

文章编号: 1007-6301 (2003) 05-0524-08

福建龙岩龙硿洞发育双酸模式

宋林华¹, 王 静¹, 林钧枢¹, 李福海², 张咏兰²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 福建省龙岩市新罗区旅游领导小组, 龙岩 364000)

摘 要: 发育在早二叠世栖霞组大理岩化夹硅质层和含硅质结核的石灰岩中的龙硿洞, 是华东地区重要的风景旅游洞穴。是一个干洞与地下河相结合的洞穴系统。由于栖霞组石灰岩与上覆的童子岩夹煤层砂页岩、文笔山砂页岩及下伏的泥盆纪石英砂砾岩呈断层接触, 断层接触带形成了地表沟谷。燕山晚期花岗岩侵入时导致栖霞灰岩变质。在地形上, 夹煤层砂页岩不仅覆盖在栖霞灰岩上, 而且出露部位比灰岩体高。出自煤系地层的水会顺坡或垂直流入灰岩体。出自煤系砂页岩的地下水 pH 值为 3.78~4.73, SO_4^{2-} 达到 240mg/L。源自泥岩夹薄层砂岩和花岗岩地区的地表水, 具有 pH 值 6.85~7.25 及低 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 值水也会流入灰岩体。直接出露灰岩体, 雨水入渗土壤, 溶解土壤 CO_2 后再进入石灰岩。因此, 龙硿洞系统是外源水与内源水共同作用的结果, 是由碳酸水和硫酸水联合作用的新型洞穴双成因发育模式的一例。

关 键 词: 龙硿洞; 碳酸水作用; 硫酸水作用; 混合发育模式; 福建龙岩

中图分类号: P931.5

龙硿洞位于福建省龙岩市新罗区龙康村, 洞穴进口地理座标为北纬 25°12'34.9", 东经 117°15'06.8", 海拔高程 602m。龙硿洞距龙岩市区 48km, 经漳龙高速公路和夏漳高速公路到厦门 198km, 它将仅需要 2.5 小时, 就可从厦门直达龙硿洞。目前正在兴建江西赣州到龙岩的铁路, 完工后, 京厦火车和广厦火车都将经过龙岩。龙岩的空陆交通将十分便捷。它发现于唐朝, 至今洞口顶壁上还保留着明朝崇贞年间的石刻。在近代的太平天国、红军时期、台湾义勇队的抗日活动期间, 龙硿洞曾是作战指挥部、战事医院和火药供给地。近几年在龙硿洞中发现了新石器时代的石钻、疑似石刀粗胚、石球、夹砂印纹陶碎片等。这些文化遗迹说明, 在商周至秦汉时期, 龙硿洞内就有百越先民生活和居住。龙硿洞地区的森林覆盖率达到 97%, 洞顶石灰岩山上长有百年大树和珍稀子遗植物桫欏树。最近北京林业大学科研组研究发现, 龙硿洞外和洞内的负氧离子分别为 8600 个/ cm^3 和 640000 个/ cm^3 , 远远高出龙岩市中心负氧离子 4400 个/ cm^3 。龙硿洞具有优美的风景旅游资源, 很高的科学价值, 极优的生态环境, 深远的文化渊源, 现在龙硿洞既是福建省省级风景名胜区, 又是重要的龙岩国家森林公园的组成部分, 是我国华东著名风景旅游洞穴, 更是一个休闲疗养的好

收稿日期: 2003-06; **修订日期:** 2003-08

基金项目: 国家自然科学基金委资助项目 (NO. 410071017)

作者简介: 宋林华 (1942-), 男, 研究员, 博士生导师。1966 年毕业于南京大学地质系。主要从事喀斯特地貌、水文、洞穴学和风景地学研究。

张兆声, 2003。龙硿洞的文化渊源。

地方。现年接待游客能力达到 20 万~ 30 万人, 是龙岩地区旅游业发展的品牌。

作者通过阐述龙硿洞的自然地理特点和景观特征, 论述龙硿洞洞穴发育机理及其形成的新模式。

1 龙硿洞发育的现代自然地理环境

龙硿洞发育在下二叠统栖霞组 (P_1q) 灰黑色夹带状硅质岩或含硅质结核的大理岩化石灰岩中(图 1)。栖霞灰岩的单层厚度 0.5~ 3m。栖霞组石灰岩以断层接触与晚泥盆统天瓦奈泥岩夹石英砾岩、下二叠统文笔山组泥岩夹薄层砂岩和童子岩组砂岩、粉砂岩夹煤层相壤。这些断层形成了沟谷, 而栖霞组石灰岩成为沟谷间的小山脊地块。

