

岩溶作用碳汇强度计算的溶蚀试片法和水化学径流法比较 ——以陈旗岩溶泉域为例

曾成^{1,2} 赵敏^{1,2} 杨睿^{1,2} 刘再华^{1,2}

- (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, 贵州 贵阳 550002;
2. 中国科学院地球化学研究所普定喀斯特生态综合试验站, 贵州 普定 562100)

摘要: 溶蚀试片法和水化学径流法是计算岩溶作用碳汇强度的两种重要方法, 利用这两种方法对贵州普定陈旗岩溶泉系统的岩溶作用碳汇强度分别进行了计算。结果发现: 通过溶蚀试片法估算出的岩溶作用碳汇强度仅为水化学径流法估算值的 1/6 左右, 这主要是因为陈旗岩溶泉域内埋放溶蚀试片处的上覆土体中含有石灰岩角砾和土骨架中存在少量原生与次生碳酸盐矿物, 这些碳酸盐的先期溶蚀大大降低了下部试片的溶蚀量。可见, 溶蚀试片法具有一定的局限性, 即在该方法应用之前, 必须对试片上覆土体的碳酸盐矿物含量进行分析, 以评价该方法的适宜性。

关键词: 溶蚀试片法; 水化学径流法; 岩溶泉域; 碳汇强度; 陈旗

中图分类号: P642.25

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2014)01-0106-06

碳酸盐岩通过岩溶作用与大气 CO_2 存在着密切的联系, 它积极地参与了全球碳循环^[1], 并且是重要的碳汇之一^[2], 准确计算岩溶作用碳汇强度有着重要的意义。溶蚀试片法和水化学径流法是评估岩溶作用碳汇强度的两种重要方法, 但各有其局限性, 它们计算出的结果常常也有较大差异^[3]。在作者以往的工作中, 感觉通过溶蚀试片法计算出的岩溶作用碳汇强度相对于水化学径流法的估算值要小, 但是缺少具体原因的深入分析。为此, 本文以贵州普定陈旗岩溶泉域为研究对象, 利用为期 1 年的相关监测数据对上述两种方法的结果进行对比阐述, 以引起大家进一步的关注。

1 研究区概况

陈旗岩溶泉系统, 位于贵州省普定县陈旗村, 属于亚热带湿润季风气候。陈旗岩溶泉为全排型岩溶泉(图 1), 汇水面积约 1.319km^2 , 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(倾角 $< 8^\circ$), 第一段(T_2g^1)泥灰岩与页岩互层构成隔水基

底, 地下水类型主要为覆盖—裸露型碳酸盐岩类裂隙溶洞水, 由大气降水补给。该泉系统中的主裂隙—管道发育于岩溶谷地中, 主要受控于共轭 X 型节理系, 一组走向为 $40^\circ \sim 54^\circ$, 另一组为 $305^\circ \sim 320^\circ$, 这两组节理在后期水流的差异性溶蚀下, 结合岩层产状, 沿 $40^\circ \sim 54^\circ$ 节理发育成岩溶主径流管道, 沿 $305^\circ \sim 320^\circ$ 节理发育干谷, 即以 NEE—SWW 向延伸的岩溶谷地为汇水带, 在其西南部的谷口端以岩溶泉的形式集中排泄。该泉域谷地中分布有落水洞, 洞中常可见 $4 \sim 5\text{cm}$ 长的小鱼, 表明该谷地底部发育有一定规模的岩溶管道空间^[4]。

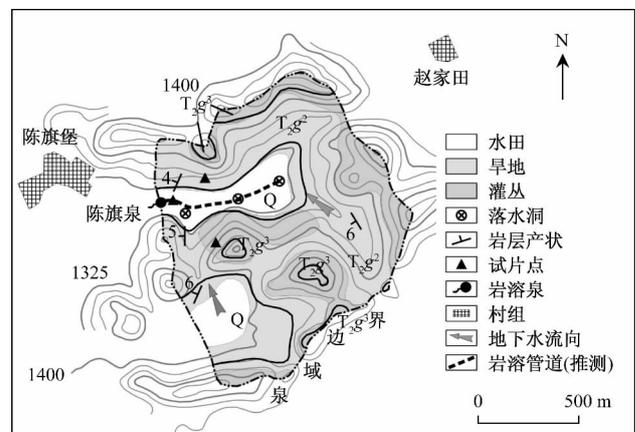


图 1 陈旗岩溶泉系统及土地利用

Fig. 1 Map showing the distribution of land-use types in the Chenqi karst spring system

