

基于 ASTER-GDEM 数据的黄河源地区 构造地貌分析

钱 程^{1,2} 韩建恩² 朱大岗² 贺承广²
孟宪刚² 邵兆刚² 王 津² 余 佳²

(1. 沈阳地质矿产研究所, 辽宁 沈阳 110034; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 基于 ASTER-GDEM 数据, 利用彩色晕染、密度分割与 GIS 空间统计分析技术, 结合地质资料, 通过地形高程、地势起伏度、地表坡度、高程和平均坡度剖面及流域面积-高程积分等手段, 对黄河源地区的构造地貌特征进行了初步分析。研究表明, 黄河源地区为一 NW-SE 带状盆地地貌, 平均海拔 4 473 m, 平均起伏度为 60 m, 平均坡度为 9.5°, 为高海拔盆地, 盆内地势平坦, 盆缘山势险峻。黄河源盆地内部(4 200~4 300 m)湖相地层发育, 地势略有起伏, 为古大湖湖底地貌后经河流改造形成; 盆内发育三级阶梯状层状地貌面, 高程分别为 4 400 m、4 500 m 和 4 600 m, 为古大湖作用形成的三级大型湖积阶地; 盆地两侧发育山地地貌, 沟壑纵横, 为山体隆升、构造剧烈活动和强烈风化剥蚀作用形成。黄河源地区的地貌特征受构造作用控制较为明显: 盆地边缘的昆南断裂、布青山山前断裂和巴颜喀拉山前断裂对盆地的展布形态和整体地貌特征具有控制作用; 盆内玛多断裂、巴颜河前断裂和麻多—野牛沟断裂破坏了古湖积阶地的层状地貌, 控制了盆地内部的地势起伏变化和黄河源区水系的整体展布。黄河源流域地貌整体处于壮年期, 为构造活动和水流作用的综合结果。4 200~4 800 m 高程范围内的流域面积最大, 占总流域的 90.6%, 为长期内流作用形成的区域平坦的地形, 推测为古湖期湖泊作用的结果; 盆地两侧的山前地区, 构造活动剧烈、风化作用显著, 呈现老年期地貌; 盆地东南切口为河谷地貌, 处于幼年期, 由黄河源的地貌发育特征推测黄河源水系为发育较为年轻的水系。

关键词: ASTER-GDEM; 黄河源; 构造地貌; 流域面积-高程积分

中图分类号: P542 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2012)05-1247-14

构造地貌是指受构造内动力作用控制, 通过内外地质动力相互作用所奠定的能反映一定构造特征的地貌形式, 最近一些学者把地球内动力、构造运动与内外力耦合所导致的地壳表部的不同形态、不同规模、不同特点的地貌称为构造地貌^[1-5]。构造地貌的研究是伴随着地貌学的产生而出现的一个较为古老的地质学术名词, 而构造地貌学是地貌学与构造地质学、地球动力学之间交叉形成的^[5-6], 其研究内容是地貌与构造的关系、构造地貌发生和发展过程

以及构造地貌所揭示的地球内外部地质作用^[5-6]。近年来, 随着地理信息系统(GIS)技术的不断发展, 国内外许多学者利用此技术运用数字高程模型(DEM)数据进行了不同层次的地学分析及应用^[7-9], 并在地貌形态与演化、区域的新构造形式与演化及古环境变迁等方面取得了一系列的成绩^[8-17]。

目前关于构造地貌的研究方法主要有: ①野外实地考察, 观测分析地表形态特征及其空间分布规律, 分析地层的沉积特征等, 从而查明地貌演变规律^[18-22];

收稿日期: 2011-03-28; **改回日期:** 2012-04-20

基金项目: 地质力学研究所基本科研业务费项目“黄河源晚新生代河湖相地层序列及其环境意义”(DZLXJK200902)和中国地质调查局项目“青藏高原新构造及晚新生代古大湖研究”(基[2006]001—08)与“晚新生代构造气候变动对黄河水系演化影响研究”(科[2007]03—04)共同资助。

作者简介: 钱程, 男, 1985年生, 硕士, 主要从事构造地质、沉积相与古环境研究; E-mail: qch1985123@163.com。

②实验模拟方法,在野外进行现场实验模拟,或在室内进行实验模拟,从而深入了解地貌演化过程中多种影响因素的作用机制,体现了构造地貌学定量化发展的趋势,是解决实际问题的强有力手段^[23];③遥感(RS)和数字高程模型(DEM)等新技术的应用,由于其直观、潜在信息丰富,使构造地貌的研究具有数字化、定量化和可视化等特点^[24-29]。本文中,笔者利用GIS技术对黄河源地区的DEM数据进行整理分析,展示黄河源地区的基本地貌形态,探讨该区地貌形态各主要因素之间的相互关系,并揭示该地区的构造地貌特征。

1 黄河源地区区域概况

黄河源地区位于青藏高原东北缘,但由于不同学科的研究思路不同,有在水利、水文方面研究的应用^[30-31],也有在地质地貌方面研究的应用^[32-33],因此学者们在限定其具体范围时存在不同的观点^[30-33]。

笔者综合上述各观点,认为其地理位置总体为:南、北界分别为巴颜喀拉山和布青山,西界为雅拉达洋山,以鄂陵湖和扎陵湖为汇水中心,黄河贯穿其中,地理坐标为东经 95°20'~103°30',北纬 32°30'~36°10',面积近 40 000 km²,平均海拔在 4 400~4 500 m。大地构造位置上,研究区位于巴颜喀拉—松潘—甘孜造山带主体,属泛华夏大陆晚古生代—中生代弧—盆区,巴颜喀拉晚古生代—中三叠世弧后盆地^[34]。根据全国 1:50 万地质图数据库、1:25 万东给错那幅地质图和 1:25 万黄河源地质与第四系地质图,综合研究形成研究区断裂分布图(图 1),区内的断裂构造发育,由断裂方向可归纳为 NW-NWW 向、NNW 向和 NE-NEE 向 3 组断裂,其中 NW-NWW 向断裂为区内主干构造,控制黄河源地区地貌形态和展布^[35]。区域主要的断裂自北向南依次为:①昆南断裂、②布青山山前断裂、③玛多断裂、④巴颜河前断裂、⑤麻多—野牛沟断裂和⑥巴颜喀拉山前断裂。

