

文章编号: 1008-2786-(2020)2-210-12

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000503

美国西部丹霞地貌特征及演化过程研究 ——以犹他州 Zion 国家公园为例

潘志新¹, 任 舫^{2*}

(1. 海南大学 旅游学院, 海口 570228; 2. 中国地质科学院, 北京 100037)

摘 要: 丹霞地貌是一种重要的风景地貌, 研究其地貌特征和演化过程可以为保护与利用这一地质遗迹提供科学支持。中生代红层是我国丹霞地貌发育的物质基础, 在美国西部的科罗拉多高原亦有大量分布。为增进国内同行对美国西部红层与丹霞地貌的了解, 以犹他州 Zion 国家公园为例, 通过实地考察, 岩样理化性质测试, 并结合 GIS 和 DEM 分析, 对其地貌特征和演化过程进行探讨。结果表明: 区域构造方面, Zion 公园红层沉积于大型的弧后盆地——西部内陆盆地, 盆地抬升时形成的节理群对丹霞地貌发育具有控制作用; 红层岩性方面, Zion 公园发育丹霞地貌的红层以风沙沉积为主, 岩性为细砂—粉砂岩, 但不同段的风成砂岩在胶结特性和岩石强度上存在较大差异; 地貌特征方面, Zion 公园整体为高原—深切峡谷景观, 其中高程为 1800 ~ 2000 m 的部分占比最大, 公园南部比北部切割侵蚀程度更高, 形成的单体地貌以块状山崖—沟谷组合为主, 同时还因地下水的基部渗流侵蚀和风蚀作用在崖壁上发育有各种洞穴景观; 演化过程方面, Zion 公园丹霞地貌发育经历了构造盆地形成—红层堆积—地壳隆升—外力塑造四个阶段, 三叠纪末期形成的西部内陆盆地为红层堆积提供了相对稳定的沉积环境, 侏罗纪期间干旱的气候环境下形成了大规模的风沙沉积, 白垩纪末期科罗拉多高原的抬升及形成的节理裂隙为外力侵蚀提供了条件。其中, 强烈的流水下切是该地区丹霞地貌发育的主导外营力, 并一直持续至今。

关键词: 红层; 丹霞地貌; 地貌特征; 演化过程; Zion 国家公园

中图分类号: P931

文献标志码: A

丹霞地貌是我国地质、地貌学家命名的一种特殊地貌类型。其中, 形成丹霞地貌的岩石物质基础为红层, 其典型的形态特征为红色陡崖坡^[1]。历经八十多年几代学者的努力, 中国丹霞地貌研究取得了诸多成果, 并逐渐由以宏观定性描述为主发展到以微观定量研究为主^[2-4]。但长期以来, 丹霞地貌的研究局限于国内, 和国际同行交流较少, 国内学者对国外的红层与丹霞地貌了解较为有限。直到近年来, 在国际地貌学家协会红层与丹霞地貌工作组的推动下, 国内丹霞地貌学者开始去实地认识和了解

国外的丹霞地貌^[5-6]。

根据文献资料和野外考察得知, 发育丹霞地貌的红层并不局限于中国, 在国外很多地区都有广泛分布^[7-8]。其中, 美国西部的科罗拉多高原地区是全球中生代红层的集中连片分布区, 在干旱气候条件下也发育形成了很多丹霞景观。虽然科罗拉多高原是美国基础地质研究比较深入的地区, 但大多是关于该地区的地质构造背景和古地理环境特征的研究, 有关美国西部红层岩性特征与地貌发育关系的专题研究并不多见。现有涉及美国西部红层的文献

收稿日期(Received date): 2019-11-08; 改回日期(Accepted date) 2020-04-09

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41761002)。[National Natural Science Foundation of China (41761002)]

作者简介(Biography): 潘志新(1986-), 男, 江西婺源人, 博士, 讲师, 主要研究方向: 红层与丹霞地貌研究。[PAN Zhixin (1986-), male, born in Wuyuan, Jiangxi province, Ph. D., lecture, research on red beds and Danxia landform] E-mail: panzhix@mail2.sysu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 任舫(1983-), 女, 江西玉山人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向: 红层与丹霞地貌研究。[REN Fang (1983-), female, born in Yushan, Jiangxi province, Ph. D., assistant researcher, research on red beds and Danxia landform] E-mail: fren2014@hotmail.com

也很分散,大多是关于某个红层岩性组的古地磁^[9-10]、沉积环境^[11-12]及相关地质构造^[13-14]的研究,或者是针对红色砂岩的微观风化过程研究^[15],没有可直接用于和中国丹霞地貌进行对比研究的地质地貌数据。本研究以犹他州 Zion 国家公园(宰恩国家公园,也译为锡安国家公园,以下简称为 Zion 公园)为例,通过野外地质地貌调查、采集岩样进行理化特征分析,同时结合 GIS 和 DEM 分析,力图阐述美国西部典型红层的岩石特性和丹霞地貌特征,并揭示其地貌演化过程,为下一步开展中美丹霞地貌的国际对比研究提供依据。

1 区域概况

1.1 地理区位

Zion 公园位于美国犹他州西南部 Springdale 附近,是该州设立的第一个国家公园,北距犹他州首府——盐湖城 480 km,南距大峡谷国家公园(Grand Canyon National Park) 320 km,西南距拉斯维加斯 250 km,总面积约为 590 km²(图 1)。公园整体地势自西向东缓倾,海拔 1117~2660 m。Zion 公园深居内陆,属温带大陆性气候,多年日平均气温为 16.8℃(极端最高和最低气温分别为 46℃和 -26℃),多年平均降水量为 411.2 mm。

根据不同的流域水系,Zion 公园可分为西北部的 Kolob 峡谷区和东南部的 Zion 峡谷区两大片区。其中,Kolob 峡谷区主要受 Taylor Creek 水系侵蚀切割,形成以平行指状峡谷为主的景观;而 Zion 峡谷区是 Zion 公园的主体,它由维京河(Virgin River,科罗拉多河的一级支流)的北部支流(North Fork)切割侵蚀而成(图 1 和图 2),对公园东南片区的地貌发育具有整体控制作用,以连续高耸的砂岩崖壁和密集的峡谷群为特征,也是本研究的重点区域。

1.2 地质构造背景

在区域构造演化上,Zion 公园抬升之前属北美西部内陆盆地(Western Interior Basin)的一部分,它是三叠纪末由太平洋板块向北美板块西部俯冲碰撞形成的一个大型弧后盆地^[16]。到白垩纪末,拉拉米造山运动(Laramide Orogeny)使落基山脉隆起,该弧后盆地结束沉积,抬升形成科罗拉多高原^[17]。与此同时,在区域地壳抬升过程中,弧后拉张作用使科罗拉多高原的西部边缘发生破裂断陷,形成很多断层和节理,Zion 公园即为这样的一个断块体^[18]。不过在公园内,断层很少,但节理分布却很密集,特别是北北西向(350°)和北北东向(20°)两组节理群,它们对 Zion 峡谷两侧山块的展布和峡谷群的发育具有重要影响(图 3)。

