

文章编号: 1008-2786-(2015)3-279-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000035

广东丹霞山砂岩蜂窝状洞穴及白斑成因

谭艳¹ 朱诚^{1*} 吴立^{2*} 孙伟¹ 王晓翠³ 贾天骄¹ 彭华⁴ 侯荣丰⁵

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 安徽 芜湖 241002;

3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 4. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275;

5. 丹霞山风景名胜区管理委员会, 广东 韶关 512300)

摘 要: 为研究广东韶关市丹霞山砂岩蜂窝状洞穴及白斑成因, 对世界自然遗产地丹霞山景区内玉女拦江洞中采集的 6 个砂岩蜂窝状洞穴样品, 以及在鸭麻岩地区采集的 4 个白斑样品, 进行 XRF 和 ICP-MS 元素地球化学分析及岩石薄片偏光显微镜鉴定。结果表明, 发育蜂窝状洞穴的砂岩体与其基岩砂岩体的成分含量相近, 岩体内部成分差异不是蜂窝状洞穴的成因。综合分析认为, 丹霞山砂岩蜂窝状洞穴的产生是岩石的矿物组成及结构、洞穴所在的地形条件、气候因素和蜂窝状洞穴所形成的微气候共同作用的结果。对白斑的元素分析结果显示, 发育白斑的砂岩在成岩过程中, 红色基岩形成于氧化环境, 而白斑形成于还原环境中, 赤铁矿被还原形成白斑。

关键词: 广东丹霞山; 砂岩; 成分分析; 蜂窝状洞穴; 白斑

中图分类号: P931

文献标志码: A

2010-08-02 在巴西首都巴西利亚召开的第 34 届世界遗产大会上, 以广东丹霞山为首申报的“中国丹霞”世界自然遗产, 成为中国的第 8 项世界自然遗产。自此, “丹霞”作为一种特殊的地貌类型被国内外学者所承认。最早关注丹霞地貌的是明代地理学家徐霞客, 他对浙江、福建、安徽等地的丹霞地貌进行考察并留下了宝贵的文字记录^[1]。我国地理学家冯景兰教授于 1928 年首先将粤北地区的红色砂、砾岩层命名为“丹霞组”^[2]。在之后的 80 a 中, 这种独特的地貌类型吸引了越来越多地理学家的注意, 陈国达、曾昭璇、黄进、彭华、朱诚等^[3-12]学者分别从不同角度对丹霞地貌做了相关研究, 经过他们的不懈努力, 丹霞地貌研究逐渐形成了一套完整的理论体系。

丹霞地貌中多种多样、千奇百怪的造景地貌是

旅游开发的重点, 但是这些奇特地貌的成因还没有进行深入研究。其中, 丹霞地貌区砂岩表面成规模的蜂窝状洞穴及其成因是岩石地貌学多年来的研究内容之一, 也是现代地表过程研究的重要方面^[4-5]。对砂岩蜂窝状洞穴成因的探讨在国际上已经持续了一百多年, 但仅发表有 100 余篇研究论文^[13]。Penck^[14]定义了砂岩蜂窝状洞穴, 把直径大于 0.5 m 的此类蜂窝状洞穴称为 Tafoni, 而小于 0.5 m 的称为 Alveoles。Soukis 等^[15]认为砂岩蜂窝状洞穴的成因以化学风化作用为主, 物理风化作用(风蚀作用)为辅。Evelpidou 等^[16]提出蜂窝状洞穴的化学风化成因是长石的高岭石化和元素迁移, 例如黑云母中铁离子的迁移。黄进教授^[6]认为丹霞山锦石岩洞内小型砂岩蜂窝状洞穴主要是粒状及极薄层凹片状风化剥落(即物理风化作用)所成, 但未能阐述其具

收稿日期(Received date): 2014-04-12; 改回日期(Accepted): 2014-05-04。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41371204, 41171163); 国家科技基础性专项重点项目(2013FY111900)。[National Natural Science Foundation of China(41371204, 41171163); National science and technology basic special key projects(2013FY111900)。]

作者简介(Biography): 谭艳(1990-), 女, 宁夏石嘴山人, 硕士研究生, 主要研究方向为地貌与第四纪环境演变。[Tan Yan(1990-), female, born in Shizuishan of Ningxia, postgraduate student, in Geomorphology and quaternary environmental change analysis.] E-mail: tanyan9001@126.com

* 通信作者(Corresponding author): 朱诚[Zhu Cheng] E-mail: zhuchengnj@126.com; 吴立[Wu Li] E-mail: jedi-wuli@163.com

体的形成过程。由上可知,国内外学术界对砂岩蜂窝状洞穴成因的研究,目前尚未获得令人满意的共识。同时,在丹霞山砂岩岩壁上可见诸多白色斑点,这些斑点在一定程度上为丹霞地貌起到了点缀作用。对丹霞地貌区红色砂岩体中白斑现象的研究仅见于1941年陈国达先生对赣粤一带红色岩层中白点成因的解释^[17]。为解释其成因,受丹霞山风景名胜区管理委员会委托,作者在近年对世界自然遗产地广东丹霞山丹霞地貌成因初步研究的基础上^[10],最近又从实地考察采样和岩性、成分等分析入手,对丹霞山砂岩蜂窝状洞穴及白斑成因作了进一步探讨,为丹霞造景地貌形成提供理论依据。