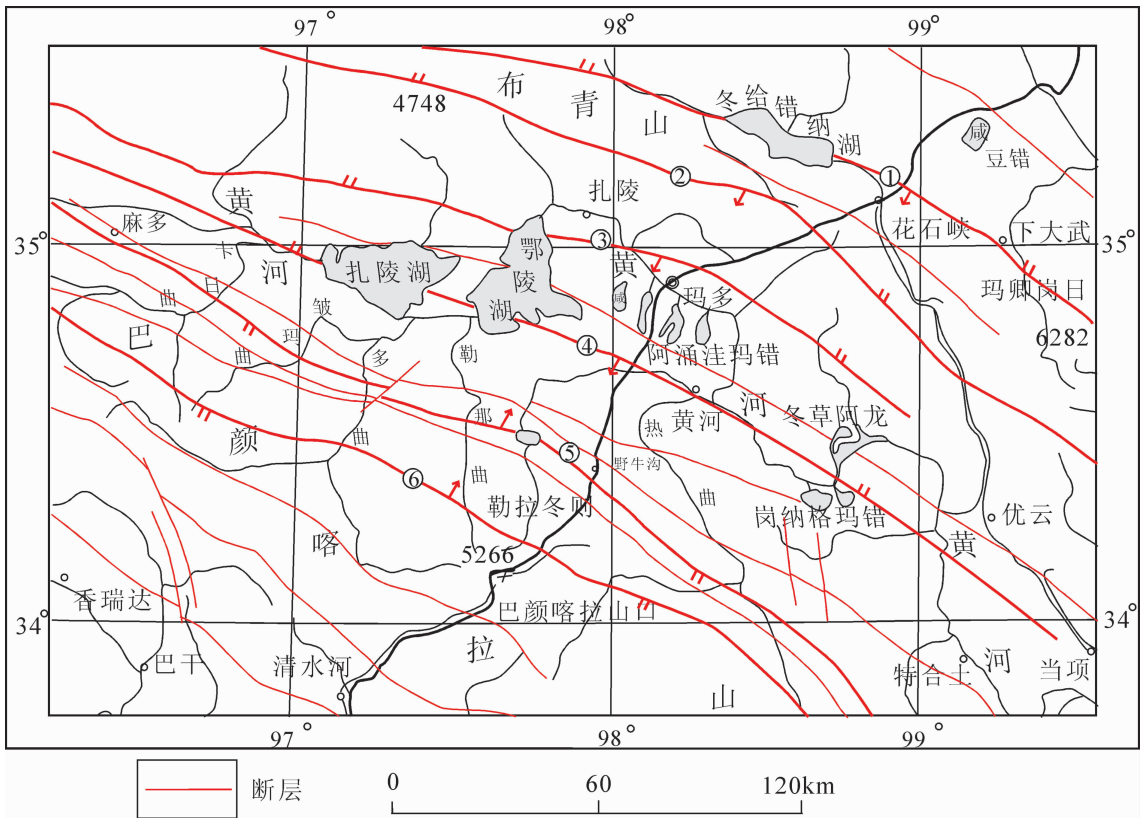


图 1 黄河源地区断裂分布图

- ①—昆南断裂;②—布青山山前断裂;③—玛多断裂;④—巴颜河前断裂;⑤—麻多—野牛沟断裂;⑥—巴颜喀拉山前断裂
- Fig.1 The main faults in the Yellow River source region
- ①—Southern Kunlun fracture; ②— Buqingshan piedmont fault; ③— Madoi fault; ④—Bayan River fault;
 - ⑤—Madoo—Buffalo ditch fault; ⑥—Bayan Har Mountain piedmont fault

2 ASTER-GDEM 数据的获取与分析方法

本文所采用的数字高程数据是美国航天局(NASA)与日本经济产业省(METI)于 2009 年 6 月共同推出的最新的地球电子地形数据 ASTER-GDEM (先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型)。该数据是根据 NASA 的新一代对地观测卫星 TERRA 的详尽观测结果制作完成的。ASTER-GDEM 是采用全自动化的方法对 ASTER 存档数据进行处理生成的,其中包括通过立体相关生成的 1 264 118 个基于独立场景的 ASTER-GDEM 数据,再经过去云处理,除去残余的异常值,取平均值,并以此作为 ASTER-GDEM 对应区域的最后像素值。而后纠正剩余的异常数据,再按 1°×1°分片,生成全球 ASTER-GDEM 数据,其水平误差约 30

m,垂直误差约 20 m,而研究区的投影面积为 46 620 km²,高程差为 2 803 m,因此其水平误差为 0.000 002%,高程误差为 0.7%,均小于 1%,对于区域上的构造地貌基本无影响,数据满足区域构造地貌分析的要求。

为了更加直观地了解黄河源地区的地表高程分布特征,笔者利用 GIS 技术,对研究区的 ASTER-GDEM 数据进行拼接、密度分割及彩色晕染等处理(图 2),在此基础上对研究区的 DEM 影像中的明显线性影像与地质简图中的区域断裂位置进行对比提取,计算研究区 DEM 的平均、最大和最小高程值及坡度值等,整理得到研究区的平均高程、最大高程、最小高程、地势起伏度、坡度和流域范围图等。此外,还沿 3 个不同方向分别作地形剖面,提取剖面线上各像素的高程和平均坡度值,绘制高程剖面曲线图和平均坡度剖面曲线图。提取黄河源流域范围,并对

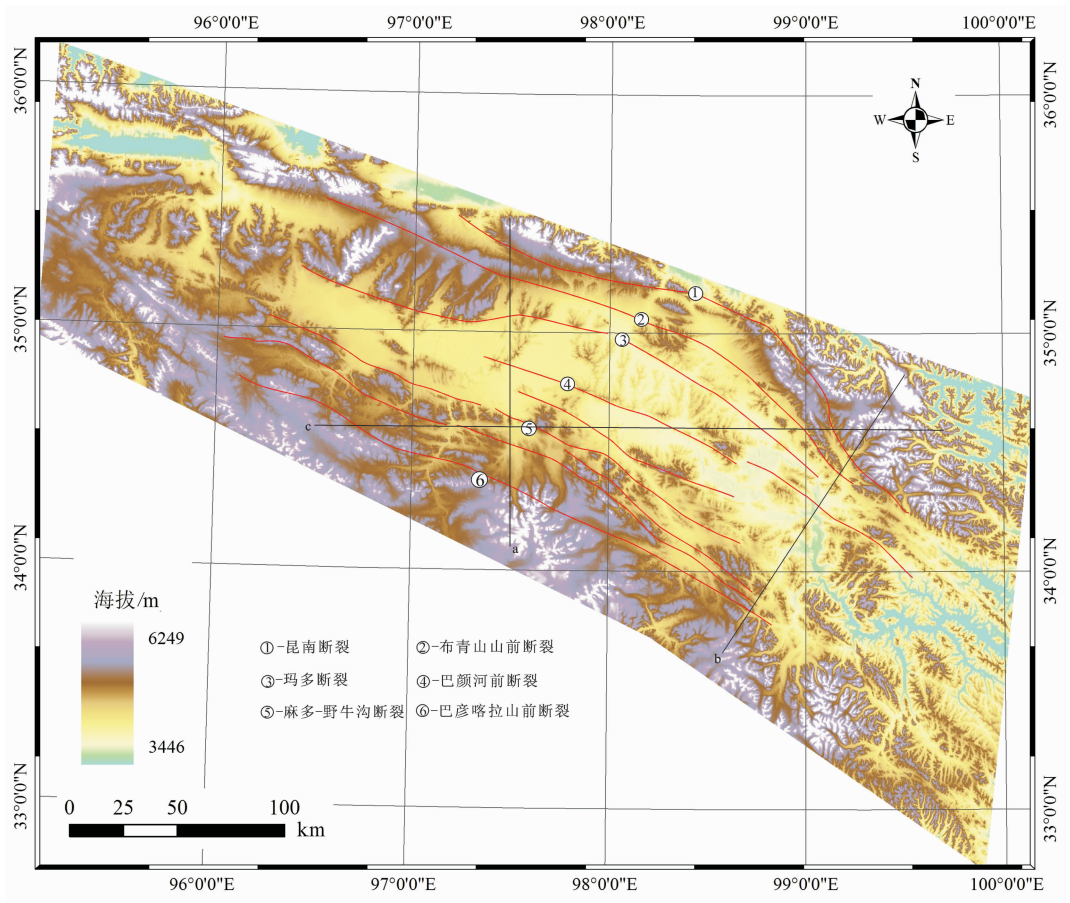


图 2 黄河源地区 DEM 图
a,b,c 为穿过研究区不同方向的 3 条剖面线
Fig.2 DEM image of the Yellow River source region
a, b, c—Profile lines through the area

其进行流域面积-高程积分分析,进而全面研究黄河源地区的地形地貌和构造地貌特征。

3 黄河源地区构造地貌分析

3.1 DEM 高程与地势起伏度分析

为了更加清晰、直观地认清黄河源地区的地形特征,笔者在GIS技术下利用黄河源地区原始的DEM数据进行运算得到:①以500m的高程差作为间距对研究区的DEM进行高程分级;②采用11×11像元大小作为采样阈值空间窗口,分别生成研究区的最大高程图和最小高程图;③利用最大高程图和最小高程图,通过栅格计算得到研究区的地势起伏度示意图(图3)。由图2和图3可知,研究区整体海拔较高,位于3446~6249m,平均海拔为4473m;高程整体呈NW-SE向条带状分布,沿带

状走向呈NW高、SE低的地势分布,垂直带状走向呈两边高中间低的地势分布;由SE向NW呈两级台阶状,分别为4000~4500m(I级台阶)和45000~5000m(II级台阶),且高程显示I级台阶被II级台阶所包围;地理位置上II级台阶对应研究区南缘的阿尼玛卿山和巴颜喀拉山、北缘的布青山,I级台阶则对应被这些山体所围限的黄河源水系展布的地区;且研究区的山体、盆地和水系呈现一致的走向特征,即NW-SE向。综合以上分析,黄河源地区的高程分布整体上呈现了NW-SE向带状的盆地地貌特征,地势上NW高SE低控制了黄河水系在源区的整体流势,结合南北山体及区域断裂的走向推测黄河源盆地是伴随着南北两侧造山隆起而形成的。

