

基于数字高程模型(DEM)的可可西里地貌及区划研究

许丽^{1,2} 李江海^{1,2,†} 刘持恒^{1,2} 崔鑫^{1,2}

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; † 通信作者, E-mail: jhli@pku.edu.cn

摘要 基于数字高程模型(DEM)数据, 应用地理信息系统(GIS)方法, 对可可西里地区地貌要素进行定量分析, 并对其地貌区划进行研究。可可西里地区海拔分为中海拔、高海拔和极高海拔三级, 其中高海拔地区占据69.38%的区域。研究区夷平面广泛发育, 根据地势起伏度可划分为丘陵、平原和台地3种类型。除东部三江源地区外, 研究区主体未受到青藏高原强烈隆升造成的河流溯源侵蚀影响, 坡度类型以小于15°的微斜坡、缓斜坡和斜坡为主, 地势平坦。依据地貌形态特征定量分析、地貌类型组合和地貌成因的差异性原则, 可可西里地区可划分为4个地貌区: 羌塘高原地貌区(I)、东昆仑山山地地貌区(II)、三江源丘状山原地貌区(III)和柴达木高原盆地(IV)。其中, 羌塘高原地貌区又可划分为可可西里高原地貌亚区(I₁)和唐古拉山高山地貌亚区(I₂), 东昆仑山山地地貌区可划分东昆仑南部极高山地貌亚区(II₁)和东昆仑北部高山地貌亚区(II₂)。地貌要素研究可以直观、量化地反映可可西里地区海拔、地势起伏度及坡度特征, 地貌区划研究可以反映可可西里地区高原、山地、山原、盆地的地貌格局和水平分异, 对研究地貌特征、地貌类型及开发保护具有重要意义。

关键词 DEM; 可可西里; 地貌形态; 地貌区划

中图分类号 P931

Research on Geomorphological Morphology and Regionalization of Hoh Xil Based on Digital Elevation Model (DEM)

XU Li^{1,2}, LI Jianghai^{1,2,†}, LIU Chiheng^{1,2}, CUI Xin^{1,2}

1. The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution (MOE), School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. Institute of Oil and Gas, Peking University, Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: jhli@pku.edu.cn

Abstract The geomorphological morphology was analyzed quantitatively and the geomorphological regionalization was studied detailedly based on Digital Elevation Model (DEM) of Hoh Xil area combined with platform of Geographic Information System (GIS). Research suggests that the Hoh Xil area composes of three types in terms of absolute altitude: the middle, the high and the highest, and the high altitude type makes up about 69.38%. Due to the formation of planation surface, the relief amplitude in this area is less than 200 m mainly included plain, tableland and hill. Rivers headward erosion caused by strong uplift of Qinghai-Tibet plateau was not exert an influence on the Hoh Xil except Sanjiangyuan region. So the primary compose of slope type are micro slope, slow slope and slope which all less than 15°. According to regional differentiation of the essential geomorphological types and their genesis, the Hoh Xil is divided into four major geomorphological regions: the Qiangtang plateau (Region I), the east Kunlun mountains (Region II), Sanjiangyuan hill mountains (Region III) and Qaidam plateau and basins (Region IV). Moreover, the Region I is divided into Hoh Xil plateau lake basin (Subregion I₁) and Dangla high mountains (Subregion I₂). The Region II is divided into southern highest

国家重点研发计划(2016YFC0503301)和国家科技重大专项(2016ZX05033002-007)资助

收稿日期: 2016-04-18; 修回日期: 2016-05-16; 网络出版日期: 2017-09-14

mountain (Subregion II₁) and northern high mountains (Subregion II₂). The morphology research which reflect altitude, relief and slope and regionalization research which show geomorphological pattern and horizontal differentiation of plateau, mountain land, mountain plateau and basin will be of great significance in geomorphic, landform type and exploitation, protection in Hoh Xil.

Key words DEM; Hoh Xil; geomorphological morphology; geomorphological regionalization

地貌是陆地表面各自然地理要素相互作用最活跃的界面,不仅复杂多变,而且在很大程度上控制着其他生态、环境因子的分布和变化,进而控制着自然环境的分异^[1-2]。形成地貌的过程复杂多样,使得地貌类型与自然景观极为繁多,不同区域的地貌既有相似性,又存在差异性,根据这种异同进行地貌分区,能更深刻地认识地貌的区域特征及区域间差异,对地貌研究具有重要的价值^[3-4]。

目前,利用数字高程模型(digital elevation model, DEM)进行地貌要素的自动提取是地貌科学研究的热点,在基本地貌形态分析中的应用已日趋成熟^[5-6]。基于 DEM 进行基本的地貌要素分析,能快速、准确地获取传统地形图无法表征的相关信息,易于进行可视化研究、统计分析和区域分析^[7-8],在进行大范围地貌研究或交通不便区域地貌普查工作中具有重要的应用价值^[9-10]。

青藏高原的地貌形成与演化一直是我国构造地貌研究最活跃的领域^[11-12]。可可西里地区位于青藏高原腹地,是青藏高原夷平面保存最好的地区,并完整地保存着世界上最长、最新的古地震断裂带遗迹,同时发育温泉、火山地貌、冰川、冰缘地貌、高原湖泊群等特殊的地貌类型^[13-18]。这种地貌特点和地貌类型的形成,直观地记录了青藏高原隆升的地质演化过程及气候、环境的变化过程。然而,可可西里地区面积广阔,交通条件差,地貌普查工作存在诸多困难,对可可西里地区地貌形态的定量分析及地貌区划研究都欠缺。本文基于数字高程模型(DEM),应用地理信息系统(geographic information system, GIS)方法,对可可西里地区地貌要素进行量化分析,并对其地貌区划进行研究。

1 可可西里地区地质背景

可可西里自然保护区位于青海西南部的玉树藏族自治州境内,其范围为昆仑山脉以南,乌兰乌拉山以北,东起青藏铁路,西迄青海省界。这里海拔高,气候寒冷而干燥,环境恶劣,人迹罕至,是青藏高原最大的高寒地区。本文研究区包括西藏北部

