

中国丹霞景观空间分异及其影响因素

闫罗彬^{1,2}, 黄 诚^{1,2}, 李宏卫³, 张 珂⁴, 袁万明⁵, 田云涛⁴, 齐德利⁶

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 西部乡村可持续发展新文科实验室, 重庆 400715;

3. 广东省地质调查院, 广州 510080; 4. 中山大学地球科学与工程学院, 珠海 519080;

5. 中国地质大学, 北京 100083; 6. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 丹霞景观指以丹霞地貌为主体的景观风貌, 在中国分布广泛。丹霞地貌学科发展和保护利用离不开全国尺度上对其景观分异的深入认识。本文依据岩性、崖壁高度、岩层产状、岩石强度等数据, 定量分析丹霞景观特征的空间格局; 结合对中国超过200处丹霞地貌的实地调查所获认识, 半定量地确定了中国丹霞景观的空间分异; 综合地质、地貌等因素, 将中国丹霞景观划分为东南部、川渝黔边区、鄂尔多斯高原、鄂尔多斯盆地西南部、“天山—祁连”沿线和青藏高原地区6个各具特色的丹霞景观片区。通过全国尺度丹霞景观的对比发现: ①红层沉积范围和喜马拉雅运动的地壳升降格局共同控制了丹霞地貌的空间分布; ②喜马拉雅运动在中国不同区域构造变形特征控制了丹霞成景地层倾斜程度; ③不同类型盆地岩性的差异, 影响崖壁平整程度等坡面形态; ④岩石强度对崖壁高度影响较小, 但垂向岩石强度的差异导致水平凹槽或洞穴的形成, 并导致以崩塌为主的地貌过程; ⑤地貌演化阶段影响单体和群体景观的丰富程度; ⑥气候主要影响当前活跃的地貌过程, 植被和水体等自然地理要素与地貌的组合塑造了不同的丹霞景观特色和美感。全国尺度上, 丹霞景观特征在空间上的分异是构造演化历史、地表环境等因素的区域性表现。

关键词: 丹霞景观; 丹霞地貌; 空间分异; 景观分异; 喜马拉雅运动

DOI: 10.11821/dlxb202305011

1 引言

丹霞景观指以丹霞地貌为主体的景观风貌, 其包含丹霞自然景观和丹霞人文景观两个层面。本文主要研究丹霞景观的自然景观范畴, 包括以丹霞地貌为核心的颜色、崖壁高度、坡面形态、单体景观、群体景观等主体景观要素和植被、水体等辅助景观要素, 以及岩性、地层时代、演化阶段、岩石强度、地层产状、其他岩石夹层等形成地域性丹霞景观差异的影响因素。

丹霞地貌指的是由陆相红层形成、以陡崖为特征的地貌^[1]。1928年冯景兰命名“丹霞层”^[2], 后1939年陈国达命名“丹霞地形”(即丹霞地貌)^[3], 这个由中国学者命名的岩石地貌类型吸引了几代地学工作者的持续调查研究。在丹霞地貌概念内涵^[1]、地貌演化模式^[4]、空间分布^[5-8]、分类系统^[9-10]、红盆地地质构造^[11-14]及受其独特地形所影响的生态^[15-16]

收稿日期: 2022-11-01; 修订日期: 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41901005); 广东省国家公园建设专项资金(2021GJGY026); 西南大学创新研究2035先导计划(SWUPilotPlan031) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41901005; Guangdong Special Fund for National Park Construction, No.2021GJGY026; Innovation Research 2035 Pilot Plan of Southwest University, No.SWUPilotPlan031]

作者简介: 闫罗彬(1987-), 男, 河北邢台人, 讲师, 中国地理学会会员(S110013368M)。主要研究方向为丹霞地貌。

E-mail: yanluobin@swu.edu.cn

和文化^[17-19]等方面,均获得诸多重要研究进展。但由于以往缺乏大尺度地貌调查和定量数据获取,因此较少探讨丹霞景观影响因素的内在机理。

红层是丹霞景观发育的物质基础,目前对红层分布的认识已比较深入。中国红层出露面积为 $9.16 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占国土面积的9.5%^[20], 红层区承载人口多达1.44亿^[21]。白垩系出露红层占出露总面积的57%, 绝大部分沿主要断层线分布; 侏罗系红层占25%, 主要分布于四川盆地; 三叠系红层主要分布于云南元谋县, 占4%; 古近系和新近系红层主要分布在塔里木盆地和准噶尔盆地边缘, 分别占红层总面积的5.1%和4.8%^[20]。依据出露红层的空间分布, 可划定丹霞地貌在空间上的大致范围, 但由于丹霞景观是岩性、构造、气候、时间等多种因素共同作用的结果, 因此深入了解其分异规律需要综合对比分析红层分布、构造、气候等诸多因素的影响与关联。

根据黄进等统计^[6-7]和近年来调查, 中国已发现1119处丹霞地貌, 它们具有既范围广袤, 又高度集聚的特征, 可粗略划分为东南、西南和西北三大集中分布区^[5, 7]。闫罗彬等根据点密度(Point Density)分析, 进一步确定为东南沿海、四川盆地和祁连山—六盘山3个集中分布区(带)^[20]。齐德利将其分布格局总结为“条带展布、斑块镶嵌、集中出现”, 将中国丹霞地貌从景观角度定性划分为东南区、西南区和西北区3个旅游大区^[22]。以上研究均表明, 中国丹霞地貌的分布在全国尺度上表现出聚集特征, 但是, 丹霞景观特征在全国尺度上是否表现出分异, 其控制因素如何, 仍然缺乏定量研究。

相比于对全国尺度的丹霞空间分布研究, 近年来针对区域丹霞地貌形成机制研究更为深入, 例如, 杨望曦探讨鄂尔多斯盆地西南缘丹霞地貌形成的机制, 发现该区域的构造位置、构造强度、地层沉积和岩性对丹霞地貌的发育特征均有影响^[23]。刘江龙从东南部红层盆地的构造演化分析了其对丹霞地貌控制作用^[24]。其他研究大多围绕省域的丹霞分布和发育规律展开^[25-28]。前人数十年来的研究积累, 使得系统性分析全国尺度丹霞景观特征、空间分布格局和影响因素成为可能。

相较于岩石地貌学的其他学科, 丹霞地貌学科理论体系的构建依然不够完善。目前存在的争议主要集中于丹霞地貌的定义和控制因素等学科基础理论问题^[29-30]。例如, 由于丹霞地貌的多样性, 导致学者在下定义时, 是否应对颜色、地貌形态、地貌过程、形成时代和地质构造等进行限定^[31-33], 说法不一。在丹霞地貌的控制因素中, 目前对岩石力学性质的影响机制研究较为深入: 垂向上岩层抗侵蚀能力的差异, 导致丹霞崖壁差异风化并形成顺层凹槽^[34-36]。闫罗彬等基于3D有限元的模拟发现, 顺层凹槽的扩展使得岩体力学状态发生变化, 这是导致丹霞崖壁崩塌(新崖壁形成)的直接原因^[37]。但是, 岩性仅是丹霞地貌多个控制因素之一, 单一的案例研究难以获取其他因素的影响。因此, 大尺度丹霞地貌景观特征的调查和区域对比, 有助于进一步深化对丹霞地貌控制因素这一基础理论问题的认识。

本文主要以科技基础资源调查专项“全国丹霞地貌基础数据调查”获取的176处丹霞地貌本底信息为数据源, 用可定量的丹霞景观要素和景观影响因素(地层时代、岩性、岩层产状、崖壁高度和岩石强度)初步确定丹霞景观空间格局, 再结合考察过程中对难以定量的景观要素的区域差异形成的认识, 确定丹霞景观的空间分异, 最后通过区域对比尝试理解地质、气候、时间和生物等各个控制因素在其空间分异中的作用。

2 数据来源和研究方法

中国丹霞地貌成景地层时代数据来自《中国丹霞地貌简表》^[6]。岩层产状、崖壁高度

和岩石单轴抗压强度等数据来自国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)《全国丹霞地貌基础数据调查》数据集。综合考虑丹霞地貌发育的典型性、空间分布上的均衡性、类型的完整性、高级别资源的优先性和个性突出性,共获取了176个丹霞地貌点的基础地质、地貌、地表环境和文化等内容的基础信息,基本涵盖了所有丹霞地貌较多的22个省级行政区,涉及到全部的气候区 and 大地构造单元。岩石强度相关测试步骤按照《工程岩体试验实验方法标准》(GB/T50266-99)和行业标准《水利水电工程岩石实验规程》(SL264-2001)完成,使用设备为YAW-42061型微机控制电液伺服压力试验机。其他数据包括地球地震模型(Global Earthquake Model)的峰值地面加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)^[38]、中国大地构造图、不同构造构造域底图^[39]和中国植被区划底图^[40]等。不同区域丹霞地貌的属性特征在空间上的表征在ArcGIS 10.8软件平台中完成。

对于全国不同区域丹霞景观特色的归纳主要通过野外实地调查获得。核密度估计(Kernel Density Estimation, KDE)是概率密度函数的非参数表示^[41-42],通过离散样本点的线性加和来构建一个连续的概率密度函数,用于获取一个平滑的样本分布。核密度估计通过Python中内置工具Kernel Density完成,用于对比不同类型岩石的单轴抗压强度的分布和不同产状丹霞地貌的峰值地面加速度的分布。

3 丹霞景观特征空间分异

3.1 成景地层时代的空间分布

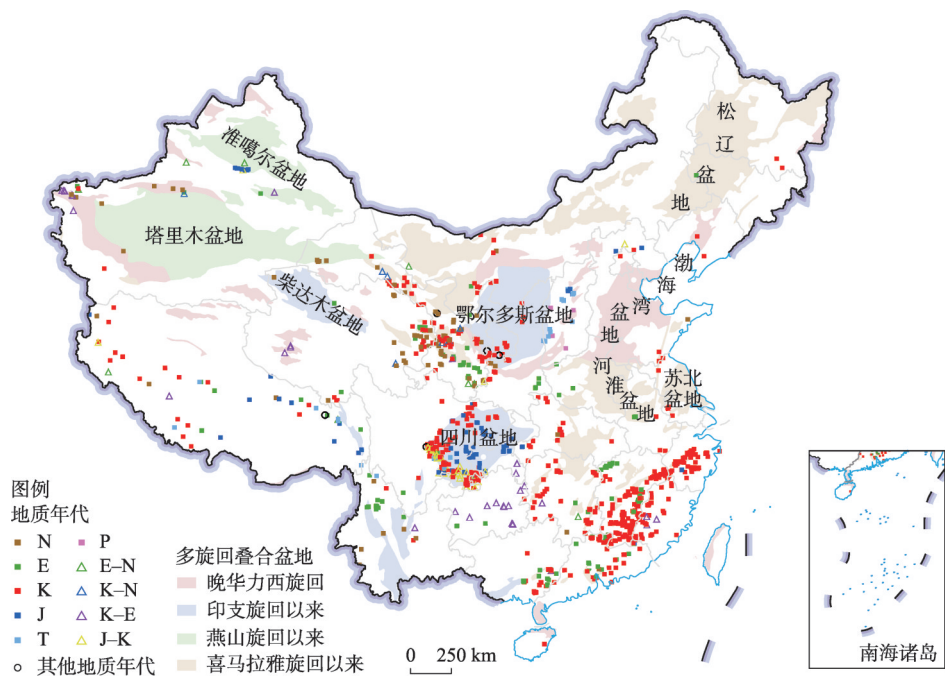
丹霞地貌成景地层的时代数据涵盖黄进统计的1104处和本次调查新增的15处丹霞地貌,共1119个。地层时代分布如图1所示。成景地层全部为白垩系红层的丹霞地貌有666处,另有85处丹霞地貌地层中部分包括白垩系地层。这85处丹霞地貌中,有42处丹霞地貌的下部为侏罗系、上部为白垩系地层,多位于四川盆地;下部为白垩系地层而上部为古近系地层的丹霞地貌34处,多位于贵州。古近系红层形成的丹霞地貌133处,另有部分成景地层为古近系的丹霞地貌45处。总体上白垩系丹霞最多,其次是古近系、侏罗系和新近系。如图1所示,四川盆地中部和东部以侏罗系为主,南部以白垩系或白垩—侏罗系为主;三叠系红层形成的丹霞大多位于山西省境内。华南地区丹霞地貌成景地层以白垩系为主,其次为古近系;新近系丹霞多分布于鄂尔多斯盆地的西南缘和塔里木盆地外围。已发现地层时代最古老的丹霞地貌位于甘肃省古浪峡,地层为泥盆系上统沙流水群(D_{3sh})^[43]。