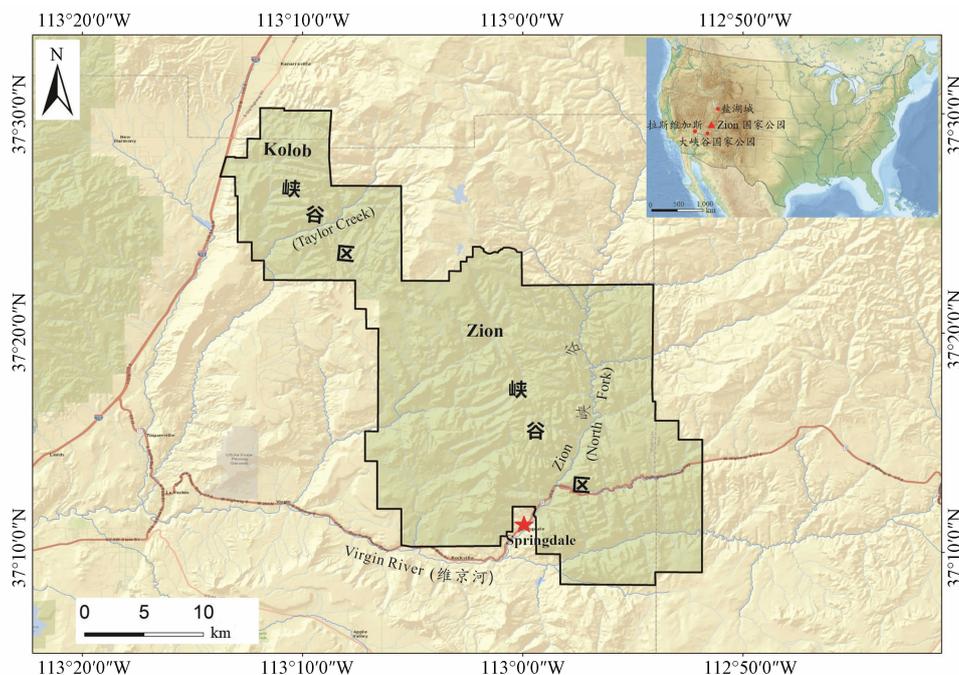


图 1 Zion 公园的地理位置

Fig. 1 Geographical location of Zion National Park

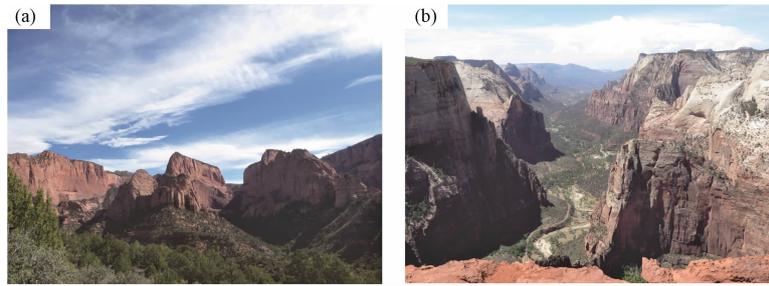


图 2 Zion 公园西北部 Kolob 峡谷区的指状峡谷群 (a) 和东南部的 Zion 大峡谷 (b)

Fig.2 Finger canyons in the northwest section of Kolob Canyon (a) and Zion Canyon in the southeast section of Zion National Park (b)

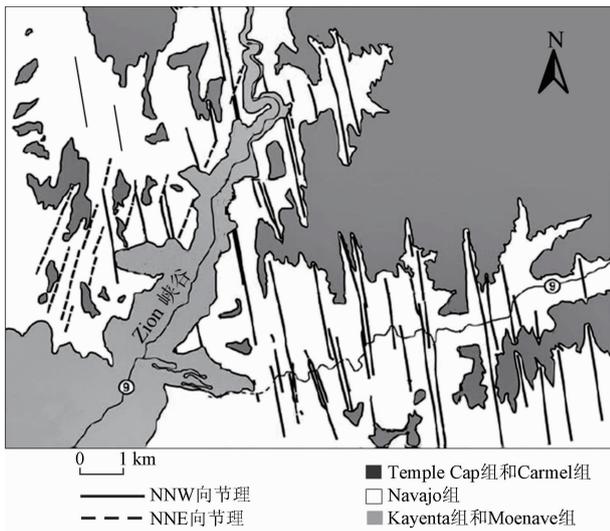


图 3 Zion 峡谷区北北西和北北东向节理分布

(据 Rogers 等,2004)

Fig.3 NNW and NNE trending joints in Zion Canyon Section

(Modified from Rogers et al, 2004)

2 地层和岩性特征

Zion 公园出露的岩层自下而上—共可分为 9 组,形成于晚二叠世—早白垩世期间(图 4)。由于区域构造演化和海侵海退,这些岩层的沉积环境较为复杂,但总体以陆相为主,滨—浅海相或海陆过渡相只占很少一部分。其中,地层底部的 Kaibab 组石灰岩和顶部的 Dakota 组砂岩出露面积很小,只在 Kolob 峡谷的边缘地区有所出露。公园内大面积出露并发育丹霞地貌的主体地层为形成于侏罗纪的红层。在岩层产状方面,公园内几乎没有褶皱分布,断层也较少,岩层整体变形较少,产状几乎近水平。

红层岩性方面,Zion 公园发育丹霞地貌的地层自下而上分别是 Moenave 组 (*Jm*)、Kayenta 组 (*Jk*)、

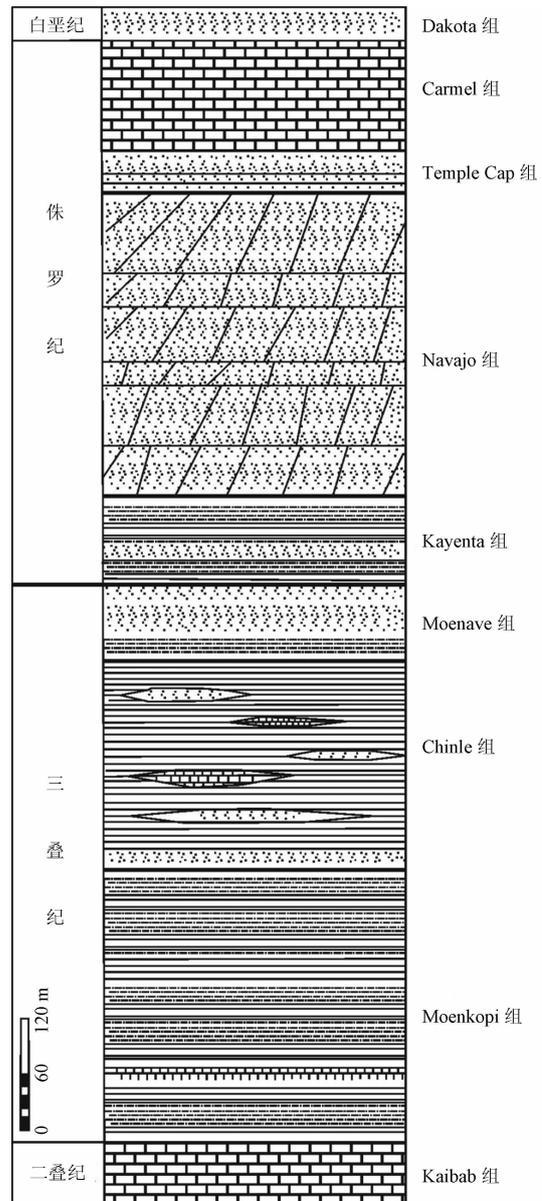


图 4 Zion 公园的地层柱状图(据 Biek 等,2000)

