

不同土地利用下岩溶水系统水化学日动态强度小波分析

曾 成^{1,2}, 赵 敏^{1,2}, 杨 睿^{1,2}, 刘再华^{1,2}, 罗洪远³

- (1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;
2. 中国科学院地球化学研究所-贵州省科技厅普定喀斯特研究综合试验站, 普定 562100;
3. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局地质矿产勘察院, 贵阳 550005)

摘要: 土地利用/覆被变化会使岩溶水系统演化的化学驱动能——土壤 CO_2 量发生变化, 进而使得岩溶水系统的水化学日动态变化强度发生变化。小波分析方法可以有效识别岩溶水系统的水化学日动态变化强度, 并给出量化的指标。通过对亚热带季风气候区的贵州省陈旗、灯盏河与板寨岩溶水系统长达 2 年的水文水化学监测数据进行小波分析, 发现有土壤覆盖但土地利用程度较高的岩溶水系统(陈旗和灯盏河), 其排泄点水化学指标中 CO_2 分压日动态强度要高于植被覆盖良好但岩石裸露的岩溶水系统(板寨)排泄点, 说明岩溶水系统中土壤对水化学日动态强度的调控有着关键的作用。这一发现对于正确理解和评价不同土地利用下的岩溶作用及其碳汇强度差异有着重要的意义。

关键词: 土地利用/覆被变化; 岩溶水系统; 日动态强度; 小波分析

中图分类号: P641.134

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2011)01-0086-08

岩溶水系统演变所需的化学能——来源于植物的根呼吸作用以及微生物分解有机质所产生的土壤 CO_2 。随着岩溶水系统中的土地利用/覆被变化, 将会发生相应的变化。有关研究已经表明, 岩溶水系统水化学指标, 如电导率、pH 值、水温、水中 CO_2 分压等, 一般具有日动态变化的现象^[1-2]。土地利用/覆被变化可能会使岩溶水系统在相似的气候条件下产生变幅不同的日动态特征(图 1)。

近年来, 国外将小波分析应用于岩溶水系统水文水化学的研究取得较快进展, 例如 Massei 利用连续小波分析, 研究了法国塞纳河流域一处岩溶泉的水位、电导率、浊度与降雨量之间的关系, 并通过小波重构区分了岩溶水系统中的快速流和慢速流^[3]。国内应用小波分析技术的领域很广, 与水文地质相关领域上的应用主要集中于水文时间序列分析上, 在勘查地球化学方面也有零星报道^[4-6], 但是应用于岩溶水系统水化学指标日动态强度识别的报道罕见。有鉴于此, 本文

以同处于湿润亚热带气候区的贵州省普定县陈旗、灯盏河岩溶水系统与荔波县板寨岩溶水系统为研究区域, 以“空间”代“时间”的方法, 对不同土地利用下岩溶水系统水化学指标的日动态强度进行分析。

1 研究区概况

本文研究区为陈旗、灯盏河岩溶泉系统与板寨岩溶地下河系统, 分别位于贵州省普定县与荔波县境内(图 2), 其中, 陈旗、灯盏河岩溶泉系统两者相邻, 位于后寨岩溶地下河系统之中, 上述三个研究区都处于湿润亚热带季风气候区。

陈旗与灯盏河岩溶泉系统以及板寨岩溶地下河系统均为闭合系统。经水文地质测绘以及室内 GIS 统计, 汇水面积为: 陈旗 1.3187 km², 灯盏河 2.8247 km², 板寨 19.3043 km², 补给来源为大气降水。

陈旗与灯盏河岩溶泉系统(图 3)内地层主要由中三叠关岭组第二段 T_2g^2 至第三段 T_2g^3 厚层灰岩白云岩夹少许薄层泥灰岩组成, 岩层产状平缓, 由 T_2g^1 的泥灰岩与页岩互层构成隔水基底, 地下水类型主要为覆盖—裸露型碳酸盐岩裂隙溶洞水。陈旗与灯盏河岩溶泉系统总体地势为东北高、西南低, 并以 NE—SW 延伸的低洼岩溶谷地为汇水带, 最终在岩溶谷地西南开口侧的终端以岩溶泉的形式排泄。两系统中的径流主管道也是在岩溶谷地中, 主要受控于系统中发育的共轭 X 型节理系。经野外露头实测, 发现两系统中的剪节理一组走向为 40°~54°, 另一组为 305°~320°, 另一组为 305°~320°。

收稿日期: 2010-03-29; 修订日期: 2010-05-17

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目; 中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx2-yw-306); 国家自然科学基金项目(40872168); 国家社会公益项目(2005DIB3J067)