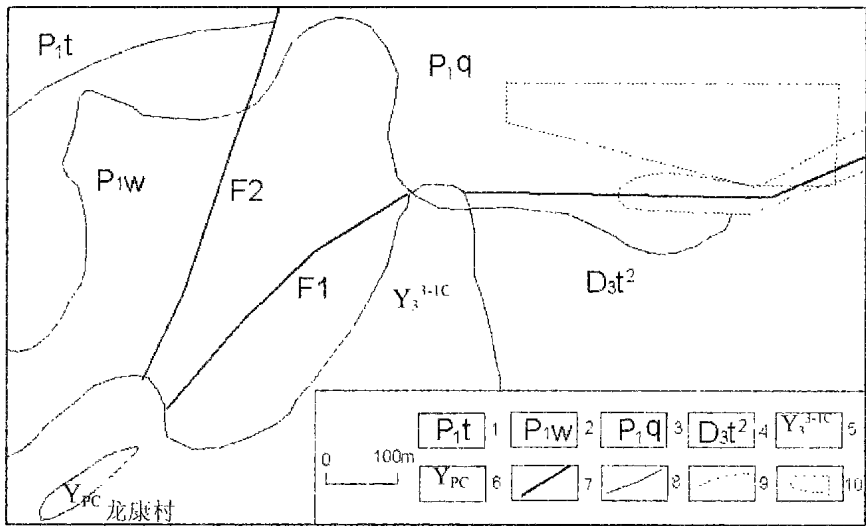


图 1 龙硿洞地区地质构造略图 (曾炳林、张顺金, 2001)

Fig. 1 Sketch of Geological structure in Longkong Cave area

图中: 1 童子岩组砂岩、粉砂岩夹煤层; 2 文笔山组泥岩夹薄层砂岩; 3 栖霞组大理岩夹带状硅质岩或含硅质结核; 4 晚泥盆统天瓦奈泥岩夹石英砾岩; 5 燕山晚期晶洞花岗岩; 6 花岗斑岩;
7 断层及编号; 8 地质界线; 9 公路; 10 龙硿洞分布区

龙硿洞地区的西南部, 在燕山运动晚期发生了大量岩浆入侵, 形成了晶洞花岗岩和花岗斑岩。岩浆的入侵使栖霞灰岩受到了热变质和产生了新的裂隙。本区除发育了两条区域性断层外, 还发育了大量节理: $N 80 E/SE 75^{\circ} \sim 80^{\circ}$; $N 10 W / 90^{\circ}$; $N 35 E/直立$, $N 65 E/直立$, $EW/S 70^{\circ}$; $N 15 E/ 90^{\circ}$; $N 85 W \wedge E 75^{\circ}$ 。

目前, 龙硿洞地区位于南、中亚热带季风气候区的交接区, 又受大陆性气候和地形的影响。这里夏凉无酷暑, 冬暖无严寒, 夏长冬短, 春夏湿润多雨。多年平均气温 19.8 左右, 最热月 (7 月) 平均气温 27.4, 最冷月 (1 月) 平均气温 10.7。年均降水量 1639mm,

每年 4~ 6 月降水量达 746mm，占全年降水量的 46%，7~ 10 月降水量为 481. 5mm，占全年降水量的 29%，11 月到次年 3 月，降水量为 411. 5mm，占全年的 25%。全年相对湿度为 76%。

龙硿洞地区的成壤母岩比较复杂，有石灰岩、页岩、砂岩、砾岩、花岗岩等。但在龙硿洞所在的石灰岩小山上分布了含碎石棕色土、含碎石红粘土，灰黑色有机土等。在石灰岩小丘上平坦处的土壤的厚度在 30- 100cm 左右，在较大裂隙中的土壤可超过 100cm。

