

引用格式: 杨柳, 陈留勤, 潘志新, 邵崇建, 吴昊. 陕北黄土覆盖型丹霞地貌特征及成因[J]. 山地学报, 2023, 41(4): 508-520.

YANG Liu, CHEN Liuqin, PAN Zhixin, SHAO Chongjian, WU Hao. Characteristics and genesis of loess-covered Danxia landscape in northern Shaanxi province of China [J]. Mountain Research, 2023, 41(4): 508-520.

陕北黄土覆盖型丹霞地貌特征及成因

杨柳¹, 陈留勤^{1*}, 潘志新², 邵崇建¹, 吴昊³

(1. 东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330013; 2. 海南大学 旅游学院, 海口 570228; 3. 陕西省矿产地质调查中心, 西安 710068)

摘要: 丹霞地貌在中国东南湿润地区研究程度较高, 但西北干旱-半干旱地区的研究资料较少。西北丹霞地貌在形态特征和形成过程等方面独具特色, 对其研究有利于提高对丹霞地貌共性特征的认识, 具有重要理论意义。陕北甘泉大峡谷地处黄土高原中部, 是黄土覆盖型丹霞地貌的典型代表, 具有明显波状起伏的峡谷特征, 对该地区的研究有利于更好地认识黄土高原丹霞地貌的演化过程。本文采用野外考察、施密特锤岩石原位硬度测量、样品薄片偏光显微镜和扫描电子显微镜观察及地理信息系统(ArcGIS)中面积高程积分等多种方法, 探究陕北地区丹霞地貌的造景岩石特征、演化阶段及其控制因素。研究结果表明: (1) 研究区的造景岩石为洛河组砂岩, 发育大型风成交错层理, 孔渗性较好, 长石、岩屑及钙质胶结物含量较高, 岩石抗风化能力较弱, 在流水侵蚀和盐风化作用下形成峡谷密布的丹霞地貌。(2) 甘泉大峡谷与桦树沟的面积高程积分值分别为 0.51 和 0.49, 指示该地区的地貌演化阶段为壮年期, 流水侵蚀为地貌演化的主要控制因素。(3) 研究区丹霞地貌于新近纪晚期之前可能已经形成, 随后第四纪气候变干, 风成黄土堆积在丹霞山峰之上和峡谷之间, 流水溯源侵蚀使峡谷进一步加深变长, 形成了独具特色的“黄土覆盖型丹霞地貌”。本研究可为加深对西北地区丹霞地貌形成过程的理解提供新材料。

关键词: 丹霞地貌; 古丹霞地貌; 流水侵蚀; 陕北; 黄土高原

中图分类号: P931

文献标志码: A

丹霞地貌因其特殊的地貌形态、科学研究和景观美学价值而备受国内外学者的关注。中国丹霞地貌主要集中在东南、西南和西北三个地区^[1-2]。东南湿润气候区丹霞地貌一直以来都是人们关注的焦点, 研究大多围绕地貌特征描述^[1,3]、定量-半定量实验分析^[4-7]、洞穴微地貌成因^[8-10]以及国内外对比^[11]等方面。然而, 陕北地区为数众多的特殊丹霞地貌却少有人知, 直至近几年才逐渐被人们所发现和关注, 其景观价值和旅游开发潜力不断显现^[12-13]。以往对陕北地区的研究多集中于黄土地貌、水土流失、地质灾害等^[14-16], 而埋藏于第四纪黄

土盖层之下的巨厚红层经过构造抬升、风化、崩塌等作用后, 发育了大量丹霞峡谷及崖壁^[17-18]。不同于中国南方湿润区的丹霞地貌, 陕北丹霞地貌在气候、构造、岩性等因素的影响下, 形态纵深狭窄、流畅圆滑, 具有明显的独特性^[19-20], 对其开展研究有助于进一步提升对不同地区丹霞地貌共性和差异的认识。

本文以陕西省延安市甘泉县桦树沟作为主要研究对象, 通过野外观察、岩石原位硬度测量、岩石样品薄片偏光显微镜和扫描电子显微镜观察及面积高程积分等方法, 分析其形成过程的主控因素和地貌演化

收稿日期(Received date): 2023-02-23; 改回日期(Accepted date): 2023-08-15

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(42361002)[National Natural Science Foundation of China (42361002)]

作者简介(Biography): 杨柳(1999-), 女, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要研究方向: 红层与丹霞地貌。[YANG Liu (1999-), female, born in Lu'an, Anhui province, M. Sc. candidate, research on red beds and Danxia landscape] E-mail: 1412124796@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 陈留勤(1983-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 红层与丹霞地貌。[CHEN Liuqin (1983-), male, Ph. D., professor, research on red beds and Danxia landscape] E-mail: chenliuqin@ecut.edu.cn

模式,为加深对西北地区丹霞地貌的形成过程提供新材料。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区域概况

甘泉大峡谷位于陕西省延安市西约 44 km 的甘泉县下寺湾镇张家沟村,2022 年 2 月被陕西省文化和旅游厅评为国家 4A 级旅游景区。甘泉一带总体地势自西北向东南倾斜,海拔 600 ~ 1645 m 左右,峡谷全长约 800 m,距离地表深度 6 ~ 15 m 左右,谷壁两侧最窄处不足 1 m,由桦树沟、牡丹沟、一线天、龙巴沟和花豹岔等重要景点组成(图 1)。研究区属温带大陆性气候,根据陕西省统计年鉴 2000 年至 2021 年气象数据(图 2),延安市平均气温约 10 ℃ 左右,年温差较大,且多年平均降水量约 557.4 mm,多年相对湿度为 55% ~ 65%,降水量分配不均,夏季多于冬季,以 6—9 月为主,占年降水量 50% ~ 65%,常伴以暴雨形式出现,为洛河水系对丹霞地貌

峡谷的侵蚀提供了动能。

地质构造上,研究区属华北板块西段克拉通边缘的典型大型内陆拗陷盆地——鄂尔多斯盆地^[21]。该构造单元于中生代早期发育,以太古代、元古代变质岩系组成盆地基底,受加里东、海西构造运动影响,缺失志留—泥盆纪及早白垩世地层,而后经燕山、喜马拉雅构造运动,盆地发生褶皱、断裂,缺失部分古近纪、新近纪地层,局部有少量新近纪红色黏土堆积,第四纪以来接受大量黄土堆积^[22]。研究区整体构造相对简单,地层产状较缓,表现为长期稳定性克拉通地块特征,而节理和裂隙却非常发育。主要造景岩石为下白垩统志丹群洛河组,其中以大型板状、槽状交错层理发育最为突出,岩性为紫红色中-细粒砂岩,整体上是一套风成沙漠相沉积,岩石孔隙度和渗透率较高,是良好的储层^[23-24]。洛河组顶部多为黄土所覆盖,部分地区沿峡谷及河谷两岸基岩裸露。