被称为“羌塘草原”的部分、青海昆仑山以南地区以及新疆与西藏、青海毗邻的地区。

在构造位置上,可可西里核心区北部以昆仑山南缘缝合带为界,南部以唐古拉断层为界,横跨巴颜喀拉地体西段和羌塘地体北部,覆盖西金乌兰-金沙江缝合带^[19]。构造演化上,可可西里地区经历过晚石炭世-晚二叠世古特提斯洋盆关闭、晚三叠世-早侏罗世前陆盆地的形成和新生代青藏高原的隆升等三期重要构造运动^[20-22]。频繁的构造运动在区内形成广泛的构造变形,其中主要以逆冲断裂、走滑断裂、褶皱等构造样式为主,并形成现今盆地复杂的构造格局。

可可西里地区是中国西部现代构造运动最活跃的地带之一,新生代青藏高原的 3 次抬升运动在布喀达坂峰-库赛湖-昆仑山口等地形成多处活动性断裂。这些断裂具有强烈的活动性,其频繁活动也使得研究区成为地震较为频发的区域。1920 年以来,Ms≥6.0 级的地震共发生过 8 次,占青海省地震的 1/3; Ms 5.0~5.9 级的地震 15 次,其中 1998 年 11 月 5 日 Ms 7.0 级的地震在地表出现 9 km 的地震破裂形变带。地震造成的地表变形痕迹保存完整,规模壮观,自然灾害现象特殊而丰富^[23-24],是特殊的地质历史记录景观。如 2001 年 11 月 14 日发生于昆仑山口西的 Ms 8.1 级强烈地震造成地表破裂带长达 426 km,是目前世界上最长、最新的断裂带。该地震遗迹已被国际地质学界公认为研究喜马拉雅造山运动和强地震机理的天然课堂^[25]。

2 可可西里地貌形态特征分析

2.1 DEM 数据来源

目前,不同国家和地区利用不同的数据采集方法,都成功地获取相关尺度的 DEM 数据。本研究利用的 DEM 数据由美国航天飞机雷达地形测绘任务(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)获得。SRTM 是 2000 年 2 月由 NASA (美国国家航空航天局)和 NIMA (美国国防部国家测绘局)联合发射的“奋进”号航天飞机测量得到。该任务获取的 SRTM-

DEM 是迄今为止人类第一次从地球轨道高度对地球表面进行雷达三维成像而获取的数字高程模型数据^[26-27], 数据的经纬度范围为 60°N—56°S, 180°E—180°W, 覆盖全球陆地表面 80% 以上。数据的值域范围为 -12000~9000 m, 水平精度为 20 m, 高程精度为 16 m^[26]。

按照其精度, 可以将 SRTM 地形数据划分为 SRTM1 和 SRTM3 两类, 分别对应分辨率为 30 m 和 90 m 的数据(目前公开的数据分辨率为 90 m)。此数据产品于 2003 年公开发布, 经历多次修订, 目前为 V4.1 版本。该版本由 CIAT (国际热带农业中心) 利用新的插值算法得到 SRTM 地形数据, 更好地填补了 SRTM 90 的数据空洞。本研究使用数据的分辨率为 90 m, 来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>)。

2.2 可可西里海拔特征

可可西里为青藏高原最高的地区之一, 平均海拔 5000 m 左右。区内地势南、北两侧高, 中部较低缓。昆仑山脉海拔较高, 北缘中昆仑山脉东段有布喀达坂峰(又称新青峰或莫诺马哈峰)海拔 6674 m, 为本区最高峰, 此外还有马兰山(6016 m)、巍雪山(5814 m)、五雪峰(5805 m)、大雪峰(5863 m)等, 这些山地是本区第四纪冰川和现代冰川发育的中心。可可西里山、冬布勒山及乌兰乌拉山横贯区内中部, 平均海拔为 5100~5400 m, 仅有少数高峰超过 5600 m。山地之间为宽阔的宽谷湖盆带, 有楚玛尔河、沱沱河等纵贯区内, 还有可可西里湖、西金乌兰湖等镶嵌其中, 这些湖盆的海拔在 4500~4900 m 之间。南部唐古拉山整体海拔较高, 平均 5600~5700 m, 多座山峰超过 6000 m (图 1)。

根据中国陆地地貌的三级台阶特征, 在中国 1:100 万数字地貌分类系统中, 将海拔高度分为四级^[28]: 低海拔(<1000 m)、中海拔(1000~3500 m)、高海拔(3500~5000 m)和极高海拔(>5000 m)。1000 m 和 3500 m 两个高程充分反映我国地势的三级台阶, 同时 3500 m 高程为现代冰川和古冰川作用的下线(也是多年冻土下线和森林上线); 5000 m 高程为雪线平均高程^[9]。基于可可西里地区 DEM 数据, 通过 GIS 平台对可可西里地区海拔进行分级统计(表 1)。研究区内最低海拔为 2749 m, 因此只有后三级海拔高度。可以看出, 高海拔地区占据可可西里绝大部分区域, 达到 69.38%; 中海拔地区主要分

表 1 可可西里地区海拔分级统计
Table 1 Classification statistics according to altitude in Hoh Xil

海拔分级	面积/km ²	比例/%
中海拔(2749~3500 m)	4904.32	1.99
高海拔(3500~5000 m)	170747.70	69.38
极高海拔(5000~6642 m)	70453.84	28.63

布在可可西里东北部的柴达木盆地; 极高海拔地区主要分布在可可西里北部的昆仑山南缘和南部的唐古拉山地区, 可可西里自然保护区内的可可西里山和乌兰乌拉山也有零星分布。

2.3 可可西里地势起伏度特征

地势起伏度指某一确定面积内最高和最低点之高差, 是反映地形起伏程度的宏观因子, 是描述地貌形态的定量指标, 也是进行区域地貌对比和地貌类型划分的客观依据。在区域性研究中, 利用 DEM 数据提取地形起伏度能够快速、直观地反映地形的起伏特征^[29]。起伏度在一定程度上反映地貌的发育阶段: 年轻的、近期强烈抬升、褶皱或断裂形成的形态有较大的起伏度, 年老的、经过夷平作用的起伏度较小。