陈旗岩溶泉域内的土地利用类型主要为水田、旱

收稿日期: 2013-01-22; 修订日期: 2013-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(41003056, 41103084); 贵州省科技厅社会攻关计划基金(黔科合 SY 字(2013)3163 号)

作者简介: 曾成(1979-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事岩溶生态水文地质研究。

E-mail: zechampion@163.com

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

地和灌丛(图 1)。其中水田主要分布于谷地底部,靠近排泄区;旱地主要分布在谷地边缘和峰丛中;峰丛上部主要为灌丛,因砍伐破坏比较严重,灌丛较为稀疏。利用 Mapgis 统计出各种土地利用类型的面积及其百分比,见表 1。

表 1 陈旗岩溶泉系统不同利用类型土地面积统计表

Table 1 Area of different land-use types in the Chenqi karst spring system

土地利用类型	水田	旱地	灌丛	总面积
面积 (km ²)	0.190	0.734	0.395	1.319
百分比 (%)	14.39	55.65	29.95	100

2 研究方法

采用溶蚀试片法和水化学径流法分别对陈旗岩溶泉系统的岩溶作用碳汇强度进行计算。

2.1 溶蚀试片法

计算公式如下:

$$E = (W_1 - W_2) / S$$

$$CSF = 10^4 \cdot E \cdot R \cdot M_{CO_2} / M_{CaCO_3}$$

式中: CSF ——碳酸盐岩岩溶作用碳汇强度 ($t / (km^2 \cdot a) (CO_2)$);

E ——石灰岩溶蚀试片的侵蚀通量 ($g / (cm^2 \cdot a)$);

W_1 ——溶蚀试片初重 (g);

W_2 ——溶蚀后的试片重量 (g);

$W_1 - W_2$ ——埋放时间内溶蚀试片的绝对溶蚀量 (g);

S ——溶蚀试片的表面积(圆形溶蚀试片,直径 4cm,厚 0.5cm,面积约 31.42cm²);

R ——石灰岩溶蚀试片中 $CaCO_3$ 含量;

M_{CO_2} —— CO_2 的分子量;

M_{CaCO_3} —— $CaCO_3$ 的分子量。

本研究中所用石灰岩溶蚀试片采自广西桂林七星岩附近上泥盆统融县组 (D_3r) 石灰岩,其酸可溶成分达 99.03%,白云石的含量低于 5%,用这种溶蚀试片估算岩溶作用碳汇强度 CSF 时,可以忽略酸不溶物和微量白云石对计算结果的影响。

2.2 水化学径流法

$$CSF = 0.5 \cdot Q \cdot [HCO_3^-] \cdot M_{CO_2} / A =$$

$$0.5 \cdot M \cdot [HCO_3^-] \cdot M_{CO_2}$$

式中: Q ——岩溶水系统径流排泄量;

$[HCO_3^-]$ ——排泄岩溶水中 HCO_3^- 的摩尔浓度;

A ——岩溶水系统汇水面积;

M ——岩溶水系统的径流模数;

0.5——因碳酸盐岩溶解形成的水中 HCO_3^- 只有一半是大气成因的碳。

因为岩溶水的水位、pH、水温 T 、电导率 EC 和主要离子 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 浓度等参数随环境变化迅速,所以这些参数将分别采用野外自动记录和现场滴定的方法获得。具体方法是在陈旗岩溶泉口安放澳大利亚 GreenSpan 公司产 CTDP300 水质多参数自动记录仪,对降水量 P 、水位、pH、 T 和 EC 进行高分辨率自动监测,监测时间间隔设定为 15min,测量精度分别达到 0.5mm、0.01m、0.01 个 pH 值单位、0.01℃ 和 0.01 $\mu S/cm$ (电导率由温度自动补偿至 25℃ 的值),流量由自动记录的水位数据通过复合堰流公式换算而得;用德国 Merck 公司生产的碱度测试盒和 Ca^{2+} 测试盒,现场测试岩溶水中的 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 的浓度,精度分别达到 2mg/L 和 0.1mmol/L (或 6mg/L) [4~6]。

