

丹霞地貌定义、分类及丹霞作用研究

郭福生¹⁾, 陈留勤²⁾, 严兆彬¹⁾, 刘富军²⁾, 潘志新³⁾, 张炜强²⁾, 胡海平²⁾

1) 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 南昌, 330013;

2) 东华理工大学地球科学学院, 南昌, 330013; 3) 海南大学, 海口, 570228

内容提要:丹霞地貌以广东丹霞山最为典型而得名,是一种发育赤壁丹崖群的特殊地貌类型,近年来随着旅游开发不断升温而成为景观地貌学关注的重要对象,但其中一些基本问题长期争论不休。本文从命名地的地质、地貌特征和我国区域地质发展史角度出发,重新厘定了丹霞地貌的定义与分类,强调丹霞地貌的三大基本要素:赤壁丹崖地貌特征、燕山旋回以来陆相红层基础和以流水侵蚀为主的地质营力。西北地区也广泛发育丹霞地貌,一类是黄土覆盖下的古丹霞,另一类是干旱区片流侵蚀和泥乳贴膜的丹霞。丹霞作用是对中生代陆相碎屑岩经流水侵蚀、重力崩塌和风化剥落等多种地质作用的统称,其产物就是丹霞地貌。岩性控制和崖壁片流垂蚀是丹霞作用的两种特殊机理。红层盆地的沉积相及其岩性差异控制着丹霞地貌的发育及其景观类型,据此在地貌发育的构造、外力和时间三个因素基础上增加了岩性因素。南方典型的红层盆地中,边缘冲积扇相粗碎屑岩地区可经历青年、中年和老年等发展阶段,盆地中央湖泊相泥岩、粉砂岩却没有经历过绝壁陡崖发展阶段。暴雨水流在丹霞崖壁上发生近垂直向下的侵蚀作用叫片流垂蚀作用。其中冲蚀作用形成竖状沟槽、竖状洞穴,涡蚀作用(借助风力吹动发展成垂直崖壁的涡旋)形成圆锥状洞穴、串珠状洞穴,后者使得洞穴沿软弱岩层分布,进一步扩大成扁平状洞穴。这些洞穴形成年代具有垂向一致性,不具有上老下新变化趋势,而在水平方向上,不同部位洞穴的形成年代可能不同。

关键词:丹霞地貌;丹霞作用;红层;地貌演化模式;片流垂蚀作用

自冯景兰等(1928)命名粤北红层为“丹霞层”,陈国达等(1939)提出“丹霞地形”术语,中华书局(1961)出版的《辞海(试行本)·地理分册》正式列入“丹霞地貌”词条以来,经过90余年的研究,丹霞地貌在区域分布、基本特征、成因机制、盆地演化与国际对比等方面取得长足进展(Feng Jinglan et al., 1928; Chen Guoda et al., 1939; Zeng Zhaoxuan, 1943; Zeng Zhaoxuan et al., 1978; Li Jianxian, 1961; 辞海编辑委员会, 1961; Zhang Yuping et al., 1963; Peng Hua et al., 2015; Qi Deli et al., 2005; Zhu Cheng et al., 2005, 2010, 2015; Pan Zhixin et al., 2015, 2016; Chen Liuqin et al., 2017, 2018, 2019a, 2019b; Jiang Yongbiao et al., 2009; Jiang Yongbiao, 2010; Xing Guangfu et al., 2013; Chen Lihong et al., 2015; Yan Luobin et al., 2019; Su Dechen et al., 2018; Jiang Fuwei et al., 2018; Guo

Fusheng et al., 2006, 2007, 2011, 2012a, 2012b, 2013a, 2013b, 2018, 2019)。黄进(1982, 2005)对丹霞坡面和地貌发育特征的研究,彭华等总结的国内外红层分布与丹霞地貌演化模式,为丹霞地貌研究确定了基本框架(Huang Jin, 1982, 2005; Peng Hua, 2000a; Peng Hua et al., 2013)。近年来,3S技术、电子探针、释光测年、同位素测年、古地磁等新技术新方法的应用,为丹霞地貌研究增添了新的活力(Liu Linqing et al., 2007; Guo Guolin et al., 2006; Xu Xing et al., 1990; Huang Jin, 2004; Jiang Yongbiao et al., 2006; Xu Huan, 2019);国内外红层地貌对比研究已逐步开展(Pan Zhixin et al., 2015, 2016; Peng Hua et al., 2015; Yu Shaohua et al., 2011);丹霞地貌的概念正在逐渐被国际地学界认可,美国西部和澳大利亚发育的红色砂岩地貌陆续被报道与中国东南地区的丹霞地貌极为相似

注:本文为国家自然科学基金项目(编号41772197、41962009、41761002)和韶关市丹霞山管委会科研基金项目资助成果。

收稿日期:2019-09-02;改回日期:2019-11-24;网络发表日期:2019-11-27;责任编辑:周健。

作者简介:郭福生,男,1962年生。教授(二级),博士生导师,从事区域地质、沉积岩和丹霞地貌研究。Email:24173404@qq.com。

引用本文:郭福生,陈留勤,严兆彬,刘富军,潘志新,张炜强,胡海平. 2020. 丹霞地貌定义、分类及丹霞作用研究. 地质学报, 94(2): 361~374, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020110.

Guo Fusheng, Chen Liuqin, Yan Zhaobin, Liu Fujun, Pan Zhixin, Zhang Weiqiang, Hu Haiping. 2020. Definition, classification, and danxianization of Danxia landscapes. Acta Geologica Sinica, 94(2): 361~374.

(Kwan Ming Chan, 2002; Young et al., 2009); Migoń et al. (2019)正式使用了丹霞地貌(Danxia landscapes)概念并报道了广东丹霞山顺层洞穴(Duszyński et al., 2019), Kusky et al. (2010)对江西龙虎山丹霞地貌演化开展了专门研究。一种特殊类型岩石地貌的学科理论已初成体系,这些成果为丹霞地貌景区成功申报世界地质公园、世界自然遗产地奠定了理论基础。

我国2004~2007年先后获批了丹霞山、泰宁、龙虎山3个以丹霞地貌为主要景观的世界地质公园,2010年8月以贵州赤水、福建泰宁、湖南崀山、广东丹霞山、江西龙虎山和浙江江郎山组成的“中国丹霞”被正式列入《世界遗产名录》,国际地貌学家协会(International Association of Geomorphologists, IAG)于2009年设立了“IAG丹霞地貌工作组(IAG Danxia Geomorphology Working Group)”,标志着丹霞地貌作为一种特殊地貌类型走上了国际学术舞台。在地貌学的辞典中,很少有“丹霞”这样的词条是用汉语命名的。万山红遍映丹霞,丹霞是中国的自然瑰宝(Liu Jiaqi, 2012)。

然而,丹霞地貌的学科体系和理论体系的构建还显得比较薄弱,与岩石地貌学的其他学科相比尚存在差距。关于丹霞地貌岩石基础的时代和岩相、丹霞地貌发育控制因素和演化模式等尚存争议,是当前丹霞地貌研究中迫切需要解决的基本问题。本文从构造演化旋回、水流侵蚀作用方式、沉积相对风化作用的控制等方面,对上述问题进行剖析。

1 丹霞地貌定义与分类

1928年,地质学家冯景兰等在广东省北部进行地质调查时,为了地质填图开展地层划分,把分布在仁化丹霞山一带的红色砂岩、砾岩定名为“丹霞层”,当时确定其时代为第三纪,并盛赞丹霞层形成的地貌美景“绝崖陡壁”(Feng Jinglan et al., 1928)。后来广东省地质矿产局把这套红层的时代划入晚白垩世,改称丹霞组(Huang Jin, 2010)。著名地质学家陈国达(1938, 1939)先后提出“丹霞山地形”、“丹霞地形”概念,并用作“丹霞层”地层对比的标志(Kuota Chan, 1938; Chen Guoda et al., 1939)。曾昭璇对华南丹霞地形做了大量研究(Zeng Zhaoxuan, 1943, 1960; Zeng Zhaoxuan et al., 1957)。李见贤(黄进)在1961年编制广东省地貌图时把丹霞地形作为一种独立的地貌类型,并首次提出“丹霞地形”的定义(Li Jianxian, 1961)。1961年,

“丹霞地貌”首次作为正式词条列入中华书局出版的《辞海(试行本)·地理分册》(辞海编辑委员会, 1961)。张玉萍等(1963)开展广东南雄盆地红层划分研究时,首次在学术论文中使用了“丹霞地貌”术语(Zhang Yuping et al., 1963)。

近年来由于旅游开发的需要,有些旅游区把色彩鲜艳、造型奇特的地貌都宣传为丹霞地貌。学术界也有不同意见,大致可分为5种情况:①依据命名优先权原则,把丹霞地貌限定为类似丹霞山的由白垩纪陆相红色碎屑岩形成的赤壁丹崖群(Chen Anze, 2013; Chen Anze et al., 2013; Cui Haiting et al., 2017);②主张凡具有赤壁丹崖的地貌,不论由什么岩石类型(包括海相碎屑岩、石灰岩、火山岩、变质岩、花岗岩)组成,都可称为丹霞地貌(Liu Shangren et al., 2003);③把无陡崖的彩色丘陵地貌也称为丹霞地貌,甚至把所有红层地貌(包括红层山地、红层丘陵、红层高原)都看成丹霞地貌,如把甘肃张掖临泽县的七彩丘陵景区与位于肃南县的冰沟丹霞景区的地貌景观混为一谈,把陕西府谷县莲花辿杂色砂岩彩丘景观也称为丹霞地貌;④彭华的折中方案,认为丹霞地貌是以赤壁丹崖为特色的红色陆相碎屑岩地貌,即以陆相为主(可能包含非陆相夹层)的红层(不限制红层年代)发育的具有陡崖坡的地貌(Peng Hua et al., 2004; Peng Hua, 2020);⑤把发育丹霞地貌的地层岩石表述为中生代至新近纪陆相红层(Zhou Dingyi, 1994; Bao Guangpu et al., 2019)或侏罗纪、白垩纪、古近纪红色砂岩、砾岩(Zhou Chenghu, 2006)。Zhao Ting et al. (2011)将燕山旋回形成红层基础、喜马拉雅旋回形成地貌景观的地质发展过程写进了丹霞地貌定义,但将非燕山期的陆相红层、非陆相碎屑岩形成的丹崖赤壁地形也扩展为广义的丹霞地貌。黄进在1961、1988、1991、1995、2006年先后对丹霞地貌做过多种定义,从“由水平或变动很轻微的厚层红色砂岩、砾岩所构成,因岩层呈块状结构和富有易于透水的垂直节理,经流水向下侵蚀及重力崩塌作用形成陡峭的峰林或方山地形”、“发育于侏罗纪至第三纪……厚层紫红色砂、砾岩层之上……的丹崖赤壁地貌”、“由红色砂砾岩形成的丹崖赤壁”、“有丹崖的红色陆相碎屑岩地貌”到“由红色碎屑岩形成雄伟奇险的岩壁、岩峰、岩洞、岩块等有关的地貌”(Li Jianxian, 1961; Huang Jin, 1995; Liu Shangren et al., 2003)^①,变化较大。可见,明确丹霞地貌含义,以便更有效地开展科学研究、区域对比及旅游宣传是当务之急。

