丹霞山世界地质公园蜂窝状洞穴特征 及成因分析

陈留勤^{1,2)},李馨敏²⁾,郭福生²⁾,李鹏程²⁾,李余亮²⁾,刘鑫²⁾ 1)东华理工大学省部共建核资源与环境国家重点实验室培育基地,南昌,330013; 2)东华理工大学地球科学学院,南昌,330013

内容提要:蜂窝状洞穴以其精致的形貌和众说纷纭的成因吸引着科研人员和普通大众的兴趣。丹霞山世界地 质公园蜂窝状洞穴主要产于晚白垩世丹霞组二段(锦石岩段)风成砂岩的崖壁上。本文以园区长老峰锦石岩寺和睡 美人禄意堂两处蜂窝状洞穴为研究对象,通过野外实地调查,了解洞穴生长环境,定量统计分析其形态特征,并采集 砂岩样品进行显微镜下观察,探讨洞穴形成与盐风化作用的关系。研究表明:蜂窝状洞穴所在的岩性主要为中一细 粒长石岩屑砂岩,发育大型高角度交错层理,渗透性较好;洞穴开口均向下朝向锦江,有利于来自锦江河流的湿润水 汽较长时间地保持在小洞内部;洞穴开口基本服从泰森多边形分布。因此,碎屑颗粒相对比较均匀的风成砂岩为丹 霞山蜂窝状洞穴的发育提供了重要的岩石基础,锦江河流为盐风化提供了必要的湿润水汽和盐分。在初始发育阶 段,从岩壁上最适合盐风化作用的若干个点开始形成细小的坑洼,逐步向同层位扩张。单个小洞穴由于盐风化作 用,洞穴内部风化速率大于洞穴开口边缘,导致蜂窝状洞穴内部空间扩大较快。然后,蜂窝状洞穴的发育突破纹层 的限制,逐步加大、变深而呈泰森多边形规则分布。最终,随着洞穴加深,在重力、风力的影响下,蜂窝状洞穴隔壁减 薄失稳,洞穴消亡。

关键词:蜂窝状洞穴;盐风化;风成砂岩;丹霞地貌;丹霞山世界地质公园

蜂窝状洞穴(honeycombs)因其形似蜂窝而得 名,在全球不同气候区域均有发育(Paradise, 2013a),常见于由砂岩(Achyuthan et al., 2010; Mustoe, 2010; Dorn et al., 2017) 和花岗岩(Dill et al., 2010; Huang Rihui et al., 2017) 等构成的天然岩 石和历史建筑(雕塑、纪念碑等)上。它们以其精致 的形貌而引人入胜,同时其发育造成岩石失稳破坏 而广泛受到关注。Young 等(2009)认为这些洞穴是 在一定气候条件下风化作用的综合产物,岩石组成 和结构是其发育的重要基础。Sunamura 等(2011) 提出用曲线方程描述以盐风化为主导的洞穴发育过 程。Paradise(2013b)通过估算不同方位洞穴的风 化速率,强调气候环境的差异对洞穴的影响。 Bruthans 等(2018) 通过现场和实验室测试, 建立水 力学层次模型,进一步揭示了洞穴形成过程中水的 作用机理。国内对蜂窝状洞穴的研究相对较少。黄 进(2010)认为这些洞穴是由风化剥蚀而形成的,并

伴随有生物作用。谭艳等(2015)将影响蜂窝状洞穴 形成的因素概括为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。吕洪波等(2017)通过对中国东部海岸 区、华北和西北半干旱区及东南湿润区众多蜂窝状 洞穴(蜂窝石头构造)实例的分析和总结,认为在地 貌景观形成过程中盐风化是普遍且重要的,为国内 盐风化作用研究提供了良好的带头作用。可见,人 们对广泛发育的蜂窝状洞穴的成因认识还存在较大 争议。

广东丹霞山是中国东南湿润区丹霞地貌的典型 代表,也是"丹霞地貌"这一地学名词的命名地, 2010年10月作为重要组成部分成功申请为世界自 然遗产"中国丹霞"。丹霞山的地貌研究由来已久, 成果丰硕(例如:黄进,2010;彭华等,2014;朱诚等, 2015),近年来在生物、生态方面也取得了重要成果 (Chen Sufang et al., 2014; 欧阳杰等,2017)。丹霞

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41602113,41772197)、韶关市丹霞山管理委员会科学研究项目(编号:DXSGEO2017001)、 江西省研究生创新项目的成果。

收稿日期:2018-02-03;改回日期:2018-06-08;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2018.04.007

作者简介:陈留勤,男,1983年生,博士,副教授,主要从事沉积岩石学和丹霞地貌研究。通讯地址:330013,江西省南昌市经开区广兰大道 418号。Email: liuqincheen@163.com。

山的科学研究对地质学和地貌学科普及当地旅游经 济发展具有重要意义。目前,对局部、小型地貌现象 的研究不足,在一定程度上制约了该地质公园的教 育功能。丹霞山小型蜂窝状洞穴不仅具有独特的旅 游观赏价值,还具有极高的科学研究价值。本次研 究通过对丹霞山长老峰锦石岩寺和睡美人禄意堂砂 岩沉积构造、物质组成和结构、蜂窝状洞穴的形态特 征及空间分布进行调查,讨论蜂窝状洞穴发育过程 中的盐风化作用,并将其形成过程初步划分为四个 阶段。