除三江源地区外, 可可西里大部分地区未受到青藏高原强烈隆起造成的河流溯源侵蚀影响, 因而区内地势起伏度较小, 相对高度仅 300~600 m, 甚至更小。本文以 4 km 作为地势起伏的统计单元, 通过提取可可西里 DEM 数据的地势起伏度, 根据中国 1:100 万数字地貌制图规范^[28], 按照平原(起伏度<30 m)、台地(起伏度一般为 30~70 m)、丘陵(起伏度为 70~200 m)、小起伏山地(起伏度为 200~500 m)、中起伏山地(起伏度为 500~1000 m)、大起伏山地(起伏度为 1000~2500 m)和极大起伏山地(起伏度>2500 m)的分类方法, 得出可可西里地区的地势起伏度分布图(图 2)。

可可西里地区虽然海拔高, 但起伏度相对较小, 没有大起伏山地和极大起伏山地类型。通过 GIS 平台对不同起伏度进行面积统计可知, 丘陵占的比例最大(33.95%), 其次为平原(26.78%), 第三为台地(22.77%)(表 2)。可可西里自然保护区内主要以平缓和低起伏的湖平面、平原以及台地为主, 被近北北西向的丘陵分割, 仅北部东昆仑山、南部唐古拉山和东部三江源地区分布小起伏山地。

青藏高原中部的中央山脉、唐古拉山逆冲推覆

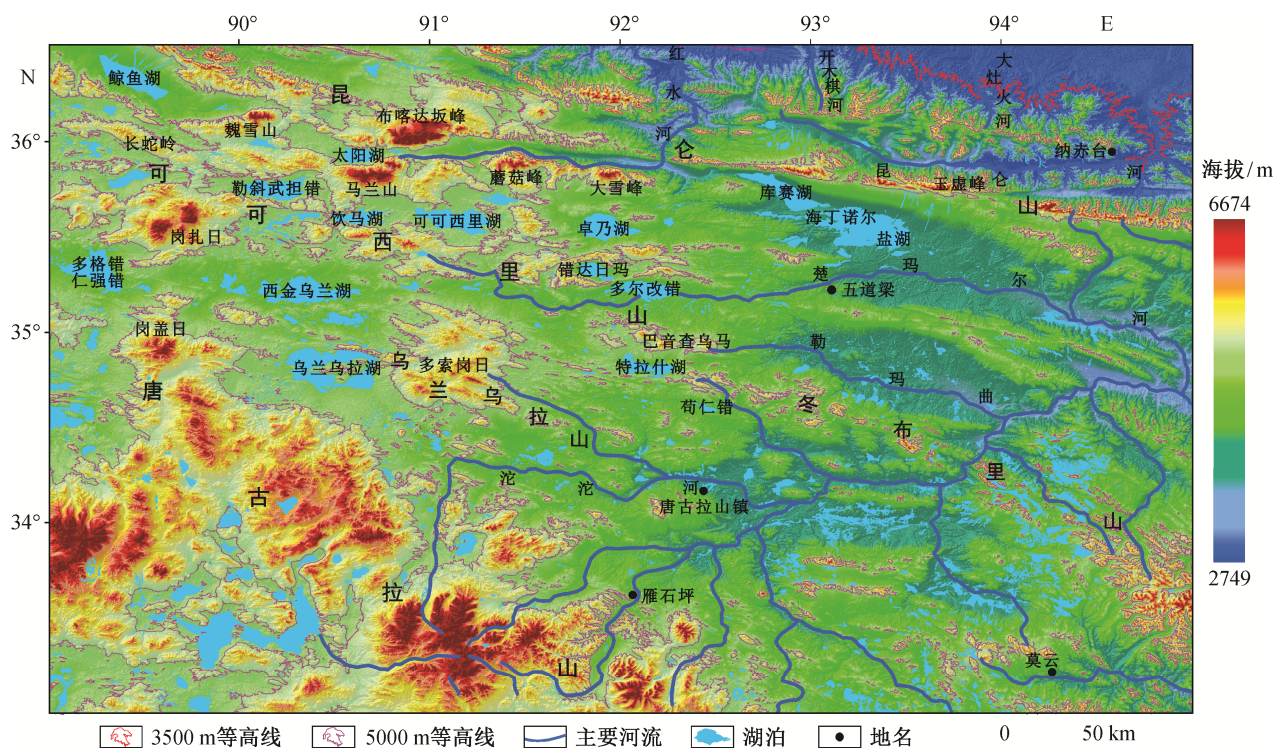


图 1 基于 SRTM-DEM 的可可西里地区海拔分级
Fig. 1 Altitude classified map in Hoh Xil based on SRTM-DEM