1.1 定义厘定

岩石地貌的关键因素是构成地貌的岩石类型。每一种地貌类型都是一定地质历史条件下的产物,岩石的时代是进行地球演化过程对比研究的基本要素,岩石地貌只有与岩石的形成年代联系起来才有区域对比意义(Chen Anze, 2013; Cui Haiting et al., 2017)。对地层时代、沉积相、地貌形成的地质营力进行限定,不仅仅是地貌分类原则的需要,也有利于大众对地质景观形成历程的认知,因而泛化丹霞地貌概念的做法可能不妥。曾昭璇等(1957)强调丹霞地貌发育的构造演化过程,阐述了其物质基础是燕山旋回的陆相红层(Zeng Zhaoxuan et al., 1957; Cui Haiting et al., 2017)。

我国陆相红层的沉积时代一般为侏罗纪—白垩纪,即燕山运动造成的内陆盆地堆积物。但由于构造运动和盆地演化具有趋前性和滞后性,在一些地区红层形成时代可上溯到中三叠世,晚到新近纪(Zhao Ting et al., 2011)。

这些红色内陆盆地在随后的喜马拉雅运动中,发生构造抬升或褶皱,遭受风化剥蚀,当地质构造、岩石成分、气候条件合适时,就形成丹霞地貌。因此,形成丹霞地貌的时间主要为古近纪、新近纪和第四纪。

上述陆相红层形成的时代、构造背景及其隆升剥蚀过程,在地洼学说的著作中有较详细的论述,被列为地洼构造层产物,具有较好的借鉴意义(Chen Guoda, 2008)。

笔者认为,将丹霞地貌的地层时代仅限于白垩纪,而将在构造旋回上相延续的侏罗纪、古近纪红层形成的特征相同的地貌也排除于丹霞地貌之外,这种割裂地质演化旋回和构造层的做法似不妥当。将所有红层(不限时代或不限岩相)形成的陡崖地貌都称丹霞地貌,这是忽略了地壳演化的阶段性。古生代乃至更早时期的老红层岩石坚硬,胶结紧密,与中生代红层岩石性质差别显著,侵蚀作用方式与结果也不尽相同,如前者缺乏片状剥落作用、溶蚀圆化现象、砾石掉落形成洞穴等特征,地貌外观差异大。华北元古界海相红色砂岩形成的红崖,呈现棱角鲜明的块状特征,有人称为嶂石岩地貌(Guo Kang, 1992),也可以继续沿用国际通用的名词“砂岩地貌”(Sandstone Landforms),如同澳大利亚奥陶纪老红砂岩形成的奥尔加山(Mount Olga)和艾尔斯岩(Ayers Rock)。把这些有陡崖群的红层地貌统称为类丹霞地貌是可取的(Liu Shangren, 1999)。近年来,有学者把典型的丹霞地貌也泛称为碎屑岩

地貌或者作为碎屑岩地貌的一部分,忽视了丹霞地貌这一特殊类型地貌术语的历史渊源和现实意义,也对其在非地学界的普及和应用增添了困惑。

遵循发源地的地质、地貌特征,运用岩石地貌命名五项原则(岩石性质、地层时代、地貌造型、形成动力、实例),本文将丹霞地貌定义修订为:丹霞地貌是发育于中生代至新近纪陆相近水平厚层状紫红色砂岩、砾岩中的丹崖赤壁及方山、石墙、石柱、峡谷、洞穴等地形的统称。地壳抬升、断裂切割、流水侵蚀、重力崩塌、风化剥落和化学溶蚀是其主要地质营力。以中国广东丹霞山为代表,是一种独特的红层地貌和景观资源,具有很高的科学研究和旅游观赏价值。而对于其他不同年代及沉积环境的红层,在不同地质营力下形成的赤壁陡崖地貌可统称为类丹霞地貌。

从地壳演化的角度出发,丹霞地貌的定义也可以表述为:印支—燕山构造旋回以来形成的陆相红色碎屑岩,在喜马拉雅运动中隆升并产生垂直断裂,经流水侵蚀、重力崩塌和风化剥落等外动力地质作用形成的以丹崖赤壁为代表的地形组合。丹霞地貌涵义应该强调三点:一是地貌特征,具有陡峭的悬崖;二是地层基础,主要为燕山构造旋回(考虑趋前和滞后性,中三叠世至新近纪)陆相红层,以红色厚层河湖相碎屑岩为主;三是地质营力主要为流水侵蚀、重力崩塌、风化剥落。

1.2 西北丹霞地貌及其对黄土地貌成因的启示

有学者把丹霞地貌产地限定在华南亚热带湿润区域内,对西北干旱区的丹霞地貌存在异议(Liu Jing, 2009)。但是,地质历史时期的气候并非一成不变,有些赤壁丹崖是黄土高原形成前,甚至是白垩纪末、古近纪、新近纪形成的,当时的古气候比现今温暖湿润,与现在南方相似。Miao et al. (2013)对兰州盆地泥岩抱粉共存分析表明,渐新世早期该区的气候类型与现在中国东南部类似,比现在温暖湿润。依据植物化石的重建结果表明,该区中新世中晚期气候比较湿润(Sun Bonian et al., 2004; Yao Nini et al., 2010; Miao et al., 2013; Zhang Peng et al., 2016)。

近年来,在中国西北干旱区发现了大量丹霞地貌,以陕西省北部最为典型,包括丹霞崖壁、方山、峡谷、波浪谷等(Guo Fusheng et al., 2019; Bao Guangpu et al., 2019)。陕北丹霞地貌的成景岩层多为白垩纪洛河组,主体为紫红色砂岩,分选性很好,结构成熟度高,成分成熟度低(长石砂岩多),钙质、泥质胶结,常见钙质结核。洛河组砂岩发育大型板状交错层理,细层延伸极为稳定,属风成砂岩夹有

少量层厚较薄的河湖相沉积。其独特之处就是红层丹霞地貌之上有厚层松散堆积物(主要是第四纪黄土以及砾石层等)覆盖(图 1a)。丹霞红层与上覆黄土之间存在风化壳,黄土之下红色碎屑岩顶部起伏多变,有的碎屑岩山丘无黄土覆盖。区域上,该区古近纪及新近纪沉积基本缺失,有零星分布的河湖相沉积,但周边渭河、银川、河套等地盆地同时期的河湖沉积相厚达几千米(Han Peng et al., 2008; Lin Yuxiang et al., 2015; Zhao Xitao et al., 2018),其碎屑物质就来源于白垩纪丹霞红层的剥蚀产物。长期的隆升和风化剥蚀形成了丹霞地貌和红层丘陵,之后又被第四纪黄土覆盖,经后期沟谷侵蚀形成现今的地貌景观。由此可见,陕北白垩纪红层形成后,古近纪以来经历过丹霞地貌发育和演化过程,这从黄土覆盖少的铜川照金一带的丹霞地貌可以得到印证。照金国家地质公园有方山、石寨、单面山、穿洞等,与南方丹霞地貌形态相同(图 1b)。因此,陕北地区是在红层基础上先形成丹霞地貌,然后被第四纪黄土覆盖,在沟谷处被流水剥蚀出露丹霞地貌并进一步受到继承性侵蚀。故陕北丹霞地貌可命名为“黄土覆盖型丹霞”,它以峡谷型丹霞为主,说明总体

上还处于较为年青的演化阶段或由于后期黄土剥蚀揭露有限所致(Guo Fusheng et al., 2019)。

黄土地貌主要有黄土沟谷地貌(纹沟、细沟、切沟、冲沟)和沟(谷)间地貌(塬、梁、峁)。黄土塬是平整的黄土土地,梁是长条形的黄土高地,峁是呈圆形的山丘(Yang Jingchun et al., 2012)。由上文推断,形成黄土塬、梁、峁的原因,与黄土覆盖丹霞地貌和黄土堆积后沟谷继承性流水侵蚀有关,黄土梁、黄土峁主要不是由黄土塬被沟谷侵蚀切割后蚀余而成(Liu Tungsheng et al., 2001)。

西北干旱区除了黄土覆盖型丹霞(古丹霞)外,丹霞地貌总体特征也与南方类似,以中生代陆相红层、赤壁丹崖、流水侵蚀为主,但又具有雨水少、对岩石粒度和硬度要求低的特点,因而地貌景观颇具特色。可以形成细小挺拔的丹霞石柱,石柱顶上有坚硬粗碎屑岩层“顶盖”,俗称戴帽细柱(图 1c、f)。崖壁上有泥乳膜,其成因是红层中泥质粉砂岩夹层的风化物遇雨水成泥浆往下流动,形成垂向沉积的泥乳膜(图 1d、e、f)。

1.3 分类体系

遵循地质作用规律和方便实用的原则,本文提

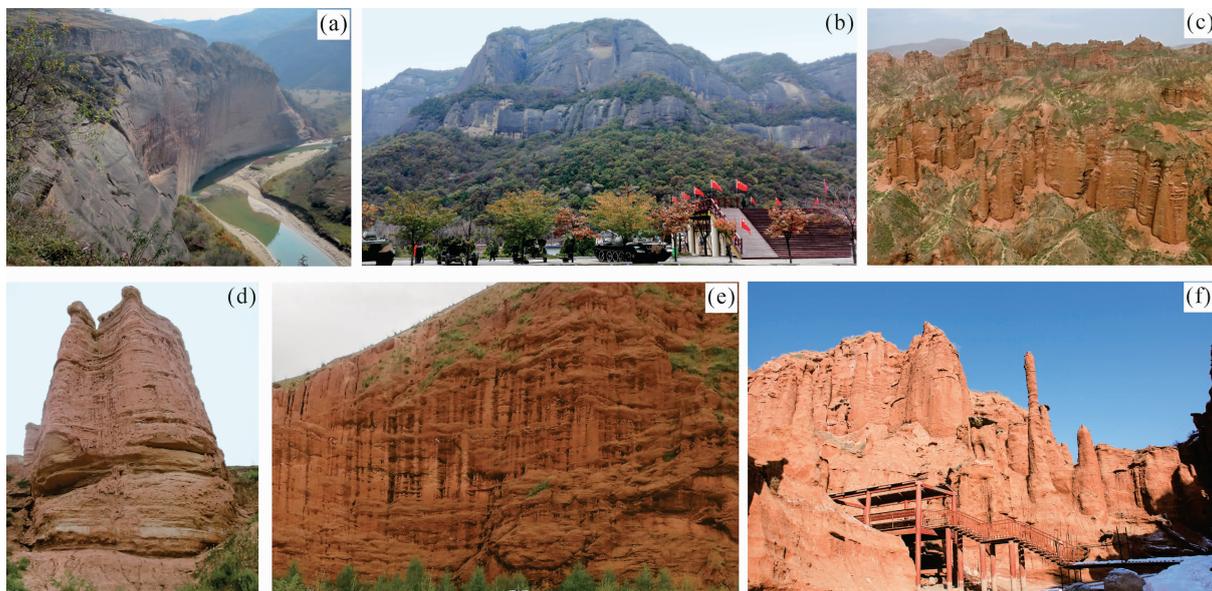


图 1 西北丹霞地貌景观特征

Fig. 1 Danxia landscapes in NW China

(a)—黄土覆盖型丹霞崖壁,陕西志丹,白垩系砂岩;(b)—丹霞方山,陕西照金,白垩系砾岩、砂岩;(c)—丹霞峰林,甘肃张掖冰沟景区,白垩系砂岩;(d)—丹霞石柱陡壁的泥乳膜,甘肃张掖冰沟景区,白垩系砂岩;(e)—丹霞崖壁泥乳膜,青海祁连县卓尔山,白垩系砂岩;(f)—丹霞石柱,新疆阿克苏温宿大峡谷,新近系砂岩