1 研究区概况

丹霞山世界地质公园位于广东省韶关市仁化县 境内(图1),地理坐标为东经113°36′25″~113°47′ 53",北纬 24°51′48"~25°04′12",总面积约为 292 km²。地处南岭南麓,属于中亚热带湿润季风气候, 年均温度为 19.7℃,年均降水量为 1715 mm。区内 河网密度相对较大,锦江自北向南蜿蜒流经景区中 部,在五马归槽北侧汇入浈江。丹霞地貌发育在丹 霞盆地晚白垩世的陆相红色碎屑岩当中。

丹霞盆地为中国东南地区晚中生代"盆岭构造体系"(Shu Liangshu et al., 2007)中的一个小型山间断陷盆地,发育近4000 m厚的白垩系红色岩系。其中,上白垩统出露较好,划分为长坝组和丹霞组(张显球和林小燕,2013)。园区成景地层主要为丹霞组,厚约1000 m,为一套由砾岩和砂岩夹粉砂质泥岩、古土壤组成的碎屑岩地层,含有轮藻、介形虫化石,底部以一套厚层砾岩为标志与下伏长坝组整





Fig. 1 The geological map of the northern Danxia Basin in Shaoguan City, Guangdong Province

(from Guangdong Geologic Survey Institute, 2008)

Q一第四系; K_2d^3 一丹霞组三段(白寨顶段); K_2d^2 丹霞组二段(锦石岩段); K_2d^1 一丹霞组一段(巴寨段); K_2c^4 一长坝组四段;

K2c3-长坝组三段;K1m-马梓坪组;K1s-伞洞组;C-石炭系;D-泥盆系

Q—Quaternary; $K_2 d^3$ —The third Member of the Danxia Formation (Baizhaiding Member); $K_2 d^2$ —The second Member of the Danxia Formation (Jinshiyan Member); $K_2 d^1$ —The first Member of the Danxia Formation (Bazhai Member); $K_2 c^4$ —The fourth Member of the Changba Formation; $K_2 c^3$ —The third Member of the Changba Formation; $K_1 m$ —The Maziping Formation; $K_1 s$ —The Sandong Formation; C—The Carboniferous; D—The Devonian

合接触(张显球,1992)。大约从7 Ma前开始,盆地 开始间歇性抬升,流水下切侵蚀,在其他外力共同作 用下,形成一系列侵蚀地貌(黄进,2010),具有重要 的美学价值和科研价值。

丹霞组自下而上可划分为三个岩性段,即巴寨段、锦石岩段和白寨顶段(张显球,1992)。本文研究的蜂窝状洞穴主要产于丹霞组二段(K₂d²)(图1)。该段岩性为肉红—褐红色厚层块状砂岩,厚92~300 m(张显球,1992),以发育大型交错层理砂岩夹砾岩或红色钙质古土壤为特征。

2 研究方法

本文选取丹霞山长老峰西北坡的锦石岩寺和睡 美人(玉女拦江)南坡的禄意堂为研究地点(图1), 这两处发育最为典型的蜂窝状洞穴地貌,总共测量 了 276 个蜂窝状洞穴的长度(洞穴开口的最大直 径)及深度,尝试从统计学角度分析洞穴形态。对 洞穴发育位置的环境和岩石状况进行详细考察。由 于在锦石岩寺附近不便于采样,本次研究的 3 块样 品均来自睡美人禄意堂。通过蜂窝状洞穴所在的砂 岩样品薄片显微镜观察,着重对比不同区域粘土矿 物、胶结物、孔隙度发育情况,分析适宜洞穴生长的 因素。

泰森多边形又叫 Voronoi 图,适用于表现空间 对象的复杂邻域关系。该几何概念因其实用性在气 象、化学、生物等领域得到广泛应用(邹强等,2014; 杨雯婷等,2016;谢绍锋等,2017),在洞穴地貌研究 方面尚不多见。其原理是通过绘制各中心点虚拟连 线的垂直平分线,实现对空间平面的等分。本文根 据单位洞穴的中心位置,在 AreGIS 10.2 软件平台 (http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis - for desktop)中构建泰森多边形,作为进一步分析其发 育机制的基础,探讨其形成过程与盐风化之间的关 系。

3 研究结果

3.1 蜂窝状洞穴生长环境及特征

根据地貌基本形态的凹凸差异,丹霞山广泛发 育负地貌,其中以岩槽、额状洞、扁平洞、穿洞等为 主。局部地区发育蜂窝状洞穴,其中大型蜂窝状洞 穴以长老峰梦觉关最为著名,单个洞穴直径最大可 达8m,前人研究认为是凹片状风化剥落的产物(黄 进,2010)。小型蜂窝状洞穴在长老峰、睡美人、燕 岩、蕉冲岩等特定地点可见。 如图 1 所示,锦江自北向南蜿蜒曲折流过丹霞 山园区,长老峰与睡美人两座山峰隔水相望,分别坐 落于河流的南东岸和北西岸。在这两个地点,蜂窝 状洞穴均位于大型洞穴内部或弧形崖壁上,它们的 开口向下,正对着锦江,朝向分别为 320°和 191°,容 易受到来自河流的水气浸润影响。两者海拔高度分 别约为 210 m 和 250 m,虽然存在高差,但同属丹霞 组二段(锦石岩段)。相比于到处发育的岩壁洞穴 来说,蜂窝状洞穴的发育具有局限性。与上、下砾岩 层相比,风成砂岩渗透性更好,抗风化能力较弱,因 而形成了类似锦石岩这样的大型层控洞穴(图 2a)。 在锦石岩洞的内壁上,蜂窝状洞穴横向连续分布,长 度可达 10 m,形似一幅飞龙壁画(图 2b),因而锦石 岩又名龙鳞片岩。