Fig.4 Stratigraphic section for Zion National Park

(Modified from Biek et al, 2000)

Navajo 组 (*Jn*) 和 Temple Cap 组 (*Jt*), 各岩性组特征如下:

2.1 Moenave 组 (*Jm*)

Moenave 组形成于早侏罗世, 主要出露于 Zion 峡谷南段入口附近的谷底两侧, 自下而上分为 Dinosaur Canyon 段和 Whitmore Point 段。其中, Dinosaur Canyon 段主要为红褐色细砂和粉砂岩, 并含薄层理; Whitmore Point 段除红褐色细砂和粉砂岩外, 还含紫红色—灰绿色泥岩夹层和白云质石灰岩夹层^[19-20] (图 5a)。

2.2 Kayenta 组 (*Jk*)

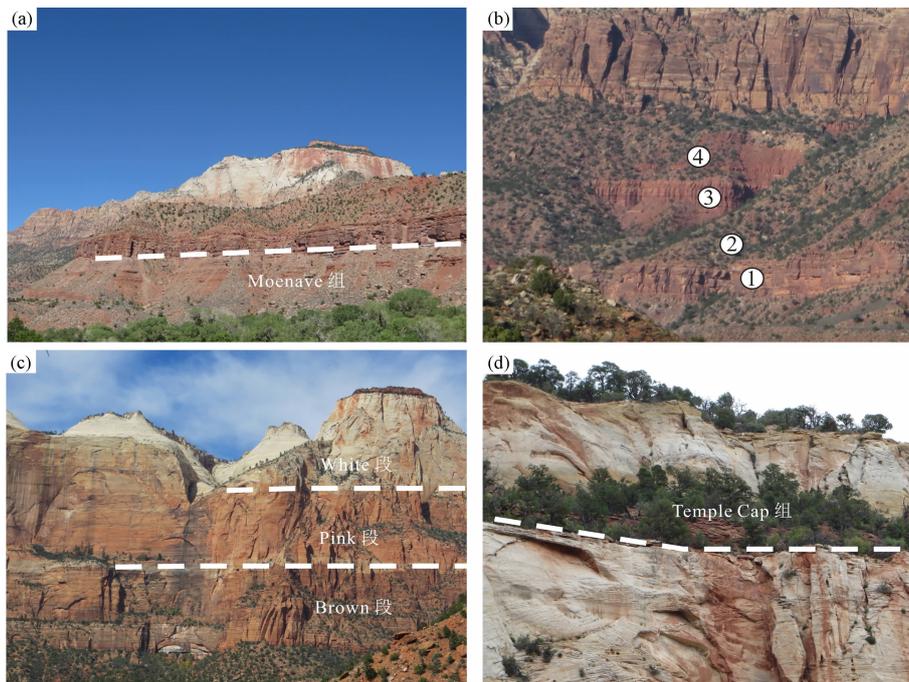
Kayenta 组也主要出露于 Zion 峡谷南段底部, 自下而上可分为 Springdale 段、Main Body 段、Lamb Point Tongue 段和 Tenney Canyon Tongue 段 (图 5b)^[21]。其中, Springdale 段由红色细砂—粉砂岩组成, 几乎不含软岩夹层, 在主崖壁下方发育形成一段低矮的崖壁, 而 Main Body 段和 Tenney Canyon Tongue 段都为静水河流或湖泊沉积, 主要为红色细砂、粉砂岩组成, 并夹薄层泥岩, 它们之间被一砂岩陡坎隔开, 形成这一砂岩陡坎的是风成相 Lamb Point Tongue 段, 它由白色细砂岩组成, 具明显的板状交错层理, 最大厚度约 37 m, 并向西尖灭, 表明了

其曾经历短暂的沙漠环境^[22]。

2.3 Navajo 组 (*Jn*)

形成于早—中侏罗世的 Navajo 组是 Zion 公园丹霞地貌主崖壁发育的地层, 它形成于内华达山脉东部广袤的内陆沙漠环境^[23-24], 是 Zion 公园乃至整个科罗拉多高原地区最具标志性的地层, 也是世界上出露面积最大的风沙沉积^[25], 其典型特征是具有大型板状交错层理 (图 6)。岩性特征上, Navajo 组为分选很好、质地均一的石英砂岩 (石英含量在 90% 以上), 以细砂—粉砂结构为主, 主要胶结物为钙质或铁质。因后期发生颜色变异, Navajo 砂岩崖壁自上而下可分为 White 段 (白色段)、Pink 段 (粉红色段) 和 Brown 段 (褐色段) (图 5c)。

关于 Navajo 砂岩颜色变异的成因, 有研究认为这是碳氢化合物的漂白作用所致^[26-27]。Navajo 组砂岩的沉积环境为沙漠, 其沉积时的颜色为红色。由于其颗粒均一、孔隙率高 (10% ~ 30%), 且分布面积广, 使 Navajo 组形成了很好的储油层^[28]。后期的造山运动使该区域的地壳抬升, 并在 Navajo 组砂岩体内形成很多节理裂隙。在抬升过程中, Navajo 砂岩储油层中富集的低密度、具有还原性的碳氢化合物沿着这些节理裂隙向上运动, 并与岩体内的铁



注: ①Springdale 段; ②Main Body 段; ③Lamb Point Tongue 段; ④Tenney Canyon Tongue 段

图 5 形成 Zion 公园丹霞地貌的红层岩性组/段

Fig. 5 Red bed formations and members for the development of Danxia landforms in Zion National Park

质胶结物(主要成分是赤铁矿, Fe_2O_3)发生还原反应,使 Fe^{3+} 变成了 Fe^{2+} 。由于碳氢化合物不断往上聚集,Navajo 组砂岩越往上颜色越白。

2.4 Temple Cap 组(Jt)

Navajo 组之上为形成于中侏罗世的 Temple Cap 组,它们之间为一不整合面,标志着 Navajo 组风沙沉积结束后曾遭受剥蚀。Temple Cap 组出露于 Navajo 砂岩崖壁顶部,可分为上下两段,下段为 Sinawava 段,厚度为 12 ~ 18 m,由红色粉砂、泥岩组成;上段为 White Throne 段,它和 Navajo 组 White 段类似,由白色—淡黄色细砂岩组成,也具有大规模的板状交错层理,厚度在 60 m 以内,表明其经历了沙漠环境的短期回返(图 5d)。

在野外考察过程中,笔者沿 Zion 峡谷采集了这 4 个红层岩性组的岩样带回实验室进行岩矿薄片鉴定和岩样元素氧化物含量测定,并且在野外考察过程中还使用施密特回弹应力仪对各采样岩性段的岩石强度进行原位测定。根据相关岩性特征分析结果

得知,形成 Zion 公园丹霞地貌的红层均为细砂—粉砂岩,部分岩层含软弱的泥/页岩夹层,但缺乏砾岩和砂砾岩等粗碎屑堆积。其中,Navajo 组砂岩和 Kayenta 组的 Lamb Point Tongue 段,以及 Temple Cap 组的 White Throne 段均为风沙沉积,都由细粒均一的石英砂岩组成(SiO_2 含量均在 90% 以上),但它们的岩石结构和胶结特性存在差异,岩石强度也不尽相同。其中,Navajo 组 White 段(图 7a)和 Kayenta 组 Lamb Point Tongue 段(图 7b),以及 Temple Cap 组的 White Throne 段(图 7c)铁质胶结物都很少,岩石外观呈白色或淡黄色,尤其是 Navajo 组 White 段,偏光显微镜下显示其颗粒间多为点状接触,孔隙较大,为弱胶结型,导致其岩石强度较低,颗粒容易剥落。相比之下,Navajo 砂岩崖壁中下部的 Pink 段(图 7d)和 Brown 段(图 7e)因颗粒周围普遍有铁质胶结物包裹,外观呈褐红色,且粒间接触更紧密(多为线状接触),岩石强度也要大很多,颗粒不易剥落。