1 研究区概况

丹霞山位于广东省韶关市仁化县和浈江区境内(图1),面积292 km²,地理坐标113°36′25″~113°47′53″E,24°51′48″~25°04′12″N;位于中亚热带季风气候区,年平均气温19.6℃,一月平均气温9.3℃,7月平均气温28.4℃,年降雨量1660.5 mm^[8]。丹霞山发育于丹霞盆地中,盆地南北长约25 km,东西宽约20 km,面积约500 km²。而丹霞盆地又处于韶关盆地内,韶关盆地是自晚古生代以来长期活动的大型构造盆地,位于南岭褶皱系中段分水岭之南,受控于北部的九峰东西构造带和南部的贵东蕉岭东西构造带,以及西部的瑶山-石鼓塘南

北向构造带和东部的诸广岭-热水南北向构造带,是一个近于方形的构造盆地。丹霞盆地内的地层均为白垩系,根据其岩性组合特征可以分为4个组级地层单位,其中伞洞组、马梓坪组和长坝组属于早白垩世地层,丹霞组属于晚白垩世地层^[18]。

2 材料与方法

丹霞山最为典型的蜂窝状洞穴出现在锦石岩寺洞穴内(图2),该洞接近内缘的顶部及北侧洞壁的砂岩层表面,有一宽约1 m并横过整个洞顶及北侧洞壁的小型蜂窝状洞穴,当地人称为龙鳞石。这些圆形小蜂窝的直径5~10 cm不等,深度则为1~2 cm至十几厘米不等。该处蜂窝状洞穴被绿色藻类覆盖,观察没有被覆盖的洞穴,发现其内部砂岩表面正在进行极薄层的片状、粒状、粉状风化剥落,粒状风化剥落的泥沙部分会堆积在洞穴内部。黄进教授^[6]曾对此做过相应研究,证实这种风化过程与岩体成分差异无关。

采样选择在玉女拦江山体西段南坡崖壁的一处洞穴中(图1,图3),由作者在当地老乡许神发引导下考察发现,该洞穴中发育有大量蜂窝状洞穴(图2)。因该洞未有命名,在采样过程中暂将其命名为玉女拦江洞。玉女拦江洞为一竖向洞穴,主洞宽约4 m,高约6 m,未见底,岩性均为红色砂岩,洞内有人工凿刻痕迹,洞外为绝壁。洞顶、洞的西南侧、东北

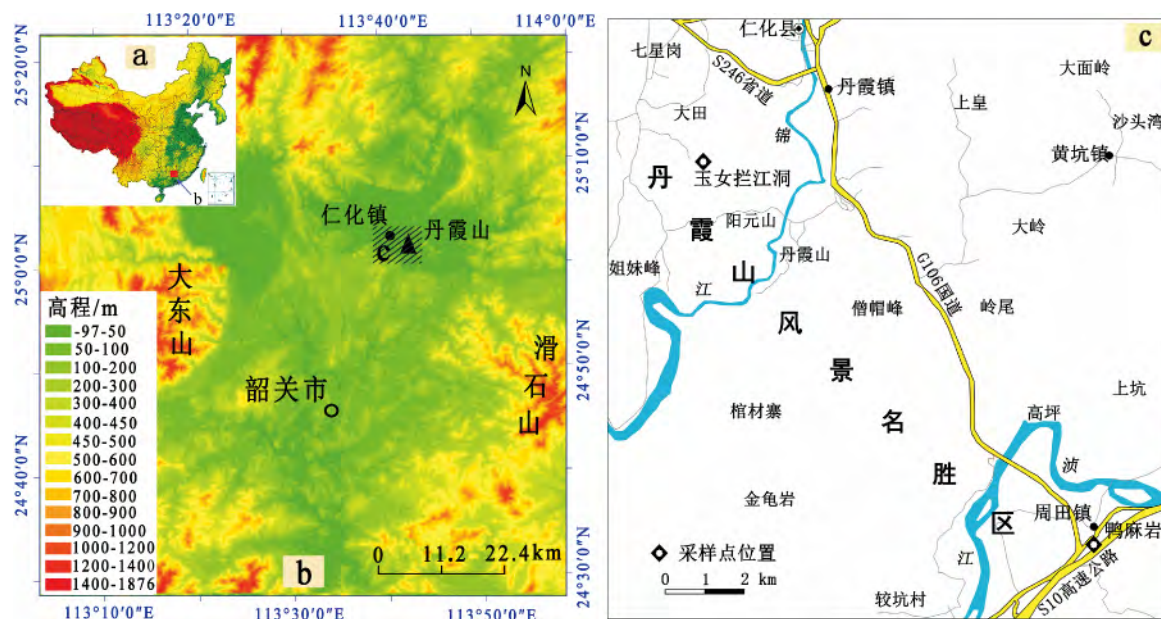


图1 广东丹霞山在中国的位置及蜂窝状洞穴和白斑采样点示意图

Fig. 1 Location of Mt. Danxiashan in Guangdong and the sampling sites of honeycombs and white spot

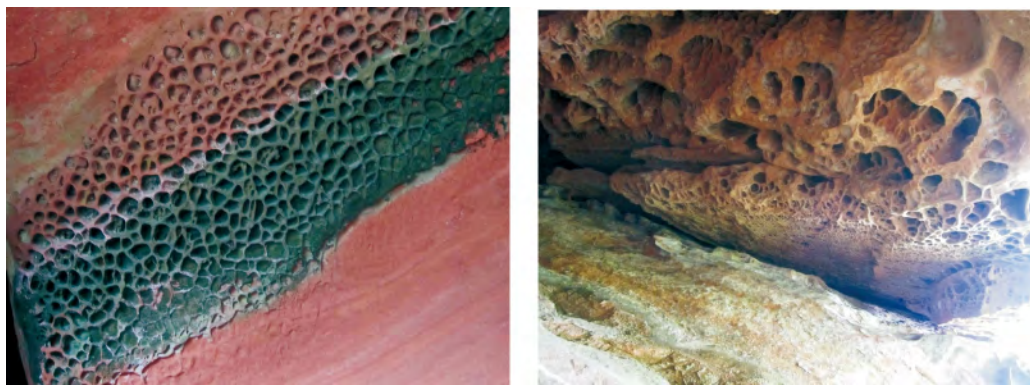


图2 丹霞山锦石岩寺龙鳞石(左图)和玉女拦江洞内(右图)蜂窝状洞穴照片

Fig. 2 Photos of the Longlin Stone in Jinshiyan Temple and honeycombs in Yunülanjiang Cave