3.2 蜂窝状洞穴所在的砂岩特征

经实地考察发现,两处洞穴均发育在丹霞组二 段(锦石岩段)厚层风成砂岩的崖壁上。锦石岩段 以发育大型楔状、板状交错层理为特征(图 3a, b)。 锦石岩寺建立在高约8 m 的大型扁平洞穴内,洞穴 所在层位为发育大型高角度交错层理的风成砂岩, 可识别出2个层系,下部层系厚约3 m。前积层由 细砂到粗砂间不同粒级的纹层互层构成,其产状为 350°∠30°。蜂窝状洞穴在该套风成砂岩的中部呈 条带状生长(图 2b)。禄意堂同样发育大型高角度 交错层理,前积层倾角最大处可达 60°。

在显微镜下,来自禄意堂的砂岩样品碎屑颗粒 主要呈次圆状,分选性中等—较好,粒径主要为 0.05~0.35 mm(图3(c—g))。碎屑颗粒成分主要 包括石英(包括单晶石英和燧石、脉石英等多晶石 英)、岩屑和长石及少量云母,颗粒之间呈点—线接 触。碎屑颗粒含量为75%~93%,杂基含量为4%~ 15%,胶结物主要为钙质,含量为3%~5%。在碎屑 颗粒中,石英表面干净,可见压裂现象,波状消光,含 量为35%~48%;长石表面浑浊,部分绢云母化,可 见聚片双晶的斜长石、树枝状条纹长石、细条纹长 石、发育格子双晶的微斜长石,含量为17%~18%; 岩屑有泥岩、火山岩岩屑等,其中火山岩屑占8%~ 11%,沉积岩屑占4%~8%;黑云母碎屑含量1%~ 2%,常被压实弯曲。

3.3 蜂窝状洞穴形态特征

在锦石岩寺和禄意堂,蜂窝状洞穴呈连片状分 布在近似垂直的砂岩崖壁上(图 2 和图 3)。每个小 洞穴通过厚约 1~2 cm 的"隔壁"与周围其它小洞穴 紧密相连,形态酷似蜂巢。较大的洞穴内还发育更



图 2 长老峰锦石岩寺大型层控洞穴及其内崖壁上的蜂窝状洞穴

Fig. 2 The large bedding-controlled cavity and honeycombs on the back walls at the Jinshiyan Temple of the Mt. Zhanglao Peak (a) 锦石岩寺位于大型层控洞穴内,洞穴开口朝向为 320° ,面向蜿蜒的锦江河流;(b)大型洞穴内部崖壁上的蜂窝状洞穴 全貌;(c)和(d)均为(b)的局部放大照片,每个小洞穴单元由厚 1~2 cm 的隔壁分开形成精致的网络状;(d)有些蜂窝状 洞穴内部有新的更小的洞穴正在生长,洞穴底部可见薄层砂和粘土堆积。图 2(b)中间的佛像高约 1.8 m;图 2(c)、(d)中的厘米比例尺总长度为 6 cm

(a) The Jinshiyan Temple is located within a large bedding-controlled cave, which is facing downwards the meandering Jinjiang River with an azimuth of 320° ; (b) Overview of honeycombs on the back walls; (c) and (d) are close-up photos of the honeycombs in (b), in which the honeycombs are separated from each other by thin side walls of $1 \sim 2$ cm thick. (d) The newly developed honeycombs can be observed within some large ones whose bottoms are covered by thin sand and clay sediments. The height of the middle Buddha statue is about 1.8 m in (b). The small ruler in (c) and (d) is 6 cm long

小的蜂窝洞穴,指示了新的蜂窝状洞穴的发育循环。 锦石岩寺蜂窝状洞穴整体呈带状分布,宽约1m,长 近10m(图2b)。禄意堂蜂窝状洞穴沿大型弧形崖 壁内缘呈集群状分布,分布面积大约4~5m²,小蜂 窝洞穴之间的隔壁更薄,具有明显的沿大型交错层 理纹层发育的趋势(图3a、b)。同时,也可见残存的 粉末状岩石脱落碎屑。

蜂窝状洞穴的形态特征分析如图 4 所示。可以 看出,锦石岩寺的蜂窝状洞穴相对较大,长度基本服 从正态分布。其中,长度在 7~9 cm 区间分布较多, 最大可达 17 cm;深度集中分布在 3~7 cm 区间,具 有 3 个峰值,分别为 3 cm、6 cm、11 cm(图 4c)。禄 意堂蜂窝状洞穴的长度最大仅为 12 cm,主要分布 在 3~5 cm 之间,深度相对较浅,频率随深度加深递 减(图 4d)。通过对洞穴长度和深度的数值模型分 析,发现两者呈较好的线性关系,斜率基本一致,分 别为 0.448、0.609。因此,从统计学意义上可以看 出,锦石岩寺和禄意堂两处蜂窝状洞穴在成因上具 有相似性。

在本次研究构建的洞穴开口泰森多边形中,每

个多边形仅含1个洞穴核心数据,泰森多边形包围 区域代表该核心的能量覆盖范围,该点到相邻区域 核心的距离最小,位于多边形边上的点到其两侧的 核心距离相等。将该多边形映射到实际洞穴,发现 与锦石岩寺洞穴边界吻合性较好(图4a),与禄意堂 洞穴部分吻合(图4b黄色小框)。对比发现:当洞 穴长度与深度比值较大,即洞穴相对较浅时,宏观上 洞穴的分布符合泰森多边形规则。当蜂窝状洞穴较 深时,二者的重合度降低。