3.2 成景地层岩性空间分布

根据丹霞地貌成景地层主体的岩性,可将其分为3大类:以砂岩为主、以砾岩为主和以砂砾岩为主。成景地层岩性空间分布如图2所示。以砂岩为主的丹霞地貌有315处,占全国丹霞地貌总数量的28.5%;以砾岩为主的丹霞地貌有73处,占比为6.6%,其余均为砂砾岩丹霞。不同岩性丹霞地貌的分布规律表现为:砂岩丹霞集中分布在四川盆地、黄土覆盖的陕西和山西省以及天山两侧,其他地区有零星分布;砾岩为主的丹霞主要分布在东南沿海和四川盆地西缘。

3.3 成景岩层产状空间分布

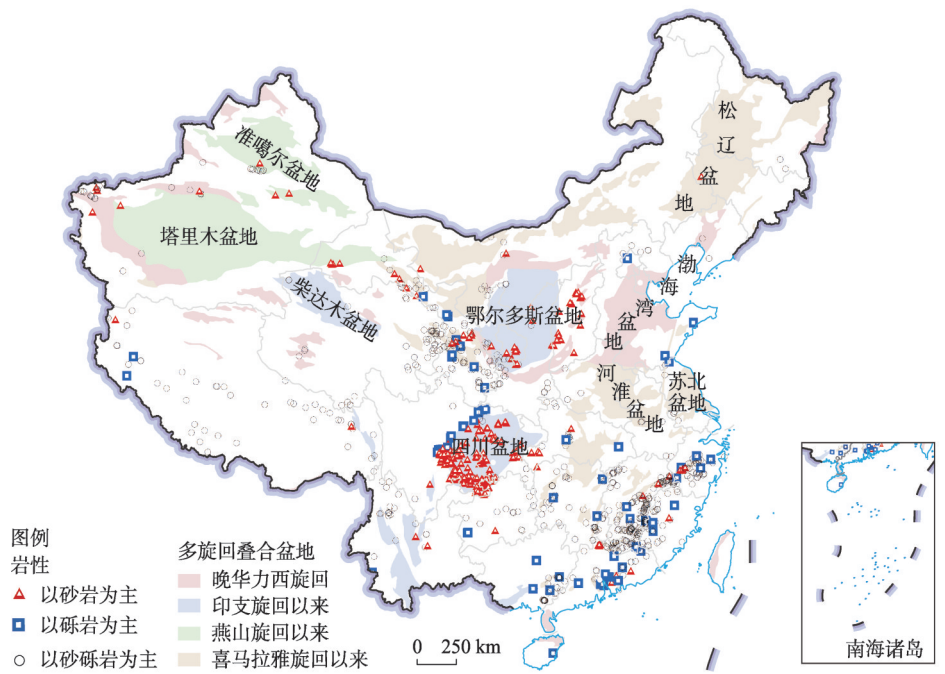
依据岩层产状可将丹霞地貌分为3类,近水平($<10^\circ$)、缓倾斜($10^\circ\sim30^\circ$)和陡倾斜($>30^\circ$)^[9]。大多数面积较小的丹霞地貌区岩层产状表现出一致性,但在一些大型红层盆地内部(如丹霞盆地),地层所处盆地位置或局部断裂影响,可能导致同一盆地内岩



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1823号的标准地图制作,底图边界无修改。

图1 构成丹霞地貌的地层时代分布特征

Fig. 1 Geological age of Danxia landscape strata

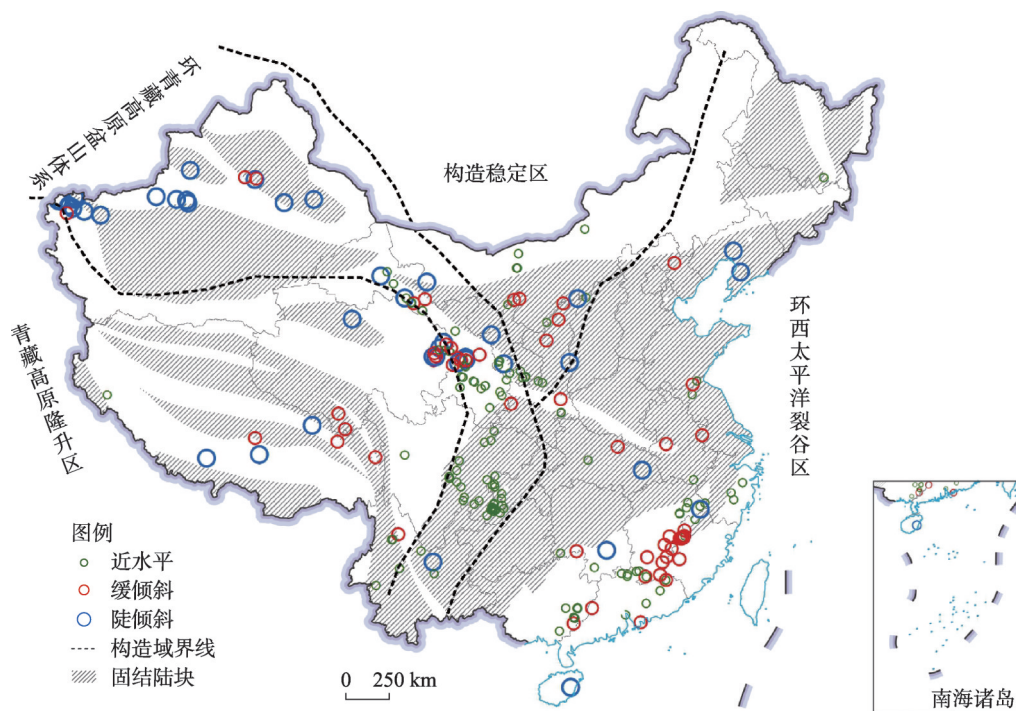


注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1823号的标准地图制作,底图边界无修改。

图2 中国丹霞地貌的岩性特征的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of lithology in Danxia sites in China

层产状不同。针对面积较大的丹霞地貌区，本文所指岩层产状为多数崖壁的成景岩层产状。根据野外测量，共获取235处成景岩层产状数据，其空间分布如图3。近水平丹霞有134处，占比为57.0%；缓倾斜丹霞53处，占比32.5%。整体表现为，西北部陡倾斜丹霞地貌较多，而东部近水平和缓倾斜丹霞较多，新疆天山两侧丹霞大多为陡倾斜。总体上，绝大多数丹霞地貌为近水平和缓倾斜丹霞，基本遵循“顶平、身陡、麓缓”的坡面形式。依据贾承造对新构造运动的分区^[39]，全国丹霞地貌岩层产状总体上表现为：在环西太平洋裂谷区和环青藏高原盆山体系的东部克拉通（四川盆地和鄂尔多斯盆地）近水平或缓倾斜丹霞较多（图3）；在青藏高原盆山体系的北部，地层以陡倾斜为主。



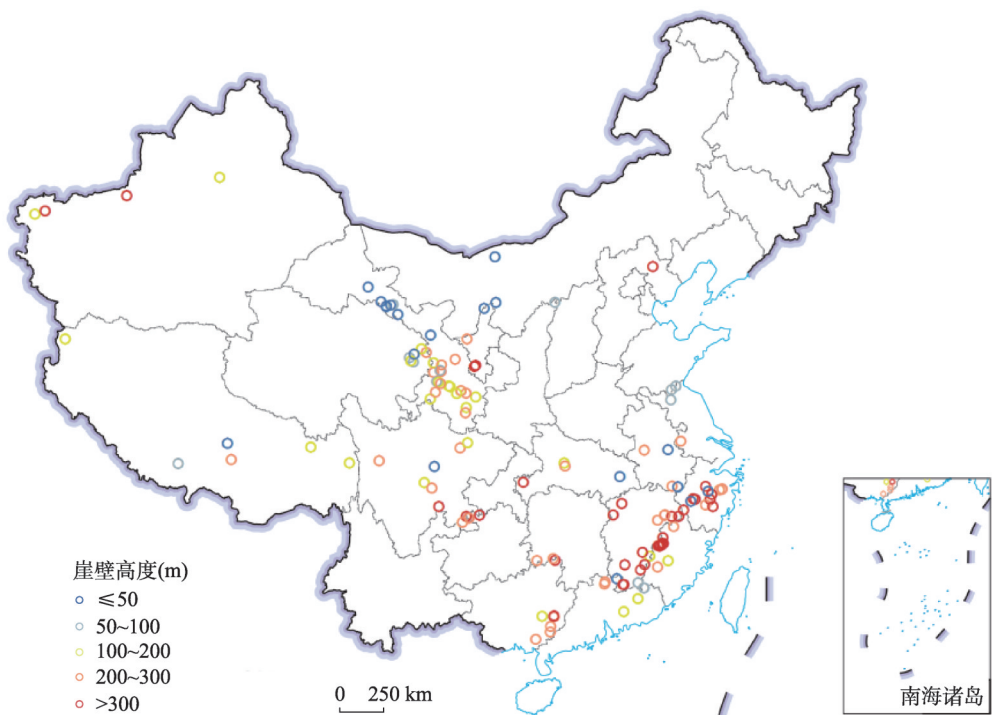
注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1823号的标准地图制作，底图边界无修改；不同构造构造域底图据贾承造等^[39]绘制。

图3 中国丹霞地貌成景岩层产状的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of attitude of Danxia site strata

3.4 丹霞地貌的崖壁高度空间分布

在全国范围内，获取133处丹霞地貌崖壁高度数据。数据集包括最大崖壁高度和一般崖壁高度。由于一般崖壁高度为调查者根据观察到的崖壁高度进行估计得出，误差较大，因此本文所使用崖壁高度为最大崖壁高度，指丹霞地貌顶部到附近水域的海拔差值。由于鄂尔多斯高原多为沟谷型丹霞地貌，故样本中不包括该区域的数据。崖壁高度的空间分布如图4所示。崖壁高度最大值为600 m，平均值为250 m。总体上，东南部（广东、浙江、福建和江西）丹霞崖壁较高，平均值为330 m；西北部（甘肃和宁夏）丹霞地貌平均高度为162 m；川渝黔边区丹霞地貌崖壁明显较高；祁连山北麓丹霞地貌的崖壁高度一般在50 m以下。



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1823号的标准地图制作,底图边界无修改。

图4 中国丹霞地貌崖壁高度的空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of the cliff height in Danxia sites

