

旅游洞穴碳酸钙景观恢复的水文地球化学试验^{*}

——以云南弥勒白龙洞为例

王 静¹, 向昌国², 宋林华¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 吉首大学资源与环境学院, 湖南 吉首 416000)

摘 要: 结合已有关于旅游洞穴景观恢复的研究方法和试验思路, 在云南弥勒白龙洞进行模拟洞穴景观形成过程的水文地球化学试验。通过缜密选点和关键水文地球化学数据的确定, 论证了喀斯特水代替大气降水不仅能够解决干燥洞穴中洞穴水来源不足的问题, 而且能够促进洞穴景观沉积, 为恢复旅游洞穴中破损、干裂景观和保护旅游资源提供新的思路和方法。

关键词: 旅游洞穴; 景观恢复; 水文地球化学试验

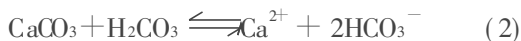
中图分类号: P596; P931.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2004) S1-0208-04

旅游设施的建设和游客的涌入, 洞穴水文地质条件和表层喀斯特特征的改变, 往往导致洞穴环境的巨大变异, 碳酸钙景观强烈风化, 科学价值和观赏价值严重受挫。目前, 许多学者为保护洞穴环境和碳酸钙景观, 进行了大量研究和试验工作, 并取得了丰富的成果^[1-3]。本文主要运用水文地球化学试验的方法, 论证改善表层喀斯特水文地质特征对促进洞穴碳酸钙景观沉淀的积极作用。

1 试验机理

1.1 洞穴水形成的水文地球化学过程

大气降水渗入土壤后溶解土壤空气中的 CO₂, 形成土壤碳酸水, 当它与洞穴上方的碳酸盐岩接触时发生溶蚀反应, 形成富含碳酸氢钙的喀斯特水。这种喀斯特水到达洞穴岩石顶板从上滴落, 或在毛细力作用下从微裂隙或孔隙中渗出, 或以集中流的形式排入洞穴中时, 成为洞穴水, 化学变化过程如下:



1.2 洞穴景观形成的水文地球化学机理

洞穴景观主要由溶蚀景观和沉积景观组成, 其中次生碳酸钙化学沉积景观是最主要的洞穴旅游资源。洞穴水中 CO₂ 与空气中的 CO₂ 之间存在着分压力差 ΔP_{CO_2} , 在分压力差的驱动下形成了洞穴中碳酸钙的各种景观:

$$\Delta P_{\text{CO}_2} = \Delta P_{\text{CO}_2(\text{l})} - \Delta P_{\text{CO}_2(\text{g})} \quad (3)$$

当 $\Delta P_{\text{CO}_2} > 0$ 时, 水溶液中的 CO₂ 就会逸出, 这样会使洞穴水中的 CaCO₃ 过饱和, 引起碳酸钙沉积, 形成洞穴化学沉积景观。所产生的反应如下:



当 $\Delta P_{\text{CO}_2} < 0$ 时, CO₂ 从洞穴空气中溶入水体, 使水体具备进一步溶蚀的能力, 易形成洞穴溶蚀景观。当 $\Delta P_{\text{CO}_2} = 0$ 时, 水体中的 CO₂ 与洞穴空气中的 CO₂ 达到平衡, 此时 CO₂ 的溶解度会因环境温度的影响而变化。

2 试验区概况

白龙洞景区位于云南省弥勒县境内, 属于亚热带半湿润常绿阔叶林红壤地带, 气候温暖湿润, 干湿季分明, 平均年气温 17.3 °C, 年均降雨量 970 mm^[4]。白龙洞发育于节理裂隙发育的下中三叠统灰质白云岩中。白龙洞全长 1 118.8 m, 洞体呈“∞”形分上下两层, 上层长 477 m, 下层长 641.8 m。洞内有 2 个天窗 3 个洞口, 游道平直平均宽度 2 m 左右, 有利于洞内空气的流通。洞内 CO₂ 浓度约为 $600 \times 10^{-6} \sim 700 \times 10^{-6}$, 空气温度恒定在 18.5 °C 左右, 除雨季外, 洞穴湿度仅为 37% ~ 45%^[5]。白龙洞内碳酸钙景观丰富但多披覆土状风化物, 景观变色、风化干裂和脱皮现象严重。

