

DOI: 10.5846/stxb201811232546

张瑞 杨勋林 刘秀明 殷建军 刘睿恺 王宝艳. 渝东南近 100 年石笋灰度变化及气候环境意义. 生态学报, 2019, 39(16): 6098–6106.

Zhang R, Yang X L, Liu X M, Yin J J, Liu R K, Wang B Y. Changes of stalagmite grayscale in the last 100 years and significance of climate and environment in the southeast of Chongqing. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 6098–6106.

## 渝东南近 100 年石笋灰度变化及气候环境意义

张 瑞<sup>1,2</sup> 杨勋林<sup>1,2,\*</sup> 刘秀明<sup>3</sup> 殷建军<sup>4</sup> 刘睿恺<sup>1,2</sup> 王宝艳<sup>1,2</sup>

1 西南大学地理科学学院, 西南大学岩溶环境开放实验室, 重庆 400715

2 自然资源部岩溶生态环境-重庆南川野外基地, 重庆 408435

3 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 550081

4 中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部, 广西岩溶动力学重点实验室 桂林 541004

**摘要:** 以采自重庆市酉阳自治县天坑洞的石笋 TK22-1 为研究对象, 利用<sup>230</sup>Th 测年、<sup>210</sup>Pb 测年和石笋纹层等计年法建立了近 100 年来高分辨率、精确定年的石笋灰度序列, 并与器测气象资料对比, 重建了渝东南近 100 年的气候环境变化历史, 进一步明确石笋灰度指示的气候环境意义。研究结果显示, 石笋 TK22-1 灰度值与当地年平均温度呈显著的正相关关系, 与年平均湿度、降雨天数呈显著的反相关关系, 这表明温度和湿度等气候条件是驱动石笋灰度值变化的主要因素。渝东南岩溶槽谷区属于生态环境脆弱区, 薄层土壤对降水的储存能力较弱, 水分是主导土壤湿度变化的主要因素之一。当降水量和地表湿度较大时, 雨水在土壤中滞留时间较少、下渗速度加快, 水岩作用减弱, 土壤水中溶解的有机质和杂质浓度降低, 最终在石笋表面结晶出较为纯净的方解石矿物, 进而使石笋灰度值降低; 反之亦然。当温度较高时地表蒸发量较大, 地表及土壤中湿度较小, 水在土壤和石灰岩地层中滞留时间长, 土壤中有有机质和 CO<sub>2</sub> 的释放量增加, 洞穴滴水中有有机质和杂质浓度升高, 导致石笋中方解石结构疏松、杂质较多, 石笋灰度值较高; 反之亦然。重庆东南岩溶槽谷区近 100 年期间的干旱事件与石笋 TK22-1 灰度序列有较好的对应关系, 干旱事件发生的年代对应着石笋灰度峰值, 即当地降水减少, 发生伏旱时, 石笋灰度值升高, 进一步表明土壤湿度和水岩作用是影响石笋灰度值变化的主要因素。

**关键词:** 石笋; 灰度值; 土壤湿度; 干旱事件; 重庆

## Changes of stalagmite grayscale in the last 100 years and significance of climate and environment in the southeast of Chongqing

ZHANG Rui<sup>1,2</sup>, YANG Xunlin<sup>1,2,\*</sup>, LIU Xiuming<sup>3</sup>, YIN Jianjun<sup>4</sup>, LIU Ruikai<sup>1,2</sup>, WANG Baoyan<sup>1,2</sup>

1 School of Geographical Sciences & Karst Environment Laboratory, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 Field Scientific Observation & Research Base of Karst Eco-environments at Nanchuan in Chongqing, Ministry of Natural Resources of China, Chongqing 408435, China

3 State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Guiyang 550081, China

4 Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China

**Abstract:** One stalagmite (TK22-1) derived from the Tiankeng Cave in Youyang Autonomous County, Chongqing is used as the research object in this article. We established high-resolution and age-accurate grayscale sequence of the last 100 years with accurate <sup>230</sup>Th dating, <sup>210</sup>Pb dating, and layer counting. We reconstructed the history of climate and environmental change of the last 100 years in Chongqing to make the significance of climate and environment that the stalagmite grayscale indicated more explicit by comparing with observed meteorological data. The results show that grayscale

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502301); 国家自然科学基金项目(41572158, 41272192, 41072141)

收稿日期: 2018-11-23; 修订日期: 2019-05-23

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xlyang9999@163.com

<http://www.ecologica.cn>

of stalagmite (TK22-1) is positively associated with the local mean annual temperature, while it is negatively associated with the local mean annual humidity and annual rainfall days. This indicates that climate conditions such as temperature and humidity are the main factors driving the grayscale to change. Karst trough valley area in the southeast of Chongqing is in the ecological environment fragile zone because the thin layer soil has weak storage capacity for precipitation. Water is one of the main causing leading soil humidity to change in this area. With high precipitation and high surface humidity, the retention time of rainwater in soil decreases and infiltration rate speeds up, eventually weakens the water-rock interaction and decreases the concentration of organic matter and impurities dissolved in the soilwater. Thus the purer calcite mineral crystallizes in the surface of stalagmite, and the grayscale decreases, and vice versa. With high temperature and high evaporation, the surface humidity and soil humidity decrease, which prolongs the retention time of water in soil and epikarst zone. The content of organic matter and  $\text{CO}_2$  releasing from soil increases. Meanwhile, the concentration of organic matter and impurities in the cave drip water increases, resulting in the loose structure of calcite and more impurities in stalagmite, and the grayscale increases and vice versa. There is a good correspondence between drought events occurred during the past 100 years in karst trough valley area of the southeast of Chongqing and the stalagmite (TK22-1) grayscale sequence. The grayscale peaked when drought events happened. With the local precipitation decreasing, summer droughts occurred, and the grayscale increased, which indicated that soil humidity and water-rock interaction were the main factors affecting the stalagmite grayscale change.