按照《中国100万数字地貌分级编码体系》规定,将地貌面的海拔高度按照低海拔(<1000m)、中

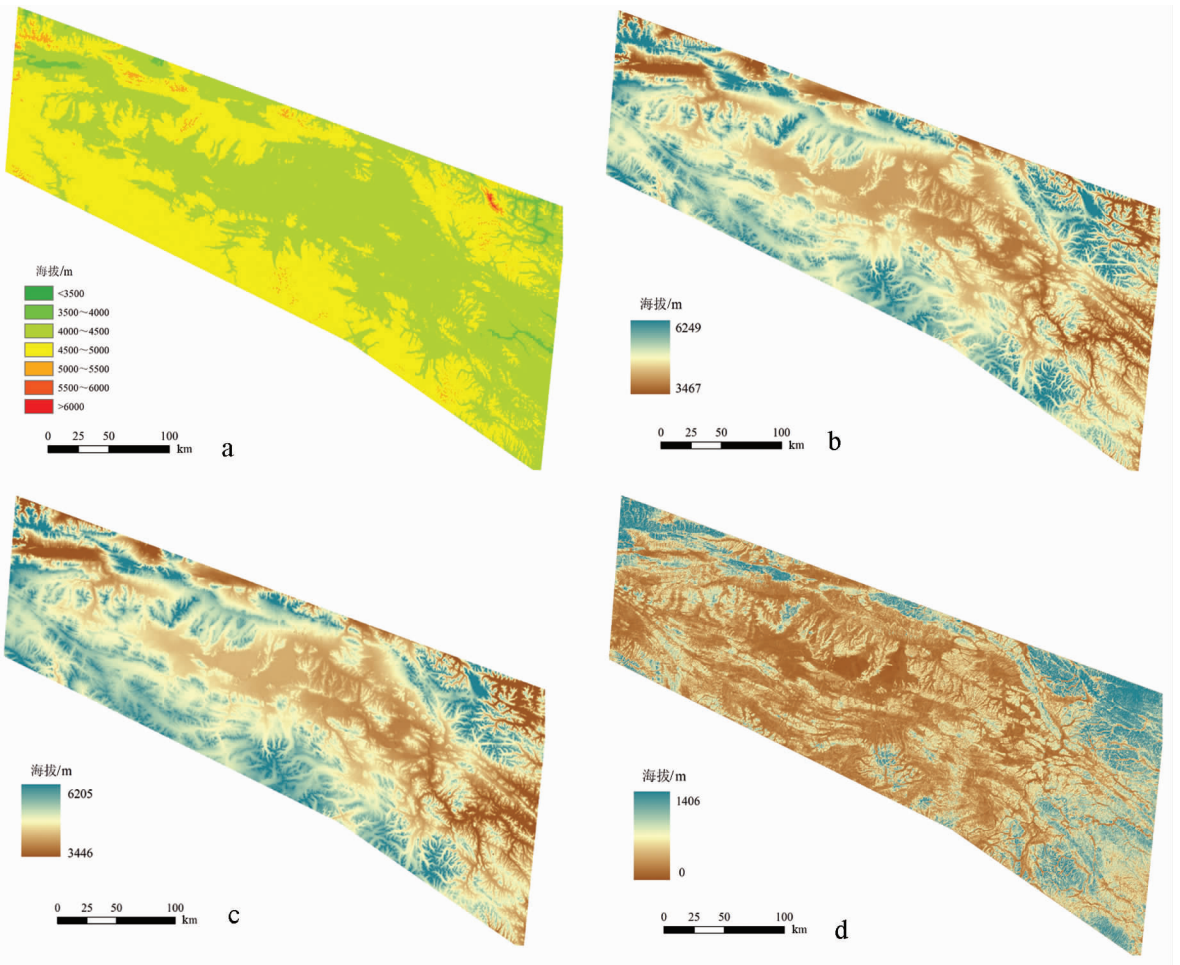


图3 黄河源地区的4种高程图

a—平均高程图;b—最大高程图;c—最小高程图;d—地势起伏度图

Fig.3 Four types of DEM maps of the Yellow River source region

a-Height (elevation) classification map; b-Maximum elevation map; c-Minimum elevation map; d-Amplitude map

海拔(1 000~3 500 m)、高海拔(3 500~5 000 m)和极高海拔(>5 000 m)划分^[36],并在此基础上再按照 500 m 一级进一步划分(图 3-a,表 1)。研究区高程统计分析结果(表 1)显示,3 500~5 000 m 的区域占全区 99.09%,说明黄河源地区绝大部分地势在高海拔及以上。高程以 4 000~4 500 m 和 4 500~5 000 m 为主,分别占研究区的 54.02%和 43.92%,大致体现了黄河源盆地的概貌,即 4 000~4 500 m 的区域为盆地的汇水区域,大于 4 500 m 的区域为盆地的集水区域。按照中国 100 万数字地貌编码规范,将平原和山地划分为 7 种基本地貌形态,以 30 m 作为平原区和山地区的划分界限;山地地貌中,起伏度小于 200 m 为丘陵,200~500 m 为小起伏山地,500~1 000 m 为中起伏山地,1 000~2 500 m 为大起伏山地,大于 2 500 m 以上的划分为极大起伏山地,由此对研究区起伏度进行划分统计(图 3-d、表 2)。结果显示,研究区的最大地势起伏度达 1 402 m,平均起伏度为 60 m;绝大部分地区起伏度在 200 m 以下,其中 30~200 m 的起伏度值占 62.35%,为低矮的丘陵,分布盆内黄河水系之间的隆起区域;0~30 m 之间的平原占 36.58%,主要分布在扎陵湖、鄂陵湖、四姐妹湖、野马滩、约古宗列曲和卡日曲水流流经的地区;起伏山地约占 2.07%,主要分布在盆地四周的山区。

结合黄河源地区的平均高程分级图、最大和最小高程图及地势起伏度图(图 3),笔者对研究区 DEM 的明显的线性影像进行分析,并与研究区的区域纲要图(图 1)进行对比,得到研究区 6 条主要断裂在 DEM 图上的影像位置(图 2)。6 条断裂影像中线性特征最为明显的是盆地与南、北侧山体的接触

地带所发育的断裂影像,即盆地南缘的巴颜喀拉山前断裂和北缘的昆南断裂、布青山山前断裂(图 2),高程变化显著,围限了盆地的整体展布形态,由此推测盆地的形成、演化等与这 3 条断裂的发育存在着密切的关系。

3.2 地表坡度分析

地表坡度分析是研究地貌形态的重要内容^[10]。根据 GIS 空间分析,黄河源地区的最大坡度值为 86.39°,平均坡度为 9.5°。为了了解各个坡度的分布和权重特征,前人对坡度角的大小进行分类划分:缓坡(0°~9°)、低陡坡(9°~21°)、中陡坡(21°~33°)、陡坡(33°~45°)和陡崖(>45°)^[17]。根据以上分类方法并结合本区特征,将研究区的坡度以 5°、9°、15°、21°、27°、33°、39°、45°、51°和 55°作为分级断点进行分级,并生成研究区的坡度分级示意图(图 4)和坡度统计表(表 3)。

由图 4 分析,盆地内部坡度较小,地势平坦;而盆缘的山麓地区坡度较大,地形起伏度大。平原或台地(>5°)占到研究区的 33.92%,地理位置主要位于黄河源扎陵湖、鄂陵湖、河源上游和野马岭地区;缓坡(5°~9°)占 24.89%,主要位于平原或台地周围的河谷地区;陡坡(9°~45°)占 41.07%,以低陡坡(9°~21°)为主,占 31.13%,主要分布在盆地与山麓的过度地带;陡崖(>45°)分布极其稀少,多分布在盆缘山体的山脊和顶面地区。

由于地貌是由地球内、外动力综合作用的结果,对于坡度的影响主要包括活动构造、相对高差、气候条件、植被条件、岩性特征等因素,而对于研究区而言,其气候主要为高原气候,植被以草甸和冰原为

表 1 黄河源地区高程统计

Table 1 Height statistics of the Yellow River source region

高程/m	<3500 中海拔	3500~5000 高海拔			5000~7000 极高海拔
		3500~4000	4000~4500	4500~5000	
百分比/%	0.001	1.16	54.016	43.916	0.907
累计百分比/%	0.001	1.161	55.177	99.093	100

