

文章编号: 1008 - 2786 - (2019)2 - 214 - 08

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000415

红层盆地岩性差异对丹霞地貌发育的控制

刘鑫^{1,2}, 郭福生^{1,2*}, 陈留勤^{1,2}, 李馨敏^{1,2}, 刘富军^{1,2}

(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)

摘 要: 陆相红层盆地的岩性在横向上和纵向上都有比较明显的变化, 导致发育的丹霞地貌形态迥异。本文以赣东北信江盆地、粤北丹霞盆地、陕北地区为例, 采用对比分析、数值模拟等研究手段, 总结了红层盆地中常见的岩石及地貌类型, 提出岩性在丹霞地貌坡面演化过程中的关键作用。在信江盆地中, 龙虎山、龟峰等挺拔高耸的山峰主要发育在盆地南缘的河口组厚层砾岩中, 而盆地中部贵溪、弋阳地区的近圆形山丘则产在塘边组大型交错层理风成砂岩中; 与其类似, 丹霞山的赤壁陡崖主要发育在丹霞组厚层砾岩夹风成砂岩中; 相反, 陕北地区波浪状地貌主要发育在洛河组风成砂岩中。利用河道-山坡综合地形演化(CHILD)地貌模拟软件, 假设在同样的构造抬升和河流侵蚀作用下, 分别模拟了细砂岩、细砾岩、中砾岩构成的山体坡面的演化过程。模拟结果显示, 细砂岩山体易形成较为平缓的坡面, 中砾岩易形成陡峻崖壁和巷谷, 而介于二者之间的细砾岩则形成较为明显的沟壑系统。CHILD 模拟结果与实地观测一致。因此, 红层岩性差异在丹霞地貌演化过程中扮演了重要的角色, 也是未来地貌定量模拟研究中需要考虑的关键因素。

关键词: 丹霞地貌; 红层; 岩性控制; 地貌演化模拟

中图分类号: P931

文献标志码: A

2010 年 8 月, “中国丹霞”被正式列入世界遗产名录以后, 丹霞地貌受到越来越多的关注。丹霞地貌是指具有陡崖坡的红层地貌^[1], 具有近圆形的山顶、陡峻的崖壁和缓倾斜的麓坡三个基本要素^[2-4]。前人的研究主要集中在我国南方亚热带湿润地区, 尤其以广东丹霞山、江西龙虎山世界地质公园的红层与丹霞地貌研究成果最为丰富。这些研究涉及地貌特征与分布^[5-9]、岩石力学性质实验^[10-12]、洞穴地貌成因^[13-15]、地貌演化模拟^[16-17]等方面。丹霞地貌在中国西北地区^[7]及世界其他国家同样发育^[18], 这为丹霞地貌在不同气候区的对比及国际对比提供了研究基础。丹霞地貌的研究正在从宏观走

向微观、从定性走向定量。

在白垩纪全球温室气候条件下, 中国许多陆相盆地中沉积了一套厚度逾千米的红色碎屑岩地层(简称陆相红层), 它们是丹霞地貌发育、演化的主要岩石基础。对于一个沉积盆地, 由于沉积环境的变化, 不同位置岩性具有明显的差异, 不同岩性抗风化、侵蚀能力不同, 导致其形成不同的丹霞地貌类型。因此, 在丹霞地貌演化研究当中, 需要注意岩性变化的影响因素。本文以江西龙虎山、广东丹霞山、陕西北部地区为例, 采用对比分析、数值模拟等研究手段, 分析岩性变化对丹霞地貌坡面发育的控制作用, 该研究将为地貌定量模拟提供一个基本思路。

收稿日期(Received date): 2018 - 11 - 05; **改回日期**(Accepted date): 2019 - 03 - 27

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41772197); 江西省研究生创新基金项目(YC2018 - S336); 韶关市丹霞山管理委员会科学研究项目(DXSCEO2019001)。[National Natural Science Foundation of China (Grant 41772197); Jiangxi Provincial Graduate Innovation Fund Project (YC2018 - S336); Scientific Research Fund from the Danxiashan Administrative Committee (DXSCEO2019001)]

作者简介(Biography): 刘鑫(1982 -), 女, 甘肃陇南人, 硕士研究生, 研究方向为地貌景观与旅游开发。[LIU Xin (1982 -), female, born in Longnan, Gansu Province, M. Sc. candidate, research on geomorphologic landscapes and tourism development] E-mail: liuxingeo@163.com

* **通讯作者**(Corresponding author): 郭福生(1962 -), 男, 江西赣州人, 教授, 博士, 研究方向为红层与丹霞地貌。[GUO Fusheng (1962 -), male, born in Ganzhou, Jiangxi province. Ph. D., professor, research on red beds and Danxia landscapes] E-mail: fshguo@ecit.cn