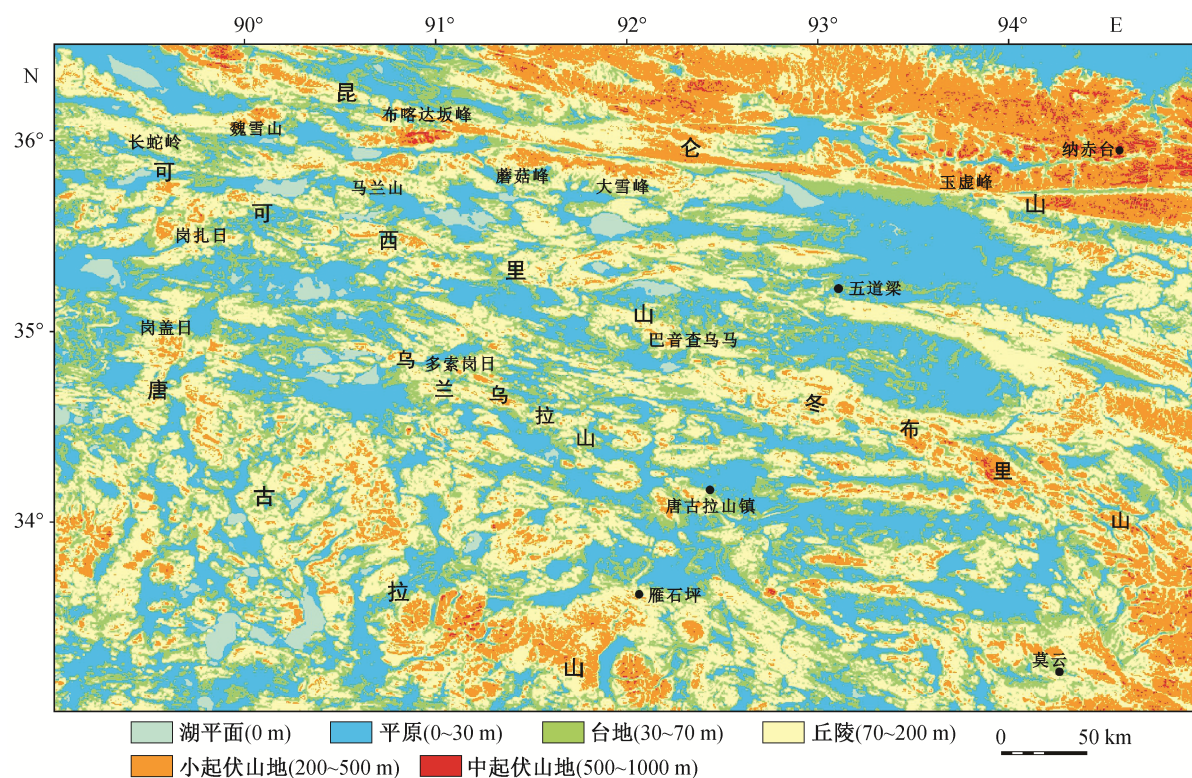


图 2 基于 SRTM-DEM 的可可西里地区地势起伏度分级
Fig. 2 Relief amplitude classified map in Hoh Xil based on SRTM-DEM

表 2 可可西里地区地势起伏度分级统计
Table 2 Classification statistics according to relief amplitude in Hoh Xil

起伏度分级	面积/km ²	比例/%
湖平面(0 m)	4233.00	1.72
平原(0~30 m)	65906.92	26.78
台地(30~70 m)	56038.12	22.77
丘陵(70~200 m)	83552.65	33.95
小起伏山地(200~500 m)	34946.91	14.20
中起伏山地(500~1000 m)	1427.41	0.58

带以及可可西里巨厚前陆盆地沉积等,均显示高原内部早新生代经历过强烈的造山作用,曾经有过大的地势起伏度。但是,青藏高原发育两级夷平面和一级剥蚀面,这种抬升之前形成的地势平坦面以及开始于抬升早期并伴随造山过程及之后“削高填低”的剥蚀作用,使边缘起伏大、内部地势平坦成为青藏高原显著的地貌形态^[30-32]。可可西里地区夷平面是青藏高原主夷平面的一部分^[13],夷平面广泛分布并完整保存是可可西里地区地势起伏和缓的重要证据之一。并且,可可西里地区的隆升方式基本上为整体抬升,使得在白垩纪地壳拉伸、沉降后广泛发育湖盆的可可西里在隆升后形成高原平台^[33]。此外,内流区与外流区之间在地势起伏特征上存在明显差异性,可可西里高原内流区腹地反映现今地形,受到以剥蚀为主的外营力的控制作用。在高原内流区中,河流水系的下切作用更加减弱,山间盆地继续承接近距离搬运的剥蚀物,并连续成片,形成海拔高度为4000~4500 m的大面积统一侵蚀基准面^[30]。因此,可可西里地区虽然海拔高,构造活动活跃,但在地貌上表现为地势平坦,以起伏度小于200 m的丘陵、台地和平原为主。

2.4 可可西里坡度特征

坡度是地貌实体的重要形态参数之一,代表地面某点的倾斜程度,一般指水平面与局部地表之间夹角的正切值。坡度值大代表倾斜度大,地势比较陡,多分布于山区和沟谷区;坡度值小代表倾斜度小,地势比较平缓,多分布于平原地区^[34]。

国际地理学联合会地貌调查与地貌制图委员会关于地貌详图应用的坡地分类:0°~0.5°为平原,0.5°~2°为微斜坡,2°~5°为缓斜坡,5°~15°为斜坡,15°~35°为陡坡,35°~55°为峭坡,55°~90°为垂直壁。按此分类方案,基于可可西里 DEM 数据,得

出研究区坡度分级图(图 3),并对不同坡度类型进行统计(表 3)。其中,微斜坡、缓斜坡和斜坡所占比例较大,分别为 27.54%, 23.91%和 28.69%。昆仑山、唐古拉山和三江源地区分布陡坡和峭坡,其他大部分地区地势相对平坦,坡度在 15°以下。

研究区坡度存在两个明显的特征:1) 由于高原后期的快速构造隆升,在北部昆仑山地区和南部唐古拉山地区形成陡坡带;2) 以盆缘构造带为物源进行长期“削高补低”的相对夷平作用,使得高原内流盆地底部长期发育湖相沉积,在晚更新世出现的遍及高原全区的古大湖期的湖泊作用又使盆地内部低矮山地得到进一步夷平,表现为地势平坦、坡度平缓的地貌形态^[35]。另外,除东部三江源地区外,可可西里核心地区未受到青藏高原强烈隆升造成的河流溯源侵蚀影响,地面坡度大多在 15°以下^[13]。坡度变化除受构造活动和河流作用影响外,还与冰川作用有关。冰缘环境下,发生冻融夷平作用。坡地一般由两部分组成:上部为较陡的基岩坡,坡度可达 40°以上,由于强烈的寒冻风化和崩塌作用,以平行后退为主;下部为风化物质组成的缓坡,在融冻泥流和融水冲刷下,坡地不断向平坦方向发展,坡度多在 10°以下,持续冻融夷平作用的结果是,陡坡在景观中消失,最终仅余下一些孤立突岩的平坦地形,形成冻融剥夷平原^[36]。

3 可可西里地区地貌区划

3.1 可可西里各地貌区地貌特征

通过对可可西里地区野外实地考察,本文对可可西里地区流水、湖泊、冰川、冰缘等多种地貌类型及组合进行识别、分类和统计,结合其分布和成因分析,以地球内动力和外营力的差异性为划分原则,并根据 DEM 数据提取的高程、地势起伏度和

表 3 可可西里地区坡度分级统计
Table 3 Classification statistics according to Slope degree in Hoh Xil

坡度分级	面积/km ²	比例/%
平原(0°~0.5°)	22207.69	9.02
微斜坡(0.5°~2°)	67779.04	27.54
缓斜坡(2°~5°)	58861.17	23.91
斜坡(5°~15°)	70615.01	28.69
陡坡(15°~35°)	26206.93	10.65
峭坡(35°~55°)	434.58	0.18
垂直壁(55°~90°)	1.40	0.01