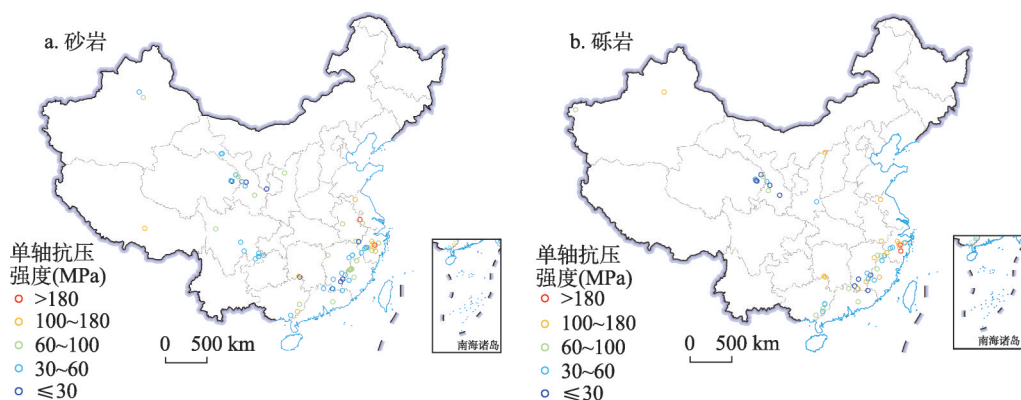
3.5 丹霞地貌成景地层岩石强度

岩石强度对地貌演化具有重要影响^[44]。对全国大范围丹霞地貌成景地层岩石强度的分析，有助于了解其对丹霞景观特征的影响。本文共获取 163 个红层岩石的单轴抗压强度数据，其中砂岩 67 个、砾岩 96 个。两种岩性数据的平均值为 72.46 MPa，砂岩最小和最大单轴抗压强度分别为 217.6 MPa 和 8.39 MPa，两者相差 26 倍；砾岩最小和最大单轴抗压强度分别为 289.0 MPa 和 14.61 MPa，两者相差近 20 倍。岩石强度的空间分布如图 5 所示，对比图 5a 和 5b 可以发现，砂岩和砾岩强度分布在空间上具有较好的一致性，表现为：浙江省强度较大，粤闽赣边区强度较小，鄂尔多斯高原西南缘强度较小。

运用 KDE 法计算两类岩石的核密度分布（图 6），砂岩平均强度小于砾岩，但两类岩石单轴抗压强度的密度分布出现较大重叠，说明丹霞成景地层岩石类型并不能决定单轴抗压强度。砾岩单轴抗压强度的核密度表现为“双峰型”分布。此外，强度小于 20 MPa 的岩样中砾岩和砂岩比例相当，而强度大于 110 MPa 的岩样中，砾岩岩样的数量占主导。

4 不同区域丹霞景观特点

在上文中对地层时代、岩性、岩层产状、崖壁高度和岩石强度等空间分布特征分析的基础上，同时结合对全国 22 个省级行政区超过 200 处丹霞地貌的实地考察过程中获得的对地表环境、坡面形态、当前活跃的地貌过程和景观特色的认识，将全国丹霞景观划分为 6 个片区（图 7），对各区域当前主要地貌过程和丹霞景观特征总结如下：



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1823号的标准地图制作,底图边界无修改。

图5 砂岩和砾岩单轴抗压强度的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of uniaxial compressive strength of sandstone and conglomerate

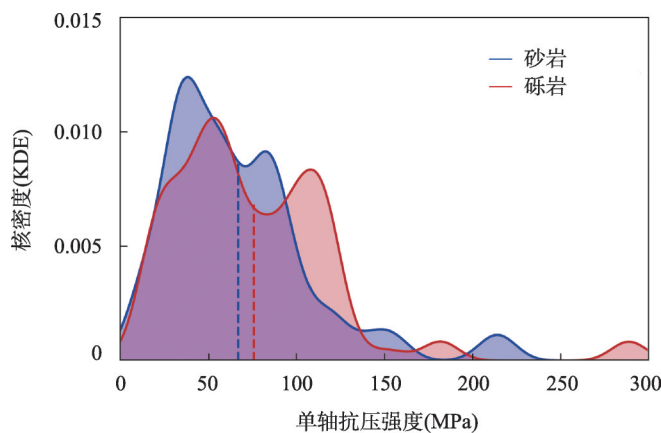


图6 不同岩石单轴抗压强度的核密度分布

Fig. 6 KDE distribution of uniaxial compressive strength

4.1 东南部丹霞景观区

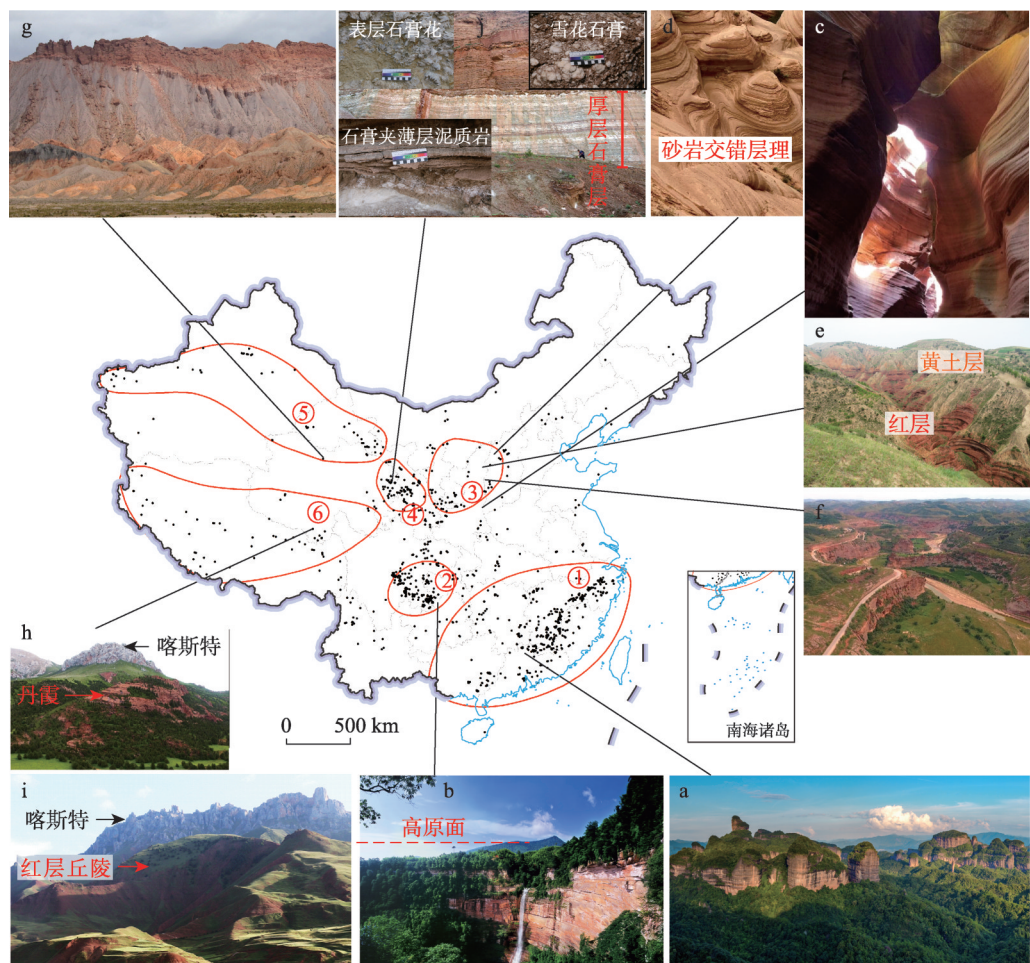
东南部多为近水平和缓倾斜的砾岩和砂砾岩丹霞,近水平和缓倾斜丹霞分别占该区域丹霞地貌总数的59%和36%。近水平丹霞的顶面与层面平行,形成方山状或石墙状丹霞。缓倾斜丹霞顶面与单斜层面接近,呈单面山丹霞。组合景观以峰林峰丛为主(图7a),单体景观中的正负地貌类型多样。当前最活跃的地貌过程为崩塌作用,坡麓多见崩积石堆。区内河流多为继承河。负地貌中的顺层和竖向凹槽均丰富^[34]。丹崖与其他景观要素色彩对比强烈。崖壁上的苔藓类生物对崖壁色彩有改造作用。

4.2 川渝黔边区丹霞景观区

该区域的丹霞地貌多为近水平砂岩丹霞,地貌演化阶段多为青年期,以深切峡谷和瀑布众多为景观特色。单体和群体地貌类型不丰富。活跃的地貌过程为流水下蚀和崩塌,峡谷内多崩塌巨石,顶部高原面保存完整(图7b)。丹霞崖壁沿着马蹄形瀑布后退方向延伸,瀑布后壁多为“圈椅”状,河流多阶跃型“裂点”。

4.3 鄂尔多斯高原丹霞景观区

鄂尔多斯高原丹霞多为近水平砂岩丹霞,其中近水平和缓倾斜丹霞分别占到该片区



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1823号的标准地图制作，底图边界无修改；

① 东南部丹霞景观区,② 川渝黔边区丹霞景观区,③ 鄂尔多斯高原丹霞景观区,④ 鄂尔多斯盆地西南缘丹霞景观区,⑤ “天山—祁连”沿线丹霞景观,⑥ 青藏高原丹霞景观区；

a 广东丹霞山东部群峰景观,b 贵州赤水高原峡谷型丹霞景观,顶部存在明显的高原面,c 陕西省延安市甘泉县雨岔峡谷,d 陕西榆林市靖边县龙洲波浪谷—沙漠相砂岩地层,存在明显的大型板状、槽状交错层理,e 陕西榆林市靖边县天赐湾小型嵌入式曲流丹霞景观,上部为黄土,下部为红层,f 陕西省延安市志丹县洛河丹霞—丹霞地貌形成于深切河曲的两岸,g 青海省大柴旦五彩谷丹霞,h和i为青藏高原丹霞地貌与红层丘陵,顶部多发育喀斯特石林,j 西宁北山—崖壁由砂泥岩红层与不同厚度的石膏层构成；
a为刘加青拍摄,b为王茂祥拍摄,c~f为彭华拍摄,g~j为闫罗彬拍摄。

图 7 不同区域代表性丹霞景观

Fig. 7 Typical Danxia landscapes in different regions of China

丹霞地貌总数的63%和26%。根据戴维斯侵蚀旋回理论，区内丹霞演化阶段为幼年期，正在经历抬升^[45]。丹霞多发育于白垩系地层，厚层砂岩岩性均一。沟谷型丹霞（包括巷谷型—峡谷型—宽谷型）发育于切穿黄土层的沟谷内（图7c~7f），主要地貌过程为河流下蚀，多分布在黄土高原上树枝状水系侵蚀河谷中，或形成于河流的凸岸。存在少数砾岩丹霞（如陕西铜川照金丹霞）。白垩系地层由沙漠相与河湖相沉积组成，发育大型板状、槽状交错层理，崖壁层理密布，别具特色（图7d）。

4.4 鄂尔多斯盆地西南部丹霞景观区

该区域包括青海湖以东和甘南以西, 位于不同气候区和构造板块的边界, 形成的丹霞景观多样。该区域近水平丹霞和陡倾斜丹霞占区域总数的43%和33%。发育于白垩系地层的丹霞地貌崖壁高度较大, 如积石峡丹霞、崆峒山、炳灵寺等。青海湖以东黄河—黑河流域丹霞地貌多数发育于古近系和新近系地层, 胶结程度弱, 丹霞崖壁多低矮、顶部浑圆。丹霞顶部大多具有黄土盖层。同时, 存在以红色泥质岩和石膏互层发育的丹霞地貌, 整体呈红色, 其中石膏层呈灰绿色, 结晶类型多样, 占崖壁比例较大, 如青海互助县白马寺、西宁南山和北山等(图7j)。这类丹霞景观在湿润区难以长期存在。