表 2 黄河源地区地势起伏度统计

Table 2 Amplitude statistics of the Yellow River source region

起伏度划分/m	平原	丘陵	小起伏山地	中起伏山地	大起伏山地
	0~30	30~200	200~500	500~1000	1000~2500
百分比/%	36.5751	62.3530	1.0696	0.0021	0.0002
累积百分比/%	36.5751	98.9281	99.9977	99.9998	100

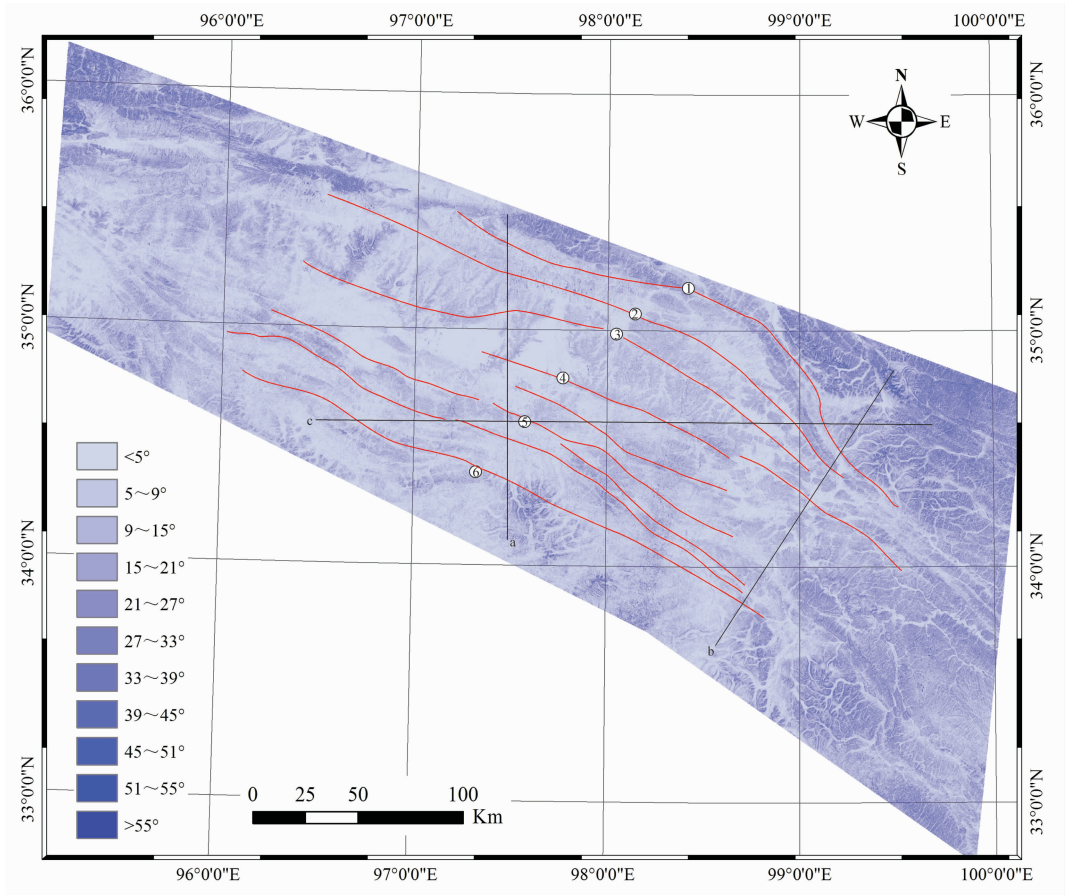


图4 黄河源地区坡度分级示意图(图例同图3)

Fig.4 Slope classification schematic diagram of the Yellow River source region

主,这些外动力因素对本地区的坡度影响较小,而本区位于青藏高原的东北缘,活动构造极其强烈,因此本区的坡度变化主要为断裂活动影响形成。断裂的活动不仅会使断裂两侧的坡度出现差异^[15,17],同时在该点上高程也会出现差异性的变化^[10]。

由图4和图2比较发现,黄河源地区的地形高程和地表坡度变化具有较好的相关性,一般地形高程大的地方其坡度偏大(如盆地北缘和南缘的山麓地区),地形高程小的地方其坡度偏小(如盆地内部的湖泊和河流冲积地区);而且发现坡度发生变化的地区往往对应着高程的差异变化,其中盆地边缘与南北缘山脉的接触地区尤为明显。把图2中所提取的构造影像位置转置于坡度图中(图4),发现其在坡度图像中也存在明显的线性影像特征。根据这6条断裂影像的高程图和平均坡度图综合分析发现,昆南断裂、布青山山前断裂和巴颜喀拉山前断裂的影像特征为:断裂西段南北两侧高程和坡度呈差异

性变化,而断裂东段所在位置的坡度和高程小呈狭长带状,其南北两侧坡度和高程突然变大,由此分析这3条断裂规模较大、活动较为强烈,对研究区的整体地貌形态具有控制作用;玛多断裂、巴颜河前断裂和麻多—野牛沟断裂的影像特征为影像南北两侧高程和坡度呈差异性变化,变化幅度较前者小,推测这3条断裂规模较小。研究区的地质资料显示,昆南断裂为昆仑构造缝合带中的一条大断裂带,布青山山前断裂是控制布青山隆升的一条大断裂,其活动性很强,而巴颜喀拉山前断裂也是区域上长逾千余千米的区域断裂,这3条断裂虽然形成较早,但新生代又有复活,且活动频繁,延续至今;而其他3条断裂的规模上都较小,且只有在第四纪以来才开始频繁活动^[32,37],与通过DEM分析各条断裂所得到的结论较为一致。

3.3 典型剖面分析

研究地形高程剖面,通常是以线代替面进而研

表 3 黄河源地区坡度统计
Table 3 Slope statistics of the Yellow River source region

坡度划分/ $^{\circ}$	平原	缓坡	低陡坡		中陡坡		陡坡		陡崖		
	<5	5~9	9~15	15~21	21~27	27~33	33~39	39~45	45~51	51~55	>55
百分比/%	33.92	24.89	20.77	10.46	5.52	2.79	1.18	0.36	0.09	0.02	0.01
累计 百分比/%	33.92	58.81	79.58	90.04	95.56	98.34	99.53	99.88	99.97	99.99	100

究区域地貌形态、轮廓形态、地势变化以及地表切割强度等^[17]。为了根据地貌进一步说明研究区的构造特征,使高程和坡度的变化综合分析,因此在高程剖面坐标系中植入 y_2 坡度坐标,形成典型的高程-距离、平均坡度-距离剖面(图 5)。在黄河源地区的 DEM 图和平均坡度图中分别以自 S 向 N、自 SW 向 NE 和自 W 向 E 形成 a、b、c 3 条典型剖面,并在高程、坡度剖面中导入区域主要断裂的位置,进而综合分析区域构造与地貌之间的相互作用(图 5)。

黄河源地区地势起伏复杂,南北两侧山体沟谷纵横、剥蚀严重,盆地内部地势平坦,河流地貌、湖积地貌特征明显。由图 5 中的高程剖面分析,剖面中盆地高程分布呈现两边高中间低的趋势特征,为盆地地貌典型的高程分布特征;盆内高程分布集中, A3、B3、C3 和 C4 层状地貌面,地势平坦,略有起伏,高程都位于 4 200~4 300 m,以平原和丘陵地貌最为典型,黄河水系发育,湖相地层发育,为古大湖湖底地貌,后经河流改造形成(图版 I-d);盆地中由盆底向两侧山体发育阶梯状层状地貌面, A5 和 B2 地貌面高程分布集中,为 4 400 m, A1、B1、B4、C2 和 C5 地貌面高程集中于 4 500 m,而 A2、A4、C1 和 C6 地貌面高程集中于 4 600 m,明显呈现三级阶梯状层状地貌,与盆地底层状地貌相间分布,各地貌面中“V”谷地发育,地势略有起伏(图版 I-a、b、c)。结合学者在本区发现的大范围的高位湖相地层^[38],由此认为,高程为 4 400 m、4 500 m 和 4 600 m 的层状地貌为区域上发育的三级大型湖积阶地,后期由于湖泊消亡,水系发育,使在这个高程范围内广泛发育高差小于 100 m 的“V”形谷地。剖面中,高程大于 4 700 m 的区域为盆地南侧的巴颜喀拉山和北侧的布青山的山脊线或山顶面组成,海拔高、地势陡峭,起伏高差最大可达 500 m 以上,风化侵蚀严重,为山体隆升构造剧烈活动和强烈风化剥蚀的综合结果。