1.2 研究方法

本次研究选择桦树沟作为主要研究区域,采用

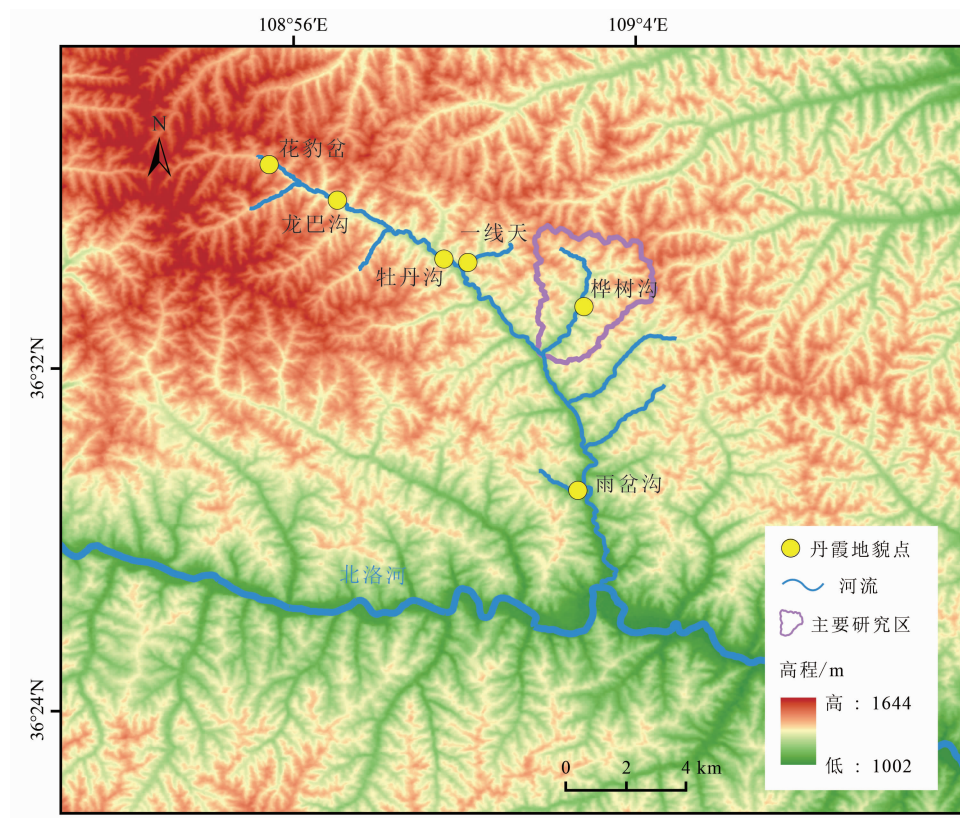


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

(数字高程模型 DEM 数据来自网站: <http://www.gscloud.cn/>)

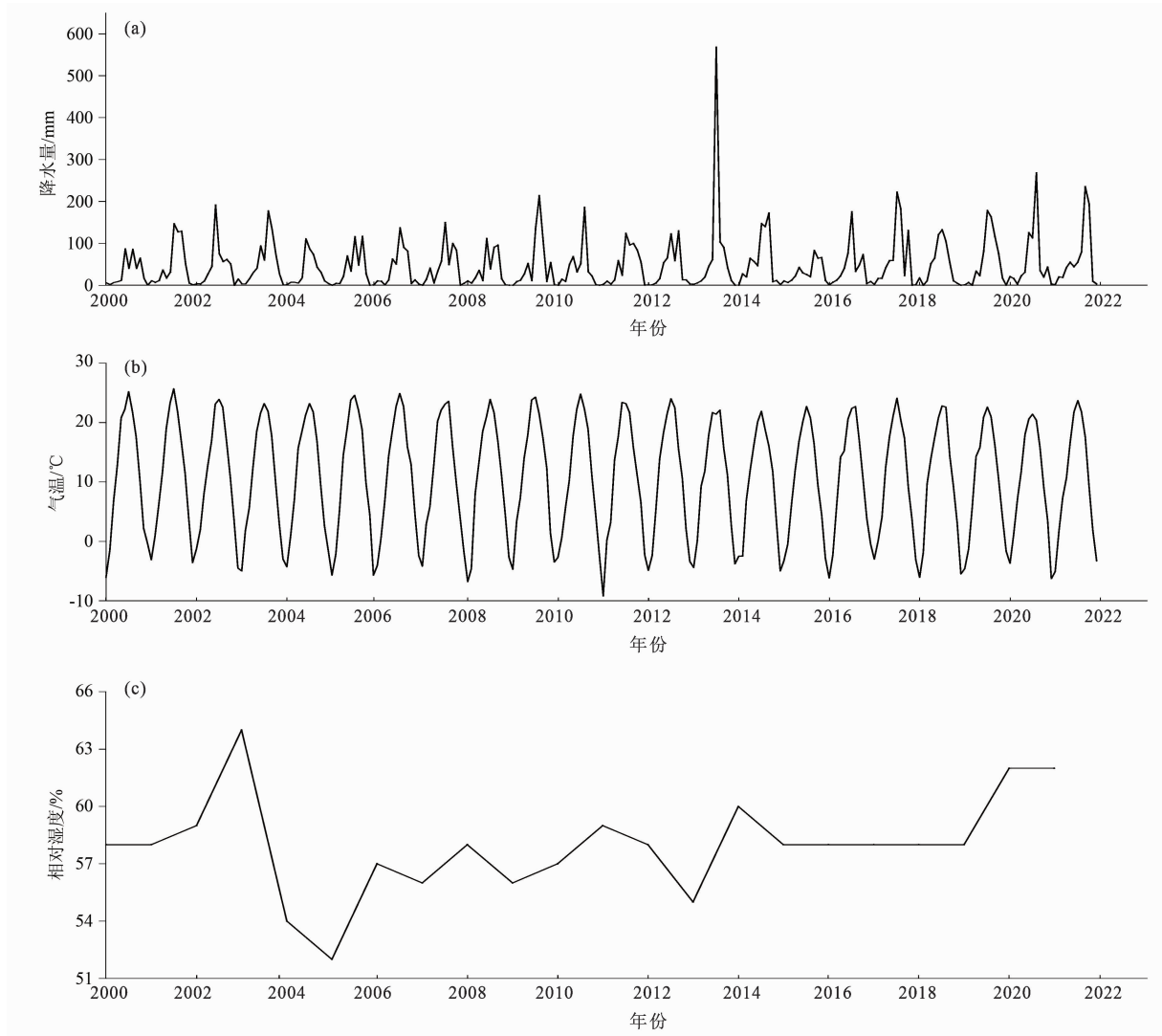


图 2 延安市 2000—2021 年气候要素数据统计图:(a)降水量;(b)气温;(c)相对湿度

Fig. 2 Statistical chart of climate elements in Yan'an city from 2000 to 2021: (a) precipitation; (b) temperature; (c) relative humidity
(数据来自陕西省统计局: <http://tjj.shaanxi.gov.cn/tjsj/ndsj/tjnj/index.html>)

野外观察、岩石原位硬度测量及样品薄片偏光显微镜和扫描电子显微镜观察等方法。野外使用瑞士 Proceq Original N 型施密特锤测量岩石的回弹值,对测量区域内平行与垂直于层理面两种情况分别进行原位回弹测量,避开地衣、苔藓和明显软弱结构的位置,在岩石表面弹击、编号并记录回弹值以表示造景岩石的硬度,每个测点测量 20 个回弹值。室内将采集的洛河组砂岩样品磨制成厚度约为 0.03 mm 的薄片,通过偏光显微镜对其进行观察,描述矿物组成、结构及胶结物类型等,同时选取部分小块状样品进行扫描电子显微镜观察,在微观尺度上分析岩石和矿物的表面形态。研究区第四系黄土与下伏下白垩统洛河组红色砂岩之间的角度不整合接触关系较

为清楚,原本的丹霞山峰被黄土覆盖后依然表现为高地形,峡谷被黄土覆盖后依然为峡谷。所以,针对研究区特殊的黄土覆盖型丹霞地貌,在戴维斯 (Davis) 地貌侵蚀循环理论的指导下,利用 ArcGIS 软件进行面积高程积分方法分析地貌所处的演化阶段是可行的。