作者简介: 曾成(1979-), 男, 博士后, 主要研究方向为岩溶生态水文学、环境工程地质。

E-mail: zcchampion@yahoo.com.cn

通讯作者: 刘再华, E-mail: liuzaihua@vip.gyig.ac.cn

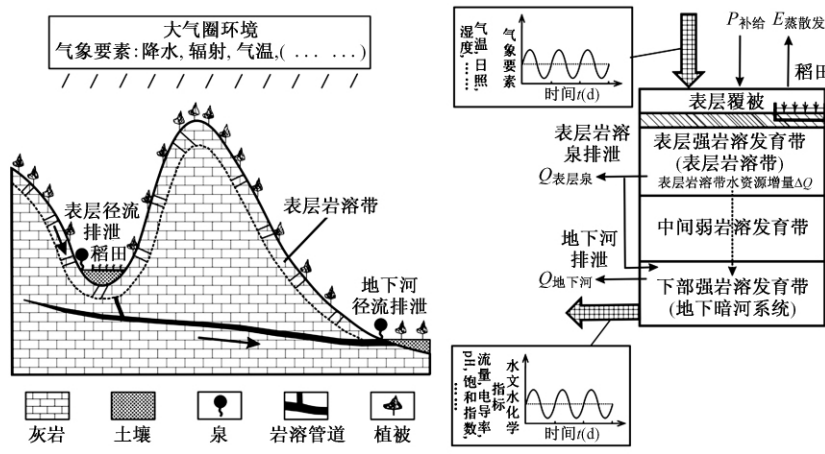


图 1 湿亚热带岩溶地下水系统概念模式图(据 陈植华^[7],蒋忠诚^[8]综合改编)

Fig.1 Conceptual model of karst groundwater systems in humid subtropical zone

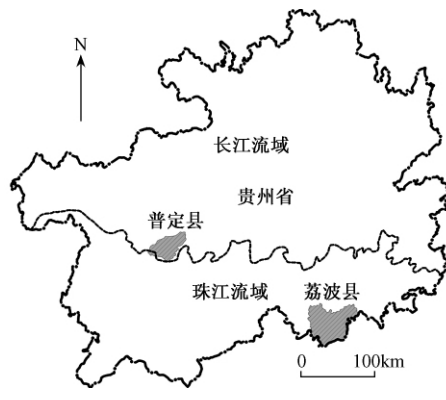


图 2 研究区在贵州省的位置

Fig.2 Location of the study areas in Guizhou

并将出露的石灰岩切成菱形,这两组节理在后期的岩溶作用中,造成水流的差异性溶蚀,并结合岩层产状,沿 40°~54°这组节理发育成岩溶主径流管道,而沿 305°~320°这组节理发育出冲沟。在调查过程中发现,陈旗、灯盏河岩溶泉域谷地中分布有落水洞,这些洞中可见 4~5cm 长的小鱼,说明谷地底部有一定规模的管道空间,并且这些落水洞由岩溶地下管道相连接。

板寨岩溶地下河系统(图 4)的地层岩性为石炭系中统灰岩与白云岩,岩层产状平缓,仅在板寨地下河出口附近出露该地下河系统的隔水基底石炭系下统大塘阶上段 C₁d³ 泥灰岩、页岩、硅质岩地层,地下水类型主要为裸露型碳酸盐岩类裂隙溶洞水。系统内主要分布有 NE 向局部导水正断层,洼地长轴方向也主要为 NE 向。落水洞主要分布在经过水淹坝及更干一线呈 NE 向串珠状发育的洼地中,推测以此作为该系统的排泄主通道,该主通道 NW 向大部分子系统岩溶水由此排

图 3 陈旗与灯盏河岩溶水系统及土地利用图

Fig.3 Map showing the distribution of land-use types in Chenqi and Dengzhanhe karst water systems

- 1—泉系统边界; 2—主径流管道; 3—消溢水洞; 4—落水洞;
5—岩溶泉; 6—长观站; 7—地下水流向; 8—岩层产状;
9—水田; 10—旱地; 11—灌丛

泄。经岩溶水文地质测绘发现该主通道东南侧岩溶负地形不发育,未形成大面积的岩溶水补给区。

板寨岩溶地下河系统内土地利用类型主要是石生性的喀斯特原始森林,大量分布于峰丛之上,面积为 17.3793km²,占整个系统面积的 90.03%。森林树种的组成上,除了山脊和顶部(通常海拔 750 m 以上)分布有少量的针、阔叶混交林,绝大部分地区为阔叶林。由于此系统内土壤极少,不宜农业生产,因此,农耕地仅零星分布在具有少量土壤的岩溶洼地底部。

陈旗、灯盏河岩溶泉域内土地利用类型主要有水田、旱地、灌丛等。其中陈旗泉域内水田主要分布于洼

地底部,接近系统排泄区;而灯盏河泉域内水田则主要分布在补给区,另外,有少量的水田分布在接近灯盏河岩溶泉口呈 NE 向延伸的狭长状洼地底部,洼地中上部则以灌丛为主。两个岩溶泉域的旱地主要分布在洼