1 红层岩性与丹霞地貌景观的关系

在江西龙虎山、广东丹霞山、陕北延安—榆林一带,形成丹霞地貌的红层岩性主要为砾岩和砂岩,夹少量泥质岩。这三个地区形成丹霞地貌的红层基本特征如表1。

1.1 砾岩

在赣东北地区的信江盆地,龙虎山—龟峰世界地质公园的主要地貌景观都发育在盆地的南缘,成景地层以晚白垩世圭峰群河口组砾岩为主。在砾岩中,可见冲刷—充填构造、块状层理、粒序层理、交错层理、平行层理、叠瓦状构造等^[14-15,19-21]。这些粒度较粗大的红色砾岩在断裂构造破坏及流水侵蚀和风化作用的塑造作用下,形成了诸如龙虎山后障排衙(图1(a))、仙人城及龟峰展旗峰、骆驼峰等景观,挺拔俊俏。另外,浙江江郎山的残余孤峰主要由上白垩统方岩组红色砾岩构成。龙虎山和江郎山的这套砾岩地层主要是在冲积扇沉积相的扇根和扇中亚相中形成的^[19,21],碎屑颗粒粗大,抗风化能力较强。

在赣东北地区的红色砾岩崖壁上,常见砾石支撑的筛状沉积(图1(b))。在风化过程中,这种局部聚集状产出的砾石容易从崖壁崩落而形成洞穴雏形,由于受到暴雨时期顺崖壁倾泻而下的水流侵蚀,洞穴变大、变圆,逐渐与顺层发育的层控型洞穴空

间上组合为棋盘状洞穴系统,在龙虎山象鼻山栈道上比较明显^[14-15]。福建泰宁世界地质公园的白垩系砾岩地层中发育形态各异的洞穴,在持续的风化作用下,小洞穴互相贯通形成较大洞穴,加速了崖壁的后退(图1(c))。另外,由于碎屑颗粒分选性普遍较差,砾岩崖壁一般都比较粗糙,其上常有苔藓等植物生长,加速了崖壁的风化、崩塌和后退。

1.2 大型交错层理风成砂岩

白垩纪是地球历史中的典型温室气候时期,在中国大部分地区最明显的沉积响应便是形成红色大型高角度交错层理风成砂岩^[22]及古土壤^[23-24]。其中,风成砂岩以板状交错层理为主,纹层倾向稳定,倾角多数可达30°,层系厚度一般大于2 m,碎屑颗粒以中—细砂为主,磨圆度和分选性普遍较好。这种砂岩颗粒均匀,易于雕刻,其曝露的崖壁上常留存丰富的人文古迹(如丹霞山长老峰的摩崖石刻),是追索当地历史文化的重要材料。

在赣东北信江盆地的中心地带,如弋阳地区的晚白垩世塘边组主要由发育大型板状交错层理的风成中—细粒砂岩组成。由于其岩性相对均匀,风化后常形成圆丘状地形,山环水绕,展示出一种柔和之美(图2(a)~图2(b)),成为建寺筑庙的优选场所,如著名的南岩寺。

在粤北丹霞山长老峰锦石岩寺和睡美人山禄意堂,晚白垩世丹霞组锦石岩段风成砂岩的崖壁上分布着外形规则的蜂窝状洞穴,它们呈带状或片状集

表1 研究区红层和丹霞地貌的一般特征

Tab. 1 A brief summary of red beds and Danxia landscapes in the study areas

地区	成景红层特征	丹霞地貌特征与类型
江西龙虎山—龟峰	晚白垩世河口组和塘边组,前者以砾岩为主,后者以大型交错层理风成砂岩为主	位于中国东南湿润区。在河口组砾岩中主要形成具有赤壁陡崖的地貌,如后障排衙、仙人城、象鼻山、骆驼峰。在塘边组砂岩中则形成低矮山丘、额状洞、穿洞,代表景观有卧佛、南岩寺
广东丹霞山	晚白垩世丹霞组,自下而上划分为三个岩性段,第一、三岩性段以砾岩为主,第二段以大型交错层理风成砂岩夹古土壤为特征	位于中国东南湿润区。在巴塞段砾岩中形成赤壁陡崖,如锦石岩、僧帽峰、巴塞的绝壁陡崖。在风成砂岩中发育圆滑坡面,如细美寨、海豹石,坡面上由于流水侵蚀形成匀称的细沟(如晒布崖)。薄层细砂岩和古土壤夹层易风化凹进而形成层控洞穴
陕北延安、榆林	早白垩世洛河组,以发育大型交错层理风成砂岩为特征,胶结程度较低,易碎	位于中国西北半干旱区。在红层裸露区,流水侵蚀形成波浪状起伏地形,突显大型交错层理的纹理,如榆林市靖边县波浪谷。在丹霞地貌被第四系黄土覆盖区,节理发育和流水侵蚀可形成具有波浪起伏状崖壁的巷谷,如延安市志丹县毛项大峡谷