由于泉水中的主要阴离子 HCO_3^- 浓度的现场滴定频率较低,为了获得连续的 HCO_3^- 浓度数据,所以必须用 CTDP300 高分辨率记录的电导率进行间接估算。先前的研究 [7] 发现,陈旗岩溶泉水的电导率 EC 和 HCO_3^- 浓度 (mg/L) 呈如下线性关系: (HCO_3^-) = $0.29 \times EC + 68.63$ $r = 0.79$ 。

3 结果与分析

3.1 溶蚀试片法结果

2010 年 7 月 4 日,分别在陈旗岩溶泉汇水范围内 3 种不同利用类型的土地(水田、旱地和灌丛)(图 1) 土下 50cm 处各埋放了 9 片溶蚀试片(以梅花形布设外围的 8 个试片点,在梅花形的中心位置布设 1 个试片点)。2011 年 7 月 4 日将这些溶蚀试片全部挖出,带回实验室后,先用超纯水将它们洗净,然后置于 105℃ 的烘箱中烘 12h,烘干后的试片立刻置于干燥器中,等它们的温度降至室温以后,再用万分之一精度的电子天平称重,溶蚀结果数据见表 2。

用陈旗岩溶泉汇水范围内水田、旱地和灌丛的土地利用面积(表 1)对它们各自的年溶蚀速率(表 2)进行加权平均,计算出该岩溶泉系统的年溶蚀速率 $E = 0.00355 g / (cm^2 \cdot a)$ 经单位转换后得出其岩溶作用碳汇强度 $CSF = 9.29 t / (km^2 \cdot a) (CO_2)$ 。水田与旱地溶蚀量的样本标准差相对于灌丛较大,这主要反映了人为扰动的影响。

表2 不同类型土地 50cm 土下溶蚀量

Table 2 Weight loss of limestone tablets at depth of 50 cm of different lands

土地类型	水田	旱地	灌丛
溶蚀量 (g/a)	0.0817	0.1051	0.0164
	0.1819	0.2154	0.0117
	0.1195	0.1279	0.0124
	0.0580	0.2409	0.0051
	0.0621	0.2052	0.0133
	0.0757	0.2034	0.018
	0.0277	0.1462	0.0407
	0.0690	0.0998	0.0260
	0.1853	0.1462	0.0288
	溶蚀量平均值 (g/a)	0.0957	0.1656
样本标准差	0.0553	0.0516	0.0109
年溶蚀速率 (g/(cm ² ·a))	0.00305	0.00527	0.00061

3.2 水化学径流法结果

图2给出了陈旗岩溶泉2010年7月4日~2011年7月4日的水文水化学自动监测结果(这一期间的

降水量为1294.5mm)。由于雨季时陈旗谷地排洪沟中常形成洪水,为区分地表、地下水流的差异,所以分别设置了观测地表、地下流量的复合堰(图3)。

由图2可以看出,排洪沟中地表水的pH与水温 T 较泉眼中涌出的地下水变化幅度大,这主要是因为裸露水体受外界天气影响的程度比地下水强烈的缘故;但是电导率 EC 的变化曲线与泉眼中涌出的地下水的变化曲线几乎重合,这主要是因为排洪沟中的地表水绝大部分是由岩溶地下水通过溶蚀裂隙等通道沿排洪沟线状泄流排泄形成,并且地表水的滞留时间较短,脱碳酸作用较弱所致。由上面的分析可知,陈旗泉眼中地下水的阴离子(HCO_3^-)浓度与电导率的线性关系式适用于排洪沟中的地表水。

岩溶作用碳汇强度的计算采用数值积分的方法,公式如下:

$$CSF = 0.5 \cdot 44 \int_{t_1}^{t_2} (Q_s C_s + Q_g C_g) dt / A$$

$$= 55.07 \text{ t} / (\text{km}^2 \cdot \text{a}) (\text{CO}_2)$$

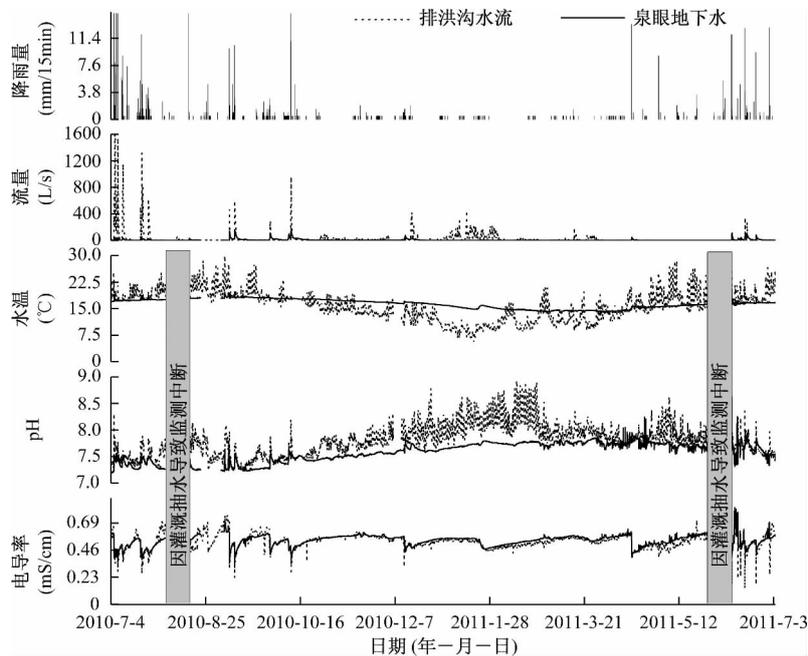


图2 陈旗岩溶泉系统排泄区气象、水文与水化学主要特征过程图

Fig.2 Meteorologic and hydrochemical graph of water in the discharge area of the Chenqi karst spring

式中: Q_s 与 C_s ——排洪沟地表水的流量与 HCO_3^- 浓度;

Q_g 与 C_g ——陈旗泉眼地下水的流量与 HCO_3^- 浓度;

A ——陈旗岩溶泉的汇水面积。

岩溶作用碳汇强度的计算结果见表3。

通过溶蚀试片法和水化学径流法估算出的陈旗岩溶泉系统的岩溶作用碳汇强度分别为 $9.29 \text{ t} / (\text{km}^2 \cdot \text{a}) (\text{CO}_2)$ 和 $55.07 \text{ t} / (\text{km}^2 \cdot \text{a}) (\text{CO}_2)$, 后者的估算值是前者的5.93倍,溶蚀试片法的估算值严重偏小,这主要是由于土壤中残存有碳酸盐岩角砾和原生、次生碳酸盐矿物^[8]造成的。



图 3 陈旗岩溶泉系统排泄区的地表、地下复合堰
Fig. 3 Compound weirs of surface and underground water in discharge area of Chenqi karst spring

笔者利用中科院地化所矿床室的粉晶 X - 射线衍射仪定性分析了水田、旱地和灌丛溶蚀试片埋放点上部土层的矿物组成(表 4),发现土层中碳酸盐矿物的比例大小排列:水田 < 旱地 < 灌丛。陈旗岩溶泉域内地面 10cm 以下主要为棕黄色粘土,粘土骨架中普

表 3 陈旗岩溶泉系统水文水化学与岩溶作用碳汇强度参数
Table 3 Hydrochemical features and karst processes-related carbon sink flux of the Chenqi karst spring system

统计项目	地表	地下	总合
年平均流量(L/s)	25.49	6.44	31.93
年径流深(mm)	609.4	154.0	763.4
径流系数	0.47	0.12	0.59
岩溶作用碳汇强度 (t/(km ² ·a)(CO ₂))	43.74	11.33	55.07

遍含有 1% ~ 2% (X 射线衍射半定量分析结果) 的原生白云石和方解石矿物^[9-10],其中山坡上十年未经人为扰动灌丛从地面 10cm 以下的土层中甚至含有肉眼可见的碳酸盐岩角砾(图 4),其碳酸盐矿物的含量最大(达到 8.27%),这就使得降雨后的下渗土壤水在到达溶蚀试片所在位置之前先期溶解了碳酸盐原生矿物或碎石,从而大大削弱了下渗水的溶蚀能力。

表 4 土体的矿物成分
Table 4 Mineral compositions of the soil

采样点	矿物含量(%)								
	石英	钾长石	铁矿物	角闪石	伊利石	蒙脱石	高岭石	方解石	白云石
水田	89.08	5.84	0.86	—	—	1.87	0.42	0.87	1.06
旱地	88.44	4.76	—	—	0.84	4	—	—	1.96
灌丛	77.29	7.45	—	3.75	—	2	1.24	—	8.27