2 结果与分析

2.1 丹霞地貌景观特征

陕北丹霞地貌最显著的特征是在丹霞地貌之上覆盖着黄土层,整体呈高原-峡谷型地貌景观,在国内外实属罕见^[19]。研究区内由大小 120 条峡

谷组成,以桦树沟为例,谷壁大多沿峡谷两侧发育,呈波状起伏,圆滑近直立,雨季表面菌藻类发育,可见明显的水流侵蚀痕迹。峡谷入口处(下游)深而狭窄(图 3a),上游处较浅,整体呈波浪状 S 形延伸,谷壁圆滑凹凸起伏,由于大型交错层理纹层之间物质成分和结构的细微差异,风化后形成的纹理引人注目(图 3b、图 3c)。局部有许多壶穴沿节理、裂隙走向展布,其走向与峡谷走向相一致,伴随流水侵蚀,相邻壶穴不断扩大并逐步贯通连接,上游处变浅,砂岩在流水侵蚀下易沿纹层界面发生剥落,进一步形成独特“峡谷型”丹霞,峡谷上游壶穴底部可见磨圆程度较好的砾石(图 3d、图 3e)。

2.2 造景岩石特征

研究区丹霞地貌的造景岩石主要是早白垩世洛河组紫红色砂岩,其最显著的特点是层系厚度大,具大型板状和槽状交错层理,无论是在峡谷还是在地表,层理构造均清晰可见(图 3)。对洛河组砂岩样品薄片进行偏光显微镜观察,结果显示石英颗粒(Qm)占比达 75%~85%,是其主要的碎屑物质,长石多为钾长石(Kfs),岩屑成分包括火山岩(Lv)、泥

岩(Mud)及灰岩(Lim)。碎屑颗粒多呈次圆状-圆状,分选性和磨圆度均较好;砂岩碎屑颗粒以点-线状接触为主,孔隙度较高(图 4a、图 4b)。颗粒间的填隙物很少有细小的碎屑物质,而主要由方解石(Cal)、铁氧化物(Fe)以及硅质次生加大边(Si)等胶结物组成,其中方解石充填在颗粒之间的较大孔隙,铁氧化物呈深棕色薄膜覆盖在砂粒表面(图 4c、图 4d)。胶结方式多为接触式胶结,胶结程度差,颗粒易剥落。

洛河组砂岩小块状样品的扫描电镜图像显示,石英颗粒表面毛玻璃现象显著,常见机械作用形成的碟形和新月形撞击坑,颗粒磨圆程度高,但是胶结疏松,容易剥落脱离,颗粒周围普遍有红色的铁质包裹边(铁氧化物组成的胶结物),与典型的风成砂岩特征相一致(图 5a~c)。在石英和长石颗粒上还观察到许多小型溶蚀孔洞及完整的岩盐颗粒(图 5d)。

2.3 造景岩石回弹值

本次研究在平行和垂直于层理面方向分别测量砂岩的回弹值。平行于层理面方向的测点分别在沟口(人工修路开挖的崖壁)、沟内湿润凹壁、出口、壶



图 3 陕北延安甘泉县桦树沟丹霞地貌景观:(a)入口处(下游)深而狭窄的峡谷;(b)上游较浅的峡谷;
(c)峡谷呈 S 形弯曲;(d)发生贯通的相邻壶穴;(e)砂岩沿交错层理纹层界面发生剥落;(f)砂岩谷壁回弹测量
Fig. 3 Danxia landscape in Huashugou canyon, Ganquan county, Yan'an, northern Shaanxi, China;
(a) a deep and narrow canyon at the entrance (downstream); (b) a shallow canyon (upstream);
(c) a s-shaped canyon; (d) adjacent connected potholes; (e) sandstone flaking along lamination of cross-beddings;
(f) rebound measurement on the sandstone wall

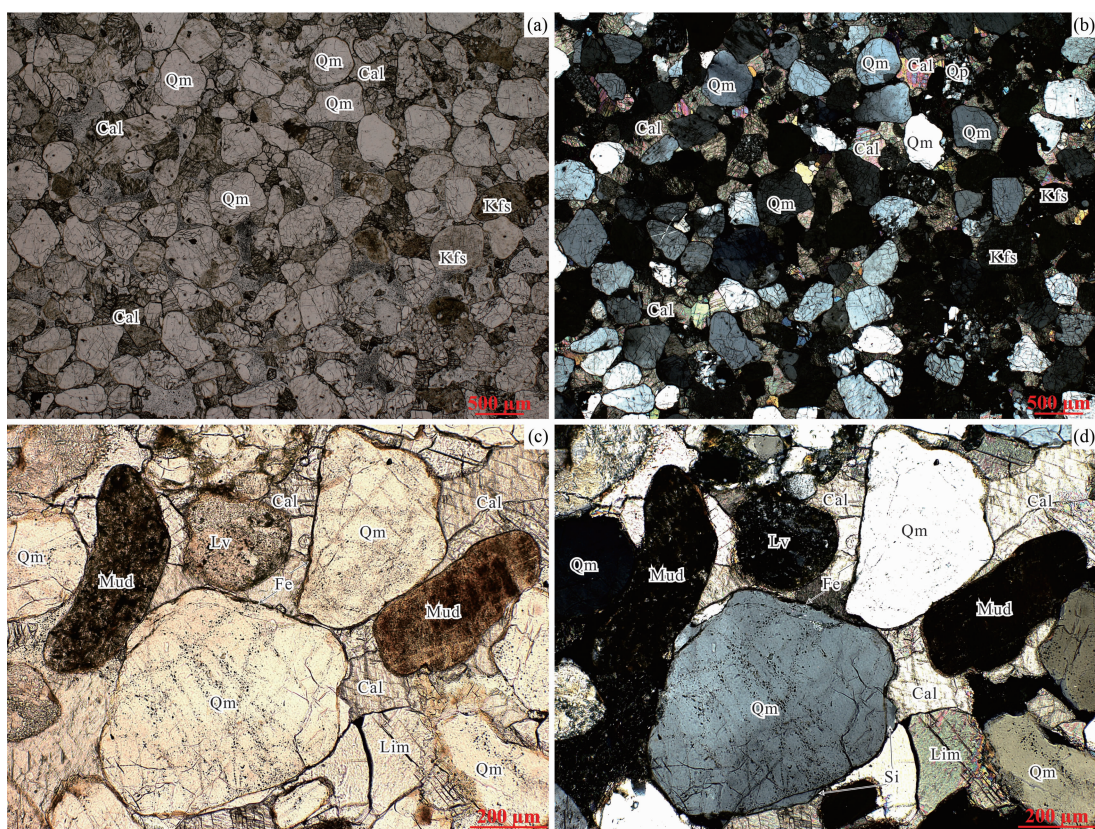


图 4 洛河组砂岩样品显微镜照片:(a)和(c)单偏光照片;(b)和(d)正交光照片

Fig. 4 Microscopic photos of sandstone samples from Luohe Formation: (a) and (c) monoscopic photographs; (b) and (d) orthoscopic photographs

