

doi: 10.12029/gc20160627

刘持恒, 李江海, 崔鑫, 等. 青海可可西里地质遗迹及其构造演化[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 2202–2215.

Liu Chiheng, Li Jianghai, Cui Xin, et al. Geological heritage of Hoh Xil in Qinghai and its tectonic evolution[J]. Geology in China, 2016, 43(6): 2202–2215(in Chinese with English abstract).

## 青海可可西里地质遗迹及其构造演化

刘持恒<sup>1,2</sup> 李江海<sup>1,2</sup> 崔鑫<sup>1,2</sup> 许丽<sup>1,2</sup> 范庆凯<sup>1,2</sup> 王辉<sup>1,2</sup> 张红伟<sup>1,2</sup>

(1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

2. 北京大学石油与天然气研究中心, 北京 100871)

**摘要:**青海可可西里自石炭纪以来经历了复杂的构造演化和地表过程,形成了集高山、宽谷、夷平面、冰川、热泉、河流和湖泊等地貌元素为一体的高原高寒地貌,同时还包括了蛇绿混杂岩带、活动断裂带、地震遗迹和火山遗迹等地质元素。在调研前人研究资料和实地野外考察基础之上,根据IUCN(2005)提出的13类地质主题分类标准将区内的地质遗迹分为地质构造、火山和地热遗迹、山脉、地层剖面、河流和湖泊、现代冰川、冰期遗迹7类,共计60余处地质遗迹点。可可西里地质遗迹对重建古特提斯构造域、研究天然地震机制、青藏高原北部隆升过程及全球气候变化均具有重要的意义。基于可可西里区内地质遗迹和前人资料恢复出可可西里石炭纪以来经历了8个构造演化阶段。

**关键词:**可可西里;地质遗迹;地貌;地学意义;构造演化

中图分类号: P53 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)06-2202-14

## Geological heritage of Hoh Xil in Qinghai and its tectonic evolution

LIU Chi-heng<sup>1,2</sup>, LI Jiang-hai<sup>1,2</sup>, CUI Xin<sup>1,2</sup>, XU Li<sup>1,2</sup>, FAN Qing-kai<sup>1,2</sup>,  
WANG Hui<sup>1,2</sup>, ZHANG Hong-wei<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Institute of Oil and Gas, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Hoh Xil in Qinghai has undergone complicated tectonic evolution and surface process since Carboniferous. Some plateau and alpine landforms were formed by these geological processes, such as high mountains, broad valleys, planation surfaces, glaciers, hot springs, rivers and lakes. In addition, Hoh Xil has preserved some geological heritages, like ophiolitic mélangé zone, fault zones, earthquake sites and volcanoes. In this paper, the authors divided geological heritages of Hoh Xil in Qinghai into seven types, i.e., geological structure, volcanic systems, mountains systems, stratigraphic sites, fluvial and lacustrine systems, glaciers, and ice ages site, which constitute more than sixty sites of geological heritages in accordance with IUCN (2005), based on geological field survey and previous studies. The results show that the study of geological heritages in Hoh Xil of Qinghai has important geoscience significance in reconstructing ancient Tethys and investigating the mechanism of earthquake, the uplift process of the

收稿日期: 2015-11-06; 改回日期: 2016-01-14

基金项目: “青海可可西里自然遗产研究”(01100-4413-160-102)资助。

作者简介: 刘持恒,男,1989年生,博士生,主要从事构造地质学和石油地质学研究;E-mail: liuchiheng@yeah.net。

通讯作者: 李江海,男,1965年生,博士,教授,主要从事全球构造研究;E-mail: jhli@pku.edu.cn。

Tibetan Plateau and the relevant global climate change. Eight tectonic evolution stages of Hoh Xil from Carboniferous to Quaternary were recognized on the basis of geological heritages in Hoh Xil area.

**Key word:** Hoh Xil; geological heritage; landform; geological significance; tectonic evolution

**About the first author:** LIU Chi-heng, male, born in 1989, doctor candidate, professor engages in research on tectonics and petroleum geology; E-mail: liuchiheng@yeah.net.

**About the corresponding author:** LI Jiang-hai, male, born in 1965, doctor, engages in research on global tectonics; E-mail: jhli@pku.edu.cn.

**Fund support:** Supported by Research Program of "Qinghai Hoh Xil Natural Heritage" (No. 01100-4413-160-102).

青海可可西里在漫长的地质历史时期中,经历了各种地球内、外动力地质作用,形成了大量宝贵的地质遗迹,它完整地记录了自石炭纪以来,该区的海陆变迁过程,是探索地球演化历史的重要线索。而正是各种地质作用,形成了大量的地质景观,包括冰川、湖泊、火山地貌等。其本身不仅是自然资源的重要组成部分,更是不可再生的自然遗产。1997年12月国务院将该区批准为国家级自然保护区,2014年11月青海可可西里开始申报世界自然遗产。

可可西里由于自然气候恶劣,长期处于“无人区”的状态,在20世纪50年代之前仅有少数的探险家涉足<sup>[1]</sup>。早期的地质科研工作始于20世纪60年代末期,青海省地矿局深入可可西里进行了1:100万的地质填图工作。70年代中国人民解放军总参谋部测绘局开赴可可西里绘制了1:10万的航测野外地形图,与此同时,中国科学院等单位对青藏高原进行了多次综合科学考察<sup>[1]</sup>,而地质学方面的考察仅限于青藏公路沿线,青海可可西里腹地却始终空白。直到90年代初,国家科委、中国科学院和青海省共同组织的科考队对可可西里腹地地质特征、演化和自然资源做了较为全面的研究<sup>[2]</sup>。1994年夏,中日可可西里科学考察队进入该区对火山作用进行了详细的研究<sup>[3]</sup>。2005—2007年,中科院再次深入可可西里核心区,进行了为期3年的地质科学大考察。作为世界第三极的青藏高原,其新生代的隆升过程在全球都备受关注<sup>[4-6]</sup>。本文在前人大量的研究基础上,通过详细的野外考察,对青海可可西里的地质遗迹进行全方位的归类和评价,探讨其地质科学的意义,并就其地质遗迹探讨可可西里地质演化过程。

## 1 可可西里地质背景

### 1.1 构造区划

可可西里位于我国青海省西南部,地处青藏高

原腹地,其北部边界为昆仑山南缘缝合带,南部为唐古拉山断裂。可可西里大地构造位置属于羌塘地体和东昆仑造山带碰撞过程中形成的增生楔地区(巴颜喀拉褶皱带),可划分为两个一级构造单元(华北地块、古特提斯缝合系)和五个二级构造单元(柴达木盆地、北昆仑岛弧、南昆仑弧沟系、可可西里增生楔、羌塘地体)<sup>[7]</sup>(图1-a)。

### 1.2 构造形迹

可可西里增生楔是青海可可西里的核心区域,其南北两侧分别为指示向南俯冲的西金乌兰缝合带<sup>[10-11]</sup>和指示向北俯冲的昆南缝合带<sup>[12]</sup>,基底为洋壳的增生楔<sup>[7]</sup>。区内主要的构造为NWW向的断裂和褶皱,在可可西里增生楔内存在多条印支期以来的逆冲断层,形成一系列逆冲—滑脱岩片,主要包括五雪峰逆冲滑脱岩片、可可西里山逆冲滑脱岩片和康特金逆冲滑脱岩片<sup>[7]</sup>。这些断层多数在新生代活化,并伴随着强烈的左行走滑运动。受印支期逆冲断裂活动的影响,可可西里三叠系强烈收缩变形,形成紧闭的复式褶皱,其褶皱枢纽走向与断裂走向基本一致(图1b)。

### 1.3 地层

可可西里地区主要出露石炭系—二叠系、三叠系、侏罗系、古近系和新近系,他们之间均存在角度不整合<sup>[13]</sup>。石炭系—二叠系未具体分层,零星出露在西金乌兰带地区,为俯冲作用残留的蛇绿混杂岩,岩石组合类型包括辉长岩、玄武岩、苦橄质玄武岩和硅质岩<sup>[14]</sup>;三叠系在研究区内非常发育,不整合覆盖在石炭—二叠系之上,下、中、上三叠统具全<sup>[15]</sup>,称为巴颜喀拉群,是一套巨厚的海相复理石沉积;可可西里地区侏罗系主要分布在西金乌兰缝合带以南的羌塘地体,在可可西里增生楔内缺失侏罗系,表明三叠系巴颜喀拉群在三叠纪末期形成的逆冲推覆系已经造山成陆,在其南侧的羌塘地区形成