图 6 Zion 公园 Navajo 砂岩崖壁上的大型板状交错层理

Fig. 6 Large tabular cross-bedding on Navajo cliff walls in Zion National Park

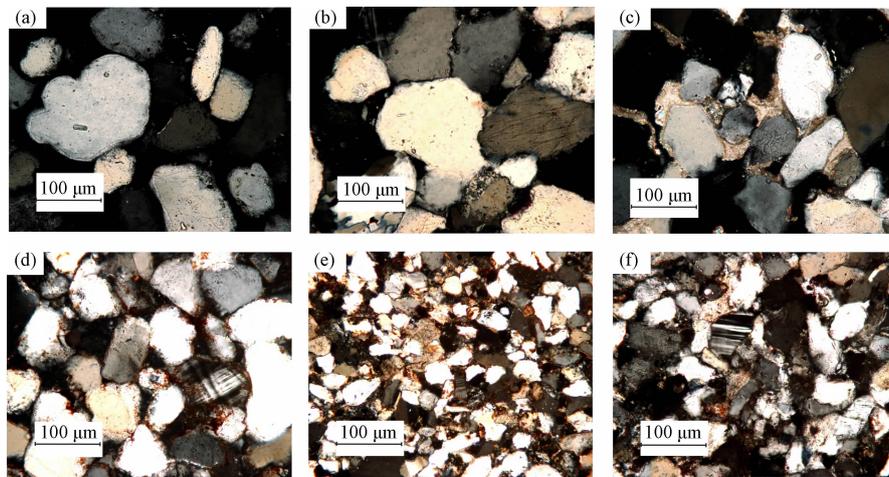


图 7 Zion 公园红层岩样偏光显微镜下图像

Fig. 7 Photos of red bed rock samples of Zion National Park under polarized light microscope

此外,形成于河流环境的 Kayenta 组 Springdale 段为红色细砂岩组成,其碎屑颗粒分选好,胶结物兼具铁质和钙质,颗粒以线状接触为主(图 7f),岩石强度也较大,在 Navajo 砂岩主崖壁下方也形成了一层低矮的小崖壁。至于其它形成于河流或湖泊环境的红层岩性组/段,它们几乎都由细砂—粉砂岩和泥/页岩互层组成,在岩石结构、主要氧化物含量等方面较接近,都为铁质或钙质胶结,除软岩夹层外,它们的岩石强度总体较小。

3 Zion 公园丹霞地貌特征

3.1 群体地貌特征

与以往研究中定性描述丹霞地貌区的整体地形地势不同,本研究基于 Zion 公园 10 m 分辨率的 DEM 数据(由美国地质调查局发布,Zion 公园提供),在 ArcGIS 平台上提取高程等地形要素,绘制高程分级图和典型高程剖面,对其群体地貌特征进行定量分析,并探讨其与其它要素的关系。本研究将 Zion 公园的高程分为 < 1200 m, $1200 \sim 1400$ m, $1400 \sim 1600$ m 等 9 个级别,生成高程分级图(图 8)和高程统计表(表 1)。

由图 8 可看出,Zion 公园整体上为高原—峡谷型地貌,以较大面积的山顶夷平面和众多深切峡谷为地貌组合特征。公园地势西北高东南低,在公园北部,高程值在 2000 m 以上的范围呈连片块状分布,在南部则呈斑点状分布。这是因为 Zion 公园的北北西和北北东向的两组节理群主要分布于公园东南部,Zion 峡谷与其支谷在沿节理往北溯源侵蚀过程中,峡谷南部的岩层首先被侵蚀掉,而峡谷北部的岩层被流水切割较浅,保存相对完好。从高程分布频率来看,各高程区间基本呈正态分布,公园约 70% 面积的高程为 $1600 \sim 2200$ m。其中,高程 $1800 \sim 2000$ m 所占的比重最大,约占公园面积的 30%,它应当是 Navajo 砂岩崖壁上部白色段的分布高度。

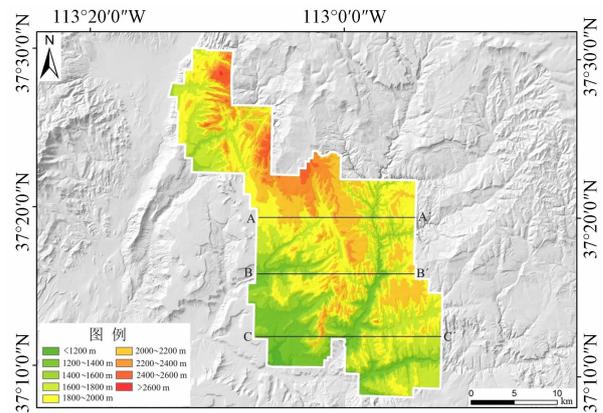


图 8 Zion 公园的高程分级

Fig. 8 Elevation classification of Zion National Park

此外,为分析流水侵蚀对 Zion 峡谷两侧地形起伏变化的影响,在高程分级图上沿东西方向分别绘制 3 条横跨 Zion 峡谷上、中、下游的直线(AA'、BB'和 CC')(图 8),利用 ArcGIS 的 3D analyst 模块生成这 3 条直线的高程剖面曲线图(图 9)。从图中可以看出,Zion 峡谷从上游至下游随着侵蚀程度的增强,高程逐渐降低。其中,峡谷上游地区遭受强烈的流水下切,Zion 峡谷的切割深度从山顶面至谷底达到约 800 m。沿 AA'剖面还可发现,Zion 峡谷西侧还保留有较大面积的高程在 2000 m 以上的区域,而东侧下切深度更大,可能是受北北西向(350°)节理的影响。到了中游,BB'剖面沿线地形起伏度明显增大,流水沿 Zion 峡谷切穿坚硬的 Navajo 砂岩崖壁,对崖壁下伏的岩性相对软弱的 Kayenta 组进行侧蚀,使 Zion 峡谷开始由下切转为侧蚀,但 Zion 峡谷两侧的支谷仍然以下切作用为主,特别是西侧受北北东节理群(20°)控制,发育了很多深切的 V 型谷地,使高程值在 2000 m 以上的山顶面变得非常破碎,而东侧切割侵蚀较浅,山顶面保持相对完整。到了下游,流水侧蚀程度增强,Zion 峡谷显著拓宽,山体高程进一步降低,沿 CC'剖面可发现,Zion 峡谷两侧侵蚀程度存在显著差异。其中,西侧山体遭受强烈侵蚀,除一处侵蚀残余的山顶高程达到 2200 m,其余大部分地

表 1 Zion 公园高程分布统计

Tab. 1 Elevation statistics of Zion National Park

高程/m	<1200	1200 ~ 1400	1400 ~ 1600	1600 ~ 1800	1800 ~ 2000	2000 ~ 2200	2200 ~ 2400	2400 ~ 2600	> 2600
百分比/%	0.006	8.563	8.980	21.435	30.032	20.481	8.1%	2.361	0.042
累积百分比/%	0.006	8.569	17.549	38.984	69.016	89.497	97.597	99.958	100