图3 丹霞山玉女拦江山体西段南半坡(左图)及其崖壁上的玉女拦江洞洞口(右图)

Fig. 3 South slope of the west section of Mt. Yunlanjiang and the entrance to Yunülanjiang Cave in the cliff

侧上部大量发育小型蜂窝状洞穴;洞穴下部有一沟谷并存在流水痕迹,有大量红色堆积物充填其间,沟内壁发育有小型蜂窝状洞穴,规模不一。该洞中小型蜂窝状洞穴经实测口径1~30 cm,深度1~25 cm。为研究其蜂窝状洞穴的形成原因,采集了块状岩石样品6个,采样记录见表1。

白斑样品的采集工作并不是工作组在考察期间内进行的,而是后期请丹霞山工作人员在丹霞山东部鸭麻岩地区(图1)采集了带有白色斑点的岩块,其白斑保存完好。

将在玉女拦江洞采集的6个蜂窝状洞穴样品和4个白斑样品,每个选择50 g左右研磨成粉末并过200目筛,而后送至南京大学现代分析中心采用粉末压片法制备测试样。首先取5~6 g粉样放入平板模具上直径为35 mm的塑料杯中,加30 t压力成型,压出平整、牢固、无裂痕和厚度在2~4 mm的圆片,然后上机用瑞士ARL-9800型X射线荧光光谱仪测定全岩元素含量,结果以氧化物百分比形式表示。此外,为了更精确地获得白斑样品的各元素含

量,还运用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)对白斑元素含量进行测定,ICP-MS分析也在南京大学现代分析中心进行,仪器为美国PE公司生产的Optima 5300 DV型等离子光谱质谱仪。将4个鸭麻岩长坝组岩体中白斑样品粉碎至200目过筛,再准确称取定量样品至聚四氟乙烯烧杯内,用盐酸、硝酸、氢氟酸、高氯酸加热溶解,溶液蒸干后残渣用盐酸提取,蒸馏水定容后上机测定。为了对比分析岩体内部结构,对玉女拦江洞的1个蜂窝状洞穴样品进行了岩石薄片偏光显微镜鉴定,先在南京大学地球科学与工程学院磨制薄片,后由孔庆友副教授在Nikon ECLIPSE LV100 POL型偏光显微镜下完成岩石薄片偏光显微镜岩性鉴定。

3 结果分析与讨论

3.1 蜂窝状洞穴成因

从表2的蜂窝状洞穴样品实验结果中可以看出,3组样品元素含量基本一致,且基岩和蜂窝状洞

表 1 丹霞山玉女拦江洞采样记录

Table 1 Sampling records of the Yuntanjiang Cave in the Mt. Danxiashan

时间 Time: 2011 - 06 - 15	地点: 玉女拦江洞内 Location: Yunlānjiang Cave	天气: 多云转阵雨 Weather : cloudy with showers
岩层产状 Attitude of rock formation SE130°∠4~5°	GPS: N25°02.855', E113°43.568', 海拔 Altitude 234 m	洞口朝向 Toward the cave NW310°
样品编号 Sample No.	采样部位 Sampling sites	
YNLJD4 - 1	第四层龙鳞片石 1 号样品	
YNLJD4 - 2	第四层龙鳞片石 2 号样品	
YNLJD4 - 3	第四层龙鳞片石 3 号样品	
YNLJD4 - S4	第四层红色砂岩样品(基岩)	
YNLJD4 - S5	第四层红色砂岩样品(基岩)	
YNLJD4 - S6	第四层龙鳞片石凹坑中松散残留物	

表 2 玉女拦江洞蜂窝状洞穴样品氧化物含量

Table 2 Oxide content of honeycomb samples in the Yuntanjiang Cave

编号 No.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	SO ₃	Cl	Na ₂ O
4 - 1	74.7	13.3	0.77	1.4	1.6	3.98	0.22	0.041	0.37
4 - 2	71.7	13.7	0.81	1.32	3.52	4.04	0.21	0.031	0.36
4 - 3	74.5	13.9	0.97	1.59	0.82	4.18	0.19	0.034	0.42
4 - S4	66.6	14	1.16	1.68	11.8	3.57	0.26	0.028	0.41
4 - S5	74.6	13.2	0.72	1.14	1.72	4.35	0.19	0.007	0.29
4 - S6	71.3	13.1	0.71	1.08	4.59	4.02	0.21	—	0.36
克拉克值	78.857	4.770	1.070	1.160	5.500	1.310	0.060	0.001	0.450

穴凹坑中松散堆积物的元素含量相近。CaO 的含量略有不同,这可能是所采集的样品紧实度不同,后期随水浸入其中的钙质不均导致的。MgO 的含量差异较显著,主要表现为蜂窝状洞穴样品的 MgO 含量高于基岩样品,但具体导致这一现象的机制还不甚清楚。总的来看,蜂窝状洞穴的凹坑内部和外缘样品元素含量比例一致,蜂窝状洞穴形成与岩石的矿物组成相关性不强,应是外力作用下的结果。