(a)—Loess-covered Danxia cliffs, Zhidan County, Shaanxi Province, Cretaceous sandstones; (b)—Danxia mesa, Zhaojin County, Shaanxi Province, Cretaceous conglomerates and sandstones; (c)—Danxia hoodoos, Binggou Tourism Attraction, Zhangye City, Gansu Province, Cretaceous sandstones; (d)—mud coatings along rock columns, Binggou Tourism Attraction, Zhangye City, Gansu Province, Cretaceous sandstones; (e)—mud coatings along the Danxia cliffs, Mt. Zhuoer, Qilian County, Qinghai Province; (f)—Danxia rock columns, Wensu canyon, Aksu, Xinjiang

出了新的丹霞地貌分类体系(表 1)。丹霞地貌的景观形态主要是绝壁陡崖、陡立的山峰、千姿百态的洞穴,因此笔者以基本形态划分大类,改变了过去按照正地貌、负地貌划分的做法(Peng Hua, 2000a; Guo Fusheng et al., 2012a)。其中,崖壁、波浪谷和象形石是具有丹霞特色的地貌景观,可以单独划分出来。崖壁是构成丹霞地貌的基本要素,不同数量和类型的崖壁组合成山峰和峡谷,崖壁成因与崩塌作用密切相关,崖壁洞穴也是最为壮观的景象。

表 1 修订的丹霞地貌分类

Table 1 A revised classification of Danxia landscapes

分类依据	类型	
形态	山峰类	方山、石墙、石柱、峰林、峰丛
	陡崖类	崖壁
	崩塌体类	崩积岩块
	峡谷类	一线天、巷谷、宽谷、波浪谷
	洞穴类	岩槽、扁平洞、竖状洞穴、穿洞、天生桥、蜂窝状洞穴
	其他	象形石、残峰孤丘
红层岩性岩相	冲积扇砾岩、河湖相碎屑岩、风成砂岩	
红层侵蚀阶段	青年期、壮年期、老年期	
气候区	干旱带、潮湿带	

注:据彭华(2000a)、郭福生等(2012a)修改。

1.4 丹霞作用概念及其特殊性

参照喀斯特地貌景观和喀斯特作用的关系,将形成丹霞地貌的各种地质作用统称为丹霞作用(danxianize, v.; danxianization, n.)。丹霞作用是以中生代陆相碎屑岩的流水侵蚀、重力崩塌和堆积为主要特征,并伴随有化学作用(溶蚀、沉淀)、风化作用(含球状风化、片状剥落)和风蚀作用的地质作用统称。丹霞作用的产物是丹霞地貌。丹霞作用的类型很多,限于篇幅,本文仅论述其中岩相控制作用和崖壁片流垂蚀作用这两种特殊性。由于红层盆地具有沉积相分带性,使得丹霞地貌演化受到岩相控制,导致戴维斯侵蚀循环说在红层地貌应用时需要修正;丹霞陡崖上暴雨水流垂直向下的运动方式,加上风力作用产生片流垂蚀作用,导致崖壁洞穴成因的复杂性。

2 丹霞地貌演化模式

2.1 红层盆地的岩性岩相对丹霞地貌具有控制作用

近年来研究发现,南方丹霞地貌陡崖发育多与盆地边缘冲积扇相有关,而盆地中央沉积粒度细,以湖相沉积为主,只能形成红层丘陵及洞穴。不同的岩性岩相特征决定着丹霞地貌的发育模式及景观类

型(Guo Fusheng et al., 2013a, 2013b; Chen Liuqin, 2017; Liu Xin et al., 2019)。笔者对江西省白垩纪红盆的遥感解释表明,丹霞地貌普遍发育于盆地边缘(Guo Fusheng et al., 2006, 2007)。广东省中生代红盆与丹霞地貌分布也存在同样的规律(Zeng Zhaoxuan et al., 1978; Wu Zhicai, 2006)。究其原因,一方面是由于受先前控盆断裂影响使盆缘抬升幅度更大。但更重要的原因是,粗粒沉积物(如冲积扇砾岩)倾向于聚集在盆地边缘部位,抗风化能力强,具有发育丹霞地貌的天然物质基础。例如,江西信江盆地丹霞地貌主要断续分布在盆地边缘,龙虎山、龟峰、象山三个丹霞地貌集中分布区的岩石基础主要是晚白垩世河口组山麓冲积扇沉积体系的砾岩,由于砾岩抗风化剥蚀能力强,更易形成赤壁丹崖和形态各异的造型石(图 2)(He Qingcheng et al., 2009; Guo Fusheng et al., 2012a, 2013a)。河流相砂岩易于发生层状风化剥落,常形成孤立的顶圆低矮丹霞丘陵。与其形成鲜明对比的是,盆地中央部位的细粒沉积岩(塘边组),大多已剥蚀夷平为准平原,没有形成陡立丹霞山峰,只是在弋阳、横峰一带由中—细粒风成砂岩构成的低矮丹霞地貌,表现为圆丘状孤峰和岩洞。此外,丹霞洞穴的形成也与沉积相有关:冲积扇砾岩易于脱落形成各类洞穴,河床滞留沉积砾岩透镜体因下伏冲刷面易受侵蚀而形成扁平洞,漫洪带微相沉积物细小易被风化剥蚀形成凹坑、蜂窝状洞穴,较大的凹坑可进一步发展成为岩槽、岩洞,进而使上覆砾岩山体重心失衡,沿垂直节理发生崩塌(Guo Fusheng et al., 2011; Zhu Zhijun et al., 2012; Jiang Yongbiao et al., 2013)。

受戴维斯侵蚀循环说(Davis, 1899)的影响,以往对丹霞地貌演化的侵蚀旋回研究只强调构造、外力和时间 3 个控制因素,忽视了红层盆地横向上岩性岩相的差异性(Peng Hua, 2000b)。尽管岩性对丹霞地貌形成的重要性为人熟知,但是对盆地大区域岩性变化对丹霞地貌的控制,过去没系统考虑,而是假设内、外地地质营力作用于一个“先期平整而均一的地质体”。如黄进通过地壳抬升速率推算华南主要丹霞地貌的年龄为 0.17~11.9Ma(Huang Jin, 2004),但这种推算并没有考虑岩性因素,使得绝对年龄相近的丹霞地貌却表现出迥然不同的地貌景观。笔者等研究表明,红层盆地中岩性岩相的差异性是造成丹霞地貌发育程度和形态特征迥异的重要原因(Guo Fusheng et al., 2007, 2011, 2012a, 2013a; Chen and Guo, 2017)。陆相盆地沉积物在

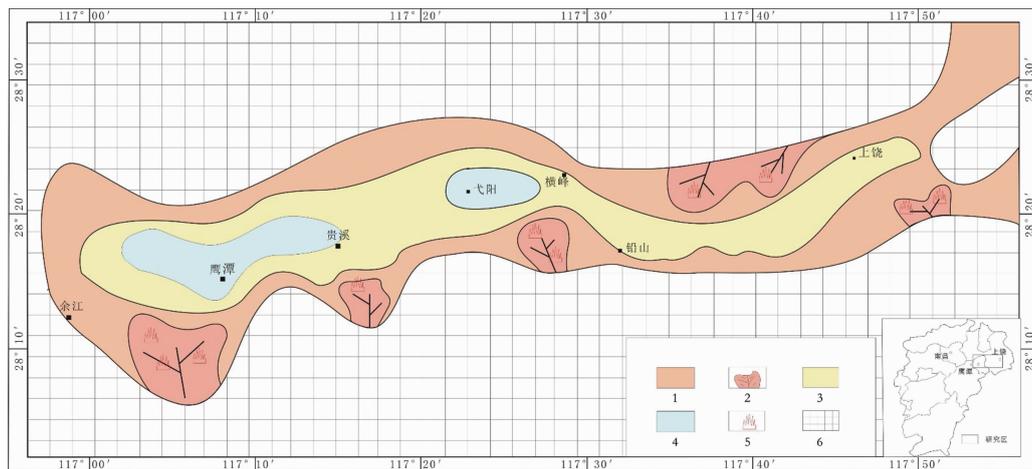


图2 江西信江盆地上白垩统沉积相展布与丹霞地貌分布

Fig. 2 Upper Cretaceous depositional systems and Danxia landscape distribution in the Xinjiang basin of Jiangxi Province

1—冲—洪积相; 2—冲积扇体; 3—冲积平原、沙漠相; 4—滨浅湖相; 5—丹霞地貌发育区; 6—盆地基底

1—Proluvial-alluvial facies; 2—alluvial fans; 3—fluvial plain/desert facies; 4—shore-shallow lake facies;

5—Danxia landscape sites; 6—basement rocks

空间上具有很强的非均质性,不同沉积相带的碎屑粒度和胶结物不同,抗风化作用的能力和方式也差异很大。粗粒沉积物(如冲积扇砾岩)倾向于分布在盆缘部位,沉积厚度大,抗风化能力强,具有发育丹霞地貌的良好物质基础。丹霞地貌的分布明显受盆地岩相分带控制,整个盆地的地貌演化过程存在横向差异性,不同部位的地貌特征差异不是地貌演化阶段的反映,丹霞地貌的微观特征也与岩性岩相关系密切。

2.2 发展阶段划分问题

戴维斯侵蚀循环说的核心内容是,地貌是构造、外力和时间的函数,在构造迅速抬升之后,受河流侵蚀作用,地形要经历幼年、壮年和老年等阶段,最后发展成准平原,再次抬升将重复上述过程(Davis, 1899)。该模式简明实用,是地貌学发展里程碑式的成果。Penck(1953)则强调地表形态的塑造决定于内、外力作用的强度比,曾昭璇(1959)对流水地貌作了综合论述,Hack(1960)认为影响地形发育的因素非常多,各个因素都在变化,但可以建立起某种平衡。