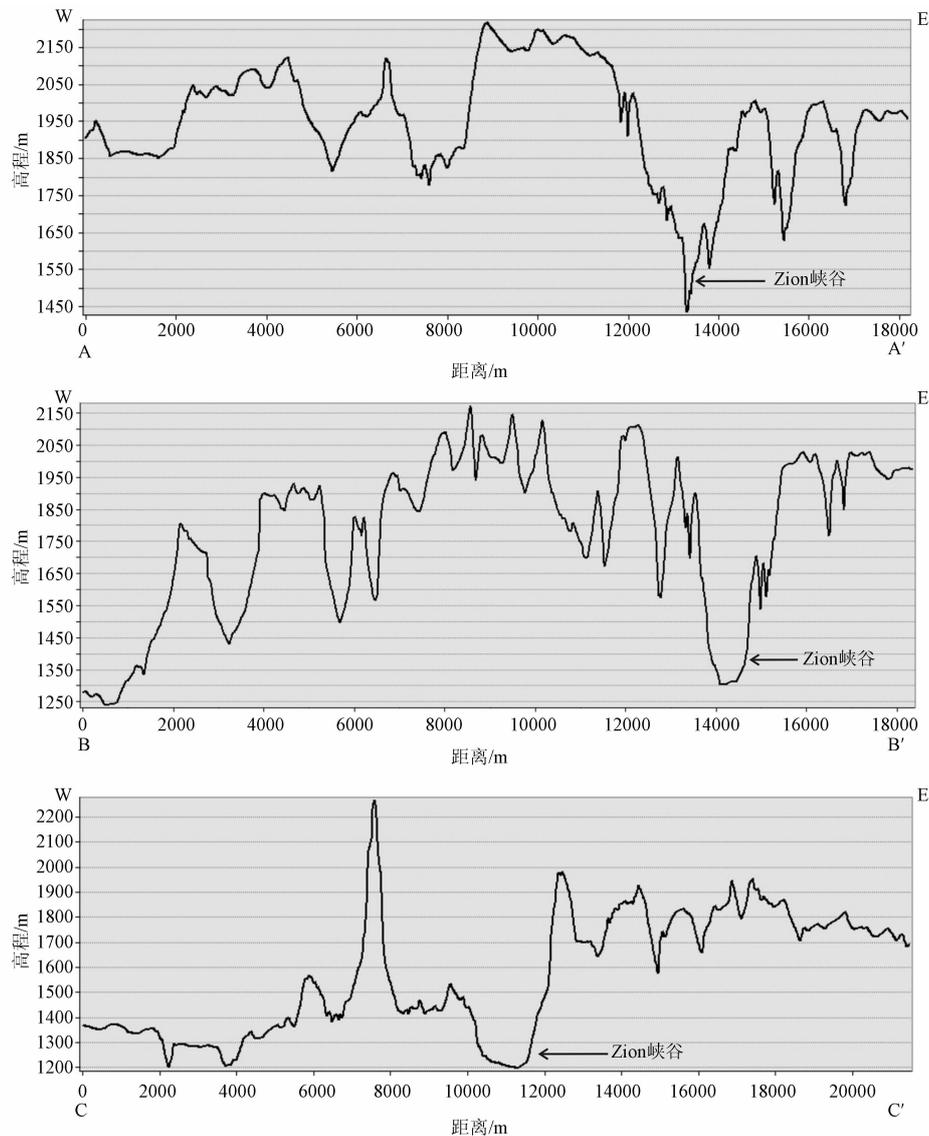


图9 Zion 公园 Zion 峡谷区的三条高程剖面曲线

Fig. 9 Three elevation profile curves in Zion Canyon Section of Zion National Park

区的高程都降至 1500 m 以下;东侧侵蚀程度相对低些,高程分布也更均匀,大部分山顶面都在 1800 ~ 2000 m。

3.2 单体地貌特征

(1) 山崖

高耸巨大的山崖是 Zion 公园最主要的地貌景观之一。因断层和褶皱较少,Zion 公园大部分地区岩层产状近水平,形成的山崖也以平顶的方山和台地为主。Zion 峡谷两侧,巨厚的 Navajo 组完全出露,形成连续的直立陡崖。在 Navajo 砂岩崖壁顶部,除局部被侵蚀残余的 Temple Cap 组覆盖,基本为平坦的高原面。由于沉积厚度较小(60 m 以内),Temple Cap 组形成的山崖体量较小,其叠加在高大

的 Navajo 砂岩崖壁顶部,如 Zion 峡谷南段西侧的西庙山(the West Temple)(图 10a)。在 Zion 峡谷南部(下游),Navajo 组下伏的 Kayenta 组出露,其中岩性均一、岩石强度较大的 Lamb Point Tongue 段(图 10b)和 Springdale 段(图 10c)也形成崖壁。同样,因沉积厚度较小,其形成的崖壁也较低矮。它们与其它岩性相对软弱的岩层组合在一起,在 Navajo 砂岩崖壁下方形成多级的陡缓坡组合。

与中国东南部湿润区典型丹霞地貌的崖壁形态浑圆、发育众多水平岩槽不同,形成 Zion 公园主崖壁的风成相 Navajo 组砂岩岩性均一,几乎不含软岩夹层,在崖壁上很少有水平岩槽发育,但其垂直节理密集,频繁的冻胀风化导致岩体很容易发生脆性断