YNLJD4 - 1 磨片样品的偏光显微镜鉴定结果(图 4)样品岩性为中粗粒砂岩,其矿物组成主要为石英、长石和泥岩碎屑,胶结物主要为钙质和粘土矿物。其中含有 20% 左右的长石,主要以微斜长石[K(AlSi₃O₈)]为主。

蜂窝状洞穴在世界各处均有发育,Theodoropoulos^[19]发现蜂窝状洞穴主要发育在基岩底部的弱风化作用带和基岩破碎带中,其成因一直以来都备受关注,甚至有学者认为在希腊圣托里尼岛上一处青铜时代壁画中出现了类似蜂窝状洞穴发展演化过程的图像^[20]。早期的研究认为,蜂窝状洞穴的成因是太阳辐射在岩石表面形成温度梯度,使得岩石颗粒分离发生崩解^[21-23]。研究发现,岩石朝向与蜂窝状

洞穴的大小有一定的相关关系,南面朝阳部分的蜂窝状洞穴通常发育最好、直径最大,太阳辐射影响下的冷热循环过程以及湿度影响下的干湿循环过程是其主要的影响因素^[24-26]。而这一理论并不能很好的解释蜂窝状洞穴的成因,在实验中也很难被验证^[27-28]。

干旱地区和海岸也常见蜂窝状洞穴发育(图 5),大量研究认为这与盐结晶作用相关^[29-33]。盐结晶作用是岩石中的盐类物质成分在水分参与下水化和再结晶的过程。含有盐基离子的溶液渗入岩石裂隙后,水分蒸发,留下盐的结晶体,晶体受热膨胀对岩体施压,使得岩石破碎^[34-36]。在干旱地区,白天温度较高,岩石内盐类物质如硫酸钠或碳酸钠在强烈的蒸发作用下结晶膨胀,使得岩石剥落,呈现为蜂窝状洞穴^[37]。在海边,含有盐分的海水极易渗透入岩石内部,在强海风的蒸发下,盐类物质结晶破坏岩体形成蜂窝状洞穴。盐结晶作用尽管可以解释岩体的破碎和崩落,但是并不能够阐明类似蜂窝状洞穴的形成机理^[38]。

在丹霞山玉女拦江洞蜂窝状洞穴砂岩样品中,可能的盐类物质,如硫酸钠、硫酸镁和氯化钙,其含

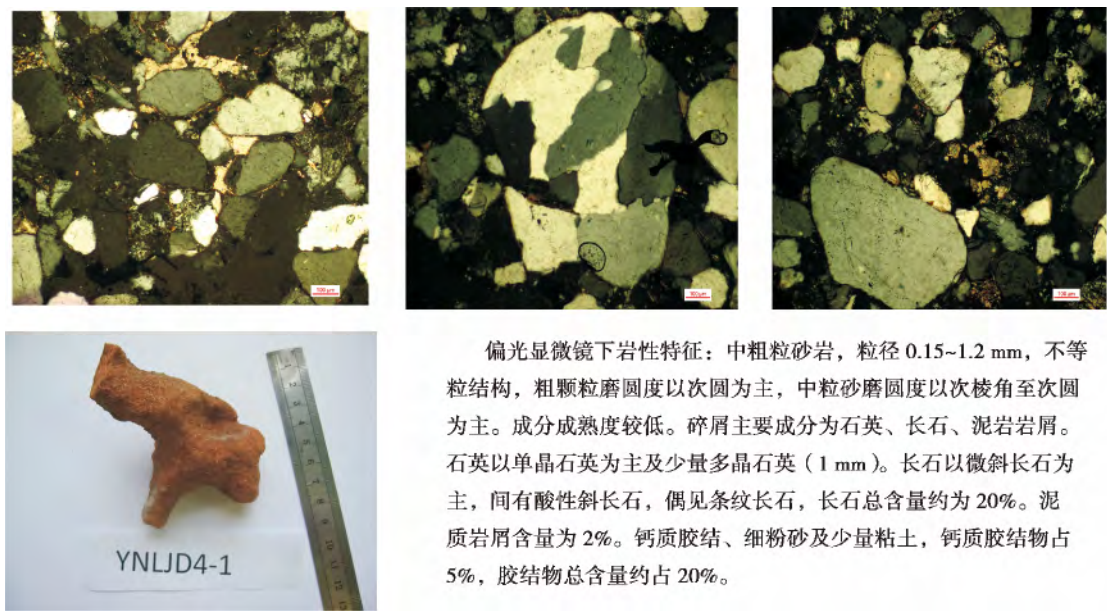


图 4 玉女拦江洞 YNLJD4 - 1 偏光显微镜下岩性鉴定结果及照片 (100 μm)

Fig. 4 Identification photos of lithology from the YNLJD4 - 1 specimen under a polarizing microscope (100 μm)



图 5 马耳他戈佐岛(左图)和中国台湾野柳(右图)蜂窝状洞穴照片

Fig. 5 Photos of the honeycombs in the Gozo Island of Malta and the Yeliu in Taiwan of China

量都很小,因此这里蜂窝状洞穴的主因不是盐结晶作用。蜂窝状洞穴多发育在颗粒状的硅酸岩壁上^[36],而丹霞山的红色砂岩正属于这一类。研究发现,岩石的矿物组成及结构、气候因素、洞穴所在的地形条件和蜂窝状洞穴所形成的微气候都是蜂窝状洞穴形成的重要原因^[39-41]。丹霞山砂岩内部的颗粒状构造增加了岩石的孔隙度,而丰富降水且高温的气候条件为蜂窝状洞穴的形成提供了有利条件。Riedl 等^[42]对希腊蒂诺岛上花岗岩表层发育的蜂窝状洞穴进行了野外观测,结果发现蜂窝状洞穴发育处会形成一种微气候,使得其内外气温、湿度和岩体存在显著差异(表 3)。丹霞山蜂窝状洞穴多发育在潮湿的岩壁上,雨水渗入后,表层水在高温和强烈的风力作用下蒸发,而内部含水量仍然很高,利于蜂窝