(a) 江西龙虎山的显著陡崖; (b) 龙虎山象鼻山栈道砾岩构成的崖壁, 常见聚集状产出的砾石(白色虚线椭圆), 右下角箭头所示为厘米比例尺; (c) 福建泰宁天穹岩景观——产在砾岩中的蜂窝状洞穴

(a) Prominent reddish cliffs in the Longhushan of Jiangxi Province; (b) The bedrock of the cliffs are composed of conglomerates with concentrated pebbles (white dotted ellipse). The card in the right corner is as a centimeter scale (yellow arrow); (c) The Tianqiongyan scenic spot is tafoni developing in conglomerates in Taining County of Fujian Province

图 1 赤壁陡崖及地貌特征

Fig. 1 Prominent reddish cliffs and landform features

群产出。单个小洞穴的直径为 3 ~ 9 cm, 部分东西开口与泰森多边形吻合程度较高, 岩性和气候可能是它们形成的重要因素^[13]。

在陕北延安、榆林地区, 广泛分布的早白垩世洛河组, 以大型交错层理风成砂岩为主, 该套中-细粒砂岩是鄂尔多斯盆地中东部分布稳定的良好含水岩组^[25]。同时, 由于其纹层横向上分布稳定, 砂屑分选性好, 在风化剥落和流水侵蚀后, 岩石表面显示出比较均匀的波状起伏形态, 于是形成了榆林市靖边县波浪谷、延安市志丹县毛项大峡谷等沟谷型丹霞地貌景观(图 2(c) ~ 图 2(d)), 展现出一种内敛美, 颇似美国西部犹他州的羚羊峡。陕北白垩纪洛河组和美国犹他州 Zion 国家公园早-中侏罗世 Navajo 组^[18]一样, 都是发育大型交错层理的风成砂岩, 层系厚度大, 砂屑颗粒粒径相对均匀, 同处于半干旱气候地区。可见, 大型交错层理风成砂岩是该类型地貌景观的内因, 而半干旱气候条件及河流侵蚀是其形成的外因。

同样, 也是由于风成砂岩碎屑颗粒磨圆度和分选性较好, 在龙虎山、丹霞山地区, 降雨季节来自山顶的流水在崖壁上侵蚀“雕刻”形成一系列近乎平行的细沟, 形成“晒布崖”等地貌景观。

