第 58 卷 第 1 期 2025 年 (总 239 期)

NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 58 No. 1 2025(Sum239)



**引文格式:**陈光庭,张金明,郝呈禄,等.青海同德石藏丹霞地貌类型特征及成因演化分析[J].西北地质,2025,58(1): 291-299. DOI: 10.12401/j.nwg.2023165

**Citation:** CHEN Guangting, ZHANG Jinming, HAO Chenglu, et al. Analysis on the Geomorphic Type Characteristics and Genetic Evolution of Danxia in Tongde Shizang, Qinghai[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 291–299. DOI: 10.12401/j. nwg.2023165

# 青海同德石藏丹霞地貌类型特征及成因演化分析

陈光庭,张金明\*,郝呈禄,张启龙,张海龙

(青海省地质调查院,青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室,青海西宁 810012)

摘 要:青海同德石藏地区发育黄河流域最上游连片分布面积最大、形态特征典型的丹霞地貌景观。基于实地调查和综合分析,按单体地貌形态对石藏丹霞地貌进行分类,包括7种丹霞正地貌和5种丹霞负地貌,类型多样、景观独特。石藏丹霞地貌的成景地层为古近纪西宁组紫红色巨厚层状砂砾岩,受地质构造、物理化学风化、机械侵蚀和重力等内外营力作用塑造形成,并经历了 红层堆积、红层盆地构造抬升、丹霞地貌发育幼年期和青年期4个形成演化阶段。从地质学角度 揭示出丹霞地貌的成因演化过程,对进一步认识中国西部地区丹霞地貌发育以及普及地球科学 知识,保护和利用地学旅游资源具有理论和实际意义。

关键词:丹霞地貌;类型特征;成因演化;青海同德

中图分类号: P931 文献标志码: A 文章编号: 1009-6248(2025)01-0291-09

# Analysis on the Geomorphic Type Characteristics and Genetic Evolution of Danxia in Tongde Shizang, Qinghai

CHEN Guangting, ZHANG Jinming\*, HAO Chenglu, ZHANG Qilong, ZHANG Hailong

(Qinghai Institute of Geological Survey, Qinghai Province Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources of Northern Qinghai-Tibet Plateau, Xining 810012, Qinghai, China)

**Abstract:** The Danxia landform landscape with the largest contiguous area and typical morphological characteristics in the upper reaches of the Yellow River Basin is developed in Shizang area of Tongde, Qinghai Province. Based on the field investigation and comprehensive analysis, the Shizang Danxia landform was classified according to the individual landform form, including 7 Danxia positive landform and 5 Danxia negative landform, with diverse types and unique landscape. The Shizang Danxia landform in the formation of paleogene Xining group purple thick layer glutenite, affected by geological structure, physical and chemical weathering, erosion, and gravity machinery, such as the inside and outside sales force shape formation, and go through the red layer accumulation, red basin tectonic uplift, danxia landforms of infancy and adolescence formed four evo-

收稿日期: 2021-12-13; 修回日期: 2022-10-15; 责任编辑: 昌鹏瑞

基金项目:青海省原国土资源厅项目"青海省重要地质遗迹调查"(2016113003jc003),青海省科技厅项目"青海省核心地质 遗迹成因及综合价值研究"(2019-KY-05)联合资助。

作者简介:陈光庭(1988-),男,工程师,主要从事区域地质调查和地质遗迹调查工作。E-mail: 780716839@qq.com。

<sup>\*</sup>通讯作者:张金明(1982-),男,正高级工程师,主要从事区域地质矿产调查工作。E-mail: qinfeno@126.com。

lutionary stages. It is of theoretical and practical significance to further understand the development of Danxia landform in western China, popularize the knowledge of earth science, and protect and utilize the geoscience

tourism resources.

Keywords: Danxia landform; type characteristics; genetic evolution; Qinghai Tongde