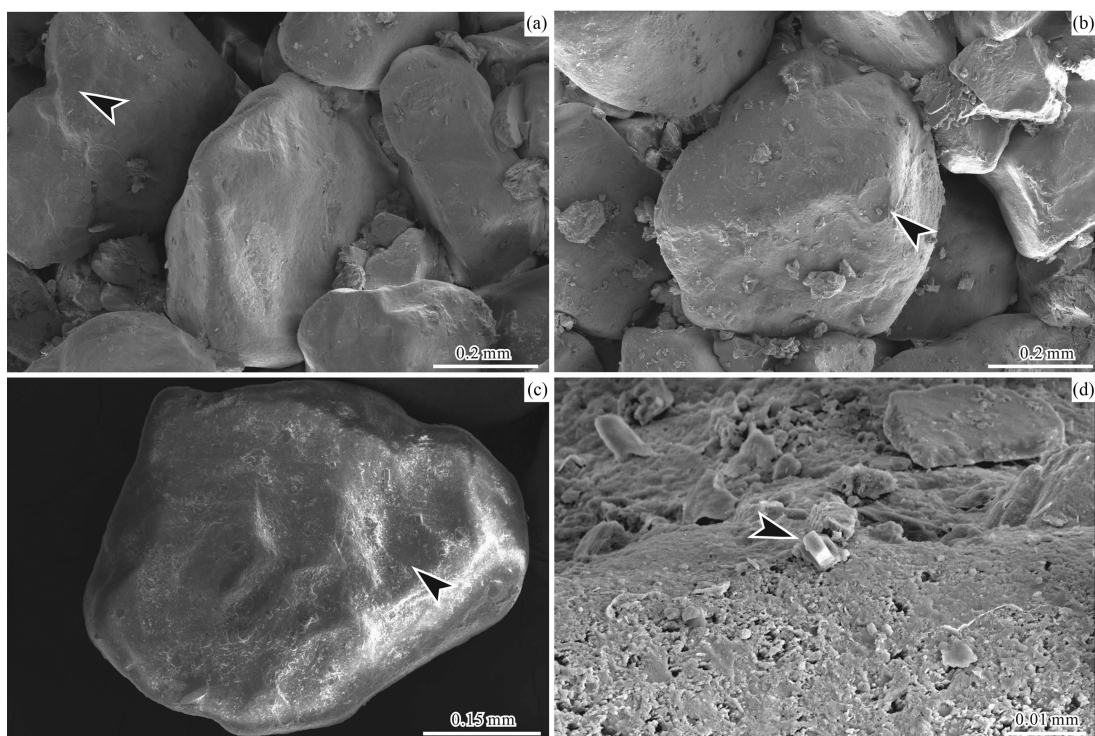


图 a ~ c 中的黑色箭头表示碟形撞击坑;图 d 中的黑色箭头表示一个完好的岩盐颗粒。

图 5 洛河组砂岩样品石英颗粒表面特征

Fig. 5 Surface characteristics of quartz grains from sandstone samples of Luohe Formation

穴等位置,同时在相应位置的垂直于层理面进行测量(图 3f),分别为 10 组,共 20 组获得 600 个回弹值。统计结果显示(图 6),平行于层理面的回弹值均值高于垂直于层理面。回弹值愈大,说明岩石表面的硬度越大,抗塑性变形能力强,反之岩石抗压程度越小。

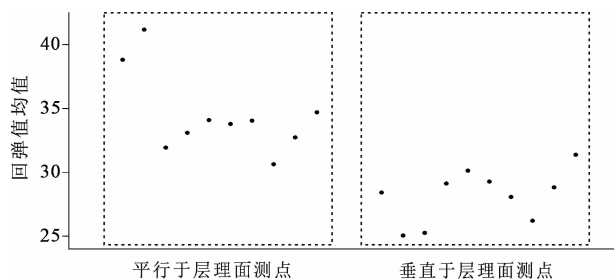


图 6 桦树沟砂岩回弹值统计图

Fig. 6 Rebound values of sandstones in Huashugou Canyon

2.4 地貌演化阶段

Strahler 在 1952 年基于数字高程模型获取流域的演化特征和活动构造特征提出了面积高程积分(Hypsometric Integral, HI)法^[28-30]。结合 Davis 地貌侵蚀循环理论,通过面积高程积分值(HI 值)及面积高程积分曲线将地貌发育模式划分为幼年期、壮年期、老年期三个阶段(表 1),各阶段面积高程积分曲线分别呈现出凸形、S 形、凹形^[31]。HI 值作为划分演化阶段的标准,其计算公式如下^[32]:

$$HI = \frac{H_{\text{mean}} - H_{\text{min}}}{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}} \quad (1)$$

式中, H_{mean} 、 H_{min} 、 H_{max} 分别为研究区内的平均高程、最小高程及最大高程。

表 1 地貌演化阶段及集水流域数统计表

Tab. 1 Geomorphological evolution stages and number of catchment basins

地貌发育阶段	HI 值	流域数/个
老年阶段	$HI < 0.40$	66
壮年阶段	$0.40 < HI < 0.60$	468
幼年阶段	$HI > 0.60$	8

使用 ArcGIS 软件平台对 ASTER GDEM 30 m 分辨率的数字高程数据进行处理,提取研究区及周边范围内的集水流域,并通过式(1)分别计算每个集水流域的 HI 值,经克里金插值获取面积高程积分

布图(图 7a)。面积高程积分分布图除东南角主河道为低值区域外以高值(>0.40)为主;基于上述三种流域演化阶段所对应的 HI 值特征^[31],统计发现研究区及周边范围内 85% 以上集水流域处于壮年阶段(表 1)。此外,以甘泉大峡谷和桦树沟流域为例,分别提取面积高程积分曲线和 HI 值(图 7b、图 7c),结果表明甘泉大峡谷和桦树沟流域 HI 值分别为 0.51 和 0.49,二者面积高程积分曲线均呈现 S 形,进一步指示研究区域地貌演化阶段处于壮年阶段,地貌发育趋于成熟。

3 讨论

3.1 造景岩石成分、结构和硬度

前人研究表明,研究区洛河组主要是在大陆性干旱、强氧化沙漠环境中形成的风成砂岩^[23-24,33],这对陕北丹霞地貌的发育具有重要影响作用。洛河组风成砂岩层系厚度大,富含化学稳定性较弱的长石、岩屑及钙质胶结物,具有易破碎性及抗侵蚀能力较差的特点。大型交错层理的层系厚度大多数在 2 m 以上,倾斜纹层的厚度在毫米至厘米级别,相邻纹层之间在结构和物质组成方面差异明显。洛河组砂岩几乎不含细小的碎屑物质,孔隙度高、渗透性好(图 4),为水和盐的输送提供了通道。研究区经常遭受来自西北方向的沙尘暴,其携带了丰富的盐^[20];上覆第四纪黄土在雨水淋溶作用下也补充了盐;该套砂岩形成于干燥氧化的古沙漠环境,蒸发作用强烈^[34],导致砂岩本身亦含有丰富的盐。因此,样品扫描电镜图像中常见较完整的岩盐颗粒。盐的结晶膨胀导致砂岩颗粒之间的结合力降低,破坏砂岩的完整性;同时也加速了硅酸盐矿物的化学溶解^[35],因此在石英、长石颗粒上常见密集发育的细小坑穴(图 5)。

研究区造景岩石回弹值测量结果表明,平行于层理面的回弹值普遍高于垂直于层理面,说明垂直于层理面方向抗压强度偏低,纹层之间的结合力较弱,更易导致纹层沿纹层面风化剥落,形成清晰的纹理构造(图 3)。上覆黄土层具有土质疏松、多孔隙、湿陷性强的特点,加上构造运动引发地壳隆升,河道坡降也随之进一步增大,流水下切作用不断增强。因此,早期流水对土质疏松、垂直节理发育的上覆黄土进行冲刷侵蚀,在切穿黄土盖层之后,继续沿着节