地边缘,且与水田相接,但陈旗旱地比例较高,约占整个流域的 60.5%。其它地方均砍伐破坏比较严重,大部份已退化为灌丛,且灌丛较稀疏(图 3、表 1)。

表 1 陈旗、灯盏河岩溶水系统不同利用类型土地面积统计表
Table 1 Statistic table of area of different land-use types of Chenqi and Dengzhanhe karst spring systems

地点	水田		旱地		灌丛		总面积	
	面积(km ²)	百分比(%)	面积(km ²)	百分比(%)	面积(km ²)	百分比(%)	面积(km ²)	百分比(%)
陈旗	0.1898	14.39	0.7339	55.65	0.3950	29.95	1.3187	100
灯盏河	0.5300	18.76	1.2486	44.20	1.0461	37.03	2.8247	100

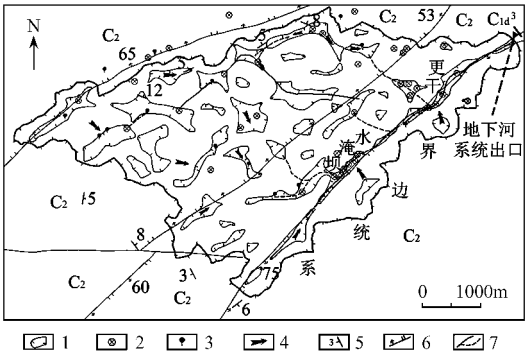


图 4 板寨岩溶地下河水文地质图
Fig. 4 Hydrogeological map of Banzhai karst water sytem

1—洼地边界;2—落水洞;3—岩溶泉;4—地下水流向;
5—岩层产状;6—断层;7—地下河(实线为实测,虚线为推测)

2 研究方法

2.1 野外监测仪器

采用澳大利亚 GreenSpan 公司生产的 CTD300 水质多参数自动记录仪,安放在所研究的岩溶水系统排泄点,监测时间间隔设定为 15min,对雨量、水位、pH 值、水温(T)和电导率(EC)进行自动监测并记录,测量精度分别达到 0.5mm、0.01m、0.01 个 pH 单位、0.01℃和 0.01μS/cm。电导率由温度自动补偿至 25℃的值。

德国 Merck 公司生产的碱度测试盒和 Ca²⁺ 测试盒,用于野外现场测试岩溶水中的 HCO₃⁻ 和 Ca²⁺ 的浓度,精度分别达到 0.1mmol/L(换算值为 6.1mg/L)和 4mg/L。

2.2 水样采集与化验

水样一般按月采集。室内主要分析项目包括:K⁺、Na⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 的浓度,由中国科学院贵阳地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室测定完成。其中阴离子由美国 Dionex 公司产的 ICS

-90 型离子色谱仪测定;阳离子则用美国 Varian 公司产的 VBTA MPX 型电感耦合等离子体-光发射光谱仪测定。

由于岩溶水 pH 值、T、EC、Ca²⁺、HCO₃⁻ 随环境变化迅速,所以这些数据将采用现场测得的值^[9]。具体的方法是用 CTD300 自动记录仪现场测定水的 pH 值、T、EC,用 Merck 公司碱度测试盒和 Ca²⁺ 测试盒现场滴定水中的 HCO₃⁻、Ca²⁺ 离子浓度。

方解石饱和指数(SI_c)和 CO₂ 分压(P_{CO2})的计算利用 WATSPEC 软件进行。

二氧化碳分压(P_{CO2})计算公式为:

$$P_{CO_2} = \frac{[HCO_3^-][H^+]}{K_1K_{CO_2}}$$

式中:K₁ 和 K_{CO2}——H₂CO₃ 和 CO₂ 的平衡常数;

[HCO₃⁻], [H⁺]——离子的摩尔浓度。

方解石饱和指数(SI_c)则由下式得出:

$$SI_c = \lg\left(\frac{[Ca^{2+}][CO_3^{2-}]}{K_c}\right)$$

式中:K_c——方解石平衡常数;

[Ca²⁺], [CO₃²⁻]——离子的摩尔浓度。

当 SI_c = 0 时,表示溶液中的方解石呈平衡状态;当 SI_c > 0 时,表示溶液中的方解石浓度已超过饱和,可能沉淀方解石;当 SI_c < 0 时,表示溶液对方解石尚未饱和,可以溶解更多的方解石。

3 监测数据及其计算分析方法

3.1 水文水化学监测数据

图 5~7 为陈旗、灯盏河岩溶泉与板寨岩溶地下河水文水化学指标监测数据图。其中陈旗与灯盏河岩溶泉的监测时段为 2007 年 7 月~2008 年 12 月,板寨岩溶地下河的监测时段为 2007 年 1 月~2008 年 12 月。由图 5~7 可以明显看出各研究区集中排泄点的岩溶