图 5 展示了区域中 6 条主要断裂在各个高程和

平均坡度剖面中的位置,各个断裂所在位置及两侧的高程和坡度都存在明显的变异。昆南断裂、布青山山前断裂和巴颜喀拉山前断裂分布于盆地两侧,高程和坡度变化剧烈,影像特征明显,高程和坡度值多位于低峰区域,断裂两侧的高程和坡度值快速增加(图 5)。区域地质资料显示,昆南断裂和布青山山前断裂新生代活动呈现为北倾高角度逆断层,巴颜喀拉山前断裂新生代呈现为北倾高角度斜冲-走滑断层,这 3 条断裂为区域性大断裂^[37],断裂活动造成两侧的巴颜喀拉山和布青山相对黄河源地区隆升,形成两山夹一盆的地貌形态,由此认为,这些断裂控制了盆地的整体展布形态,其发育与活动是黄河源盆地形成的主要原因(图版 I-b)。而玛多断裂、巴颜河前断裂和麻多-野牛沟断裂的高程和坡度的变异程度小,多分布在盆内丘陵或小起伏山地的山前地区,位于侵蚀较弱的“V”谷附近,其发育破坏了黄河源地区古湖相阶地的层状分布特征,控制了盆地内部的地势起伏变化及源区水系在盆地内部的展布(图版 I-e)。

3.4 流域面积-高程积分

前文已对黄河源地区的地形基本形态及典型剖面进行分析,为了进一步了解区域地貌的空间展布,生成流域范围图(图 6)。图中红线所围限的彩色晕染部分为黄河源盆地流域的具体范围。利用 GIS 手段,得到黄河源流域的地理位置为 $95^{\circ}50' \sim 100^{\circ}10'$ 、北纬 $33^{\circ}00' \sim 35^{\circ}30'$,区域的投影面积为 $46\,619\text{ km}^2$,表面积为 $47\,473\text{ km}^2$;高程位于 $3\,698 \sim 5\,347\text{ m}$,平均高程为 $4\,445\text{ m}$;坡度小于 74.9° ,平均坡度为 7.9° 。黄河源流域基本位于高海拔流域,坡度以缓坡为主,较为平坦,与前文分析得到的研究区盆地地貌特征一致。

流域地貌的发育是伴随着外力对地表物质的侵蚀、搬运和堆积作用而进行的。20 世纪 50 年代,利用流域地貌面积-高程分析法首次对流域地貌发育的阶段性进行分析^[39],即任一流域的地貌发育阶段,

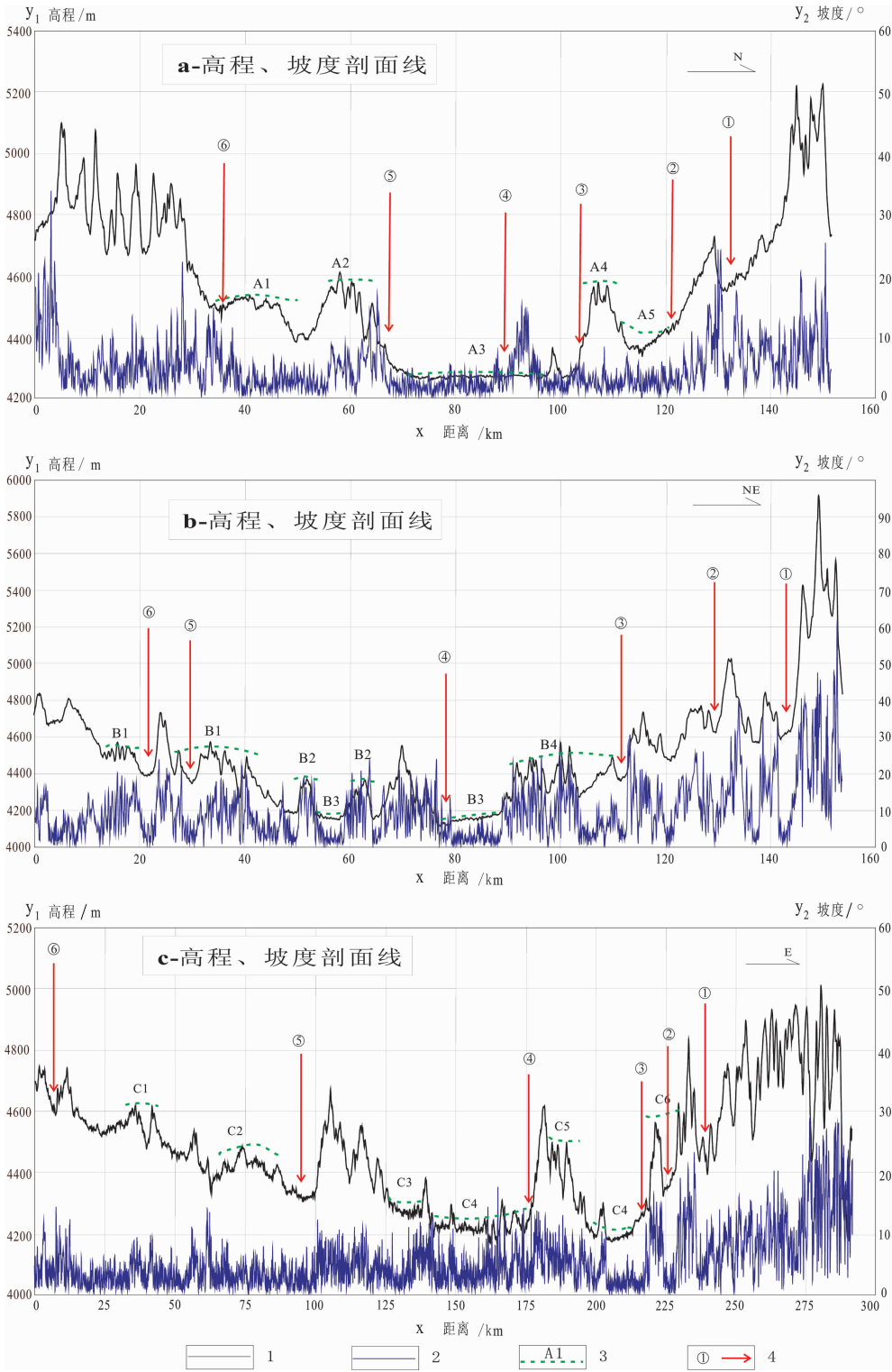


图5 黄河源地区 a、b、c 3 条高程、平均坡度剖面图

1—高程剖面线;2—平均坡度剖面线;3—层状地貌面位置及编号;4—区域发育的主要断裂位置及编号;①—昆南断裂;②—布青山山前断裂;③—玛多断裂;④—巴颜河前断裂;⑤—麻多-野牛沟断裂;⑥—巴颜喀拉山前断裂

Fig.5 Three graphs of height map and slope classification profiles through the Yellow River source region
1—Height profiles; 2—Slope classification profiles; 3—Positions and serial number of layered landform surfaces; 4—Positions and serial number of the faults; ①—Southern Kunlun fracture; ②— Buqingshan piedmont fault; ③— Madoi fault; ④—Bayan River fault; ⑤—Madoo—Buffalo ditch fault; ⑥—Bayan Har Mountain piedmont fault