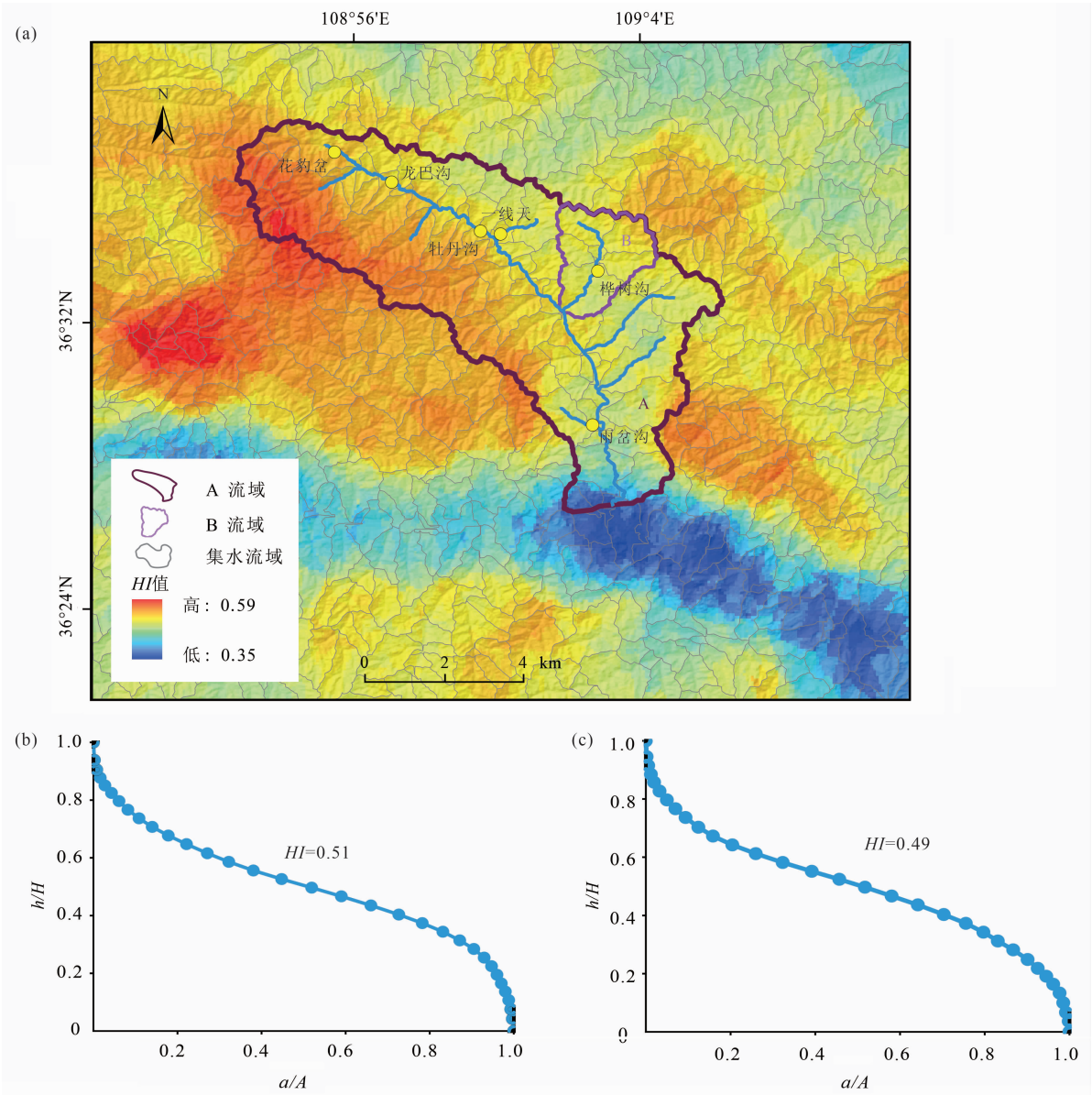


图 a 中的流域 A 为甘泉大峡谷,流域 B 为桦树沟;图 b 中 h/H 为高程比, a/A 为面积比。

图 7 研究区面积高程积分:(a)研究区面积高程积分分布图;

(b)甘泉大峡谷面积高程积分曲线及 HI 值;(c)桦树沟面积高程积分曲线及 HI 值

Fig.7 Hypsometric integral of study area; (a) distribution map of HI values in the study area;

(b) hypsometric curve and HI value of the Ganquan Grand Canyon; (c) hypsometric curve and HI value of Huashugou

(数字高程 DEM 数据来自地理空间数据云: <http://www.gscloud.cn/>)

理、裂隙发生下切侵蚀,使伏于黄土之下的“古丹霞地貌”重新暴露出来,逐步形成了今天深切的峡谷地貌景观。

3.2 黄土覆盖型丹霞地貌的演化过程

研究区地处鄂尔多斯盆地内部,区域上经历中侏罗世安定组一段沉积以后,发生了剧烈的燕山运动^[36]。白垩纪早期,信风带与西风带交替控制此

处,致使研究区在半干旱与半湿润环境间交替转换^[34],与此同时,强劲信风与西风带来了丰富沙源,沉积了一套沙漠相红色碎屑岩^[23],这为洛河组红层的发育打下了基础(图 8a)。

从白垩纪晚期到古新世阶段,孢粉化石指示中国存在一条自西向东延伸的宽阔干旱带^[34];新生代以来,受喜马拉雅运动和新构造运动及其他多期次

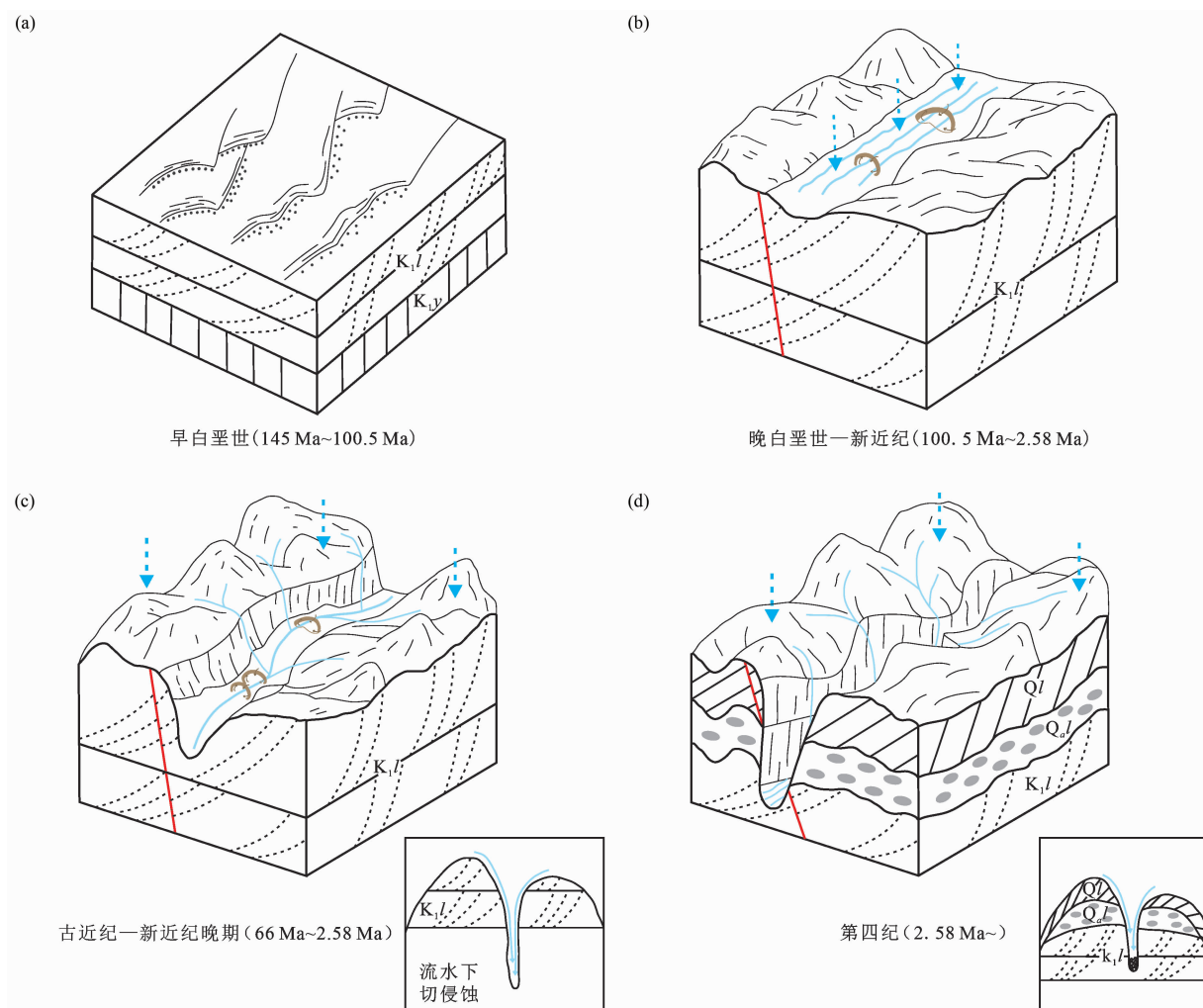


图8 陕北丹霞地貌演化示意图: (a)洛河组(K_1l)风成砂岩沉积时期; (b)构造抬升及流水侵蚀产生壶穴; (c)风化、流水侵蚀形成古丹霞地貌; (d)少量新近纪红色黏土堆积($Q_a l$)及第四纪黄土(Ql)覆盖