1928年,冯景兰把"丹霞"二字引入地球科学, 在丹霞山命名"丹霞层";1939年,陈国达使用"丹 霞地形"描述丹霞层发育的地形。这个在中国诞生 的地质、地貌学术语已经使用了90多年,学术界对其 科学问题形成了较清晰的认识(彭华, 2020)。目前, 已知青藏高原丹霞地貌的分布涉及高原半干旱区和 半湿润区,且均以丹崖赤壁为其基本特征(黄进等, 2015)。近年来,青藏高原丹霞地貌的研究多限于东 北部半干旱-干旱地区(保广普等, 2019; 郭福生等, 2020),主要围绕地质公园内的丹霞地貌开展相关工 作(肖景义等,2007),对半湿润-湿润区发育的丹霞地 貌却鲜为人知。青海同德石藏地区发育大面积丹霞 地貌,以其红艳的赤壁丹崖、挺立的孤峰窄脊、深幽 的沟谷、奇特的造型山石、密布的洞穴凹槽为特色, 是高原半湿润气候环境中,在古近纪红层中发育的典 型丹霞地貌景观,也是青藏高原隆升演化的有力证据。 巨厚的紫红色砂砾岩,在一定的地质构造和外动力作 用下,形成了黄河流域最上游连片分布面积最大、形 态特征叹为观止的丹霞地貌。2020年3月18日,以 高原丹霞地貌为主体景观的"青海同德石藏丹霞国 家地质公园"被授予国家地质公园资格。笔者在野 外实地调查的基础上,对石藏丹霞地貌类型及具体特 征进行了系统阐述和总结,并结合区域地质、地理背 景进一步分析了丹霞地貌的成因及发育过程,这对进 一步认识中国西部地区丹霞地貌发育、保护与利用地 学旅游资源具有重要意义。

1 区域背景

# 1.1 地理概况

石藏丹霞地貌位于青海省海南藏族自治州同德 县河北乡,距西宁市约 340 km,距同德县城约 102 km, 距玛沁县城约 100 km。101 省道(西久公路)NE 向横 穿全区,交通较为便利。

石藏地区地处青藏高原东北部,以高原山地为主 体,三面环山,一面临水,西、北、东部高,南部低,海 拔为3324~3790 m。中部地区构成中起伏中山,树 枝状水系密集,为丹霞地貌主要分布区;北西部构成 大起伏高山,发育羽状水系,山脊线平直。地貌成因 形态和结构类型,可见构造作用的断层,流水作用的 大河峡谷、中小河峡谷、干沟谷、泉点,以及多成因作 用的高程点。全区具明显的河谷充裕,滩地奇峡等 特点。

石藏地区属高原大陆性气候,处于青藏高原高寒 区,属于半湿润气候区。具春季干旱多风,夏季短促 凉爽,秋季阴湿多雨,冬季漫长干燥的特点。年平均 气温为 0.4 ℃,年降水量为 400~500 mm,主要集中在 5~9 月。蒸发量为 1 260.1~2 029.8 mm,年平均蒸发 量为 1 466 mm。

境内水系源自四周山地的18余条河流,形成以 黄河为中心呈树枝状分布的水系(图1)。受地形影响, 河网呈明显不对称分布,北部面积宽广,支流分布多, 流程较长,河水流量较大。南部地域狭窄、河道较短、 水资源贫乏。独特的自然地理环境为石藏丹霞地貌 的形成演化提供了不可缺少的外营力条件。

### 1.2 地质概况

石藏地区属秦祁昆地层大区西秦岭地层区泽库 地层分区。以大面积分布早—中三叠世隆务河组 (T<sub>1-2</sub>*l*)和中三叠世古浪堤组(T<sub>2</sub>*g*)复理石地层为特点, 并上叠有新生代陆相沉积盆地(图 1)。其中,古近纪 西宁组(Ex)为丹霞地貌载体,岩性主要为紫红色砾岩、 含砾粗砂岩、粉砂岩,偶夹石膏薄层,发育平行层理, 岩层倾角为 5°~10°,为干旱气候环境下的河湖相含 石膏红色碎屑岩沉积。

构造单元划属秦祁昆造山系西秦岭造山带泽库 复合型前陆盆地,除主造山期划分的构造单元外,还 发育共和断陷盆地,研究区位于该断陷盆地南缘。盆 地边缘受逆冲断层控制,形成于陆内发展(盆山转换) 阶段。区内构造活动较为强烈,断层发育,多为北倾 逆断层,主要有拉加断裂和冬乌日岗南断裂。后期叠 加 NE 向、NNE 向或 SN 向小断层及褶皱,断层对早期 形成的断裂都有不同程度的破坏,但规模较小,褶皱

292



Ⅰ.中-南祁连造山带;Ⅱ.东昆仑造山带;Ⅲ1.泽库复合型前陆盆地;Ⅲ2.西倾山-南秦岭被动陆缘;Ⅳ.阿尼玛卿-布青山俯冲增生杂岩带;Ⅴ.巴颜喀拉地块;Ⅵ.三江造山带;1.古近纪西宁组;2.中三叠世古浪堤组;3.早—中三叠世隆 务河组;4.地质界线;5.角度不整合接触界线;6.逆断层;7.河流;8.剖面位置;9.研究区位置