4 丹霞山蜂窝状洞穴成因分析

4.1 盐风化

盐风化是以化学过程为机制,物理过程为结果的一种特殊类型的风化作用(徐舒鹰,1993),它是 指岩石孔隙(或裂隙)中的盐类结晶生长促进岩石 表面颗粒分解或脱落的一种风化过程(Doehne, 2002;Young et al., 2009)。盐风化在自然界地貌形 态的塑造过程中充当着十分重要的角色,其影响因 素有岩石结构、含盐溶液和小气候环境等(吕洪波 等,2017)。目前,已经发现砂岩、花岗岩等具有粒



图 3 丹霞组锦石岩段风成砂岩露头及显微镜照片

Fig. 3 Outcrop and microscopic photos of aeolian sandstones of the Jinshiyan Member of the Danxia Formation (a)和(b)分别是锦石岩寺和禄意堂崖壁上的蜂窝状洞穴与大型交错层理;(c)显微照片整体特征,碎屑颗粒主要呈次圆状,分选性良好;(d)呈次圆状的单晶石英(Qm)和条纹长石(Pe);(e)单晶石英(Qm)和千枚岩岩屑(Ls),千枚岩岩屑受挤压发生弯曲,泥质胶结(M);(f)圆状多晶石英(Qp)和微斜长石(Mc),后者发育格子双晶,钙质胶结(Ca);(g)正长石(Or)呈圆状

(a) and (b) show honeycombs and large-scale cross-beds on the back walls at the Jinshiyan Temple and Luyitang sites; (c) Overview of microscopic photos shows subrounded detrital grains and well sorting; (d) subrounded monocrystalline quartz grains (Qm) and perthite (Pe); (e) monocrystalline quartz grains (Qm), platelike phyllite lithic fragments (Ls) deformed by compression, and mud cements (M); (f) a rounded polycrystalline quartzose lithic fragment (Qp), a microcline grain (Mc), and calcite cements (Ca); (g) a rounded orthoclase (Or)

状结构的岩石容易受其影响(Cardell et al., 2003; Achyuthan et al., 2010; Paradise, 2013a)。在不同气

候环境下,虽然盐风化表现形式有所差异,但最终在 地貌上都直观地表现为大小不一、形状各异的风化



图 4 丹霞山锦石岩寺和禄意堂蜂窝状洞穴形态分析

Fig. 4 Honeycomb size analysis at the Jinshiyan Temple and Luyitang sties in the Mt. Danxiashan (a)和(b)分别为锦石岩寺和禄意堂蜂窝状洞穴分布与泰森多边形的关系(泰森多边形在 ArcGIS 10.2 平台构建(http:// www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop));(c)、(d)、(e)分别为蜂窝状洞穴长度、深度及长度/深度比值分布 (a) and (b) show the relationship between the distribution of honeycombs and Voronoi diagrams at the Jinshiyan Temple and Luyitang sites. The Voronoi diagrams were constructed by using ArcGIS 10.2 software (http://www.esri.com/software/arcgis/ arcgis-for-desktop)).(c),(d), and (e) show the distribution of the length, depth, and length/depth ratio of the measured honeycombs

穴(Goudie et al., 2002; Harvey, 2012; 吕洪波等, 2017)。

4.1.1 岩石结构

研究区蜂窝状洞穴主要发育在丹霞组锦石岩段 风成砂岩中。该风成砂岩发育大型高角度交错层 理,由粗粒和细粒纹层所构成的旋回性沉积是其重 要特点,这也是造成研究区局部可以观察到蜂窝状 洞穴受纹层延伸方向控制的原因。从显微镜观察可 知,蜂窝状洞穴的寄主砂岩碎屑颗粒磨圆程度和分 选性较好,长石矿物常发生向粘土矿物的转变,胶结 物主要为钙质,颗粒间孔隙度相对较大,易于含盐溶 液的渗透及溶蚀。同时,在野外露头上,粒状和鳞片 状风化、剥落十分常见。这些特征均说明丹霞组锦 石岩段风成砂岩为盐风化作用提供了良好的物质基 础(Warke and Smith, 2000; Benavente et al., 2007; Labus and Bochen, 2012)。

4.1.2 含盐溶液

吕洪波等(2017)认为导致盐风化的盐分主要

是外来的。丹霞山地区降水丰富,多年平均降雨量 为1715 mm,降水中携带的盐分可停留在洞穴所在 砂岩的上部,随着时间的流逝逐渐渗入岩石孔隙中。 洞穴所在岩壁面朝锦江,大量湿润水汽由下而上运 动进入半封闭状态的大型层控洞穴(锦石岩寺)和 弧形崖壁(禄意堂),盐分的渗入加快了岩石的风化 速率,促进了蜂窝状洞穴的形成。另外,在丹霞组沉 积过程中,红层本身赋存了或多或少的盐分,洞穴内 部的湿度比边缘要高,会使深部的盐分向浅部运移 (郭青林等,2009)。最终在风和水两种介质的作用 下富集,为丹霞组锦石岩段砂岩发生盐风化提供充 足的物质条件。

