹类偏寒湿林带。

本文利用 CTD300 多参数自动记录传感仪对不同高度发育的岩溶泉的降雨量、水温、水位、pH、电导率进行了监测, 研究其动态变化规律及其对环境因子变化的响应过程、降雨效应等, 探索垂直气候带岩溶动力系统的地球化学行为与控制因素。

1 研究方法

选择两个不同高度的岩溶泉点: 碧潭泉和黄草坪水房泉, 其中碧潭泉海拔 700 m , 黄草坪水房泉海拔 2000 m 。前者代表山体下部亚热带岩溶生态环境(袁道先等, 1988), 岩性为寒武系上统毛田组灰质白云岩, 地貌属典型的低山峡谷岩溶地貌, 土壤厚度 $50 \sim 80 \text{ cm}$, 植被主要次生灌丛, 覆盖度 70% 左右, 水热与植被条件较好, 岩溶作用较强; 后者代表高原面上温带岩溶生态环境(袁道先等, 1988), 岩性为二叠系灰岩, 由于海拔高、气温低, 现代岩溶发育强度低于山体下部(曾艳等, 2002)。

采用德国产 CTD300 多参数传感仪自动记录泉水的降雨量、水温、水位、pH 值、电导率, 时间间隔设置为 15 min 记录一组数据, 按月将观测数据导入笔记本电脑, 用于室内作图分析; 采用钙离子和碱度测试合 (Aquamerck, 德国) 现场分别测定泉水的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 离子浓度; 水样测试分析由中国地质科学院岩溶地质研究所实验室完成。

2 监测结果与分析

2.1 泉水的水化学特征

表 1 为碧潭泉与水房泉的水化学指标及其与广西马山县弄拉兰电堂泉的对比。

从表 1 可以看出, 水化学成分主要受岩性和温度控制, 发育于白云岩地层的碧潭泉, 水中 Mg^{2+} 含量高, 水温高, HCO_3^- 、总硬度和电导率也高, 而 Ca^{2+}

表 1 碧潭泉与水房泉泉水的水化学指标对比($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Table 1 Comparison of hydrochemical indices between Bitan Spring and Shuifang Spring ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

地 点	取样时间	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	总硬度	pH
碧潭泉	2003.9.2	0.51	0.01	38.47	21.90	3.53	11.29	199.16	186.25	7.82
碧潭泉	2003.11.18	0.47	0.16	46.05	15.81	5.30	13.54	183.59	180.11	8.27
水房泉	2003.9.3	0.26	1.11	44.75	1.43	6.18	5.64	129.28	117.63	7.82
水房泉	2003.11.19	0.37	0.80	39.97	1.58	5.30	5.21	116.65	106.33	7.79
兰电堂泉	2004.1.20	0.00	0.68	60.18	34.22	5.06	6.76	349.94	291.20	7.41

含量则相差不多。与同为亚热带白云岩区年均气温为 20℃ 的兰电堂表层岩溶泉相比(章程等,2003),水化学指标含量仍较低,进一步证实温度对岩溶作用强度有重要的影响。监测数据也说明了这一点(表 2)。

2.2 泉水物理化学指标动态变化规律

图 2 是 5 月 13 日到 23 日碧潭泉的动态监测结果。15 日夜间有一个强降雨过程,累计降雨量达 37.5 mm。

从图 2 可以看出降雨开始,水温、pH 与电导率同步快速下降,而水位则快速上升,说明这一阶段泉水的水化学主要受雨水的稀释作用控制(刘再华等,2003)。降雨停止后,水化学指标逐渐回升。在无雨条件下(18 日后),水温在回升的同时出现明显的昼夜变化,白天高,夜间低,pH 值也呈现同样的变化规

律,说明这一阶段水温和 pH 主要受气温控制,电导率则无明显的昼夜变化规律。

2.3 降雨效应

图 3 是 2004 年 6 月碧潭泉动态监测结果。从 5 月 30 日至 6 月 26 日,共捕捉到 5 场强降雨过程(表 3),最大日降雨量达 98 mm,而且主要降雨量均集中在夜间,据资料统计,重庆市夜间降雨量占全年降雨量的 60%~70%,监测结果也证明了这一点。降雨过程开始,水位快速上升,达 1.6 cm,反映出表层岩溶带裂隙较发育,降雨能较快地补给泉水;而电导率、水温、pH 均快速下降,而且降雨强度越大,下降速度越快,下降值越大(图 4),说明雨水的稀释作用(刘再华等,2003)明显。其后水化学各项指标逐渐回升,CO₂ 效应逐渐占主导地位,但与广西桂林试验场(蒋忠诚,2000;何师意等,1997;潘根兴等,

