

# 格尔木河流域面积 - 高程积分值的地貌学分析

张敬春, 李川川, 张 梅, 刘耕年

(北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

**摘 要:** 在 SRTM - DEM 数据的基础上, 运用 GIS 空间分析技术, 系统提取了格尔木河三级流域及部分二级流域地形参数和面积 - 高程积分值, 探讨了面积 - 高程积分值的面积及空间依赖性, 并对面积 - 高程积分值 (HI) 对构造活动性、岩性变化、冰川作用强度的指示意义进行了研究。研究表明: HI 值具有面积依赖及空间依赖性; 东昆南断裂 (F4) - 西大滩断裂 (F3) 以昆仑山口为界可以分为东西两部分, 各自的活动性都是中间强往两边依次减小, 东昆中断裂 (F1) 的活动性变化不大; 岩性对 HI 影响表现出, 侵入岩的抗侵蚀力最大, 片岩的抗侵蚀力最小, 碳酸盐岩组合的抗侵蚀力居中; 冰川作用对地貌发育和侵蚀程度有改造作用, 与只有古冰川发育或无古冰川流域比较, 有现代冰川发育, 古冰川作用遗迹广泛的流域, HI 值较大并会出现 U 型谷。

**关键词:** 格尔木河流域; 面积 - 高程积分值; 地貌学分析

**中图分类号:** P931

**文献标识码:** A

数字高程模型 (DEM) 是对地球表面地貌的数字表达和模拟<sup>[1]</sup>。数字高程模型 (DEM) 以及相关的 GIS 空间分析技术的引入, 极大丰富了地貌学的研究手段, 使传统地貌学研究得到深入和扩展, 研究尺度由微观地貌尺度延伸到宏观的造山带、大陆板块甚至全球构造地貌<sup>[2]</sup>, 使地表地貌过程的研究由定性转变到半定量 - 量化阶段。国内外许多学者利用 DEM 对构造地貌<sup>[3]</sup>、夷平面<sup>[4]</sup>、流域地貌<sup>[5-6]</sup>、冰川地貌<sup>[7]</sup>等进行了研究。技术进步和地貌演化理论深入, 使得利用 DEM 数据进行青藏高原地貌特征研究, 深入探讨青藏高原不同地貌单元演化过程和机制, 为典型地区的地表过程以及隆升、剥蚀机制的研究提供一个崭新的视角。

本文以 DEM 数据为基础资料, 以 ArcGIS 为技术支撑, 从格尔木河三级流域及部分二级流域中系统提取出各种常规定量参数及面积 - 高程积分值, 结合剖面分析, 对格尔木河流域面积 - 高程积分值的影响因素及面积 - 高程积分值对构造活动性、

岩性变化、冰川作用强度的指示意义进行研究。

## 1 区域与研究概况

研究区位于东昆仑山脉与柴达木盆地边界, 格尔木河处于柴达木盆地, 属内陆水系, 青藏公路由格尔木市沿河向南越过昆仑山口上到高原面上。

东昆仑山在本区南北宽约 100 km, 以东、西大滩谷地为界, 北部为布尔罕布达山, 山峰海拔多在 5 000 m 左右; 南部为东昆仑山主脊, 山峰海拔均在 5 000 m 以上, 为长江外流水系与柴达木内流水系的分水岭, 其主峰玉珠峰海拔 6 178 m。玉珠峰终年冰雪覆盖, 形成东昆仑山现代冰川作用中心之一。这里的冰川主要是冰斗冰川、悬冰川和山谷冰川。冰舌末端高度北坡为 4 500 ~ 4 800 m, 南坡为 5 000 ~ 5 150 m; 雪线高度北坡为 5 150 m 左右, 南坡为 5 250 m 左右<sup>[8]</sup>。