状洞穴的发展。蜂窝状洞穴内部气温的日变化较小,夜晚温度较表面高,会使得岩石表面硬化作用(即物体受力作用后内部发生变化而引起的脆化或老化的现象)加强,蜂窝状洞穴不断发育扩大。

表 3 蜂窝状洞穴内外部温度、相对湿度测量结果^[42]

Table 3 Measuring results of temperature and relative humidity inside and outside the honeycomb cave^[42]

测试内容	洞穴外部	洞穴内部
Test content	Outside of cave	Inside of cave
空气温度	25.5 ~ 27.4℃	24.9 ~ 23.7℃
空气相对湿度	62.5% ~ 56.4%	65.0% ~ 66.8%
岩体温度	26.6 ~ 27.9℃	24.3 ~ 24.2℃

注:数据测量时间为 8 月,11:00—14:00

根据砂岩的特性及上述分析,作者提出丹霞山玉女拦江洞中砂岩蜂窝状洞穴的形成过程(图6)。第一阶段(图6A),由于蜂窝状洞穴多发育在像锦石岩和玉女拦江洞内有一定坡度的砂岩体中,砂岩颗粒间具有大小不一的孔隙,不同大小孔隙的含水量不同,孔隙大的区域内水对岩石表层的侵蚀力最大;第二阶段(图6B),在孔隙水的侵蚀作用下,孔隙发育的区域逐渐凹进;在岩壁已经呈干燥,其内部仍为湿润状态时,岩石近表层会发生硬化作用使水流向同一个地方,使得侵蚀能力增强、凹坑扩大;第三阶段(图6C),凹坑增大后会在洞穴边缘凹入处形成一种特殊的微气候,岩壁温度高于岩体内部温度,该处的蒸发量会加大,硬化作用使得蜂窝状洞穴的脊尖端宽度减小,突出更加明显;第四阶段(图6D)这种突出的脊在水、重力、风力的作用下脱落,使得蜂窝状洞穴的凹坑加大,此时,扩大的凹坑内部会再次按照这一过程发育蜂窝状洞穴,即大的蜂窝状洞穴内部会再次发育小型的蜂窝状洞穴,据观察证实这种现象在玉女拦江洞中是普遍存在的(图2)。

3.2 白斑成因

在丹霞山地区的红色砂岩中常见一种灰白色斑

点出现于岩石表面,在本研究中将其暂称为“白斑”这些斑点大小不一,多为直径2~20 cm的圆形或椭圆形(图7)。为了对白斑进行成分分析,丹霞山风景名胜区管理委员会工作人员用切割机将含有白斑的岩块切成立方体寄至南京大学。

在对这些立方体岩块的观察中发现,白斑不是只存在于表面,而是呈圆柱状贯穿于整个岩块。对采自仁化县周田镇月岭村鸭麻岩附近的 K_1c 长坝组砂岩4块白斑岩石标本,采用电感耦合等离子体质谱仪以及X射线荧光光谱仪对元素含量分别进行测定,其结果见表4和5。

表4和5中,B-1、B-2是白斑样品,H-1、H-2是包围着白斑的红色基岩样品。从XRF分析结果可以看出,砂岩的主要成分——石英(SiO_2)在四个样品中并没有很大差别,这是因为石英的化学性质比较稳定且溶解度很低、分解缓慢,在周围矿物分解的过程中,它仍可保留。ICP-MS和XRF分析结果中,Al、K、Na和Mg四种元素在含量上基本一致。值得注意的是Ca的含量,陈国达教授^[17]在对白斑样品的采集实验过程中发现,白斑和基岩样品在Fe和Ca的含量上有显著差异,表现为白斑样品Fe、Ca的含量明显小于基岩样品。但是在本次实验

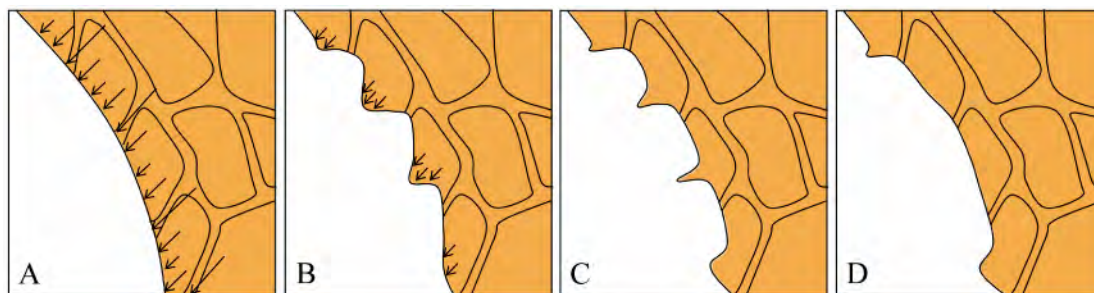


图6 丹霞山玉女拦江蜂窝状坑穴形成过程

Fig. 6 Forming process of the honeycombs in the Yuntulanjiang Cave of Mt. Danxiashan



图7 采自仁化县鸭麻岩附近的白斑标本(左)和丹霞山铺路石采用的 K_1c 长坝组砂岩白斑岩体(右)

Fig. 7 White spot specimens collected from Yamayan of Renhua County and sandstone of Changba Formation

表 4 丹霞山白斑样品 ICP – MS 元素分析表
Table 4 ICP – MS element analysis results of white spot samples