**Key Words:** stalagmite; grayscale; soil moisture; drought events; Chongqing

洞穴石笋因其具有精确定年、时间跨度大和分辨高等优点,已成为重建古环境研究中的重要工具。过去人们的焦点主要聚集在石笋氧同位素上,基于石笋能够反映亚洲夏季风强弱变化这一基本假设,前人利用亚洲石笋记录重建了不同时间尺度亚洲季风演化历史并探讨其驱动机制<sup>[1-6]</sup>。同时,一些科学家对东亚季风区石笋  $\delta^{18}\text{O}$  能否作为夏季风代用指标也提出许多质疑,认为中国石笋记录可能仅指示水汽来源而非季风强度<sup>[7-10]</sup>。鉴于人们对石笋  $\delta^{18}\text{O}$  的质疑,开发利用石笋其他气候指标综合研究过去环境变迁已经成为石笋古气候研究的新趋势。近日 Zhang 等<sup>[11]</sup> 利用石笋微量元素记录重建出长江中游地区的降水变化,提出了在 Bølling-Allerød 时期季风减弱、降水增多的观点。Wang 等<sup>[12]</sup> 利用石笋中 3-羟基脂肪酸重建出长江中游古温度和古水文变化,实现了石笋中温度和水文信号的剥离。因此,进一步开发和探索石笋新的气候环境指标,是石笋古气候研究的新趋势。相较于石笋  $\delta^{18}\text{O}$  和其他指标,灰度数据具有获取方式简易,对石笋破坏程度低和实验周期短等优点。Baker 等<sup>[13]</sup> 利用在同一地区的泥炭沉积物和石笋中荧光强度进行对比,发现石笋中发光物质波长的增加反映了地表湿度的升高;秦小光和刘东生等<sup>[14-15]</sup> 提出石笋中发光物质主要反映洞穴滴水中有机质的含量和原地生长的有机物数量;杨勋林等<sup>[16]</sup> 研究显示降水量和季风强度对灰度值的影响较大;崔古月等<sup>[17]</sup> 指出太阳活动和季风降水是影响灰度值变化的主要因素;Tan 等<sup>[18]</sup> 利用纹层灰度和温度的对应关系,显示了石笋灰度值与温度之间显著的相关性。目前,针对石笋灰度值所代表的气候环境意义和驱动机理还存在着很大的争议,缺乏具有精确年代的石笋记录与现代器测资料的精细对比。因此,本文以采自重庆市酉阳自治县的一根石笋为研究对象,利用数字图像技术,获取近 100 年高分辨率的石笋灰度序列,并结合当地近 100 年器测气象资料和渝东南地区历史文献进行对比,利用石笋灰度序列和微量元素数据,深入探讨石笋灰度值与干旱指数、器测气象资料之间的关系,进一步明确石笋灰度值所指代的气候环境意义以及驱动机理。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

本文研究的石笋样品(TK22-1)采自重庆市酉阳土家族苗族自治县,酉阳自治县地处  $108^{\circ}18'25''$ — $109^{\circ}19'02''\text{E}$ ,  $28^{\circ}19'28''$ — $29^{\circ}24'18''\text{N}$  之间,重庆市东南部。酉阳自治县地质构造单元位置属新华夏构造体系第三

隆起带的川、黔、湘、鄂褶皱带,县内山体以八面山、武陵山系为主,海拔 263—1895 m,属于典型岩溶槽谷地区。当地气候类型为亚热带湿润季风气候,气候较湿润,年均降水量 1300 mm,年均气温 15℃左右。天坑洞位于酉阳自治县板溪镇,地处于 108°46′32″E、28°44′5″N。此洞穴发育于下奥陶统石灰岩地层,海拔 560 m,洞口较大,洞穴顶板厚度约 30 m,洞穴正上方为小块农田,农田上方为山体,山体最高处海拔约 950 m(图 1)。

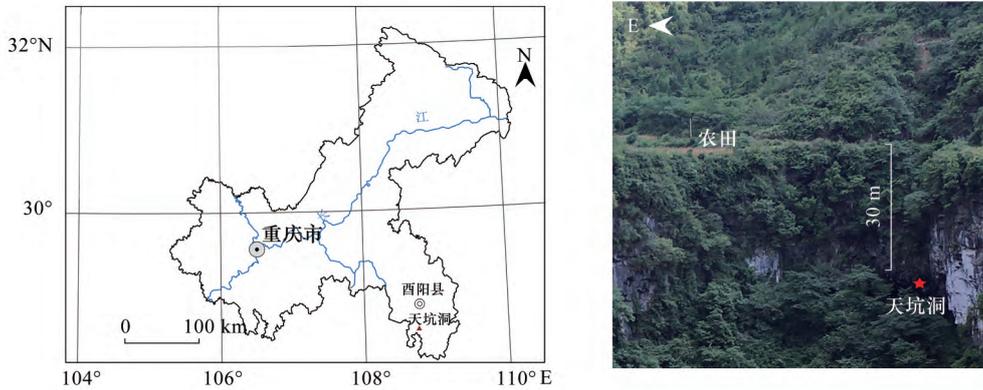


图 1 天坑洞地理位置及其洞口情况

Fig.1 The geographical location and cave condition of Tiankeng Cave

1.2 数据来源及实验方法

石笋 TK22-1 总长 180.0 mm,直径 130.0 mm,呈锥柱状。沿中轴线切开后,如图 2 所示,抛光面上的生长纹层清晰可见,生长核心稳定,说明了石笋所处的水文环境并没有发生太过剧烈的变化。石笋大体呈灰白色,中间含有数条淡黄色条带。本石笋测年工作在西安交通大学同位素实验室完成,仪器采用 MC-ICP-MS(多接收等离子电感耦合质谱仪),年龄样品采自石笋生长轴方向。化学前处理过程以及仪器测试过程与方法参照 Shen 等<sup>[19]</sup>,获得三个<sup>230</sup>Th 年龄数据,均符合沉积序列,表 1 为石笋 TK22-1 的<sup>230</sup>Th 测年结果。石笋<sup>210</sup>Pb 的测试仪器为 ORTEC ALPHA-ENSEMBLE-8 型 α 能谱仪,仪器分辨率为: 17.0 keV,仪器效率: ~27%,测试误差: < 5%,实验方法参照文献<sup>[20]</sup>,测试工作在中国地质科学院岩溶地质研究所完成。本文中显微矿物结构是利用 COXEM EM-30 PLUS 台式扫描电镜在北京欧波同有限公司完成的。

