

典型表层岩溶泉短时间尺度动态变化规律研究

章 程 袁道先 曹建华 蒋忠诚

中国地质科学院岩溶地质研究所,国土资源部岩溶动力学开放研究实验室,广西 桂林 541004

摘 要 本文以广西马山县弄拉岩溶动力系统监测站为例,通过人工及自动记录,分别对表层岩溶泉水的物理化学特征变化进行了研究。短时间尺度监测表明,岩溶动力系统对环境变化十分敏感,响应及时。在不同的气候条件下,水的物理化学特征多日与昼夜动态变化有不同的表现。在正常气候(无雨)条件下,水温的变化与气温变化基本一致,pH与电导率之间具有较好的负相关关系,电导率峰值区滞后最高温度约4~5 h。这可能与植被从光合作用向呼吸作用转变导致大气CO₂浓度产生较大的梯度变化有关。而这种梯度十分有利于岩溶作用的进行。暴雨期间,稀释作用可贯穿整个降雨过程,但降雨1~2 h后,表层岩溶带的高裂隙率和渗透性开始发挥作用,水动力作用和CO₂效应逐渐占主导地位,而稀释作用对弱降雨过程仅作用于降雨的开始阶段。因此有必要把水、岩、CO₂气体作为一个整体来解释表层岩溶作用的水文地球化学行为。

关键词 表层岩溶带 物理化学 短时间尺度 昼夜动态变化

An Analysis of Short-Term Scale Variation of the Typical Epikarst Spring

ZHANG Cheng YUAN Daoxian CAO Jianhua JIANG Zhongcheng

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

Abstract Nongla, a typical karst dynamic system monitoring site, is located at Nongla Village, Mashan County, Guangxi. The data from the site automatic records indicate that the karst dynamic system is highly sensitive to the environment. Multi-day and diurnal physico-chemical variations of epikarst spring water are quite different under different climatic conditions. In a normal day with no rainfall, water temperature and air temperature almost have the same variation. Conductivity has a good negative correlation with the pH value of the spring, and its peak zone lags behind the top temperature for about 4~5 hours. This is probably attributed to the gradient of CO₂ concentration in atmosphere caused by the conversion of vegetation from photosynthesis to respiration, which is helpful to the karst process. At the beginning of the rainstorm, physico-chemical variation of the spring is mainly controlled by the dilution effect and can last for the entire rainfall process. 1~2 hours later, however, hydrodynamic effect and CO₂ effect will occupy the dominant position due to the high fissure rate and permeability in the epikarst zone, whereas the dilution effect only acts in the earliest period of the light rain. So it is necessary to regard water, rock and CO₂ as a whole system in the explanation of hydrochemical behavior of the epikarst process.

Key words epikarst zone physico-chemistry short-term time scale diurnal variation

表层岩溶带常指地表或土壤层与深部块状可溶岩之间的一个过渡带,厚度一般为数米,它的形成主要受地球表层风化作用的影响。主要特征表现为岩石裂隙化程度高、岩溶发育强烈和渗透性与下部包气带有显著不同,因而形成一个独特的上部带内含水层(曹建华等,1999)。该含水层内的水既可以通

过表层岩溶泉排泄,也可以集中补给下部包气带内的大裂隙。由于其岩溶作用特殊、对环境变化敏感(如气候、土地利用等)(Andrzej,1996;Yuan Daoxian等,1998),又有特殊的资源环境效应(水资源水污染、碳循环等),表层岩溶带的研究日益受到重视(袁道先,2001;蒋忠诚,2000)。通过典型岩溶动力

本文由国家自然科学基金资助项目“我国西南岩溶生态系统的运行规律及石漠化趋势”(批准号:40152002)及广西基金资助项目“岩溶石山区土壤-植被系统的蓄水保土功能”(批准号:20010229)和科技部公益研究专项资助项目“不同地区岩溶动力系统监测”(编号:164),国土资源部2000重点科技项目“中国西南岩溶生态系统研究”(批准号:2000208)资助。