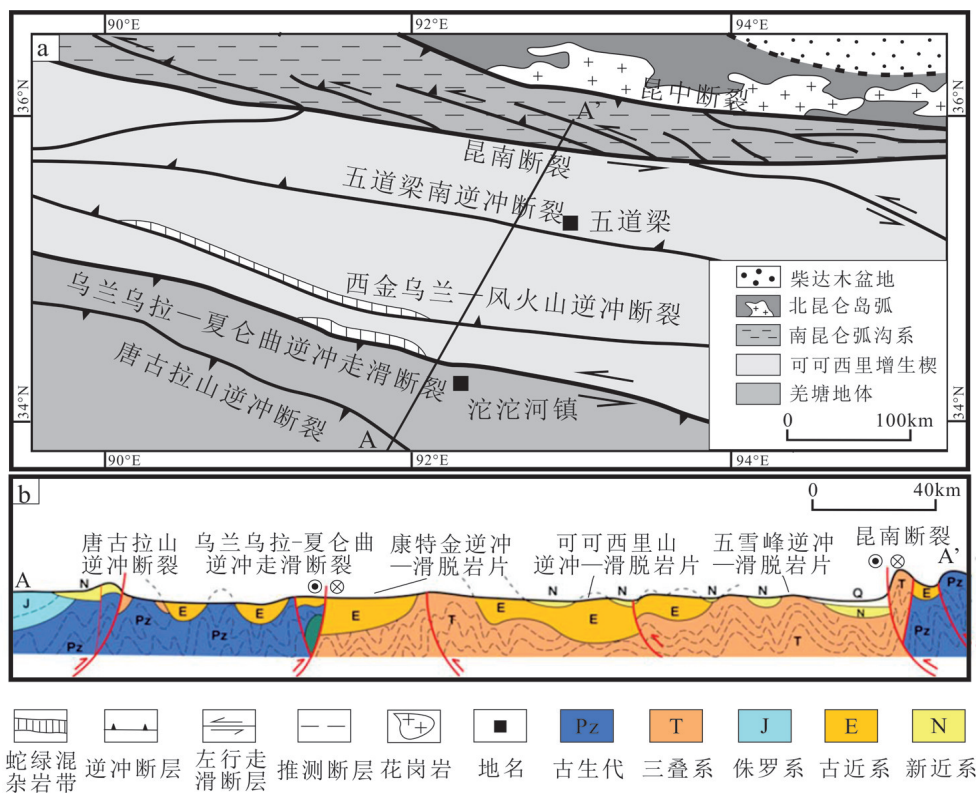


图1 可可西里及邻区构造分区图(a)及构造剖面图(b)(据参考文献[8-9]修改)

Fig.1 The tectonic division (a) and tectonic section (b) of Hoh Xil and adjacent areas (modified after references [8-9])

侏罗系前陆盆地<sup>[16]</sup>,沉积了一套红色碎屑岩系;古近系风火山群为一套河流—湖泊相的碎屑岩沉积,在可可西里地区广泛发育,多处不整合覆盖在三叠系之上。Liu<sup>[17]</sup>根据磁性地层将风火山群和上覆雅西措群的年龄定为56~31.5 Ma和31.5~30 Ma,将原定为晚白垩统的风火山群<sup>[2]</sup>划入始新世,代表了白垩系在可可西里的缺失;新近系五道梁群为一套灰白色湖相碳酸盐沉积,主要分布在可可西里北部地区,该群中产有大量的介形虫和孢粉化石,所显示的时间为中新世,不整合于雅西措群之上<sup>[18]</sup>。

## 2 可可西里地质遗迹分布情况

自石炭纪以来,可可西里经历了复杂的构造演化和地表过程,形成了种类丰富、类型独特、极具科考价值的地质遗迹景观。本区地貌类型多样,不仅有构造差异运动形成海拔6000 m以上的极高山、高海拔丘陵、台地和高原等基本地貌,还有受构造控制的火山熔岩地貌。气候地貌类型也比较丰富,有

高寒地区特有的现代冰川和冰缘冻土,还有最常见的流水地貌和湖成地貌。星罗棋布的高原湖泊和保存完整的高原夷平面造就了可可西里地区罕见的高原美景。由于可可西里位于青藏高原腹地,自然条件恶劣,区内人迹罕至,本区成为原始的生态环境和独特高原自然景观保持最好的地区<sup>[19]</sup>。此外,地表出露的蛇绿混杂岩、地震断裂带、火山等地质遗迹直观地记录了该区从古特提斯洋闭合到抬升造山的海陆变迁过程。可可西里沉积盆地还是青藏高原腹地最大的古近—新近纪陆相盆地,其沉积地层是青藏高原整体抬升演化过程和气候变化的直接反应,可以说可可西里地区是中国乃至全世界唯一一处完整记录青藏高原隆升过程并完好保存地质遗迹证据的高原盆地。

由于地质遗迹具有多样性和复杂性,建立一个清晰的分类框架有助于认清遗迹的地质价值和进行准确的评估。在构建地质遗迹资源体系的过程中,对青海可可西里地区地质遗迹进行了大量文献

①Dingwall P, Weighell T, Badman T. Geological world heritage: a global framework [R]. Switzerland: Protected Area Programme, IUCN, 2005.

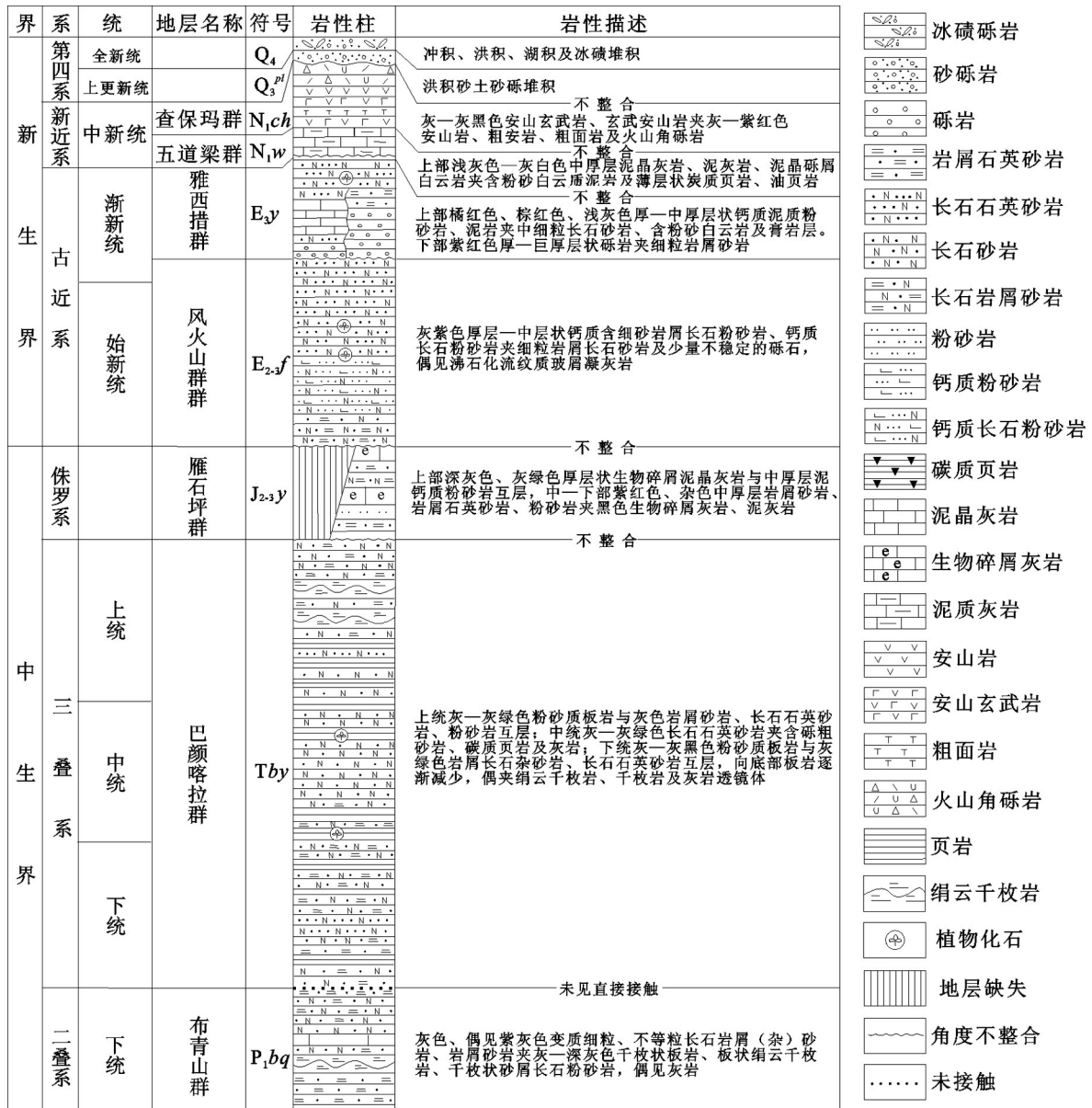


图2 可可西里地区综合柱状图(岩性资料据区调报告①②)

Fig. 2 Stratigraphic columnar section of Hoh Xil (lithology information after Regional Geological Survey Report ①②)

的调研和详细的野外地质地貌考察,结合 IUCN<sup>①</sup>提出的 13 类地质主题进行分类和评估,将青海可可西里的地质遗迹分为地质构造、火山和地热遗迹、山脉、地层、河流湖泊、冰川、冰期遗迹 7 类,共计 60 余处地质遗迹点。具体的地质遗迹分类及遗迹点分布见表 1,部分地质遗迹照片见图 3。

### 3 可可西里地质遗迹及其地学价值评价

#### 3.1 高原湖泊

可可西里地区湖泊星罗棋布,在平均海拔高达 4400 m 的广大地带水流排泄不畅,积储成泊,是可

①青海省地质矿产局. 库赛湖幅 1-46-3 1:20 万地质图[R]. 西宁: 青海省地质矿产局, 1992.