现代地貌学理论是在对戴维斯侵蚀循环说批判和继承基础上发展起来的。戴维斯模式阐明了地貌发育过程的阶段性与演化性,形象地描述了抬升、侵蚀到成准平原的过程,对大多数丹霞地貌的演化是适用的(Zhang Ke et al., 2003; Young et al., 2009; Peng Hua, 2020)。Young et al. (2009)在表述砂岩地貌演化时,也倡导划分演化阶段。丹霞地貌演化也要经历幼年期、壮年期、老年期:① 在幼年期发育

阶段,地壳间歇性上升,水流沿裂隙不断侵蚀、分割山体。分水岭上保留着宽阔的原始平坦构造面,沟谷逐渐加深形成峡谷,两侧为陡峭崖壁,谷壁块体运动比较显著,形成巨大的方山、石寨。② 壮年期发育阶段,水流进一步快速冲刷、侵蚀、切割,原始地面已被破坏,河谷切割深度达到最大极限。地貌上表现为石寨面积缩小,石柱、石梁、石墙发育,沟谷幽深,分水岭狭窄,赤壁丹崖密布,是丹霞地貌发育的全盛时期。③ 老年期发育阶段,河谷日益宽阔,曲流发育,谷坡低缓,形成起伏较小的大面积平坦地貌,其上散布着一些孤立的残丘,即准平原状态。

由于丹霞地貌景观类型变化多样,三个阶段的划分不足以反映丹霞地貌演化特征。彭华(2013)在戴维斯侵蚀循环说的基础上,将丹霞地貌演化划分为6个阶段,即青年早期、青年晚期、壮年早期、壮年晚期、老年早期和老年晚期,中国丹霞6个片区(贵州赤水、福建泰宁、湖南崀山、广东丹霞山、江西龙虎山、浙江江郎山)分别是其典型代表(Peng Hua et al., 2013)。

地貌演化阶段是指一个地区从抬升到夷平的总过程,青年期总体上以巷谷为代表,中年期以峰丛为代表,老年期以孤峰为代表,但并非某个阶段不存在其他景观类型。所以不能反过来以单个景点来判定某个地区所处的演化阶段。如常看到有人描述“本区发育从幼年期的巷谷、一线天,壮年期的岩墙、峰丛、峰林,到老年期的残峰残柱”,而不知这个红盆到底处于哪个演化阶段。

2.3 戴维斯模式的改进

戴维斯(1899)侵蚀循环说满足对一般地貌演化

的原理分析。对于岩性均匀的地区来说,构造抬升之后,在长期地壳稳定条件下,可以完成完整的侵蚀旋回。

但中国东南红层盆地内同时代地层相变很大,盆地边缘与盆地中央的岩性、结构构造会有很大的差异,地貌敏感性不同,造成绝对年龄大致相同但相对年龄很大不同的各种地貌。另外,断裂构造、断裂活动和河流分布状况是不均匀的,也会影响到丹霞地貌演化进程(Thomas and Allison, 1993)。

因此,丹霞地貌演化模式,应当加入岩性岩相,把沉积相也作为自变量。这样,丹霞地貌可以简单表述为岩相、构造、外力、时间等四者的函数:

$$L = f(s, T, e, t)$$

式中: L 为地形, s 为沉积相, T 为构造运动, e 为外力作用, t 为时间。

这些因素与盆地空间格局有关,共同制约着不同区域丹霞地貌演化进程及其景观总体特征,可称其为丹霞地貌成景系统(Guo Fusheng et al., 2011)。沉积相类型控制地貌演化阶段进程,决定丹霞地貌类型。丹霞山峰的形成需要抗蚀力强的岩石,如冲积扇、辫状河的粗粒物质、胶结坚硬的岩石。沉积微相影响微观风化作用,不同的沉积相岩性组合不同,形成不同造型景观石和洞穴类型。丹霞洞穴的形成和持续扩大,需要软硬岩层的交互,或者层内有透镜体、碎屑物粒度差异大(Guo Fusheng et al., 2013a)。

在南方湿润区红层盆地,边缘冲积扇相粗碎屑岩地区,有青年期、中年期、老年期等发展阶段;盆地中央湖泊相的泥岩、粉砂岩则没有经历过绝壁陡崖发展阶段。盆地不同部位的地貌特征并非与演化阶段相关,而是反映了红层岩性差异和沉积相带空间分布。

江西信江盆地地貌演化起始于晚白垩世晚期(Li Jianhua et al., 2014; Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources, 2017)(图3A),新构造运动使红层盆地大幅度抬升,断裂构造也随之发育。在新近纪上新世,红层被抬升至侵蚀基准面之上(Liu Jianglong, 2009),流水沿着断裂侵蚀下切,盆地边缘开始形成丹霞地貌景观,先后经历了幼年期(图3B)、青年期、壮年期和老年期(图3C)发展阶段。

3 崖壁片流垂蚀作用及其形成的串珠状洞穴

3.1 片流垂蚀作用

片流垂蚀作用是笔者提出的一个新概念,用来

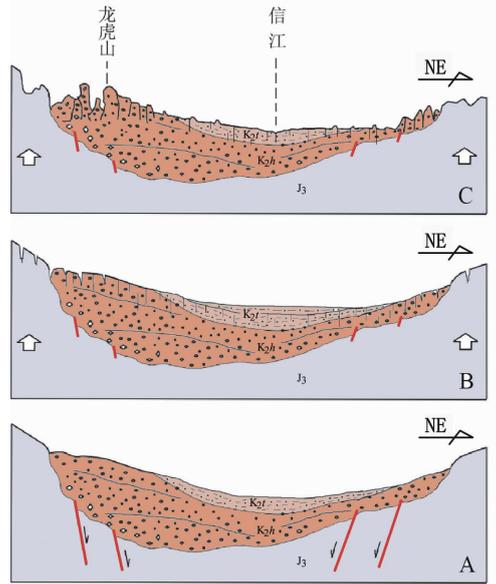


图3 江西信江盆地丹霞地貌演化模式图
Fig. 3 Danxia landscape evolution model in the Xinjiang basin of Jiangxi Province

A—晚白垩世晚期红层抬升,断裂发育;B—新近纪上新世盆地边缘开始形成丹霞地貌景观;C—现今老年期丹霞地貌
A—Uplift and fault development of the red basin during the late stage of the Late Cretaceous; B—Danxia landscape formation at the basin margin after the Pliocene of the Neogene; C—present-day late-staged Danxia landscapes

表述在陡峻的岩石崖壁上由于暴雨形成的暂时性水流,沿着垂直沟槽近似垂直落下时进行的侵蚀作用(Guo Fusheng et al., 2018)。它是丹霞作用中一个极为重要又尚未引起重视的特殊侵蚀作用方式,它有别于我们熟知的河流侧蚀作用和下蚀作用。垂蚀作用可分为冲蚀和涡蚀两种基本作用方式,前者为水流顺着崖壁往下流动或者垂直下落,后者为水流遇到陡壁上凹洼处或洞穴时沿着其顶部斜面流入形成涡流(图4)。涡蚀作用往往还借助于风力的吹动,由于旋转水体垂直崖壁往里钻蚀,故也可叫钻蚀作用。

冲蚀作用的产物是,在崖壁上形成竖状沟槽、竖状洞穴(往往沿垂直节理冲蚀),在地面形成落水洞。涡蚀作用则是水流旋转形成崖壁上的圆锥状洞穴,也可以发生在较大洞穴的顶部而形成顶穴。在丹霞地貌崖壁上由于近水平岩层的抗侵蚀能力强弱相间,多个岩层的圆锥状洞穴在垂向上构成串珠状和珠帘状洞穴。圆锥状洞穴进一步涡蚀时,往往在同一软弱岩层内横向扩大成扁平状洞穴,进一步发展可以使相邻洞穴相连,形成洞穴高度比较一致的水平岩槽(图5)。

在中生代红色碎屑岩层构成的丹霞地貌陡壁

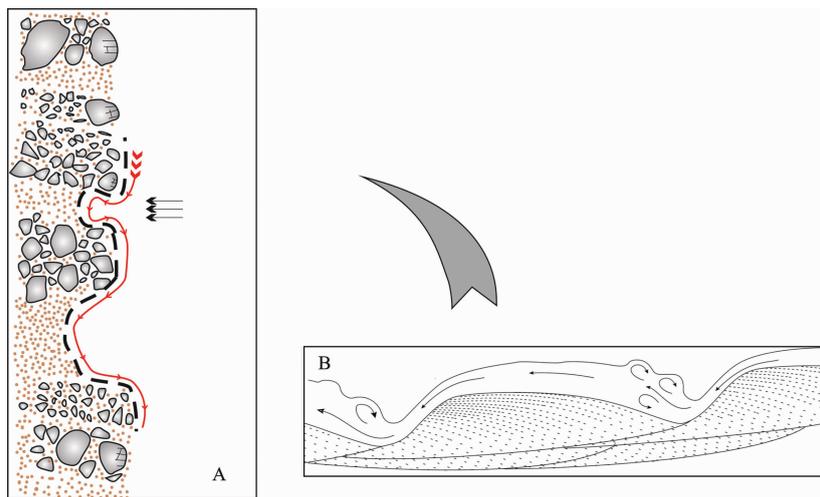


图4 崖壁水流垂蚀作用与河流下蚀作用对比

Fig. 4 Comparison of vertical water flow and the hydraulic jump

A—崖壁上的串珠状洞穴是由水流垂蚀作用形成的;B—在单向超临界水流条件下形成的循环发育的阶梯状地形(Cartigny et al., 2014)

A—Beaded tafoni on cliffs were produced by the erosive force of vertical water flows;

B—cyclic steps formed in unidirectional supercritical flows (Cartigny et al., 2014)

上,由于岩层软硬交替,垂蚀作用表现得非常明显,它是陡崖洞穴形成的主要水力学机制,而不是过去通常认为的河流侧蚀作用形成洞穴后地壳运动抬升到高处所致(Zhu Cheng et al., 2015)。

3.2 珠帘状洞穴的形成过程及其时代意义

圆锥状洞穴是涡蚀作用的典型产物。由于红层的碎屑结构特征,冲蚀作用首先会使突起的部分砾石脱落,并带走软弱岩层表面的松散砂屑。砾石脱落形成洞穴的雏形,就为之后的水流涡旋、空化气泡的形成提供良好基础。圆锥状洞穴略微向上开口,即洞壁上陡下缓。

对上部洞穴涡蚀作用完成后,水流在重力作用下沿竖直沟槽向下流动,到达下一层软弱岩层或者原先有洞穴存在处,继续进行涡蚀作用,与竖状沟槽一起构成串珠状洞穴。20世纪40年代,前苏联布拉茨克水电站溢流坝因涡蚀作用发生过类似的“蜂窝链”,这种链由分布在一条顺水流线上的一系列蜂窝组成(Huang Jitang, 1991; Jia Laifei, 2012)。多条串珠状洞穴就构成珠帘状洞穴。