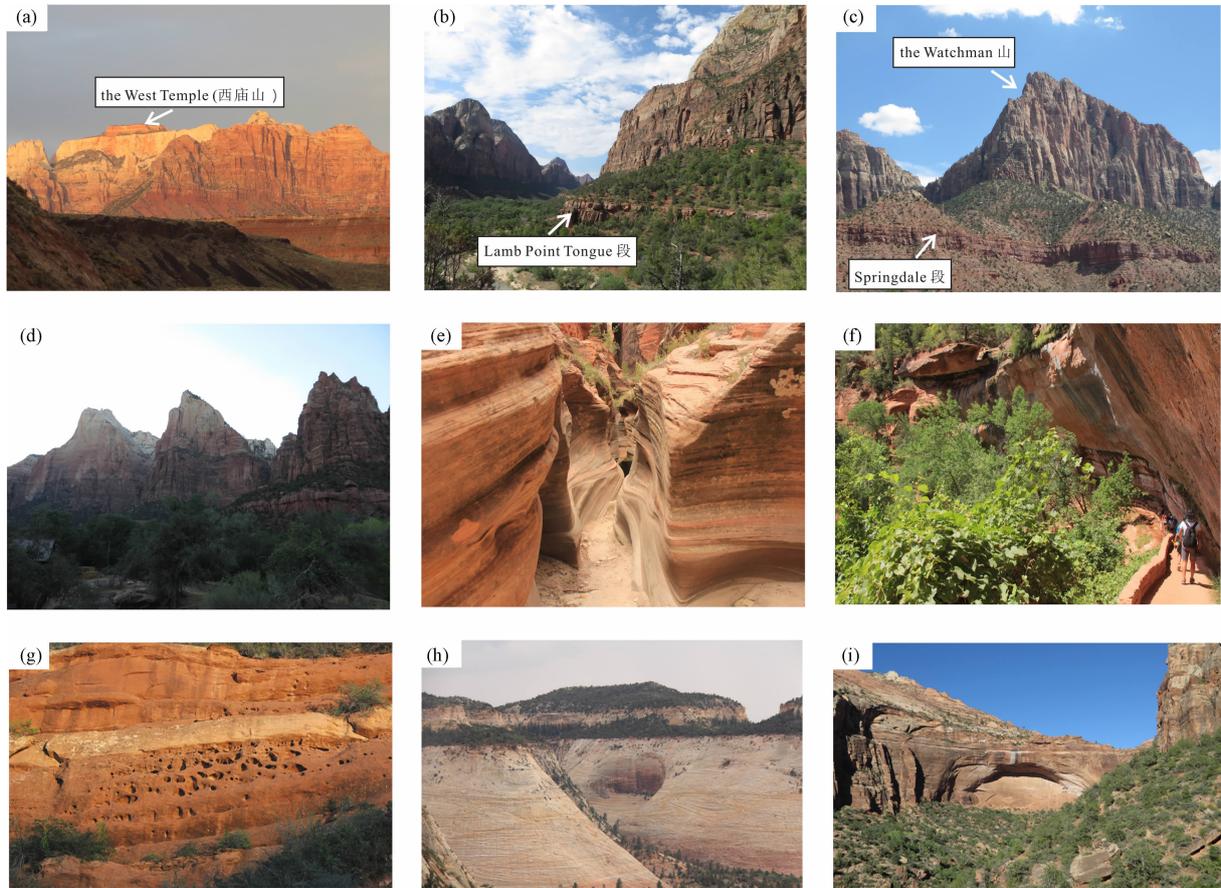


图 10 Zion 公园典型丹霞地貌

Fig. 10 Representative Danxia landforms in Zion National Park

裂,形成的崖壁边缘棱角尖锐,如 Zion 峡谷南段入口东侧的 the Watchman 山(图 10c)。

(2) 沟谷

密集分布的峡谷网络是 Zion 公园重要的地貌特征之一,最典型的代表便是 Zion 峡谷,其全长 24 km,最大谷深达 916 m^[16]。从上游至下游,Zion 峡谷的形态随流水切割侵蚀程度而变化。上游河谷呈 V 型,两侧为高耸的 Navajo 砂岩崖壁;中游河谷呈 U 型,两侧崖壁有所降低,并有和缓的崖麓;下游河谷呈宽槽型,两侧崖壁高度更低,但河谷更为开阔。

在 Zion 峡谷两侧,流水沿北北西向(350°)或北北东(20°)向节理切割 Navajo 组砂岩形成众多平行排列,规则分布的支谷。与 Zion 峡谷相比,这些支谷的长度、宽度和切割深度相对要小些,并伴有间歇性流水。有些支谷在与 Zion 峡谷交汇时,因其切割侵蚀程度不及 Zion 峡谷的主河谷,在 Navajo 砂岩崖壁上形成 V 型悬谷,如 Zion 峡谷中段西侧的 The

Court of the Patriarchs(长老议事廷)景点,流水沿北北西向主节理进行切割,形成两条并排的悬谷(图 10d)。此外,在局部地区还有一组未切穿 Navajo 砂岩崖壁的北北西向节理(340°),经流水切割后形成深窄的巷谷(图 10e)。

(3) 洞穴

Zion 公园洞穴崖壁上发育的洞穴景观主要有额状洞穴、蜂窝状洞穴、壁龛和天然拱等几种类型。其中,额状洞穴多发育于 Navajo 砂岩崖壁底部或同是风成相的 Kayenta 组 Lamb Point Tongue 段底部,它由地下水对下伏透水性较差的泥岩/页岩进行风化侵蚀,使崖壁底部失去支撑而崩塌形成,如 Zion 峡谷中段西侧的景点翡翠池,它位于两段透水性不同的岩层接触面。上部为风成相砂岩 Lamb Point Tongue 段,其粒间孔隙较大,透水性较好;下部为透水性较差的 Main Body 段,其岩性为粉砂岩并含泥岩夹层。地下水沿 Lamb Point Tongue 段砂岩下渗至此,与 Main Body 段粉砂岩、泥岩中的铁质和钙质

胶结物进行微观化学风化,使其不断侵蚀凹进,洞顶不断崩塌(图 10f);蜂窝状洞穴主要形成于 Navajo 组和 Kayenta 组 Lamb Point Tongue 段的崖壁上,其可能是砂岩颗粒间的钙质胶结物被溶蚀后风化形成的,也可能与盐风化作用有关(图 10g);壁龛是指发育在崖壁上,形态为圆形或椭圆形的洞穴和凹坑,多发育在 Navajo 砂岩崖壁上部的 White 段,其成因可能与崖壁迎风面的风蚀作用有关^[29](图 10h);天然拱多形成于 Navajo 砂岩崖壁底部,其成因与额状洞穴类似,也是由地下水对下伏不透水的泥岩层风化侵蚀形成,其上部岩层已崩塌,但其后有崖壁支撑,尚未形成通透的穿洞,因而又被称为隐形石拱(blind arch),如 Zion-Mt. Carmel Highway 隧道西侧出入口附近的景点——Great Arch(大拱)(图 10i)。

4 Zion 公园丹霞地貌的演化过程

4.1 构造盆地的形成

区域构造演化直接控制了沉积盆地的形成和演化,对沉积物的堆积、气候演变,以及后期的地貌发育都有重要影响。Zion 公园所在地区构造盆地的形成与太平洋板块向北美板块西部的俯冲碰撞及其衍生的三次造山运动(即内华达造山运动、塞维尔造山运动和拉拉米造山运动)有关。中生代以前,Zion 公园所在地区为边缘浅海环境。三叠纪末,联合古陆开始分裂解体,促使北美大陆板块往西北方向漂移^[16],并与太平洋板块发生俯冲碰撞,在北美大陆西部的内华达山脉后方形成一个巨大的弧后盆地,即西部内陆盆地。Zion 公园所在的犹他州为西部内陆盆地的组成部分,从此开始广泛接受陆相沉积。

4.2 红层堆积

构造盆地形成后,从侏罗纪开始,红层堆积形成了 Moenave 组、Kayenta 组、Navajo 组和 Temple Cap 组 4 组不同岩性的红层,它们是塑造 Zion 公园丹霞地貌景观的主要地层。在此期间,受构造演变和气候变化的影响,红层的沉积环境在沙漠、河流、湖泊交替切换,但总体为沙漠环境。尤其是早一中侏罗世期间,北美大陆板块往副热带地区漂移,并与太平洋板块进一步发生俯冲碰撞,内华达山脉开始隆起(Nevadan Orogeny)^[30]。此时,Zion 公园所在的西部内陆盆地位于内华达山脉的背风坡,形成了干旱的沙漠气候,类似于今天北非的撒哈拉沙漠,风沙沉积

显著,开始形成巨厚的 Navajo 组砂岩。

到中侏罗世末,太平洋板块加速向北美板块俯冲碰撞,并向东挤压北美大陆,形成塞维尔造山运动(Sevier Orogeny)^[31]。在此期间,内华达山脉继续隆起,西部内陆盆地则相对下沉,面积进一步增大,海水开始从墨西哥湾和北冰洋侵入,结束了该区域的红层堆积过程。此后,虽有沙漠沉积环境的短期回返,堆积形成了 Temple Cap 组红层,但很快海水再次侵入。到白垩纪时,随着墨西哥湾裂陷扩大,南北水道贯通,西部内陆盆地变成了宽广的西部内陆海道(Western Interior Seaway)^[32],Zion 公园所在地区又回到了中生代以前的滨/浅海沉积环境。