图版 I plate I



a 曲麻来县卡日曲海拔约 4 590~4 640 m 的湖湘侵蚀地貌面



b 麻多县鄂陵湖东南侧海拔 4 480~4 530 m 的湖积阶地地貌面及布青山山前断裂三角面



c 玛沁县优云乡南侧海拔 4 370~4 420 m 的湖积阶地地貌面



d 达日县西侧海拔约 4 180 m 的 U 形黄河谷地及特合土乡海拔约 4 270 m 的湖底地貌面



e 达日县东侧海拔约 3 990 m 的 U 形黄河谷地及 V 形黄河谷地、巴颜河断裂三角面

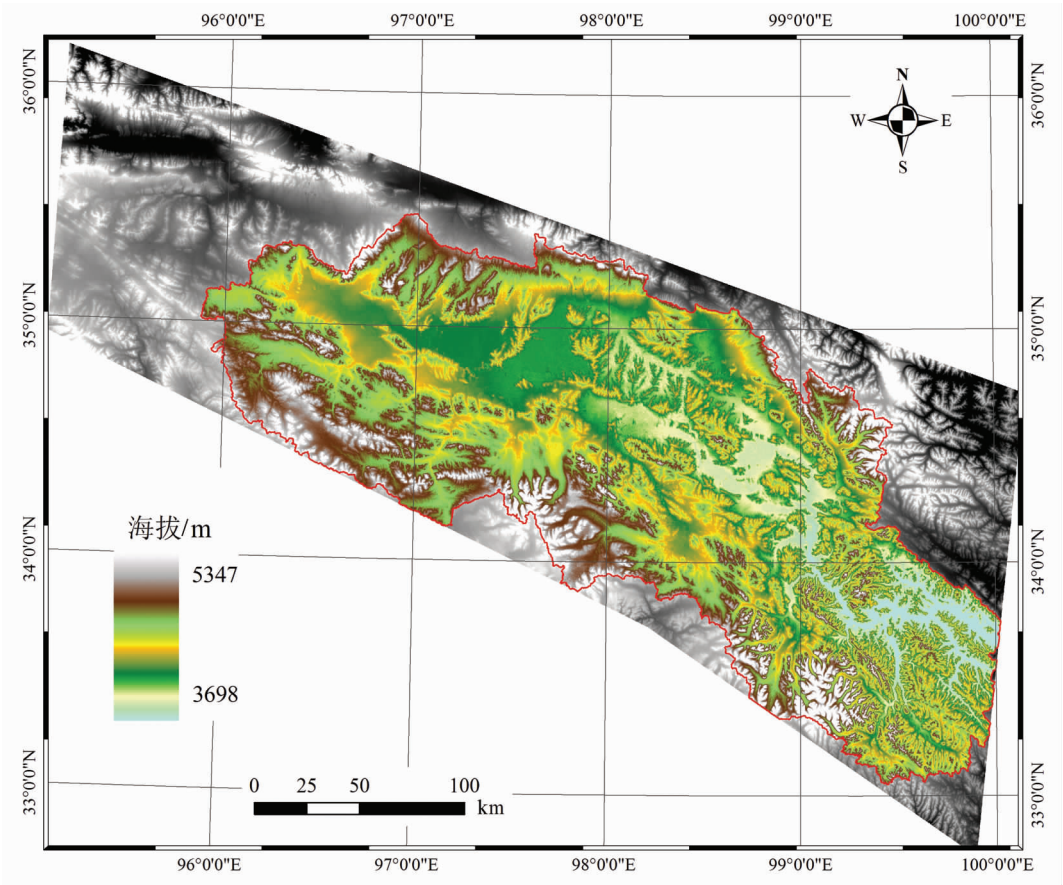


图 6 基于 DEM 数据的黄河源地区流域范围示意图
 Fig.6 Yellow River source valley range diagram based on DEM

可以用反映地表物质相对侵蚀量的面积-高程积分曲线来表示。其作法为：在流域地形图上，以某一间距形成等高线，得到每一条等高线以上的面积(a)和每条等高线与流域最低点的高差(h)，流域的总面积为 A，最大高差为 H，令 $x = a/A$ 、 $y = h/H$ 分别为横坐标和纵坐标，绘出曲线： $y=f(x)$ ，即流域的面积-高程曲线，而后对 $f(x)$ 在 $[0,1]$ 进行积分，得到 S。当 $S > 0.6$ 时，流域的地表物质被蚀小于 40%，地貌趋于崎岖，为幼年期，面积-高度曲线呈上凸形(a 曲线)； $0.35 \leq S \leq 0.6$ 时，地势起伏达到最大，地貌类型最复杂，为壮年期，曲线呈“S”形(b 曲线)； $S < 0.35$ 时，60%以上的物质被侵蚀掉，此时地势平缓，起伏不大，为老年期，曲线呈下凹形(c 曲线)(图 7)^[40-41]。本文在 GIS 技术下，在黄河源流域图基础上以 50 m 作为等高线间距求出每条等高线对应的 a 值和 h 值及流域的总面积值 A 和最大高差 H，作出流域面积-高程积分曲线(图 7)。

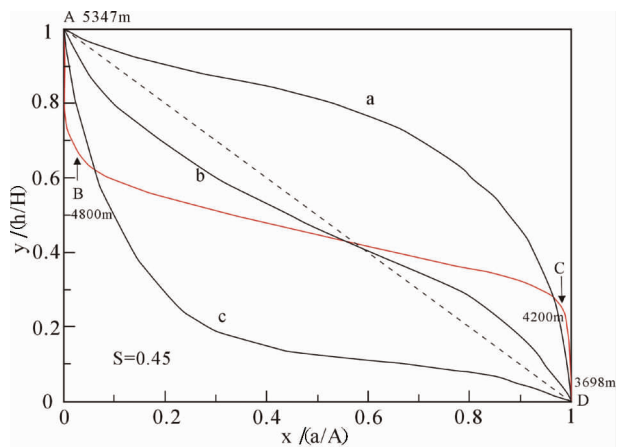


图 7 黄河源流域面积-高程积分曲线图
 a、b、c 分别为幼年、壮年、老年阶段；红线为黄河源流域面积-高程积分曲线
 Fig.7 Curve of hypsometric integral in Yellow River source region
 a, b, c refer to respectively the stage of youth, maturity and old age; red line is the curve of basin area - altitude

黄河源流域的面积-高程积分曲线呈“S”形,且积分面积 $S=0.45$,表明研究区流域处于典型的壮年期,地势起伏变化大,地貌类型复杂。研究区位于青藏高原东北缘,是高原隆升重要的构造运动响应区,新构造发育,而且海拔高、水系发育、风化作用复杂,同时由于古大湖沉积作用,区内形成大规模的湖相沉积,因而形成典型的壮年期地貌。黄河源流域的“S”形曲线显示,研究区不同的海拔区域呈现不同的地貌发育阶段,其是由于不同海拔高度的构造作用和所遭受的侵蚀作用不同形成的。“S”形曲线明显呈三段式分布:AB段(4 800~5 347 m),曲线呈强烈下凹状,高程变化剧烈,面积较小,占总流域的 2.8%(图版 I-a,b,d,e);BC段(4 200~4 800 m),曲线较为平直,面积范围大,占总流域的 90.6%(图版 I-a,b,c,d,e);CD段(3 698~4 200 m),曲线呈明显上凸状,高程变化剧烈,面积只占总流域的 6.6%(图版 I-e)(图 7)。由此分析,黄河源流域内存在长期的内流沉积作用,其间沉积物质相对盆地底部呈削高补低的形式被搬运,使盆地内部地貌向低趋于平坦,流域面积-高程积分曲线较为平坦(BC段),推测为古湖期湖泊作用形成;盆地边缘山体剥蚀严重、切割强烈,地势陡峭,积分曲线呈强烈下凹状(AB段),为两侧山体构造抬升强烈风化剥蚀的结果;后期随着盆地的破坏,水体外泄,泻口处迅速遭受切割,并逐渐向源侵蚀,形成新生地貌,积分曲线呈明显上凸状,说明盆地外流时间较短,地貌上处于幼年期,由黄河源区地貌特征推测黄河源水系是现代发育的较为年轻的水系。

4 结 论

在 GIS 支持下,利用 ASTER-GDEM 数据进行地貌特征模拟,并通过地形高程分析、地表坡度分析、高程和平均坡度典型剖面分析及流域面积-高程积分等手段,结合区域地质资料,对黄河源地区的地貌形态、地貌特征、构造活动特征及构造地貌特征等总结如下:

黄河源地区为一 NW-SE 向带状的盆地地貌,平均海拔为 4 473 m,平均起伏度为 60 m,平均坡度为 9.5° ,整体处于高海拔地区,盆内地势平坦,盆缘山势险峻。水系的概貌为:4 000~4 500 m 区域为盆地的汇水区域,大于 4 500 m 区域为集水区域。盆内地势呈现 NW 高 SE 低,控制了黄河水系在源区的整体

流势,结合两侧山体及区域断裂的走向推测黄河源盆地的形成是伴随着南北两侧造山隆起而形成的。

黄河源盆地内部地势平坦,高程位于 4 200~4 300 m,地势平坦,略有起伏,由平原和丘陵组成,湖相地层发育,为古大湖湖底地貌,后经河流改造形成;由盆地平原向两侧山体发育三级梯状层状地貌面,高程分别为 4 400 m、4 500 m 和 4 600 m,为古大湖作用形成的三级大型湖积阶地,湖泊消亡后,水系发育,使其广泛发育高差小于 200 m 的“V”形谷地;盆地两侧发育典型的山地地貌,高程大于 4700 m,地势陡峭,风化侵蚀严重,为山体隆升、构造剧烈活动和强烈风化剥蚀的综合结果。