4.5 “天山—祁连”沿线丹霞景观区

该区域丹霞景观主要沿着天山两侧的背斜两翼和祁连山北侧分布, 陡倾斜丹霞数目占该区域丹霞地貌数量的67%。丹霞崖壁多为背斜形成的峡谷两壁。当前活跃的地貌过程为风化。不同颜色单斜地层呈带状展布, 色彩丰富, 如青海大柴旦五彩谷等(图7g)。部分地区丹霞崖壁仅出现在侵蚀河谷一侧, 如吐鲁番火焰山。由于降水量少, 弱胶结的粉砂岩、泥岩因顶部存在坚硬的砂岩或者砾岩盖层, 可形成高度不大的陡崖或石柱, 这类现象在干旱区常见。

4.6 青藏高原地区丹霞景观区

青藏高原丹霞景观物质基础多为白垩—古近系红层, 缓倾斜和陡倾斜丹霞分别占比为50%和38%, 主要沿拉萨与羌塘等地块边缘分布。青藏高原典型丹霞地貌多出现在块体边缘和切割强烈的峡谷(如西藏昌都乌然大峡谷)中, 高原面上多发育红层丘陵和红层山地。由于当前活跃的地貌过程以寒冻风化为主, 崖壁坡面较缓, 山麓处崩塌巨石少见, 崖壁面水蚀痕迹不明显。拉脊山和昂赛等地的丹霞景观为绿色高寒草甸与红色丹霞组合。此外, 青藏高原区红层多与石灰岩伴生, 下部为丹霞地貌, 上部为喀斯特地貌, 红白相映, 是青藏高原丹霞景观的一大特色(图7h、7i)。

4.7 各区域丹霞景观对比

本文将各个区域丹霞景观的特点总结如表1。

表1 各区域丹霞景观的对比
Tab. 1 Comparison of Danxia landscapes in different regions of China

区域	盆地类型	岩性	岩性与产状	坡面形态	成因	活跃地貌过程	气候	景观特色	地貌演化阶段
东南部	断陷盆地	砂砾岩	缓倾斜+近水平	竖向+水平凹槽	抬升→流水下切→崩塌	崩塌	湿润	峰林峰丛、森林+碧水	青年晚期、壮年期、老年期
川渝黔边区	大型坳陷盆地	砂岩	近水平	水平凹槽	抬升→流水下切→崩塌	流水下蚀+崩塌	湿润	深切峡谷+瀑布众多+森林	青年早期为主
鄂尔多斯高原	大型坳陷盆地	砂岩	近水平	-	抬升→流水下切	流水下蚀	半干旱	黄土覆盖+崖壁层理丰富	幼年期为主
鄂尔多斯盆地西南部	断陷盆地	砂砾岩	缓倾斜	水平凹槽	抬升→风化、崩塌	温差+盐风化	多样	顶部黄土+厚层石膏	-
“天山—祁连”沿线	大型坳陷盆地	砂岩或砂砾岩	陡倾斜	不平整	褶皱抬升(背斜)	温差+盐风化	干旱	带状展布+色彩丰富	-
青藏高原地区	断陷盆地	砂砾岩	陡倾斜或缓倾斜	水平凹槽	古丹霞→寒冻风化改造	寒冻风化	高寒	喀斯特与丹霞共存	-

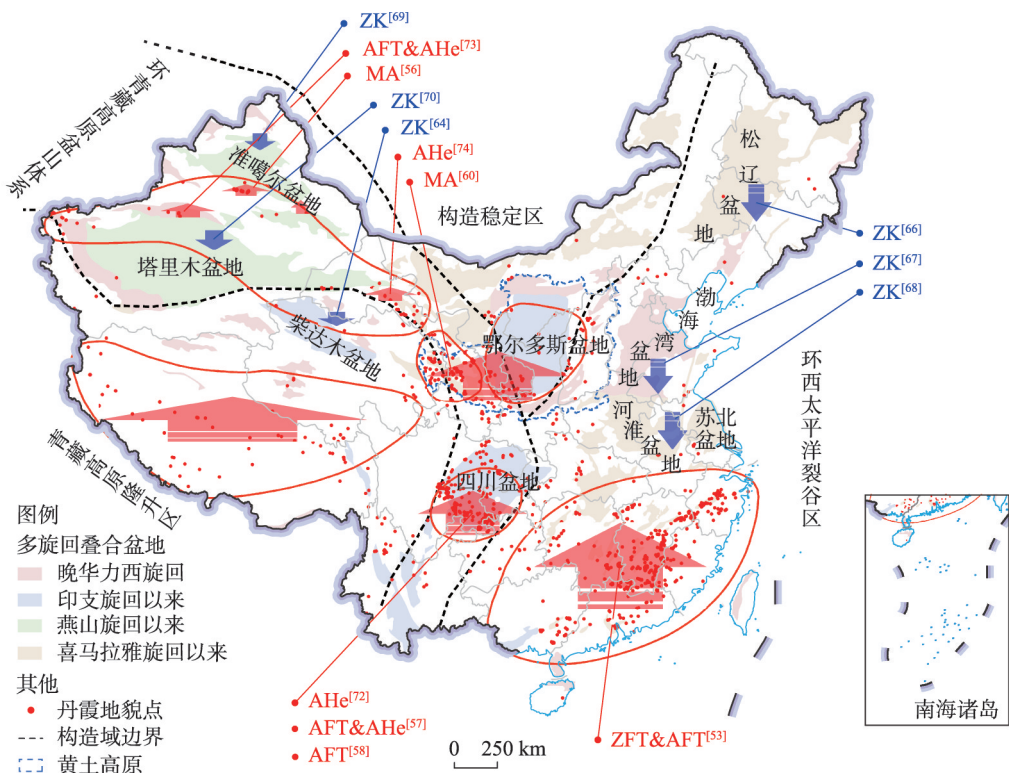
5 喜马拉雅运动对丹霞景观分布的控制

中国陆相红层沉积时代多为侏罗纪—白垩纪，以往学者认为红色内陆盆地基本都是在随后的喜马拉雅运动中被抬升^[20, 46]，但喜马拉雅运动如何控制丹霞景观的空间分布依然缺乏深入探究。本文综合低温热年代学和磁性地层学方法获取的地表抬升数据和钻孔获取的埋藏红层数据，用以表征喜马拉雅运动在各区域引起的地表升降格局（图8），并结合贾承造提出的中国喜马拉雅构造运动的陆内变形特征^[39]，分析喜马拉雅运动对丹霞景观分布的控制作用。

中国喜马拉雅构造期陆内变形构造性质与特征由青藏高原挤压隆升和太平洋板块俯冲拉张共同控制。贾承造将喜马拉雅构造运动的发育特征归为青藏高原隆升、盆地与造山带体制和东部拉张活动，并将其构造特征分为3种类型，分别为东部拉张环境控制的裂谷沉降、中部地块抬升剥蚀和西部盆地压缩挠曲沉降与冲断隆升^[39]。

中国东南部和中部的稳定抬升区（鄂尔多斯和四川盆地）丹霞地貌密集，在东北和华北丹霞地貌数量少，西北地区主要分布在三大盆地边缘和祁连山北侧，青藏高原丹霞多出现在块体边缘（图8）。

东南部丹霞分布区，位于环西太平洋裂谷区（图8）。从早白垩世到古近纪，由于太



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1823号的标准地图制作，底图边界无修改；
钻孔数据来自蓝色参考文献，表明盆地地下埋藏厚层陆相红层^[64, 66-70]，低温热年代学数据和磁性地层学数据来自
红色参考文献^[53, 56-58, 60, 71-74]，表明在喜马拉雅运动期间发生大幅抬升，不同构造构造域底图据贾承造等^[39]；ZK为钻孔
数据、MA为磁性地层学方法、AFT为磷灰石裂变径迹法、AHe为磷灰石(U-Th)/He技术、ZFT为锆石裂变径迹法。

图8 不同构造域红层分布区的构造升降格局

Fig. 8 Crustal compression and extension during the Himalayan movement in the redbed region

平洋板块俯冲,在弧后拉张背景下形成一系列NE-NNE向断陷盆地群^[47-49],沉积大量白垩纪晚期—古近纪红层^[48,50-51]。始新世,盆地停止下沉^[52]。磷灰石裂变径迹数据表明,由于印度欧亚板块碰撞的远程效应,渐新世末到中新世初,发生区域抬升^[53]。

“天山—祁连”沿线丹霞地貌位于环青藏高原盆山体系,表现为盆地压缩挠曲沉降与冲断隆升,在天山两侧和祁连山北缘形成冲断带^[39]。新近纪和第四纪形成逆冲断层和褶皱,在天山造山带南北边界形成线状、大致东西走向的背斜^[29,54-55]。背斜两翼的陡崖多发育丹霞地貌。磁性地层学研究表明,天山隆升主要发生在约7—2.58 Ma和早更新世^[56],为青藏高原向北推挤的结果。

四川盆地属于环青藏高原盆山体系(图8),在晚白垩世之后一直处于差异隆升—沉降阶段,低温热年代学数据表明,新生代以来四川盆地发生大规模侵蚀,特别是晚新生代以来,岩石剥蚀和冷却作用加强^[57-58]。磷灰石裂变径迹反演的构造—隆升史表明,抬升剥蚀速率约100 m/Ma,龙门山地区甚至超过600 m/Ma,隆升剥蚀幅度超过5.0 km^[59]。

鄂尔多斯高原西南缘位于环青藏高原盆山体系的北部。从印支期到喜马拉雅运动期,各时期构造活动强烈,形成大量山间盆地,沉积从中侏罗系到新近系不同时期红层。磁性地层学研究表明,该区域在10 Ma以来经历多期构造隆升,是对青藏高原隆升过程的响应^[60]。

目前对于青藏高原的红层和丹霞研究薄弱,有研究表明,青藏高原的陆相红层多形成于陆陆碰撞之后陆内汇聚所形成的前陆盆地构造环境^[61-62]。但是针对青藏高原顶部丹霞地貌是否为青藏高原抬升前的“古丹霞”,尚缺少研究。

钻孔数据表明,东部松辽盆地、渤海湾盆地、河淮盆地、苏北盆地和西北三大盆地,在燕山旋回均沉积厚层红层^[52,63-66]。喜马拉雅构造运动中,东部渤海湾、松辽盆地受拉张构造环境控制,导致裂谷沉降^[39],新近纪和第四纪进入拗陷阶段^[63],绝大多数红层在第四纪被埋藏,丹霞地貌数量少,规模小。西北三大盆地受到基底结构影响^[39],造山带隆起,盆地沉降,盆地中部红层未出露地表。

分析发现,东北部和西北大部分红层盆地因位于喜马拉雅运动沉降区而被第四系沉积物掩埋,不具备形成丹霞地貌的条件。丹霞地貌密集的区域均位于喜马拉雅运动的抬升区,是对青藏高原隆升的响应。因此,燕山运动以来的红层沉积范围和喜马拉雅运动共同控制了中国丹霞景观的空间分布格局。