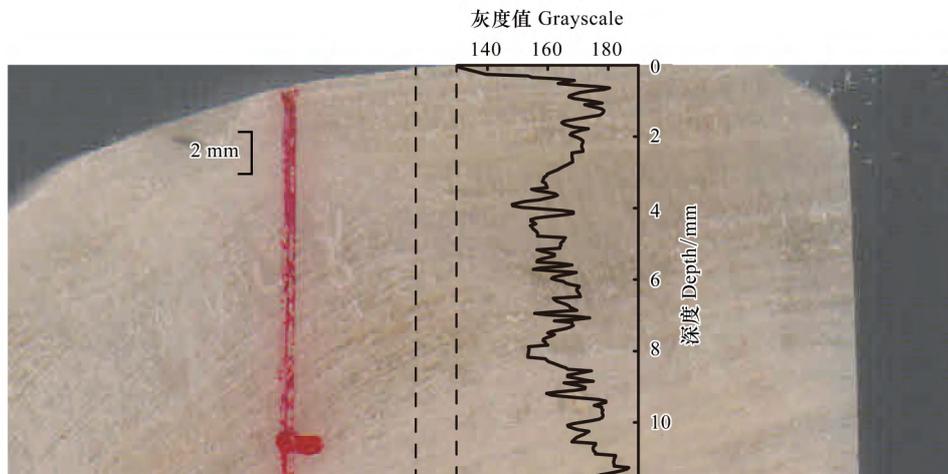


图 2 石笋 TK22-1 的剖光纵切面及其灰度值

Fig.2 Polished longitudinal section and grayscale sequence of stalagmite TK22-1

图中双虚线所夹的区域为被测区域

本文所用到的石笋灰度序列是光面测量方法得到的灰度值,将抛光后的石笋用酒精反复擦拭至表面洁

净, 放置到扫描仪上并保持水平, 并在黑暗的条件下使用扫描仪对抛光剖面进行扫描; 最后选取靠近且平行于生长轴处的图像, 使用古环境记录图像分析软件进行数字化处理提取其灰度值。石笋 TK22-1 灰度值在 130—187 之间变化, 由于本文石笋是通过测量反射光强度来获取的石笋灰度值, 本文中灰度值越大表明石笋表面反光度越强, 反之越弱。在图 2 中展示了该石笋的生长韵律, 很明显地看到石笋具有平直而分明的生长层, 同时在生长轴方向也基本不发生变化。石笋微量元素指标的获取是采用 XRF 岩芯扫描仪, 直接对石笋样品的抛光面进行扫描。XRF 扫描仪可以获得石笋剖面元素的连续变化特征, 并且 XRF 岩芯扫描记录也可反映沉积物各元素组成的相对变化关系。本次测试在云南师范大学地理实验室完成, 采用了 0.2 mm 的分辨率, 沿 TK22-1 的生长轴从顶部到尾部进行扫描, 且避开了测年采样留下的凹槽。

文中用到的重庆市 1891—2015 年降水量资料和酉阳自治县 1951—2015 年器测气象资料下载于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>), 主要用到年平均温度、年平均湿度和年降水量等器测气象资料, 除年降水量和年平均温度外, 其他数据存在部分年份资料缺失。CRUTEM4 栅格式温度距平数据下载于 (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/crutem/ge/>), 引用区域为渝贵地区 (27.5°N, 107.5°E) 和鄂豫地区 (32.5°N, 112.5°E) [21]。重庆市旱涝指数数据来源于《中国近五百年旱涝分布图集》[22-24], 渝东南地区旱涝指数原始资料来源于多本前人汇总的旱涝史料汇编 [25-27], 旱涝指数的建立方法详见张德二等 [23]。

## 2 结果与讨论

### 2.1 石笋年代模型

酉阳天坑洞石笋 TK22-1 在采集时正在滴水, 石笋顶部有一层现代沉积物, 初步判断是正在生长的年轻石笋。而且铀含量较高, 质地致密, 无重结晶、溶蚀等现象, 无明显的沉积间断, 适合  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{230}\text{Th}$  法测年。石笋  $^{210}\text{Pb}$  的测试数据显示过剩  $^{210}\text{Pb}$  呈指数衰减, 表明该石笋为年轻石笋; 根据  $^{210}\text{Pb}$  测试数据计算出石笋平均沉积速率为 0.084 mm/a, 与石笋  $^{230}\text{Th}$  测年数据计算的近 100 年平均沉积速率 0.099 mm/a 在误差范围内基本一致。石笋上部有清晰纹层, 因此石笋近 52 年的年代是通过纹层建立的, 后面 63 年是通过  $^{230}\text{Th}$  测年数据内插获得的。最近 65 年的灰度值与当地气象数据具有较高的相关性, 也表明年代模型是可靠的。

表 1 石笋 TK22-1  $^{230}\text{Th}$  测年结果  
Table 1  $^{230}\text{Th}$  dating results of the stalagmite TK22-1

样品编号 Sample number	深度 Depth/cm	$^{238}\text{U}$ /ppb	$^{232}\text{Th}$ /ppt	原子数 $\times 10^{-6}$ Atomic $\times 10^{-6}$ $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	测量值 Measured $\delta^{234}\text{U}^*$	已校正 Corrected $^{230}\text{Th}$ 年龄(年 公元) $^{230}\text{Th}$ Age (a AD)
TK22-1-1	0.6	1602.7 $\pm$ 4.0	6707 $\pm$ 135	8 $\pm$ 0	79.7 $\pm$ 2.6	1935 $\pm$ 81
TK22-1-2	1.1	1496.2 $\pm$ 3.2	1931 $\pm$ 39	19 $\pm$ 2	82.5 $\pm$ 2.2	1904 $\pm$ 31
TK22-1-3	1.7	1691.3 $\pm$ 3.9	2051 $\pm$ 42	25 $\pm$ 2	83.1 $\pm$ 2.2	1861 $\pm$ 29