为改善景观状况, 设想通过地表人工滴灌增加

* 收稿日期: 2004-01-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90202017; 410071017)

作者简介: 王静 (1975 年生), 女, 博士研究生; E-mail: wangjing@igsnr.ac.cn

地下洞穴滴水 and 洞穴湿度，使碳酸钙景观复生。试验水源有采自地下河的喀斯特水和雨水两种，它们的水化学特征如表 1。

表 1 自来水与雨水水化学特征

Tah 1 Compositions of rain water and Karst water

水样	水温 ℃	$\rho(\text{HCO}_3^-)$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Ca^{2+} ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH	Ω ($\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)
雨水	16.7	13.0	5.02	8.26	24.6
喀斯特水	20	294.5	86.1	7.44	873

3 水文地球化学试验

3.1 试验方法

本试验采用滴灌地表喀斯特水，通过洞中采样、现场和实验室分析相结合的途径与自然滴水中因 CaCO_3 沉淀从水中带走的 Ca^{2+} 量（以下称损失量）进行对比。地表滴水胶管长 2.0m，管上每隔 10cm 钻 1 个直径 2mm 孔，水从小孔中涌出，渗入土壤进入洞穴中，水量可由阀门控制。

3.2 试验点选择

4 月 24 日 14:40 打开阀门，同日 19:35 分洞内产生了若干滴水点，为了便于采样观测点在 DP1-1 和 DP1-2 两点中选择。DP1-1 滴水点距离采水点 14.16 m，DP1-2 滴水点距离采水处 2.6 m。4 月 25 日 6:40 关闭阀门，试验共耗水约 25 m^3 。两个观测点水文曲线如图 1。

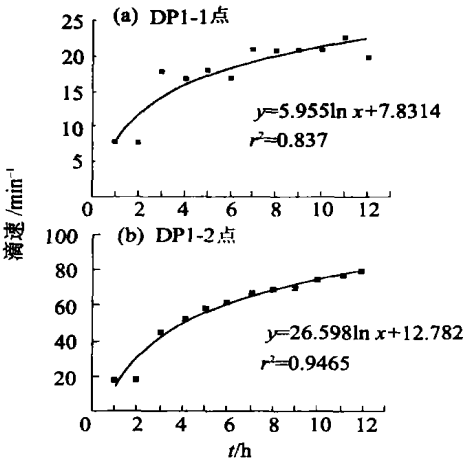


图 1 滴速上升曲线

Fig. 1 Change of dripping velocity with surface water supply

图 1 说明，在地表供水阶段，DP1-1 点的滴速上升缓慢，上升系数为 5.955，而 DP1-2 点的滴速上升很快，系数为 26.598。

图 2 说明地表停止供水后 DP1-1 点很快停止滴

水，持续时间为 6 h，衰减系数 12.058，而 DP1-2 点在相同 6 h 内滴速缓慢降低，直到 229 h 之后，即 5 月 6 日才停止滴水，衰减速度较慢，衰减系数为 10.916。

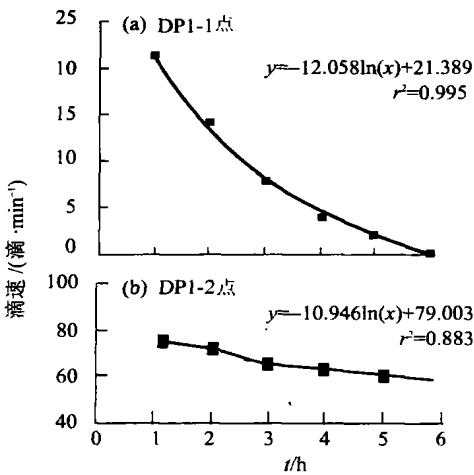


图 2 滴速衰减曲线

Fig. 2 Change of dripping velocity without surface water supply

以上分析表明，DP1-1 点滴水滞后性强、衰减快，不利于长时间观测，而 DP1-2 点处滴水持续时间长，能够充分地掌握观测数据，因此试验点确定为 DP1-2 点。

4 讨论与结论

水中碳酸钙饱和度用 SI_c 表示，是指示碳酸钙景观形成的重要数据， SI_c 升高说明水中 CO_2 逸出，为碳酸钙沉淀提供有利条件，其计算公式^[6]为：

$$SI_c = \lg[\text{Ca}^{2+}] + \lg[\text{HCO}_3^-] + \text{pH} - \text{p}K_2 + \text{p}K_e$$