6 丹霞景观特征空间分异影响因素

6.1 盆地类型影响成景地层岩性

中国丹霞地貌成景地层岩性在空间上表现为,东南部地区主要为砂砾岩丹霞和砾岩丹霞,四川盆地和鄂尔多斯盆地多为砂岩丹霞(图2)。

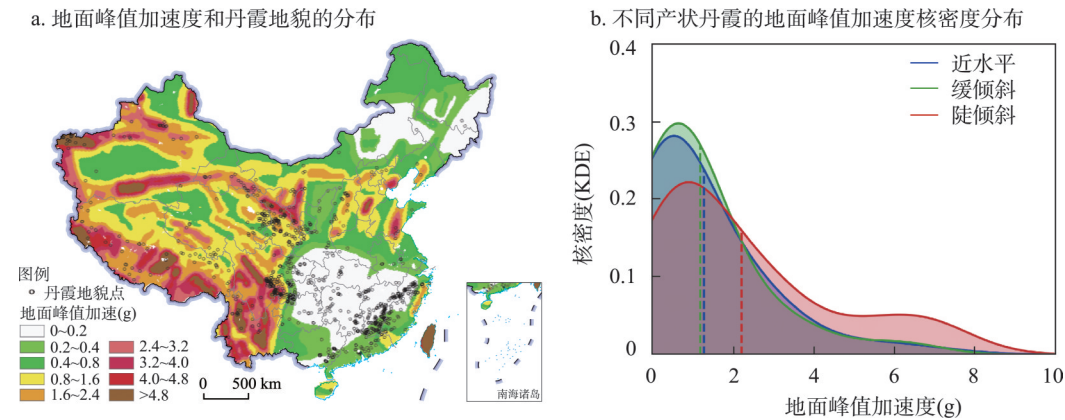
红层形成于陆相沉积盆地,陆相盆地对环境因素敏感,岩性在垂直方向上异质性强^[75],故砂砾岩丹霞最多,占全国总数的65%。东南部多为拉张背景下形成的断陷山间盆地,为近源堆积,碎屑分选差,岩性多为砂砾岩,并以砾岩为主。与山间盆地相对应,四川盆地和鄂尔多斯盆地为大型岩石圈挠曲盆地。碎屑搬运距离大,分选好,沉积了巨厚层的河湖相砂岩;除河湖相外,鄂尔多斯高原还有风沙相沉积,大型斜层理和交错层理十分发育^[76]。因此以上两个盆地主要发育砂岩丹霞;而在盆地边缘,也发育一些近源堆积,例如,在四川盆地西缘发育规模不大的扇状砾岩沉积^[77],形成剑门山、青城山、窦团山等砾岩丹霞。总体上盆地类型影响丹霞景观的地层岩性。

6.2 构造运动强度控制岩层产状

在喜马拉雅构造运动期间，中国东南部表现为拉张环境，四川盆地和鄂尔多斯盆地表现为刚性地块大面积挠曲隆起或小角度掀斜，所以以上区域丹霞地层均为近水平。四川盆地在喜山运动期间受到青藏高原多期构造挤压变形，出现多个滑脱层，在盆地东侧则形成侏罗山式褶皱构造样式^[78-83]。白垩纪地层在盆地西部向西缓倾（近水平），盆地内的丹霞地貌主要保存在盆地西部和东部向斜发育区，这是盆地内部丹霞多为近水平的原因。

“天山—祁连”沿线丹霞地貌位于环青藏高原盆山体系的北部，区域表现为盆地压缩挠曲沉降和外围山体强烈隆升。天山两侧丹霞多分布于库车褶皱冲断带和乌恰—阿图什—喀什构造段，这些背斜带导致红层的陡倾斜产出^[84]。祁连山北侧主要构造为逆冲断层。以上地区挤压冲断是丹霞地层陡倾斜产出的原因。该区域丹霞地貌主要为构造成因。构造运动强度，特别是喜山运动的活动强度影响了丹霞地貌岩层产状。

峰值地面加速度常被用于表征地壳活动强度^[85]。为进一步验证地壳构造活动强度对丹霞岩层产状的影响，将岩层产状与峰值地面加速度进行叠置（图 9a）。陡倾斜丹霞所在位置的地面峰值加速度均值为 2.27 g，而缓倾斜和近水平丹霞的地面峰值加速度均值分别为 1.30 g 和 1.20 g（图 9b）。陡倾斜丹霞地貌大多位于地壳活动强度大的区域。



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1823号的标准地图制作，底图边界无修改。

图 9 地面峰值加速度对红层倾斜程度的影响

Fig. 9 Impact of peak ground acceleration (PGA) on inclination of strata in Danxia sites

需要指出的是，岩层产状是沉积之后构造变形的累积，它与当今峰值地面加速度之间的关系本质上反映中国现今地壳变形是新构造运动变形的表现和继续。

6.3 岩石强度对崖壁高度的影响

一般认为，岩石强度越大岩体失稳所需要的应力阈值越大，即所能维持的崖壁高度上限越高。以往研究认为即使在构造弱的区域，岩石强度的差异可以引起地形起伏度不断增大^[44, 86]，但本文发现砂岩岩石强度与丹霞崖壁最大高度基于Kendall秩的相关性不显著（ $p > 0.05$ ）（图 10a），砾岩岩石强度与崖壁高度的相关性显著，但相关性较小（ $r = 0.28$ ）（图 10b），未发现岩石强度对崖壁高度具有显著影响。

根据戴维斯侵蚀旋回学说，地貌发育要素包括构造、侵蚀阶段和营力^[87]。地貌演化反映三者之间的函数关系，岩石强度仅影响地貌营力的作用，所以岩石强度和崖壁高度关系较弱。

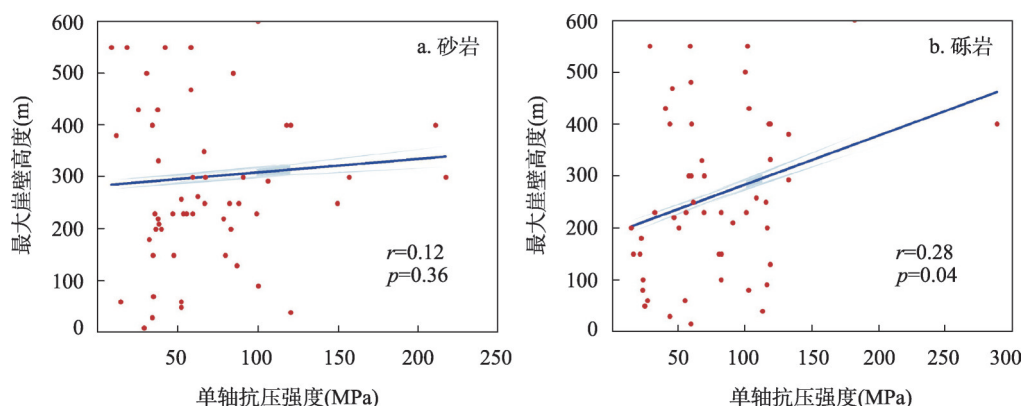


图10 单轴抗压强度与构造活动对崖壁高度的影响

Fig. 10 Impact of uniaxial compressive strength and tectonics on cliff height

6.4 植被和气候影响地貌过程和美感

中国丹霞景观在除寒温带针叶林区域外的所有植被类型区均有分布（图11）。不同植被类型与丹霞地貌的结合，产生不同的美感，例如东南部和川渝黔边区丹崖和东部亚热带常绿阔叶林色彩对比强烈，形成秀美的丹霞景观。“天山—祁连”沿线主要位于暖温带荒漠区域，呈现出粗犷荒凉的美感。青藏高原丹崖和高原高寒草甸、草原的组合别具特色。此外，湿润区的藻类、地衣和苔藓等植物的生长会明显改变崖壁颜色。

东南部和川渝黔边区为亚热带季风气候区，崖壁上多流水侵蚀形成竖向沟槽，河流下蚀强烈。青藏高原东北部地区全新世以来为干旱高寒气候^[88]，作为主要地貌营力的寒冻剥蚀导致丹霞地貌坡面较缓，崩积物少见。在鄂尔多斯高原西南部，干旱气候使崖壁中厚层石膏的存在成为可能。总体上，气候主要影响地貌过程，同时塑造了丹霞景观的坡面形态。

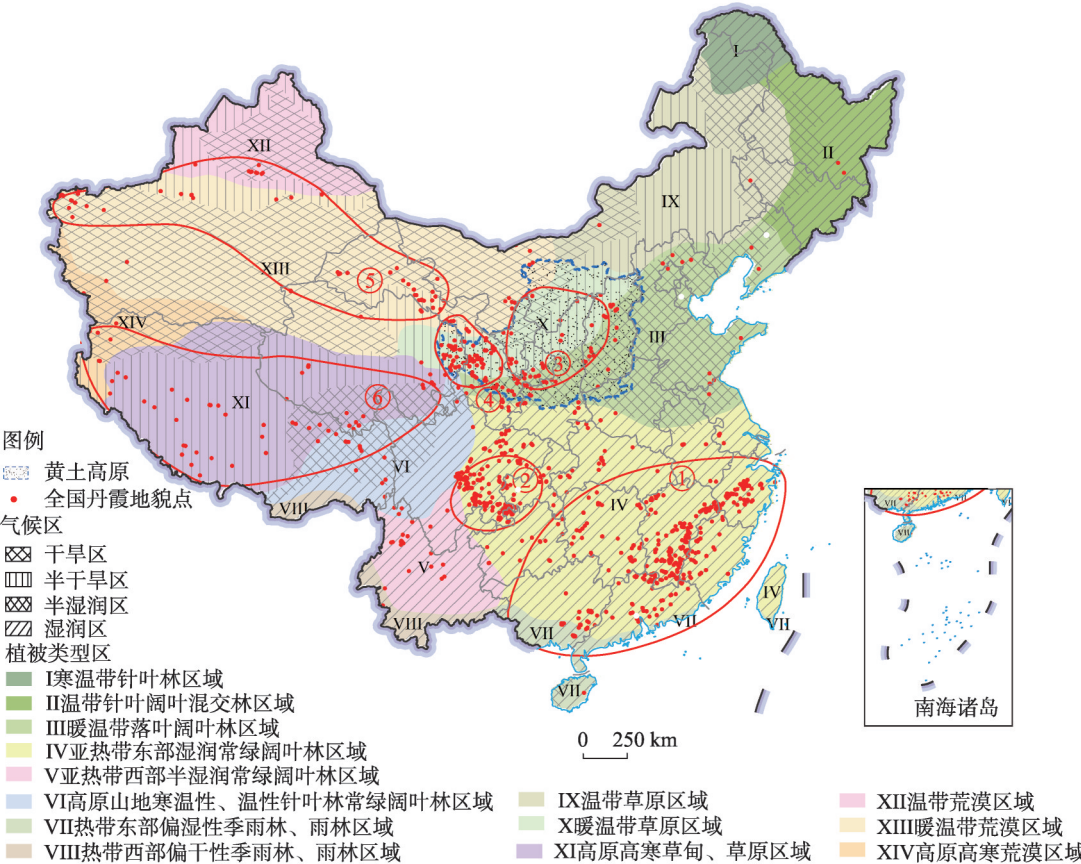
7 丹霞景观异质性因素的影响机制

丹霞景观的影响因素往往耦合在一起，在对各异质性因素分析基础上，以喜马拉雅运动、盆地类型、气候、演化阶段和其他自然地理要素等5个影响因素为背景，通过大尺度区域对比，确定其对丹霞景观空间分异的影响（图12）。

喜马拉雅运动对岩层产状的控制作用在6.2中已经述及，不再赘述（图12a）。盆地类型影响岩性，东南部断陷盆地以砾岩为主，四川盆地以砂岩为主。同为湿润气候和亚热带东部湿润常绿阔叶林区域（图11），对比发现，东南部砾岩丹霞区崖壁水平凹槽和片流垂蚀作用形成的竖向凹槽均较多^[31]，而川渝边区砂岩丹霞崖壁尽管存在大型水平洞穴，但整体上较平整，可以确定盆地类型和岩性主要影响丹霞地貌的坡面形态（图12b）。