新鲜陡崖上的暴雨水流沿着一些相对固定的竖状沟槽往下流动,沿途形成一些圆锥状洞穴,洞穴不断扩大向扁平状演化。随着时间的推移,水流在崖壁水平方向上的位置会发生变动,不断产生一些新的竖状沟槽和圆锥状洞穴。沟槽和圆锥状洞穴增多,新旧混杂,而新旧洞穴合并可以形成更大的扁平状洞穴(图6)。新旧珠帘状洞穴相互叠加后,形态辨别比较困难。干旱区丹霞地貌由于水流作用弱,

新鲜崩塌形成的陡崖面上较容易保留珠帘状洞穴。

基于以上认识,丹霞崖壁洞穴的时代具有垂向一致性。暴雨片流从上往下急速流动,在崖壁上选择某些粒度差异大的岩层形成各种丹霞洞穴。由于丹霞岩层产状较平缓,同一岩层中的洞穴呈现出水平方向展布特点,但它们可以是不同时期水流形成的,即在水平方向上,不同洞穴的流水作用和时代不具有 consistency。从山顶到山脚,纵向上的一系列洞是同时间形成的。而河流侵蚀的洞穴,同一水平方向上是同时形成的。这在丹霞地貌的洞穴年代上,是一个特别有意义的新认识。

4 结论

(1)丹霞地貌是发育于中生代陆相近水平厚层状紫红色砂岩、砾岩中,由于沿垂直断裂发生风化剥落、流水侵蚀和崩塌后退等多种地质作用而形成的赤壁陡崖、山峰、峡谷、洞穴等地貌的统称。从地壳演化的角度出发,丹霞地貌的定义也可以表述为:印支-燕山旋回以来形成的陆相红色碎屑岩,在喜马拉雅运动中隆升并产生垂直断裂,经流水侵蚀、重力崩塌和风化剥落等外动力地质作用形成的以丹崖赤壁为代表的地形组合。陕北白垩纪发育风成沙丘岩,反映了内陆河湖和沙漠环境并存,气候炎热干燥。古近纪、新近纪的温暖潮湿时期主要为河湖相沉积,也是流水侵蚀发育丹霞地貌的时期。第四纪寒冷干燥形成风成黄土覆盖在先期形成的丹霞地貌之上。

(2)丹霞作用是形成丹霞地貌的各种地质作用

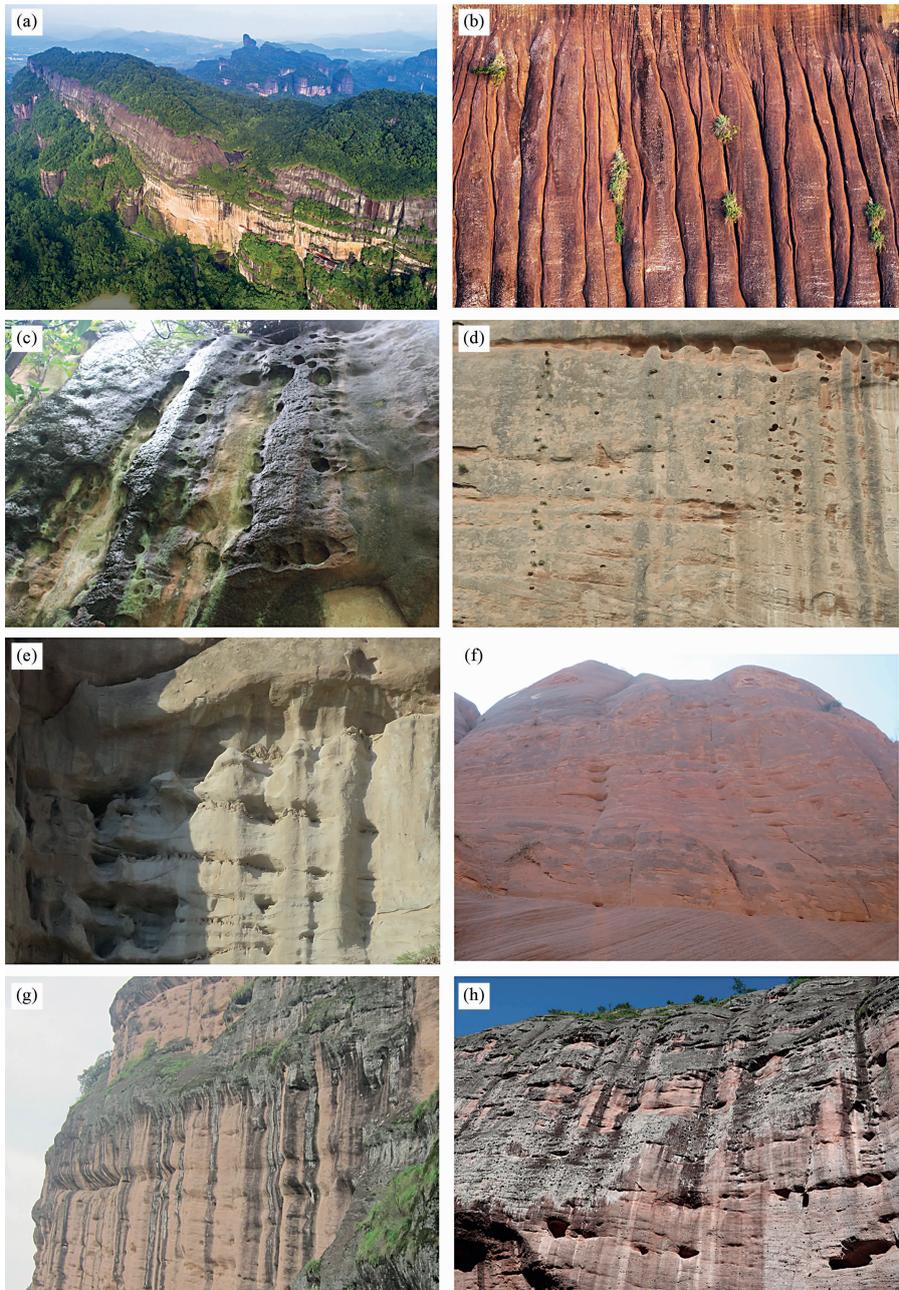


图 5 竖状沟槽和珠帘状洞穴

Fig. 5 Vertical grooves and beaded tafoni

(a)、(b)、(c)—广东丹霞山;(d)、(e)—甘肃张掖;(f)—陕西靖边;(g)—江西龙虎山;(h)—福建泰宁

(a), (b), (c)—Danxiashan of Guangdong Province; (d), (e)—Zhangye of Gansu Province; (f)—Jingbian of Shaanxi Province;

(g)—Longhushan of Jiangxi Province; (h)—Taining of Fujian Province

统称,其风化侵蚀过程中的特殊性是存在岩相控制作用和崖壁片流垂蚀作用。

(3)一个红层盆地的丹霞地貌发育程度和景观类型分布,受到盆地沉积相带分布的控制。丹霞地貌演化模式,需要在戴维斯模式中加入岩性岩相因素。红层盆地不同部位演化作用不同,南方湿润区泥岩没有经历过赤壁丹崖阶段。

(4)片流垂蚀作用是相对于河流侧蚀作用和下

蚀作用而言的,指崖壁暴雨水流沿陡峭岩壁近似于垂直落下时对沿途岩石进行的破坏作用。以垂蚀作用为主形成的洞穴包括圆锥状洞穴、顶穴、竖状洞穴、落水洞,其集合体包括扁平状洞穴、串珠状洞穴、珠帘状洞穴,其中珠帘状洞穴景观最为典型。丹霞崖壁上的洞穴,在形成过程和时间上具有垂向上一致性,而在水平方向上,不同洞穴的流水作用和时间不具有不一致性。

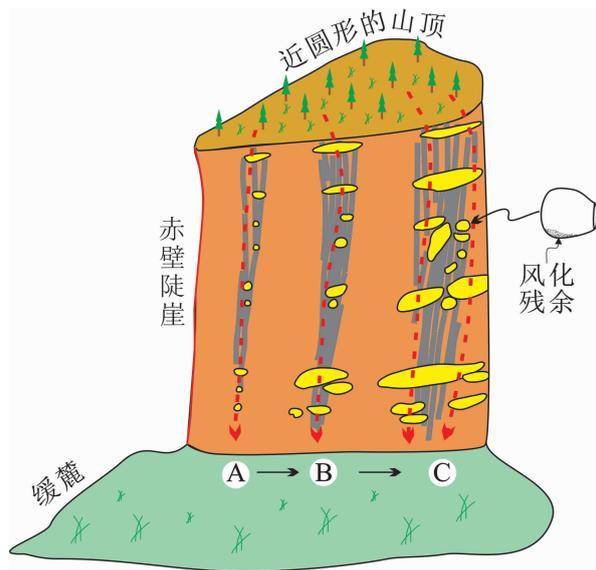


图6 串珠状洞穴的发育模式

Fig. 6 A proposed development model of beaded tafoni

A—在最初阶段,崖壁上单个粗砾石或聚集状砾岩被侵蚀后,砾石脱落形成小的凹坑;B—在垂向水流的不断侵蚀作用下,更多的洞穴形成了且沿着黑色条带垂向分布;C—随着侵蚀作用的继续,小洞穴逐渐变大并与旁边的洞穴串通形成较大的椭圆形洞穴
A—During the initial stage, larger individual boulders and beds of finer-grained pebbles are eroded and fall from the cliff to form small pits; B—more tafoni are formed and become beaded along the dark belt produced by water flow and algae; C—the tafoni become enlarged and coalesce laterally to form large elliptical ones

致谢:感谢中国地质大学(武汉)杜远生教授、河南地质调查院张忠慧研究员、中山大学张珂教授、中国地质调查局武汉地调中心邢光福研究员、南京大学杨达源教授、南京师范大学黄家柱教授、陕西省地质调查院李益朝研究员、韶关市丹霞山管理委员会陈昉副主任、中国地质科学院地质研究所苏德辰研究员、加拿大蒙特利尔大学嵇少丞教授、贵阳理工学院姜伏伟副教授、西南大学闫罗彬博士、中国科学院地理研究所齐德利博士、中国地质科学院地质力学研究所裴军令研究员、任昉博士、东华理工大学姜勇彪教授、曹秋香博士、杨庆坤博士、许欢博士、丁婷博士、龚志军博士的有益讨论。图5a,b照片由广东省仁化县摄影家协会谢锦树提供,谨致谢意!

注释

- ① 黄进,黄瑞红,苏泽霖. 2006. 丹霞洞穴地貌的初步研究. 见: 陈安泽, 卢云亭, 陈兆棉主编. 旅游地学的理论与实践——旅游地学论文集第二集. 中国地质学会旅游地学与地质公园研究分会.