黄河源地区的地貌特征受构造作用控制较为明显。盆地边缘的昆南断裂、布青山山前断裂和巴颜喀拉山前断裂为区域性大断裂,DEM 影像特征明显,使南北两侧的巴颜喀拉山和布青山相对黄河源盆地隆升,对盆地的展布形态和整体地貌特征具有控制作用。盆地内部玛多断裂、巴颜河前断裂和麻多—野牛沟断裂的发育,破坏了古湖相阶地的层状地貌,控制了盆地内部的地势起伏变化和黄河源区水系的整体展布。

黄河源流域地貌整体处于壮年期,为构造活动和水流作用的综合结果。流域内部面积范围最大,占总流域 90.06%的高程分布在 4 200~4 800 m 范围内,为长期内流作用,使盆地地势向下趋于平坦,推测为古湖期湖泊作用的结果;盆地边缘山前地区,构造活动剧烈、风化作用显著,山势陡峭,侵蚀强烈,为老年期地貌;盆地东南切口迅速变为河谷地貌,为水体切割和河流向源侵蚀形成,地貌处于幼年期,因此黄河源水系是现代发育的较为年轻的水系。

利用 GIS 技术,通过 DEM 数据分析,不仅可以方便快捷地生成一系列的地貌分析专题图,如坡度专题图、地势起伏度专题图和流域分布专题图等,而且能够直观地进行各种地形特征(如高程、地势、坡度、剖面等)分析,进而对新构造运动特征、层状地貌面分布和地貌发育程度等构造地貌问题进行全面且深入的研究。而且随着全球高精度和高分辨率 DEM 数据的不断更新,DEM 数据分析将成为未来构造地貌研究的重要发展方向。

参考文献(References):

- [1] 赵越,黎敦明,刘建,等.构造地貌——认识高原历史的钥匙[J].

- 地质通报, 2008, 27(12):1961-1967.
- Zhao Yue, Li Dulpeng, Liu Jian, et al. Tectonic geomorphology: A key to understanding of the history of plateau [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27 (12):1961-1967 (in Chinese with English abstract).
- [2] 吴珍汉, 吴中海, 江万, 等. 中国大陆及邻区新生代构造-地貌演化过程与机理[M]. 北京:地质出版社, 2001:1-5.
- Wu Zhenhan, Wu Zhonghai, Jiang Wan, et al. Mainland China and its neighboring area Cenozoic tectonic geomorphology evolutionary process and mechanism [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2001:1-5(in Chinese).
- [3] 韩幕康. 构造地貌学[J]. 地球科学进展, 1992, 7(5):61-62.
- Han Mukang. Structural Geomorphology [J]. Advance in Earth Sciences, 1992, 7(5):61-62(in Chinese with English abstract).
- [4] Ufimtsev G F. The third face of tectonic-tectonic analysis of relief [J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(1/2):9-18.
- [5] 王岸, 王国灿. 构造地貌及其分析方法评述 [J]. 地质科技情报, 2005, 24(4):8-12.
- Wan An, Wang Guocan. Review on Morphotectonic and Its Analytical Methods [J]. Geological Science and Technology Information, 2005, 24(4):8-12(in Chinese with English abstract).
- [6] 杜国云, 王竹华, 李晓燕. 构造地貌分析体系及相关的构造地貌标志[J]. 烟台师范学院学报(自然科学版), 29:216-223.
- Du Guoyun, Wang Zuhua, Li Xiaoyan. Analysis system and mark for tectonic geomorphology [J]. Yantai Teachers College Journal (Natural Science), 29:216-223(in Chinese with English abstract).
- [7] Fielding E J, Isacks B, Barazangi M, et al. How flat is Tibet? [J]. Geology, 1994, 22:163-168(in Chinese with English abstract).
- [8] Szekely B. On the surface of the Eastern Alps—a DEM study[M]. Germany: Universitat Tubingen Press, 2001:1-157.
- [9] Takashi Oguchi, Tatsuto Aoki, Nobuhisa Matsuta. Identification of an active fault in the Japenses Alps from DEM-based hill shading[J]. Computers & Geosciences, 2003, 29:885-891.
- [10] 程三友, 刘少峰, 张会平, 等. 大别山构造地貌的 DEM 初步分析 [J]. 地质力学学报, 2005, 11(4):333-340.
- Cheng Sanyou, Liu Shaofeng, Zhang Huiping, et al. DEM analysis of the tectonogeomorphology of the Dabie Orogenic Belt [J]. Journal of Geomechanics, 2005, 11 (4):333-340 (in Chinese with English abstract).
- [11] 张会平, 杨农, 刘少峰, 等. 数字高程模型(DEM)在构造地貌研究中的应用新进展[J]. 地质通报, 2006, 25(6):660-670.
- Zhang Huiping, Yang Nong, Liu Shaofeng, et al. Recent progress in the DEM -based tectonogeomorphic study [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(6):660-670(in Chinese with English abstract).
- [12] Summerfield M A. Geomorphology and Global Tectonic [M]. London: John Wiley & Sons, Ltd. Press, 2001:1-367.
- [13] Zomer R, Ustin S, Ives J. Using satellite remote sensing for DEM extraction in complex mountainous terrain: landscape analysis of Makalu Barun National Park of eastern Nepal [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(1):125-143.
- [14] 张会平, 刘少峰. 利用 DEM 进行地形高程剖面分析的新方法[J]. 地质前缘, 2004, 11(3):226.
- Zhang Huiping, Liu Shaofeng. Use for terrain elevation DEM new method of profile analysis [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3):226(in Chinese with English abstract).
- [15] 张会平, 刘少峰, 孙亚平, 等. 基于 SRTM-DEM 区域地形起伏的获取及应用[J]. 国土资源遥感, 2006, (1):31-35.
- Zhang Huiping, Liu Shaofeng, Sun Yaping, et al. Based on regional terrain ups and downs SRTM-DEM gain and application [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2006, (1):31-35(in Chinese with English abstract).
- [16] 赵洪壮, 李有利, 杨景春, 等. 基于 DEM 数据的北天山地貌形态分析[J]. 地理科学, 2009, 29(3):445-449.
- Zhao Hongzhuang, Li Youli, Yang Jingchun, et al. Geomorphic characteristics of North Tianshan Mountain Based on DEM data[J]. Scientia Geographic Sinica, 2009, 29(3):445-449(in Chinese with English abstract).
- [17] 洪顺英, 申旭辉, 荆凤, 等. 基于 SRTM-DEM 的阿尔泰山的构造地貌特征分析[J]. 国土资源遥感, 2007, (3):62-66.
- Hong Shunying, Shen Xuhui, Jing Feng, et al. An analysis of geomorphology characteristics of the Altai Mountain based on DEM[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2007, (3):62-66(in Chinese with English abstract).
- [18] 康来迅. 昌马断裂带活动构造地貌之研究[J]. 地理研究, 1989, 8(2):35.
- Kang Laixun. Researches on the active tectonic landforms of Changma fault zone [J]. Geographical Research, 1989, 8 (2):35(in Chinese with English abstract).
- [19] 赵小麟, 邓起东, 陈社发. 岷山隆起的构造地貌学研究 [J]. 地震地质, 1994, 16(4):429-439.
- Zhao Xiaolin, Deng Qidong, Chen Shefa. Tectonic geomorphology of the minshan uplift in western ichuan, southwestern China[J]. Seismology and Geology, 1994, 16(4):429-439(in Chinese with English abstract).
- [20] 李有利, 杨景春, 李保俊, 等. 河西走廊榆木山边缘断层构造地貌研究[J]. 地质力学学报, 1997, 3(4):20-26.
- Li Youli, Yang Jiangchun, Li Baojun, et al. On the tectonic landform of the Yumu mountain, Hexi corridor, Gansu Province [J]. Journal of Geomechanics, 1997, 3 (4):20-26 (in Chinese with English abstract).
- [21] Li Youli, Yang Jingchun. Tectonic geomorphology in the Hexi Corridor, northwest China[J]. Basin-Research, 1998, 10(3):345-352.
- [22] S B Kuzmin. Estimation of active fault zone width using the methods of neotectonics and structural geomorphology (evidence from the Eastern Sayan and Western Cisbaikalia) [J]. Geotectonics, 1998, 32(1):60-67.
- [23] 李吉均, 张青松, 李炳元. 近 15 年中国地貌学的进展[J]. 地理学报, 1994, 49(增刊):641-649.