水化学指标在季节尺度上的变化情况,表现出岩溶旱季 P_{CO_2} 较雨季为低的趋势,雨季强烈的降雨造成相应水化学指标的剧烈波动,以上情况将岩溶水的日动态变化细节所掩盖,采取相应的数学方法提取日动态变化强度,具有重要的意义。

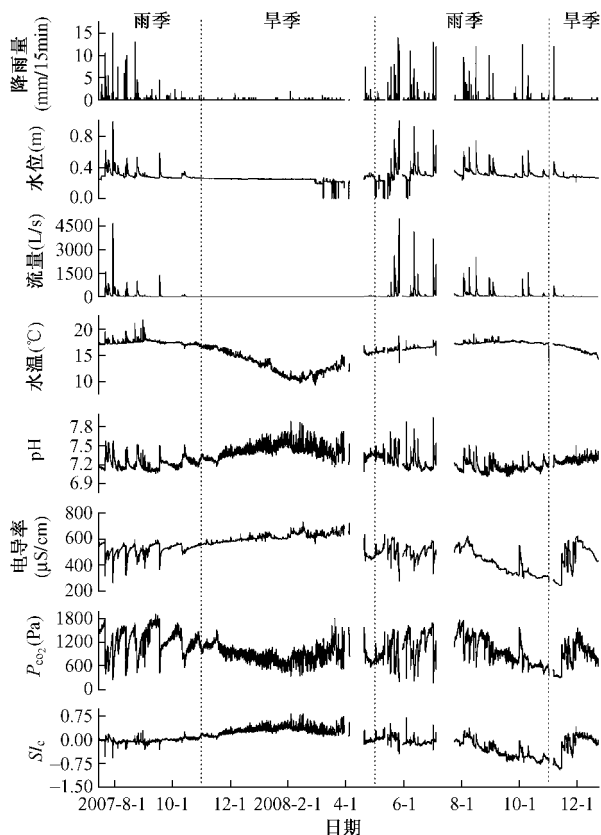


图5 陈旗岩溶泉水文水化学季节变化图

Fig.5 Seasonal hydrochemical variations of Chenqi karst spring water

3.2 监测数据的计算处理分析方法

小波分析亦称多分辨率分析,是近年来国际上十分热门的一个前沿领域。对复杂信号作小波变换,进行多分辨率分析,已经成为信号分析和处理的常用方法^[10]。传统的傅里叶变换对于含有大量非稳态成分的时变信号,通常需要提取某一时间段或瞬态的频域信息或某一频率段所对应的时间信息时,则显得不足^[11]。小波分析方法是一种窗口大小固定、形状可变的时频局部化信号分析方法,即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率。

小波是具有震荡特性、能够迅速衰减到零的一类函数,即:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0$$

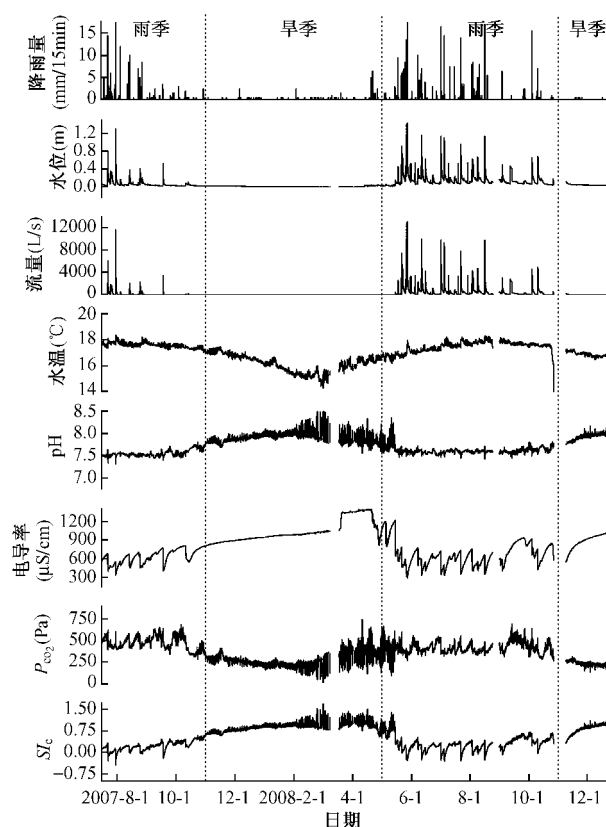


图6 灯盏河岩溶泉水文水化学季节变化图

Fig.6 Seasonal hydrochemical variations in the Dengzhanhe karst spring water

由 $\Psi(t)$ 的伸缩和平移构成一族函数系:

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R, \text{ 且 } a \neq 0$$

$\Psi_{a,b}(t)$ 为基本小波,它是双窗函数,一个是时间窗,一个是频率窗。 $\Psi_{a,b}(t)$ 的振荡随 $\frac{1}{|a|}$ 的增大而增大,因此 a 是频率参数; b 是时间参数,表示波动在时间上的平移。