#### 图1 研究区区域地质简图

Fig. 1 Regional geological map of the study area

使早期形成的褶皱枢纽起伏倾斜(祁生胜等,2018)。 总体上构造运动以大规模隆升为主,是控制石藏地区 丹霞地貌发育的最重要因素。

2 丹霞地貌类型及特征

石藏丹霞地貌主要分布于拉加-河北-石藏一带, 主要沿黄河及其北部支流展布,分布面积为150 km<sup>2</sup>。 笔者在对石藏丹霞地貌野外实地调查与综合分析的 基础上,按单体地貌形态对丹霞地貌进行分类(彭华, 2002),将石藏丹霞地貌划分为正地貌和负地貌两类, 包括 12 种类型(表 1)。

### 2.1 丹霞正地貌

# 2.1.1 丹霞崖壁

由崩塌作用形成的赤壁丹崖是丹霞地貌的主要 特征和独具特色的景观,一般沿垂直大型节理、陡倾 裂隙面发育而成,坡度一般大于60°,高度为10~100 m, 延伸几十至上百米不等。一般分布于山缘和峡谷两 侧,崖壁多为直立或呈反坡,可因岩性差异呈多层状 组合。壁上多顺层凹槽、岩洞和竖向流水蚀槽。崖壁 是构成丹霞山石的基础坡面,由不同尺度崖壁围限的 红色碎屑岩山体构成石峰、低山、石柱、石墙等各种 地貌景观。此外,丹霞崖壁也是观察古环境沉积的天 然剖面,在区内以古加、石藏、拉家、隆列卜等一带分 布集中。

2.1.2 丹霞石墙

山块顺断裂构造线延伸形成的线状地貌形态,墙体顶部窄小,呈平环状,四周为陡壁。石墙一般和石峰相伴产出,其延伸方向为 NE 向和近 EW 向,宽度为 5~20 m,高度为 10~80 m 不等,长度可达几十至上百米。石墙常沿构造线方向延伸,大部分沿丹霞山体的节理和裂隙逐渐风化剥蚀而成,现多已形成完全孤立的墙体。最典型的当属位于河北乡北侧的"火车岩"(图 2a),石墙长度约为 270 m,由西向东呈弯曲尖灭,顶部呈平滑倾斜状。

2.1.3 丹霞石柱

一般产出于丹霞崖壁边缘,四周由直立崖壁围限 构成孤立石柱,多呈方形或圆形,局部呈孤立饼状,其 净高一般为6~20 m,直径在10 m以内,多具圆顶,上 下基本等粗。石柱整体形态苍劲雄浑,似有擎天之力, 形态如"丹凤朝阳""阳元石""倚崖柱"(图 2b) 等,均具极高观赏性和科普价值。位于河北乡西北的 "倚崖柱"由丹霞山体沿 NE 向垂直节理长期侵蚀风 化、崩塌而分离后形成,石柱净高约为 20 m,整体呈 规则的方形柱状,柱身发育少量的丹霞洞穴,顶底同 粗,是典型的丹霞石柱代表。