References

- Bao Guangpu, Liu Chune, Huang Guangwen. 2019. Distribution, characteristics and evolution of Danxia landform in Qinghai. *Northwestern Geology*, 52(3): 199~208 (in Chinese with

- English abstract).
 Cartigny M J B, Ventra D, Postma G, Van D B J H, Venditti J. 2014. Morphodynamics and sedimentary structures of bedforms under supercritical-flow conditions; New insights from flume experiments. *Sedimentology*, 61: 712~748.
 Chen Anze. 2013. Discussion on several problems of Danxia landform. In: Chen Anze, ed. *Tourism Geology and Geopark Research-proceeding of Chen A Z*. Beijing: Science Press, 441~447 (in Chinese with English abstract).
 Chen Anze, Lu Yunting, Zhang Erkuang, Tian Mingzhong. 2013. *A Grand Tourism Earthscience Dictionary*. Beijing: Science Press, 166 (in Chinese).
 Chen Guoda. 1938. On the subdivisions of the red beds of South-Eastern China. *Bulletin of the Geological Society of China*, 10(8).
 Chen Guoda, Liu Huisi. 1939. Geology of the Gongshui river valley in Jiangxi province. *Jiangxi Geological Survey*, (Number 2): 164 (Fig. 3 Fig. C Illustrates) (in Chinese with English abstract).
 Chen Guoda. 2008. *The Complete Works of Chen Guoda*. Changsha: Central South University Press, 445~580.
 Chen Lihong, Zhang Pu, Wu Fadong, Gao Guoming. 2015. Geoheritage landscapes and tourism earth sciences significance of the Danxia landform National Geopark in Chengde, Hebei Province. *Acta Geoscientia Sinica*, 36(4): 500~506 (in Chinese with English abstract).
 Chen Liuqin, Guo Fusheng. 2017. Upper Cretaceous alluvial fan deposits in the Jianglangshan Geopark of southeastern China: implications for bedrock control on Danxia landform evolution. *Journal of Mountain Science*, 14(5): 926~935.
 Chen Liuqin, Li Xinmin, Guo Fusheng, Li Pengchen, Li Yuliang, Liu Xing. 2018. Characteristics and origin of honeycombs in the Danxiashan Global Geopark in South China. *Geological Review*, 64(4): 895~904 (in Chinese with English abstract).
 Chen Liuqin, Guo Fusheng, Liu Fujun, Xu Huan, Ding Ting, Liu Xing. 2019a. Origin of tafoni in the Late Cretaceous Aeolian sandstones, Danxiashan UNESCO Global Geopark, South China. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 93(2): 451~463.
 Chen Liuqin, Li Pengcheng, Guo Fusheng, Liu Xing, Li Xinmin. 2019b. Facies analysis and paleoclimate implications of Late Cretaceous Danxia Formation in the Danxia basin, northern Guangdong Province, South China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37(1): 17~29 (in Chinese with English abstract).
 Cui Haiting, Huang Runhua. 2017. The original and generalization of the geomorphic term Danxia landform. *China Terminology*, 19(2): 60~62 (in Chinese with English abstract).
 Davis W M. 1899. The geographical cycle. *The Geography Journal*, 14(5): 481~504.
 Duszyński F, Migoń P, Strzelecki M C. 2019. Escarpment retreat in sedimentary tablelands and cuesta landscapes-landforms, mechanisms and patterns. *Earth-Science Reviews*, 196: 14~15.
 Feng Jinglan, Zhu Huisheng. 1928. Geology and mineral resources in Qujiang, Renhua, Shixing, Nanxiong, Guangdong Province. *The Annual Report of Geological Survey in Guangdong and Guangxi*, (number 1). 1~65 (in Chinese with English abstract).
 Guo Fusheng, Liu Linqing, Hua Ming, Ye Zhanghuang. 2006. On the regional planning for Danxia landform travel resources in Jiangxi Province and the idea of "Double Red Travel Area". *Journal of East China Institute of Technology*, 25(4): 363~366 (in Chinese with English abstract).
 Guo Fusheng, Liu Linqing, Yang Zhi, Zeng Xiaohua. 2007. Development of Danxia landform in Jiangxi Province and its regional planning for tourism. *Resources survey & Environment*, 28(3): 214~222 (in Chinese with English abstract).
 Guo Fusheng, Jiang Yongbiao, Hu Zhonghua, Liu Linqing, Li Hong. 2011. Evolution and genesis system features of Danxia

- landform in Longhushan World Geopark. *Journal of Mountain Science*, 29(2): 195~201 (in Chinese with English abstract).
- Guo Fusheng, et al. 2012a. The Exotic Danxia Landforms of Longhushan Mountain, South China. Beijing: Geological Publishing House, 1~105 (in Chinese with English abstract).
- Guo Fusheng, Jiang Fuwei, Hu Zhonghua, Wu Zhiyong, Jiang Yongbiao, Jiang Xingbo. 2012b. Danxia landscape rockfall-landscape types and protection measures—A case study of Mt. Longhushan in Jiangxi, China. *Journal of Mountain Science*, 30(1): 99~106 (in Chinese with English abstract).
- Guo Fusheng, Zhu Zhijun, Huang Baohua, Jiang Yongbiao. 2013a. Cretaceous sedimentary system and their relationship with Danxia landform in Xinjiang basin, Jiangxi. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(6): 954~964 (in Chinese with English abstract).
- Guo Fusheng, Jiang Fuwei, Jiang Yongbiao, Huang Baohua. 2013b. The development directions of Danxia landform research. *Journal of East China Institute of Technology*, 32(3): 207~212 (in Chinese with English abstract).
- Guo Fusheng, Chen Liuqin, Xu Huan, Liu Xing. 2018. Origin of beaded tafoni in cliffs of Danxia landscapes, Longhushan Global Geopark, South China. *Journal of Mountain Science*, 15(11): 2398~2408.
- Guo Fusheng, Chen Liuqin, Liu Fujun, Li Yizhao, Hua Chen. 2019. Characteristics of Danxia landscapes in northern Shanxi province and comparison with South China. *Acta Geologica Sinica* (English edition), 93(2): 464~465.
- Guo Guolin, Guo Fusheng, Liu Xiaodong, Yan Zhaobin, Yang Zhi. 2006. Study by Epma on microcosmic chemical weathering to sandstone in Danxia landform. *Carsologica Sinica*, 25(2): 172~176 (in Chinese with English abstract).
- Guo Kang. 1992. Discovery of Zhangshiyuan landform and its value in tourism development. *Acta Geographica Sinica*, 59(5): 467~472 (in Chinese with English abstract).
- Hack T J. 1960. Interpretation of erosional topography in humid temperate region. *American Journal of Science*, 285(A): 80~97.
- Han Peng, Gao Fei, Wang Jianqiang. 2008. Discussion on the occurrence time of the Cenozoic fault basins surrounding the Ordos block. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, (5): 38~39 (in Chinese with English abstract).
- He Qingcheng, Ren Fang, Liu Kai, Li Xia. 2009. The influencing factors development and evolution of Danxia landform in Longhushan. In: *World Danxia-First International Symposium on Danxia Landform*. 242~248.
- Huang Jitang. 1991. *The Principle and Application of Cavitation and Cavitation Erosion*. Beijing: Tsinghua University Press, 3~5 (in Chinese).
- Huang Jin. 1982. A basic way to develop the slope of Danxia landform. *Tropical Geography*, 3(2): 107~134 (in Chinese with English abstract).
- Huang Jin. 1991. The classified areas of Danxia landforms in China. *Tropical Geomorphology*, (Suppl): 69~81 (in Chinese with English abstract).
- Huang Jin. 1995. Tourism resources of Danxia landform and its development and protection. *GSC. Landform • Environment • Development*. Beijing: China Environmental Press, 264~267 (in Chinese with English abstract).
- Huang Jin. 2004. Quantitative survey of several important issues concerning with the formation of the Danxia landforms. *Tropical Geography*, 24(2): 123~126 (in Chinese with English abstract).
- Huang Jin. 2005. A field investigation of the Danxia landform in Danxiashan. Guangzhou: Sun Yat-Sen University Press, 1~269 (in Chinese with English abstract).
- Huang Jin. 2010. *The Landform of Danxiashan*. Beijing: Science Press, 5~12 (in Chinese with English abstract).
- Jia Laifei. 2012. Three-dimensional numerical simulation of aerated flow downstream of aeration slot in spillway. Tianjin University, 1~3.
- Jiang Fuwei, Guo Fusheng, Yang Anlin. 2018. Differential expansion and contraction characteristics of Danxia landform rock mass and its geomorphological effect. *Mountain Research*, 36(4): 501~508 (in Chinese with English abstract).
- Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources. 2017. *Regional Geology of Jiangxi Province*. Beijing: Geological Publishing House, 850~858.
- Jiang Yongbiao. 2010. *The Danxia landform and its tourism development in Xinjiang basin*. Jiangxi Province. Beijing: Geological Publishing House, 1~97 (in Chinese).
- Jiang Yongbiao, Guo Fusheng, Liu Linqing, Peng Huaming. 2006. TL dating research of geomorphic surface on lower terraces of rives in Longhushan Danxia landform areas. *Journal of East China Institute of Technology*, 29(3): 225~228 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yongbiao, Guo Fusheng, Hu Zhonghua, Sun Chuanmin, Liu Linqing, Huang Baohua. 2009. A study on the features of Danxia landform in Longhushan World Geopark and comparing with others in China. *Mountain Research*, 27(3): 99~106 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yongbiao, Guo Fusheng, Chen Shanshan. 2013. Spatial distribution and its genesis of the Danxia landforms in Xinjiang basin, Jiangxi. *Mountain Research*, 31(6): 731~737 (in Chinese with English abstract).
- Kusky T M, Ye Minghe, Wang Junpeng, Wang Lu. 2010. Geological evolution of Longhushan World Geopark in relation to global tectonics. *Journal of Earth Science*, 21(1): 1~18.
- Li Jianhua, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Johnston S T. 2014. Cretaceous tectonic evolution of South China: A preliminary synthesis. *Earth-Science Reviews*, 134: 98~136.
- Li Jianxian. 1961. Landform types in Guangdong Province. Editorial Department of *Journal of Sun Yanstun University*, (4): 70~81 (in Chinese with English abstract).
- Lin Yuxiang, Meng Cai, Han Jilei, Zhu Chuanzhen, Wang Yuwei, Zhao Hui, Cao Gaoshe. 2015. Characteristics of lithofacies paleogeography during Paleogene-Neogene in the area of North China platform. *Geology in China*, 42(4): 1058~1067 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jiaolong. 2009. Research on formation mechanism and geoscientific effects of Danxia landform in southeast China. PhD thesis of the Central South University, 24~28.
- Liu Jing. 2009. Is there Danxia landform in the Northwest? *Chinese National Geography*, (10): 134~138 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jiaqi. 2012. Danxia blooming all over the splendid red mountains (preface). In: Guo Fusheng, et al., eds. *Danxia Landform in Mount Longhushan and Its Tourism Development*. Beijing: Geological Publishing House, 1~II (in Chinese with English abstract).
- Liu Tungsheng, Sun Jimin, Wu Wenxiang. 2001. Past, present and future of the Chinese loess research: a discussion on the reality of facts and stories. *Quaternary Sciences*, 21(3): 185~207 (in Chinese with English abstract).
- Liu Linqing, Guo Fusheng, Zeng Xiaohua. 2007. Study on the Danxia geomorphologic landscape with remote sensing technology. *Journal of East China Institute of Technology*, 30(3): 247~251 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shangren. 1999. Thoughts on several problems of Danxia landform. *Economic Geography*, 19(suppl 2): 5~9 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shangren, Liu Ruihua. 2003. On the conception of Danxia landform. *Mountain Research*, 21(6): 669~674 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xing, Guo Fusheng, Chen Liuqin, Li Xinmin, Liu Fujun. 2019. Lithologic control on the development of Danxia landscapes in red basins. *Mountain Research*, 37(2): 214~221 (in Chinese with English abstract).
- Miao Yunfa, Wu Fuli, Herrmann M, Yan Xiaoli, Meng Qingquan.