坡度信息,将研究区划分为 4 个地貌区:羌塘高原地貌区(I)、东昆仑山地地貌区(II)、三江源丘状山原地貌区(III)以及柴达木高原盆地地貌区(IV)(图 4)。以前三者为研究重点,各地貌区地貌特征、地貌类型及地貌成因分析如下。

1) 羌塘高原地貌区(I)。该区的地貌特征与古近纪至新近纪青藏高原两期强烈隆升和两次夷平作用有关,是占据高原大部分的主夷平面和现今的高原面。由于 67.1~23.8 Ma 期间青藏高原向北扩展隆升,在该区南部形成唐古拉山逆冲断层^[37],并形成海拔超过 5000 m 的唐古拉山,其地貌特征与北部高原台地有显著差异。该区在乌兰乌拉湖南-雁石坪一线分为可可西里高原地貌亚区(I₁)和唐古拉山高地地貌亚区(I₂)。北面的可可西里高原地貌亚区为可可西里新生代主要沉积区,地形起伏较小(多数地区起伏度小于 200 m)。中新世以来青藏高原北部抬升,经过多次夷平和剥蚀作用,形成高原和高海拔台地,在主夷平面上普遍发育冰缘地貌。与高原抬升相关的火山作用形成火山地貌。高山与宽谷相间分布,形成高原内极高山区和宽谷地区。极高山地区多形成冰川地貌,宽谷地区受活动断层控制形成构造湖盆。唐古拉山高地地貌亚区海拔多数超过 5000 m,为高海拔山地,剥蚀作用明显,极高山地区形成冰川地貌和河流源头,冰缘地貌普遍发育。

2) 东昆仑山地地貌区(II)。东昆仑山是一个经历了多期构造活动的复杂造山带,同时也是一条巨型的岩浆岩带^[38],山势走向大致为北西西-南东东向,区内地势起伏较大。由于新生代以来青藏高原抬升向北扩展,致使东昆仑山南北海拔具有明显差异,南部多为海拔超过 5000 m 的极高山,少数山峰超过 6000 m,形成冰川地貌;北部海拔约 3500~5000 m,山地间河流作用明显,形成多个山间宽谷,发育强烈的剥蚀作用和洪积扇。因此,根据山地海拔和地表风化作用的差异,将东昆仑山地地貌区按 5000 m 等高线划分为东昆仑南部极高山地貌亚区(II₁)和东昆仑北部高山地貌亚区(II₂)。

3) 三江源丘状山原地貌区(III)。该区为长江、黄河和澜沧江源头区,以外流水系为主,众多分支河流汇聚形成复杂的水系网,辫状河发育,形成众多河谷。地形受河流侵蚀明显,切割程度中等,大多数地区为丘陵和小起伏的被风化剥蚀为浑圆山丘的山地。

3.2 可可西里各地貌小区的地貌特征

可可西里高原地貌亚区是青海可可西里保护区的主要区域,也是最具特色的地貌区域,东西向近平行排列的绵延超过 500 km 的昆仑山、可可西里山、乌兰乌拉山和唐古拉山将高原内部平坦的、大小不同的盆地分隔(图 5 中 A-A'剖面),从西北至东南,地势逐渐降低(图 5 中 E-E'剖面)。本区地貌类型多样,不仅有构造差异运动形成的海拔 6000 m 以上的极高山、高海拔丘陵、台地和平原等基本地貌形态,还有受构造控制的类型较丰富的火山熔岩地貌和气候地貌,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、湖成地貌和风成地貌^[39]。由于自然条件恶劣,人迹罕至,可可西里地区成为原始生态环境和独特高原环境保存最好的自然景观地区。

通过对该区进行野外考察并收集大量资料,根据区域相对完整的基本地貌单元原则,依据高原台地内小起伏山脉与宽阔高原相间分布的地势差异,按地理位置,将可可西里高原地貌亚区细分为 5 个地貌小区:马兰山-大雪峰极高山地貌小区(I₁¹)、岗扎日极高山地貌小区(I₁²)、高山-乌什峰极高山地貌小区(I₁³)、多索岗日极高山地貌小区(I₁⁴)和可可西里高原湖盆地貌小区(I₁⁵)。其中,前 4 个为高原台地中的极高山地貌小区。马兰山-大雪峰极高山地貌小区和高山-乌什峰极高山地貌小区为近东西向狭长的山脉(图 5 中 B-B'剖面),岗扎日极高山地貌小区和多索岗日极高山地貌小区呈短轴穹窿状。这些山脉海拔超过 5000 m,其分布明显受断裂活动及其展布控制。地势起伏度除马兰山-大雪峰地区为小起伏山地(起伏度 200~500 m)外,其余极高山地貌小区均为台地和丘陵(起伏度 30~200 m),起伏度不大,并多处保留着青藏高原主夷平面。这些山峰地区海拔最高可超过 6000 m,形成山谷冰川,包括冰舌、冰斗等多种形态^[40]。新生代钾质火山岩喷发^[41]形成火山熔岩地貌,主要有熔岩方山和残留火山锥,多数分布在马兰山-大雪峰极高山地貌小区和高山-乌什峰极高山地貌小区边缘的丘陵地区。

分布在极高山之间的广阔区域是可可西里高原湖盆地貌小区(I₁⁵)。该区位于青藏内流区的最东部,呈东西向分布,海拔在 4500~4900 m 之间(图 5 中 F-F'剖面),有较宽的冲积平原和洪积平原。星罗棋布的高原湖泊、河谷和保存完整的高原夷平面是