注:“—”表示未测出

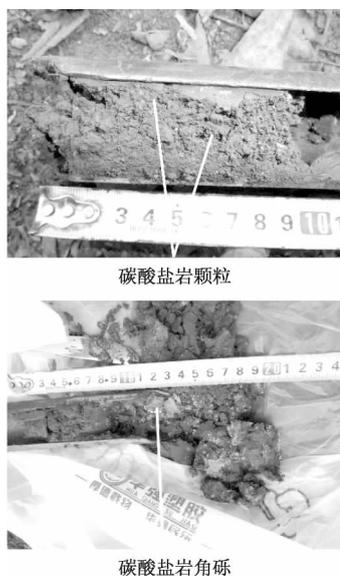


图 4 灌丛土层中的碳酸盐岩碎石
Fig. 4 Carbonate rock breccias in shrub soil

旱地的溶蚀试片溶蚀量平均值大于水田,主要是

因为旱地较高的垂直渗透系数^[7](旱地为 243 mm/h,水田为 6 ~ 7 mm/h)所导致的下渗雨水较多造成的。

此外,溶蚀试片法主要是“以点带面”,即以有限的样本点获取整个流域的信息,而岩溶流域具有土壤覆盖的不连续性与补给方式的多样性(例如渗入式、地表水流入式、注入式、渗透式和渗漏式)^[11],使得有限的样本点不能完全表征岩溶流域内不同下垫面的岩溶碳汇特征。与从宏观尺度估算岩溶流域岩溶作用碳汇强度的水化学径流法相比,溶蚀试片法的代表性存在着一定的问题。

4 结论

就陈旗岩溶泉系统而言,用溶蚀试片法计算出的岩溶作用碳汇强度比用水化学径流法的计算值严重偏小,表明岩溶流域内的土壤碳酸盐(包括原生的和次生的)的存在大大降低了溶蚀试片法的准确性。因此,为准确了解岩溶作用碳汇强度,在今后溶蚀试片法的应用中,应率先开展岩溶流域内土体碳酸盐矿物的

调查分析工作,尽量避免上覆有碳酸盐的土壤剖面。当无法避免碳酸盐的影响时,需充分考虑土体碳酸盐矿物含量对该方法所获结果的影响,此种情况下最好采用水化学径流法或入渗—平衡化学法估算岩溶作用碳汇强度。

致谢:在野外调查过程中,参与采样的有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晏浩,普定喀斯特生态综合试验站的张林、蔡先立,贵州省安顺市普定县城关镇陈旗村的杨长安等4位同志,在此向他们谨致谢忱!

参考文献:

- [1] 袁道先,刘再华,林玉石,等. 中国岩溶动力系统[M]. 北京:地质出版社,2002:116-121. [YUAN D X, LIU Z H, LIN Y S, *et al.* China karst dynamics system [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 116-121. (in Chinese)]
- [2] Gombert P. Role of karstic dissolution in global carbon cycle [J]. *Global and Planetary Change*, 2002, 33: 177-184.
- [3] 刘再华. 岩溶作用及其碳汇强度计算的“入渗—平衡化学法”——兼论水化学径流法和溶蚀试片法[J]. *中国岩溶*, 2011, 30(4): 379-382. [LIU Z H. “Method of maximum potential dissolution” to calculate the intensity of karst process and the relevant carbon sink: With discussions on methods of solute load and carbonate-rock-tablet test [J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(4): 379-382. (in Chinese)]
- [4] 曾成,赵敏,杨睿,等. 不同土地利用下岩溶水系统水化学日动态强度小波分析[J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(1): 86-93. [ZENG C, ZHAO M, YANG R, *et al.* Wavelet analysis of the intensity of diurnal hydrochemical variation of karst water systems under different land use conditions [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(1): 86-93. (in Chinese)]
- [5] 曾成,赵敏,杨睿,等. 高寒冰雪覆盖型和湿润亚热带型岩溶水系统碳汇强度对比[J]. *气候变化研究进展*, 2011, 7(3): 162-170. [ZENG C, ZHAO M, YANG R, *et al.* Comparison of karst process-related carbon sink intensity between an alpine glaciated and snow covered karst water system and humid subtropical karst water system [J]. *Advances In Climate Change Research*, 2011, 7(3): 162-170. (in Chinese)]
- [6] 曾成,赵敏,杨睿,等. 缺土的板寨原始森林区岩溶地下河系统的水—碳动态特征[J]. *地球科学:中国地质大学学报*, 2012, 37(2): 253-262. [ZENG C, ZHAO M, YANG R, *et al.* Characteristics of water-carbon regime of Banzhai karst subterranean stream system covered by virgin forest in soil shortage environment [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(2): 253-262. (in Chinese)]
- [7] 曾成. 湿亚热带岩溶系统水文水化学对不同土地利用的响应研究[D]. 北京:中国地质科学院,2009:149. [ZENG C. Study on the response of hydrology and hydrochemistry of karst systems to different land uses under humid subtropical climate [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2009: 149. (in Chinese)]
- [8] Plan L. Factors controlling carbonate dissolution rates quantified in a field test in the Austrian alps [J]. *Geomorphology*, 2005, 68: 201-212.
- [9] 王玉英,阎长虹,陈明珠,等. 贵州普定陈旗堡地区土体主要理化性质与持水量相关性研究[J]. *地质评论*, 2008, 54(4): 550-556. [WANG Y Y, YAN C H, CHEN M Z, *et al.* A study on water holding-capacity of the soils in Chenqibao area, Puding County, Guizhou Province [J]. *Geological Review*, 2008, 54(4): 550-556. (in Chinese)]
- [10] 陈明珠,阎长虹,王玉英,等. 土体渗透性影响因素——以普定陈旗堡为例[J]. *水文地质工程地质*, 2008, 35(4): 66-70. [CHEN M Z, YAN C H, WANG Y Y, *et al.* The influence factors of soil permeability in Chenqibao village of Puding County [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008, (4): 66-70. (in Chinese)]
- [11] 郭纯青,李文兴. 岩溶多重介质环境与岩溶地下水系统[M]. 北京:化学工业出版社,2006:10-14. [GUO C Q, LI W X. Karst multi-ply media and karst groundwater system [M]. Beijing: Chemic Industry Publishing House, 2006: 10-14. (in Chinese)]