- Li Jijun, Zhang Qingsong, Li Bingyuan. Main progress of geomorphology in China in the past fifteen years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 49:641-649.
- [24] 梅安新, 彭望球, 秦其明, 等. 遥感导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- Mei Anxin, Peng Wanglu, Qing Qiming, et al. Introduction to Remote Sensing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001 (in Chinese).
- [25] Tang Guoan. A Research on the Accuracy of Digital Elevation Models[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [26] 闻国年, 钱亚东, 陈钟明. 基于栅格数字高程模型提取特征地貌技术研究[J]. *地理学报*, 1998, 53(6):562-569.
- Lu Guonian, Qian Yadong, Chen Zhongming. Automated extraction of the characteristics of topography from grid digital elevation data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(6):562-569(in Chinese with English abstract).
- [27] 王义祥, 刘勇, 潘保田. 夷平面数字地形模型的生成、显示与分析初探: 以美武高原为例[J]. *遥感技术与应用*, 1999, 14:59-64.
- Wang Yixiang, Liu Yong, Pan Baotian. A preliminary approach on the generation, display and analysis of digital terrain model of planation surface taking Meiwu Plateau as an example [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1999, 14:59-64 (in Chinese with English abstract).
- [28] 王东锐, 杨景春. 四维地貌模型研究 [J]. *地理学与国土研究*, 2001, 17(2):20-23.
- Wang Dongrui, Yang Jingchun. Study on the four dimension geomorphic model [J]. *Geography and Territorial Research*, 2001, 17(2):20-23(in Chinese with English abstract).
- [29] 胡世雄, 王珂. 现代地貌学的发展与思考[J]. *地学前缘*, 2000, 7: 67-78.
- Hu Shixiong, Wang Ke. Development and tendency of modern geomorphology [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7: 67-78 (in Chinese with English abstract).
- [30] 车骞, 王根绪, 孙胜利. 黄河源区径流时空特性及相关因素分析 [J]. *人民黄河*, 2005, 27(2):9-11.
- Che Qian, Wang Gengxu, Sun Shengli. Analysis on temporal and spatial characteristics and correlation factors of runoff in source region of the Yellow River[J]. *Yellow River*, 2005, 27(2):9-11(in Chinese with English abstract).
- [31] 张志, 张雪亭. 利用遥感信息探讨黄河源区姐妹湖的环境变化 [J]. *青海环境*, 2000, 10(1):6-10.
- Zhang Zhi, Zhang Xueting. Remote sensing information, discussed the headwater area of the Yellow River and sisters lake environmental change [J]. *Journal of Qinghai Environment*, 2000, 10(1):6-10(in Chinese with English abstract).
- [32] 程捷. 黄河源区第四纪地质与生态环境[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- Cheng Jie. The headwater area of the Yellow River Quaternary Geology and the Ecological Environment [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006(in Chinese).
- [33] 郑本兴, 王苏民. 黄河源区的古冰川环境讨论 [J]. *冰川冻土*, 1996, 18(3):210-218.
- Zheng Bengxing, Wang Sumin. The ancient glacial environment the headwater area of the Yellow River discussion [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18 (3):210-218 (in Chinese with English abstract).
- [34] 潘桂棠, 李兴振, 王立全, 等. 青藏高原及邻区大地构造单元初步划分[J]. *地质通报*, 2002, 21(11):701-707.
- Pan Guitang, Li Xingzheng, Wang Liquan, et al. Preliminary division of tectonic units of the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent regions [J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(11): 701-707(in Chinese with English abstract).
- [35] 汪校锋. 东昆仑巴颜喀拉山群地区区域构造演化 [J]. *南方油气*, 2005, 18(1):29-31.
- Wang Xiaofeng. Regional structural evolution of Bayankela Mountain Group in eastern Kunlun areas[J]. *Southern China Oil & Gas*, 2005, 18(1):29-31(in Chinese with English abstract).
- [36] 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室. 中华人民共和国 1:100 万数字地貌制作规范[S]. 2005.
- The Resource and Environmental Information System of State Key Laboratory in The Geographical Science and Resources Institute, Chinese Academy of Sciences. The People's Republic of China 1: 100 million digital landform regulated production[S]. 2005.
- [37] 青海省地质矿产局. 青海省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Qinghai Province. Qinghai Regional Geological Volunteers [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991(in Chinese with English abstract).
- [38] 朱大岗, 邵兆刚, 孟宪刚, 等. 青海巴颜喀拉山北麓古高位湖相沉积的分布于特征[J]. *地质通报*, 2009, 28(5):549-555.
- Zhu Dagang, Shao Zhaogang, Meng Xiangang, et al. The distribution and characteristics of lacustrine sedimentation from ancient high level lake at the north foot of Mt. Bayankala, Qinghai, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(5):549-555 (in Chinese with English abstract).
- [39] 尹国康. 流域地貌系统[M]. 南京: 南京大学出版社, 1991:210-212.
- Yin Guokang. Watershed Geomorphology System [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1991:210-212(in Chinese).
- [40] Pike R J, Wilson S E. Elevation-relief ratio, hypsometric integral and geomorphic area-altitude analysis [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1971, 62: 1079-1084.
- [41] 陈彦桀, 郑光佑. 面积尺度与空间分布对流域高度积分及地质意义影响[J]. *地理学报(台湾)*: 2005, (39):53-69.
- Chen Yanjie, Zheng Guangyou. The spatial distribution of dimension and height of the basin and the geological significance influence. Integration [J]. *Geographical Journal (Taiwan)*: 2005, (39):53-69.

An analysis of geomorphologic characteristics of the Yellow River source region based on ASTER-GDEM

QIAN Cheng^{1,2}, HAN Jian-en², ZHU Da-gang²,
HE Cheng-guang², MENG Xian-gang², SHAO Zhao-gang², WANG Jin², YU Jia²

(1. *Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China*; 2. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: Based on ASTER-GDEM (30m) data and geological information and adopting color-dye, density-class and GIS spatial analysis technology, the authors studied geomorphologic characteristics of the Yellow River source region by means of topography-elevation analysis, surficial-slope analysis, terrain-section analysis and hypsometric analysis. According to the research results, the Yellow River source region is a NW-SE-trending ribbon basin with an average elevation of 4473m, an average surface rolling of 60m and an average slope of 9.5°, thus belonging to the high-altitude basin. The basin is flat with steep edges. In the basin there are lots of lacustrine strata 4200~4300m in altitude, characterized by slight undulation. The internal basin was once a fossil lake bed and then turned into what it is by fluviation. There are three layered geomorphic surfaces inside the basin 4400m, 4500m and 4600m in attitude respectively, which constituted large-size fluvial terraces due to the influence of the fossil lake. There are mountains on the edges of the basin with steep ravines, formed by mountain uplift and drastic tectonic activity as well as strong weathering action. The geomorphologic characteristics of the Yellow River source region were strongly affected by tectonization: Kunlun fracture, Buqingshan piedmont fault, and Bayan Har Mountain piedmont fault on the edges of the basin exerted a controlling influence on the layout and the entire geomorphologic characteristics; Madoi fault, Bayan River fault and Maduo-Buffer ditch fault within the basin broke the stratified relief of the lacustrine terraces, and played a main role in forming the terrain and the overall layout of the Yellow River source region water system. The region integrally is at its maturity stage and is the comprehensive result of tectonic activity and fluviation action. The largest drainage area is located in the region with the altitude from 4200 to 4800m, occupying 90.6% of the total region. It is a flat terrain formed by long-term internal flow function, which is considered to be the result of fossil lake fluviation. The piedmont area on the northern and southern side of the basin experienced strong tectonic actions with obvious weathering, which is now at its old-age stage. The river valley geomorphology in the southeast of the basin is at the youth stage. Estimated from its terrain characteristics, the Yellow source water system is relatively young.

Key words: ASTER-GDEM; Yellow River source; geomorphology; hypsometric integral

About the first author: QIAN Cheng, male, born in 1985, master, mainly engages in the study of regional geology, sedimentary facies and paleoenvironment; E-mail: qch1985123@163.com.