改回日期:2002-11-5,责任编辑:宫月萱。

第一作者 蒋忠诚,1965年生,副研究员,从事岩溶环境学研究,E-mail:zhzhang@karst.edu.cn。

系统的观测试验,不仅揭示了生物积极参与岩溶作用过程(王福星等,1993;曹建华等,1999),如岩面殖居生物(藻类、地衣等)可加速岩面碳循环,富集营养元素,为高等植物生长创造条件(Cao Jianhua等,1998),而且对全球变化研究的碳循环模型中把一切地质作用(含岩溶作用)列为长时间尺度作用提出质疑,其地球化学表现出明显的年变化、季节变化甚至日变化(刘再华等,2000;Yuan Daoxian,1998),如岩溶水元素的迁移量随土壤空气 CO_2 的季节差异而变化(蒋忠诚,1999;袁道先,1993,1999)。但由于岩溶作用地球化学行为本身的复杂性和受监测手段的限制,未能对其多日动态,尤其是不同气候条件下的日动态变化有更好的了解。本文以广西马山县弄拉岩溶动力系统监测站为例,通过人工记录(3~5 d 监测一次)及自动记录(MultiLine P3 pH/L 全自动 pH 计,每 15 min 记录一个数据),分别对表层岩溶泉水的物理化学季节和昼夜变化进行了研究。以探索短时间尺度的岩溶作用机理及其对环境变化的响应过程。

1 岩溶动力系统概况

弄拉岩溶动力系统监测站位于广西马山县古零镇境内,是典型的岩溶峰丛山区,洼地底部高程多在 330~410 m 之间,最高峰 787.7 m,相对高差 200~300 m。峰丛区边缘谷地高程 243~245 m,与当地侵蚀基准面相当。年内气温 8~30 $^{\circ}\text{C}$,年平均气温 20.0 $^{\circ}\text{C}$,年降雨量 1 756.6 mm(2001 年),主要岩石为泥盆系东岗岭组厚层泥硅质白云岩,岩层产状平缓。土壤层最大厚度 2 m,一般 0.5 m。土壤 CO_2 含量(土下 20 cm 为 $(4\ 500\sim17\ 000)\times10^{-6}$;土下 50 cm(近基岩面)为 $(8\ 000\sim35\ 000)\times10^{-6}$ 。岩石和土壤的微量元素含量丰富,植物矿质营养元素 Ca、Mg、K、Zn 等背景值较高。

区内表层岩溶泉-兰电堂泉位于植被恢复相对较好的次生林区,属于良性生态区和石漠化之间的过渡生态区,表层带厚度较大($>5\text{ m}$),裂隙发育,裂隙率高达 60%,岩溶动力作用强,与稀疏林区相比,兰电堂茂密森林区浅层土壤中 CO_2 浓度高出 $7\ 000\times10^{-6}$,泉水中钙镁离子浓度提高 29.9%和 57.6%(蒋忠诚,1999)。泉水补给全部来自大气降雨,降雨入渗系数达 0.7,由于地表植被和土壤覆盖情况良好,泉水水位和流量对降雨的调蓄作用较强,动态相对比较稳定,为常年不干的常流泉(图 1)。研究表层岩溶泉的地球化学行为不仅可以进一步揭

示岩溶动力学系统运行规律与石漠化与良性生态恢复机制的关系,也有助于加强对岩溶作用短时间尺度作用的认识,为全球变化研究(如 IGBP)的碳循环模型的修正提供科学依据。

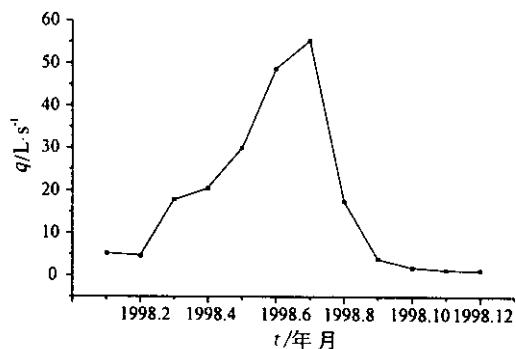


图 1 兰电堂泉水流量年际变化曲线(1998)

Fig. 1 Annual discharge diagram of Laniantang Spring, Nongla, Guangxi (1998)