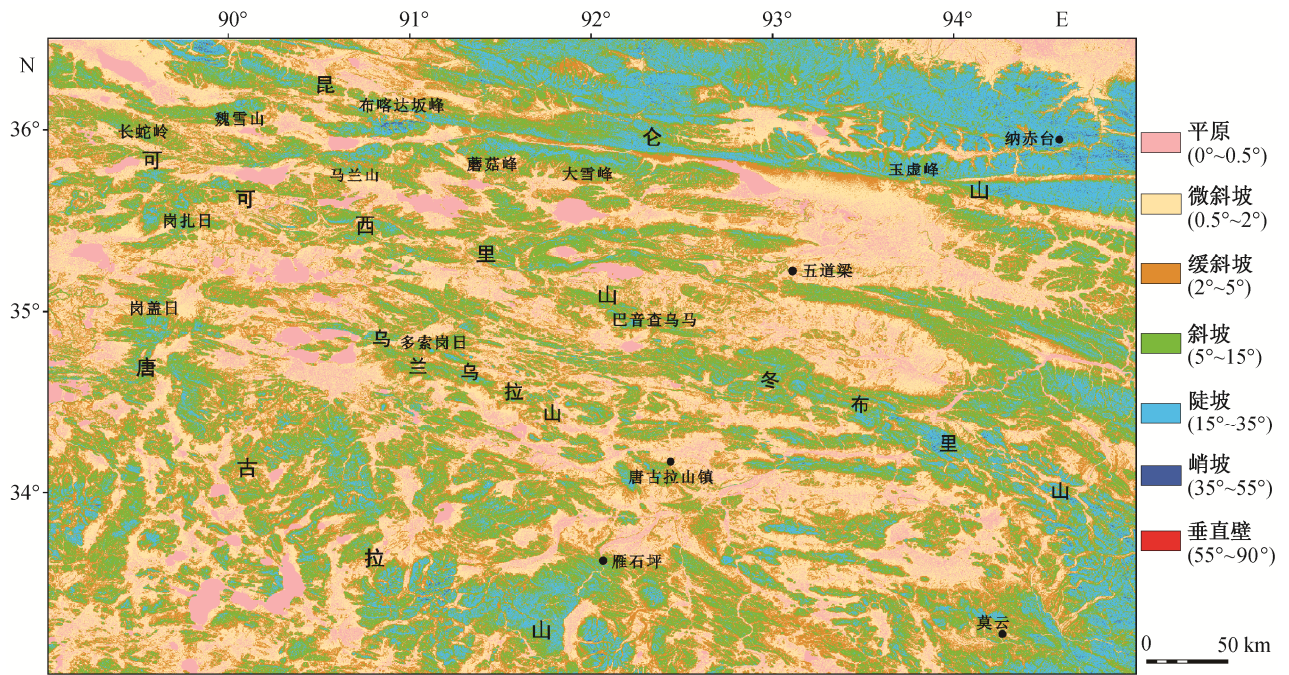


图 3 基于 SRTM-DEM 的可可西里坡度分级

Fig. 3 Slope degree classified map in Hoh Xil based on SRTM-DEM

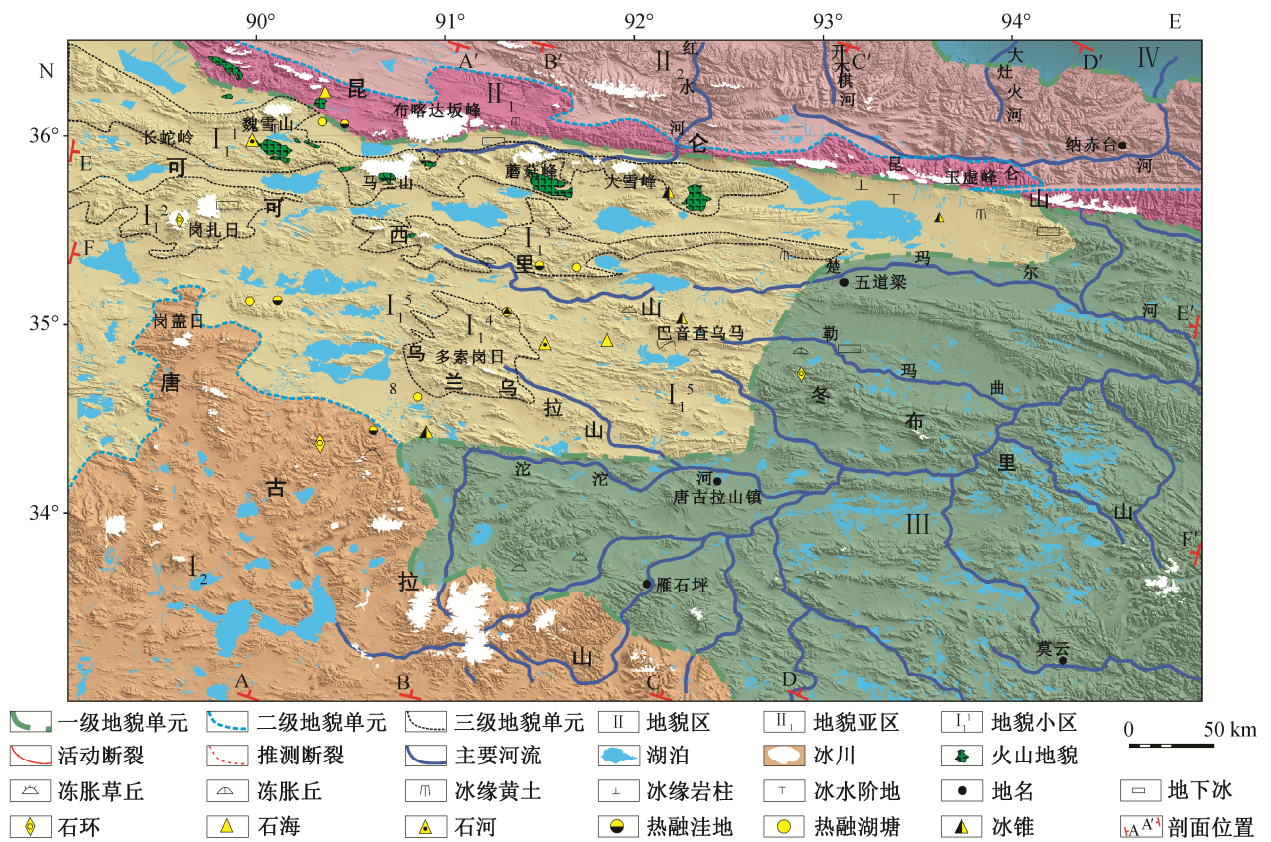


图 4 青海可可西里地貌分区及特殊地貌类型分布

Fig. 4 Map of geomorphological regionalization and distribution of the special landforms in Hoh Xil