4.1.3 微气候

丹霞山1月平均气温9.3℃,7月平均28.4 ℃,属中亚热带湿润季风气候区。除大面积分布常 绿阔叶林外,还生长有准南亚热带雨林(朱诚等, 2015)。虽然蜂窝状洞穴所在的大型扁平状洞穴暴 露在温暖湿润的大气候环境下,但是半封闭的状态 可使其与外界仍然存在着显著的差异。大型扁平洞 穴和弧形崖壁的存在避免了其内部的蜂窝洞穴与外 界复杂、强劲环境的直接接触,也为内部微气候的形 成创造了条件。

Huang Rihui 等(2017)对南海北部庙湾岛燕山 期花岗岩中发育的蜂窝状洞穴进行了气候监测,其 中洞穴 A2 的数据显示.1 月份洞穴外部温度变化为 11.8~32.4℃,内部温度为12.9~27.8℃,外部相对 湿度 32.4%~100%,内部相对湿度 42.5%~90.5%; 4月份洞穴外部温度变化为25.1~49℃,内部温度 为 25.7~35.7℃,外部相对湿度 26.7%~86.4%,内 部相对湿度 52.6%~84.5%。因此,我们认为丹霞 山大型层控洞内部的蜂窝状洞穴的形成和发展也与 温度、湿度的昼夜及季节性变化所导致的盐风化作 用密切相关。也就是说,与直接暴露在空气当中蒸 发作用强烈的陡峭崖壁表面相比,湿润水汽更容易 在蜂窝状洞穴中保持更长的时间。所以,蜂窝状洞 穴后壁往往比较潮湿,这种水汽的维持使单个小洞 穴内部软化,加速了风化作用,在洞穴底部常见风化 剥落的砂粒和粘土,而洞穴之间薄的隔壁相对比较 干燥,风化速率相对较慢(Conca and Rossman, 1982; Dorn et al., 2017)。因此,湿润水汽的差异分 布造成很多蜂窝状洞穴具有内部大而边缘(开口) 小的特点。

4.2 形成过程和发育阶段

4.2.1 发育机制

从盐风化作用的必要条件及实际情况来看,蜂 窝状洞穴的发育地点具有选择性。岩石组成和结 构、盐分含量、微气候越适宜,发育蜂窝状洞穴的概 率越高。丹霞山体具有顶平的特点,山顶植被生长 茂盛,有一定蓄水能力,加上外部的降水渗透,共同 构成盐分流通的介质。盐分在孔隙度较好的砂岩位 置富集,随着水分的蒸发,盐类开始结晶,盐分结晶 产生的张力将靠近表面的碎屑颗粒撑开而脱落(吕 洪波等,2017),从而发生粒状、鳞片状风化。

在图 5a 中,砂岩内部的含盐溶液较为充足,渗 出岩石后水分蒸发,留下盐的结晶体。从洞穴的最 后形态来看(图 4a),洞穴发育强调其核心的扩散作 用。从条件最为适宜的点出发,盐风化作用逐渐向 四周辐射。洞穴雏形(细小的坑洼)产生以后,微气 候作用的影响越来越显著,洞穴内部相对湿润,更适 合水分蒸发和盐分结晶,加速风化作用。相反,蜂窝 状洞穴的隔壁相对干燥而发生硬化。该过程随时间 推移持续进行,直至洞穴隔壁由于重力、风力、自身 结构等原因失稳脱落。

4.2.2 发育阶段

在丹霞山阳元山景区的锦石岩段砂岩崖壁上, 可以观察到蜂窝状洞穴发育的初始阶段(图 5a、e)。 在该阶段,砂岩内的盐分在一定条件下膨胀,对岩石 施压,或作用于砂岩中胶结较弱的小砾石,使其脱 落,形成零星的微型洞穴。

砂岩岩壁表面纹层代表着不同粒级砂层的叠置,同一纹层性质一般相同。因此,在扩张阶段,蜂 窝状洞穴的数量有沿纹层持续增多、左右贯通的趋势(图5b、f)。在深化阶段,蜂窝状洞穴的发育可能 突破纹层的限制,多个相邻的小洞穴发生贯通,逐渐 合成为一个较大的洞穴。另外,在这种较大洞穴内 部仍然可见少许新生成的小洞穴(雏形),反映了蜂 窝状洞穴又开始了新一轮的演化循环(图5c、g)。

最后,进入成熟阶段(图 5d、h),每个蜂窝状洞 穴的深度加大、开口直径增加,显示出明显的受纹层 延伸方向的控制作用。同时,在这一阶段,单个洞穴 内部发育若干个更小洞穴的现象普遍存在,许多洞 穴隔壁变薄,厚度小于1 cm。有的隔壁虽然在外部 相连接,但是内部已经沟通而呈现出更为复杂的三 维空间构造。在该阶段,蜂窝状洞穴的开口形态与 泰森多边形比较吻合。

本文虽然将丹霞山砂岩崖壁上的蜂窝状洞穴发 育过程划分为四个阶段,但实际上,有时候在同一个 崖壁上,不同的演化阶段可以并存,它们并不是严格 分开的。这一特征可能指示了蜂窝状洞穴发育的速 率比较快。根据 Grisez(1960)的研究,从 1898 年到 1960 年的 62 年内,在法属大西洋沿岸海堤中,结晶 片岩巨砾上的蜂窝状洞穴最大深度为 66 mm,说明 蜂窝状洞穴的发育速率可达 1 mm/a。在印度 Tamil Nadu 海岸,铁镁质矿物只需要十几年就会被破坏, 而在 花 岗 岩 表 面 形 成 不 规 则 形 状 的 风 化 穴 (Achyuthan et al., 2010)。