2 泉水季节及昼夜动态变化

2.1 季节变化特征

泉水汇水区仅为两座山峰,面积较小($<1\text{ km}^2$),但长年不干,流量在 1.81~55.29 L/s 之间(图 1),对降雨响应及时(图 2);年平均水温 19.65 $^{\circ}\text{C}$,接近年均气温,但变幅较小,说明与外部环境-大气圈水圈密切相关。水中 Ca^{2+} 浓度为 64~92 mg/L, HCO_3^- 浓度为 5~7.9 mmol/L(图 3)。

从图 3 可以看出,随着雨季的来临,泉水钙离子含量逐渐增加,暴雨期间有一定的回落,但峰值区位于雨季结束后的一段时间内,滞后雨季约 2 个月。这可能与雨季的稀释效应有关,也与土壤 CO_2 进入水中溶解碳酸盐岩需要较长时间有关。冬季随着气温的显著降低,水温也下降,钙离子浓度又逐渐减小。

2.2 昼夜变化特征

2.2.1 正常气候条件 在正常气候(无雨)条件下,水温的变化与气温变化基本一致:白天高,夜间低,pH 与电导率之间具有较好的负相关关系,电导率下降,pH 值逐渐升高,但它们与水温之间并无明显的相关关系,水温的小幅度变化(1 $^{\circ}\text{C}$ 左右),可导致电导率的下降或上升,电导率高值区在夜间 9 点钟附近,滞后最高温度约 4~5 h。这可能与植被的从光合作用向呼吸作用转变有关。根据桂林岩溶洼地生态系统中大气 CO_2 动态监测结果(曹建华等,1999),白天植被光合作用强, CO_2 浓度下降,随着太阳西沉,温度下降,光合作用减弱, CO_2 浓度渐升,

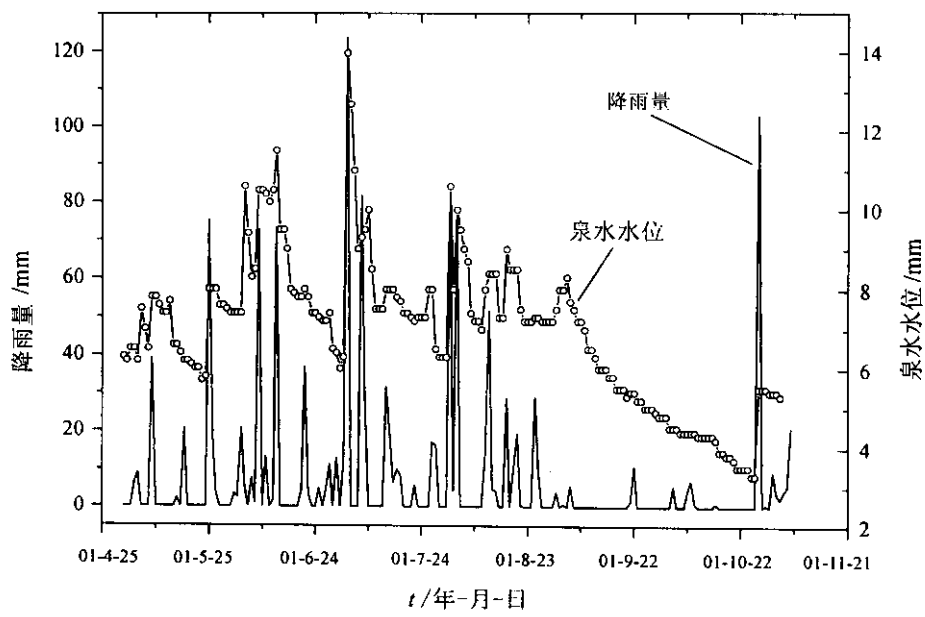


图 2 兰电堂泉水水位对降雨的响应变化过程曲线

Fig.2 Daily variability of precipitation and waterlevel of Landiantang Spring(2001.5.1~11.5)