式中 $[\text{Ca}^{2+}]$ 和 $[\text{HCO}_3^-]$ 分别是水溶液中 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的浓度， $\text{p}K_2$ 和 $\text{p}K_e$ 是与滴水水温相关的两个常量。

DP1-2 处上、下采样点间的高差为 2.44 m，2003 年 5 月 6—9 日分别对两点的 SI_c 变化状况进行观测、计算分析，结果示于图 3 中。图 3 表明下部水样碳酸钙饱和度高于上部水样，即滴水滴落过程中 CO_2 不断从水中逸出，因此在水体过饱和的前提下 CaCO_3 能够不断产生沉淀。表 2 与图 3 对应性地说明水滴落过程中 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 含量的变化。

为了将人工试验的结果与自然状态下的洞穴景观形成过程对比，我们在同年雨季期间选择了 3 个雨水滴水点，即长期滴水点 DP2-1、DP2-2，季节性滴水点 DP2-3，同一滴水点采样的高度差为 1.86 m，观测的方法与 DP1-2 方法相同。雨水进入洞穴

后滴落过程中成分变化见表 3。

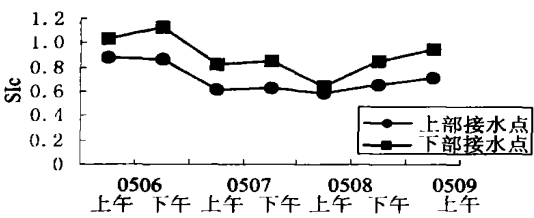


图 3 DP1-2 点 SI_c 变化图

Fig 3 Variation of SI_c with time at site DP1-2

表 2 喀斯特水—洞穴水滴落过程成分变化表

Tah 2 Change of compositions of Kairst water and cave water during dripping

时间	接水位置	$c(Ca^{2+})$ ($mg \cdot L^{-1}$)	Ca^{2+} 损失量 ($mg \cdot L^{-1}$)	CO_2 逸出 ($g \cdot L^{-1}$)
5 月 6 日上午	上	115.368	23.408	0.156
	下	91.960		
5 月 6 日下午	上	112.860	8.360	0.189
	下	104.500		
5 月 7 日上午	上	101.156	13.376	0.261
	下	87.780		
5 月 7 日下午	上	108.680	20.900	0.327
	下	87.780		
5 月 8 日上午	上	108.680	5.080	0.225
	下	83.600		
5 月 8 日下午	上	108.680	2.572	0.278
	下	86.108		
5 月 9 日上午	上	108.680	25.080	0.271
	下	83.600		

表 3 雨水—洞穴水滴落过程成分变化

Tah 3 Change of compositions of rain water and cave water during dripping

滴水点	观测时间	接水位置	$c(Ca^{2+})$ ($mg \cdot L^{-1}$)	Ca^{2+} 损失量 ($mg \cdot L^{-1}$)	CO_2 逸出 ($g \cdot L^{-1}$)
DP2-1	5 月 29 日	上	56.012	0.836	0.0025
		下	55.176		
	5 月 30 日	上	58.52	0	0.0012
		下	58.52		
DP2-2	6 月 9 日	上	64.37	4.18	0.01
		下	60.19		
DP2-3	5 月 27 日	上	88.616	5.016	0.0124
		下	83.6		
	5 月 29 日	上	88.616	1.672	0.0057
		下	86.944		

表 2 和表 3 计算可得, DP1—2 点 Ca^{2+} 因沉积平均损失量为 $8.13\text{ mg}/(L \cdot m)$, 长期滴水点 Ca^{2+} 的平

均损失量为 $1.35\text{ mg}/(L \cdot m)$, 而季节性滴水点的 Ca^{2+} 的沉积量约为 $1.8\text{ mg}/(L \cdot m)$, 因此用当地喀斯特水补充含水层能够促进碳酸钙沉积形成景观。由喀斯特水形成的碳酸钙沉积物因沉积速度快, 晶粒较雨水沉积的晶粒小, 但晶体形态与自然景观的晶体形态基本一致, 如图 4、5 所示。