Th 衰变常数  $\lambda_{230} = 9.1705 \times 10^{-6}$ , U 衰变常数  $\lambda_{234} = 2.82206 \times 10^{-6}$ ,  $\lambda_{238} = 1.55125 \times 10^{-10}$ ,  $\delta^{234}\text{U} = ([^{234}\text{U}/^{238}\text{U}]_{\text{activity}} - 1) \times 1000$ , 根据  $^{230}\text{Th}$  年龄获得  $\delta^{234}\text{U}$  初始值 =  $\delta^{234}\text{U}$  测试值  $\times e^{\lambda_{234} \times T}$ ,  $^{230}\text{Th}$  初始年龄校正采用  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  平均比值:  $4.4 \pm 2.2 \times 10^{-6}$

### 2.2 石笋灰度气候环境意义

石笋 TK22-1 的灰度值在 1950—2006 年期间呈现出整体上升的趋势, 在 1950—1970 年间, 灰度值发生多次的波动, 其中 1957—1968 年间, 灰度值波动幅度较大, 最大振幅可达 18, 此期间出现两个较高峰值和一个低谷值, 随后灰度值快速上升; 2006 年上升至 180, 在 1990—2006 年期间出现多次明显波动, 波动幅度在 14 左右; 2006—2015 年灰度值呈下降趋势。图 3 中黄色矩形区域是该地区干旱事件发生的年代 [28], 分别为 1960 年、1966 年、1981 年、1987 年、1994 年、2006 年和 2011 年, 这些年代同时较好地对应着灰度值的峰值, 也显示着干旱事件发生时, 石笋灰度值升高。石笋 TK22-1 的灰度值与其他器测气象资料有着明显的相关性, 用 SPSS 17.0 数据处理软件将其进行相关性分析得到表 2, 分析结果显示: 石笋 TK22-1 灰度值与当地年平均温度呈显著的正相关关系, 和湿度、年降水天数呈负相关关系; 与年降水量和蒸发量也具有一定的相关关系, 但

均未达到显著相关性检验。尽管石笋灰度值与降水量没有达到显著的相关关系,但是由图 3 可以发现,石笋灰度值升高的时段绝大部分对应着降水量减少的年份,特别是在一些干旱年份,比如 2006 年川渝地区百年不遇的高温干旱,受灾面积 132.7 万  $\text{hm}^2$ ,高温少雨致使伏旱加重,持续时间超过 3 个月,对应的石笋灰度值达到峰值,同样的情况包括 1960 年、1965 年和 2011 年等。

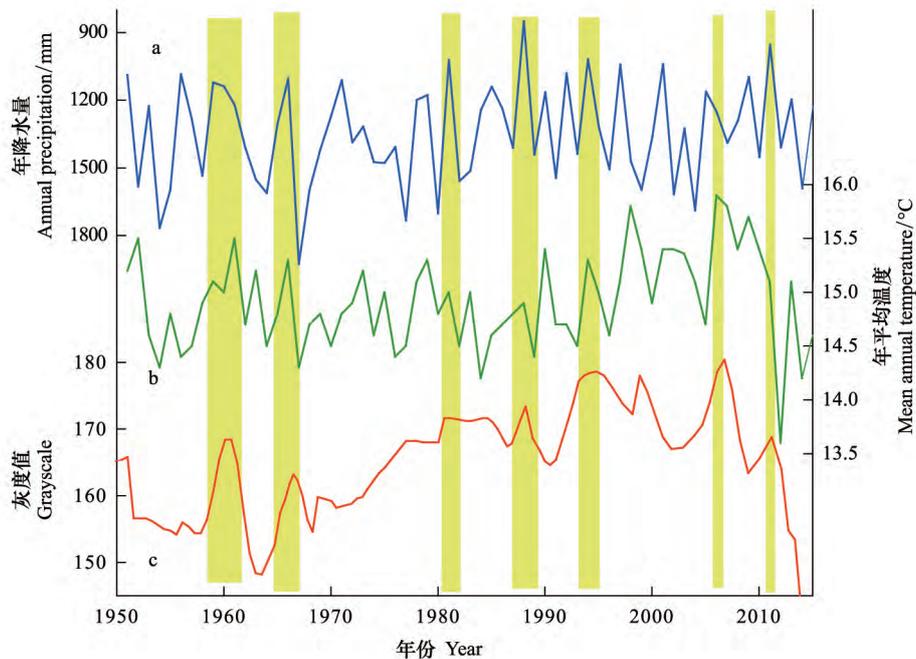


图 3 石笋 TK22-1 灰度序列与酉阳地区 1951—2015 年器测气象资料对比

Fig.3 Comparison of the stalagmite TK22-1 grayscale sequence with the observed data in Youyang during 1951—2015

(a) 酉阳自治县年降水量曲线; (b) 酉阳自治县年平均温度曲线; (c) 石笋 TK22-1 灰度序列; 图中黄色矩形代表该地区干旱发生时期<sup>[26]</sup>

表 2 石笋 TK22-1 灰度值与酉阳地区器测气象资料的相关性分析

Table 2 Correlation of the stalagmite TK22-1 grayscale with the observed data in Youyang area

数据名称 Data name	相关系数 $R$ Correlation coefficient	相关系数显著性 $P$ Correlation coefficient significance	变量数 $N$ Number of variables
年降水量 Annual precipitation	-0.167	0.184	65
年平均温度 Mean annual temperature	0.318*	0.010	65
降雨天数 Raining days	-0.230	0.079	59
年平均湿度 Mean annual humidity	-0.311*	0.017	59
蒸发量 Evaporation	0.203	0.241	35