2013. Late early Oligocene East Asian summer monsoon in the NE Tibetan Plateau: Evidence from a palynological record from the Lanzhou basin, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 75: 46~57.
- Penck W. 1953. Morphological analysis of landforms. Czech H. Boswell K C, trans. London and Basing Stoke. Macmillan & Co Ltd, 1~18.
- Peng Hua. 2000a. A Survey of the Danxia Landform Research in China. Guangzhou: Sun Yat-Sen University Press, 1~77 (in Chinese and English).
- Peng Hua. 2000b. A survey of the Danxia landform research in China. *Scientia Geographica Sinica*, 20(3): 203~211 (in Chinese and English).
- Peng Hua. 2020. China Danxia. Beijing: Higher Education Press, Singapore: Springer Nature Singapore, 1~391.
- Peng Hua, Wu Zhicai, Zhang Ke, Liu Shangren. 2004. The significance of building Danxiashan World Geopark and its development characteristics of Danxia landform. GSC. Landform • Environment • Development. -proceeding of Danxiashan Meeting. Beijing: China Environmental Press, 247~257 (in Chinese with English abstract).
- Peng Hua, Pan Zhixin, Yan Luobin, Simonson S. 2013. A review of the research on red beds and Danxia landform. *Acta Geographica Sinica*, 68(9): 1170~1181 (in Chinese with English abstract).
- Peng Hua, Ren Fang, Pan Zhixin. 2015. A review of Danxia landscapes in China. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 59: 19~33.
- Pan Zhixin, Peng Hua. 2015. Comparative study on the global distribution and geomorphic development of red beds. *Scientia Geographica Sinica*, 35(12): 1575~1584 (in Chinese with English abstract).
- Pan Zhixin, Peng Hua, Ren Fang, Encarnacion J. 2016. A study of the development of red bed landforms in Zion National Park, the United States. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(1): 116~126 (in Chinese with English abstract).
- Qi Deli, Yu Rong, Zhang Renshun, Ge Yunjian, Li Jialin. 2005. On the spatial pattern of Danxia landform in China. *Acta Geographica Sinica*, 60(1): 41~52 (in Chinese with English abstract).
- Su Dechen, Chen Zhifang, Sun Aiping. 2018. The Beauty of Danxiashan. Beijing: Petroleum Industry Press, 1~198 (in Chinese).
- Sun Bonian, Yan Defei, Xie Sanping, Cong Peiyun, Xin Cunlin, Yun Fei. 2004. The fossils of populus and paleoclimatic significance of Paleogene in Lanzhou basin. *Chinese Science Bulletin*, 49(13): 1283~1289 (in Chinese with English abstract).
- Thomas D S G, Allison R J. 1993. Landscape Sensitivity. New York: John Wiley & Son Ltd.
- Wu Zhicai. 2006. Regional comparative study on the development of Danxia landform in Guangdong. *Economic Geography*, 26(suppl): 88~96 (in Chinese with English abstract).
- Xing Guangfu, Zheng Jianbo, Shen Jialin, Jiang Maoqiu, Qian Maiping, Jiang Yang, Jin Guodong, Duan Zheng. 2013. Red beds of Danxia landform in the Tailing Geopark, Fujian Province. *Journal of Stratigraphy*, 37(1): 18~24 (in Chinese with English abstract).
- Xu Huan, Guo Fusheng, Chen Liuqin, Wang Chao, Zhang Weiqiang. 2019. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of tuffs in the Taining basin: Constraints on the ages of the Danxia red beds. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, Accepted, <https://doi.org/10.1111/1755-6724.13843>.
- Xu Xing, Ge Tongming, Xiao Hui. 1990. Preliminary search on the age for red beds in Danxia basin—New evidence of paleomagnetic study. *Journal of Chengdu College of Geology*, 17(2): 79~86 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingchun, Li Youli. 2012. Principle of Geomorphology (Third edition). Beijing: Peking University Press, 128~134 (in Chinese).
- Yao Nini, Ma Fujun, Yan Defei. 2010. Reconstruction of paleoclimatic parameters from the Oligocene in Lanzhou basin, Gansu Province. *Gansu Geology*, 19(4): 20~25 (in Chinese with English abstract).
- Young R W, Wray R A L, Young A. 2009. Sandstone Landforms. Cambridge: Cambridge University Press, 14~226.
- Yu Shaohua, Yang Shiyu. 2011. Learning from Australian experience on tourism geological resource development and conservation. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 36(1): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhaoxuan. 1943. Preliminary discussion on the topography of the thick red sandstone area in the southern part of Renhua. National Sun Yat-Sen University Geographical Collection, (12): 19~24 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhaoxuan. 1959. The development theory of pipelining terrain. *Journal of South China Normal Institute*, (3): 1~34 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhaoxuan. 1960. Rock Geomorphology. Beijing: Geological Publishing House, 45~57 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhaoxuan, Li Guozhen. 1957. The terrain features of sandstone in South China. *Geography Knowledge*, 397~399 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhaoxuan, Huang Shaomin. 1978. Red beds landforms in southeastern China. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, (1): 56~73.
- Zhang Ke, Li Zhihong. 2003. The division of stages to the evolution of Danxia landform in Xinchang area, Zhejiang Province. *Economic Geography*, 23(suppl): 166~170 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Peng, Ao Hong, An Zhisheng. 2016. Review of the stratigraphy and paleoclimatology study of the Paleogene-Neogene Longzhong basin. *Journal of Earth Environment*, 7(2): 97~120 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuping, Tong Yongsheng. 1963. Subdivision of "Redbeds" of Nanhsung basin, Kwangtung. *Vertebrata Palasiatica*, 7(3): 249~260 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ting, Zhao Xun, Peng Hua, Hou Rongfeng, Hao Meiyang. 2011. A Study on Danxia Landform. Beijing: Geological Publishing House, 1~5 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xitao, Jia Liyun, Hu Daogong. 2018. Discoveries of fluvial terraces and Neogene gravels in the Hetao area, Inner Mongolia; Implications for the development of the Yellow River, Antiquity of Chinese Rivers, and coexistence theory of rivers and lakes. *Acta Geologica Sinica*, 92(4): 845~886 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Chenghu. 2006. A Dictionary of Geomorphology. Beijing: China Water & Power Press, 44 (in Chinese).
- Zhou Dingyi. 1994. Thoughts on the definition of "Danxia landform". *Economic Geography*, (suppl): 76~79 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Cheng, Peng Hua, Li Shicheng, Huang Linyan, Zheng Chaogui, Xiang Fusheng, Sun Yufei, Tang Yunsheng, Hu Jiyuan, Zhu Guanghui, Lü Jianjun, Cheng Guanghua. 2005. Danxia landform genesis on Qiyun Mountain, Anhui Province. *Acta Geographica Sinica*, 60(3): 445~455 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Cheng, Peng Hua, Ouyang Jie, Hu Zhinong, Li Lan. 2010. Rock resistance and the development of horizontal grooves on Danxia slopes. *Geomorphology*, 123(1-2): 84~96.
- Zhu Cheng, Ma Chunmei, Zhang Guangsheng. 2015. Development Mechanisms of Typical Danxia Landforms in China. Beijing: Science Press, 75~77 (in Chinese).
- Zhu Zhijun, Huang Baohua, Guo Fusheng, Zheng Haifeng, Jiang Yongbiao. 2012. Cretaceous braided river facies sediments and Danxia landform development characteristics in Longhushan World Geopark, Jiangxi. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(3): 379~387 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 保广普,刘春娥,黄广文. 2019. 青海丹霞地貌的分布与特征及演化. 西北地质, 52(3):199~208.
- 陈安泽. 2013. 丹霞地貌若干问题的讨论. 见:陈安泽主编. 旅游地理学与地质公园研究——陈安泽文集. 北京:科学出版社, 441~447.
- 陈安泽,卢云亭,张尔匡,田明中. 2013. 旅游地理学大辞典. 北京:科学出版社, 166.
- 陈国达. 2008. 陈国达全集(第四卷). 长沙:中南大学出版社, 445~580.
- 陈国达,刘辉泗. 1939. 江西贡水流域地质. 江西地质汇刊, (第二号):164(图版3,图C说明).
- 陈丽红,张璞,武法东,高国明. 2015. 河北承德丹霞地貌国家地质公园地质遗迹景观及其旅游地质学意义. 地球学报, 36(4):500~506.
- 陈留勤,李馨敏,郭福生,李鹏程,李余亮,刘鑫. 2018. 丹霞山世界地质公园蜂窝状洞穴特征及成因分析. 地质论评, 64(4):895~904.
- 陈留勤,李鹏程,郭福生,刘鑫,李馨敏. 2019b. 粤北丹霞盆地晚白垩世丹霞组沉积相及古气候意义. 沉积学报, 37(1):17~29.
- 崔海亭,黄润华. 2017. 丹霞地貌名称的滥觞与泛化. 中国科技术语, 19(2):60~62.
- 辞海编辑委员会. 1961. 辞海(试行本)·地理分册. 北京:中华书局, 8.
- 冯景兰,朱翔声. 1928. 广东曲江仁化始兴南雄地质矿产. 两广地质调查所年报, (第一号), 1~65.
- 郭福生,刘林清,花明,叶张煌. 2006. 江西省丹霞地貌景观资源区划与“双红旅游区”刍议. 东华理工学院学报(社会科学版), 25(4):363~366.
- 郭福生,刘林清,杨志,曾晓华. 2007. 江西省丹霞地貌发育规律及旅游区划研究. 资源调查与环境, 28(3):214~222.
- 郭福生,姜勇彪,胡中华,刘林清,李虹. 2011. 龙虎山世界地质公园丹霞地貌成景系统特征及其演化. 山地学报, 29(2):195~201.
- 郭福生,李晓勇,姜勇彪,胡中华,刘林清,廖六根,吴知勇,叶张煌,姜伏伟. 2012a. 龙虎山丹霞地貌与旅游开发. 北京:地质出版社, 1~105.
- 郭福生,姜伏伟,胡中华,吴知勇,姜勇彪,蒋兴波. 2012b. 丹霞地貌危岩景观分类及可持续开发对策——以龙虎山景区为例. 山地学报, 30(1):99~106.
- 郭福生,朱志军,黄宝华,姜勇彪. 2013a. 江西信江盆地白垩系沉积体系及其与丹霞地貌的关系. 沉积学报, 31(6):954~964.
- 郭福生,姜伏伟,姜勇彪,黄宝华. 2013b. 丹霞地貌研究几个发展方向. 东华理工大学学报(社会科学版), 32(3):207~212.
- 郭国林,郭福生,刘晓东,严兆彬,杨志. 2006. 丹霞地貌砂岩的微观化学风化作用电子探针研究. 中国岩溶, 25(2):172~176.
- 郭康. 1992. 嶂石岩地貌之发现及其旅游开发价值. 地理学报, 59(5):467~472.
- 韩鹏,高飞,王建强. 2008. 鄂尔多斯周缘新生代盆地断陷发生时间探讨. 内蒙古石油化工, (5):38~39.
- 黄继汤. 1991. 空化与空蚀的原因及应用. 北京:清华大学出版社, 3~5.
- 黄进. 1982. 丹霞地貌坡面发育的一种基本方式. 热带地理, 3(2):107~134.
- 黄进. 1991. 中国丹霞地貌类型的初步研究. 热带地貌, (增刊):69~81.
- 黄进. 1995. 丹霞地貌的旅游资源及其开发与保护. 见:中国地理学会地貌与第四纪专业委员会编. 地貌·环境·发展. 北京:中国环境出版社, 264~267.
- 黄进. 2004. 丹霞地貌发育几个重要问题的定量测算. 热带地理, 24(2):123~126.
- 黄进. 2005. 丹霞山地貌考察记. 广州:中山大学出版社, 1~269.
- 黄进. 2010. 丹霞山地貌. 北京:科学出版社, 5~12.
- 贾来飞. 2012. 溢洪道掺气坎槽后掺气水流三维数值模拟研究. 天津大学学位论文, 1~3.
- 姜伏伟,郭福生,杨安林. 2018. 丹霞地貌岩体差异胀缩特征及其成景作用. 山地学报, 36(4):501~508.
- 江西省地质矿产勘查开发局. 2017. 江西省区域地质志. 北京:地质出版社, 850~858.
- 姜勇彪. 2010. 江西信江盆地丹霞地貌与旅游开发. 北京:地质出版社, 1~97.
- 姜勇彪,郭福生,刘林清,等. 2006. 龙虎山丹霞地貌区河流阶地地貌面的热释光测年研究. 东华理工学院学报(自然科学版), 29(3):225~228.
- 姜勇彪,郭福生,胡中华,孙传敏,刘林清,黄宝华. 2009. 龙虎山世界地质公园丹霞地貌特征及与国内其他丹霞地貌的对比. 山地学报, 27(3):99~106.
- 姜勇彪,郭福生,陈珊珊. 2013. 江西信江盆地丹霞地貌空间分布及其成因. 山地学报, 31(6):731~737.
- 李见贤. 1961. 广东省的地貌类型. 中山大学学报, (4):72.
- 林玉祥,孟彩,韩继雷,朱传真,王玉伟,赵慧,曹高社. 2015. 华北地台区古近纪—新近纪岩相古地理特征. 中国地质, 42(4):1058~1067.
- 刘东生,孙继敏,吴文祥. 2001. 中国黄土研究的历史、现状和未来——一次事实与故事相结合的讨论. 第四纪研究, 21(3):185~207.
- 刘江龙. 2009. 中国东南部丹霞地貌形成机理及其地学效应研究. 中南大学博士学位论文, 24~28.
- 刘林清,郭福生,曾晓华. 2007. 丹霞地貌景观调查的遥感技术应用研究. 东华理工学院学报(自然科学版), 30(3):247~251.
- 刘尚仁. 1999. 对丹霞地貌若干问题的思考. 经济地理, 19(增刊2):5~9.
- 刘尚仁,刘瑞华. 2003. 丹霞地貌概念讨论. 山地学报, 21(6):669~674.
- 刘晶. 2009. 西北有“丹霞”? 中国国家地理, (10):134~138.
- 刘嘉麒. 2012. 万山红遍映丹霞(代序). 见:郭福生等著. 龙虎山丹霞地貌与旅游开发. 北京:地质出版社, 1~11.
- 刘鑫,郭福生,陈留勤,李馨敏,刘富军. 2019. 红层盆地岩性差异对丹霞地貌发育的控制. 山地学报, 37(2):214~221.
- 彭华. 2000a. 中国丹霞地貌及其研究进展. 北京:中山大学出版社, 1~77.
- 彭华. 2000b. 中国丹霞地貌研究进展. 地理科学, 20(3):203~211.
- 彭华,吴志才,张珂,等. 2004. 丹霞山建设世界地质公园的意义及其丹霞地貌发育特征. 见:中国地理学会地貌与第四纪专业委员会编. 地貌环境·发展——丹霞山会议文集. 北京:中国环境科学出版社, 247~257.
- 彭华,潘志新,闫罗彬, Simonson S. 2013. 国内外红层与丹霞地貌研究述评. 地理学报, 68(9):1170~1181.
- 潘志新,彭华. 2015. 国内外红层分布及其地貌发育的对比研究. 地理科学, 35(12):1575~1584.
- 潘志新,彭华,任飏. 2016. 美国 Zion 国家公园红层地貌发育研究. 地球学报, 37(1):116~126.
- 齐德利,于蓉,张忍顺,等. 2005. 中国丹霞地貌空间格局. 地理学报, 60(1):41~52.
- 苏德辰,陈志芳,孙爱萍. 2018. 奇美天成丹霞山. 北京:石油工业出版社, 1~198.
- 孙柏年,阎德飞,解三平,等. 2004. 兰州盆地古近系杨属叶化石及古气候指示意义. 科学通报, 49(13):1283~1289.
- 吴志才. 2006. 广东丹霞地貌发育的区域对比研究. 经济地理, 26(增):88~96.
- 邢光福,郑剑波,沈加林,江茂求,钱迈平,姜杨,靳国栋,段政. 2013. 福建泰宁世界地质公园丹霞红层研究. 地层学杂志, 37(1):18~24.
- 徐行,葛同明,肖晖. 1990. 丹霞盆地红层时代的初探——古地磁研究的新证据. 成都地质学院学报, 17(2):79~86.
- 杨景春,李有利. 2012. 地貌学原理(第三版). 北京:北京大学出版社, 128~134.
- 姚妮妮,马福军,闫德飞. 2010. 甘肃兰州盆地渐新世古气候参数重建. 甘肃地质, 19(4):20~25.
- 余绍华,杨世瑜. 2011. 澳大利亚旅游地质资源开发与保护的体验与