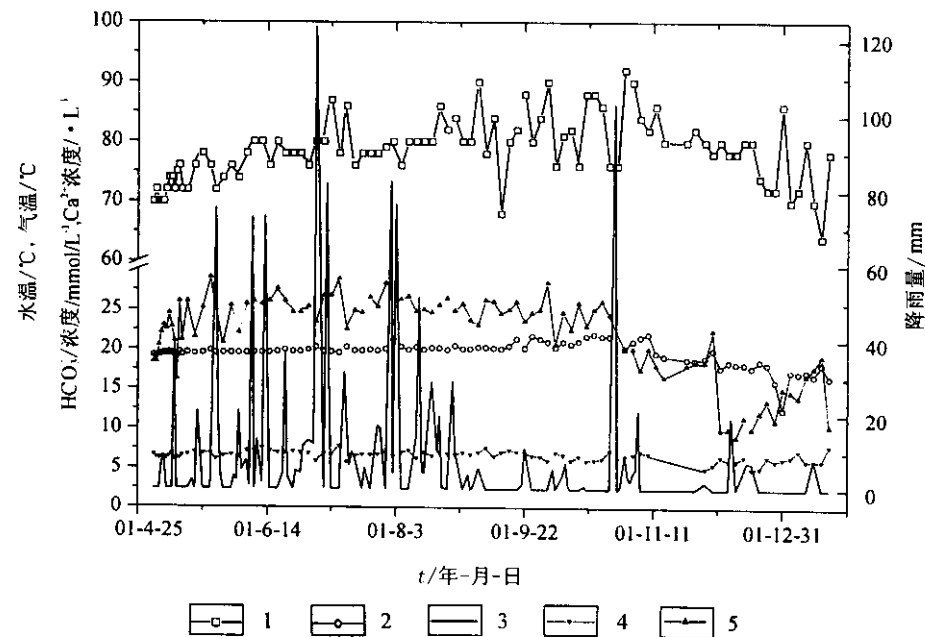


图 3 兰电堂泉水的物理化学指标季节变化特征及与降雨的关系

Fig.3 Seasonal variation of physical chemistry of Landiantang spring and its relationship with precipitation

1- Ca^{2+} 浓度 2-水温 3-降雨量 4- HCO_3^- 浓度 5-气温

1- Ca^{2+} content 2-water temperature 3-precipitation 4- HCO_3^- content 5-air temperature

并伴随夜晚植被呼吸作用使大气 CO_2 浓度进一步升高,这种 CO_2 浓度梯度的强烈变化十分有利于岩溶作用的进行(Yuan Daoxian 等,1998)这使得溶解的碳酸盐更多,从而导致水的电导率升高。

2.2.2 暴雨效应 图 5 是 2001 年 10 月 26 日至 27 日对兰电堂泉的昼夜动态监测结果,26 日下午 3 时开始下雨,夜间转大,至第二天上午累计降雨量达 103.2 mm。从图中可以看出泉水的地球化学行为

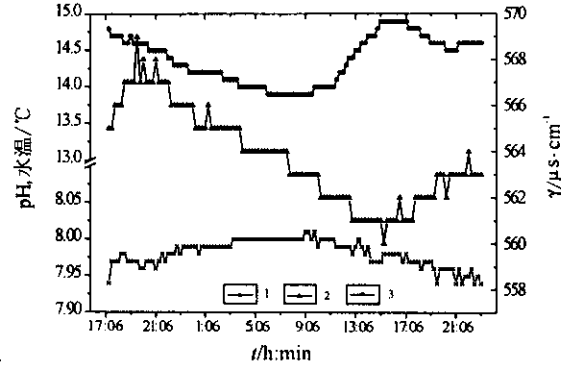


图 4 兰电堂正常气候条件下泉水的物理化学日动态变化(2002 年 1 月 20~21 日)

Fig.4 Diurnal variation of physical chemistry of Landiantang spring with no rainfall(2002-1-20~21)

1-pH 值 2-电导率 3-水温
1-pH 2-conductivity 3-water temperature

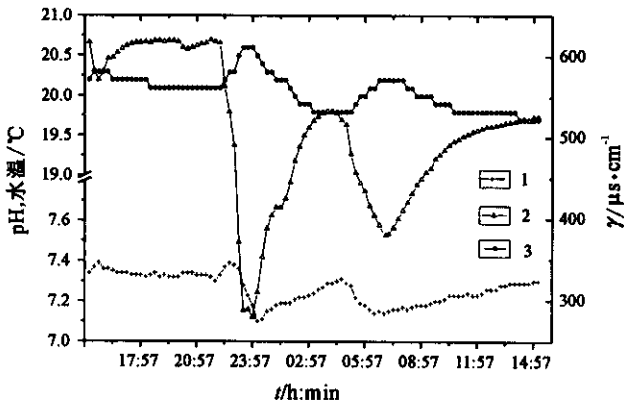


图 5 兰电堂暴雨气候条件下泉水的物理化学日动态变化(2001 年 10 月 26~27 日)