表 2 碧潭泉与水房泉泉水的主要监测指标统计结果
Table. 2 Comparison of monitoring data between Bitan Spring and Shuifang Spring

	Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	HCO ₃ ⁻ /mol·L ⁻¹	pH	电导率 /μs·cm ⁻¹	水温 /℃
碧潭泉	34~54	3.10~3.55	7.46~8.28	225.62~351.13	14.17~14.90
水房泉	20~50	1.50~2.10	7.35~7.93	106.10~154.00	9.54~10.53

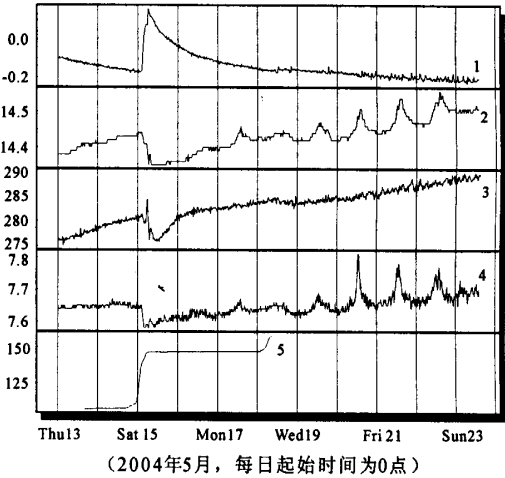


图 2 2004 年 5 月中旬碧潭泉的物理化学指标动态变化特征

Fig. 2 Variation of physical-chemistry of Bitan Spring (May 13 to 23, 2004)

1—水位/cm;2—水温/℃;3—电导率/μs·cm⁻¹;4—pH;
5—累计降雨量/mm
1—water level/cm;2—water temperature/℃;3—conductivity /μs·cm⁻¹;4—pH;5—precipitation/mm

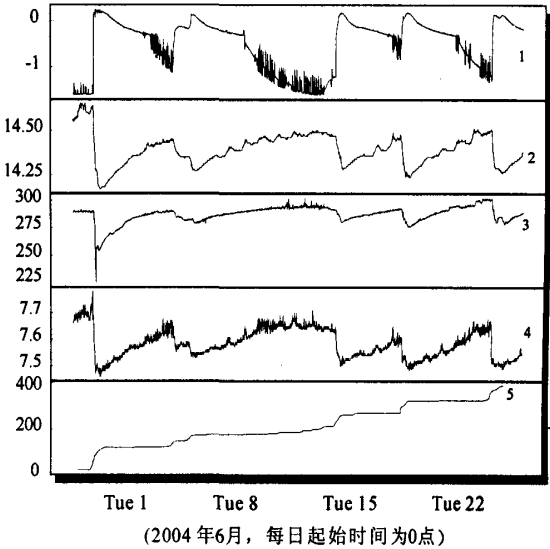


图 3 2004 年 6 月碧潭泉的物理化学指标动态变化特征
Fig. 3 Variation of physical-chemistry of Bitan Spring (June, 2004)

1—水位/cm;2—水温/℃;3—电导率/μs·cm⁻¹;4—pH;
5—累计降雨量/mm
1—water level/cm;2—water temperature/℃;3—conductivity /μs·cm⁻¹;4—pH;5—precipitation/mm

表 3 降雨强度与相应水化学指标的变化值

Table 3 Precipitation intensity and its corresponding varying value of hydrochemical index

日期	降雨强度 /mm·d ⁻¹	pH 下降值	水温下降值 /℃	电导率下降值 /μs·cm ⁻¹
2004.5.30	98.0	0.29	0.44	62.31
2004.6.4	22.5	0.09	0.08	4.34
2004.6.5	21.0	0.04	0.04	3.17
2006.6.18	48.0	0.12	0.20	15.44
2004.6.23	56.0	0.17	0.23	19.55

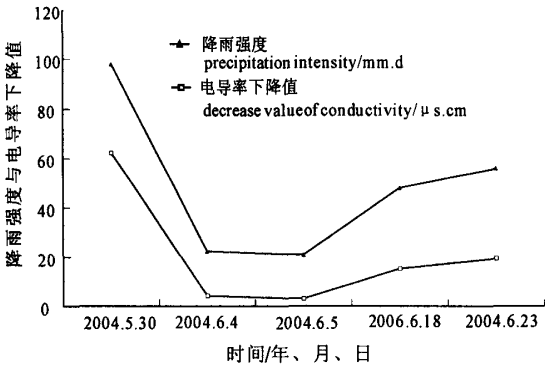


图 4 降雨强度与碧潭泉水电导率的下降值曲线

Fig. 4 Curve of decrease value of conductivity varying with precipitation intensity at Bitan Spring