4.3 地壳隆升

到了白垩纪末期,由于太平洋板块与北美板块的俯冲角度变小,引发深部岩浆向上运动,形成拉拉米造山运动(Laramide Orogeny)^[33],它的结果是落基山脉开始隆起,同时西部内陆海道关闭并被整体抬升,形成了今天的科罗拉多高原。在区域地壳的隆生过程中,弧后拉张作用产生向西的张应力,在 Zion 公园及其周边形成一些近南北走向的断层和密集的节理群。这些构造隆升的结果是使流经 Zion 公园的维京河水系的河道坡降增大,流水开始沿这些断裂构造对岩层进行切割侵蚀。

4.4 外力塑造

自白垩纪末期科罗拉多高原开始抬升以来,流水切割、风化剥蚀及重力崩塌等外动力不断对 Zion 公园出露的红层进行地貌塑造。其中,强烈的流水下切作用是该地区形成丹霞地貌的主导外营力,形成了如今以 Zion 峡谷为代表的高原—深切峡谷景观和密集的峡谷网络。据估算,在过去的一百万年里,维京河水系切穿了将近 400 m 厚的沉积岩层,并且还可以继续下切约 300 m^[25]。与此同时,地下水的基部渗流侵蚀作用(Sapping Process)对 Zion 公园丹霞地貌发育同样具有重要影响。尤其是在上覆透水岩层和下伏不透水岩层的接触面,地下水的渗流侵蚀可以使上覆岩层崩塌,形成前述的额状洞穴和天然拱等景观。

风化方面,Zion 公园的温带大陆性气候使得该区域的岩石物理风化过程更为显著,包括卸荷作用、温差风化、冻胀风化以及盐风化等。其中,卸荷作用在 Navajo 砂岩表现得尤为明显。当上覆岩层被侵蚀后,下部岩层因为应力释放发生膨胀,沿着 Navajo

砂岩的交错层理进行片状剥落。此外,Navajo 砂岩孔隙度高、节理密集,岩体内容易赋存孔隙水,因温度变化引起的水分状态的变化产生的冻胀风化对该地区丹霞崖壁的形态塑造具有重要作用,崖壁表面多纵向沟槽裂隙,崖壁边缘棱角尖锐。

重力崩塌在 Zion 公园也非常普遍,流水下切和风化作用使崖壁的垂直节理裂隙拓宽加大,当这些垂直裂隙和岩体中原有的节理裂隙相互贯通,重力大于抗剪应力时便会发生崩塌。其结果是谷地边坡不断后退,并在坡脚处形成崩积锥。

5 结论

(1)中生代红层在美国西部的科罗拉多高原地区广泛分布。其中,Zion 公园是美国西部红层的典型代表,公园内地质构造较稳定、褶皱和断层较少,岩层产状以近水平为主,崖壁的展布和峡谷群的发育主要受控于北北西向(350°)和北北东向(20°)两组节理。

(2)红层岩性方面,Zion 公园发育丹霞地貌的地层均形成于侏罗纪,以红色细砂—粉砂岩为主,沉积环境包括沙漠、河流和湖泊等。其中,形成于早—中侏罗世的 Navajo 组是 Zion 公园丹霞地貌主崖壁发育的地层,为典型风沙沉积,以大型板状交错层理为主要特征。Navajo 组砂岩形成初期可能均为红色,但后期被具有还原性的碳氢化合物漂白,使 Navajo 砂岩出现颜色变异和分段现象,并导致各段岩层的胶结特性和岩石强度也呈现差别。

(3)地貌特征方面,Zion 公园整体上为高原—深切峡谷景观,以较大面积的山顶夷平面和众多深切峡谷为地貌组合特征。在单体地貌方面,Zion 公园多连续的台地和方山,崖壁高耸巨大,且有多层崖壁,主崖壁边缘棱角尖锐;主河谷两侧为平行排列的峡谷群,多巷谷和悬谷;主崖壁下方的岩层含有软岩夹层,在地下水的基部渗流侵蚀作用下发育额状洞穴或天然拱等。

(4)地貌演化过程方面,Zion 公园丹霞地貌的发育经历了构造盆地形成—红层堆积—地壳隆生—外力塑造这一地质作用过程。三叠纪末期形成的西部内陆盆地为红层堆积提供了相对稳定的沉积环境,侏罗纪期间干旱的气候环境下形成了大规模的风沙沉积,白垩纪末期科罗拉多高原的抬升及形成

的节理裂隙为外力侵蚀提供了条件,其中,强烈的流水下切是该地区丹霞地貌发育的主导外营力,并一直持续至今。

致谢:感谢美国圣路易斯大学(Saint Louis University)地球与大气科学系 John Encarnacion 教授、东华理工大学地球科学学院陈留勤副教授对本研究的指导;感谢美国犹他州 Zion 国家公园为作者野外考察期间提供的大力协助。

参考文献(References)