\* 表示相关性检验  $P < 0.05$

无论是年降水量、年平均温度,还是降雨天数、年平均湿度、蒸发量都是影响土壤湿度(含水量)的重要因素,且土壤湿度直接影响洞穴滴水在土壤-围岩中的滞留时间、水量的大小以及洞穴滴水快慢等因素,因此,我们认为在岩溶槽谷区温度和土壤湿度是影响石笋灰度的重要因素。

温度对石笋灰度值的影响较为复杂。在相同的降水条件下,温度升高、地表蒸发量上升、土壤含水量下降,水分在土壤和石灰岩地层中滞留时间增长,溶解的土壤有机质和杂质浓度升高,造成洞穴滴水中的有机质和杂质浓度也升高,石笋中矿物的性质因溶质浓度的升高而发生改变,使组成石笋的方解石结构疏松、颜色发白、灰度值较高;反之当温度降低时,地表蒸发量减少,土壤中水分损失量减少。在相同的降水条件下,水分在土壤\围岩中流速较快,所含溶质减少,沉积出的方解石结晶较纯净,结构致密、反光性差、颜色较深、灰度值偏低。同时,我们对石笋 TK22-1 进行了微量元素的扫描,并将扫描结果与灰度值进行对比和分析,得到石笋

TK22-1 灰度值与磷元素(P)含量呈显著的相关性( $R=0.445, N=39, P<0.01$ ),与钙元素(Ca)含量也具有显著的相关性( $R=0.327, N=39, P<0.05$ ) (图4)。其中石笋中的磷元素主要来源为土壤中无机磷和有机磷化合物,因洞穴滴水进入石笋中以磷酸盐的形式储存起来,因此石笋中磷元素含量可以较好地反映洞穴滴水中有有机质含量的变化<sup>[29]</sup>。另外,Christ 等<sup>[30]</sup>观测到在适宜的条件下土壤可溶性有机碳含量随温度升高而逐渐增加,这是因为温度升高会使微生物加快繁殖,促进了微生物对植物和动物遗体的分解,从而增加土壤水中无机质和有机质含量。这也表明当温度升高时,土壤水和洞穴滴水中的杂质浓度上升,导致溶液中晶核增多、结晶速率加快,析出小而白的方解石颗粒<sup>[31]</sup>,最终使石笋表面反光性增强、灰度值升高。图5的电镜扫描结果显示,灰度值高的区域,方解石结晶较小且含杂质较多;灰度值低的区域,方解石结晶纯净,结构致密。另外石笋中主要矿物为方解石( $\text{CaCO}_3$ ),钙元素是构成方解石的主要元素之一,Ca含量的变化直接反映着石笋矿物中 $\text{CaCO}_3$ 含量的变化,Ca含量与灰度值的正相关关系表明灰度值高时,石笋中碳酸钙含量较高。

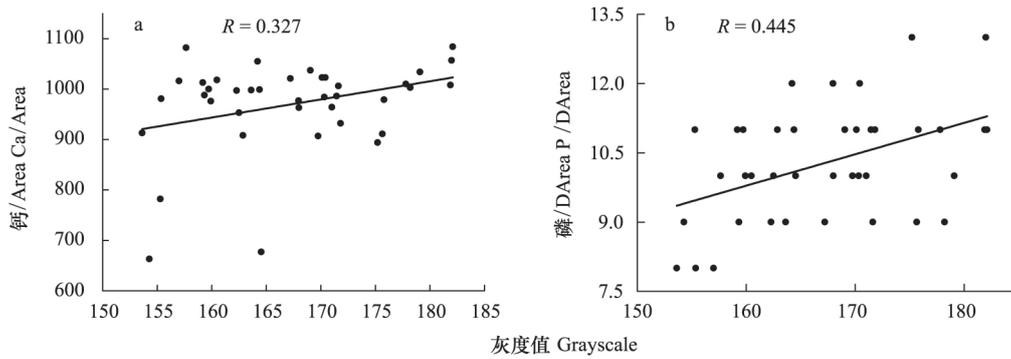


图4 石笋 TK22-1 灰度值与微量元素含量的相关性统计图

Fig.4 Correlation of grayscale with trace element concentration

图 (a) (b) 分别为石笋 TK22-1 灰度值与钙元素和磷元素含量的相关性统计图

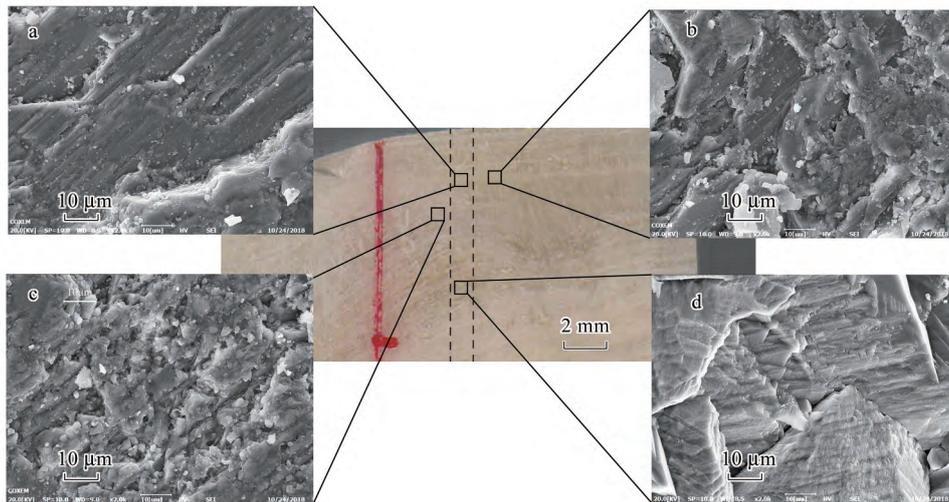


图5 石笋 TK22-1 显微矿物结构

Fig.5 Microscopic mineral structure of stalagmite TK22-1

图 (a) (b) (c) 为灰度值较高区域,方解石结晶疏松;(d) 为灰度值较低区域,方解石结晶致密

石笋中的碳酸钙主要由富含  $\text{CO}_2$  的水溶液溶解围岩所得到,而洞穴滴水中的  $\text{CO}_2$  来自于土壤水溶解大气和土层中的  $\text{CO}_2$ ,此过程受温度影响较大。最近有学者通过研究发现<sup>[32]</sup>随着全球变暖,土壤呼吸所产生的  $\text{CO}_2$  总量也在增加,正是因为全球变暖加强了植物和微生物的异养呼吸,导致土壤碳流失的程度增加,此现象