龙硿洞地区石灰岩、砂页岩和花岗岩山上的森林和竹林覆盖率在 97% 以上。据有关部门调查，龙岩森林公园有常见的维管束植物 172 科、676 属、1490 种。在龙硿洞附近就有绿竹、桫欏、红豆杉等珍稀植物。动物种类也极为丰富，共有陆生脊椎动物 27 目 73 科 326 种，鱼类 14 科 68 种，无脊椎动物 2000 种。据说，这里若干年前曾发现过华南虎的踪迹。

在两年前，龙山有 2 块水稻田，总面积达 10 亩。农民引龙康小溪水和由夹煤层砂页岩小泉水灌溉水稻田。当时洞穴中到处有滴水。从 2001 年 10 月，水稻田改为饭店和水泥停车场后，洞穴中的滴水大幅度减少，洞穴环境有明显变干的趋势。

2001 年 10 月 13 日和 2003 年 6 月 22 日的两次对龙硿洞内的温度、湿度和 CO₂ 含量的测量表明，洞穴温度变化在 19. 1~ 20. 6℃，与本区多年平均温度 19. 8℃相当；洞穴空气相对湿度变化在 70% ~ 90%；洞穴空气中 CO₂ 的变化在 700~ 1500ppm，只有在游客较多的情况下，个别景点的 CO₂ 才超过 2500ppm。因此，龙硿洞洞内环境基本处于优良状态。

2 龙硿洞的 CO₂ 喀斯特作用

由于龙硿洞地区生态、土壤、气温、降水等综合条件好，土壤空气中持有较高 CO₂ 的浓度（表 1）。

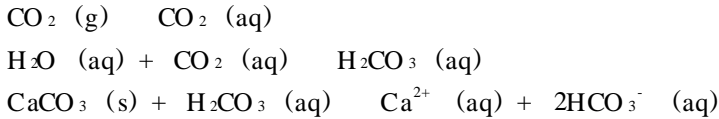
表 1 龙硿洞石灰岩山上土壤空气 CO₂ (ppm) 分布特征表
Tab. 1 CO₂ Distribution of Soil Atmosphere on Longkong Limestone hill, Longyan (2003. 7. 31)

深度 (cm)	采 样 点		
	NO. 1	NO. 2	NO. 3
- 20	10000	6000	6000
- 40	14000	7000	8000
- 60	16000	13000	9500
- 70			9500
- 80	11000		
- 90	17000		

注: No. 1 距耳聿树 1. 5m，树杆高 7m 左右，直径近 30cm。树冠下有高 2. 5m 的桂花树和一些羊齿、茅草等。表土为黑色有机土。
No. 2 距两棵耳聿树各 2m 的稀草地，灰色含碎石块的土壤。
No. 3 是高 1. 5m 到 2m 的密茅草地，有少量灌木，土壤中含有小石块。

当雨水渗入土壤，就会溶解土壤中的 CO₂，形成碳酸水。在它渗入石灰岩的裂隙后，即对石灰岩进行溶蚀，扩大和加深裂隙，并能形成对碳酸钙的饱和水溶液^[1~ 3]。这个喀斯特作

用过程可用以下反应来描述。



当固态的碳酸钙（由方解石构成的石灰岩）与液态的碳酸水相作用，形成了能存在并能随水运动的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的两种离子。

如果，我们按土壤空气 CO_2 浓度的平均值 10000ppm 来计算，当 1 升渗入的雨水与处于 20℃（相当于龙硿洞地区的多年平均气温）土壤空气相充分接触，那么它就具有溶解 170mg 碳酸钙的能力^[4]。