# 2.1.4 丹霞石峰

主要分布在区内北部的拉家、隆列卜及石藏以西

表 1	石藏丹霞地貌类型及特征

Tab. 1 The types and characteristics of Danxia landform in Shizang

类型		指标依据	特征	分布
正地貌	丹霞崖壁	坡度 > 60°, 高度 > 10 m的 崖坡	多直立坡和陡崖坡,流水侵蚀崖壁凹凸 不平,崩塌崖壁直立光平;壁上多顺层 凹槽和洞穴	坚硬岩石地段的大部分边坡, 山缘或沟谷两侧
	丹霞石墙	长度大于2倍宽度,高度大 于宽度	顺构造线方向延伸,呈墙状山块,低矮 者可称石梁	一般和石峰相伴产出,发育受断裂、裂隙控制,常沿构造线 延伸
	丹霞石柱	孤立石柱,一般高度大于 直径	多呈方形或圆形,低矮者(高度小于直径) 可称石墩	垂直断裂切割的地段,一般产 出于丹霞崖壁边缘
	丹霞石峰	陡崖坡构成的锥状山峰	由陡坡围限的锥状山块,有尖顶、平顶 和圆顶等差别	坚硬岩石地段或流水侵蚀作用 强烈区
	丹霞低山	局部陡崖,多为30°~60°的 陡坡山峰	多以陡坡或陡缓坡相间构成石峰或山梁, 局部存在陡坡崖	岩性稍软地段
	丹霞丘陵	以基岩陡坡为主,大部分 坡度在55°以下	无连续陡崖坡,缓坡上基岩裸露	抬升后长期稳定的侵蚀区或软 岩地段
	崩塌堆和崩 塌巨石	陡崖下不规则锥状崩积体 和巨石块	块状崩塌堆积,叠置洞穴;石块大小不同,单块巨石大可至几百立方米	流水侵蚀作用强烈区, 陡崖坡 的下部
负地貌	顺层凹槽	顺软岩层形成的崖壁凹槽, 宽:高≥10:1,深度小于 槽口高度	岩壁上出露的软岩层风化或侵蚀形成凹 槽,连续或不连续	多见于丹霞崖壁,顺软岩层 发育
	丹霞洞穴	深度大于外口最小尺度的 凹穴	大小不等,形态各异,如顺层洞穴、水 平洞穴、蜂窝状洞穴等;纵深方向多顺 层延伸	崖壁软岩出露地带或流水侧蚀 部位
	丹霞穿洞	蚀穿山块的通透洞穴	洞高小于洞顶岩层厚度的称为穿洞(石窗);洞高大于洞顶岩层厚度的跨谷穿洞为天生桥,否则为石拱	一般产出于石墙中软岩地段, 山块顶部蚀穿形成石窗,底部 形成穿洞
	竖向洞穴	竖向发展的洞穴,高度大 于宽度	由垂直水流侵蚀形成,不一定有平展的 洞顶	垂直节理发育区和流水侵蚀作 用强烈区
	线谷	谷深>3 m并大于5倍谷宽, 谷宽<1 m	仅容1人通过或人不能通过,谷壁直立或 平行,俗称"一线天"	
	沟谷 巷谷	谷深>3 m并大于5倍谷宽, 谷宽1~10 m	两壁呈"V"型或"U型",垂直或同斜, 谷底较平坦	主要顺构造线发育,为流水侵 蚀作用强烈区
	峡谷	谷深大于谷宽,谷底宽度 >10 m的山谷	两侧谷壁以陡坡为主,谷地可见小型边 滩,谷底平坦	



图2 石藏丹霞正地貌 Fig. 2 Positive Danxia landform in Shizang 一带,为流水侵蚀作用强烈区。由峰林地貌演变而来, 为陡坡围限的锥状山块,局部有陡崖,多为尖顶和圆顶。区内最典型的当属位于河北乡北东的"通天峰" (图 2c),高度约为 50 m,表面发育水平层理,垂直节理 极为发育,整体呈阶梯状成层展布,从峰底直达顶端。 2.1.5 升霞低山

指高度相对较低,局部有陡崖,大部分以陡坡或 陡缓坡相间构成的山峰或山梁。主要分布于区内中 北部岩性稍软地段,以拉家-隆列卜、河北乡北侧形成 的异石景观最具代表性和美学观赏价值。例如,位于 河北乡北侧的"海星峰"(图 2d),低山高度约为 30 m, 山顶部呈圆滑锥状,底部沿低山周围形成放射状的 5 处丹霞石梁,远望形态似海洋生物"海星"。

# 2.1.6 丹霞丘陵

指大部分山坡平缓的丹霞地貌区,为抬升后长期 稳定的侵蚀区。主要分布于拉家及河北乡东一带,由 易风化的砖红色泥岩及砂岩组成,分布面积较广,无 丹霞石峰,山顶浑圆,局部保持陡崖,远观山石似染红

# 2.1.7 崩塌堆和崩塌巨石

主要见于区内北部峡谷地貌发育地区,指由重力 崩塌作用堆积于崖脚缓坡处的崩积碎屑物,分为崩塌 堆和崩塌巨石。崩塌堆多见于崖脚,多形成崖脚崩塌 堆和崩塌堆积带。崩塌巨石多分布于崖脚缓坡或沟 谷底部,岩块大可至上百立方米,形状较为规则。区 内最具代表性的"刀劈石"(图 2f)由两块崩积巨石 构成,单块巨石达上百立方米,呈"V"字形排列。

# 2.2 丹霞负地貌

# 2.2.1 顺层凹槽

指崖壁上顺软岩层发育的长形崖槽,岩性(砂岩、 砾岩)垂向差异使丹霞崖壁上软岩层(砂岩层)快速风 化成凹槽,顺层可连续或不连续,凹槽高度一般为 10~30 cm,局部达 2 m 以上,深度为十几厘米至 1 m, 在区内丹霞崖壁上普遍发育,分布集中,数量众多。 凹槽沿层理产状水平延伸,山石高下参差,疏密相生, 近于水平的岩层组合有序(图 3a)。



a.顺层凹槽;b.丹霞洞穴;c.丹霞穿洞;
d.竖向洞穴;e.丹霞巷谷;f.丹霞峡谷
图3 丹霞负地貌

#### Fig. 3 Negative Danxia landform in Shizang

### 2.2.2 丹霞洞穴

发育于崖壁软岩带或流水侧蚀部位,由流水侵蚀 和差异风化作用形成。洞穴形态各异,立面上呈圆形、 椭圆形、扁平形或不规则形,大小不等,尺度大者其洞 口达几十米,小者在几十厘米。在沟谷两侧崖壁底部 多见孤立的深大洞穴,沿壁面多为密集分布的微型洞 穴群(图 3b),一般沿崖壁层理面展布,具有分层性。