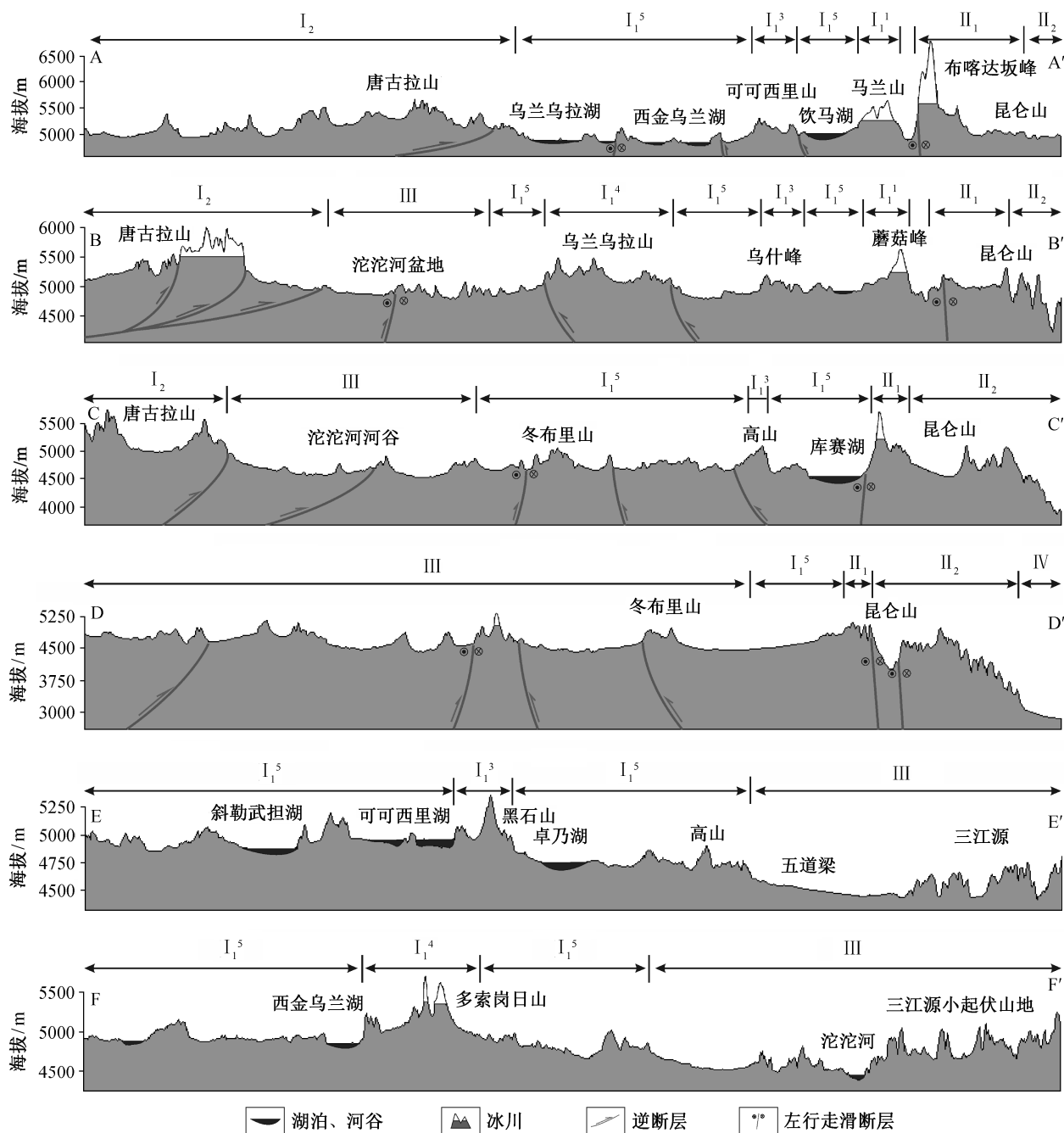


图 5 可可西里地区地貌分区剖面图(剖面位置见图 4)

Fig. 5 Section map of geomorphological regionalization in Hoh Xil (section position as shown in Fig. 4)

该区主要的地貌类型。冰缘地貌在该区普遍发育,包括冻胀丘、冻胀草丘、石冰川、热融洼地、热融湖塘、冰缘黄土与砂丘、冻拔石以及由冻拔石组成的冻胀“石林”以及融冻褶皱(冰卷泥)。高原山顶面由于受高原广泛发育并持续至今的冻融作用的强烈改造,发育一系列冻融陡坡带,同一地区因原始地貌的不同,往往有多级冻融夷平面同时存在。除此

之外,还存在常见的动力地貌,如流水地貌和风成地貌。

地貌区的划分基本上反映了可可西里地区高原、山地、山原和盆地的地貌格局和水平分异,对研究区域地貌特征具有重要意义,并可以作为研究区自然保护和地理区划的科学依据。地貌小区划分对地貌格局进行细化,主要反映基本地貌类型及组

合,为可可西里自然保护区的地貌类型研究划定区域范围,并为开发保护和环境监测范围提供参考。

4 结论

1) 可可西里地区是青藏高原最高的地区之一,地势南北两侧高,中部较低缓。海拔可分为中海拔、高海拔和极高海拔三级,高海拔地区占据69.38%的区域,中海拔地区主要分布在研究区东北部的柴达木盆地地区,极高海拔地区主要分布在昆仑山南缘以及南部的唐古拉山地区。

2) 按照起伏度分级,可可西里地区丘陵占的比例最大(33.95%),其次为平原(26.78%),台地类型排第三位(22.77%)。可可西里自然保护区以平缓、低起伏的湖平面、高原和台地为主,被近北北西向的丘陵分割,仅东昆仑山、唐古拉山和三江源局部地区为中起伏山地。这种地貌形态主要由抬升之前形成的地势平坦面(夷平面)、开始于抬升早期并伴随造山过程及之后的“削高填低”的剥蚀作用以及内流水系条件下的外营力作用三方面因素共同作用而形成。

3) 可可西里地区主体未受到青藏高原强烈隆升造成的河流溯源侵蚀影响,而以盆缘构造带为物源进行长期“削高补底”的相对夷平作用,使研究区内坡度和缓,大部分地区在 15° 以下。按照坡度分级,可可西里地区微斜坡、缓斜坡和斜坡所占比例较大,分别为27.54%、23.91%和28.69%。昆仑山、唐古拉山和三江源地区分布陡坡和峭坡,其他大部分地区地势相对平坦。坡度的大小和变化除由造山作用引起外,还与冰川作用有关。