Fig. 8 Schematic diagrams of Danxia landscape evolution in northern Shaanxi, China: (a) deposition of red beds; (b) tectonic uplift; (c) formation paleo-danxia landscape; (d) covering of Quaternary loess

构造应力的叠加改造,鄂尔多斯盆地经历了强烈的隆起抬升过程,由于板块间的碰撞挤压及区域性的隆升期次,致使盆地东、西部存在明显差异,内部主体缺失部分古近纪和新近纪地层,西部遭受强烈剥蚀,仅在中东部地区存在少量新近纪红色黏土堆积^[22,37]。与此同时,亚洲季风系统随之发育,受此影响,在渐新世—中新世时期,中国东部气候逐渐由干旱转为湿润,而西北内陆地区受地形的阻挡,湿润气流无法进入,同时,副热带高压的干燥下沉气流影响显著,致使干旱不断加剧,季风携带的大量风成黄土使得黄土高原海拔高度显著增加^[38]。在这一构造抬升过程中,形成了许多节理和裂隙,为后续赤壁陡崖的形成奠定了基础。值得注意的是,鄂尔多斯

地块在晚中新世—上新世阶段,完成了从盆地到高原的过渡,此时,副热带高压带北移,气候相对于第四纪时期较为湿润,风力携带及流水冲刷并短途搬运而来的红黏土覆盖在高低起伏的古地貌之上^[37]。也就是说,在新近纪晚期之前研究区已经形成了峡谷发育的“古丹霞地貌”(图8b)。

第四纪以来,青藏高原抬升速度加快,在冰期—间冰期气候旋回作用下,该地区的干旱化程度越来越高,风成黄土大量堆积于“古丹霞地貌”之上,与下伏洛河组红层形成不整合接触,最终形成如今特殊的黄土覆盖型丹霞地貌。

研究区域范围较小,构造运动影响及地貌演化时间大体相似,主要造景岩石均为洛河组砂岩,岩性

相同。因此,影响研究区地貌演化的主控因素主要考虑外力侵蚀作用。延安市近二十年气候要素数据统计(图2)显示,该区域温度和相对湿度变化不大,但降水量具有逐年增加的趋势且夏季多暴雨,研究区附近河流广布,以降水为主所引起的流水侵蚀速率加快,侵蚀作用十分明显,渗透性好的砂岩易受到强烈的雨水冲刷和流水侵蚀,在红层区进一步向下切穿形成陡窄亘长的深沟,以集水流域为基础的面积高程积分计算也证实了这一点。冬春季易受寒潮霜冻的影响,温差风化和冻融风化使得谷坡产生不同程度的卸荷节理,进而诱发崩塌,形成近乎垂直的峡谷崖壁,在强劲且持续时间长的信风与流水的交互作用下,高处的疏松基岩极易被剥蚀,致使“古丹霞地貌”逐渐出露(图8c、图8d)。因此,流水侵蚀对研究区丹霞地貌具有主要的塑造作用,峡谷底部在流水侵蚀下形成一系列壶穴,随时间流逝,壶穴加深变大,相邻壶穴逐渐贯通、崩塌。构造抬升,流水再次下切,形成新的壶穴群,如此往复最终形成曲线优美的波状谷壁。

3.3 国内外丹霞地貌对比

陕北峡谷型丹霞地貌和美国西部羚羊峡谷风景区的地貌景观非常相似^[11],都是高原-峡谷景观,以波状起伏的谷壁为特征,崖壁顶部被盖层覆盖,地貌类型简单。其原因是两地的造景岩石都是主要形成于内陆沙漠环境的规模较大的风成砂岩,抗侵蚀能力较差且易破碎。此外,两地均以干旱-半干旱气候为主,受夏季暴雨影响,流水下切侵蚀作用强烈,致使风成砂岩被切穿,相邻壶穴发生贯通,从而形成峡谷景观。因此,沉积环境、岩性、构造运动、气候、外力作用等对陕北与美国西部的覆盖型丹霞地貌的形成具有重要作用。

以广东丹霞山、湖南崀山、江西龙虎山等为代表的中国南方湿润气候区丹霞地貌,造景岩石多为砾岩及含砾粗砂岩,岩石相对坚硬,仅在局部含有风成砂岩,沉积环境以冲-洪积扇和河流为主,新近纪时期,气候亦由于干旱-半干旱气候转变为季风性湿润气候^[39-40]。另外,东南地区的降水量较高,水系更为发达,流水侵蚀也更为强烈。故中国东南部的丹霞地貌总体表现为峰丛-峰林景观,由于光照、温度和湿度的差异,导致山顶和沟谷植物群落差异分布,形成特殊的生境^[41]。而陕北地区丹霞地貌的基岩为

风成砂岩,岩石硬度较低,主要为沙漠沉积环境,降水量较低,植被较为稀疏,生物风化和化学风化相对较弱,盐风化作用更加显著,但流水侵蚀在塑造地貌中仍然扮演着重要角色。

4 结 论

(1)陕北丹霞地貌的基岩洛河组砂岩层系厚度大,富含化学稳定性较弱的长石、岩屑及钙质胶结物,易受风化作用影响,其本身富含盐,上覆第四纪黄土受雨水淋溶及风沙天气也是重要盐源,致使盐风化显著。砂岩硬度测量表明垂直层理面方向抗压强度较低,导致纹层易沿纹层面风化剥落,形成清晰的纹理,具有独特且较高的观赏价值。

(2)在甘泉大峡谷和桦树沟的面积高程积分模型中, HI 值分别为0.51和0.49,指示该区域整体地貌演化处于壮年期,虽然降水量仅为广东丹霞山的三分之一,但流水侵蚀仍然为塑造该区地貌演化的主要控制因素。

(3)陕北在新生代喜马拉雅构造运动期间受到抬升剥蚀,至少在新近纪晚期之前已经形成古丹霞地貌。随后第四纪气候干旱加剧导致顶部风成黄土覆盖其上,形成第四纪黄土与下伏洛河组砂岩之间的角度不整合接触界面,以发育波状起伏的峡谷为典型特征,以崖壁-峡谷景观为主,形成独具特色的“黄土覆盖型丹霞地貌”。

参考文献(References)

- [1] 黄进,陈致均,齐德利. 中国丹霞地貌分布(上)[J]. 山地学报, 2015, 33(4): 385-396. [HUANG Jin, CHEN Zhijun, QI Deli. Study on distribution of Danxia landform in China (first)[J]. Mountain Research, 2015, 33(4): 385-396] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000049
- [2] YAN Luobin, PENG Hua, ZHANG Shaoyun, et al. The spatial patterns of red beds and Danxia landforms: Implication for the formation factors-China [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 1961. DOI: 10.1038/s41598-018-37238-7
- [3] 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] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2011.02.011