## 2.2.3 丹霞穿洞

指穿透山体的洞穴,有石窗和石拱(天生桥)之分, 一般产出于石墙顶部,在风化作用及流水冲蚀作用影 响下,山块顶部蚀穿形成石窗,底部形成穿洞,在石藏 丹霞地貌中较为罕见。在区内以石藏西北的丹霞石 窗最为典型(图 3c),窗口呈不规则透镜状,长度约为 5 m,最宽处约为 2.5 m,下部洞穴整体形态呈圆筒状, 最宽处达 15 m,山块外侧形成石拱。

# 2.2.4 竖向洞穴

丹霞崖壁表面沿垂直节理裂隙,在流水侵蚀和重 力崩塌等外动力作用下形成的竖向洞穴,其高度大于 厚度,规模有大有小。尺度较小者分布较广泛,与崖 壁共生,垂向上表现为下宽上细,厚度一般在几十厘 米,一般垂直连接洞穴发育;尺度较大者以河北乡东 发育最为典型(图 3d),顺垂直方向延伸高度达 30 m, 深度约为 8 m,下宽上细,宽度为 3~8 m。 2.2.5 丹霞沟谷

主要为流水侵蚀所形成的深切线状谷地,一般顺构造线方向发育,或继承原始洼地下切而成。早期宽度较小,呈线谷状,进一步侵蚀切割形成巷谷(图 3e)或峡谷(图 3f)。主要见于区内北部和南部,主体为峡谷地貌,谷底宽度为几米至几十米不等,长度一般为几百米至几千米,横剖面形态呈"U""V"型,沿谷底一般淌过由北向南的河流,河流随沟谷走向呈弯曲,谷中水流多平缓,水质清澈,沟谷切割深度一般为 20~100 m,沿沟谷两侧多形成平直或同斜陡峭的丹霞赤壁。

# 3 丹霞地貌成因演化分析

# 3.1 丹霞地貌发育的物质基础

石藏丹霞地貌载体为古近纪西宁组陆相碎屑岩, 主要岩石组合为灰紫—紫红色砾岩、含砾粗砂岩夹砂 岩、粉砂岩、泥岩,偶夹有石膏薄层。下部(1~3层) 为紫红色巨厚层中-细砾岩夹白云质、钙质胶结细粒 长石砂岩,地貌上以发育丹霞崖壁、顺层凹槽及竖向 洞穴为主。中部(4~9层)以紫灰色长石石英砂岩夹 紫色粉砂岩、泥质粉砂岩、泥岩为主,以发育低矮的 丹霞低山和丘陵地貌为主。上部(10~11层)以灰紫 色巨厚层不等砾砾岩,含砾砂岩,长石石英砂岩为主, 以发育赤壁丹崖、尖峰、石墙、石柱、沟谷等丹霞地貌 为主,沿崖壁多见洞穴、沟谷中多形成崩塌堆和崩塌 巨石,为区内丹霞地貌主要发育层位(图4)。





图4 研究区西宁组实测地层剖面图(据祁生胜等, 2008 修改)

Fig. 4 Measured stratum profile of Xining Formation in the study area

#### 3.2 地质构造的影响

3.2.1 断层节理决定山块格局

盆地内部的构造线是控制丹霞地貌山块格局乃至 山块形态的基本因素。大构造线控制了山块总体的排列 方向,小构造则控制山块的走向、密度和平面形态(彭华, 2020)。从石藏丹霞地貌的地质构造来看(图 5),主要构 造线方向为 NE 向和近 EW 向断裂格架,其控制区内丹 霞山块基本沿 NE 向和近 EW 向排列。而山块的分布、 石柱的排列和深切线状谷地的延伸主要受新生代盆地内 部 NE 向、近 SN 向和 NW 向小断裂和密集节理组控制。



## 图5 研究区断层节理对丹霞地貌山块的控制示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the control of fault joints on Danxia landform block in the study area