函数 $f(t)$ 小波变换的连续形式为:

$$\omega_f(a,b) = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \bar{\Psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

式中: $\Psi(t)$ 与 $\bar{\Psi}(t)$ ——复共轭函数。

小波变换的离散形式是:

$$\omega_f(a,b) = |a|^{-1/2} \Delta t \sum_{i=1}^n f(i\Delta t) \Psi\left(\frac{i\Delta t - b}{a}\right)$$

式中: Δt ——取样间隔;

n ——样本量。

小波方差为:

$$\text{var}(a) = \frac{1}{n} \sum [\omega_f(a,b)]^2$$

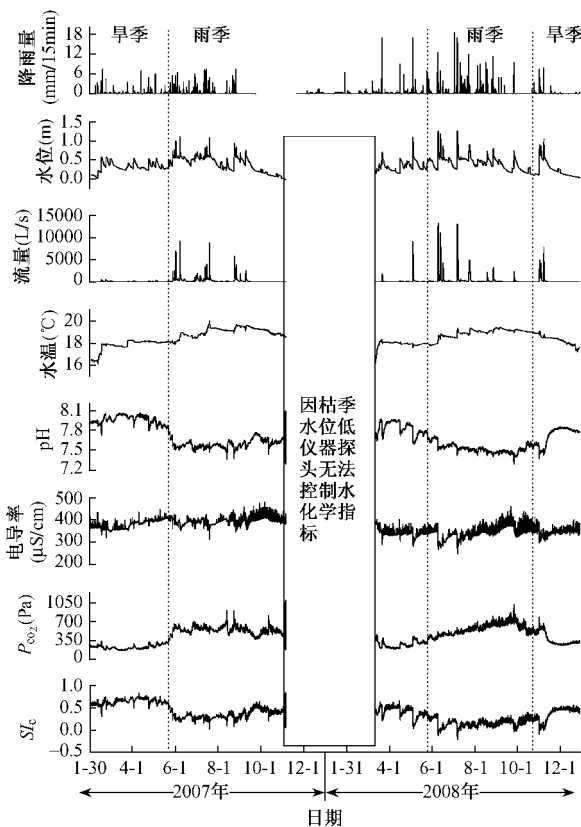


图7 板寨岩溶地下水水文化学季节变化图

Fig.7 Seasonal hydrochemical variations in the Banzhai karst subterranean river

小波函数目前有很多种,比较常用的有墨西哥草帽小波:

$$\Psi(t) = (1 - t^2) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad -\infty < t < \infty$$

Mallat 给出了小波变换的快速算法,又称 Mallat 算法。这一算法对非平稳信号的分析显得尤为重要。因为非平稳信号的频率随时间而变化,这种变化可以分为慢变和快变两部分。慢变部分对应非平稳信号的低频部分,代表信号的主要轮廓;而快变部分对应信号的高频信息,表示的是信号的细节^[12]。Mallat 算法是一种信号的分解方法,首先是对长度为 N 的数据序列进行第 1 层分解,可得到长度为 $N/2$ 的第 1 层低频部分 $A1$ 和长度为 $N/2$ 的第 1 层高频部分 $D1$;然后是对长度为 $N/2$ 的低频部分进行第 2 层分解,可得到长度为 $N/4$ 的第 2 层低频部分 $A2$ 和长度为 $N/4$ 的第 2 层高频部分 $D2$;这样一直进行下去,直到一个数目较小的低频部分被保留下来。例如一个三层分解的小波分解树可用图 8 进行描述,这样就可以将原始信号分解为一系列低频分量和高频分量的相加 $f(t) = A3 + D3$

$+ D2 + D1$ 。

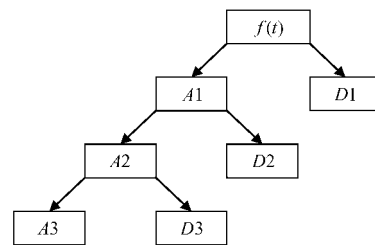


图8 三层小波分解树结构图

Fig.8 Structural map of three layers wavelet decomposition tree

离散小波变换可以用来分解信号,而把分解的系数还原成原始信号的过程叫做小波重构。小波重构只需简单地颠倒上述离散小波变换的整个过程,按图 8 从下向上进行,即可将原始信号还原。

对岩溶水系统排泄区水化学监测指标的时间序列来说,低频部分代表着序列的季节变化规律。随着分解层次的增加,时间分辨率降低,水化学指标时间序列的这种季节变化规律将更加明显。这可以在频率中理解它,小波分解中的低频部分随着层次的增加,它含有的高频成分信息会随之减少。只要进行有限层次的分解,剩余的低频系数就可以比较明显地反映水化学指标时间序列的季节变化而又不失代表性。由以上分析可知,小波分析方法应用于分析岩溶水系统排泄区水化学监测指标变化趋势是可行的。