启示. 昆明理工大学学报(自然科学版), 36(1): 1~11.

曾昭璇. 1943. 仁化南部厚层红色砂岩区域地形之初步探讨. 国立中山大学地理集刊, (12): 19~24.

曾昭璇. 1959. 流水地形发育论. 华南师院学报, (3): 1~34.

曾昭璇. 1960. 岩石地形学. 北京: 地质出版社, 45~57.

曾昭璇, 李国珍. 1957. 华南砂岩地形特点. 地理知识, 397~399.

曾昭璇, 黄少敏. 1978. 中国东南部红层地貌. 华南师院学报(自然科学版), (1): 56~73.

张珂, 李志宏. 2003. 浙江新昌地区丹霞地貌的发育阶段分析. 经济地理, 23: 166~170.

张鹏, 敖红, 安芷生. 2016. 陇中盆地古近纪—新近纪地层学与古气候学研究进展. 地球环境学报, 7(2): 97~120.

张玉萍, 童永生. 1963. 广东南雄盆地“红层”的划分. 古脊椎动物与古人类, 7(3): 249~260.

赵汀, 赵逊, 彭华, 侯荣丰, 郝美英. 2011. 论丹霞地貌. 北京: 地质出版社, 1~5.

赵希涛, 贾丽云, 胡道功. 2018. 内蒙古套地区黄河阶地与新近纪砾石层的发现及其对黄河发育、中国河流古老性与河湖共存论的意义. 地质学报, 92(4): 845~886.

周成虎. 2006. 地貌学辞典. 北京: 中国水利水电出版社, 44.

周定一. 1994. 对“丹霞地貌”定义的思考. 经济地理, (增刊): 76~79.

朱诚, 彭华, 李世成, 等. 2005. 安徽齐云山丹霞地貌成因. 地理学报, 60(3): 445~455.

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, 75~77.

朱志军, 黄宝华, 郭福生, 郑海峰, 姜勇彪. 2012. 江西龙虎山世界地质公园白垩系辫状河相沉积及其丹霞地貌发育特征. 地球学报, 33(3): 379~387.

Definition, classification, and danxianization of Danxia landscapes

GUO Fusheng^{*1)}, CHEN Liuqin²⁾, YAN Zhaobin¹⁾, LIU Fujun²⁾,
PAN Zhixin³⁾, ZHANG Weiqiang²⁾, HU Haiping²⁾

1) State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang, 330013;

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

3) School of Tourism, Hainan University, Haikou, 570228

* Corresponding author: 24173404@qq.com

Abstract

The representative Danxia landscape, named after Mt. Danxia of Guangdong Province, is a special type of landscape characterized by red cliffs. With the rise of tourism in recent years, it has become a focus of geomorphological research. However, there are still controversies in some basic issues of Danxia landscape. Based on the geological, geomorphological characteristics and regional geologic evolution of the named place, this paper proposes a new definition and classification of Danxia landscape with emphasis on three fundamental elements: prominent red cliffs, continental red beds deposited since Yanshanian cycle as material basis, and water erosion as a dominant external force. Moreover, the Danxia landscapes are also widely distributed in NW China and they can be classified into two types: one is the old Danxia landscape covered by Quaternary loess, another is characterized by water erosion and covered by mud. This paper proposes the concept of danxianization which involves various geologic processes such as water erosion, gravity collapse, and weathering and deterioration of the Mesozoic-Cenozoic continental clastic rocks, resulting in the formation of Danxia landscapes. The danxianization includes two special mechanisms of lithofacies control and vertical overflow erosion. The differences in red bed lithofacies control the development and type of Danxia landscape. Therefore, Danxia landscape evolution model is hereby revised as the function of lithofacies, geologic structure, external forces, and time. In typical red bed basins of South China, the coarse-grained alluvial fan deposits at basin margin have the early, middle, and late development stages. In contrast, mudstones and siltstones deposited in the middle of the basin are thought to have not experienced the development stage of prominent cliffs. Water erosion during the torrential rain on the cliff sides along the vertical trench is called vertical overflow erosion which results in the formation of vertical grooves and cavities. The vortex action is caused by rotating and drilling by wind to generate cone-shaped cavities, beaded tafoni, which are then coalesced laterally to form flat caves. Thus, it is proposed that the ages of the beaded cavities are vertically consistent, they may form at different ages in horizontal direction.

Key words: Danxia landscape; danxianization; red beds; geomorphic evolution model; vertical erosion of overflow