# 3.2.2 岩层产状控制坡面形态

岩层产状主要影响丹霞山块顶面和坡面形态,进 而控制丹霞地貌的坡面组合。区内古近纪西宁组碎 屑岩形成岩层倾角小于10°的近水平岩层,发育的丹 霞地貌具有"顶平、身陡、麓缓"的坡面特征。顶部 受岩层层面控制,呈微上凸形,四壁陡峭直立,多形成 水平墙状、方山状、柱状及锥状丹霞地貌。

# 3.2.3 地壳升降控制地貌发育进程

新构造运动对丹霞地貌发育进程影响巨大,研究 区处于青藏高原新构造运动隆起区,晚新生代高原隆 升以来经历了3次隆升和2次夷平(施雅风等,1998)。 区内古近纪红层盆地在后期经历强烈隆升,红层盆地 内部的差异性和间歇性抬升为后期侵蚀提供了必要 条件,有利于丹霞地貌的持续演化和形成,也奠定了 现代地貌格局的基本构架。

#### 3.3 外力作用的影响

### 3.3.1 流水作用

流水作用在丹霞地貌发育和演化中的主导性表 现为流水是下切和侧蚀的主动力。末次冰期间冰期 段(45~25 ka B.P.),青海兴海-多石峡段黄河连通(刘 志杰, 2007),以黄河为主的多条河流对本区发生溯源 侵蚀;青藏高原在 11.0 ka B.P.左右开始进入全新世, 由前期的冷干环境逐渐向暖湿转变(刘星星, 2013), 为丹霞地貌早期发育提供了很好的外力作用条件。 区内属典型的高原半湿润气候区,处于宽阔的河谷地 带,气候温湿,雨水充足,降水量年际变化大,降雨集 中,季节性洪流冲蚀作用强烈,对地表不断进行雕琢, 有助于形成多彩的丹霞地貌。同时流水又不断地蚀

296

去坡面上的风化物质,使风化得以继续进行。流水的 侧蚀是沟谷展宽的主要作用形式,流水在下切过程中 往往会在构造交汇的拐弯处和软弱岩层形成侧向侵 蚀,使沟谷崩塌展宽,形成丰富的丹霞沟谷和地貌。 此外,流水对红层中的钙质胶结物和可溶性砾石进行 溶蚀,可促进风化速度和流水侵蚀强度。

## 3.3.2 风化作用

风化是丹霞地貌发育过程中持续而又重要的作 用,虽然速度缓慢,但长期的作用能力仍然十分巨大。 由于红层在垂向上抗风化能力的差异性,在陡崖坡上 软岩的风化作用较为明显,泥质和粉砂质软岩层可风 化凹进形成顺层凹槽或岩洞,而岩洞风化可为上覆岩 层的崩塌提供条件,进而造成陡崖坡后退。此外,区 内冬季较为严寒,高寒区的冻融风化使本区的丹霞地 貌物理风化作用较为强烈,而使其形成了比较粗糙的 表面。

3.3.3 重力作用

崖壁是丹霞地貌中最具特色与表现力的形态要 素,其大部分为崩塌面或经风化及坡面流水改造过的 崩塌面,所以重力崩塌作用是丹霞地貌发育的基本方 式。区内重力崩塌作用常发生在沟谷两侧的临空谷 坡、临崖石柱和软岩层风化凹进形成的上覆岩体上, 悬空岩体一般沿构造节理或卸荷节理发生重力崩塌。 此外,也可见深大洞穴的顶部、穿洞的顶板发生局部 崩塌。崩塌岩体常沿崖壁底部堆积,经机械破碎形成 常见的崩塌堆和崩塌巨石。

#### 3.4 丹霞地貌发育的基本过程

丹霞地貌演化过程可描述为:其地貌发育开始于 红层盆地的抬升,经历幼年、青年、壮年和老年发育 阶段(彭华,2000,2020)。根据石藏丹霞地貌的特色, 以高原峡谷型地貌组合为主,峰丛、石柱和孤峰发育, 除主河谷外峡谷和巷谷仍为负地貌载体,表明石藏丹 霞地貌发育处于青年阶段。结合青藏高原新生代隆 升研究现状分析(张克信等,2013),石藏丹霞地貌在 发育过程中,经历了红层堆积、红层盆地构造抬升、 丹霞地貌发育幼年期、丹霞地貌发育青年期4个演化 阶段。