②青海省地质矿产局. 雁石坪幅 1-46-21 1:20 万地质图[R]. 西宁: 青海省地质矿产局, 1993.

表1 可可西里地质遗迹分类表  
Table 1 Classification of geological heritages in Hoh Xil

类型	地质遗迹点
地质构造	昆南活动断裂、斜勒武担湖—太阳湖活动断裂、西金乌兰—五道梁南活动断裂、乌兰乌拉湖—岗齐曲活动断裂、昆仑山口西8.1级地震遗迹、西金乌兰—蛇形沟蛇绿混杂岩带、冈齐曲蛇绿混杂岩带、巴音查乌玛蛇绿混杂岩带
火山和地热遗迹	可考湖北中新世熔岩台地、可考湖东中新世火山岩颈、五雪峰西中新世熔岩台地、平台山中新世熔岩台地、黑驼峰中新世熔岩台地、向阳湖中新世熔岩台地、天台山中新世熔岩台地、大帽山中新世火山熔岩、苟纠麦尔沟全新世泥火山、太阳湖东北热泉群
山脉	昆仑山、可可西里山、乌兰乌拉山、东布里山、唐古拉山
地层剖面	风火山始新世—渐新世地层剖面、乌兰乌拉始新世—渐新世地层剖面、通天河渐新世地层剖面
河流和湖泊	红水河、楚玛尔河、勒玛曲、日阿尺曲、扎木曲、沱沱河、乌兰乌拉湖、西金乌兰湖、可可西里湖、斜勒武担湖、卓乃湖、库赛湖、多尔改措、海丁诺尔湖、错达日玛、移山湖、太阳湖、库水浣、莲湖、月亮湖、饮马湖、永红湖、节约湖、明镜湖、移山湖、连水湖、马鞍湖、高台湖、可考湖、特拉什湖、苟仁错、茶湖
现代冰川	姜古迪如南侧冰川、煤矿冰川、野牛沟冰川、湖北冰峰冰川、马兰山冰川、太阳湖冰川、足冰川、布喀达坂峰冰川、北莫诺玛哈冰川、冰鳞川冰川
冰期遗迹	岗扎日第四纪冰川作用遗迹、多索岗日第四纪冰川作用遗迹、布喀达坂峰第四纪冰川作用遗迹、马兰山第四纪冰川作用遗迹

可可西里最突出的地质遗迹。根据区域地理要素计算,可可西里地区湖泊度约为0.05<sup>[20]</sup>。区内面积大于1 km<sup>2</sup>的湖泊有107个,总面积为3825 km<sup>2</sup>。最大的湖泊为西金乌兰湖,其湖泊面积为383.6 km<sup>2</sup>,其次为可可西里湖(319.5 km<sup>2</sup>)和卓乃湖(264.98 km<sup>2</sup>)(2010年数据)<sup>[21]</sup>。可可西里湖泊多为新近纪以来东西向展布的断陷湖盆<sup>[22]</sup>,其类型则包括淡水湖、咸水湖—半咸水湖,盐湖<sup>[20]</sup>,以内流湖为主,水源主要来自雪山和冰川融水,少量湖泊为外流湖。湖泊群具有高海拔、大密度、多类型等突出特点,实属全球罕见。

在众多咸水湖—半咸水湖群中,对于藏羚羊生存影响最大的就是可可西里北部的卓乃湖(图4)。卓乃湖是青藏高原上一个微咸水湖泊,位于青海省格尔木西南280 km,湖盆面积约为264.98 km<sup>2</sup><sup>[21]</sup>。湖盆是受新近纪以来青藏高原整体抬升过程中形成的北西—南东向正断层控制的断陷湖盆,湖底地势北东深,南西浅,向南西侧逐渐过渡为沼泽湿地<sup>[22]</sup>。湖盆西南边缘为第四纪冲积、坡积、风积砂砾石,粉—细砂岩等组成的滨湖地区,湖水退化则形成沼泽湿地。盆内为近代风积、湖积粉细砂、粉砂质粘土等细碎屑沉积覆盖。湖泊沉积物的变化反应了是湖泊变迁历史,对青藏高原北部地质环境演变具有重要意义。

### 3.2 高原夷平面

可可西里夷平面是青藏高原地区夷平面保存

最完整的地区<sup>[9]</sup>,形成了独特的高原地貌,也是空旷洪荒景象的基本特征(图3-f)。可可西里主要存在两级夷平面,老夷平面即山顶面,分布在东昆仑和唐古拉山的顶部,海拔约5700~6000 m,保存面积小<sup>[23]</sup>;主夷平面分布在可可西里盆地内的小起伏的高山、丘陵的平缓山顶,海拔约4900~5200 m(图5)<sup>[24]</sup>。可可西里北部平缓的中新世火山熔岩台地与主夷平面交叉分布,可利用二者之间发育关系确定夷平面形成时期。卓乃湖北部的大坎顶和大帽山、斜勒武担湖西北的黑驼峰、向阳湖西南的天台山和白象山火山熔岩方山与周围主夷平面高度近乎一致,认为夷平作用切削了火山地貌,李炳元等<sup>[24]</sup>测定该区火山熔岩喷发的主要时期集中在9.9~6.95 Ma,可以确定为夷平作用发生的下限。

深入研究可可西里夷平面的发育史将有助于充分认识高原出现以前的真实面貌,并可进一步讨论高原的隆升时代、过程、幅度、速率等问题。

### 3.3 现代冰川和第四纪冰期遗迹

可可西里现代冰川主要分布在昆仑山、唐古拉山及零星分布的东岗扎日、马兰山等海拔6000 m左右的高山上,区内冰川主要为大陆性现代冰川(图3-c、e),形态保存完整,具有顶部平缓,周围伸出众多大小冰舌的典型冰帽冰川形态(图3-d),多次冰期形成的冰碛物保存也较好。经研究表明,可可西里地区发育现代冰川437条,覆盖面积1552.39 km<sup>2</sup>,冰储



图3 可可西里地质遗迹照片

a—极高山昆仑山;b—高海拔丘陵风火山;c—玉珠峰冰川;d—玉珠峰冰舌;e—布喀达坂峰冰川;f—五道梁高原面;g—楚玛尔河;  
h—太阳湖东北热泉;i—昆仑山南麓断层三角面;j—五道梁南地表破裂;k—风火山地表破裂及地震鼓包;l—二道沟南断层

Fig.3 Photographs of geological heritage in Hoh Xil

a—Kunlun alpine; b—Fenghuoshan high altitude hill; c—Yuzhu glacier; d—Yuzhu glacier tongue; e—Bukadaban glacier; f—Wudaoliang plateau surface; g—Chumaer River; h—Thermal spring in the northeast of Taiyang Lake; i—Fault facets in the south of Kunlun Mountains; j—Surface rupture in the south of Wudaoliang; k—Surface rupture and earthquake drumlin in Fenghuoshan; l—Fault in the south of Erdaogou

量为 162.8349 km<sup>3</sup>, 是该区众多河流和湖泊水体的重要补给源泉<sup>[25]</sup>。可可西里地区最具代表性大陆冰川是布喀达坂峰冰川(图3-e), 最高海拔 6860 m, 平均雪线高度 5550 m, 相对高差在 800~1970 m。布喀达坂峰山脊呈东西向延伸约 36 km, 峰区被巨大冰帽覆

盖, 其南坡高大陡峭, 冰川类型以山谷冰川为主, 集冰斗、坡面冰川、冰舌等多种形态冰川。

可可西里第四纪冰川遗迹主要分布在昆仑山、唐古拉山、岗扎日、多索岗日和马兰山等现代冰川外围, 冰碛物显示更新世以来至少有过 3 次明显的

冰川作用,位于可可西里腹部的低缓山地也见到1次到2次冰川作用遗迹<sup>[26]</sup>。其冰川作用时期可与3 Ma以来青藏高原隆升引起的全球气候急剧变冷时期<sup>[27]</sup>相对应。可以看出该区第四纪冰川作用除了受全球气候的变化,还受到整个青藏高原在第四纪以来的隆升过程共同制约<sup>[28]</sup>。