2000)及马山县弄拉峰丛洼地区典型表层岩溶泉(章程,2003,2004;蒋忠诚等,1999)相比,其回升速度相对缓慢。一方面反映出表层岩溶带发育的差异;另一方面土壤及土壤 CO₂ 浓度也是影响其岩溶作用强度的一个重要制约因子。碧潭泉周围土壤厚度、表层土壤有机质、养分含量与弄拉相近(李为等,2004),但碧潭泉夏季土壤 CO₂ 浓度较低,只有 1500~5000×10⁻⁶(吴威等,2003),较低的气温影响了土壤活性。降雨渗入土壤,由于未能携带充分的土壤 CO₂ 补给,从而影响到岩溶作用的进行。水温对降雨的响应也与其他地区研究结果(章程等,2003;刘再华等,2003)不同,一般情况下,因夏季环境温度较高,降雨后泉水水温会有所上升,而碧潭泉正好相反。这可能与该地区多为夜雨有关。由于山区温差大,夜间气温低,加之降雨常伴随降温过程,导致雨水的温度低于水温,虽然水温的下降幅度并不大。

图 5 为 2004 年 6 月与 7 月初水房泉动态监测

结果。由于仪器故障,没能记录降雨数据,但从水化学指标变化看山顶的降雨基本与山脚同步,降雨期间,水房泉的电导率、水温变化基本与碧潭泉的变化一致,只是水位上升幅度较小,小于 0.2 cm,但 pH 值的变化规律则不同于碧潭泉,降雨开始时有快速上升现象,一定时间后又快速恢复到降雨前的水平,这可能与山顶表层岩溶带不发育,裂隙细小,加之气温低,雨水与土壤 CO₂ 含量均较小有关。据研究山顶土壤 CO₂ 浓度较低,为 1250~3400×10⁻⁶,土壤 CO₂ 释放量也较小,为 11.0~26.8 mg/m²·h(曾艳等,2002),低含量 CO₂ 高 pH 值的雨水补给含水层,导致水的 pH 值上升,因此对水房泉而言,降雨过程中稀释效应和 CO₂ 效应均对水化学的变化产生了影响。

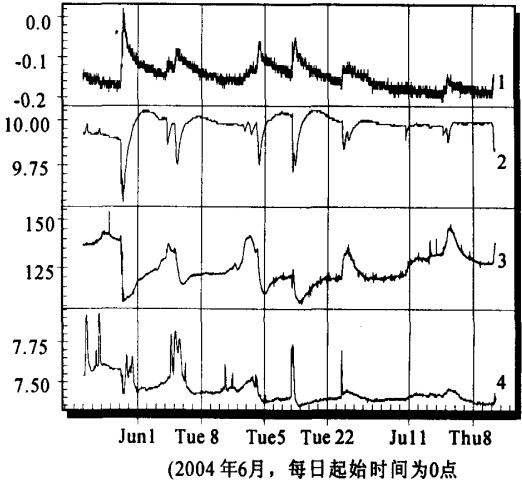


图 5 水房泉 2004 年 6 月物理化学指标动态变化

Fig. 5 Variation of physical-chemistry of Shuifang Spring (June and early July, 2004)

1—水位/cm;2—水温/℃;3—电导率/μs·cm⁻¹;4—pH
1—water level/cm;2—water temperature/℃;3—conductivity
/μs·cm⁻¹;4—pH

3 结论

高分辨率自动化记录监测结果表明,不同海拔高度的表层岩溶泉水化学对环境变化十分敏感,且具不同的表现形式,气温和土壤 CO₂ 是引起水化学动态变化的两个重要因子。气温高,土壤 CO₂ 浓度高,岩溶作用强,反之则弱。降雨过程中,至少有两种效应在影响水化学性质:雨水的稀释效应和 CO₂ 效应,水化学指标的变化一定程度上反映了含水介