4) 通过对地貌形态特征的定量分析,以地球内、外营力造成的地貌类型组合和地貌成因差异性为划分原则,将可可西里地区可划分为3个地貌区:羌塘高原地貌区(I)、东昆仑山山地地貌区(II)和三江源丘状山原地貌区(III)。其中,羌塘高原地貌区在乌兰乌拉湖南-雁石坪一线分为可可西里高原地貌亚区(I₁)和唐古拉山高山地貌亚区(I₂);东昆仑山地地貌区按5000 m等高线划分为东昆仑南部极高山地貌亚区(II₁)和东昆仑北部高山地貌亚区(II₂)。

致谢 感谢北京大学闻承博士和博士研究生范庆凯提供可可西里地区野外实地考察资料。

参考文献

- [1] 李炳元,潘保田,程维明,等.中国地貌区划新论.地理学报,2013,68(3):291-306
- [2] 肖飞,张百平,凌峰,等.基于DEM的地貌实体单元提取方法.地理研究,2008,27(2):459-466
- [3] 沈玉昌,苏时雨,尹泽生.中国地貌分类、区划与制图研究工作的回顾与展望.地理科学,1982,2(2):97-105
- [4] 郭子良,崔国发.中国地貌区划系统:以自然保护区体系建设为目标.生态学报,2013,33(19):6264-6276
- [5] 闻国年,钱亚东.基于栅格数字高程模型提取特征地貌技术研究.地理学报,1998,53(6):562-570
- [6] 常直杨,孙伟红,王建,等.数字高程模型在构造地貌形态分析中的应用现状及展望.南京师大学报:自然科学版,2015,38(4):129-136
- [7] Michael A. Geomorphology and global tectonics. London: John Wiley & Sons Press, 2000
- [8] Balázs Székely. On the surface of the Eastern Alps — a DEM study. Tübingen: University Tübingen Press, 2001
- [9] 程维明,周成虎,柴慧霞,等.中国陆地地貌基本形态类型定量提取与分析.地球信息科学学报,2009,11(6):725-736
- [10] 刘少峰,王陶,张会平,等.数字高程模型在地表过程研究中的应用.地学前缘,2005,12(1):303-309
- [11] 葛肖虹,刘俊来,任收麦,等.青藏高原隆升对中国构造-地貌形成、气候环境变迁与古人类迁徙的影响.中国地质,2014,41(3):698-714
- [12] 潘裕生.青藏高原的形成与隆升.地学前缘,1999,6(3):153-163
- [13] 李炳元,潘保田.可可西里东部地区的夷平面与火山年代.第四纪研究,2002,22(5):397-405
- [14] 徐锡伟,陈文彬,于贵华,等.2001年11月14日昆仑山库赛湖地震(M_s 8.1)地表破裂带的基本特征.地震地质,2002,24(1):1-13
- [15] 邓万明,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.岩石矿物学杂志,1996,15(4):289-298
- [16] 李树德,李世杰.青海可可西里地区多年冻土与冰缘地貌.冰川冻土,1993,15(1):77-82
- [17] 胡东生.可可西里地区湖泊概况.盐湖研究,1994,2(3):60-67
- [18] 李炳元.青海可可西里地区综合科学考察初报.山地学报,1990,8(3):93-98

- [19] 刘志飞, 王成善. 可可西里盆地新生代沉积演化历史重建. 地质学报, 2001, 75(2): 250-258
- [20] 徐贵忠, 常承法. 大陆岩石圈构造与资源. 北京: 海洋出版社, 1992: 19-32
- [21] 陈守建, 李荣社, 计文化, 等. 巴颜喀拉构造带二叠-三叠纪岩相特征及构造演化. 地球科学: 中国地质大学学报, 2011, 36(3): 393-408
- [22] 张以菲. 青藏高原北部地质构造演化初论. 青海地质, 1993, 2(2): 1-7
- [23] 叶建青. 青海可可西里地区的活动构造与地震. 高原地震, 1994, 6(2): 11-23
- [24] 邓起东, 程绍平, 马冀, 等. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势. 地球物理学报, 2014, 57(7): 2025-2042
- [25] 都昌庭. 青海昆仑山口西 8.1 级地震前的尾波持续时间 and 地震频次. 山西地震, 2003, 113(2): 29-31
- [26] Rabus B, Eineder M, Roth A, et al. The shuttle radar topography mission-a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2003, 57: 241-262
- [27] United States Geological Survey. Shuttle radar topography mission documentation: SRTM Topo [EB/OL]. (2015-12-08) [2016-03-18]. http://edcftp.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/Documentation/SRTM_Topo.txt. 2003
- [28] 中国科学院地理研究所. 中国 1:100 万地貌制图规范(征求意见稿). 北京: 科学出版社, 1987
- [29] 朱红春, 陈楠, 刘海英, 等. 自 1:10000 比例尺 DEM 提取地形起伏度: 以陕北黄土高原的实验为例. 测绘科学, 2005, 30(4): 86-88
- [30] 刘静, 丁林, 曾令森, 等. 青藏高原典型地区的地貌量化分析: 兼对高原“夷平面”的讨论. 地学前缘, 2006, 13(5): 285-299
- [31] 潘保田, 高红山, 李炳元, 等. 青藏高原层状地貌与高原隆升. 第四纪研究, 2004, 24(1): 50-57
- [32] 曹伟超, 陶和平, 孔博, 等. 青藏高原地貌形态总体特征的 GIS 识别分析. 水土保持通报, 2011, 31(4): 163-167
- [33] 边千韬, 常承法. 青海可可西里大地构造基本特征. 地质科学, 1997, 32(1): 37-46
- [34] 龙恩, 程维明, 周成虎, 等. 基于 Srtm-DEM 与遥感的长白山基本地貌类型提取方法. 山地学报, 2007, 25(5): 557-565
- [35] 邵兆刚, 孟宪刚, 朱大岗, 等. 青藏高原层状地貌特征及其成因初探. 地学前缘, 2009, 16(6): 186-194
- [36] 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. 地理科学, 2002, 22(5): 520-526
- [37] 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. 地质学报, 2006, 80(8): 1118-1130
- [38] 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长. 高校地质学报, 2007, 13(3): 403-414
- [39] 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. 泉州师范学院学报, 2006, 23(2): 47-50
- [40] 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. 岩石学报, 2008, 24(2): 279-290
- [41] 李世杰, 李树德. 青海可可西里地区第四纪冰川与环境演化. 冰川冻土, 1992, 14(4): 316-324