正发生在许多地区的生态系统中,这种趋势还将持续。当土壤中  $\text{CO}_2$  含量随温度升高而上升时,岩水中的  $\text{CO}_2$  含量以及溶解的碳酸钙的量增加,饱和  $\text{CaCO}_3$  的水溶液在石笋表面发生沉积时,因溶液中  $\text{CO}_2$  分压较高、逸出量增多,  $\text{CaCO}_3$  沉积速率加快,最终导致方解石结晶不充分、结构疏松、颜色发白,石笋灰度值上升。

表 3 酉阳地区年平均湿度与其他器测气象资料的相关性分析

Table 3 Correlation of annual average humidity and other observed data in Youyang area

数据名称 Data name	相关系数 $R$ Correlation coefficient	相关系数显著性 $P$ Correlation coefficient significance	变量数 $N$ Number of variables
年降水量 Annual precipitation	0.385 **	0.002	60
年平均温度 Mean annual temperature	-0.577 **	0.000	60
降雨天数 Raining days	0.698 **	0.000	60
蒸发量 Evaporation	0.203	0.241	35

\* \* 表示相关性检验  $P < 0.01$

降水量和降雨天数也是影响土壤湿度的重要因素。石笋灰度虽与降水相关性未达到显著相关性,但与当地年平均湿度和降雨天数呈显著的相关性,这说明石笋灰度受当地土壤含水量和地表湿度的影响,而这些因素与降水量息息相关。在岩溶槽谷区土层薄,蓄水能力差,雨水落至地表后快速下渗,导致岩溶区植被对水分的依赖性较强;并且当地在夏季因受副热带高压的控制,易发生伏旱等高温灾害,经过湿度与其他气象数据的分析得到温度和降水都是影响当地湿度变化的主要因素(表 3)。结合石笋灰度值和气象数据的相关关系以及岩溶槽谷区地貌特征,当降水量和地表湿度较高时,雨水在土壤中下渗速度加快,滞留时间较短,在土壤-围岩中水岩作用减弱,水中溶解的土壤有机质和杂质浓度下降,最终在石笋表面结晶出较为纯净的方解石矿物,进而使石笋灰度值降低;反之,当地发生伏旱时,持续的高温少雨使地表湿度和土壤含水量下降,水分在土壤-围岩中运移速度减缓,溶解土壤有机质和杂质浓度升高,使得石笋表面方解石结晶疏松、颗粒较小、颜色发白,石笋灰度值升高。

### 2.3 近 100 年灰度值变化

石笋 TK22-1 灰度值在 1900—2015 年期间变化趋势明显:灰度值在 1900—1960 年持续下降,1960—2006 年逐步上升,2007 年之后降至最低;其中波动幅度较大的时段有 1900—1920 年、1930—1950 年、1960—1970 年、1980—2010 年;灰度序列与黄色矩形交叉的年份,为重庆东南部干旱灾害发生的时期,主要年份包括:1914、1942、1960、1966、1994、2006 和 2011 年,这些年代均对应着灰度值的峰值且与前后数值变化较大;重庆市 1891—2015 年年降水量曲线显示,在干旱事件发生时重庆地区降水量明显减少,且达到较低值,同时也是重庆以及附近地区温度较高时期。在图 6 中显示灰度值与降水量、温度和旱涝指数均有着很好的对应性,且各曲线变化趋势相似,这进一步证明了灰度值所代表的气候环境意义,即灰度值高时气候干旱,土壤中水分含量较少,水岩作用强烈,溶解的有机质和杂质浓度较高,方解石结晶疏松、颜色发白,石笋灰度值较高;反之气候较为湿润,雨水在土壤中下渗速度较快,水分与土壤-围岩接触时间较短,溶解的有机质和杂质浓度较低,方解石结晶纯净,石笋灰度值较低。

### 3 结论

本文利用来自重庆市酉阳自治县天坑洞高分辨率的石笋 TK22-1 灰度序列和精确的年代模式,并结合石笋微量元素、器测气象资料和旱涝史料等数据,分析石笋灰度值与器测气象资料的关系,进一步明确石笋灰度值的气候环境意义:

(1) 石笋 TK22-1 灰度值与当地温度呈正相关关系,与湿度和降雨天数呈负相关关系,这说明石笋灰度值的变化主要受当地气候影响。岩溶槽谷区具有土层薄、多伏旱等特点,当地植被对土壤湿度依赖性强,温度和降水对当地环境影响较大,且降水控制着土壤-围岩中的水岩作用,水岩作用决定洞穴滴水中的溶质变化,因