正交小波基的 Daubechies (dbN) 小波系是计算机时代的产物,由于它具有良好的时频分析性能,目前已在许多工程领域中得到应用^[13]。本文分析采用 Daubechies (db4) 小波。所有分析在 MATLAB6.5 软件中调用相关的小波分析指令完成。

4 研究区季节尺度上水化学日动态强度计算

根据陈旗、灯盏河岩溶泉与板寨地下河出口水文水化学数据监测情况,将中间从未出现数据监测中断的时间序列提取出来作信号处理,为保证水文水化学监测序列具有代表性,监测序列的选择应尽量长,包含旱季和雨季两部分。为此,特选择如下时间段上的监测序列:

板寨:2008 年 3 月 15 日 0 点~12 月 28 日 0 点;

陈旗:2007 年 7 月 15 日 0 点~2008 年 3 月 1 日 0 点;

灯盏河:2007 年 7 月 15 日 0 点~2008 年 2 月 28

日 0 点；

所计算的水化学指标有： P_{CO_2} 、电导率、pH 值、水温，取各资料的年平均值，并作变量的标准化。

分析步骤如下：

(1) 对研究区水化学监测指标时间序列进行标准化处理。

在这些监测的各岩溶水化学指标，单位不一样，平均值与标准差也不同，为了使它们可以在同一水平上进行比较，可以借鉴气象资料统计中的方法^[14]，使它们变成同一水平的无单位的变量。标准化的方法为：时间序列中的各指标，分别减去该指标的季节平均值，然后再除以该指标的季节标准差。

(2) 水化学指标时间序列的小波分解。

应用 Mallat 塔式分解算法用 db4 函数对标准化处理后的水化学指标时间序列进行小波分解，得到小波分解序列 $\{d_1, d_2, \dots, d_n, a_n\}$ 。利用 MATLAB6.5 的一维离散小波分析指令并结合图形显示指令，可以看出清晰展示出原始序列的趋势项所需分解的层数。

(3) 原始序列分解后的各高、低频序列的连续小波变换。

采用墨西哥草帽小波函数，分别对 $\{d_1, d_2, \dots, d_n, a_n\}$ 进行连续小波变换，得出它们的小波系数，利用 MATLAB6.5 中强大的矩阵运算能力，求出它们的小波方差，找出它们的主要周期，并记录 24h 周期所对应的小波方差值。

表 2 研究区岩溶水化学指标日动态信号的小波方差

Table 2 Wavelet variances of diurnal variation in karst water hydrochemical index in the three study areas

地点	水中 P_{CO_2}	电导率	pH 值	水温
陈旗	5.7852	1.0338	4.6961	0.3350
灯盏河	1.8672	0.7794	0.8831	0.4557
板寨	0.9434	4.5756	0.9092	0.6016

通过对季节尺度上板寨、陈旗与灯盏河岩溶水系统排泄区水化学指标监测序列的小波分解与高频信号的识别，发现当分解至第 8 层时，高频信号 24h 左右振动的小波方差值最大（表 2），剩余的低频信号可以清晰地展示出原始序列的趋势项（这里仅给出陈旗岩溶泉 P_{CO_2} 的变化趋势图，见图 9）。由表 2 可以看出：水中 P_{CO_2} 日变化的强度顺序是陈旗 > 灯盏河 > 板寨，说明岩溶水系统中的土壤量多少以及土地利用分布的格局将决定土壤 CO_2 与水中 P_{CO_2} 的关系，植被少土多，土壤成因的 CO_2 在土中聚集，缓慢向大气释放，土壤