样品编号 Sample No.	Al [*]	Ba	Ca [*]	Cu	Fe [*]	K [*]	Mg [*]	Mn	Na [*]	P	Pb	V	Zn
B – 1	3.79	574	3.4	7.29	0.37	2.36	0.28	143	0.53	98.2	43.3	12.2	17.2
B – 2	3.84	479	3.39	7.37	0.40	2.41	0.29	157	0.56	110	41.6	12.9	23.7
H – 1	3.69	611	3.52	5.92	0.54	2.28	0.29	160	0.50	87.7	48.5	14.7	16.0
H – 2	3.84	656	3.94	4.72	0.61	2.28	0.30	196	0.53	92.1	54.6	14.5	13.7

注: 计量单位※质量百分数为% 无标注为 $\mu\text{g}/[\text{g}(\text{ppm})]$

表 5 白斑样品 XRF 氧化物含量表
Table 5 XRF element analysis results of white spot samples /%

样品编号 Sample No.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	SO ₃
B – 1	65	12.7	10.3	3.06	1.2	0.88	0.52	0.106
B – 2	64.2	12.6	11.2	2.91	1.23	0.87	0.54	0.096
H – 1	64.2	12.6	11.1	2.97	1.32	1.09	0.37	0.054
H – 2	64.3	12.7	10.4	3.1	1.21	1.12	0.52	0.052

中,无论是 ICP – MS 还是 XRF 分析结果,Ca 的含量并没有出现差别,因此,含钙成分的析出并不是白斑形成的主要原因。

从 ICP – MS 和 XRF 的实验结果中可以发现,金属元素 Ba、Fe、Mn、Pb、V 五种金属元素均表现为白斑样品含量小于红色基岩样品,例如白斑 B – 1 和 B – 2 样品的 Fe₂O₃ 含量仅为 0.87% ~ 0.88%,但白斑周围红色砂岩的 Fe₂O₃ 含量就高达 1.09% ~ 1.12%;而金属元素 Cu、Zn 和非金属元素 P、S 的含量表现为白斑样品含量大于红色基岩样品,红色基岩和白斑的成岩过程是存在差异的。丹霞山红色砂岩形成于高温高湿的氧化环境中,含铁矿物多被氧化成为赤铁矿包围着石英和方解石,从而使岩层呈现红色,同时具有氧化性的金属元素 Ba、Fe、Mn、Pb、V 含量也较高。白斑则形成于还原环境中,主要表现为还原性元素 S、P 和 Cu 显著高于红色基岩,Zn 在还原条件下表现出亲硫性,因此白斑中 Zn 含量较高。

砂岩中还原性的孔隙溶液是白斑形成的重要原因^[43-44]。溶液中所含物质会与岩石发生反应,赤铁矿(Fe₂O₃)逐渐被溶解成为亚铁离子^[45-46],当亚铁离子饱和时会形成菱铁矿(FeCO₃),岩体即由红色转变为白色。砂岩的形变过程以还原作用为主导,同时形变会使得孔隙流体流动强度增大,赤铁矿溶解加剧,因此在发生形变的部位常可见一些白色或褐色的斑点^[47]。此外,砂岩成岩过程中发生的一些化学反应会释放出 CO₂,CO₂ 溶解在孔隙溶液中使其呈现弱酸性,加强了溶液对铁的运移,这也是白斑

中铁元素含量小于红色基岩中铁含量的原因。含碳物质和岩体内的矿物成分发生反应最终会形成碳酸盐,也是白斑形成的原因之一^[48]。白斑之所以呈现圆形或椭圆形,是由孔隙溶液扩散过程各向异性造成的^[44,48-49]。

4 结论

通过对世界自然遗产地广东丹霞山砂岩蜂窝状洞穴和白斑样品的元素地球化学分析和岩石薄片偏光显微镜鉴定,对它们岩性与成因的关系有了更明确的认识:

1. 丹霞山砂岩蜂窝状洞穴发育的岩体和基岩岩体成分相似,岩体内部成分差异不是蜂窝状洞穴的成因。影响蜂窝状洞穴形成的因素包括岩石的矿物组成及结构、洞穴所在的地形条件、气候因素和蜂窝状洞穴本身所形成的微气候。

2. 丹霞山地区发育白斑的砂岩在成岩过程中,红色基岩形成于氧化环境,而白斑形成于还原环境中,赤铁矿被还原形成白斑。还原环境下含碳物质最终形成碳酸盐,也是白斑形成的重要原因。

致谢: 丹霞山风景名胜区管理委员会领导和工作人员在取样过程中给予的热情帮助和支持;南京大学现代分析中心刘笛高级工程师完成样品 X 射线荧光光谱分析,南京大学地球科学与工程学院孔庆友副教授完成岩石薄片偏光显微镜鉴定,在此一并表示诚挚谢意。

参考文献(References)