洞穴的生长需要适宜的微气候环境。从整体来 看,中部洞穴的较快速生长、脱落及边缘洞穴的新发 展,使洞穴整体具有向内凹进的趋势。此现象可以 用反馈机制来解释,即洞穴或微气候为保持自身平 衡,本身会向创造一个加快自身扩张(正反馈)或阻 止自身发展(负反馈)环境发展(Goudie et al., 1997),或直接发育在已经形成的扁平状洞穴内部。 之后,随着单个洞穴的体积逐渐增大,蜂窝状洞穴系 统逐渐成熟,洞穴开口整体(或部分)形态与泰森多



图 5 丹霞山丹霞组锦石岩段风成砂岩崖壁上蜂窝状洞穴发育阶段 Fig. 5 The development stages of honeycombs on the cliff faces of the aeolian sandstones from the Jinshiyan Member of the Danxia Formation in the Mt. Danxiashan (a、e)初始阶段;(b、f)扩张阶段;(c、g)深化阶段;(d、h)成熟阶段;照片(a)、(b)和(c)中的 卡片长度为 10 cm,宽度为 7 cm。照片 d 右下角小洞穴内的比例尺长度为 6 cm

(a) and (e) Initiation stage; (b) and (f) Expansion stage; (c) and (g) Deepening stage; (d) and (h) Mature stage. The blue card in (a), (b), and (c) for scale is 10 cm long and 7 cm wide. The small ruler in the lower honeycomb is 6 cm long in (d)

边形吻合。岩性致密、不易溶蚀的层位仍作为洞穴 的稳固边界。随着洞穴加深,洞穴外壁形态向不规 则状发展,最终失稳脱落。

5 结论

在丹霞山地区,丹霞组二段(锦石岩段)红层主 要以发育大型板状、楔状交错层理的厚层—块状砂 岩为特征,蜂窝状洞穴在砂岩中的生长具有比较明 显的选择性。在长老峰的锦石岩寺和睡美人禄意 堂,红色砂岩崖壁面朝锦江,自生和外生盐分充足, 气候适宜,为盐风化作用创造了岩石基础和气候条 件,适宜蜂窝状洞穴生长。

蜂窝状洞穴的形成主要是因为砂岩内盐分结晶 产生的张力对岩石颗粒的破坏作用。在初始发育阶 段,一般从最适合盐风化作用的若干个点出发形成 细小的坑洼,逐步扩大并向同层位发生横向扩张,指 示了蜂窝状洞穴发育的层控性特点。随着蜂窝状洞 穴的进一步生长,其发育范围可能突破纹层的限制。 到成熟阶段,蜂窝状洞穴整体或部分形态符合泰森 多边形规则分布。最终,随着洞穴加深、扩大,在重 力、风力的影响下,蜂窝状洞穴隔壁变薄、崩落,洞穴 消亡。但是在同一个崖壁面上,可以见到不同阶段 的蜂窝状洞穴并存,一方面说明其形成速率很快,另 一方面指示了蜂窝状洞穴系统的不稳定性。

致谢:感谢韶关市丹霞山管理委员会陈昉、侯荣 丰、黄涛、顾丽娟、黄兰珍、余东亮等工作人员,他们 为野外考察提供了热情的帮助。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

- 陈丕基. 1997. 晚白垩世中国东南沿岸山系与中南地区的沙漠和盐 湖化. 地层学杂志, 21(3): 203~213.
- 广东省地质调查院. 2008. 中华人民共和国地质图(1:50000):丹霞 山世界地质公园.
- 郭青林, 王旭东, 薛平, 张国彬, 樊再轩, 侯文芳, 张正模. 2009. 敦 煌莫高窟底层洞窟岩体内水汽与盐分空间分布及其关系研究. 岩石力学与工程学报, 28(增2): 3769~3775.
- 黄进. 2010. 丹霞山地貌. 北京: 科学出版社.
- 吕洪波,苏德辰,章雨旭,冯雪东,李春旺. 2017. 中国不同气候带 盐风化作用的地貌特征. 地质论评, 63(4):911~926.
- 欧阳杰, 彭华, 罗晓莹, 陈再雄, 张安新, 马育宣. 2017. 丹霞山国家 珍稀濒危保护植物丹霞梧桐空间分布的微地貌环境特征研究. 地理科学, 37(10): 1585~1592.
- 彭华, 邱卓炜, 潘志新. 2014. 丹霞山顺层洞穴风化特征的试验研究. 地理科学, 34(4): 454~463.
- 谭艳,朱诚,吴立,孙伟,王晓翠,贾天骄,彭华,侯荣丰.2015.广东 丹霞山砂岩蜂窝状洞穴及白斑成因.山地学报,33(3):279~ 287.
- 谢绍锋,欧阳君祥,肖化顺.2017.基于泰森多边形与条件熵的林火 易发性空间分布研究.林业资源管理,(4):50~58.