### 3.4 新生代火山地貌和火山地质

可可西里地区自中新世以来火山活动十分活跃,在可可西里西北部保存了大量的火山遗迹。火山岩基本沿近东西走向大型逆冲—走滑断裂带分布,勒斜武担湖至大帽山一段出露最好。火山地貌形态主要为典型的平顶方山和残留火山锥状体。火山岩呈熔岩被、熔岩台地、熔岩残丘、熔岩阶地和次火山穹隆产出,海拔在5000 m左右,面积多为几平方千米至几十平方千米,厚度多为几十米。不少火山机构保持完好,在熔岩台地中有许多低洼的火山口,火山口直径数十米至数百米,熔岩呈辐射状围绕火山口分布<sup>[29]</sup>。邓万明等<sup>[3]</sup>通过测定该区火山岩K-Ar年龄将火山活动期次划分为3期,几乎贯穿了整个中新世,第一期年龄为17.3~15.4 Ma,以大帽山地区为代表;第二期年龄为14.5~11.17 Ma,是本区火山活动的主要时期,以可考湖、黑驼峰地区为代表;第三期年龄为7.5~6.95 Ma,主要出露在天台山一带。大帽山火山区位于可可西里火山区的东部,喷发方式为中心式,火山地貌表现为浑圆状的小山丘,表明其熔岩已经被风化剥蚀成,而位于可可西里火山区西部的天台山火山熔岩地貌保存较好,四周为陡峭的熔岩台地,从地貌形态也能说明大帽山地区火山形成较天台山早<sup>[3]</sup>。可可西里新生代火山岩为钙碱性、高钾钙碱性和钾玄岩系列<sup>[30]</sup>,是始新世以来,青藏高原北部由碰撞、挤压作用转换为走滑、拉张作用的结果<sup>[31]</sup>。该区火山岩的源区性质有助于进一步深入论证青藏高原碰撞后的隆升机制。

### 3.5 蛇绿混杂岩带

在20世纪90年代初期的可可西里大考察中,综合科考队在西金乌兰湖和岗齐曲两地发现了蛇绿混杂岩带<sup>[32]</sup>,向东与金沙江蛇绿岩相连,是青藏高原内部多地体拼贴的重要构造单元界限。它们沿着逆冲断层带分布,岩石组合包括底部地幔岩系、上部结晶岩系(堆晶岩、高位侵入岩、席状岩墙、枕

状熔岩)和深海沉积物混杂堆积,虽然可可西里地区的蛇绿混杂岩以中上部层位的岩石单元为主,但构成完整的蛇绿岩套的岩石单元是齐全的<sup>[44]</sup>。岩石组合中超铁镁质岩石地球化学特征显示为洋岛环境,代表着大洋关闭过程中的增生楔碎片。深海相放射虫年龄为蛇绿岩的时代提供了确凿证据,西金乌兰蛇绿混杂岩的硅质岩中发现早石炭世放射虫组合,岗齐曲蛇绿混杂岩则发现早二叠世的放射虫组合,表明该区于早石炭世—早二叠世是宽广的大洋环境<sup>[33]</sup>。可可西里地区的蛇绿混杂岩清楚地记录了可可西里洋盆—浅海—高原的古地理变迁,并在区域上和金沙江蛇绿岩带相连,曾被认为是冈瓦纳大陆的北界<sup>[34]</sup>,后又被看作是古特提斯洋中部的闭合遗迹<sup>[35-36]</sup>。可可西里地区蛇绿混杂岩的发现为整个古特提斯构造域的演化提供了更多的地质依据,具有极为重要的地学价值。

### 3.6 典型地层剖面

可可西里盆地是青藏高原腹地最大的新生代陆相沉积盆地,海拔高程4000~5000 m,盆地面积101000 km<sup>2</sup><sup>[37-38]</sup>,始新世—中新世地层层序保留完整。可可西里新生代地层主要风火山群、雅西错群和五道梁群,在风火山和乌兰乌拉剖面出露完整的风火山群和雅西错群下部,通天河剖面出露完整的雅西错群,为河流—湖泊相的紫红色砂岩、泥岩互层,雅西错群底部出现石膏。风火山群和雅西错群总厚度超过5000 m<sup>[9]</sup>。根据磁性年代地层分析确定的绝对年龄,认为风火山群属于始新世—早渐新世(52.0~31.3 Ma),雅西错群为早渐新世(31.3~23.8 Ma),与风火山群整合接触<sup>[9]</sup>。晚渐新世时期沉积间断,中新统五道梁群不整合于雅西错群之上,根据生物地层确定其底界时限约22 Ma<sup>[2]</sup>。

可可西里典型的新生代地层记录了青藏高原隆升过程及其引起的气候变化。盆地内的沉积学特征可以作为青藏高原构造事件的沉积响应,是建立大陆碰撞、高原隆升的一种新途径<sup>[39-40]</sup>。通过盆地内始新世—渐新世的沉积层序、岩性特征、沉积环境和古流向的综合研究表明,可可西里新生代沉积盆地沉积中心逐渐向北、向东迁移,反应了青藏高原腹地早期隆升过程是依靠南北向地壳缩短和北东向扩展作用来实现的<sup>[40]</sup>。早中新世地层所受变形程度较小,表明高原以差异隆升为主<sup>[41]</sup>。可可西里盆

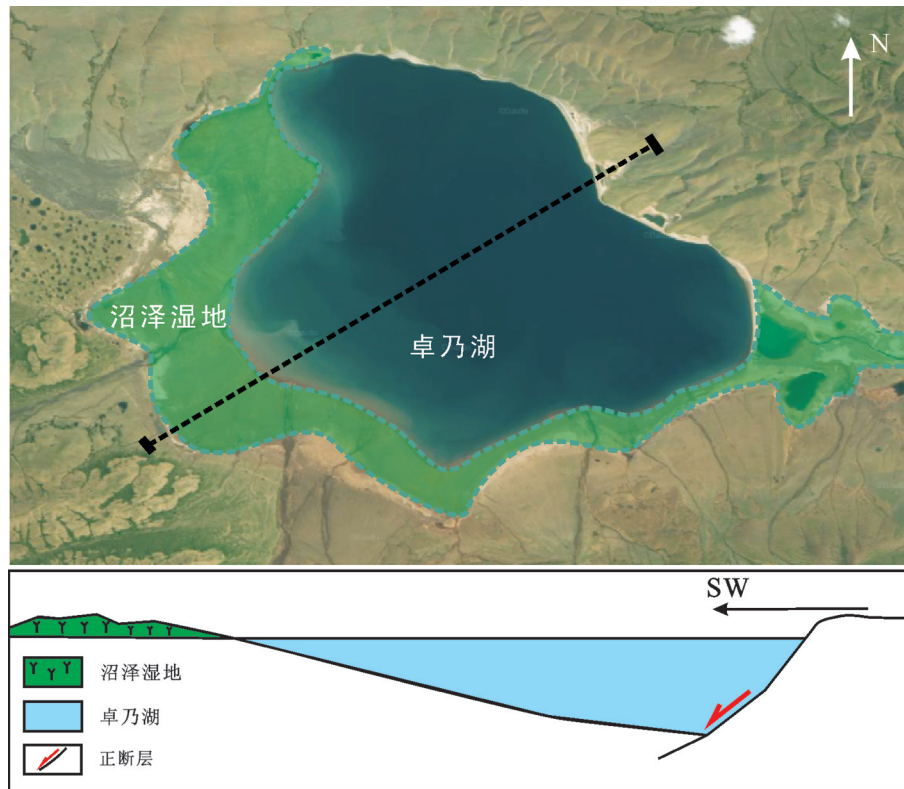


图4 卓乃湖及周缘沼泽湿地遥感解译及剖面示意图(底图来自百度卫星地图)

Fig.4 The remote sensing interpretation and profile sketch map of Zhuonai Lake and its neighboring areas (base map after Baidu Satellite Map)

地新生代地层所反映的古生态特征对于了解青藏高原隆升引起的气候变化同样具有重要的意义。雅西错群底部的石膏层突然大量出现体现了渐新世早期的全球变冷变干事件在青藏高原北部的记录<sup>[37]</sup>。而在五道梁群中发现的穹窿状叠层石指示了中新世的湖泛事件,说明青藏高原北部中新世曾出现过短暂的气候异常湿润期<sup>[42]</sup>。

### 3.7 断裂及地震活动遗迹

可可西里地区发育多条活动断层,是中国西部现代构造运动最活跃的地带之一,也是历史上地震多发区域。构造类型主要为北西西向断裂和褶皱,绝大多数断层倾向朝北,深部滑脱于晚古生代增生楔上的逆冲推覆构造<sup>[43]</sup>,并一直处于活动状态。可可西里区内的活动断裂主要包括4条,由北至南分别是昆南活动断裂带、勒斜武担湖—太阳湖活动断裂、西金乌兰湖—五道梁南活动断裂和乌兰乌拉湖—岗齐曲活动断裂<sup>[44]</sup>。