# 3.4.1 红层堆积阶段

青藏古新世—始新世总体构造地貌格局主要受 控于印度板块与欧亚板块沿雅江缝合带的碰撞及持 续挤压,影响当时的古地理和沉积分布(张克信等, 2010)。古近纪以来,青藏高原隆升运动开始,早期叠 覆造山阶段形成的古老山系再次活化,山系之间的差 异升降活动频发,盆地发展向面上展开,形成了区内 较为局限的古近纪断陷盆地。盆地长轴方向循 NE 向 断续延展,它明显受区域 NE 向逆断裂控制。断陷盆 地接受盆周缘所携带的碎屑物质沉积,充填古近纪西 宁组河湖相含石膏红色碎屑岩,在区内出露厚度为 707 m, 为石藏丹霞地貌的形成奠定了物质基础(图 6a)。 西宁组下部以紫红色砾岩、含砾砂岩为主,中部为砂 岩、泥岩夹石膏,上部砾岩、含砾砂岩、钙质砂岩进一 步增多,构成了向上从粗-细-粗的沉积序列。沉积中 心部位的西宁组泥岩比例较大,沉积中心向外砂岩和 砾岩增多,总体看盆地西北缘岩性较粗。厚层砾岩的 发育说明当时盆缘出现了陡坡带,是强隆升事件的直 接体现(张克信等, 2011)。

3.4.2 红层盆地构造抬升阶段



中新世---上新世期间,青藏高原经历了全区的不

图6 石藏丹霞地貌形成过程示意图(据彭华, 2000 修改) Fig. 6 Schematic diagram of Shizang Danxia lanform formation process

均衡隆升和拗陷,最终在上新世末铸就了西高东低的 地貌格局(张克信等,2007),包括研究区在内的高原 东北缘新近纪经历23~21 Ma、~8 Ma和~3.6 Ma以 来3个强隆升阶段(王国灿等,2011)。区内新近纪沉 积缺失,指示处于大面积隆升。该时期盆地内古近纪 地层抬升变形,断层发育、规模较小,多为北倾逆断层。 后期叠加NE向、近SN向和NNW向小断裂,山体生成 许多深大垂直节理,并且岩层内伴有多组节理产生 (图 6b),成为后期流水侵蚀的薄弱地带。

# 3.4.3 丹霞地貌发育幼年期

更新世高原出现 3~4次冰期与间冰期,在古气 候上有过 3~4次寒冷期与温暖期的交替变化(蔡厚 维,2009),在构造作用的基础上气候的波动对丹霞地 貌形成十分有利。晚更新世,区域上处于高原快速隆 升与河流阶地形成时期,全球性气温上升,水资源开 始丰富。红层盆地抬升的同时,以黄河为主的多条河 流对本区发生溯源侵蚀下切,其原始性洼地往往发育 主河谷,断层破碎带和大节理成为流水切割的薄弱地 带,也可发育主河谷。该时期,巷谷和峡谷发育,且上 部保持较大面积的沉积顶面或弱侵蚀平台。峡谷中 的红色碎屑岩开始被抬升出来并遭受侵蚀风化,这就 是区内丹霞地貌的雏形(图 6c)。

### 3.4.4 丹霞地貌发育青年期

全新世以后,黄河及其支流进一步下切,山顶呈 山原面,除主河谷外峡谷和巷谷仍为负地貌主体,少 见孤立山块,丹崖地貌发育,主要集中于峡谷两侧。 同期,升温迅速,降水丰沛,为丹霞地貌发育提供了很 好的外力作用条件。但是,强烈的流水侵蚀和风化作 用并不能持续太长时间。在之后的全新世晚期,区域 性气候由温湿变得干冷,流水侵蚀作用和风蚀作用得 到了很大程度的削减,从而延缓了石藏丹霞地貌的发 育,形成了如今典型的青年期丹霞地貌景观(图 6d)。

# 4 结论

(1)石藏丹霞地貌分布集中,类型多样,特征典型, 按单体地貌形态进行分类,包括丹霞崖壁、石墙、石 柱、石峰、低山、丘陵及崩塌堆和崩塌巨石等丹霞正 地貌,顺层凹槽、洞穴、穿洞和沟谷等丹霞负地貌,几 乎涵盖了丹霞地貌演化各阶段的地貌形态,系统而完 整,具有极高的观赏价值和科研科普价值。

(2)石藏丹霞地貌是高原半湿润气候环境下,在

古近纪红层中发育的典型丹霞地貌景观,是地球内外 地质营力共同作用的结果,其形成演化过程大致经历 了红层堆积、红层盆地构造抬升、发育幼年期和青年 期4个重要阶段。是认识中国西部地区丹霞地貌发 育的理想场所,具典型性和稀有性的特征。