- 徐叔鹰. 1993. 干旱区盐风化过程的初步研究. 干旱区地理, 16(2): 14~20.
- 杨雯婷,黄坤,张勤勤. 2016. 基于泰森多边形的油库配送区域优化. 油气储运, 35(1):68~72.
- 张显球,林小燕.2013. 粤北丹霞盆地白垩系长坝组的介形类动物 群. 微体古生物学报,30(1):58~86.
- 张显球. 1992. 丹霞盆地白垩系的划分与对比. 地层学杂志, 16(2): 81~95.
- 朱诚, 马春梅, 张广胜. 2015. 中国典型丹霞地貌成因研究. 北京: 科 学出版社.
- 邹强,张晓华,姚玉刚,丁黄达,朱燕玲. 2014. 泰森多边形在环境 空气监测网络布设中的应用.干旱环境监测,28(1):36~38.
- Achyuthan H, Ashok Kumar K, Tiwari S K, Norwick S. 2010. A reconnaissance study of tafoni development, exfoliation, and granular disintegration of natural and artificial rock surfaces in the coastal and lowland regions of Tamil Nadu, Southern India. Zeitschrift Für Geomorphologie, 54(4): 491~509.
- Benavente D, Martínez-Martínez J, Cueto N, García-del-Cura M A. 2007. Salt weathering in dual-porosity building dolostones. Engineering Geology, 94(3~4), 215~226.
- Bruthans J, Filippi M, Slavík M, Svobodová E. 2018. Origin of honeycombs: Testing the hydraulic and case hardening hypotheses. Geomorphology, 303: 68~83.
- Cardell C, Rivas T, Mosquera M J, Birginie J M, Moropoulou A, Prieto B, Silva B, Van Grieken R. 2003. Patterns of damage in igneous and sedimentary rocks under conditions simulating sea——salt weathering. Earth Surface Processes and Landforms, 28(1): 1~14.
- Chen Piji. 1997&. Coastal Mountains of SE China, desertization and saliniferous lakes of Central China during the Upper Cretaceous. Journal of Stratigraphy, 21(3): 203~213.
- Chen Sufang, Li Mingwan, Hou Rongfeng, Liao Wenbo, Zhou Renchao, Fan Qiang. 2014. Low genetic diversity and weak population differentiation in *Firmiana danxiaensis*, a tree species endemic to Danxia landform in northern Guangdong, China. Biochemical Systematics and Ecology, 55: 66~72.
- Conca J L, Rossman G R. 1982. Case hardening of sandstone. Geology, 10(10): 520~523.
- Dill H G, Weber B, Gerdes A. 2010. Constraining the physical chemical conditions of Pleistocene cavernous weathering in late Paleozoic granites. Geomorphology, 121(3~4): 283~290.
- Doehne, E. 2002. Salt weathering: a selective review. Geological Society, London, Special Publications, 205: 51~64.
- Dorn R I, Mahaney W C, Krinsley D H. 2017. Case hardening: turning weathering rinds into protective shells. Elements, 13(3): 165 ~ 169.
- Goudie A S, Viles H A. 1997. Salt Weathering Hazards. Chichester: John Wiley and Sons.
- Goudie A S, Wright E, Viles H A. 2002. The roles of salt (sodium nitrate) and fog in weathering: a laboratory simulation of conditions in the northern Atacama Desert, Chile. Catena, 48(4): 255~266.
- Grisez L. 1960. Alvéolisation littorale de schistes métamorphiques. Revue Géomorphologie Dynamique, 11: 164~167.
- Guangdong Geologic Survey Institute, 2008 #. Geological Map (1: 50000) of the People's Republic of China: Danxiashan Global Geopark.
- Guo Qingling, Wang Xudong, Xue Ping, Zhang Guobin, Fan Zaixuan, Hou Wenfang, Zhang Zhengmo. 2009&. Research on spatial distribution and relations of salinity and moisture content inside rock

mass of low-layer caves in Dunhuang Mogao Grottoes. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 28(Supp.2): 3769~ 3775.

- Harvey A. 2012. Introducing Geomorphology: a Guide to Landforms and Processes. Edinburgh: Dunedin Academic Press: 1~124.
- Huang Jin. 2010#. Landforms of the Mt. Danxiashan. Beijing: Science Press.
- Huang Rihui, Wang Wei. 2017. Microclimatic, chemical, and mineralogical evidence for tafoni weathering processes on the Miaowan Island, South China. Journal of Asian Earth Sciences, 134: 281~292.
- Labus M, Bochen J. 2012. Sandstone degradation: an experimental study of accelerated weathering. Environmental Earth Sciences, 67(7): 2027~2042.
- Lü Hongbo, Su Dechen, Zhang Yuxu, Feng Xuedong, Li Chunwang. 2017&. Landform features of salt weathering in different climatic zones in China. Geological Review, 63(4): 911~926.
- Mustoe G E. 2010&. Biogenic origin of coastal honeycomb weathering. Earth Surface Processes and Landforms, 35(4): 424~434.
- Ouyang Jie, Peng Hua, Luo Xiaoying, Chen Zaixiong, Zhang Anxin, Ma Yuxuan. 2017&. Environmental features of the micro-landforms of the spatial distribution of the national rare species of *Firmiana danxiaensis* on the Danxiashan mountain. Scientia Geographica Sinica, 37(10): 1585~1592.
- Paradise T R. 2013a. Tafoni and other rock basins. In: Shroder J F, Pope G A. eds. Treatise on Geomorphology, 4: 111 ~ 126. San Diego: Academic Press.
- Paradise T R. 2013b. Assessment of tafoni distribution and environmental factors on a sandstone djinn block above Petra, Jordan. Applied Geography, 42(8): 176~185.
- Peng Hua, Qiu Zhuowei, Pan Zhixin. 2014&. Experimental study on the weathering features of bedding caves at Mt. Danxiashan. Scientia Geographica Sinica, 34(4): 454~463.
- Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, Zhu Wenbin. 2007. Mesozoic—Cenozoic basin features and evolution of Southeast China. Acta Geologica Sinica (English Edition), 81(4): 573~586.
- Sunamura T, Aoki H. 2011. Application of an S-shaped curve model to the temporal development of tafoni of salt-weathering origin. Earth Surface Processes and Landforms, 36(12): 1624~1631.
- Tan Yan, Zhu Cheng, Wu Li, Sun Wei, WangXiaocui, Jia Tianjiao, Peng Hua, Hou Rongfeng. 2015&. Geomorphogensis on sandstone honeycombs and white spot in the Mt. Danxiashan, Guangdong Province, South China. Mountain Research, 33(3): 279~287.
- Warke P A, Smith B J. 2000. Salt distribution in clay-rich weathered sandstone. Earth Surface Processes and Landforms, 25(12): 1333 ~1342.
- Xie Shaofeng, Ouyang Junxiang, Xiao Huashun. 2017&. Research on the forest fire susceptibility spatial distribution of voronoi and conditional entropy. Forest Resources Management, (4): 50~58.
- Xu Shuying. 1993&. Preliminary study on the salt weathering process in arid area. Arid Land Geography, 16(2): 14~20.
- Yang Wenting, Huang Kun, Zhang Qinqin. 2016&. Optimization of tankfarm distribution region based on Thiessen—Polygon. Oil & Gas Storage and Transportation, 35(1):68~72.
- Young R W, Wray R A L, Young A R M. 2009. Sandstone Landforms. Cambridge: Cambridge University Press.
- Zhang Xianqiu. 1992 #. Cretaceous subdivision and correlation in the Danxia Basin. Journal of Stratigraphy, 16(2): 81~95.