可可西里地区最典型也是最壮观的活动断裂是

位于昆仑山南侧的布喀达坂峰—库赛湖—昆仑山口活动断裂,也称为昆南断裂,其西侧发育在布喀达坂峰南侧,向东延伸至库赛湖北岸,昆仑山口南。在地貌上,断裂北侧的昆仑山海拔在6000 m左右,南侧海拔在4800~5000 m,在山前形成一系列断层三角面(图3-i)。该活动断层被认为是在早二叠世就形成的继承性断层,并在全新世强烈活动,昆仑山南侧的冲沟显示有70~140 m的左旋位移量<sup>[44]</sup>。

在众多活动断层的背景下,强烈的地震屡有发生(图6),地震造成的地表变形规模非常壮观,包括地表破裂、地震鼓包、不均匀冻胀等地震作用形成的遗迹,并具有显著的地震灾害效应。据统计,1920年以来可可西里单位面积上的地震频次是青海全省平均值的3倍,是青海省中强地震的主要发震场所<sup>[44]</sup>。发震地区主要集中在昆南活动断裂、可可西里山北部活动断裂和可可西里山南部活动断裂沿线。其中,在昆南活动断裂西部于2001年11月14日发生了青海省有地震记录以来最大的一次



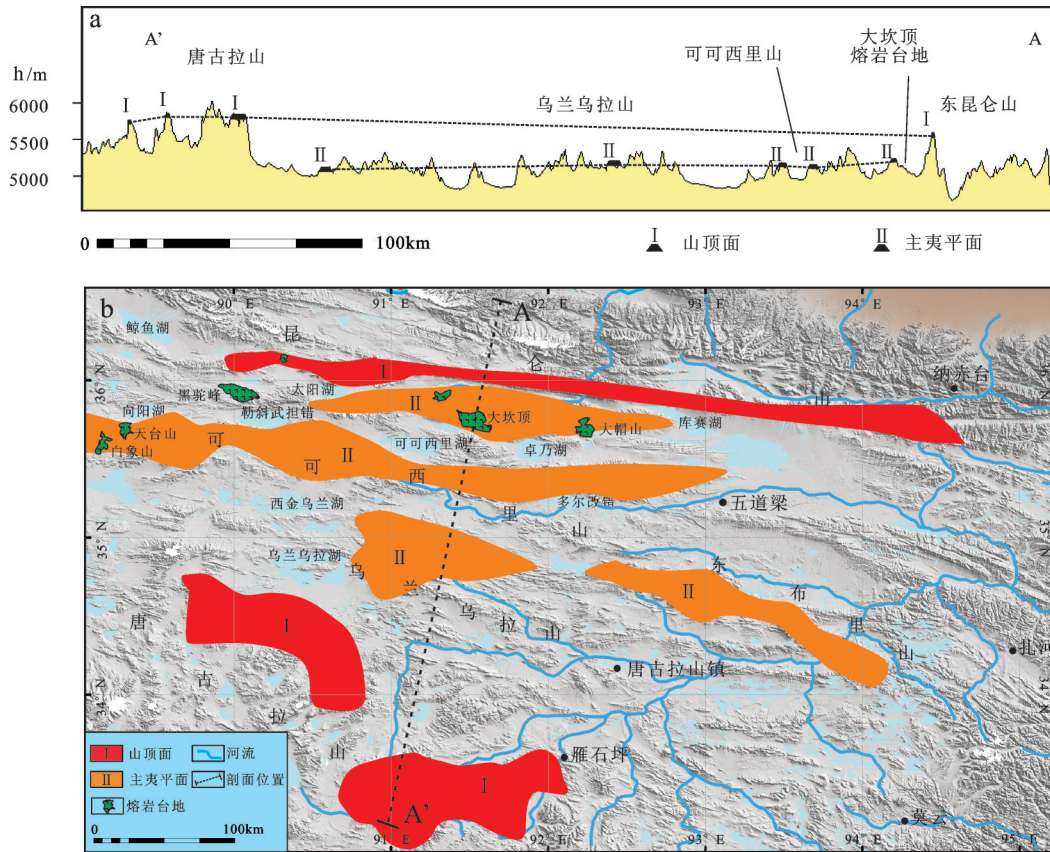


图5 可可西里夷平面、夷平熔岩台地分布示意图(据参考文献[24]修改)

Fig.5 The distribution of planation surface and lava plateau in Hoh Xil (modified after reference [24])

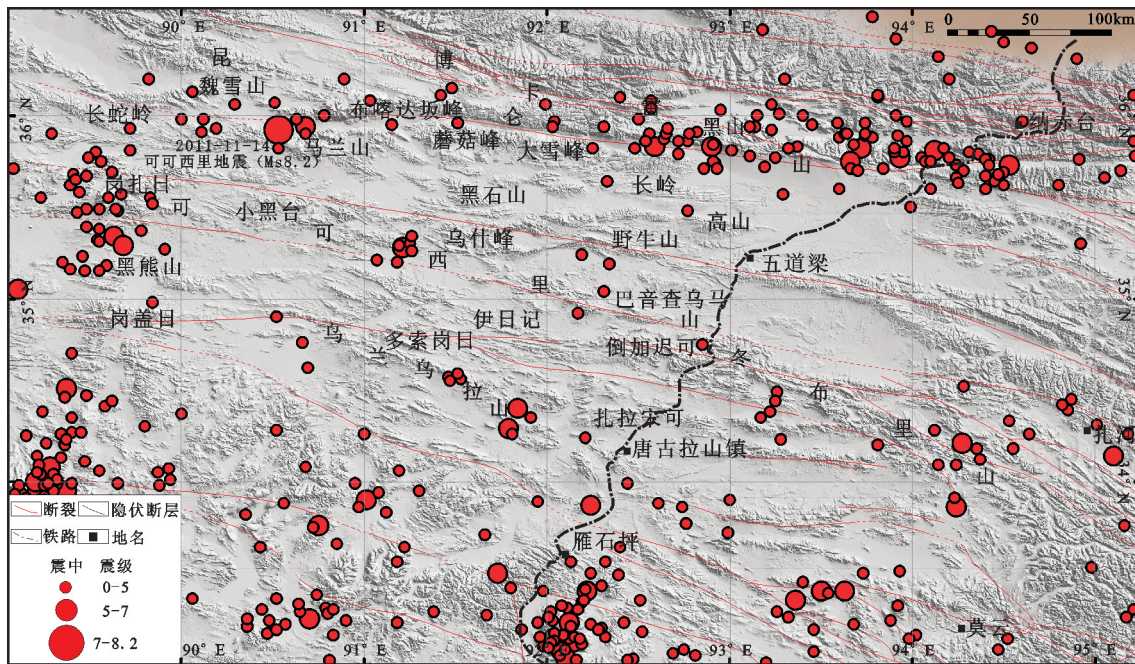


图6 可可西里地区断裂带-地震分布图(地震数据引自中国地震台网)

Fig.6 The distribution of faults and earthquake sites in Hoh Xil(earthquake-related data after China Earthquake Network Center)

地震活动,震级达到 $M_s=8.1$ ,在昆仑山南缘造成的地表裂缝长达几百千米。这是陆地上保存最完整、震级最大的地震遗迹,是开展地震机制研究的最佳场所。

#### 4 可可西里构造演化过程

可可西里众多的地质遗迹为恢复该区构造演化提供了地质证据,在前人研究资料和野外考察的基础上,根据区内的蛇绿混杂岩分布时代、地层分布及构造层变形、同构造岩浆活动特征,认为可可西里主要经历了古特提斯构造域多岛弧、地块碰撞拼贴和新生代青藏高原隆升的过程,具体构造演化为以下8个阶段:

(1)早石炭世—晚二叠世古特提斯洋演化阶段:可可西里地区出露最老的岩石是石炭系—下二叠统的蛇绿混杂岩,是洋壳在的证据,结合古板块恢复资料<sup>[45]</sup>,表明该区在早石炭世—晚二叠世为宽广的古特提斯洋盆(图7-a)。

(2)早三叠世—晚三叠世弧前盆地—残余洋盆演化阶段:根据祁漫塔格花岗闪长岩侵位时间(锆石U-

Pb年龄 $(232.4\pm 1)\text{ Ma}$ <sup>[46]</sup>和玉树附近钙碱性花岗岩年龄(Ar/Ar年龄 $(206\pm 7)\text{ Ma}$ <sup>[47]</sup>)认为古特提斯洋在昆南缝合带和西金乌兰缝合带自早三叠世近乎同时俯冲,形成双向反向俯冲的构造格局(图7-b)。古特提斯洋俯冲关闭的过程中,在可可西里地区堆积了宽广的弧前增生楔杂岩和巨厚的三叠系复理石沉积,代表了弧前盆地—残余洋盆演化阶段。