东昆仑地区自元古代以来经历了多次复杂而强

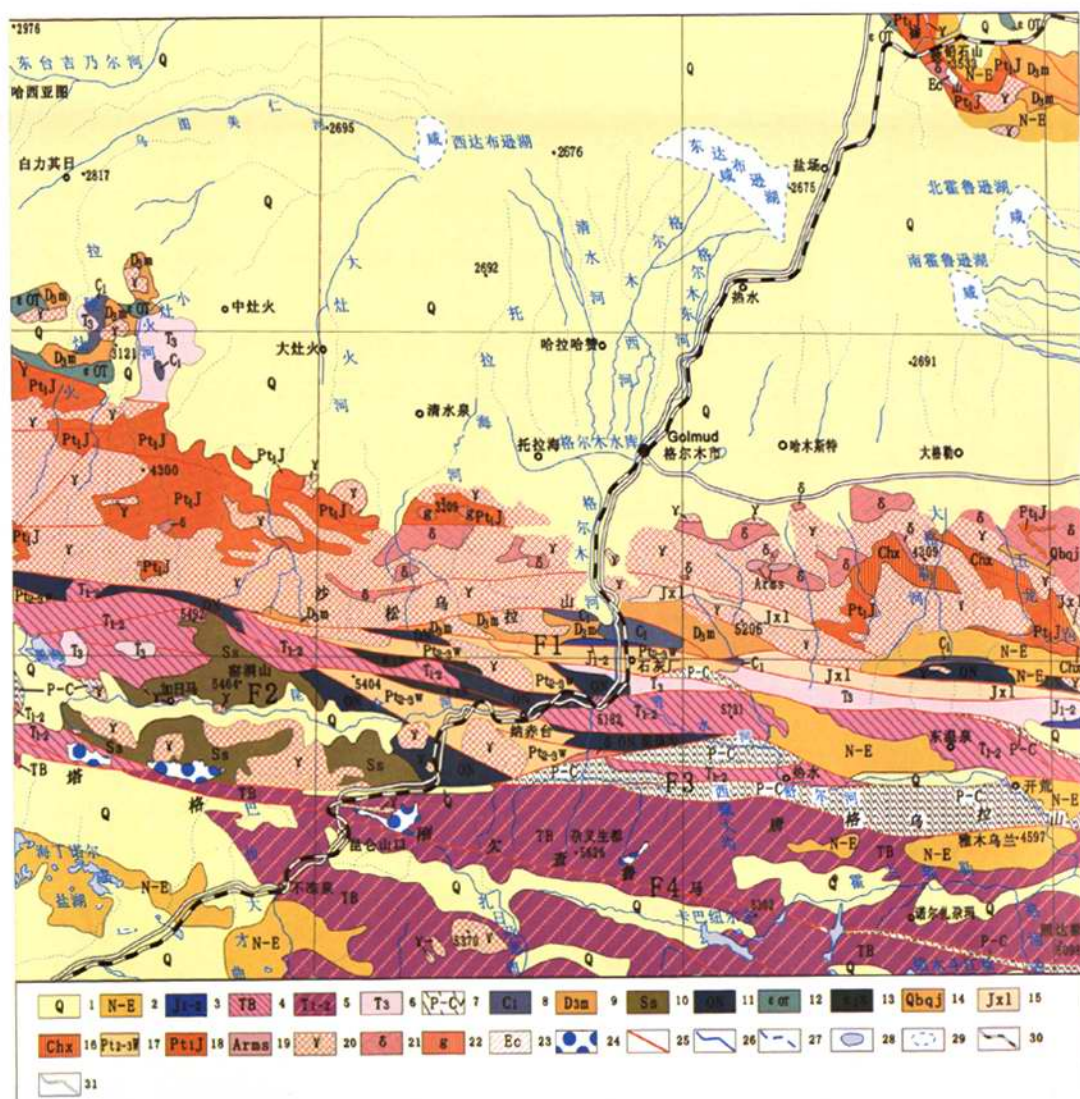
收稿日期 (Received date): 2010 - 05 - 20; 改回日期 (Accepted): 2010 - 12 - 01。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (批准号: 40571014, 40971002) 和 973 项目 (批准号: 2005CB422001)。[Supported by National Natural Science Foundation of China, No. 40571014, 40971002 and "973 Program", No. 2005CB422001.]

作者简介 (Biography): 张敬春 (1985 - ), 男, 汉族, 山东济宁人, 在读硕士生, 研究方向为 RS、GIS 技术在地貌学与环境演变中的应用。[Zhang Jingchun, Male, Master Student, Mainly engaged in the application of RS and GIS in geomorphology and environmental change research.]  
TEL: 15120094206, E-mail: zhangjingchun@pku.edu.cn

烈的构造变动,近东西向构造线,特别是系列近东西向的断裂构造控制着本区的基本地貌格局(图1)。主要断裂构造从北向南依次有东昆中断裂(F1)、昆仑河-野牛沟断裂(F2)、西大滩断裂(F3)和东昆南

断裂(F4)等。这些断裂多为具有复杂演化历史的长期活动的区域性断裂,一些断裂是具有板块缝线性质的区域性构造边界断裂,如东昆中断裂、西大滩断裂和东昆南断裂<sup>[9-10]</sup>。



1. 第四纪松散沉积物 2. 新近-古近纪:碎屑岩 3. 侏罗纪大煤沟组和羊曲组:碎屑岩、煤层 4. 三叠纪巴颜喀拉山群:板岩、砂岩、灰岩、火山岩 5. 三叠纪希里可特组、阔仓堡组、洪水川组和下大武组:碎屑岩、中酸性火山岩 6. 三叠纪八宝山组和鄂拉山组:中基-中酸性火山岩、碎屑岩、煤层 7. 二叠-石炭纪布青山群、格曲组和浩特洛哇组:中基-中酸性火山岩、碎屑岩 8. 石炭纪哈拉郭勒组、石拐子组和大干沟组:灰岩、砾岩、砂岩、安山岩 9. 泥盆纪托牛山组:中基-中酸性火山岩、碎屑岩 10. 志留纪赛什腾组:变砾岩、砂岩、千枚岩夹中酸性火山岩 11. 奥陶纪纳纳台群:片岩、基性火山岩、硅质岩、结晶灰岩 12. 奥陶-寒武纪滩间山群:中基性火山岩、千枚岩、结晶灰岩、砂岩 13. 寒武纪沙松乌拉组:砂岩、板岩、灰岩、火山碎屑岩 14. 青白口纪丘东沟组:绿泥钠长片岩、白云岩、板岩、变砂岩夹硅质岩 15. 蓟县纪狼牙山组:白云岩、灰岩夹砂岩、板岩 16. 长城纪小庙组:石英片岩、石英岩、大理岩夹混合岩、变砾岩 17. 新-中元古代万宝沟群:碳酸盐岩、中基性火山岩 18. 中元古代金水口岩群:片麻岩、斜长角闪岩、混合岩、大理岩 19. 太古宙变质表壳岩组合:麻粒岩、变砾岩、片麻岩 20. 加里东晚期-燕山早期侵入岩 21. 前寒武侵入岩 22. 麻粒岩 23. 榴辉岩 24. 冰川 25. 断裂 26. 长流河 27. 季节性河 28. 湖泊 29. 季节性湖 30. 铁路 31. 公路