质的性质。因此,在解释表层岩溶泉水的地球化学行为时,应把水—岩—CO₂ 作为一个整体来对待,才能获得正确的认识。

参考文献

- 何师意,徐胜友,张美良. 1997. 岩溶土壤中 CO₂ 浓度、水化学观测及其与岩溶作用的关系. 中国岩溶, 16(4): 319~324.
- 蒋忠诚. 2000. 中国南方表层岩溶系统的碳循环及其生态效应. 第四纪研究, 20(4): 316~321.
- 蒋忠诚,袁道先. 1999. 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义. 地球学报, 20(3): 302~308.
- 李为,余龙江,袁道先,吴云. 2004. 不同岩溶生态系统土壤及其细菌碳酸酐酶的活性分析及生态意义. 生态学报, 24(3): 438~443.
- 刘再华, Chris groves, 袁道先, Joe Meiman, 姜光辉, 何师意. 2003. 水—岩—气相互作用引起的水化学动态变化研究——以桂林岩溶试验场为例. 水文地质工程地质, 30(4): 13~18.
- 潘根兴,孙玉华,藤永忠,等. 2000. 湿润亚热带峰丛洼地岩溶土壤系统中碳分布及其转移. 应用生态学报, 11(1): 69~72.
- 吴威,况明生,魏秉铎,孙艳丽,张远颀. 2003. 亚热带灌丛岩溶区夏季土壤 CO₂ 浓度动态初探. 贵州师范大学学报(自然科学版), 21(2): 70~74.
- 袁道先,蔡桂鸿. 1988. 岩溶环境学. 重庆: 重庆出版社, 25~29.
- 曾艳,况明生,李林立,冯绍国. 2002. 重庆金佛山不同高度岩溶发育特征的差异研究. 贵州师范大学学报(自然科学版), 20(4): 9~12.
- 章程,曹建华. 2003. 不同植被条件下表层岩溶泉动态变化特征对比研究——以广西马山弄拉兰电堂和东旺泉为例. 中国岩溶, 22(1): 1~5.
- 章程,袁道先,曹建华等. 2004. 典型表层岩溶泉短尺度动态变化规律研究. 地球学报, 25(4): 467~471.
- 钟章成. 1997. 植物生态学研究进展. 重庆: 西南师范大学出版社, 452.

References

- He Shiyi, Xu Shengyou, Zhang Meiliang. 1997. CO₂ concentration, hydrochemical measurement in karst soil and their relationship with karst processes. Carsologica Sinica, 16(4): 319~324.

- Jiang Zhongcheng. 2000. Carbon cycle of epikarst system in southern China and its ecological effect. Quaternary Research, 20(4): 316~321.
- Jiang Zhongcheng, Yuan Daoxian. 1999. Karst dynamics characteristics of epikarst zone and its environmental and resources significances. Acta Geoscientica Sinica, 20(3): 302~308.
- Li Wei, Yu Longjian, Yuan Daoxian, Wu Yun. 2004. Researches on activity of carbonic anhydrase from soil and its bacteria in different Karst ecosystems and its ecological significance. Acta Ecologica Sinica, 24(3): 438~443.
- Liu Zaihua, Chris groves, Yuan Daoxian, Joe Meiman, Jiang Guanghui, He Shiyi. 2003. Study on hydrochemical variation caused by water-rock-CO₂ interaction—taking Guilin karst experiment site as an example. Hydrogeology and Engineering Geology, 30(4): 13~18.
- Pan Genxing, Sun Yuhua, Teng Yongzhong, et al. 2000. Soil carbon distribution in subtropic karst depression system and its transfer. Journal of Applied Ecology, 11(1): 69~72.
- Wu Wei, Kuang Mingsheng, Wei Bingduo, Sun Yanli, Zhang Yuanzhu. 2003. Preliminary study of CO₂ concentration in soil in shrub subtropical karst area. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 21(2): 70~74.
- Yuan Daoxian, Cai Guihong. 1988. Science of Karst Environment. Chongqing: Chongqing Publishing House, 25~29.
- Zeng Yan, Kuang Mingsheng, Li Linli, Feng Shaoguo. 2002. Differences in karst features at different altitudes in Jinfo mountain in Chongqing. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 20(4): 9~12.
- Zhang Cheng, Caojianhua. 2003. Seasonal and diurnal variation of physico-chemistry of typical epikarst springs under different vegetation—A case study of Landiantang spring and Dongwang spring at Nongla village, Mashan County, Guangxi. Carsologica Sinica, 22(1): 1~5.
- Zhang Cheng, Yuan Daoxian, Cao Jianhua et al. 2004. An analysis of short-term scale variation of the typical epikarst spring. Acta Geologica Sinica, 25(4): 467~471.
- Zhong Zhangcheng. 1997. Research progresses of botanical ecology. Chongqing: Publishing House of Southwest Normal University, 452.