东南部和川渝边区与“天山—祁连”沿线处于不同气候区，对比其丹霞景观发现，湿润区主要为流水下蚀和崩塌作用，而干旱区主要为盐风化、冻融风化等物理风化作用，气候影响地貌过程（图12c）。不同地貌过程也影响坡面形态，如干旱区崖壁常见因风化形成的风蚀壁龛。

鄂尔多斯高原、川渝边区岩性较为一致，鄂尔多斯高原处于幼年期，基本为沟谷型丹霞，地貌类型单一。通过东南部处于不同演化阶段的丹霞景观的对比发现，青年早期丹霞地貌峡谷、巷谷密集，负地貌多样，而壮年期和老年期丹霞单体和群体景观丰富。



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1823号的标准地图制作,底图边界无修改;
① 东南部丹霞景观区,② 川渝黔边区丹霞景观区,③ 鄂尔多斯高原丹霞景观区,④ 鄂尔多斯盆地西南缘丹霞景观区,⑤ “天山—祁连”沿线丹霞景观区,⑥ 青藏高原丹霞景观区;中国植被区划底图来自廖克^[40]。

图 11 不同植被区的丹霞地貌分布

Fig. 11 Distribution of Danxia sites versus vegetation regionalization

对于以水蚀为主的大型丹霞地貌区,地貌演化阶段影响单体和群体的景观类型丰富程度(图 12d)。此外,对比发现,属于构造成因的“天山—祁连”沿线丹霞(背斜)不符合戴维斯侵蚀旋回的整体快速抬升的假定,无法确定其地貌演化阶段。

岩石强度对丹霞景观的高度影响较小。红层岩石强度有巨大变异,朱诚等通过一系列工况下的岩石力学强度实验研究表明,垂直方向上岩石力学强度差异导致崖壁发生差异风化,形成顺层洞穴^[34]。而顺层洞穴导致岩体力学状态的变化,是崖壁发生崩塌的直接原因^[37]。因此,红层的岩石强度差异影响坡面形态和地貌过程,非红层夹层和植被等其他自然地理要素直接影响丹霞景观特色(图 12e)。

8 结论

丹霞地貌分布的密集区是对相关地区喜马拉雅运动阶段地表隆升的响应,沉降区红层大多被掩埋,丹霞地貌数量少。红层沉积范围和喜马拉雅运动表现形式(隆升还是沉降)共同控制了中国丹霞地貌的空间分布格局。

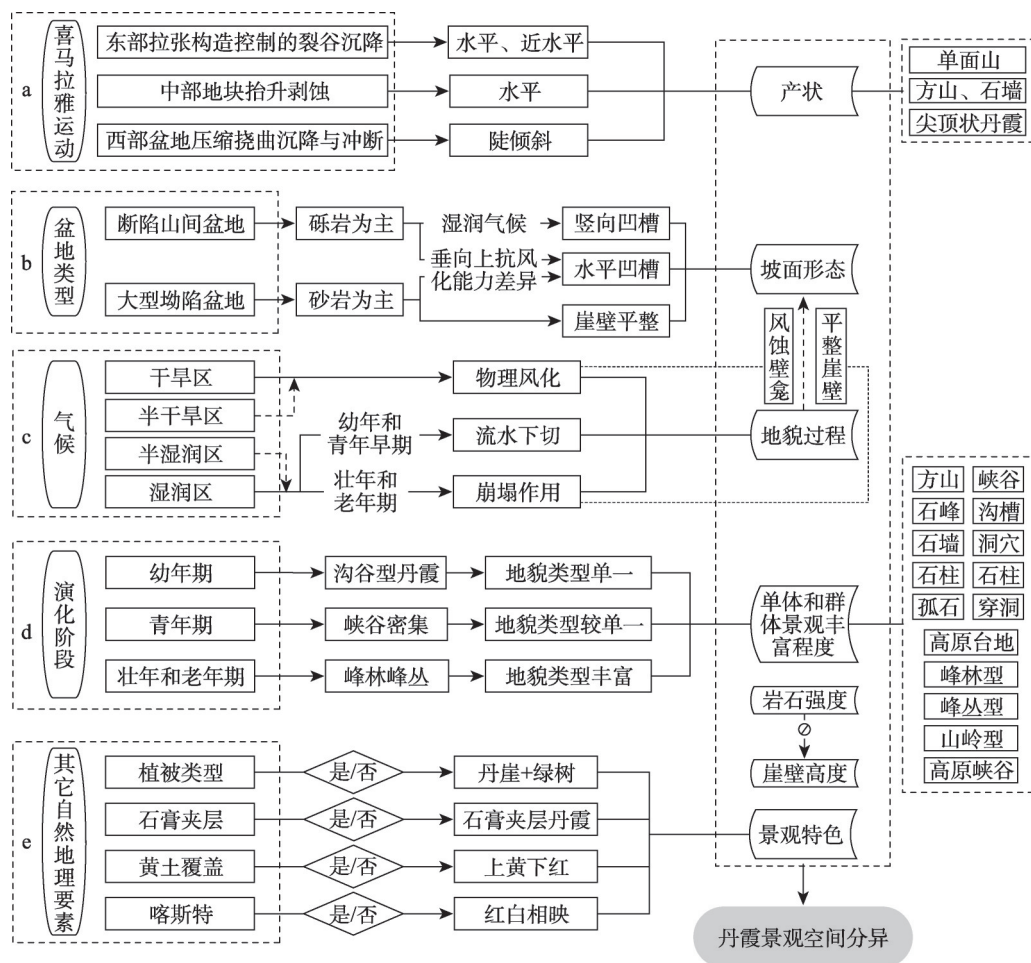


图 12 各影响因素对丹霞景观分异的影响

Fig. 12 Driving factors in the differentiation of Danxia landscapes

本文通过半定量方式，确定中国丹霞景观特征在空间上表现出显著分异，并将其划分为东南部、川渝黔边区、鄂尔多斯高原、鄂尔多斯盆地西南部、“天山—祁连”沿线、青藏高原地区6个各具特色的丹霞景观片区。

通过各区域丹霞景观对比，发现丹霞景观空间分异主要由喜马拉雅运动、盆地类型、气候、演化阶段、其他自然地理要素等共同控制。具体表现为，喜马拉雅运动中不同区域的构造特征控制岩层产状及丹霞地貌的密集程度；不同盆地岩性差异影响坡面形态；气候影响地貌过程，同时对坡面形态也有影响；地貌演化阶段影响单体和群体景观的丰富程度；其他自然地理要素，诸如植被类型、石膏层、黄土覆盖和喀斯特石林等影响丹霞景观的特色。

本文还发现，红层岩石单轴抗压强度变异很大，同一崖壁上岩石强度的显著变异会导致差异风化，影响坡面形态和地貌过程，而不同区域岩石强度的大小对崖壁高度影响不显著。

致谢：感谢国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>) 提供数据支撑；本文所使用《全国丹霞地

貌基础数据调查》数据集由彭华教授团队和黄进教授完成,谨此致谢。感谢泉州师范学院李永春教授对本文提出的修改建议。

参考文献(References)

- [1] Peng Hua, Pan Zhixin, Yan Luobin, et al. A review of the research on red beds and Danxia landform. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(9): 1170-1181. [彭华, 潘志新, 闫罗彬, 等. 国内外红层与丹霞地貌研究述评. *地理学报*, 2013, 68(9): 1170-1181.]
- [2] Feng Jinglan, Zhu Huisheng. Preliminary report on the geology and mineral resources of Chu Chiang, Jen Hua, Nan Hsiung and Shih Hsing Districts of Northern Kwangtung. *Annual Report of the Geological Survey of Kwangtung and Kwangsi*, 1927-1928. 1928. [冯景兰, 朱翊声. 广东曲江仁化始兴南雄地质矿产, 1927—1928年两广地质调查报告. 1928.]
- [3] Chen Guoda, Liu Huisi. Geology of Gongshui Basin in Jiangxi. *Jiangxi Geological Transactions*, 1939(2):1-64. [陈国达, 刘辉泗. 江西贡水流域地质. *江西地质汇刊*, 1939(2): 1-64.]
- [4] Huang Jin. A basic scenario of Danxia cliff development. *Tropical Geomorphology*, 1982, 3(2): 107-134. [黄进. 丹霞地貌坡面发育的一种基本方式. *热带地貌*, 1982, 3(2): 107-134.]
- [5] Qi Deli, Yu Rong, Zhang Renshun, et al. On the spatial pattern of Danxia landform in China. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 41-52. [齐德利, 于蓉, 张忍顺, 等. 中国丹霞地貌空间格局. *地理学报*, 2005, 60(1): 41-52.]
- [6] Huang Jin, Chen Zhijun, Qi Deli. Study on distribution of Danxia landform in China (First). *Mountain Research*, 2015, 33(4): 385-396. [黄进, 陈致均, 齐德利. 中国丹霞地貌分布(上). *山地学报*, 2015, 33(4): 385-396.]
- [7] Huang Jin, Chen Zhijun, Qi Deli. Distribution of Danxia landform in China (Last). *Mountain Research*, 2015, 33(6): 649-673. [黄进, 陈致均, 齐德利. 中国丹霞地貌分布(下). *山地学报*, 2015, 33(6): 649-673.]
- [8] Ouyang Jie, Huang Jin. Discussion on spatial distribution of Danxia landform in China. *Geospatial Information*, 2011, 9(6): 55-56. [欧阳杰, 黄进. 中国丹霞地貌空间分布的探讨. *地理空间信息*, 2011, 9(6): 55-56.]
- [9] Huang Jin, Chen Zhijun, Huang Keguoguang. Definition and classification of Danxia landform. The 1st National Danxia Landform Tourism Development Conference, 1992. [黄进, 陈致均, 黄可光. 丹霞地貌的定义及分类. 第1届全国丹霞地貌旅游开发会议, 1992.]
- [10] Peng Hua. *Danxia Landform*. Beijing: Science Press, 2020. [彭华. 丹霞地貌学. 北京: 科学出版社, 2020.]
- [11] Luo Ding, Xiao Yuanfu, Zhan Long, et al. The tectogenesis control of Danxia landform in southeast China. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science)*, 2010, 33(2): 147-153. [骆丁, 肖渊甫, 湛龙, 等. 中国东南部丹霞地貌的区域构造控制. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 33(2): 147-153.]
- [12] Zeng Zhaoxuan, Huang Shaomin. Red bed landforms in southeastern China. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 1978(1): 56-73. [曾昭璇, 黄少敏. 中国东南部红层地貌. *华南师院学报(自然科学版)*, 1978(1): 56-73.]
- [13] Zeng Zhaoxuan, Huang Shaomin. Red bed landforms in southeastern China (continued). *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 1978(2): 40-54. [曾昭璇, 黄少敏. 中国东南部红层地貌(续). *华南师院学报(自然科学版)*, 1978(2): 40-54.]
- [14] Zeng Zhaoxuan, Huang Shaomin. Red bed landforms in southeastern China and its utilization and transformation. *Tropical Geomorphology*, 1992, 13(1): 41-65. [曾昭璇, 黄少敏. 中国东南部红层地貌及其利用和改造. *热带地貌*, 1992, 13(1): 41-65.]
- [15] Peng Shaolin, Li Furong, Zhou Ting, et al. The ecological ravine effects of Danxia landform. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7): 2947-2953. [彭少麟, 李富荣, 周婷, 等. 丹霞地貌沟谷生态效应. *生态学报*, 2008, 28(7): 2947-2953.]
- [16] Wu Jin, Peng Shaolin, Lin Zhenguang, et al. The ecological effect on the hilltop of Danxia landform. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7): 3390-3400. [吴瑾, 彭少麟, 林真光, 等. 丹霞地貌山顶生态效应. *生态学报*, 2008, 28(7): 3390-3400.]
- [17] Luo Chengde, Wang Fujun. On the cliff culture of Danxia landform. *Journal of Leshan Normal University*, 2016, 31(12): 57-60. [罗成德, 王付军. 丹霞地貌崖文化初探. *乐山师范学院学报*, 2016, 31(12): 57-60.]
- [18] Ge Yunjian, Zhang Renshun. Research on the relation of overhanging coffin with Danxia landform. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2004, 27(3): 92-96. [葛云健, 张忍顺. 悬棺葬及其与丹霞地貌的关系. *南京师大学报(自然科学版)*, 2004, 27(3): 92-96.]
- [19] Zhang Renshun, Chen Zhijun, Qi Deli, et al. Humanities Kunlun, Mortal Heavenly Palace: Preliminary study on Kongtong Mountain Danxia culture. The 28th Annual Meeting of Tourism Geoscience and Geopark Research Branch of