- [4] 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] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2014.04.454
- [5] 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. DOI: 10.1007/s11442-015-1212-9
- [6] 罗曦, 杨志军, 张珂, 等. 广东丹霞山红色成因的矿物学研究[J]. 矿物学报, 2021, **41**(6): 704–712. [LUO Xi, YANG Zhijun, ZHANG Ke, et al. A mineralogical study on the genesis of red color of the Danxia Mountain in Guangdong province [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2021, **41**(6): 704–712] DOI: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2021.41.086
- [7] 杨志军, 都衡恒, 罗曦, 等. 广东丹霞山红色岩层中白斑成因的矿物学研究[J]. 矿产与地质, 2022, **36**(1): 129–137. [YANG Zhijun, DU Hengheng, LUO Xi, et al. Mineralogy study on the origin of white spots in the red strata of Danxia Mountain, Guangdong [J]. Mineral Resources and Geology, 2022, **36**(1): 129–137] DOI: 10.19856/j.cnki.issn.1001-5663.2022.01.016
- [8] CHEN Liuqin, GUO Fusheng, LIU Fujun, et al. Origin of tafoni in the Late Cretaceous aeolian sandstones, Danxiashan UNESCO Global Geopark, South China [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2019, **93**(2): 451–463. DOI: 10.1111/1755-6724.13810
- [9] CHEN Xin, CHEN Liuqin, ZHANG Yanhong, et al. Lithological and environmental controls on large tafoni along conglomerate cliffs in subtropic humid Danxiashan UNESCO Global Geopark [J]. Journal of Mountain Science, 2021, **18**(5): 1131–1143. DOI: 10.1007/s11629-020-6649-3
- [10] 史月欣, 陈留勤, 杜丁丁, 等. 丹霞山陡坡上风化洞穴的基本特征及成因探讨[J]. 热带地理, 2023, **43**(1): 103–114. [SHI Yuexin, CHEN Liuqin, DU Dingding, et al. Basic characteristics and genesis of cavernous weathering features on the steep slopes of Danxia landscape in Danxiashan UNESCO Global Geopark [J]. Tropical Geography, 2023, **43**(1): 103–114] DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003614
- [11] 潘志新, 任舫, 陈留勤, 等. 陕北丹霞地貌特征及国内外对比研究[J]. 地理科学, 2021, **41**(6): 1069–1078. [PAN Zhixin, REN Fang, CHEN Liuqin, et al. Characteristics of Danxia landform in the northern Shaanxi and a comparison with other Danxia areas in and outside China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, **41**(6): 1069–1078] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2021.06.016
- [12] 丁华, 廖文强, 段丰浩, 等. 陕西省丹霞地貌景观特征、空间分布与形成机理初探[J]. 干旱区地理, 2023, **46**(4): 527–538. [DING Hua, LIAO Wenqiang, DUAN Fenghao, et al. Characteristics, spatial distribution and formation mechanism of Danxia landform in Shaanxi province [J]. Arid Land Geography, 2023, **46**(4): 527–538] DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2022.372
- [13] 丁华, 段丰浩, 陈姗姗, 等. 陕北甘泉丹霞峡谷群地质遗迹景观特征与保护利用[J]. 地球科学与环境学报, 2023, **45**(2): 362–372. [DING Hua, DUAN Fenghao, CHEN Shanshan, et al. Characteristics, protection and utilization of the canyons of Danxia landscape geoheritages in Ganquan area of the Northern Shaanxi, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, **45**(2): 362–372] DOI: 10.19814/j.jese.2022.05003
- [14] 吴成基, 陶盈科, 林明太, 等. 陕北黄土高原地貌景观资源化探讨[J]. 山地学报, 2005, **23**(5): 513–519. [WU Chengji, TAO Yingke, LIN Mingtai, et al. Discussion on the utilization of landform scenery resources of Loess Plateau in northern of Shaanxi [J]. Mountain Research, 2005, **23**(5): 513–519] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2005.05.001
- [15] 赵文武, 傅伯杰, 陈利顶. 陕北黄土丘陵沟壑区地形因子与水土流失的相关性分析[J]. 水土保持学报, 2003, **17**(3): 66–69. [ZHAO Wenwu, FU Bojie, CHEN Liding. Correlations between topographical factors and soil and water loss in hilly and gully area of Loess Plateau in northern Shaanxi [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, **17**(3): 66–69] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2003.03.019
- [16] 李明, 杜继稳, 高维英. 陕北黄土高原区地质灾害与降水关系[J]. 干旱区研究, 2009, **26**(4): 599–606. [LI Ming, DU Jiwen, GAO Weiyang. Study on the relationship between geological disasters and precipitation in the Loess Plateau in north Shaanxi province [J]. Arid Zone Research, 2009, **26**(4): 599–606] DOI: 10.13866/j.azr.2009.04.011
- [17] 彭小华, 吴昊, 李益朝, 等. 陕西靖边龙洲波浪式丹霞地貌成因机理初探[J]. 地球学报, 2020, **41**(3): 443–451. [PENG Xiaohua, WU Hao, LI Yizhao, et al. A preliminary study on the genetic mechanism of wavy Danxia landform in Longzhou, Jingbian, Shaanxi province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, **41**(3): 443–451] DOI: 10.3975/cagsb.2020.032302
- [18] 吴昊, 彭小华, 祝捷, 等. 陕西靖边龙洲波浪式丹霞地貌景观特征及其成景环境分析[J]. 矿产勘查, 2021, **12**(2): 497–502. [WU Hao, PENG Xiaohua, ZHU Jie, et al. Characteristics and forming environment of wave-type Danxia landform landscape in Longzhou, Jingbian county, Shaanxi province [J]. Mineral Exploration, 2021, **12**(2): 497–502] DOI: 10.3969/j.issn.1674-7801.2021.02.040
- [19] 郭福生, 陈留勤, 严兆彬, 等. 丹霞地貌定义、分类及丹霞作用研究[J]. 地质学报, 2020, **94**(2): 361–374. [GUO Fusheng, CHEN Liuqin, YAN Zhaobin, et al. Definition,