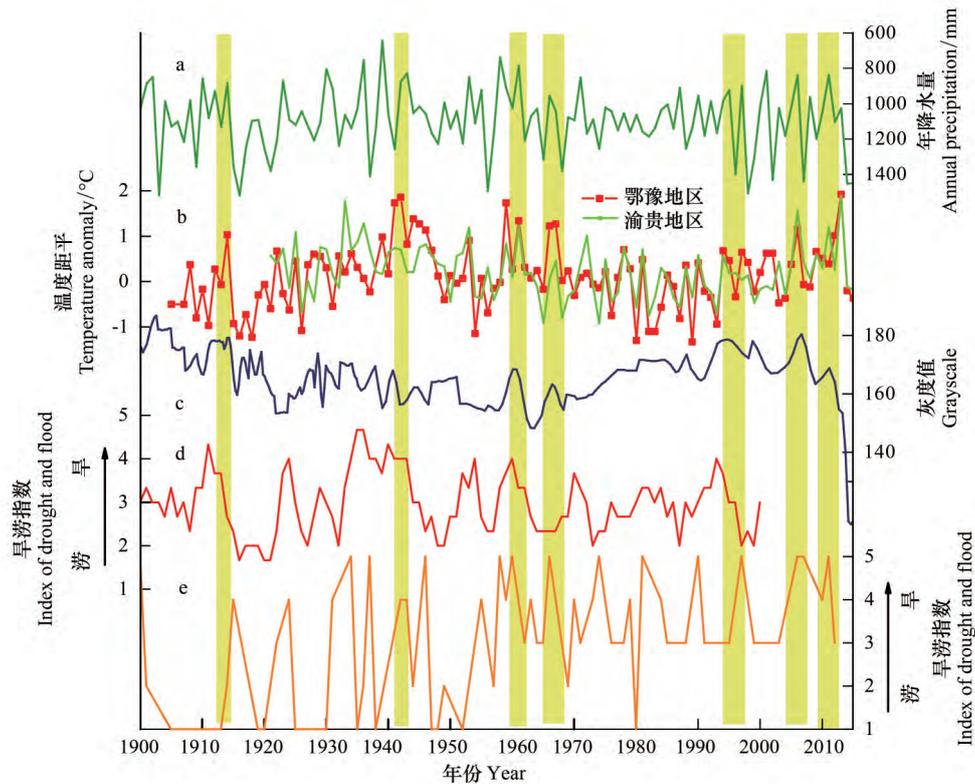


图 6 石笋 TK22-1 灰度序列与其他记录对比

Fig.6 Comparison of the stalagmite TK22-1 grayscale sequence with other paleoclimatic records

(a) 重庆 1891—2015 年年降水量曲线; (b) 渝贵地区 (27.5°N, 107.5°E) 1921—2015 年温度曲线, 鄂豫地区 (32.5°N, 112.5°E) 1905—2015 年温度曲线<sup>[21]</sup>; (c) 石笋 TK22-1 灰度序列; (d) 重庆市近 100 年旱涝指数<sup>[22-24]</sup>(曲线为原数据经 Origin 8.0 利用 2 点平滑方法得到); (e) 渝东南近 100 年旱涝指数, 旱涝指数越大代表干旱程度越强; 图中黄色矩形为当地干旱灾害发生时期

此石笋的生长状态可以较好地响应当地降水和温度的变化,也可以充分地反映当地气候环境变化。

(2) 温度对石笋 TK22-1 灰度值的影响较为复杂,在相同的降水条件下,温度升高、地表蒸发量上升、土壤含水量下降,水分在土壤-围岩中滞留时间增长,溶解的土壤有机质和碳酸钙含量升高,同时,温度上升促进了土壤微生物对有机质的合成和 CO<sub>2</sub>的释放,造成洞穴滴水中的有机质和碳酸钙含量升高。石笋的矿物性质因溶质含量的升高而发生改变,使组成石笋的方解石结构疏松、颜色发白、灰度值较高;反之当温度降低时,土壤中有有机质的合成和 CO<sub>2</sub>的释放量减少,且水分在土壤-围岩中滞留时间相对减少,洞穴滴水中的有机质和碳酸钙含量降低,沉积出的方解石结晶较纯净,结构致密、反光性差、颜色较深、灰度值偏低。

(3) 石笋灰度值与湿度、降雨天数呈现出的显著相关性表明,当降水量和地表湿度较高时,雨水在土壤中滞留时间较少、下渗速度加快,水岩作用减弱,土壤水中溶解的有机质和杂质浓度降低,最终在石笋表面结晶出较为纯净的方解石矿物,进而使石笋灰度值降低;反之,当地发生伏旱时,持续的高温少雨使土壤含水量下降,水分在土壤和围岩中运移速度减缓,溶解的土壤有机质和杂质含量增加,使得石笋表面方解石结晶疏松、颗粒较小、颜色发白,石笋灰度值升高。

(4) 重庆东南岩溶槽谷区近 100 年期间发生了多起严重的干旱事件,主要发生在:1914、1942、1960、1966、1994、2006 和 2011 年。石笋 TK22-1 灰度序列与干旱事件有较好的对应关系,干旱事件发生年代对应着石笋灰度峰值,即当地降水减少,发生伏旱时,石笋灰度值升高。

#### 参考文献(References):

[1] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, An Z S, Wu J Y, Shen C C, Dorale J A. A high-resolution absolute-dated late pleistocene monsoon record