- Chinese Geological Society and Guizhou Zhijindong National Geopark Construction and Tourism Development Seminar, Guizhou, 2013. [张忍顺, 陈致均, 齐德利, 等. 人文昆仑·凡间天宫: 崆峒山丹霞文化初步研究. 中国地质学会旅游地质与地质公园研究分会第28届年会暨贵州织金洞国家地质公园建设旅游发展研讨会, 贵州, 2013.]
- [20] Yan L B, Peng H A, Zhang S Y, et al. The spatial patterns of red beds and Danxia landforms: Implication for the formation factors, China. *Scientific Reports*, 2019, 9: 1961. DOI: 10.1038/s41598-018-37238-7.
- [21] Yan L B, Kasanin-Grubin M. Land degradation and management of red beds in China: Two case studies. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(11): 2591-2604.
- [22] Qi Deli. Multi-scale comparative study on Danxia landform in China [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2005. [齐德利. 中国丹霞地貌多尺度对比研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2005.]
- [23] Yang Wangtun. Study on formation mechanism of Danxia landform in southwest margin of Ordos Basin [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. [杨望墩. 鄂尔多斯盆地西南缘丹霞地貌形成机制研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.]
- [24] Liu Jianglong. Research on formation mechanism and geo-scientific effects of Danxia landform in southeast China [D]. Changsha: Central South University, 2009. [刘江龙. 中国东南部丹霞地貌形成机理及其地学效应研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.]
- [25] Bao Guangpu, Liu Chune, Huang Guangwen. Distribution, characteristics and evolution of Danxia landform in Qinghai. *Northwestern Geology*, 2019, 52(3): 199-208. [保广普, 刘春娥, 黄广文. 青海丹霞地貌的分布、特征及演化. 西北地质, 2019, 52(3): 199-208.]
- [26] Guo Fusheng, Liu Linqing, Yang Zhi, et al. Development of Danxia landform in Jiangxi Province and its regional planning for tourism. *Resources Survey & Environment*, 2007, 28(3): 214-222. [郭福生, 刘林清, 杨志, 等. 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, 2007, 28(3): 214-222.]
- [27] Huang Keguang, Zhang Bo. Characteristics of Danxia landform in Gansu and its development on tourism. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science Edition)*, 1994, 30(4): 57-61. [黄可光, 张勃. 甘肃丹霞地貌的特征及其旅游开发. 西北师范大学学报(自然科学版), 1994, 30(4): 57-61.]
- [28] Lv Huijin. Danxia landform and its tourism resource in the west central Zhejiang Province. *Geology of Zhejiang*, 2001, 17(2): 66-73. [吕惠进. 浙江省中西部地区丹霞地貌特征及其旅游资源. 浙江地质, 2001, 17(2): 66-73.]
- [29] Qiu Jianhua. Geometries and kinematics of cenozoic thrust and fold belt in the Southern Junggar Basin [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. [邱建华. 准噶尔南缘新生代逆冲褶皱带构造几何学和运动学[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.]
- [30] Li Yongchun, Hu Chunyuan, Li Zhiqiang, et al. Cognitive roadmap of Danxia landform definition. *China Terminology*, 2021, 23(3): 10-17. [李永春, 胡春元, 李志强, 等. 丹霞地貌定义的认知路线图. 中国科技术语, 2021, 23(3): 10-17.]
- [31] Guo Fusheng, Chen Liuqin, Yan Zhaobin, et al. Definition, classification, and danxianization of Danxia landscapes. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(2): 361-374. [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. 地质学报, 2020, 94(2): 361-374.]
- [32] Chen Anze. Discussion on some issues of Danxia landforms. The 19th National Tourism Geomorphology Annual Conference and Shaoguan Tourism Development Strategy Seminar, Shaoguan, Guangdong, China, 2005. [陈安泽. 丹霞地貌若干问题探讨. 全国第19届旅游地学年会暨韶关市旅游发展战略研讨会. 韶关, 2005.]
- [33] Peng Hua. A survey of Danxia landform research in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20(3): 203-211. [彭华. 中国丹霞地貌研究进展. 地理科学, 2000, 20(3): 203-211.]
- [34] Zhu C, Peng H, Ouyang J, et al. Rock resistance and the development of horizontal grooves on Danxia slopes. *Geomorphology*, 2010, 123(1-2): 84-96.
- [35] Chen Wei, Zhang Tianwen, He Lijun, et al. Lithologic characteristics in Huoshi Village, Ningxia Province and the influence on the formation of Danxia landform. *Journal of Geology*, 2022, 46(4): 375-380. [陈伟, 张天文, 何立军, 等. 宁夏火石寨岩石岩性特征及其对丹霞地貌形成的影响. 地质学刊, 2022, 46(4): 375-380.]
- [36] Chen Shu, Zhu Cheng, Peng Hua, et al. Anti-pressure experimental study on rocks in level Cave of Jinshiyan of Danxiashan in Guangdong Province. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2010, 33(2): 170-174. [陈姝, 朱诚, 彭华, 等. 广东丹霞山洞穴景观岩体稳定性的抗压实验研究. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2010, 33(2): 170-174.]
- [37] Yan L B, Peng H, Hu Z, et al. Stone pillar rockfall in Danxia landform area, Mt. Langshan, Hunan Province, China. *Physical Geography*, 2016, 37(5): 327-343.
- [38] Pagani M, Garcia-Pelaez J A, Gee R, et al. The 2018 version of the Global Earthquake Model: Hazard component. *Earthquake Spectra*, 2020, 36(suppl.1): 226-251.
- [39] Jia Chengzao. The characteristics of intra-continental deformation and hydrocarbon distribution controlled by the

- Himalayan tectonic movements in China. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(4): 96-104. [贾承造. 中国喜马拉雅构造运动的陆内变形特征与油气矿藏富集. *地学前缘*, 2007, 14(4): 96-104.]
- [40] Liao Ke. *The National Physical Atlas of China*. Beijing: SinoMaps Press, 1999. [廖克. 中华人民共和国国家自然地图集. 北京: 中国地图出版社, 1999.]
- [41] Rosenblatt M. Remarks on some nonparametric estimates of a density function. *Annals of Mathematical Statistics*, 1956, 27(3): 832-837.
- [42] Parzen E. On estimation of a probability density function and mode. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1962, 33(3): 1065-1076.
- [43] Huang Jin, Chen Zhijun. The discussion on the definition and classification to Danxia landform. *Economic Geography*, 2003, 23(Suppl.): 6-11. [黄进, 陈致均. 丹霞地貌定义及分类中一些问题的探讨. *经济地理*, 2003, 23(增刊): 6-11.]
- [44] Bernard T, Sinclair H D, Gailleton B, et al. Lithological control on the post-orogenic topography and erosion history of the Pyrenees. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 518: 53-66.
- [45] Liang S M, Gan W J, Shen C Z, et al. Three-dimensional velocity field of present-day crustal motion of the Tibetan Plateau derived from GPS measurements. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2013, 118(10): 5722-5732.
- [46] Zhao Ting, Zhao Xun, Peng Hua, et al. *On Danxia landform*. Beijing: Geological Publishing House, 2011. [赵汀, 赵逊, 彭华, 等. 论丹霞地貌. 北京: 地质出版社, 2011.]
- [47] Shu Liangshu. An analysis of principal features of tectonic evolution in south China Block. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(7): 1035-1053. [舒良树. 华南构造演化的基本特征. *地质通报*, 2012, 31(7): 1035-1053.]
- [48] Wang D Z, Shu L S. Late Mesozoic Basin and range tectonics and related magmatism in Southeast China. *Geoscience Frontiers*, 2012, 3(2): 109-124.
- [49] Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Su Wenchao, et al. The relationship between uranium metallogenesis and crustal extension during the Cretaceous-Tertiary in south China. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1): 153-160. [胡瑞忠, 毕献武, 苏文超, 等. 华南白垩—第三纪地壳拉张与铀成矿的关系. *地学前缘*, 2004, 11(1): 153-160.]
- [50] Shu L S, Zhou X M, Deng P, et al. Mesozoic-Cenozoic basin features and evolution of southeast China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2007, 81(4): 573-586.
- [51] Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, et al. Geological features and tectonic evolution of Meso-Cenozoic basins in southeastern China. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(9-10): 876-884. [舒良树, 周新民, 邓平, 等. 中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化. *地质通报*, 2004, 23(9-10): 876-884.]
- [52] Ren J Y, Tamaki K, Li S T, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 2002, 344(3-4): 175-205.
- [53] Wang Y, Wang Y J, Li S B, et al. Exhumation and landscape evolution in eastern South China since the Cretaceous: New insights from fission-track thermochronology. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 191: 104239. DOI: 10.1016/j.jseas.2020.104239.
- [54] Lu Huafu, Jia Chengzao, Jia Dong, et al. Features of the thrust wedge of deformation belt in Kuqa rejuvenation foreland basin. *Geological Journal of China Universities*, 2001, 7(3): 257-271. [卢华复, 贾承造, 贾东, 等. 库车再生前陆盆地冲断构造楔特征. *高校地质学报*, 2001, 7(3): 257-271.]
- [55] Wang Xin, Jia Chengzao, Yang Shufeng. Geometry and kinematics of the Kuqa fold-and-thrust belt in the southern Tianshan. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37(3): 372-384. [汪新, 贾承造, 杨树锋. 南天山库车褶皱冲断带构造几何学和运动学. *地质科学*, 2002, 37(3): 372-384.]
- [56] Sun J M, Zhu R X, Bowler J. Timing of the Tianshan Mountains uplift constrained by magnetostratigraphic analysis of molasse deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 219(3-4): 239-253.
- [57] Tian Y T, Kohn B P, Qiu N S, et al. Eocene to Miocene out-of-sequence deformation in the Eastern Tibetan Plateau: Insights from shortening structures in the Sichuan Basin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(2): 1840-1855.
- [58] Richardson N J, Densmore A L, Seward D, et al. Extraordinary denudation in the Sichuan Basin: Insights from low-temperature thermochronology adjacent to the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B4): B04409. DOI: 10.1029/2006JB004739.
- [59] Deng Bin, Liu Shugen, Li Zhiwu, et al. A comparative study of the late Mesozoic uplifting in the eastern margin of Qinghai-Tibet Plateau and Sichuan Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2008, 35(4): 477-486. [邓宾, 刘树根, 李智武, 等. 青藏高原东缘及四川盆地晚中生代以来隆升作用对比研究. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 35(4): 477-486.]