- classification, and danxianization of Danxia landscapes [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, **94**(2): 361–374 DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020110
- [20] CHEN Liuqin, MIGNON P, GUO Fusheng, et al. Cavernous weathering in aeolian sandstones: An example from the Yongningshan Hill of the Loess Plateau, northwest China [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2022, **96**(5): 1764–1777. DOI: 10.1111/1755–6724.14908
- [21] 赵振宇, 郭彦如, 王艳, 等. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展[J]. 特种油气藏, 2012, **19**(5): 15–20+151. [ZHAO Zhenyu, GUO Yanru, WANG Yan, et al. Study progress in tectonic evolution and paleogeography of Ordos Basin [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2012, **19**(5): 15–20+151] DOI: 10.3969/j.issn.1006–6535.2012.05.004
- [22] 赵红格. 鄂尔多斯盆地西部构造特征及演化[D]. 西安: 西北大学, 2003: 33–119. [ZHAO Hongge. Structural characteristics and the evolution in western Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2003: 33–119]
- [23] 江新胜, 潘忠习, 谢渊, 等. 鄂尔多斯盆地白垩纪沙漠旋回、风向和水循环变化——白垩纪气候非均一性的证据[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2004, **34**(7): 649–657. [JIANG Xinsheng, PAN Zhongxi, XIE Yuan, et al. Cretaceous desert cycles, wind direction and water cycle changes in the Ordos Basin: Evidence for climatic heterogeneity in the Cretaceous [J]. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 2004, **34**(7): 649–657] DOI: 10.1360/zd2004–34–7–649
- [24] 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] DOI: 10.3969/j.issn.1000–0550.2005.01.010
- [25] 彭华, 潘志新, 闫彬, 等. 国内外红层与丹霞地貌研究述评[J]. 地理学报, 2013, **68**(9): 1170–1181. [PENG Hua, PAN Zhixin, YAN Luobin, et al. A review of the research on red beds and Danxia landform [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, **68**(9): 1170–1181] DOI: 10.11821/dlxb201309002
- [26] 吴昊, 李益朝, 王秦伟, 等. 陕北延安丹霞地貌类型特征及演化模式分析[J]. 矿产勘查, 2018, **9**(9): 1812–1819. [WU Hao, LI Yizhao, WANG Qinwei, et al. Characteristics of Danxia landform types and their evolution model in Yan'an, northern Shaanxi [J]. *Mineral Exploration*, 2018, **9**(9): 1812–1819] DOI: 10.3969/j.issn.1674–7801.2018.09.021
- [27] 彭小华, 吴昊, 李兴文, 等. 延安地区丹霞地貌类型及发育机制研究[J]. 干旱区地理, 2021, **44**(2): 418–426. [PENG Xiaohua, WU Hao, LI Xingwen, et al. Danxia landform types and development mechanism in Yan'an city [J]. *Arid Land Geography*, 2021, **44**(2): 418–426] DOI: 10.12118/j.issn.1000–6060.2021.02.13
- [28] 邵崇建, 李勇, 赵国华, 等. 基于面积-高程积分对龙门山南段山前河流的构造地貌研究[J]. 现代地质, 2015, **29**(4): 727–737. [SHAO Chongjian, LI Yong, ZHAO Guohua, et al. Tectonic geomorphology analysis of piedmont rivers in the southern section of Longmenshan based on hypsometric integral [J]. *Geoscience*, 2015, **29**(4): 727–737] DOI: 10.3969/j.issn.1000–8527.2015.04.002
- [29] 章桂芳, 陈凯伦, 张浩然, 等. 基于DEM的丹霞地貌演化阶段划分[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2018, **57**(2): 12–21. [ZHANG Guifang, CHEN Kailun, ZHANG Haoran, et al. The evolution stage decision of Danxia landform based on digital elevation model (DEM) [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2018, **57**(2): 12–21] DOI: 10.13471/j.cnki.acta.snus.2018.02.002
- [30] 洪艳, 赵银兵, 王运生, 等. 利用面积高程积分方法研究龙门山断裂带地貌隆升特征[J]. 科学技术与工程, 2019, **19**(30): 43–51. [HONG Yan, ZHAO Yinbing, WANG Yunsheng, et al. Study on the geomorphic uplift characteristics of the Longmenshan fault zone using hypsometric integral method [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, **19**(30): 43–51] DOI: 10.3969/j.issn.1671–1815.2019.30.007
- [31] STRAHLER A N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1952, **63**(11): 1117–1142. DOI: 10.1130/0016–7606(1952)63[1117: HAAOET]2.0.CO;2
- [32] PIKE R J, WILSON S E. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1971, **82**(4): 1079–1084. DOI: 10.1130/0016–7606(1971)82[1079: ERHIAG]2.0.CO;2
- [33] WU Liquan, JIAO Yangquan, ZHU Peimin, et al. Architectural units and groundwater resource quantity evaluation of Cretaceous sandstones in the Ordos Basin, China [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2017, **91**(1): 249–262. DOI: 10.1111/1755–6724.13075
- [34] 谢渊, 王剑, 李明辉, 等. 鄂尔多斯盆地早白垩世岩相古地理与地下水水质和分布的关系[J]. 地质通报, 2004, **23**(11): 1094–1102. [XIE Yuan, WANG Jian, LI Minghui, et al. Relations of the Early Cretaceous lithofacies-paleogeography to groundwater quality and distribution in the Ordos basin [J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, **23**(11): 1094–1102] DOI: 10.3969/j.issn.1671–2552.2004.11.008
- [35] YOUNG R W, WRAY A L, YOUNG R M. Sandstone landforms [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009: 1–304.
- [36] 林玉祥, 孟彩, 韩继雷, 等. 华北地台区晚侏罗世-早白垩世岩相古地理特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2015, **45**(4): 611–617. [LIN Yuxiang, MENG Cai, HAN Jilei, et al.

- Characteristics of lithofacies paleogeographic during late Jurassic-early Cretaceous in the area of north China platform [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2015, **45**(4): 611–617] DOI: 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2015-04-020
- [37] 岳乐平, 李建星, 郑国璋, 等. 鄂尔多斯高原演化及环境效应[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2007(S1): 16–22. [YUE Leping, LI Jianxing, ZHENG Guozhang, et al. Evolution and environmental effects of Ordos Plateau [J]. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 2007(S1): 16–22] DOI: 10.3321/j.issn:1006-9267.2007.z1.002
- [38] SUN Xiangjun, WANG Pinxian. How old is the Asian monsoon system? —Palaeobotanical records from China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, **222**(3–4): 181–222. DOI: 10.1016/J.PALAEO.2005.03.005
- [39] 陈留勤, 李鹏程, 郭福生, 等. 粤北丹霞盆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] DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2018.118
- [40] 陈留勤, 郭福生, 邵崇建, 等. 江西省丹霞地貌特征及其控制因素探讨[J]. *地质学报*, 2022, **96**(11): 4023–4037. [CHEN Liuqin, GUO Fusheng, SHAO Chongjian, et al. Characteristics and controlling factors of danxia landscapes in Jiangxi province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, **96**(11): 4023–4037] DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022078
- [41] 彭华, 刘盼, 张桂花. 中国东南部丹霞地貌区小尺度植被分异结构研究[J]. *地理科学*, 2018, **38**(6): 944–953. [PENG Hua, LIU Pan, ZHANG Guihua. Small scale vegetation differentiation structure in Danxia landforms, southeast China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, **38**(6): 944–953] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.06.014

Characteristics and Genesis of Loess-Covered Danxia Landscape in Northern Shaanxi Province of China

YANG Liu¹, CHEN Liuqin^{1*}, PAN Zhixin², SHAO Chongjian¹, WU Hao³

(1. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. School of Tourism, Hainan University, Haikou 570228, China; 3. Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey, Xi'an 710068, China)

Abstract: Danxia landscape in southeastern China has been a scientific concern, but in northwestern China it received little attention from scientists. The northwestern Danxia landscapes are unique in both morphological appearances and geologic genesis as compared with those in the southeast; thus research on them in the northwest Danxia would lead to some important geomorphologic advances on the formation of Danxia landscape.

The Ganquan Grand Canyon, located in the middle of the Loess Plateau of China, exemplifies a representative of loess-covered Danxia landscape with undulated canyons in northwestern China. Research on this canyon is conducive to better understanding the evolution process of Danxia landscape in the Loess Plateau.

In this study, a variety of research approaches, such as field survey, in-situ rock hardness measurement by using a Schmidt hammer, sample observation under a polarizing microscope and scanning electron microscope, Hypsometric Integral (HI) (a tool developed in ArcGIS software to quantitatively describe the geomorphic evolution stage of drainage basin) were collectively used to explore the bedrock characteristics, evolution stages and controlling factors of Danxia landscape in northern Shaanxi.

It found some interesting results. (1) The bedrock of the Ganquan Grand Canyon is composed predominantly of eolian sandstones of the Luohe Formation, with large-scale cross-beddings, high porosity and permeability, high contents of feldspar particles, lithic fragments and carbonate cements, and hence less resistant to weathering.

Influenced dominantly by water erosion and salt weathering, the Danxia landscapes walled by dense valleys were formed. (2) The HI values of the Ganquan Grand Canyon and the Huashugou gully are 0.51 and 0.49, respectively, suggesting that they are in the mature stage and the river erosion acted as the primary controlling factor of landscape evolution. (3) The Danxia landscape in the study area had been possibly formed by the late Neogene period, followed by a drying Quaternary climate, when the loess covered on the top of peaks of Danxia mountains and valleys; and then headward erosion by flowing water resulted in the deepening and lengthening of valleys, and the formation of the distinct loess-covered Danxia landscape.

The research can provide new materials for deepening the understanding of the formation process of Danxia landscape in northwestern China.

Key words: Danxia landscape; paleo-danxia landscape; water erosion; northern Shaanxi; the Loess Plateau

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)