Fig.5 Diurnal variation of physical chemistry of Landiantang spring during the rainstorm(2001.10.26~27)

1-pH 2-电导率 3-水温
1-pH 2-conductivity 3-water temperature

行为不能简单地用传统的水-岩相互作用理论来解释,有必要把水、岩、 CO_2 气体作为一个整体来解释物理化学的变化^①,因为有观测表明,暴雨期间系统中 CO_2 分压升高,有利于溶蚀作用快速进行,使水的电导率快速回升。

2.2.3 弱降雨效应 图 6 是 2001 年 11 月 29 日至 30 日对兰电堂泉的昼夜动态监测结果,29 日上午 10 时 30 分开始降小雨,持续时间约 1 h,降雨量 2 mm。随着降雨的开始,电导率下降,但 15 min 后即回升,30 min 后即恢复到降雨过程前的值,可见岩溶作用对环境变化的敏感。也就是说对弱降雨而言,稀释作用仅作用于降雨的开始时期,其时间长短取决于降雨的强度。

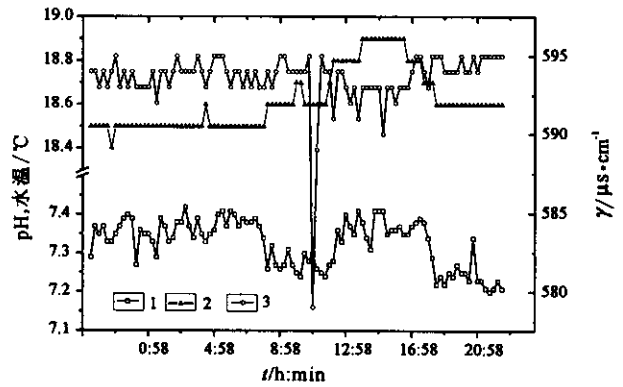


图 6 兰电堂弱降雨气候条件下泉水的物理化学日动态变化(2001 年 11 月 29~30 日)

Fig.6 Diurnal variation of physical chemistry of Landiantang spring during the light rain(2001.11.29~30)

1-pH 2-电导率 3-水温
1-pH 2-conductivity 3-water temperature

3 结论

(1) 短时间尺度监测表明,岩溶动力系统对环境变化十分敏感,响应及时。其地球化学表现为明显的多日与昼夜动态变化,且在不同的气候条件下,水化学动态变化有不同的表现。

(2) 在正常气候(无雨)条件下,水温的变化与气温变化基本一致,pH 与电导率之间具有较好的负相关关系,电导率峰值区滞后最高温度约 4~5 h。这可能与植被从光合作用向呼吸作用转变导致大气 CO_2 浓度产生强烈的梯度变化有关。

(3) 降雨效应:暴雨期间,稀释作用可贯穿整个

对强降雨过程十分敏感,强降雨期间,电导率快速下降,pH 值也显著下降,首先表现为水的稀释效应,随后电导率即迅速回升,说明此时(降雨 1~2 h 后)表层岩溶带的高裂隙率和渗透性(蒋忠诚等,1999)开始发挥作用,水动力作用和 CO_2 效应(刘再华等,1999)逐渐占主导地位,但从降雨前后的电导率数值变化(下降 $100 \mu\text{S}/\text{cm}$)看,暴雨期间稀释作用贯穿整个降雨过程。因而表层岩溶作用的水文地球化学

① 袁道先,刘再华,蒋忠诚等. 2001. 中国北方半干旱与西南亚热带岩溶生态系统导游词(UNESCO/IUGS IGCP448 项目),50~61.

降雨过程,但降雨 1~2 h 后,表层岩溶带的高裂隙率和渗透性开始发挥作用,水动力作用和 CO₂ 效应逐渐占主导地位,而稀释作用对弱降雨过程仅作用于降雨的开始阶段。因此有必要把水、岩、CO₂ 气体作为一个整体来解释表层岩溶作用的水文地球化学行为。

参 考 文 献

曹建华,潘根兴,袁道先等. 1999. 桂林岩溶洼地生态系统中大气 CO₂ 动态及环境意义. 地质论评, 45(1):105~111.