<http://www.ecologica.cn>

- from Hulu Cave, China. *Science*, 2001, 294( 5550): 2345–2348.
- [ 2 ] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, He Y Q, Kong X G, An Z S, Wu J Y, Kelly M J, Dykoski C A, Li X D. The holocene asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic Climate. *Science*, 2005, 308( 5723): 854–857.
- [ 3 ] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, Kong X G, Shao X H, Chen S T, Wu J Y, Jiang X Y, Wang X F, An Z S. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224, 000 years. *Nature*, 2008, 451( 7182): 1090–1093.
- [ 4 ] Yuan, D X, Cheng H, Edwards R L, Dykoski C A, Kelly M J, Zhang M L, Qing J M, Lin Y S, Wang Y J, Wu J Y, Dorale J A, An Z S, Cai Y J. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon. *Science*, 2004, 304( 5670): 575–578.
- [ 5 ] Cheng H, Edwards R L, Broecker W S, Denton G H, Kong X G, Wang Y J, Zhang R, Wang X F. Ice age terminations. *Science*, 2009, 326( 5950): 248–252.
- [ 6 ] Cheng H, Edwards R L, Sinha A, Spötl C, Yi L, Chen S T, Kelly M, Kathayat G, Wang X F, Li X L, Kong X G, Wang Y J, Ning Y F, Zhang H W. The Asian monsoon over the past 640, 000 years and ice age terminations. *Nature*, 2016, 534( 7609): 640–646.
- [ 7 ] Clemens S C, Prell W L, Sun Y B. Orbital-scale timing and mechanisms driving Late Pleistocene Indo-Asian summer monsoons: reinterpreting cave speleothem  $\delta^{18}\text{O}$ . *Paleoceanography*, 2010, 25( 4), PA4207.
- [ 8 ] 谭明. 环流效应: 中国季风区石笋氧同位素短尺度变化的气候意义——古气候记录与现代气候研究的一次对话. *第四纪研究*, 2009, 29( 5): 851–862.
- [ 9 ] Zhang D E, Li H C, Ku T L, Lu L H. On linking climate to Chinese dynastic change: spatial and temporal variations of monsoonal rain. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55( 1): 77–83.
- [ 10 ] Pausata F S R, Battisti D S, Nisancioglu K H, Bitz C M. Chinese stalagmite  $\delta^{18}\text{O}$  controlled by changes in the Indian monsoon during a simulated Heinrich event. *Nature Geoscience*, 2011, 4( 7): 474–480.
- [ 11 ] Zhang H B, Griffiths M L, Chiang J C H, Kong W W, Wu S T, Atwood A, Huang J H, Cheng H, Ning Y F, Xie S C. East Asian hydroclimate modulated by the position of the westerlies during Termination I. *Science*, 2018, 362( 6414), 580–583.
- [ 12 ] Wang C F, Bendle J A, Zhang H B, Yang Y, Liu D, Huang J H, Cui J W, Xie S C. Holocene temperature and hydrological changes reconstructed by bacterial 3-hydroxy fatty acids in a stalagmite from central China. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 192: 97–105.
- [ 13 ] Baker A, Caseldine C J, Gilmour M A, Charman D, Proctor C J, Hawkesworth C J, Phillips N. Stalagmite luminescence and peat humification records of palaeomoisture for the last 2500 years. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 165( 1): 157–162.
- [ 14 ] 秦小光, 刘东生, 谭明, 李铁英, 吕金波, 丁仲礼, 刘嘉麒, 聂高众. 北京石花洞石笋微层灰度变化特征及其气候意义——I. 微层显微特征. *中国科学(D 辑)*, 1998, 28( 1): 91–96.
- [ 15 ] 刘东生, 谭明, 秦小光, 赵树森, 李铁英, 吕金波, 张德二. 洞穴碳酸钙微层理在中国的首次发现及其对全球变化研究的意义. *第四纪研究*, 1997, 17( 1): 41–51.
- [ 16 ] 杨勋林, 袁道先, 张月明, 黄帆, 孙玉川, 杨琰. 湖北仙女山人工隧洞现代石笋气候学——灰度及其指示意义. *中国岩溶*, 2012, 31( 3): 248–252.
- [ 17 ] 崔古月, 杨勋林, 方默勤, 孙喜利, 史志超, 王宝艳. 全新世早期石笋灰度序列记录的气候环境信息分析——以重庆羊口洞石笋为例. *中国岩溶*, 2017, 36( 2): 171–178.
- [ 18 ] Tan M, Liu T S, Hou J Z, Qin X G, Zhang H C, Li T Y. Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2650-year stalagmite record of warm season temperature. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30( 12): 1617.
- [ 19 ] Shen C Z, Wu C C, Cheng H, Edwards R L, Hsieh Y T, Gallet S, Chang C C, Li T Y, Lam D D, Kano A, Hori M, Spötl C. High-precision and high-resolution  $^{230}\text{Th}$  dating for coral and speleothem carbonates by MC-ICP-MS with SEM protocols. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 99: 71–86.
- [ 20 ] 殷建军, 李红春, 沈川洲, 李廷勇, 林玉石, 覃嘉铭, 唐伟, 王华, 杨会. 年轻石笋平均沉积速率的确定——多方法探讨. *地质学报*, 2015, 89( 10): 1884–1891.
- [ 21 ] Osborn T. J., Jones P. D. The CRUTEM4 land-surface air temperature data set: construction, previous versions and dissemination via Google Earth. *Earth System Science Data*, 2014, 6( 1): 61–68.
- [ 22 ] 中央气象局气象科学研究所. 中国近五百年旱涝分布图集. 北京: 地图出版社, 1981: 321–332.
- [ 23 ] 张德二, 刘传志. 《中国近五百年旱涝分布图集》续补( 1980—1992 年). *气象*, 1993, ( 11): 41–45.
- [ 24 ] 张德二, 李小泉, 梁有叶. 《中国近五百年旱涝分布图集》的再续补( 1993~2000 年). *应用气象学报*, 2003, 14( 3): 397–388.
- [ 25 ] 曾汉轩. 酉阳县志. 重庆: 重庆出版社, 2002: 65–80.
- [ 26 ] 四川省气象局资料室编辑. 四川省近五百年旱涝史料. 成都: 四川省气象局资料室, 1978: 120–139.
- [ 27 ] 水利部长江水利委员会. 四川两千年洪灾史料汇编. 北京: 文物出版社, 1993, 110–170.
- [ 28 ] 程燕, 罗丹, 张会, 董伟杰, 胡晓. 1955–2013 年酉阳县干旱灾害评价研究. *现代农业科技*, 2016( 13): 247–248.
- [ 29 ] 段凤君, 胡超涌, 阮骄阳, 李成展. 岩溶滴水中痕量硼的测定及其古环境意义. *中国岩溶*, 2012, 31( 2): 115–120.
- [ 30 ] Christ J, David M B. Temperature and moisture effects on the production of dissolved organic carbon in a Spodosol. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28( 9): 1191–1199.
- [ 31 ] 南京地质学校. 矿物学. 北京: 地质出版社, 1978: 72–83.
- [ 32 ] Bond-Lamberty B, Bailey V L, Chen M, Gough C M, Vargas R. Globally rising soil heterotrophic respiration over recent decades. *Nature*, 2018, 560( 7716): 80–83.