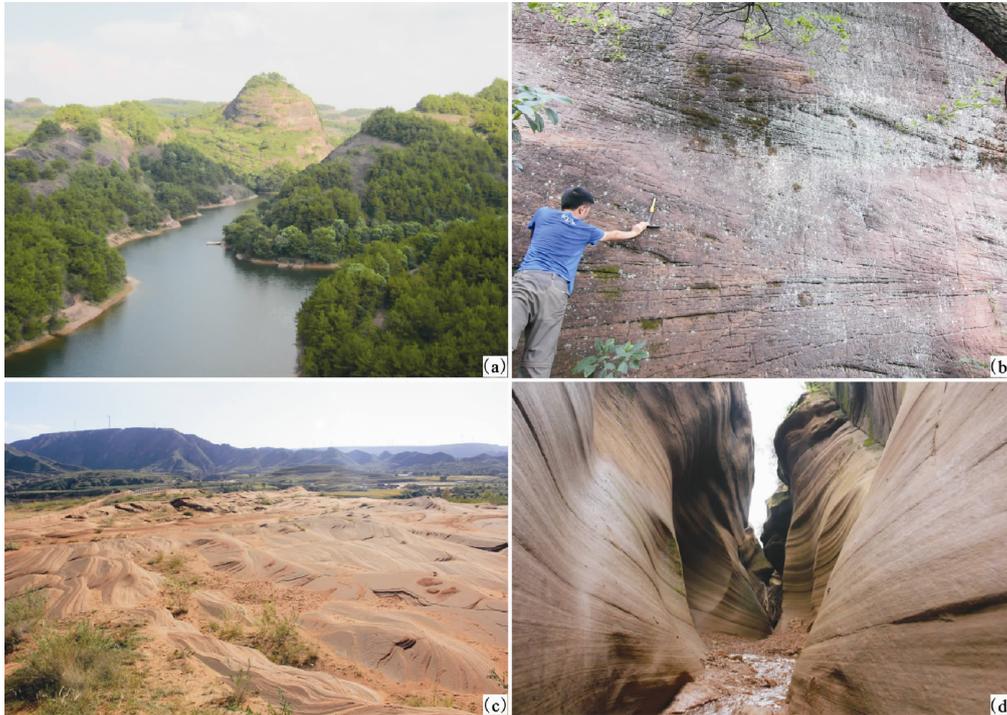
1.3 砂岩和泥质岩

由于抗风化能力的差异, 夹于砾岩层之间的砂岩和泥质岩更易风化而凹进, 形成天然洞穴(或岩槽), 有的经人工刻凿, 成为古寺庙、山寨的最佳选址。如广东丹霞山长老峰锦石岩寺、阳元山混元洞和狮子岩庙、睡美人山南坡的禄意堂及陕西旬邑县马栏河谷崖壁上的众多石窟。另外, 丹霞山长老峰梦觉关和巴寨观景平台, 都是晚白垩世丹霞组锦石岩段以风成砂岩夹古土壤的一套地层被风化凹进后形成的(图 3)。

2 CHILD 软件模拟

2.1 软件介绍与基本原理

河道-山坡综合地形演化(Channel-Hillslope



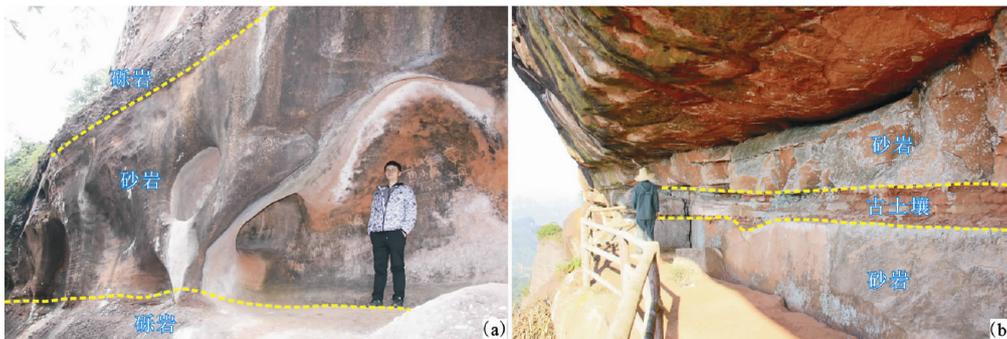
(a) 和 (b) 分别为赣东北弋阳县低矮丘陵地形和发育大型交错层理的风成砂岩;

(c) 和 (d) 分别为陕北靖边县波浪谷和志丹县毛项大峡谷景观

(a) and (b) are low hilly terrains and eolian sandstones with large-scale cross-beddings in Yiyang County of northern Jiangxi Province; (c) and (d) are the Bolang Valley in Jingbian County and Maoxiang Valley in Zhidan County of northern Shaanxi Province

图 2 赣东北和陕北地区白垩系大型交错层理风成砂岩及地貌

Fig. 2 Cretaceous large-scale cross-bedded eolian sandstones and landscapes in northeastern Jiangxi and northern Shaanxi provinces



(a) 长老峰梦觉关大型蜂窝状洞穴发育在砂岩中,其顶、底与砾岩地层分界明显;

(b) 巴塞厚层砂岩夹古土壤地层,抗风化能力较弱而被风化凹进形成层控洞穴

(a) Large honeycombs in the sandstone bed bounded with the lower and upper conglomerate beds at the Mengjueguan of Zhanglao Peak scenic area; (b) The sandstones with interbedded paleosols have been weathered to form bedding-controlled cavity at Bazhai Peak scenic area

图 3 粤北丹霞山红层及地貌景观

Fig. 3 Red beds and landscapes in the Danxiashan of northern Guangdong Province

Integrated Landscape Development, 简称 CHILD) 模型是由美国科罗拉多大学环境科学合作研究所 Gregory E Tucker 教授研发的计算机模拟平台^[26]。在稳定的或短暂的条件下,CHILD 已经成功应用于

不同尺度的地貌时空演化^[27]。CHILD 软件充分考虑到了地形演化中的气候、构造、河流侵蚀、生物等因素,在过去十多年的实践检验中已经取得了较好的应用效果^[28-29]。

质量连续方程能够表达地形中每一个点的海拔变化与构造抬升、河流下蚀作用及坡面蠕动侵蚀作用等之间的关系。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\nabla q_s + U(x, y, t) \quad (1)$$