- [1] Yang Zaitian. On Xu Xiake's investigation into China's Danxia Landform—Memory Xu Xiake 360 anniversary [J]. Geographical Research 2000, 19(4): 429–436 [杨载田. 徐霞客对我国丹霞地貌旅行考察的贡献——纪念徐霞客逝世 360 周年[J]. 地理研究 2000, 19(4): 429–436]
- [2] Feng Jinglan, Zhu Huisheng, Zheng Jingyun. Geological minerals of Nanxiong, Shixing, Renhua, Qujiang in Guangdong [J]. Geological Annual Report of Institute of Geologic Survey of Guangdong & Guangxi, 1928, 1(1): 38–42 [冯景兰, 朱翊声. 广东曲江仁化始兴南雄地质矿产[J]. 两广地质调查所地质年报, 1928, 1(1): 38–42]
- [3] Chen Guoda. Red rock systems of Guangdong Province [J]. The Science Quarterly of the National Sun Yat-Sen University, 1935, 6(4): 1–30 [陈国达. 广东之红色岩系[J]. 国立中山大学理学季刊, 1935, 6(4): 1–30]
- [4] Zeng Zhaoxuan, Huang Shaomin. Red bed in southeastern China [J]. Journal of South China Normal University: Natural Science, 1978, 1(1): 56–73 [曾昭璇, 黄少敏. 中国东南部红层地貌[J]. 华南师范学院学报: 自然科学, 1978, 1(1): 56–73]
- [5] Zeng Zhaoxuan, Huang Shaomin. Red bed in southeastern China (Sequel) [J]. Journal of South China Normal University: Natural Science, 1978, 2(2): 40–54 [曾昭璇, 黄少敏. 中国东南部红层地貌(续)[J]. 华南师范学院学报: 自然科学版, 1978, 2(2): 40–54]
- [6] Huang Jin. Geomorphology of Mt. Danxiashan [M]. Beijing: Science Press, 2010. [黄进. 丹霞山地貌[M]. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [7] Huang Jin. Research report on Danxia Landform in China [J]. Tropical Geography, 1992, 12(Suppl.): 1–36 [黄进. 中国丹霞地貌研究汇报[J]. 热带地理, 1992, 12(增刊): 1–36]
- [8] Peng Hua. The red stone park of China—Danxiashan [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004. [彭华. 中国红石公园——丹霞山[M]. 北京: 地质出版社, 2004.]
- [9] Peng Hua. Research on landscape geomorphology in Danxiashan [J]. Tropical Geography, 1992, 12(Suppl.): 66–76 [彭华. 丹霞山风景地貌研究[J]. 热带地理, 1992, 12(增刊): 66–76]
- [10] Zhu C, Peng H, Ouyang J et al. Rock resistance and the development of horizontal grooves on Danxia slopes [J]. Geomorphology, 2010, 123: 84–96
- [11] Zhu C, Peng H, Li Z X et al. Age and genesis of the Danxia landform on Jianglang Mountain Zhejiang Province [J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19: 615–630
- [12] Zhu Cheng, Peng Hua, Ouyang Jie et al. Age genesis and characteristics of Danxia landform of Fangyan in Zhejiang Province, China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(2): 229–237 [朱诚, 彭华, 欧阳杰, 等. 浙江方岩丹霞地貌发育的年代、成因与特色研究[J]. 地理科学, 2009, 29(2): 229–237]
- [13] Jon Boxerman. Tafoni [EB/OL]. 2012. <http://tafoni.com>
- [14] Penck D A. Morphologie der Erdoberfläche [M]. Stuttgart: Verlag von J. Engelhorn, 1894.
- [15] Soukis K, Koufosotiri E, Stournaras G. Special landforms on Tinos Island: spheroidal weathering “TAFONI” forms [G]//Mytilini: 3rd International Scientific Symposium of Protected areas and Natural Monuments, 1998. (In Greek)
- [16] Evelpidou N, Leonidopoulou D, Vassilopoulos A. Tafoni and Alveole formation. An example from Naxos and Tinos islands [G]//Evelpidou N, Figueiredo T, Mauro F et al. Natural Heritage from East to West. Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 35–42
- [17] Chen Guoda. One explanation for the geomorphogenesis of white spot in red bed [J]. Geological Review, 1941, 6(Z3): 393–396 [陈国达. 红色岩层中白点成因一解[J]. 地质评论, 1941, 6(Z3): 393–396]
- [18] Bureau of Geology of Foshan City, 706 Geological Team of Bureau of Geology of Guangdong Province. Geological genesis of Danxia Landform in Mt. Danxiashan Global Geopark [R]. Foshan: Bureau of Geology of Foshan City in Guangdong, 2008. [广东省佛山地质局, 广东省地质勘查局七〇六地质大队. 丹霞山世界地质公园丹霞地貌地质成因研究[R]. 佛山: 广东省佛山地质局, 2008.]
- [19] Theodoropoulos D. Honeycomb weathering phenomena (TAFONI) on Tinos Island [J]. Annales Géol. des pays Hellén, 1975, XXVI: 149–158
- [20] Ewald H. A pictorial study of tafoni development from the 2nd millennium BC [J]. Geomorphology, 2005, 64: 87–95
- [21] Dana J D. Manual of Geology, 1st ed [M]. Ivison, Blakeman, Taylor and Company, New York, 1849.
- [22] Schaffer R J. The Weathering of Natural Building Stones [M]. Garston (reprinted 1972), 1932: 149
- [23] McGreevy J P. Thermal properties as controls on rock surface temperature maxima and possible implications for rock weathering [J]. Earth Surf. Process. Landf., 1985, 10: 125–136
- [24] Sancho C, Benito G. Factors controlling tafoni weathering in the Ebro Basin (NE Spain) [J]. Z. Geomorphol., 1990, 34(2): 165–177
- [25] Paradise T R. Sandstone weathering and aspect in Petra, Jordan [J]. Z. Geomorphol., 2002, 46: 1–17
- [26] Paradise T R. Assessment of tafoni distribution and environmental factors on a sandstone djinn block above Petra, Jordan [J]. Applied Geography, 2013, 42: 176–185
- [27] Blackwelder E. The insolation hypothesis of rock weathering [J]. Am. J. Sci., 1933, 21: 140–144
- [28] Griggs D T. The factor of fatigue in rock exfoliation [J]. J. Geol., 1936, 9: 783–796
- [29] Robinson D A, Williams R B G. Experimental weathering of sandstone by combinations of salts [J]. Earth Surf. Process. Landf., 2000, 25: 1309–1315
- [30] Wellman H W, Wilson A T. Salt weathering a neglected geological erosive agent in coastal and arid environments [J]. Nature, 1965, 205: 1097–1098
- [31] Evans I S. Salt crystallisation and rock weathering: a review [J]. Revue de Géomorphologie Dynamique, 1970, 19(4): 153–177
- [32] Bradley W C, Hutton J T, Twidale C R. Role of salts in development of granitic tafoni, South Australia [J]. J. Geol., 1978, 86: 647–654
- [33] Kamh G M E. Weathering at high latitudes on the Carboniferous Old Red Sandstone, petrographic and geotechnical investigations, Jedburgh Abbey Church, Scotland a case study [J]. Environmental Geology, 2005, 47(4): 482–492
- [34] Qu Jianjun, Zhang Weimin, Wen Zixiang et al. Environmental geological hazards in Mogao Grotto area of Dunhuang [J]. Marine Ge-