Comparison of karst processes-related carbon sink intensity calculated by carbonate rock tablet test and solute load method: a case study in the Chenqi karst spring system

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

(1. *State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang, Guizhou 550002, China*; 2. *Puding Comprehensive Karst Research and Experimental Station, Institute of Geochemistry, CAS and Science, Puding, Guizhou 562100, China*)

Abstract: Carbonate rock tablet test and solute load method are two important methods for calculating karst processed-related carbon sink intensity. The carbon sink intensity of the Chenqi karst spring system, Puding County, Guizhou Province is calculated respectively by using these two methods. It is found that the carbon sink intensity calculated by carbonate rock tablet test is only one sixth of that estimated by using the solute load method. The reason for this is that there are carbonate rock breccias in the soil in which the carbonate rock tablets are placed, and there are also some primary and secondary carbonate minerals in the soil skeleton. The earlier dissolution of these carbonates greatly decreases the underlying carbonate rock tablet's dissolution amount. The results show that there are some limitations of carbonate rock tablet test, i. e., the presence of carbonate minerals in the overlying soil limits the suitability of this method.

Key words: carbonate rock tablet test; solute load method; karst spring system; carbon sink intensity; Chenqi

责任编辑:汪美华

(上接第 100 页)

A study of the failure process of the Wangxia dangerous rockmass W1 based on site-monitoring

YANG Xiu-yuan^{1,2}, SUN Qiang^{2,3}, YAN E-chuan¹, GAO You-long², JIN Xiao-hao²

(1. *Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China*; 2. *Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding Hebei 071051, China*; 3. *School of Resources and Geoscience, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China*)

Abstract: The analysis of the failure process of the Wangxia dangerous rockmass W1 was performed based on the geological investigation and displacement on-site monitoring data. The Wangxia dangerous rockmass, which is cutted by fissures into a cylindrical shape, is located in Liangping of Wushan county in Chongqing, China. The lithology of the dangerous rockmass is medium or thick layer of chert siliceous argillaceous limestone with intercalation of shale, claystone and coal line. They constituent the hard rock on the slope of soft structure. The research results indicate that the displacement deformation curves of the local and whole dangerous rockmass shows the similarity of process, which can be divided into four stages of the early accumulated deformation, uniform deformation, acceleration deformation and critical deformation. The geological structure and environment of the dangerous rockmass provide the basis for its foundation of deformation and instability. Human activity and rainfall have significant effect on its deformation and failure.

Key words: dangerous rockmass; deformation monitoring; rainfall; evolution process

责任编辑:张若琳