- ZhangXianqiu, Lin Xiaoyan. 2013&. Cretaceous Ostracods from the Changba Formation in the Danxia Basin of northern Guangdong Province. Acta Micropalaeontologica Sinica, 30(1): 58~86.
- Zhu Cheng, Ma Chunmei, Zhang Guangsheng. 2015 #. Development mechanisms of typical Danxia landforms in China. Beijing; Science

Press.

Zou Qiang, Zhang Xiaohua, Yao Yugang, Ding Huangda, Zhu Yanling. 2014&. Thiessen polygon and its application in planning of ambient air monitoring network. Arid Environmental Monitoring, 28(1):36 ~38.

Characteristics and Origin of Honeycombs in the Danxiashan Global Geopark in South China

CHEN Liuqin^{1,2)}, LI Xinmin²⁾, GUO Fusheng²⁾, LI Pengcheng²⁾, LI Yuliang²⁾, LIU Xin²⁾

1) State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, Nanchang, 330013;

2) School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang, 330013

Objectives: Honeycombs are great interests of scientific community and the public alike owing to their delicate morphology and controversial formation processes. The honeycombs in the Danxiashan Global Geopark of South China occur along the cliff faces of the aeolian sandstones, which belong to the Second (Jinshiyan) Member of the Late Cretaceous Danxia Formation. In this study, two sites were chosen to discuss the influences of salt weathering on formation mechanisms of these honeycombs.

Methods: Field investigation, size measurement, sandstone sampling and observation under a microscope were performed to obtain lithology, grain composition and fabric, and honeycomb sizes. Moreover, the Voronoi polygons were completed by using ArcGIS 10.2 software to compare with honeycomb openings.

Results: The results show that the development locations of the honeycombs are largely selective. The two studied sites are facing downwards the Jinjiang River, which is beneficial for moisture availability and maintenance in them because of the curvature of the rock faces. The bedrock is aeolian sandstones with large-scale crossbeddings and well permeability. In addition, the openings of honeycombs are basically in accordance with the Voronoi diagrams.

Conclusions: The relatively homogeneous thick-bedded aeolian sandstones are the crucial bedrock lithology, and the Jinjiang River supplies essential moisture for the development of the honeycombs in the study area. It can be deduced that small pits in the cliffs might generate from a number of points suitable for salt weathering during the initial development stage, and then gradually expands laterally along the same intervals. Owing to the on-going salt weathering, the inside back walls are possibly being weathered at higher rates than the side walls of the honeycombs. Then the honeycomb cells cross through laminations, resulting in enlargement and deepening of them. As a result, the honeycomb openings are in agreement with Voronoi polygons at least in part during the mature stage. Eventually, as the honeycomb cells deepen, the side walls become thin and unstable and might suffer sudden collapse owing to the influence of the gravity and wind.

Keywords: honeycomb; salt weathering; aeolian sandstone; Danxia landform; Danxiashan Global Geopark; Mountain Danxia

Acknowledgements: This study was financially supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 41602113, 41772197), Scientific Research Fund from Danxiashan Administrative Committee (No. DXSGE02017001), and Jiangxi Provincial Graduate Innovation Fund Project. We are grateful to CHEN Fang, HOU Rongfeng, HUANG Tao, GU Lijuan, HUANG Lanzhen, and YU Dongliang of the Danxiashan Administrative Committee for their generous help during the field survey.

First author: CHEN Liuqin, male, born in 1983, associate professor of sedimentary petrology and Danxia landform. Email: liuqincheen@163.com

Manuscript received on: 2018-02-03; Accepted on: 2018-06-08; Edited by: ZHANG Yuxu **Doi**: 10.16509/j.georeview.2018.04.007