(3)按地貌形态对石藏丹霞地貌类型进行划分具 有重要意义,不仅可以从地质学角度揭示出丹霞地貌 的成因演化机理和价值,而且对普及地球科学知识, 科学合理保护与利用该地区丹霞地貌具有理论和实 际意义。

# 参考文献(References):

- 保广普,刘春娥,黄广文.青海丹霞地貌的分布、特征及演化 [J].西北地质,2019,52(3):199-208.
- BAO Guangpu, LIU Chun'e, HUANG Guangwen. Distribution, Characteristics and Evolution of Danxia Landform in Qinghai[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(3): 199–208.
- 蔡厚维. 青藏高原的现今地壳活动性[J]. 西北地质, 2009, 42(1): 34-42.
- CAI Houwei. Present Crustal Activity Tibetan Plateau[J]. Northwestern Geology, 2009, 42(1): 34–42.
- 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.
- 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.
- 刘星星,宋磊,金彦香,等.青藏高原全新世风沙活动历史与环 境变化[J].干旱区资源与环境,2013,27(6):41-47.
- LIU Xingxing, SONG Lei, JIN Yanxiang, et al. History of aeolian deposits in Tibetan Plateau and climate change over Holocene [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(6): 41–47.
- 刘志杰,孙永军.青藏高原隆升与黄河形成演化[J].地理与地 理信息科学,2007,23(1):79-82+91.
- LIU Zhijie, SUN Yongjun. Uplift of the Qinghai-Tibet Plateau and Formation, Evolution of the Yellow River[J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23(1): 79–82+91.
- 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.

- 彭华.丹霞地貌分类系统研究[J].经济地理,2002,22(S1): 28-35.
- PENG Hua. The Research on Classification System of Danxia Landform[J]. Economic Geography, 2002, 22(S1): 28–35.
- 彭华.丹霞地貌学[M].北京:科学出版社,2020.
- PENG Hua. Danxia geomorphology[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- 祁生胜,马志康,安守文,等.1:25万河南蒙古族自治县幅 (I47C002004)区域地质调查报告[R].青海省地质调查院, 2008.
- 祁生胜,李五福,于文杰,等.青海新一轮地质志修编报告[R]. 青海省地质调查院,2018.
- 施雅风,李吉均,李炳元.青藏高原晚新生代隆升与环境变化 [M].广州:广东科技出版社,1998.
- SHI Yafeng, LI Jijun, LI Bingyuan. Uplift and environmental changes of Qinghai-Xizang(Tibetan) plateau in the Late Cenozoic[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1998.
- 王国灿, 曹凯, 张克信, 等. 青藏高原新生代构造隆升阶段的时 空格局[J]. 中国科学:地球科学, 2011, 41(3): 332-349.
- WANG Guocan, CAO Kai, ZHANG Kexin, et al. Spatio-temporal framework of tectonic uplift stages of the Tibetan Plateau in Cenozoic[J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 41(3): 332–349.
- 肖景义,陈建强,张璞.青海地质旅游发展探讨[J].西北地质, 2007,40(3):111-117.

- XIAO Jingyi, CHEN Jianqiang, ZHANG Pu. Discussion on Development of Geo-tourism in Qinghai Province[J]. Northwestern Geology, 2007, 40(3): 111–117.
- 张克信,王国灿,陈奋宁,等.青藏高原古近纪—新近纪隆升与 沉积盆地分布耦合[J].地球科学(中国地质大学学报), 2007,32(5):583-597.
- ZHANG Kexin, WANG Guocan, CHEN Fenning, et al. Coupling between the Uplift of Qinghai-Tibet Plateau and Distribution of Basins of Paleogene-Neogene[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2007, 32(5): 583–597.
- 张克信,王国灿,骆满生,等.青藏高原新生代构造岩相古地理 演化及其对构造隆升的响应[J].地球科学(中国地质大学 学报),2010,35(5):697-712.
- ZHANG Kexin, WANG Guocan, LUO Mansheng, et al. Evolution of Tectonic Lithofacies Paleogeography of Cenozoic of Qinghai Tibet Plateau and Its Response to Uplift of the Plateau [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(5): 697–712.
- 张克信,王国灿,洪汉烈,等.青藏高原新生代岩石剥露、沉积与 气候演化及其对构造隆升的响应[A].中国古生物学会学 术年会[C],2011:232-234.
- 张克信,王国灿,洪汉烈,等.青藏高原新生代隆升研究现状[J]. 地质通报,2013,32(1):1-18.
- ZHANG Kexin, WANG Guocan, HONG Hanlie, et al. The study of the Cenozoic uplift in the Tibetan Plateau[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(1): 1–18.