3 龙硿洞的异常溶蚀景观及形成机理

龙硿洞内的景观与一般喀斯特溶洞的最大区别就在于它有众多的石灰岩溶蚀景观。

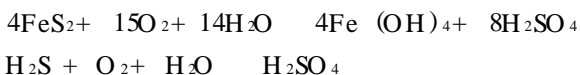
丰富而奇特的石灰岩溶蚀形态。龙硿洞的溶蚀形态有：三瓣洞口、三仙门、白象出洞、母子象、鹰咀、龙床、洞中洞、蚌壳穴、鹰爪、天生桥、槽上槽。龙硿洞的入口呈三片花瓣组成的洞口。三仙洞原指洞口内一个由 2 根石柱组成的大小 3 个高 2.92~2.98m 的拱门。白象出洞是由洞顶石灰岩被地下水溶蚀成三个高 0.7~1.05m 的倒石牙，形成了栩栩如生的小白象形态。母子象则是由两组倒石牙组成，最大的一组高达 5.59m 的倒石牙。还有向下钩的石鹰咀。有直径在 1m 左右的上下两层溶蚀管道组成的龙床。这些溶蚀石灰岩景观均分布在从洞口到第一大厅之间仅 100m 左右的洞段上。在此洞段上，除发育了上述各种溶蚀景观外，还发育了 5 个长 5~10m 的向西南方向延伸的小支洞。其中许多形态呈管道状。

在龙硿洞中段的石灰岩块上还发育了穿洞。在第一层地下河管道下又发育了第二期地下河溶蚀管道，一、二层间的石灰岩块的厚度仅 1m 左右，形成了洞穴内的石灰岩天生桥。有的地方把突出的石灰岩块溶蚀成鸡腿、马头、龙尾等等石灰岩残蚀景观。

龙硿洞内、特别是洞穴前段发育如此丰富的、千姿百态的石灰岩溶蚀景观，这在由一般地下水溶蚀成因的洞穴中是很少见的。

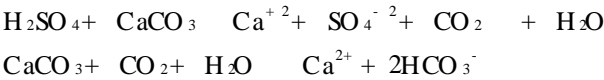
因此，在洞段溶蚀景观的倒石牙特点，表明倒石牙是由地下河水溶蚀成因。而且其溶蚀速率可能很快。如果地下河水没有相当大的溶蚀能力是难以达到的。在龙硿洞地区能导致地下河水具有溶蚀能力的物质只有碳酸和硫酸，不可能存在具有其它强烈溶蚀作用的酸类。碳酸的来源为渗入土壤的雨水溶解土壤中的 CO_2 而产生^[5,6]。这已在上一节中作了简单论述。而硫酸则有可能从煤系地层中的硫化物经氧化而来。

龙硿洞发育在下二叠统栖霞灰岩中，上覆下二叠统晚期童子岩砂岩、粉砂岩夹煤层。煤层中的平均含硫量在 1.1%。一般硫呈硫化亚铁的形式存在。当硫化亚铁与新鲜的地下水相遇时，硫化亚铁就会被氧化成氢氧化铁和硫酸^[7]。同样当煤层中的硫和硫化氢与新鲜水相遇时，也会生成硫酸。上述这些作用可用下列反应式表示：



在采集龙康老煤窑砂页中流出的泉水样时，发现在泉水流出处有棕褐色的铁沉积，在

下游 5m 处的公路排水沟的底部沉积了大量铁。同时测得泉水的 pH 值为 4.73 (2003.6.23) 和 3.78 (2003.7.15)。实验室分析证明泉水中具有大量硫酸根。这证明,老煤窑泉水中存在着氢氧化铁和硫酸。水质分析还表明,龙硖洞地下河水和靠近童子岩组砂页岩夹煤层的神牛戏水洞顶射流水中均含有相当高的硫酸根,它们分别为 60mg/l 和 120mg/l, 水的 pH 值分别为 7.05 和 7.46, 它们均低于一般喀斯特水的 pH 值。但它们的 Ca^{2+} 离子含量分别达到了 165.04mg/l 和 252.42mg/l, 这种高钙和高硫含量的情况,说明这两种水中存在着硫酸钙和碳酸氢钙。当从煤层中流出的地下水缓慢地渗入或流入煤层下面的石灰岩,就会对石灰岩产生强烈的溶蚀作用,产生硫酸钙和放出 CO_2 。 CO_2 再参与碳酸水喀斯特作用:



4 结果与讨论

根据以上的讨论,可以得出龙硖洞地区存在 4 种不同类型的水(表 2)和碳酸水—硫酸水共同对石灰岩进行溶蚀作用,形成双酸成因的喀斯特洞穴。

表 2 说明,在龙硖洞和龙硖洞地下河流域内存在着 4 种类型的水:

表 2 龙硖洞及附近地区水化学特征表 (2003 年 7 月 15 日)

Tab. 2 Water chemical properties in Longkong Cave and Longkong Cave drainage basin					
化学特征	老煤窑泉水	龙爪瀑布	地下河水	神牛戏水射流水	一线天滴水
水温 ()	20.50	20	19.5	19.5	19.5
pH	3.78	6.85	7.05	7.46	6.92
Ca^{2+} mg/l	139.18	25.86	165.04	252.42	52.81
Mg^{2+} mg/l	30.10	0.97	7.77	13.59	8.24
$\text{K}^+ + \text{Na}^+$ mg/l	27.85	12.60	2.25	54.12	7.11
Cl^- mg/l	5.00	5.67	3.33	4.01	6.70
SO_4^{2-} mg/l	240.00	20.00	60.00	120.00	30.00
HCO_3^- mg/l	16.17	22.64	87.26	242.9	171.34
CO_3^{2-} mg/l	0	0	0	0	0
Fe^{2+} mg/l	0.27	0.001	0.001	0.001	0.006
Mn^{2+} mg/l	2.34	0.06	0.01	0.02	0.02

本表资料由华南地质局二九五大队分析提供。

1) 强烈溶蚀石灰岩的四种类型水

(1) 是以老煤窑砂页裂隙中流出来的水为代表的低 pH 的酸性水。它是由煤层中或砂页中以黄铁矿为主的硫化物在遇到新鲜水(含氧水)时,硫化物被氧化为硫酸和铁的氢氧化物。这种水往往具有低碳酸量和高硫酸物。如老煤窑泉水中硫酸根为 240mg/l, 钙离子含量

由华南地质局二九五大队分析室分析。

139mg/l, 而 HCO_3^- 含量只有16.17mg/l。这说明此水中钙以硫酸钙的形式存在。另外水中还有游离的 H^+ 和 SO_4^{2-} 存在, 这是一种强酸溶液, 当与碳酸钙接触时, 即能起极强烈的反应。

(2) 低矿化的外源水, 以龙爪瀑布为代表, 它是源于花岗岩地区和文笔山组泥岩夹薄层砂岩地区的地表水。它的最大特点是所含矿物质较低, 钙镁含量只有26.83mg/l, 硫酸根和重碳酸根的含量也只有20.00~22.64mg/l。特别是它的pH只有6.85~7.25, 呈现出微酸性到微碱性。当它进入喀斯特系统后, 还会大幅度溶解石灰岩的可能性。特别是当它与已对碳酸钙溶解达到饱和的水相遇时, 因混合溶蚀作用, 使混合水对碳酸钙的溶蚀能力大幅度提高。这就形成了混合溶蚀型喀斯特。

(3) 高硫高碳酸高钙水, 以神牛戏水为代表。该类水的pH达到7.46(2003.7.15)~7.82(2003.6.22), SO_4^{2-} 为120mg/l, HCO_3^- 达242mg/l, 钙含量高达252.42mg/l, 成为在 HCO_3^- , SO_4^{2-} - Ca^{2+} 水。这种水的钙含量是所有混合型水中最高的。

(4) 喀斯特内源水型, 以一线天景点处的滴水为代表。这种滴水只有在一定量的降水后才出现。当雨水渗入土壤, 吸收和溶解土壤 CO_2 后, 变成碳酸水, 再沿石灰岩裂隙向下渗流。它能强烈地溶蚀石灰岩, 形成高碳酸氢钙型喀斯特水。当渗入洞穴后, 因水中 $\text{Pco}_2(\text{aq})$ 高于洞穴空气中的 $\text{Pco}_2(\text{cave})$, CO_2 就会从水溶液中逸入空气中, 使水变成对碳酸钙的强过饱和, 迫使 CaCO_3 从水中析出, 形成各种洞穴碳酸钙沉积, 如钟乳石、石笋、石柱、卷曲石等。

由于内源喀斯特水只有当石灰岩层上的童子组和文笔山组砂页岩被完全剥蚀掉后, 石灰岩才完全出露于地表, 并直接接受大气降水时才能形成。这是重要的龙硿洞发育和洞穴碳酸钙沉积景观形成过程的一部分。