(3)晚三叠世末—早侏罗世强烈造山阶段:由于班公湖—怒江一线发生海底扩张,羌塘地体向北推挤,可可西里进入强烈的造山阶段,形成了大规模的北北西向滑脱逆冲褶皱,在三叠纪地层中见复式褶皱、断裂和劈理等变形构造,并伴随着岩浆活动和变质作用。其深部的增生楔物质随即也被部分带到地表,可可西里增生楔逐渐进入陆相演化阶段(图7-c)。

(4)侏罗纪前陆盆地阶段:经历了印支期强烈造山阶段,可可西里三叠系向羌塘地体高角度仰冲,在羌塘地区形成侏罗纪前陆盆地<sup>[16]</sup>,沉积了一套陆相红色碎屑岩系(图7-d)。

(5)白垩纪抬升剥蚀阶段:可可西里白垩纪的

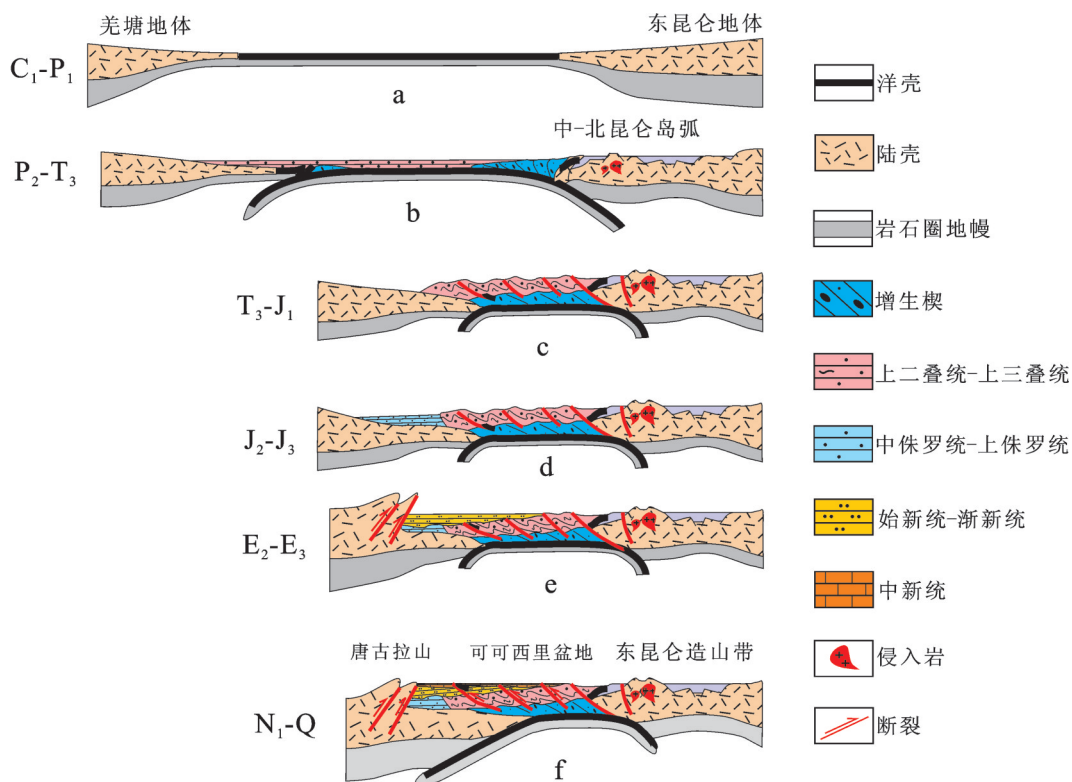


图7 可可西里石炭纪—第四纪构造演化示意图

Fig.7 he tectonic evolution of Hoh Xil during Carboniferous to Quaternary

演化过程主要是依靠风火山群岩相特征,但其地质年代一直有较大的争议。Liu<sup>[17]</sup>对风火山群开展了磁性年代地层学研究,将其年龄确定为始新世—渐新世,故可可西里地区缺失白垩系地层。认为白垩纪期间新特提斯北洋盆地闭合,导致可可西里地区处于抬升剥蚀阶段。

(6)始新世—渐新世前陆盆地阶段:新生代印度板块与欧亚大陆碰撞,造成青藏高原由南向北扩展隆升<sup>[5]</sup>,在羌塘地体北部形成唐古拉山逆冲断层,根据同构造岩浆同位素年龄和沉积充填序列表面,唐古拉山逆冲断层形成于67.1~23.8 Ma<sup>[48]</sup>,可可西里进入前陆盆地阶段,沉积了风火山群和雅西错群,角度不整合于三叠系地层之上(图7-e)。

(7)渐新世末—早中新世地壳缩短阶段:青藏高原在向北扩展抬升的过程中,可可西里地区于渐新世与中新世期间发生南北向地壳缩短,风火山群和雅西错群发生强烈褶皱。抬升过程中伴随着东西向伸展沉积了五道梁群相碳酸盐岩<sup>[5]</sup>,与下伏渐新统雅西措群角度不整合代表青藏高原北部又一次造山作用。

(8)中新世—今抬升夷平阶段:青藏高原于22 Ma前后经历了第二期构造隆升<sup>[49]</sup>,在可可西里地区抬升强烈,基于氢、氧同位素估算的古海拔研究表明<sup>[50-51]</sup>,可可西里36 Ma古海拔不足2000 m,15 Ma已经达到4000 m,接近现今海拔4500 m。可可西里深部“地幔羽”的发现<sup>[52]</sup>和中新世钾质火山岩<sup>[29]</sup>都指示中新世可可西里地区发生了剧烈的抬升。强烈抬升之后,地壳活动平缓,以剥蚀作用为主,使得可可西里在中新世成为一个平坦的高原夷平面(青藏高原主夷平面)。3.6 Ma青藏高原再次发生大规模隆升,青藏统一的主夷平面趋于解体<sup>[53]</sup>,而在可可西里地区至今还未受到河流溯源侵蚀影响,主夷平面仍然完整保存(图7-f)。中更新世以来,全球性降温 and 高原进一步抬升,可可西里首次进入冰冻圈,并完整保留下3次第四纪冰川作用遗迹<sup>[26]</sup>。

## 5 结 论

青海可可西里地质遗迹可分为地质构造、火山和地热遗迹、山脉、地层剖面、河流和湖泊、现代冰川、冰期遗迹7类,共计60余处地质遗迹点。其遗迹的独特性和地学价值在于:(1)可可西里湖泊群

具有高海拔、大密度、多类型等突出特点,并且不受人类生产活动的影响,其变化规律对青藏地区及全球的气候变化具有重要意义;(2)可可西里高原夷平面是青藏高原地区夷平面保存最完整的地区,有助于深入研究高原地貌演化史,充分认识高原出现以前的真实面貌;(3)可可西里现代冰川和第四纪冰川遗迹保存完整,岗扎日、多索岗日、布喀达坂峰和马兰山地区的冰碛物所建立的冰期对青藏高原隆升和全球背景下的气候变化具有重要的研究意义;(4)可可西里斜勒武担湖—大帽山地区具有丰富的火山地貌,其火山地质为进一步论证青藏高原碰撞后的隆升机制提供更多的岩石学依据;(5)可可西里西金乌兰—蛇形沟蛇绿混杂岩、冈齐曲蛇绿混杂岩、巴音查乌玛蛇绿混杂岩具有较为完整的蛇绿岩套序列,对重建古特提斯构造域具有重要意义;(6)可可西里沉积盆地是青藏高原腹地最大的新生代陆相沉积盆地,风火山始新统一渐新统和通天河渐新统地层剖面所记录的沉积信息是揭示青藏高原北部隆升过程和气候变化的重要地质依据;(7)可可西里区内断裂活动频繁,地震遗迹保存完整,区内昆南活动断裂带、勒斜武担湖—太阳湖活动断裂、西金乌兰湖—五道梁南活动断裂和乌兰乌拉湖—岗齐曲活动断裂是研究天然地震机制的最佳场所。

根据可可西里众多的地质遗迹认为该区构造演化主要包括8个阶段:早石炭世—晚二叠世古特提斯洋演化阶段、早三叠世—晚三叠世弧前盆地—残余洋盆演化阶段、晚三叠世末—早侏罗世强烈造山阶段、侏罗纪前陆盆地阶段、白垩纪抬升剥蚀阶段、始新世—渐新世前陆盆地阶段、渐新世末—早中新世地壳缩短阶段、中新世—今抬升夷平阶段。

**致谢:**野外考察得到青海省住建厅和青海可可西里保护区的帮助,一起参加野外考察工作的还有于涵工程师和闻丞博士,在此一并表示感谢。

## 参考文献(References):

- [1] 李炳元. 青海可可西里地区综合科学考察初报[J]. 山地研究, 1990, 8(3): 161-166.
- Li Bingyuan. A preliminary report about integrated scientific expedition in the Hohxilshan region of Qinghai province [J]. Mountain Research, 1990, 8(3): 161-166 (in Chinese with English).