其中, z 是地表高程; t 是高程变化的时间; q_s 为沉积物通量; $-\nabla q_s$ 则代表不同的运输和侵蚀条件, 该哈密顿算符能够利用其矢量和微分算子的双重性量, 根据运动过程中预先设置的不同假设呈现不同的形式。 U 是一个基准面变化的函数, 其自变量为该区域水平面某个点的坐标 (x, y) 及时间 (t) 。使用有限体积法对该连续性方程进行求解, 即为不规则三角网 (TIN) 描述的空间三维地表形态。本文模拟区域选用 $3000 \text{ m} \times 3000 \text{ m}$, 假定整个演化历程为 $7 \text{ Ma}^{[5]}$ 。

2.2 模拟结果

将研究区分割为一系列互相连接的点以形成不规则网格。其中, 每个节点相当于一个有限体积细胞。网格密度在数值模拟中十分重要, 密度越大精度越高。但是密度过大则会耗费更多的计算时间和计算机内存。在相同的气候条件 (降水、温度等) 和构造抬升作用下, 经历相同地质时期的流水侵蚀作用, 由细砂岩、细砾岩、中砾岩构成的山体坡面演化模拟结果 (图 4) 显示: 细砂岩坡面平缓, 呈波状起伏形态, 与陕北县波浪谷 (图 2(c)) 相似; 中砾岩山体形成切割较深的峡谷和陡峻的崖壁, 与龙虎山象鼻山栈道沿线的赤壁陡崖 (图 1(a)) 类似; 而介于细砂岩和中砾岩之间的细砾岩, 则发育较为明显的沟壑系统。

3 讨论

岩性变化既是客观存在的事实, 也是丹霞地貌坡面演化的根本影响因素。由于沉积环境差异, 在盆地不同位置红层的岩性差别较大。在白垩纪总体干燥、炎热古气候的地表氧化条件下, 盆地边缘地区以厚度较大的冲积扇砾岩堆积为主; 而在盆地中部, 则发育泛滥平原、干盐湖、沙漠等沉积环境, 碎屑颗粒变小, 砂岩和泥岩及古土壤增多^[19]。因此, 盆地边缘厚层砾岩为后期构造抬升和流水侵蚀形成赤壁陡崖提供了先天的岩石基础, 形成了诸如龙虎山仙人城、后障排衙及丹霞山锦石岩赤壁等景观。具有

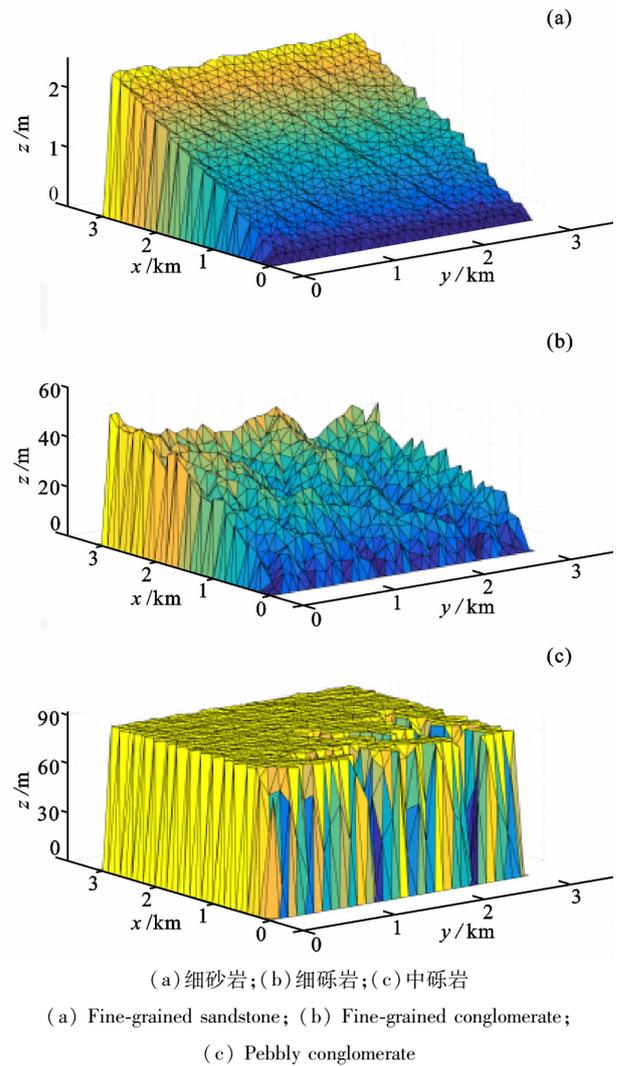


图 4 不同岩性组成的丹霞地貌坡面演化模拟结果

Fig. 4 Development simulation results of Danxia slopes composed of different lithologies