从龙硿洞的溶蚀景观和碳酸钙沉积景观的数量、类型和体量看, 溶蚀的洞道规模大, 支洞成迷宫型, 洞道上下沟通, 洞层间距小于2m。溶蚀的石灰岩倒石牙、溶沟、溶窝、穿洞等从洞穴入口到大厅段量多体大。洞内的碳酸钙沉积景观呈量少体小的特点。这些说明在龙硿洞发育过程中, 外源酸性水和弱性水的溶蚀作用比内源弱碱性水的溶蚀作用更重要。

2) 龙硿洞成因模式

根据上述对龙硿洞地区水文特征和洞穴发育过程的关系, 龙硿洞洞穴系统发育过程可以用下面模式图来表示:

当ACD含煤层砂页岩中的含硫酸地下水通过AD界面进入石灰岩层, 就对石灰岩进行强烈的溶蚀作用, 使石灰岩喀斯特迅速发育。这就是外源含硫酸地下水促进石灰岩喀斯特洞穴系统发育的模式。

ABD石灰岩地块中, 降水通过地面AB渗过土壤的过程中, 因吸收和溶解了土壤 CO_2 而变成了含碳酸的地下水。它在石灰岩中向下渗流过程中不断溶蚀石灰岩, 到达洞穴后, 又不断因渗流水与洞穴空气之间 CO_2 分压力差而不断沉积碳酸钙景观。这是一个正常的碳酸溶蚀作用和沉积作用导致的洞穴发育过程。

实际上, 在龙硿洞喀斯特发育过程中往往硫酸和碳酸溶液的混合作用。一方面硫酸和碳酸溶液对石灰岩进行强烈的溶蚀作用, 使龙硿洞地下河对围岩进行各种雕刻性溶蚀作用, 在扩大洞穴河道的同时, 加工了各种形态的洞穴石牙景观和通过形态。另一方面, 又有一部分碳酸钙会沉积下来, 形成了如龙伞、擎天柱、石螺丝、观音等景观。

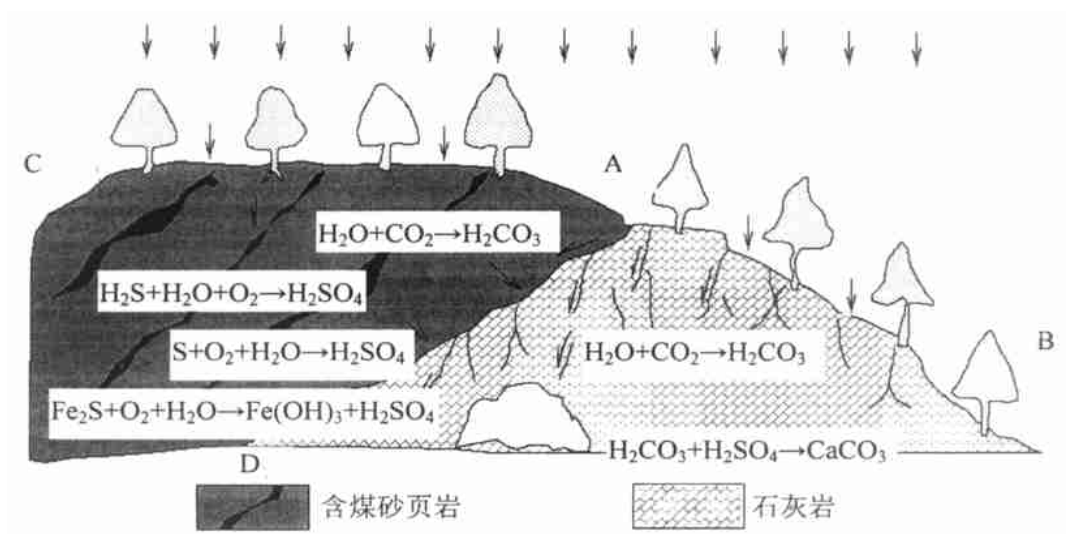


图 2 福建龙岩龙硿洞穴发育模式图

Fig. 2 Development model of Long Kong cave, Longyan, Fujian

注：图中ACD 地块表示含煤砂页岩；ABD 表示为石灰岩地块； $H_2CO_3 + H_2SO_4 \rightarrow CaCO_3$ 仅说明碳酸与硫酸对石灰岩发生溶蚀作用。