曹建华,袁道先. 1999. 石生藻类、地衣、苔藓与碳酸盐岩持水性及生态意义. 地球化学, 28(3): 248~256.

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.

蒋忠诚. 1999. 岩溶动力系统中的元素迁移. 地理学报, 54(5): 438~444.

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): 316~324.

刘再华,袁道先,何师意. 1999. 岩溶动力系统水化学动态变化规律分析. 中国岩溶, 18(2):103~108.

刘再华,袁道先. 2000. 我国典型表层岩溶系统的地球化学动态特征及其环境意义. 地质论评, 46(3):324~327.

王福星,曹建华,黄俊发等. 1993. 生物岩溶. 北京:地质出版社, 3~9.

袁道先. 1993. 碳循环与全球岩溶. 第四纪研究, 13(1):1~6.

袁道先. 1999. “岩溶作用与碳循环”研究进展. 地球科学进展, 14(5): 425~432.

袁道先. 2001. 地球系统的碳循环和资源环境效应. 第四纪研究, 21(3): 223~232.

References

Andrzej Tyc. 1996. The nature of epikarst and its role in dispersed pollution of carbonate aquifers(A). In : Karst-Fractured Aquifers—Vulnerability and Sustainability (Andrzej Rózkowski, Andrzej Kowalczyk, Jacek Motyka, Krystyn Rubin(Eds)), a selection of the papers presented at the Conference held in Katowice-Ustroń, Poland (10~13) 270~281.

Cao Jianhua, Pan Genxing, Yuan Daoxian et al. 1999. Atmosphere CO₂ dynamics in the Guilin karst depression ecosystem and environmen-

tal significance. Geological Review, 45(1):105~111(in Chinese with English abstract).

Cao Jianhua, Wang Fuxing. 1998. Reform of carbonate rock surface by crustose lichens and its environmental significance. Acta Geological Sinica, 72(1): 94~99.

Cao Jianhua, Yuan Daoxian. 1999. Relationship between water-holding of carbonate rock and saxicolous algae, lichen and moss and its ecological significance. Geochimica, 28(3): 248~256(in Chinese with English abstract).

Jiang Zhongcheng, Yuan Daoxian. 1999. Dynamics features of the epikarst zone and their significance in environments and resources. Acta Geoscientia Sinica, 20(3) 302~308(in Chinese with English abstract).

Jiang Zhongcheng. 2000. Carbon cycle and ecological effects in epikarst system in southern China. Quaternary Sciences, 20(4):316~324 (in Chinese with English abstract).

Jiang Zhongcheng. 1999. Element migration of karst dynamics system. Acta Geographica Sinica, 54(5):438~444(in Chinese with English abstract).

Liu Zaihua, Yuan Daoxian, He Shiyi. 1999. Analysis on the variation of hydrochemistry in karst dynamic system. Carsologica Sinica, 18(2):103~108(in Chinese with English abstract).

Liu Zaihua, Yuan Daoxian. 2000. Features of geochemical variations in typical epikarst systems of China and their environmental significance. Geological Review, 46(3): 324~327(in Chinese with English abstract).

Wang Fuxing, Cao Jianhua, Huang Junfa et al. 1993. Biokarst. Beijing: Geological Publishing House, 3~9(in Chinese).

Yuan Daixian. 1998. Contribution of IGCP379 “ karst processes and carbon cycle ” to global change. Episodes, 21(3):198.

Yuan Daoxian, Liu Zaihua(Eds). 1998. Global karst correlation. Beijing, New York: Science Press. Utrecht: VSP, 1~23.

Yuan Daoxian. 1993. Carbon cycle and global karst. Quaternary Sciences, 13(1):1~6(in Chinese with English abstract).

Yuan Daoxian. 1999. Progress in the study on karst processes and carbon Cycle. Advance in Earth Sciences, 14(5):425~432(in Chinese with English abstract).

Yuan Daoxian. 2001. Carbon cycle in earth system and its effects on environment and resources. Quaternary Sciences, 21(3): 223~232 (in Chinese with English abstract).