大型交错层理的风成砂岩, 以中-细粒砂屑为主, 颗粒分选性和磨圆程度较好, 颗粒均匀, 风化后易形成低矮圆丘或波浪状地貌。

在红盆演化过程中, 地质历史时期古环境和古气候条件的差异导致在纵向剖面上岩性也会发生变化。比较明显的是, 红层剖面岩性差异导致在崖壁上形成一系列层控型洞穴^[10, 14-15]。如果抗风化能力较弱的岩层厚度较大, 则可能发育形成大型扁平状或额状洞穴, 由于其具有天然遮风避雨之功能, 同时红色又受到佛教、道教信徒的青睐^[30], 所以成为许多古代寺庙建筑的优选地址。

实际上, CHILD 软件可将目标地层视为一组各层深度变化、沉积物组成差异的岩性序列, 结合地层

年代学、内部结构特征数据等能够展现更为真实的红层物质基础,只是地层代表性剖面、空间尺度及具体参数选择的适用性有待进一步探讨。从定性描述到定量模拟是地貌学研究的前沿之一。定量研究就是通过统计调查法或实验法,收集精确的数据资料,然后进行统计分析和检验。本文的研究意义在于强调岩性对丹霞地貌演化过程的重要性,及用定量模拟的手段验证红层岩性对丹霞地貌坡面演化的控制作用。对于一个区域地貌演化的讨论,不能将岩性认为是均匀的,也不能仅根据形态变化来判断丹霞地貌的演化阶段。

另外,气候条件(如降水、温度、植被)在地貌塑造过程中也扮演着重要角色。比如,在假设岩性和构造条件一致的情况下,由于广东丹霞山和陕北靖边波浪谷分别处于湿润和半干旱气候区,降水和温度的明显差异必然影响地貌的演化。但是,由于地表地貌演化过程的复杂性,本次研究仅突出了岩性的控制作用,气候因素是未来需要考虑的重要课题。

4 结论

(1)CHILD 软件模拟结果表明,从细砂岩到中砾岩,随着红层岩石碎屑颗粒粒径增大,岩石抗风化能力增强,在相同或相似的构造抬升和流水侵蚀作用下,盆地中部的中-细砂岩更易形成低缓的丘状或波状地貌,而盆地边缘厚度较大的砾岩由于其抗风化能力强,则更易形成陡峭的崖壁。

(2)红层盆地岩性和岩相变化是客观存在的事实。岩性和岩相差异又是后期丹霞地貌演化的内在基础,决定了地形和地貌的最终表现。因此,在丹霞地貌坡面演化的计算机模拟过程中,需要重视盆地不同位置岩性的差异及纵向剖面上不同粒级所占的比例,才能更好地认识和理解丹霞地貌坡面发育过程。

参考文献 (References)

[1] 彭华. 中国丹霞地貌研究进展[J]. 地理科学, 2000, 20(3): 203-211. [PENG Hua. A survey of the Danxia landform research in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(3): 203-211]

[2] 黄进. 丹霞地貌坡面发育的一种基本方式[J]. 热带地貌, 1982, 3(2): 107-134. [HUANG Jin. One of the basic development models of slopes in "Danxia" Terrain [J]. Tropical

Geomorphology, 1982, 3(2): 107-134]

[3] YOUNG R W, WRAY R A L, YOUNG A R M. Sandstone landforms [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009, 1-304.

[4] PENG Hua, REN Fang, PAN Zhixin. A review of Danxia landforms in China [J]. Zeitschrift für Geomorphologie, 2015, 59 (Suppl. 1): 19-33.

[5] 黄进. 丹霞山地貌[M]. 北京: 科学出版社, 2010. [HUANG Jin. Landforms of Danxiashan [M]. Beijing: Science Press, 2010, 1-239]

[6] 郭福生, 姜勇彪, 胡中华, 等. 龙虎山世界地质公园丹霞地貌成景系统特征及其演化[J]. 山地学报, 2011, 29(2): 195-201. [GUO Fusheng, JIANG Yongbiao, HU Zhonghua, et al. Evolution and genesis system features of Danxia landform in Longhushan World Geopark [J]. Mountain Research, 2011, 29(2): 195-201]

[7] 黄进, 陈致均, 齐德利. 中国丹霞地貌分布(下)[J]. 山地学报, 2015, 33(4): 649-673. [HUANG Jin, CHEN Zhijun, QI Deli. Distribution of Danxia landform in China (Last) [J]. Mountain Research, 2015, 33(4): 649-673]