- abstract).
- [2] 张以蒞, 郑祥身. 青海可可西里地区地质演化[M]. 北京: 科学出版社, 1996.  
Zhang Yifu, Zheng Xiangshen. Geological evolution of the Hoh Xil region, Qinghai [M]. Beijing: Science Press, 1996 (in Chinese).
- [3] 邓万明, 郑锡澜, 松本征夫. 青海可可西里地区新生代火山岩的岩石特征与时代[J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 15(4): 289-298.  
Deng Wangming, Zheng Xilan, Yukio Matsumoto. Petrological characteristics and ages of Cenozoic volcanic rocks from the Hoh Xil Mts., Qinghai province [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1996, 15(4): 289-298 (in Chinese with English abstract).
- [4] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogeny [J]. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2000, 28(1): 211-280.
- [5] Wang Chengshan, Dai Jingen, Zhao Xixi, et al. Outward-growth of the Tibetan Plateau during the Cenozoic: A review [J]. Tectonophysics, 2014, 621, 1-43.
- [6] Dai Jingen, Zhao Xixi, Wang Chengshan, et al. The vast proto-Tibetan Plateau: New constraints from Paleogene Hoh Xil Basin [J]. Gondwana Research, 2012, 22: 434-446.
- [7] 边千韬, 常承法, 郑祥身. 青海可可西里大地构造基本特征[J]. 地质科学, 1997, 32(1): 37-46.  
Bian Qiantao, Chang Chengfa, Zheng Xiangshen. Basic geotectonic characteristics of the Hoh Xil region of Qinghai province, China [J]. Scientia Geologica Sinica, 1997, 32(1): 37-46 (in Chinese with English abstract).
- [8] 许志琴, 李海兵, 唐哲民, 等. 大型走滑断裂对青藏高原地体构架的改造[J]. 岩石学报, 2011, 11: 3157-3170.  
Xu Zhiqin, Li Haibin, Tang Zhemin, et al. The transformation of the terrain structures of the Tibet Plateau through large-scale strike-slip faults [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(11): 3157-3170 (in Chinese with English abstract).
- [9] Wang Chengshan, Zhao Xixi, Liu Zhifei, et al. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau [J]. PNAS, 2008, 105 (13): 4987-4992.
- [10] Kapp P, Yin A, Manning C E, et al. Tectonic evolution of the early Mesozoic blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt, central Tibet[J]. Tectonics, 2003, 22(4): 1-27.
- [11] Wang X, Metcalfe I, Jian P, et al. The Jinshajiang - Ailaoshan suture zone, China: tectonostratigraphy, age and evolution [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2000, 18(6): 675-690.
- [12] 许志琴, 杨经绥, 李文昌, 等. 青藏高原中的古特提斯体制与增生造山作用[J]. 岩石学报, 2013, 29(6): 1847-1860.  
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Wenchang, et al. Paleo-Tethys system and accretionary orogen in the Tibet Plateau [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(6): 1847-1860 (in Chinese with English abstract).
- [13] 刘志飞. 青藏高原腹地第三纪沉积与高原隆升的关系[D]. 成都: 成都理工学院博士学位论文, 1999: 1-267.  
Liu Zhifei. Sedimentology of the Tertiary Basins in the Hinterland of the Tibet Plateau: Applications for the History and Mechanism of Plateau Uplift [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1999: 1-267 (in Chinese with English abstract).
- [14] 边千韬, 郑祥身, 李红生, 等. 青海可可西里地区蛇绿岩的时代及形成环境[J]. 地质论评, 1997, 43(4): 347-355.  
Bian Qiantao, Zheng Xiangshen, Li Hongsheng, et al. Age and tectonic setting of ophiolite in the Hoh Xil region, Qinghai Province[J]. Geological Review, 1997, 43(4): 347-355 (in Chinese with English abstract).
- [15] 朱迎堂. 可可西里—巴颜喀拉三叠纪沉积盆地的形成及演化[D]. 成都: 成都理工大学博士学位论文, 2006: 1-172.  
Zhu Yingtang. The formation and change of Triassic sedimentary basin in Hoh Xil Bayan Har [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006: 1-172 (in Chinese with English abstract).
- [16] 李勇, 王成善, 伊海生. 中生代羌塘前陆盆地充填序列及演化过程[J]. 地层学杂志, 2002, 26(1): 62-67.  
Li Yong, Wang Chengshan, Yi haisheng. Filled sequence and evolution of the mesozoic qiangtang composite foreland basin in the Qinghai-Tibet plateau [J]. Journal of Stratigraphy, 2002, 26 (1): 62-67(in Chinese with English abstract).
- [17] Liu Z, Zhao X, Wang C, et al. Magnetostratigraphy of Tertiary sediments from the Hoh Xil Basin: implications for the Cenozoic tectonic history of the Tibetan Plateau [J]. Geophysical Journal International, 2003, 154(2): 233-252.
- [18] Haisheng Y, Chengshan W, Shun L, et al. Sedimentary record of the planation surface in the Hoh Xil region of the northern Tibet plateau [J]. Acta Geologica Sinica (English edition), 2000, 74(4): 827-835.
- [19] 李永春, 陈大涌. 高海拔地形区冰缘环境土壤特征的研究——以青藏高原可可西里自然保护区为例[J]. 泉州师范学院学报(自然科学), 2005, 23(2): 47-57.  
Li Yongchun, Chen Dayong. Influence of environment with high altitude on soil forming and development in ice edge of Qinghai Tibet Plateau [J]. Journal of Quanzhou Normal University (Natural Science), 2005, 23(2): 47-57 (in Chinese with English abstract).
- [20] 胡东升. 可可西里地区湖泊概况[J]. 盐湖研究, 1994, 2(3): 17-21.  
Hu Dongsheng. Lakes survey in Kekexili region [J]. Journal of Salt Lake Research, 1994, 2(3): 17-21(in Chinese with English abstract).
- [21] Yan L, Zheng M. Influence of climate change on saline lakes of the Tibet Plateau, 1973 - 2010[J]. Geomorphology, 2015, 246: 68-78.
- [22] 罗重光, 韩凤清, 庞小鹏, 等. 青海可可西里主要湖泊湖底地貌研究[J]. 盐湖研究, 2010, 28(1): 1-8.  
Luo Chongguang, Han Fengqing, Pang Xiaopeng, et al. study on sublacustrine morphology of main lakes in Hoh Xil region [J].