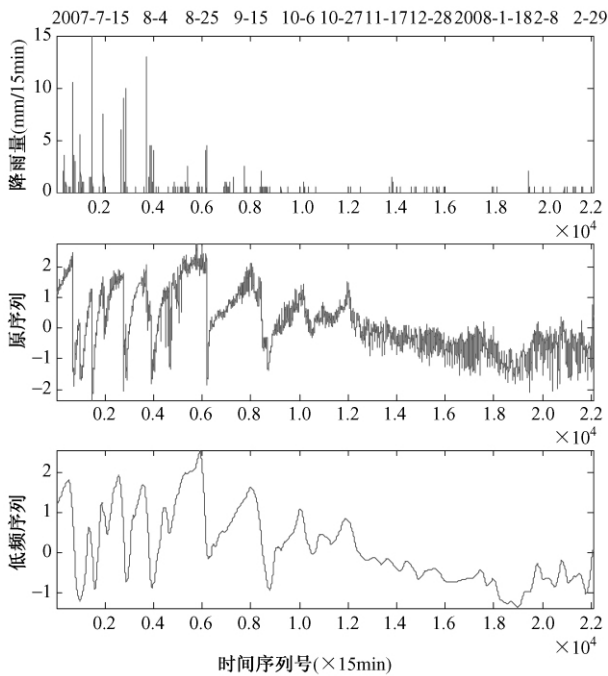


图 9 陈旗岩溶泉 P_{CO_2} 变化趋势

Fig. 9 Trend of P_{CO_2} change in the Chenqi karst spring

下部的 CO_2 可以在土壤水向下运移的过程中进入含水层，提高水中 P_{CO_2} 值，而板寨的植被虽好，但是其裸岩环境下土壤层的覆盖情况相对于普定陈旗、灯盏河的较差，土壤 CO_2 向大气释放较快，所以在日动态上的强度较低。电导率的日动态强度也可以说明这一点，陈旗、灯盏河岩溶泉系统内地质情况相似，表现出与岩溶水中 P_{CO_2} 相似的顺序关系，但是由于受石膏地层中释放的大量 SO_4^{2-} 对电导率的影响，一定程度上削弱了日动态的相对强度，所以其值相对于水中 P_{CO_2} 日动态强度的值较低，而板寨的较大，原因是板寨岩溶水系统中基本没有石膏地层，水中的电导率仅受 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 等离子影响，而这些离子又主要受制于气象要素的强烈日动态变化影响，所以值较高。pH 值日动态的强度顺序为陈旗 > 板寨 > 灯盏河，pH 值的变化在岩溶区主要受制于水中 P_{CO_2} 的大小，而这里灯盏河与板寨的日动态强度关系正好与水中 P_{CO_2} 的关系相反，可能的原因是板寨研究区内植被覆盖良好，枯枝落叶层中所含的大量醋酸、蚁酸、草酸、琥珀酸和柠檬酸等生物成因的有机酸较多有关^[15]，但是对日动态强度影响的程度不大，因为其值仅比灯盏河的高出 0.026 左右。水温日动态的强度顺序为板寨 > 灯盏河 > 陈旗，则说明系统面积大小的影响。

5 结论

本文利用小波分析方法,对季节尺度上陈旗、灯盏河与板寨岩溶水系统集中排泄点的水化学日动态强度进行了分析,研究表明不同覆被条件下的岩溶水系统排泄点水化学日动态强度明显不同。主要表现为有土壤覆盖但土地利用程度较高的陈旗和灯盏河岩溶水系统,其排泄点水化学指标中 P_{CO_2} 日动态强度要高于植被覆盖良好但灰岩裸露的板寨岩溶水系统排泄点的强度。说明岩溶水系统中土壤对水化学日动态强度的调控有着关键的作用,即,土地利用程度较高并发生一定石漠化现象的地区若坡地类型以土质或土石质为主,其排泄点岩溶水中 P_{CO_2} 日动态强度不一定会比植被覆盖良好但以石质坡地为主的岩溶水系统为低(注:土质、石质为主坡地的概念可以参考文献[16])。这一发现对于正确理解和评价不同土地利用下的岩溶作用及其碳汇强度差异有着重要的意义。

致谢:在论文写作前期的岩溶水系统水文地质调查过程中,分别得到了桂林理工大学环境科学与工程学院闫志为教授、张志卫硕士,中国科学院地球化学研究所—贵州省科技厅普定喀斯特研究综合试验站徐泽琳主任、陈波工程师、贺光宏工程师、王莉莉工程师,贵州省茂兰国家级自然保护区管理局冉景丞局长、熊志斌高工的指导与帮助;水样分析过程中,中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室的孙海龙博士、刘彦博士和黄荣生高工、王海静博士给予了帮助,在此向他们表示真挚的感谢!

参考文献:

- [1] Liu Zaihua, Li Qiang, Sun Hailong, *et al.* Seasonal, diurnal and storm – scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: CO_2 and dilution effects [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 337 (1/2): 207 – 223.
- [2] 曾成,刘再华,赵敏,等. 基于谱分析的岩溶地下河系统短时间尺度水化学变化研究[J]. *水文地质工程地质*, 2009, 36 (3): 39 – 44. [ZENG C, LIU Z H, ZHAO M, *et al.* A study of short-time scale variation in hydrochemistry of karst ground river based on spectrum analysis [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36 (3): 39 – 44. (in Chinese)]
- [3] Massei N, Dupont J P, Mahler B J, *et al.* Investigating transport properties and turbidity dynamics of a karst aquifer using correlation, spectral, and wavelet analyses [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 329: 244 – 257.
- [4] 任春,裴涛,夏响华,等. 波谱分析法在油气地球化学勘探中的应用研究[J]. *物探与化探*, 2003, 27 (6): 462 – 464. [REN C, PEI T, XIA X H, *et al.* The application of wave spectrum analysis to oil and gas geochemical exploration [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2003, 27 (6): 462 – 464. (in Chinese)]
- [5] 曹殿华,王安建,王高尚,等. 勘查地球化学异常多尺度分析方法:以赣东北德兴矿集区为例[J]. *现代地质*, 2008, 22 (6): 1028 – 1033. [CAO D H, WANG A J, WANG G S, *et al.* Multiscale Analysis of Exploration Geochemical Anomalies: A Case Study of Dexing Ore Concentration Area, North-east Jiangxi Province [J]. *Geoscience*, 2008, 22 (6): 1028 – 1033. (in Chinese)]
- [6] 申维,房丛卉,常兴国. 小波分析在 Mandamah 地区的物探数据及其铜矿预测中的应用[J]. *物探化探计算技术*, 2009, 31 (6): 525 – 529. [SHEN W, FANG C H, CHANG X G, *et al.* Application of wavelet analysis for geophysical data and copper mineral deposits forecast in Mandamah area [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2009, 31 (6): 525 – 529. (in Chinese)]
- [7] 陈植华,陈刚,靖娟利,等. 西南岩溶石山表层岩溶带岩溶水资源调蓄能力初步评价[M]//中国岩溶地下水与石漠化治理. 桂林:广西科学出版社, 2003. [CHEN Z H, CHEN G, JING J L, *et al.* Preliminary assessment of the epikarst water resources retardation in Southwest China karst hill areas [M]// *Karst groundwater and rocky desertification control in China*. Guilin: Guangxi Science Press, 2003. (in Chinese)]
- [8] 蒋忠诚,李先琨,曾馥平,等. 岩溶峰丛洼地生态重建[M]. 北京:地质出版社,2007. [JIANG Z C, LI X K, ZENG F P, *et al.* Ecological rebuild in karst peak-cluster depression area [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007. (in Chinese)]
- [9] 刘再华, Wolfgang Dreybrodt. 岩溶作用动力学与环境[M]. 北京:地质出版社,2007: 151 – 159. [LIU Z H, Wolfgang Dreybrodt. *Karst process kinetics and environment* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 151 – 159. (in Chinese)]
- [10] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北

- 京: 气象出版社, 2007. [WEI F Y. Statistical diagnoses of modern climate and forecasting techniques [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007. (in Chinese)]
- [11] 飞思科技产品研发中心. MATLAB6.5 辅助小波分析与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003. [Feisi Research and Development Center of technological product. Wavelet analysis with the aid of Matlab6.5 and its application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. (in Chinese)]
- [12] 李弼程, 罗建书. 小波分析及其应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003. [LI B C, LUO J S. Wavelet analysis and its application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. (in Chinese)]
- [13] 董长虹, 高志, 余啸海. Matlab 小波分析工具箱原理与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. [DONG C H, GAO Z, YU X H. Principle and application of Matlab wavelet toolbox [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)]
- [14] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法 [M]. 北京: 气象出版社, 2004. [HUANG J Y. Meteorological statistics and forecasting Methods [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004. (in Chinese)]
- [15] 任美锷, 刘振中. 岩溶学概论 [M]. 北京: 商务印书馆, 1983. [REN M E, LIU Z Z. Introduction to karstology [M]. Beijing: The Commercial Press, 1983. (in Chinese)]
- [16] 张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 等. 西南岩溶山地坡地石漠化分类刍议 [J]. 地球与环境, 2007, 35 (2): 188 - 192. [ZHANG X B, WANG S J, HE X B, et al. A preliminary discussion on the rocky desertification classification for slope land in karst mountain areas of Southwest China [J]. Earth and Environment, 2007, 35 (2): 188 - 192. (in Chinese)]

Wavelet analysis of the intensity of diurnal hydrochemical variation of karst water systems under different land use conditions

ZENG Cheng^{1,2}, ZHAO Min^{1,2}, YANG Rui^{1,2}, LIU Zai-hua^{1,2}, LUO Hong-yuan³

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China;

2. Puding Comprehensive Karst Research and Experimental Station, Institute of Geochemistry, CAS and Sciences and Technology Department of Guizhou Province, Puding 562100, China;

3. Geological and Mineral Surveying Institute of Guizhou non-Ferrous Metal and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau, Guiyang 550005, China)

Abstract: Land use and land cover change in a karst water system can change the driving force (soil CO₂) for the chemical evolution of the karst water system, which thus changes the intensity of diurnal hydrochemical variation of the karst water system. The intensity of diurnal hydrochemical variation of a karst water system was identified with the wavelet analysis method based on the two-year hydrological and hydrochemical data in the Chenqi, Dengzhanhe and Banzhai karst water systems. It was found that the diurnal variation intensity of CO₂ partial pressure of the karst water system with more soil cover but high degree of land use (for example, Chenqi and Dengzhanhe, Puding, Guizhou) was higher than that of the karst water system with virgin forest but little soil cover (for example, Banzhai and Maolan, Guizhou). The results indicate that soil in the karst water system may be the most important to the adjustment of intensity of diurnal hydrochemical variation, which is important to correctly understand and evaluate the difference of karst process and related CO₂ sink intensity under different land use conditions.

Key words: land use and land cover change; karst water system; diurnal hydrochemical variation intensity; wavelet analysis

责任编辑: 汪美华