- [60] Song Yougui, Fang Xiaomin, Li Jijun, et al. The late Cenozoic uplift of the Liupan Shan, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001, 31(Suppl.1): 142-148. [宋友桂, 方小敏, 李吉均, 等. 晚新生代六盘山隆升过程初探. *中国科学D辑: 地球科学*, 2001, 31(增刊1): 142-148.]
- [61] Chen Xiaolong. Sedimentary records and significance of Late Cretaceous Linzhou Basin in Lhasa, Tibet: Taking "shexing formation" as an example [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020. [陈小龙. 西藏拉萨晚白垩世林周盆地沉积记录及意义: 以“设兴组”为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.]
- [62] Zeng Xianjin, Wang Ming, Fan Jianjun, et al. Lhasa-Qiangtang collision: Constraints from Late Cretaceous red beds in Asa, Tibet. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(9): 1428-1442. [曾先进, 王明, 范建军, 等. 拉萨—羌塘板块碰撞: 来自西藏阿索晚白垩世红层的约束. *地质通报*, 2021, 40(9): 1428-1442.]
- [63] Zhang Jiaodong, Hao Tianyao, Fan Dehua, et al. Identification of geological time of Mesozoic strata in Hefei Basin and its significance. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(5): 599-608. [张交东, 郝天珧, 樊德华, 等. 合肥盆地中生界的地层时代判识及意义. *地质学报*, 2009, 83(5): 599-608.]
- [64] Tang Liangjie, Jin Zhijun, Zhang Mingli, et al. An analysis on tectono-paleogeography of the Qaidam Basin, NW China. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(4): 421-429. [汤良杰, 金之钧, 张明利, 等. 柴达木盆地构造古地理分析. *地质学报*, 2000, 7(4): 421-429.]
- [65] Xi Dangpeng, Li Gang, Wan Xiaoqiao, et al. Yaojia-Lower Nenjiang formations and lake evolution of southeastern Songliao Basin, NE China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2009, 48(3): 556-568. [席党鹏, 李罡, 万晓樵, 等. 松辽盆地东南区姚家组—嫩江组一段地层特征与湖泊演变. *古生物学报*, 2009, 48(3): 556-568.]
- [66] Hou Hesheng, Wang Chengshan, Zhang Jiaodong, et al. Deep continental scientific drilling engineering in Songliao Basin: Progress in earth science research. *Geology in China*, 2018, 45(4): 641-657. [侯贺晟, 王成善, 张交东, 等. 松辽盆地大陆深部科学钻探地球科学研究进展. *中国地质*, 2018, 45(4): 641-657.]
- [67] Li Chen, Chen Shiyue, Pu Xiugang, et al. Stratigraphic subdivision and correlation of the Mesozoic in the Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 2022. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220623.1812.008.html>. [李晨, 陈世悦, 蒲秀刚, 等. 渤海湾盆地中生代地层划分与对比. *地球科学*, 2022. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220623.1812.008.html>.]
- [68] Zhang Maoheng. Sedimentary infilling and environmental changes of the northern Jiangsu Basin since Latest Miocene recorded in Xinghua Cores [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2009. [张茂恒. 中新世末期以来苏北盆地沉积环境演化的兴化钻孔记录[D]. 南京: 南京师范大学, 2009.]
- [69] Jin Ruoshi, Cheng Yinhang, Li Jianguo, et al. Late Mesozoic continental basin "Red and Black Beds" coupling formation constraints on the sandstone uranium mineralization in northern China. *Geology in China*, 2017, 44(2): 205-223. [金若时, 程银行, 李建国, 等. 中国北方晚中生代陆相盆地红—黑岩系耦合产出对砂岩型铀矿成矿环境的制约. *中国地质*, 2017, 44(2): 205-223.]
- [70] Tan Xiaodong, Fang Dajun, Wang Pengyan, et al. Paleomagnetic study of the Mesozoic and Cenozoic bore hole in north Tarim Basin: Himalayan remagnetization and hydrocarbon migration and collection. *Chinese Journal of Geophysics*, 1995, 38(5): 688-691. [谈晓冬, 方大钧, 王朋岩, 等. 塔里木盆地北部中、新生代钻孔岩芯古地磁研究: 喜山期岩石重磁化与油气移聚. *地球物理学报*, 1995, 38(5): 688-691.]
- [71] Arne D, Worley B, Wilson C, et al. Differential exhumation in response to episodic thrusting along the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 1997, 280(3/4): 239-256.
- [72] Kirby E, Reiners P W, Krol M A, et al. Late Cenozoic uplift and landscape evolution along the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He thermochronology. *Tectonics*, 2002, 21(1): 1001. DOI: 10.1029/2000TC001246.
- [73] Chang J, Glorie S, Qiu N S, et al. Late Miocene (10.0 similar to 6.0 Ma) rapid exhumation of the Chinese South Tianshan: Implications for the timing of aridification in the Tarim Basin. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(3): e2020GL090623. DOI: 10.1016/j.tecto.2019.228279.
- [74] Meng Q Q, Song C H, Nie J S, et al. Middle-late Miocene rapid exhumation of the southern Qilian Shan and implications for propagation of the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 2020, 774: 228279. DOI: 10.1016/j.tecto.2019.228279.
- [75] Turner P. *Continental Red Beds*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1980.
- [76] Jiang Xinsheng, Pan Zhongxi. *Cretaceous Desert and Climate in China*. Beijing: Geological Publishing House, 2005. [江新胜, 潘忠习. 中国白垩纪沙漠及气候. 北京: 地质出版社, 2005.]
- [77] Yang Guochen. Sequence filling and tectonic-lithofacies paleogeographic evolution from Late Jurassic to Neogene in Sichuan Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010. [杨国臣. 四川盆地晚侏罗世至新近纪层序充填及

- 构造—岩相古地理演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.]
- [78] Liu Chiyang, Zhao Hongge, Gui Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 617-638. [刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化—改造的时空坐标及其成藏(矿)响应. *地质学报*, 2006, 80(5): 617-638.]
- [79] Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Qiu Xinwei, et al. Geodynamic environment and tectonic attributes of the hydrocarbon-rich sag in Yanchang Period of Middle-Late Triassic, Ordos Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(6): 1913-1930. [刘池洋, 王建强, 邱欣卫, 等. 鄂尔多斯盆地延长期富烃坳陷形成的动力学环境与构造属性. *岩石学报*, 2020, 36(6): 1913-1930.]
- [80] Chen Yifang, Chen Jiuhui, Guo Biao, et al. Crustal structure and deformation between different blocks in the northern part of the western margin of Ordos. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(3): 886-896. [陈一方, 陈九辉, 郭彪, 等. 鄂尔多斯西缘北段的地壳结构和块体间变形关系. *地球物理学报*, 2020, 63(3): 886-896.]
- [81] Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Yu Lin, et al. The transfer of depocenters and accumulation centers of Ordos Basin in Mesozoic and its meaning. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(4): 540-552. [赵俊峰, 刘池洋, 喻林, 等. 鄂尔多斯盆地中生代沉积和堆积中心迁移及其地质意义. *地质学报*, 2008, 82(4): 540-552.]
- [82] Zhao Xiaochen, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, et al. Mesozoic geological events and its evolution sequence of the northern north-south tectonic belt, China. *Geological Review*, 2018, 64(6): 1324-1338. [赵晓辰, 刘池洋, 王建强, 等. 中国南北构造带北部中生代地质事件及其演化序列. *地质论评*, 2018, 64(6): 1324-1338.]
- [83] Yang Minghui, Liu Chiyang, Zeng Peng, et al. Prototypes of Late Triassic sedimentary basins of North China Craton (NCC) and deformation pattern of its early destruction. *Geological Review*, 2012, 58(1): 1-18. [杨明慧, 刘池洋, 曾鹏, 等. 华北克拉通晚三叠世沉积盆地原型与破坏早期构造变形格局. *地质论评*, 2012, 58(1): 1-18.]
- [84] Yu Hongdian, Chen Hanlin, Cheng Xiaogan, et al. Spatial variation and controlling factors of deformation in the western segment of the southern Tianshan fold-thrust belt. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(6): 1689-1703. [余宏甸, 陈汉林, 程晓敢, 等. 南天山褶皱冲断带西段变形空间差异性及其控制因素. *地质学报*, 2020, 94(6): 1689-1703.]
- [85] Seybold H, Berghuijs W R, Prancevic J P, et al. Global dominance of tectonics over climate in shaping river longitudinal profiles. *Nature Geoscience*, 2021, 14(7): 503-507.
- [86] Peifer D, Persano C, Hurst M D, et al. Growing topography due to contrasting rock types in a tectonically dead landscape. *Earth Surface Dynamics*, 2021, 9(2): 167-181.
- [87] Davis M W. The geographical cycle. *The Geographical Journal*, 1899, 14(5): 481-504.
- [88] Cui Zhijiu, Hong Yun, Gao Quanzhou, et al. The process and environment of Polaeokarst in the northeast area of Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(5): 408-417. [崔之久, 洪云, 高全洲, 等. 青藏高原东北部古喀斯特过程与环境. *地理学报*, 1996, 51(5): 408-417.]

Spatial differentiation of Danxia landscapes in China and its influencing factors

YAN Luobin^{1,2}, HUANG Cheng^{1,2}, LI Hongwei³, ZHANG Ke⁴,

YUAN Wanming⁵, TIAN Yuntao⁴, QI Deli⁶

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. New Liberal Arts Laboratory for Sustainable Development of Rural Western China, Chongqing 400715, China;

3. Guangdong Geological Survey Institute, Guangzhou 510080, China; 4. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519080, Guangdong, China; 5. Institute of Earth Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 6. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Danxia landscapes are a landscape feature with the Danxia landform as the main body, and are widely distributed in China. An in-depth understanding of the landscape differentiation on a national scale is essential for the protection and utilization of Danxia landscapes as tourism resource. Based on data such as lithology, cliff height, stratum attitude, rock strength, and other data, this study quantitatively analyzes the spatial pattern of Danxia landscapes. Combining these data with the understanding from an on-site survey of more than 200 Danxia landforms across the country, the differentiation of Chinese Danxia landscapes is semi-quantitatively determined. Based on multiple geologic and geomorphologic factors, the Danxia landscape in China is divided into six distinctive regions: Southeast China, the Sichuan-Chongqing-Guizhou junction, the Ordos Plateau, the southwestern Ordos Basin, "Tianshan-Qilian", and the Qinghai-Tibet Plateau. Through the national-scale comparison of Danxia landscapes, six key characteristics are noted. The basin size of red-bed deposits and the crustal uplift and subsidence during the Himalayan movement jointly controlled the spatial distribution of the Danxia landforms, while the tectonic deformation characteristics in different regions controlled the inclination of strata. The spatial lithological differences among different types of the basins affect the slope morphology. Rock strength has little effect on cliff height, but the difference in vertical rock strength affects the slope shape, which in turn affects the geomorphological process. The landform evolution stages affect the richness of individual and group landscapes. Finally, climate influences the currently active geomorphic processes, and the combination of vegetation and landforms in different climate zones shapes different Danxia landscape features and aesthetics. Nationally, the spatial distribution of Danxia characteristics is a regional manifestation of tectonic evolution, Earth's surface environment, and other factors.

Keywords: Danxia landscape; Danxia landform; spatial differentiation; landscape differentiation; Himalayan tectonic plate movement