[8] 李霞, 何庆成, 董颖, 等. 贵州赤水南部地区丹霞地貌类型特征及成因演化分析[J]. 地球学报, 2013, 34(4): 501-508. [LI Xia, HE Qingcheng, DONG Ying, et al. An analysis of characteristics and evolution of Danxia Landform in the South of Chishui County, Guizhou [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2013, 34(4): 501-508]

[9] 潘志新, 彭华. 国内外红层分布及其地貌发育的对比研究[J]. 地理科学, 2015, 35(12): 1575-1584. [PAN Zhixin, PENG Hua. Comparative study on the global distribution and geomorphic development of red beds [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(12): 1575-1584]

[10] 彭华, 邱卓炜, 潘志新. 丹霞山顺层洞穴风化特征的试验研究[J]. 地理科学, 2014, 34(4): 454-463. [PENG Hua, QIU Zhuowei, PAN Zhixin. Experimental study on the weathering features of bedding caves at Mt. Danxiashan [J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(4): 454-463]

[11] ZHU Cheng, WU Li, ZHU Tongxin, et al. Experimental studies on the Danxia landscape morphogenesis in Mt. Danxiashan, South China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(8): 943-966.

[12] 姜伏伟, 郭福生, 杨安林. 丹霞地貌岩体差异胀缩特征及其成景作用[J]. 山地学报, 2018, 36(4): 501-508. [JIANG Fuwei, GUO Fusheng, YANG Anlin. Differential expansion and contraction characteristics of Danxia landform rock mass and its geomorphological effect [J]. Mountain Research, 2018, 36(4): 501-508]

[13] 陈留勤, 李馨敏, 郭福生, 等. 丹霞山世界地质公园蜂窝状洞穴特征及成因分析[J]. 地质论评, 2018, 64(4): 895-904. [CHEN Liuqin, LI Xinmin, GUO Fusheng, et al. Characteristics and origin of honeycombs in the Danxiashan Global Geopark in South China [J]. Geological Review, 2018, 64(4): 895-904]