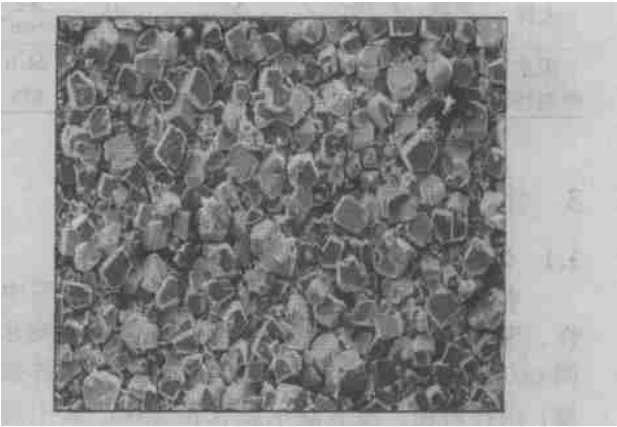


图 4 DP1-2 点处形成的钙膜晶形

Fig 4 Crystal shape of calcic film growing at site DP1-2

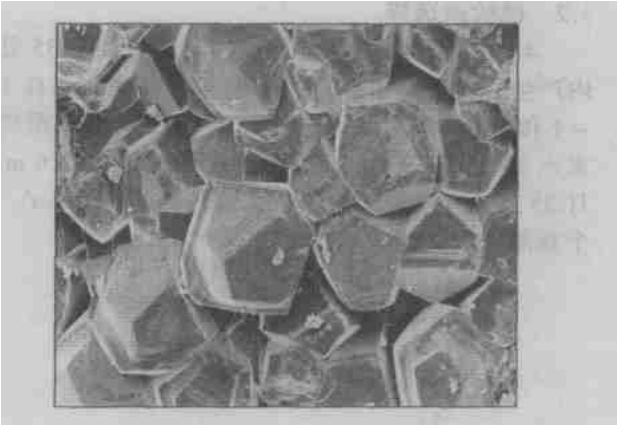


图 5 天然景观晶体形态

Fig 5 Crystal shape of naturally grown landscape

总之, 通过在白龙洞内进行以旅游洞穴景观恢复和保护旅游资源为目的的水文地球化学试验, 证明喀斯特水进入洞穴滴落过程中, Ca^{2+} 因沉积平均损失量远远超过雨水补给的长期滴水点和季节性滴水点, 因此用当地喀斯特水补给表层喀斯特含水层能够对干旱洞穴景观的沉积起到促进作用, 并具有可行性, 虽然过程中会加大洞穴空气中的 CO_2 浓度, 但是在较干燥的洞穴内一般通风条件较好, 不会恶化洞穴环境, 该试验为我国旅游资源的保护和改善旅游环境提供了一个新的思路。

参考文献：

[1] 宋林华. 旅游洞穴的环境变异及景观保护[A] , 喀斯特与洞穴风景旅游资源研究[M] . 北京: 地震出版社, 1994. 118—125.

[2] WELLS R Cave calcite[J] . Studies in Speleology, 1971(2): 129—148.

[3] 宋林华, 杨京蓉, 林钧枢, 等. 浙江瑶琳洞风化碳酸钙景观复生试验[J] . 地理研究, 1999, 18(2): 199—205.

[4] 杨一光. 云南省综合自然区划[M] . 北京: 高等教育出版社, 1990. 149—151.

[5] 王静, 宋林华. 云南白龙洞景区旅游资源潜力探讨[J] . 资源科学, 2003, 25(3): 98—103.

[6] FORD D, WILLIAMS P. Karst geomorphology and hydrology [M] . 1989, 50—95.

Hydrogeochemical Experiment on Recovering of Cave Landscape
—Taking Bailong Cave as an Example

WANG Jing¹, XIANG Chang guo², SONG Lin hua¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;
2. College of Resources and Environment, Jishou University, Jishou 416000, Hunan, China)

Abstract: This paper shows a hydrogeochemical experiment in Bailong cave, Yunnan province, in order to provide a new way solving the problem of breaking and weathering landscape in arid caves and improving the show caves environments. By analyzing the hydrogeochemical data, we find the quantity of the sediment of Ca²⁺ during dripping of Karst water is a little less than the seasonal slow drops' but far more than the long term ones'. At last we draw a conclusion that the Karst water can be a good choice to improve the epikarst aquifer for the landscape recovering assignment and better cave environment.

Key words: show caves; landscape recovering; hydrogeochemical experiment