- Journal of Salt Lake Research, 2010, 28(1): 1–8(in Chinese with English abstract).
- [23] 崔久之, 高全洲, 刘耕年, 等. 青藏高原夷平面与岩溶时代及其起始高度[J]. 科学通报, 1996, 41(15): 1402–1406.  
Cui Zhijiu, Gao Quanzhou, Liu Gengnian, et al. The initial elevation of palaeokarst and planation surfaces on Tibet Plateau [J]. Chinese Science Bulliten, 1996, 41(15): 1402–1406. (in Chinese).
- [24] 李炳元, 潘保田, 高红山. 可可西里东部地区的夷平面与火山年代[J]. 第四纪研究, 2002, 22(5): 397–405.  
Li Bingyuan, Pan Baotian, Gao Hongshan. A planation surface and ages of volcanic rocks in eastern Hohxil, Qinghai–Tibetan Plateau[J]. Quaternary Sciences, 2002, 22(5): 397–405.
- [25] 李世杰. 青藏高原可可西里地区现代冰川发育特征[J]. 地理科学, 1996, 16(1): 10–17.  
Li Shijie. Characteristic of existing glacial development in the Hoh Xil region, Qinghai–Xizang Plateau [J]. Scientia Geographica Sinica, 1996, 16(1): 10–17 (in Chinese with English abstract).
- [26] 李世杰, 李树德. 青海可可西里地区第四纪冰川与环境演化[J]. 冰川冻土, 1992, 14(4): 316–324.  
Lin Shijie, Li Shude. Quaternary glacial and environmental changes in the region of Hoh Xil, Qinghai Province [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1992, 14(4): 316–324 (in Chinese with English abstract).
- [27] Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of late Cenozoic climate [J]. Nature, 1992, 359(6391): 117–122.
- [28] Owen L A, Dortch J M. Nature and timing of Quaternary glaciation in the Himalayan–Tibetan orogeny [J]. Quaternary Science Reviews, 2014, 88(5): 14–54.
- [29] 江东辉, 刘嘉麒, 丁林. 青藏高原北部可可西里地区新生代钾质火山岩地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 2008, 24(2): 279–290.  
Jiang Donghui, Liu Jiaqi, Ding Lin. Geochemistry and petrogenesis of Cenozoic potassic volcanic rocks in the Hoh Xil area, northern Tibet plateau [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(2): 279–290 (in Chinese with English abstract).
- [30] 赵振明, 计文化, 李荣社, 等. 青藏高原北部巴颜喀拉与东昆仑地区新近纪以来火山岩的地球化学特征及其成因[J]. 地球化学, 2009, 38(3): 205–230.  
Zhao Zhenming, Ji Wenhua, Li Rongshe, et al. Geochemical characteristics an petrogenesis of volcanic rocks since Neogene in the bayankala and east Kunlun region, northern Tibetan plateau [J]. Geochimica, 2009, 38(3): 205–230 (in Chinese with English abstract).
- [31] 郑祥身, 边千韬, 郑健康, 等. 青海可可西里地区新生代火山岩研究[J]. 岩石学报, 1996, 12(4): 530–545.  
Zheng Xiangshen, Bian Qiantao, Zheng Jiankang. On the Cenozoic volcanic rocks in Hoh Xil district, Qinghai province[J]. Acta Petrologica Sinica, 1996, 12(4): 530–545 (in Chinese with English abstract).
- [32] 边千韬, 郑祥身. 西金乌兰和岗齐曲蛇绿岩的发现[J]. 地质科学, 1991, (3): 304.  
Bian Qiantao, Zheng Xiangshen. Ophiolite is found in the areas of Xijir Ulan and Gangqiqu, Qinghai Province [J]. Scientia Geologica Sinica, 1991, (3): 304 (in Chinese with English abstract).
- [33] 李红生, 边千韬. 可可西里西金乌兰—冈齐曲蛇绿混杂岩中晚古生代放射虫[J]. 现代地质, 1993, 7(4): 410–420.  
Li Hongsheng, Bian Qiantao. Upper Paleozoic radiolaria of the Xijin Ulan–Gangqiqu ophiolite complex, Kekexili [J]. Geoscience, 1993, 7(4): 410–420 (in Chinese with English abstract).
- [34] 黄汲清, 陈炳蔚. 中国及邻区特提斯海的演化[M]. 北京: 地质出版社, 1987.  
Huang Jiqing, Chen Bingwei. The Evolution of the Tethys in China and Adjacent Regions [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987 (in Chinese with English abstract).
- [35] 李才, 翟庆国, 董永胜, 等. 青藏高原龙木错—双湖板块缝合带与羌塘古特提斯洋演化记录[J]. 地质通报, 2007, 26(1): 13–21.  
Li Cai, Zhai Qingguo, Dong Yongsheng, et al. Lungmu Co–Shanghu plate suture in the Qinghai–Tibet Plateau and records of the evolution of the Paleo–Tethys Ocean in the Qiangtang area, Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(1): 13–21 (in Chinese with English abstract).
- [36] 李才. 青藏高原龙木错—双湖—澜沧江板块缝合带研究二十年[J]. 地质论评, 2008, 54(1): 105–119.  
Li Cai. A review on 20 years’ study of the Longmu Co–Shuanghu–Lancang river suture zone in Qinghai–Xizang (Tibet) Plateau[J]. Geological Review, 2008, 54(1): 104–119 (in Chinese with English abstract).
- [37] 刘志飞, 王成善, 伊海生, 等. 可可西里盆地新生代沉积演化历史重建[J]. 地质学报, 2001, 75(2): 250–258.  
Liu Zhifei, Wang Chengshan, Yi Haisheng, et al. Reconstruction of depositional history of the Cenozoic Hoh Xil Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(2): 250–258 (in Chinese with English abstract).
- [38] 李廷栋. 青藏高原地质科学研究的新进展[J]. 地质通报, 2002, 21(7): 370–376.  
Li Tingdong. New progress in the geoscience study of the Qinghai–Tibet Plateau [J]. Regional Geology of China, 2002, 21(7): 370–376 (in Chinese with English abstract).
- [39] 伊海生, 王成善, 李亚林, 等. 构造事件的沉积响应——建立青藏高原大陆碰撞、隆升过程时空坐标的设想和方法[J]. 沉积与特提斯地质, 2001, 21(2): 1–15.  
Yi Haisheng, Wang Chengshan, Li Yalin. Sedimentary response to tectonic events: Reconstructed spatio–temporal scale of the Indo–Asian continental collision and Qinghai–Xizang Plateau

- uplift [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2001, 21 (2): 1–15 (in Chinese with English abstract).
- [40] Liu Zhifei, Wang Chengshan. Facies analysis and depositional systems of Cenozoic sediments in the Hoh Xil basin, northern Tibet [J]. *Sedimentary Geology*, 2001, 140(3): 251–270.
- [41] 刘学燕, 侯曾谦, 王光辉, 等. 沱沱河盆地古近纪—新近纪盆地演化及青藏高原隆升的沉积响应[J]. *地学前缘*, 2011, 18(4): 65–76.
- Liu Xueyan, Hou Zengqian, Wang Guanghui, et al. Basin evolutions of the Tuotuohe River basin and sedimentary response to the uplifting of the Qinghai – Tibet Plateau in the Paleogene – Neogene[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(4): 65–76 (in Chinese with English abstract).
- [42] 伊海生, 林金辉, 周恩恩, 等. 可可西里地区中新世湖相叠层石成因及其古气候意义[J]. *矿物岩石*, 2008, 28(1): 106–113.
- Yi Haisheng, Lin Jinhui, Zhou Kenken, et al. The origin of Miocene lacustrine stromatolites in the Hoh Xil area and its paleoclimatic implications [J]. *Journal of Mineral Petrol*, 2008, 28 (1): 106–113 (in Chinese with English abstract).
- [43] 张以芬. 可可西里—巴颜喀拉三叠纪沉积盆地的划分及演化[J]. *青海地质*, 1996, (1): 1–17.
- Zhang Yifu. Division and evolution of the Hoh Xil– Bayan Har sedimentary basin [J]. *Qinghai Geology*, 1996, (1): 1–17 (in Chinese with English abstract).
- [44] 叶建青. 青海可可西里地区的活动构造与地震[J]. *高原地质*, 1994, 6(2): 11–23.
- Ye Jianqing. Study on the active tectonic and earthquake in Kekexili area of Qinghai province [J]. *Plateau Earthquake Research*, 1994, 6(2): 11–23 (in Chinese with English abstract).
- [45] Scotese C R. A continental drift flipbook [J]. *The Journal of Geology*, 2004, 112(6): 729–741.
- [46] 王秉璋, 陈静, 罗照华, 等. 东昆仑祁漫塔格东段晚二叠世—早侏罗世侵入岩岩石组合时空分布、构造环境的讨论[J]. *岩石学报*, 2014, 30(11): 3213–3228.
- Wang Bingzhang, Chen Jing, Luo Zhaohua, et al. Spatial and temporal distribution of Late Permian– Early Jurassic intrusion assemblages in eastern Qimantag, East Kunlun, and their tectonic settings [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(11): 3213–3228 (in Chinese with English abstract).
- [47] Roger F, Jolivet M, Malavieille J. Tectonic evolution of the Triassic fold belts of Tibet[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2008, 340(2): 180–189.
- [48] 李亚林, 王成善, 伊海生, 等. 西藏北部新生代大型逆冲推覆构造与唐古拉山的隆起[J]. *地质学报*, 2006, 80(8): 1118–1130.
- Li Yalin, Wang Chengshan, Yi Haisheng, et al. Cenozoic thrust system and uplifting of the Tanggula Mountain, Northern Tibet [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(8): 1118–1130 (in Chinese with English abstract).
- [49] 李炳元, 潘保田. 青藏高原古地理环境研究[J]. *地理研究*, 2002, 21(1): 61–70.
- Li Bingyuan, Pan Baotian. Progress in paleogeographic study of the Tibetan Plateau [J]. *Geographical Research*, 2002, 21(1): 61–70 (in Chinese with English abstract).
- [50] Cyr A J, Currie B S, Rowley D B. Geochemical evaluation of Fenghuoshan Group lacustrine carbonates, north– central Tibet: Implications for the paleoaltimetry of the Eocene Tibetan Plateau[J]. *The Journal of Geology*, 2005, 113(5): 517–533.
- [51] Polissar P J, Freeman K H, Rowley D B, et al. Paleoaltimetry of the Tibetan Plateau from D/H ratios of lipid biomarkers[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 287(1): 64–76.
- [52] 许志琴, 姜枚, 杨经绥, 等. 青藏高原的地幔结构: 地幔羽, 地幔剪切带及岩石圈俯冲板片的拆沉[J]. *地学前缘*, 2004, 11(4): 329–343.
- Xu Zhiqin, Jiang Mei, Yang Jingsui, et al. Mantle structure of Qinghai– Tibet plateau: Mantle plume, mantle shear zone and delamination of lithospheric slab [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(4): 329–343 (in Chinese with English abstract).
- [53] 潘保田, 高红山, 李吉均. 关于夷平面的科学问题——兼论青藏高原夷平面[J]. *地理科学*, 2002, 22(5): 520–526.
- Pan Baotian, Gao Hongshan, Li Jijun. On Problems of Planation Surface——A Discussion on the Planation Surface in Qinghai– Xizang Plateau [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(5): 520–526 (in Chinese with English abstract).