- [14] GUO Fusheng, CHEN Liuqin, XU Huan, et al. Origin of beaded tafoni in cliffs of Danxia landscapes, Longhushan Global Geopark, South China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2018, **15**(11): 2398–2408.
- [15] 李馨敏, 郭福生, 陈留勤, 等. 龙虎山世界地质公园象鼻山栈道洞穴地貌成因[J]. *山地学报*, 2018, **36**(4): 509–518. [LI Xinmin, GUO Fusheng, CHEN Liuqin, et al. Origin analysis of the cavities along the Xiangbishi cliffs in the Longhushan Global Geopark, Southeast China [J]. *Mountain Research*, 2018, **36**(4): 509–518]
- [16] YAN Zhenzhen, DU Xiaoping, FAN Xiangtao. Numerical simulation of the evolutionary process of Danxia landforms [J]. *Physical Geography*, 2015, **36**(4): 322–336.
- [17] YAN Luobin, PENG Hua, HU Zheng, et al. Stone pillar rockfall in Danxia landform area, Mt. Langshan, Hunan Province, China [J]. *Physical Geography*, 2016, **37**(5): 327–343.
- [18] 潘志新, 彭华, 任舫, 等. 美国 Zion 国家公园红层地貌发育研究[J]. *地球学报*, 2016, **37**(1): 116–126. [PAN Zhixin, PENG Hua, REN Fang, et al. A study of the development of red bed landforms in Zion National Park, the United States [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, **37**(1): 116–126]
- [19] CHEN Liuqin, GUO Fusheng. Upper Cretaceous alluvial fan deposits in the Jianglangshan Geopark of Southeast China; implications for bedrock control on Danxia landform evolution [J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, **14**(5): 926–935.
- [20] 刘鑫, 陈留勤, 李馨敏, 等. 江西象山地质公园丹霞地貌成景地层沉积环境分析[J]. *现代地质*, 2018, **32**(2): 260–269. [LIU Xin, CHEN Liuqin, LI Xinmin, et al. Depositional environments of the bedrock of Danxia landform in Xiangshan Geopark of Jiangxi Province, SE China [J]. *Geoscience*, 2018, **32**(2): 260–269]
- [21] 李文灏, 陈留勤, 郭福生, 等. 江西龙虎山地区红层沉积相分析及与丹霞地貌发育关系研究——以仙人城景区为例[J]. *地质力学学报*, 2018, **24**(4): 522–532. [LI Wenhao, CHEN Liuqin, GUO Fusheng, et al. Facies analysis of red beds and its relationship with the development of Danxia landform in Longhushan area of Jiangxi Province: an example from Xianrencheng scenic spot [J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, **24**(4): 522–532]
- [22] WU Chihua, RODRÍGUEZ-LÓPEZ J R, LIU Chenglin, et al. Late Cretaceous climbing erg systems in the western Xinjiang Basin: Palaeoatmosphere dynamics and East Asia margin tectonic forcing on desert expansion and preservation [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, **93**: 539–552.
- [23] 李祥辉, 陈斯盾, 曹珂, 等. 浙闽地区白垩纪中期古土壤类型与古气候[J]. *地学前缘*, 2009, **16**(5): 63–70. [LI Xianghui, CHEN Sidun, CAO Ke, et al. Paleosols of the mid-Cretaceous: A report from Zhejiang and Fujian, SE China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, **16**(5): 63–70]
- [24] 陈留勤, 李鹏程, 郭福生, 等. 粤北丹霞地晚白垩世丹霞组沉积相及古气候意义[J]. *沉积学报*, 2019, **37**(1): 17–29. [CHEN Liuqin, LI Pengcheng, GUO Fusheng, et al. Facies analysis and paleoclimate implications of the Late Cretaceous Danxia Formation in the Danxia Basin, Northern Guangdong Province, South China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, **37**(1): 17–29]
- [25] 谢渊, 王剑, 江新胜, 等. 鄂尔多斯盆地白垩系沙漠相沉积特征及其水文地质意义[J]. *沉积学报*, 2005, **23**(1): 73–83. [XIE Yuan, WANG Jian, JIANG Xinsheng, et al. Sedimentary characteristics of the Cretaceous desert facies in Ordos Basin and their hydrogeological significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, **23**(1): 73–83]
- [26] TUCKER G E, LANCASTER S, GASPARINI N, et al. The Channel-Hillslope Integrated Landscape Development Model (CHILD) [C]//HARMON R S, DOE W W. *Landscape Erosion and Evolution Modeling*. Boston: Springer, 2001: 349–388.
- [27] TUCKER G E. *Landscape Evolution* [C]//SCHUBERT G. *Treatise on Geophysics* (Second Edition). S. I. Elsevier B V, 2015: 593–630.
- [28] ATTAL M, TUCKER G E, WHITTAKER A C, et al. Modeling fluvial incision and transient landscape evolution: influence of dynamic channel adjustment [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008, **113**(F3): 189–193.
- [29] ROY S G, KOONS P O, OSTI B, et al. Multi-scale characterization of topographic anisotropy [J]. *Computers & Geosciences*, 2015, **90**: 102–116.
- [30] 孙丽, 李志文. 龙虎山丹霞地貌与中国传统文化关系浅析[J]. *东华理工大学(社会科学版)*, 2013, **32**(3): 272–275. [SUN Li, LI Zhiwen. Study on the relationship between Longhushan Danxia Landform and Chinese traditional culture [J]. *Journal of East China Institute of Technology (Social Science)*, 2013, **32**(3): 272–275]

Lithologic Control on the Development of Danxia Landscapes in Red Basins

LIU Xin^{1,2}, GUO Fusheng^{1,2*}, CHEN Liuqin^{1,2}, LI Xinmin^{1,2}, LIU Fujun^{1,2}

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

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

Abstract: The terrestrial red basins are characterized by distinct lateral and vertical lithologic changes, which leads to development of different Danxia landscapes. The comparative analysis and numerical modeling are used to summarize the dominant rock and Danxia landscape types, and to propose that lithology plays a key role in the Danxia slope evolution in the Xinjiang Basin of northeastern Jiangxi Province, Danxia Basin of northern Guangdong Province and northern Shaanxi Province. In the Xinjiang Basin, the prominent cliffs particularly occur in the conglomerate-dominated Hekou Formation at the southern basin margin, while the subrounded low hilly terrains develop in the eolian sandstone-dominated Tangbian Formation in Guixi and Yiyang areas at the middle areas of the basin. Similarly, the prominent cliffs generally occur in the conglomerates with eolian sandstone interbeds of the Danxia Formation in the Danxiashan Global Geopark of northern Guangdong Province. In contrast, the wavy landscapes develop in the Luohe Formation eolian sandstones in northern Shaanxi Province. Under the assumption of the similar tectonic uplift and river erosion, the Channel-Hillslope Integrated Landscape Development (CHILD) model was used to test slope evolution in the fine-grained sandstone, fine-grained conglomerate, and pebbly conglomerate. The modelling results showed that the gentle slopes develop in the fine-grained sandstones, the gullies occur in the fine-grained conglomerates, while the prominent cliffs occurred particularly in the pebbly conglomerates. Therefore, lithology is the fundamental factor that needs to be paid more attention in the future quantitative modeling of Danxia landscapes.

Key words: Danxia landscape; red beds; lithologic control; landform evolution modeling