- ology & Quaternary Geology, 1995, 15(3): 113–119. [屈建军, 张伟民, 文子祥, 等. 论敦煌莫高窟的环境地质灾害[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1995, 15(3): 113–119]
- [35] Doehne E. Salt weathering: a selective review [M]. Geological Society London Special Publications 2002 205: 51–64
- [36] Mellor A, Short J, Kirkby S J. Tafoni in the El Chorro area, Andalusia, Southern Spain [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1997 22: 817–833
- [37] Matsuoka N. Rock weathering processes and landform development in the Sør Rondane Mountains, Antarctica [J]. Geomorphology, 1995, 12: 323–339
- [38] Turkington A V, Paradise T R. Sandstone weathering: a century of research and innovation [J]. Geomorphology 2005 67: 229–253
- [39] Dragovich D. Cavern microclimates in relation to preservation of rock art [J]. Stud. Conserv. 1981(26): 143–149
- [40] Turkington A V, Smith B J, Basheer P A M. The effect of block retreat on sub-surface temperature and moisture conditions in sandstone [G]//Prikryl, R., Viles, H. (Eds.), Understanding and Managing Stone Decay. Prague: Karolinum Press 2002: 113–126
- [41] Wilhelmy H. Klimamorphologie der Massengesteine [M]. Braunschweig: Georg Westermann Verlag, 1958.
- [42] Riedl, H. Beiträge zur regionalen Geographie der Insel Tinos (Kykkladen) mit besonderer Berücksichtigung des quasinatürlichen Formenschatzes [M]. Beiträge zur Landeskunde von Griechenland V, Band 29, Salzburger Geographische Arbeiten. Salzburg, 1995.
- [43] Benito M I, Horra R, Barrenchea J F et al. Late Permian continental sediments in the SE Iberian Ranges, eastern Spain: Petrological and mineralogical characteristics and palaeoenvironmental significance [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2005 229: 24–39
- [44] Michèle van Panhuys – Sigler, Nigel H. Trewin, John Still. Roscoelite associated with reduction spots in Devonian red beds, Gamrie Bay, Banffshire [J]. Scottish Journal of Geology, 1996 32: 127–132
- [45] Weibel R, Friis H. Opaque minerals as keys for distinguishing oxidising and reducing diagenetic conditions in the Lower Triassic Bunter Sandstone, North German Basin [J]. Sedimentary Geology, 2004 169: 129–149
- [46] Weibel R. Diagenesis in oxidising and locally reducing conditions—an example from the Triassic Skagerrak Formation, Denmark [J]. Sedimentary Geology, 1998 121: 259–276
- [47] Stel H. Diagenetic crystallization and oxidation of siderite in red bed (Buntsandstein) sediments from the Central Iberian Chain, Spain [J]. Sedimentary Geology 2009 213: 89–96
- [48] Nakamura N, Borradaile G. Do reduction spots predate finite strain? A magnetic diagnosis of Cambrian slates in North Wales [J]. Tectonophysics 2001 340: 133–139
- [49] Mykura H, Hampton B P. On the mechanism of formation of reduction spots in the Carboniferous/Permian red beds of Warwickshire [J]. Geol. Mag, 1984, 121(1): 71–74

Geomorphogenesis on Sandstone Honeycombs and White Spot in the Mt. Danxiashan, Guangdong Province, South China

TAN Yan¹, ZHU Cheng¹, WU Li², SUN Wei¹, WANG Xiaocui³,
JIA Tianjiao¹, PENG Hua⁴, HOU Rongfeng⁵

(1. School of Geographic and Oceanographic Science, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China;

2. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241002, Anhui, China;

3. Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China;

4. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, 510275, Guangzhou, China

5. Administrative Committee of Danxiashan Scenic Spot, Shaoguan 512300, Guangdong, China)

Abstract: Abundant typical sandstone morphologic shapes developed in Mt. Danxiashan. We collected six samples of sandstone honeycombs in Yunülanjiang Cave and four samples of white spots in Yamayan to do component analysis (XRF and ICP-MS) with the purpose of explaining their genesis. The results indicate that the component contents of samples in honeycombs and bedrock are similar so that there is no direct relationship between lithological differences and honeycomb's formation. The comprehensive analysis reveals that honeycombs are the result of physical weathering. And the rock structure, topography, climate and cavern microclimate are important influencing factors in the formation process of honeycombs. In the discussion of sandstone white spot, reducing conditions prevail in the process and some minerals are dissolved. Reduction of Fe making the color change from red to white with water percolating through the rock, thereby forming a white spot on the surface.

Key words: Mt. Danxiashan; sandstone; component analysis; honeycombs; white spot