- [1] 彭华. 中国南方湿润区红层地貌及相关问题探讨[J]. 地理研究, 2011, **30**(10): 1739 - 1752. [PENG Hua. Perspectives on the red beds landforms in humid area of southern China and some related Problems [J]. Geographical Research, 2011, **30**(10): 1739 - 1752]
- [2] 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). ACTA Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2018, **57**(2): 12 - 21]
- [3] 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): 121 - 130. [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): 121 - 130]
- [4] 汪震, 姜勇彪. 江西宜黄盆地丹霞地貌特征分析[J]. 山地学报, 2019, **37**(6): 839 - 847. [WANG Zhen, JIANG Yongbiao. Analysis of Danxia landform characteristics in the Yihuang Basin, Jiangxi Province, China [J]. Mountain Research, 2019, **37**(6): 839 - 847]
- [5] 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]
- [6] 潘志新, 任舫, 彭华. 美国西部红层地貌发育及与中国东南部丹霞地貌的对比[J]. 地理研究, 2018, **37**(12): 2399 - 2410. [PAN Zhixin, REN Fang, PENG Hua. Development of red bed landform in the western United States and a comparison with Danxia landform in southeast China [J]. Geographical Research, 2018, **37**(12): 2399 - 2410]
- [7] 刘尚仁, 彭华. 国外若干丹霞地貌简介[J]. 经济地理, 2006, **26**(增刊): 213 - 221 [LIU Shangren, Peng Hua. The information on Danxia landforms in foreign country [J]. Economic Geography, 2006, **26**(suppl.): 213 - 221]
- [8] 潘志新, 彭华. 国内外红层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]
- [9] EKSTRAND E J, BUTLER R F. Paleomagnetism of the Moenave Formation: Implications for the Mesozoic North American apparent polar wander path [J]. *Geology*, 1989, **17**(3): 245 – 248.
- [10] BAZARD D R, BUTLER R F. Paleomagnetism of the Chinle and Kayenta Formations, New Mexico and Arizona [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, **96**(B6): 9847 – 9871.
- [11] MOUNTNEY N P. Periodic accumulation and destruction of aeolian erg sequences in the Permian Cedar Mesa Sandstone, White Canyon, southern Utah, USA [J]. *Sedimentology*, 2006, **53**(4): 789 – 823.
- [12] KENNY, R. A cool time in the Early Jurassic: first continental paleoclimate estimates from oxygen and hydrogen isotope ratios in chert from Navajo Sandstone carbonate lenses, Utah (USA) [J]. *Carbonates and Evaporites*, 2017, **32**(1): 45 – 52.
- [13] MOORE J M, SCHULTZ R A. Processes of faulting in jointed rocks of Canyonlands National Park, Utah [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1999, **111**(6): 808 – 822.
- [14] KATZ Y, WEINBERGER R, AYDIN A. Geometry and kinematic evolution of Riedel shear structures, Capitol Reef National Park, Utah [J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, **26**(3): 491 – 501.
- [15] NETOFF D I, SHROBA R R. Conical sandstone landforms cored with elastic pipes in Glen Canyon National Recreation Area, southeastern Utah [J]. *Geomorphology*, 2001, **39**(3): 99 – 110.
- [16] BEUMONT C, QUINLAN G M, STOCKMAL G S. The evolution of the Western Interior Basin: causes, consequences and unsolved problems [C]. *Evolution of the Western Interior Basin: Geological Association of Canada Special Paper*, 1993, **39**: 97 – 117.
- [17] SPENCER, J E. Uplift of the Colorado Plateau due to lithosphere attenuation during Laramide low-angle subduction [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, **101**(B6): 13595 – 13609.
- [18] ROGER C M, MYERS D A, ENGELDER T. Kinematic implications of joint zones and isolated joints in the Navajo Sandstone at Zion National Park, Utah: Evidence for Cordilleran relaxation [J]. *Tectonics*, 2004, **23**(1): 1 – 16.
- [19] OLSEN H. Sandstone-body structures and ephemeral stream processes in the Dinosaur Canyon Member, Moenave Formation (Lower Jurassic), Utah, USA [J]. *Sedimentary Geology*, 1989, **61**(3–4): 207 – 221.
- [20] TANNER L H, LUCAS S G. The Moenave Formation: Sedimentologic and stratigraphic context of the Triassic – Jurassic boundary in the Four Corners area, southwestern USA [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2007, **244**(1–4): 111 – 125.
- [21] LUCAS S G, TANNER L H. The Springdale Member of the Kayenta Formation, Lower Jurassic of Utah – Arizona [J]. *New Mexico Museum of Natural History Bulletin*, 2006, **37**: 71 – 76.
- [22] BIEK R F, WILLIS G C, HYLLAND M D, et al. Geology of Zion National Park, Utah [A]. In Sprinkel D A, Chidsey T C, Anderson P B (eds.). *Geology of Utah's parks and Monuments* [C]. Utah Geological Association Publication, 2000, **28**: 107 – 138.
- [23] WOLF M B, SALEEBY J B. Jurassic Cordilleran dike swarm-shear zones: Implications for the Nevadan orogeny and North American plate motion [J]. *Geology*, 1992, **20**(8): 745 – 748.
- [24] VERLANDER J E. The Navajo Sandstone [J]. *Geology Today*, 1995, **11**(4): 143 – 146.
- [25] GRAHAM J. Zion National Park Geologic Resource Evaluation Report [R]. Natural Resource Report, National Park Service, Denver, Colorado, 2006, 27 – 31.
- [26] BEITLER B, CHAN M A, PARRY W T. Bleaching of Jurassic Navajo Sandstone on Colorado Plateau Laramide highs: Evidence of exhumed hydrocarbon supergiants? [J]. *Geology*, 2003, **31**(12): 1041 – 1044.
- [27] UYGUR K, PICARD M D. Reservoir characteristics of Jurassic Navajo Sandstone, southern Utah [A]. In: Picard M D (eds.). *Henry Mountain symposium* [C]. Utah Geological Association Publication. 1980, **8**: 277 – 286.
- [28] SURDAM R C, JIAO Z S, MACGOWAN D B. Redox reactions involving hydrocarbons and mineral oxidants: A mechanism for significant porosity enhancement in sandstones [J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1993, **77**(9): 1509 – 1518.
- [29] LOOPE D B, MASON J A. Wind erosion of the wind – deposited Navajo Sandstone, USA [J]. *Geology Today*, 2009, **25**(2): 65 – 70.
- [30] SCHWEICKERT R A, BOGEN N L, GIRTY G H et al. Timing and structural expression of the Nevadan orogeny, Sierra Nevada, California [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1984, **95**(8): 967 – 979.
- [31] HELLER P L, BOWDLER S S, CHAMBERS H P, et al. Time of initial thrusting in the Sevier orogenic belt, Idaho – Wyoming and Utah [J]. *Geology*, 1986, **14**(5): 388 – 391.
- [32] WRIGHT E K. Stratification and paleocirculation of the Late Cretaceous Western Interior Seaway of North America [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1987, **99**(4): 480 – 490.
- [33] ENGLISH J M, JOHNSTON S T. The Laramide Orogeny: what were the driving forces? [J]. *International Geology Review*, 2004, **46**(9): 833 – 838.

Geomorphic Features and Evolution Process of Danxia Landforms in Western United States: A Case Study at Zion National Park, Utah

PAN Zhixin¹, REN Fang^{2*}

(1. School of Tourism, Hainan University, Haikou 570228, China;

2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Danxia landforms is an important type of landscapes and research on their geomorphic features and evolutionary processes can provide scientific support for the protection and utilization of this geoheritage. Mesozoic red beds are the material basis for the development of Danxia landforms in China, and they are also widely distributed on the Colorado Plateau of the Western United States. In order to enhance understanding on red beds and Danxia landforms in the Western United States, this study took Zion National Park in Utah as a case to discuss the geomorphic features and evolution process of Danxia landforms by field investigation and analysis of physical and chemical properties of rock samples, and analysis by the application of GIS and DEM. In terms of regional geological setting, the depositional environment for red beds deposited in Zion was a large back-arc basin—the Western Interior Basin, the development of Danxia landforms was controlled by closely-spaced joints developed when the basin was uplifted. In terms of lithologic features, red beds for the development of Danxia landforms in Zion are dominated by aeolian deposition, which are featured by fine-grained sandstones and siltstones, while coarse-grained clastic deposits such as conglomerates and sandy conglomerates are scarce in this area. In addition, the cementation characteristics and rock strength of these aeolian sandstones are varied in different rock members. In terms of geomorphic features, the overall landscape in Zion is a combination of plateau and deeply-incised valleys, with the elevation of 1800 ~ 2000 m accounts for the largest proportion, and the southern part has more down-cutting and erosion than the northern part. As for single Danxia landforms, they include sheer cliff walls, valleys, and various caves developed by sapping process of ground water and wind erosion. In terms of geomorphic evolution, the evolution processes of Danxia landforms in Zion could be divided into four stages: formation of structural basin—deposition of red beds—tectonic uplift—erosion of external forces. The Western Interior Basin formed in the late Triassic provided a relatively stable depositional environment for the deposition of red beds. Then, during the Jurassic period, a large scale of aeolian deposits was formed in arid climate. Finally, the uplift of the Colorado Plateau in late Cretaceous and the formation of joints provided conditions for erosion of external forces. Among them, the strong downcutting process was the dominant external force for the formation of Danxia landforms in this area, and it continued to this day.

Key words: red beds; Danxia landforms; geomorphic features; evolution process; Zion National Park