结论: 龙硿洞的发育过程是一种独特的由碳酸水与硫酸水构成的双酸溶蚀过程。它们的作用既有碳酸水或硫酸水的单酸喀斯特作用，也有碳酸水和硫酸水共存情况下的协同喀斯特作用。它完全不同于我国喀斯特地区仅有内源水或由内源水与外源水共同作用发育的洞穴系统。

因此，龙硿洞内既有丰富的喀斯特溶蚀景观，又有多样的洞穴碳酸蚀沉积景观。龙硿洞的双酸喀斯特发育模式为我们研究有极类似地质环境的洞穴发育与演化过程提供了重要参考。

参考文献

[1] Alfred Bogli, Karst Hydrology and Physical Speleology. Springer- Verlag, 1980.

[2] Derek Ford & Paul Williams, Karst Geomorphology and Hydrology, Unwin Hyman, 1989.

[3] William Whit. Geomorphology and Hydrology of Carbonate Terrains. Oxford: Oxford University Press, 1988.

[4] 梁福源, 宋林华, 王富昌, 郑炳元, 张丽萍. 路南石林地区土壤空气中CO₂ 浓度分布规律与土下溶蚀形态研究. 中国岩溶, 2000, 19(2): 180~ 187.

[5] 宋林华. 喀斯特地貌研究进展与趋势. 地理科学进展, 2000, 19(3): 193~ 202.

[6] 梁福源, 宋林华, 王静. 土壤 CO₂ 浓度昼夜变化及其对土壤 CO₂ 排放量的影响. 地理科学进展, 2003, 22(2): 170~ 176.

[7] Alexander B. Klimchouk, Derek C. Ford, Arthur N. Palmer, Wolfgang Dreybrodt. Speleogenesis Evolution of Karst Aquifers. The National Speleological Society, Inc, 2000.

Genesis Model of Longkong Cave by Two Acid Water Karstification, Longyan Fujian

SONG L inhua, WANG Jing, L N Junshu

(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources, CAS, Beijing 100101)

L I Fuhai, ZHANG Yonglan

(Leading Group of Xinglou District, Longyan, Fujian 364000)

Abstract: The Longkong Cave, including the underground river and dry passages decorated by the solutional features and carbonate speleothems, is one of the well known show caves in Southeastern China. It develops in the Lower Permian Qixia limestone with siliceous layers and concretions. The Qixia limestone is contacted by faults with Lower Permian Tongzhiyan sandstone and shale with coal mines, Wenbisha sandstone and shales and Devonian silicarenite and conglomerate rock. The surface valleys developed along the faults. The Qixia limestone was metamorphosed by the Late Yanshan granite intrusion. Topographically, The sandstone and shale with coal and the granite on the mountain and the Qixia limestone on the lower slope. The surface water and groundwater from the sandstone and shale with coal and other noncarbonate terrains flows into or down to the limestone. A part of limestone has been exposed as the noncarbonate rocks, which have been removed away.

The fissure spring water discharging from the Tongzhiyan formation is with pH values in the range from 3.78 to 4.73, 240 mg/l of SO_4^{2-} anions; the water with pH of 6.78 ~ 7.25 and lower contents of Ca^{2+} and HCO_3^- sources from other noncarbonate rock terrains. These exotic waters, especially with sulphuric acid aqueous, strongly dissolve the limestone to form the Longkong cave system. The endogenetic water penetrates into soil covering on the limestone from the rainwater and dissolves the CO_2 produced by vegetation roots breath, organism decomposition and biofunction of soil fauna and microbe to form the carbonic acid aqueous. When the water flows into the limestone, it dissolves the limestone to enlarge the fissures and passages. The Longkong Cave is the typical genetic model for cave development by the sulphuric and carbonic acid aqueous from the exotic and endogenetic waters.

Key words: longkong cave; carbonic acid solution; sulphuric solution; mixed karstic genesis model; Fujian Longyan