图1 研究区地质构造简图(据文献[11]改绘)

Fig. 1 The simplified geological and structural map of research area

本区是青藏高原北部地貌第四纪演化研究程度较深地区之一。崔之久等<sup>[12]</sup>根据高原古岩溶及夷平面证据,认为中新世期间(18.0~7.0 Ma)的高原面海拔1 000 m左右。上新世末到更新世早期(3.6~0.7 Ma),昆仑山口古湖沉积证据表明当时具有较为温和、潮湿的生态环境,处于相对稳定的构造背景之下,本区海拔高度当在1 500 m左右。地形演化过程:1. 在3.6~1.6 Ma,位于昆仑山口的羌塘古湖最大,地形属于半高原性质,高度约1 500 m。北侧布尔罕布达山形成,有玄武岩喷发。2. 在1.1~0.7 Ma,早期“昆仑-黄河运动”发生,羌塘古湖已消亡,昆仑河和东大滩之间的中间山地隆起,东西向昆仑河谷形成,向东雪水河,向西野牛沟是其延续。3. 在0.7 Ma前后,主“昆仑-黄河运动”期,高原面抬升至海拔3 000 m,并发生最大冰期。纳赤台沟组(0.6~0.4 Ma),厚约100 m,为一套以泥石流沉积物为主的沉积物。4. 从0.5 Ma至今,中期昆仑-黄河运动致使西大滩-东大滩拉分断陷,东-西大滩谷地产生,玉珠峰隆升。三岔河组(0.4~0.06 Ma)堆积,厚度超过60 m,为一套中更新世至晚更新世时期河流沉积的地层,显示谷地自中更新世以来一直处于一种缓慢下沉的状态。

王国灿等<sup>[13-14]</sup>探讨了东昆仑东段的成山作用过程,提出东昆仑山系成形于第四纪,支持成山作用随时间由北向南推移。李长安等<sup>[15]</sup>、王岸等<sup>[16]</sup>探讨了昆仑山东段水系的发展过程,水系发展与构造隆升、气候变化的关系及其演化趋势。

已有的大多数研究都是从地层剖面的沉积记录、生物组合入手,通过ESR、TL、OSL、<sup>14</sup>C、TCN等测年手段,着重从地貌特征和沉积环境方面讨论它们与构造运动、气候变化之间的关系。曹凯等<sup>[17]</sup>引进河流长度-坡度参数(SL参数)和Hack剖面2个能够有效反映区域新构造活动的地貌参数,论证昆仑河-野牛沟断裂和东昆中断裂第四纪以来存在构造活动性,第四纪以来强烈的构造差异隆升作用控制了东昆仑地区的地貌水系发育格局。这给该区地貌研究提供了一个新的思路,但该方法不能对各个断裂内部活动性的差异进行探讨,另外该文并未讨论气候变化的影响。

## 2 研究方法和地形数据

### 2.1 研究方法

本研究利用的DEM数据取自美国地质勘探局

(USGS)2003年公布的SRTM-DEM。其中GTOPO30的精度为1 km,SRTM-DEM的精度为30 m(美国境内)和90 m(美国之外的其他国家和地区)。

为了更好的进行地貌类型解译及水系判读,使用ETM遥感影像和DEM相互配合对地物进行判别。本文使用的格尔木地区ETM遥感影像由多景遥感影像拼接而成,并以7、4、2波段进行假彩色合成(图2)。在影像上,山脉、盆地、冲积扇等宏观标志清晰可见。水系呈蓝色、蓝紫色,线状;山脉呈紫红色,带状;洪积扇呈浅紫色或浅紫与浅绿相见的颜色,扇形;冰川呈白色、淡蓝色,条带状。

作者对主要河段的河流地貌和源区冰川地貌进行了野外实地考察,研究区冰川地貌图参考伍永秋等<sup>[18]</sup>的编绘(见图2)。

将以上各种数据资料经过几何校正、配准、重采样,转换到统一的WGS-84坐标系下,精度控制在0.5个像元(<15 m)以内。

### 2.2 流域提取

流域水系网络和亚流域盆地的提取,地貌形态参数的获取以ArcGIS 9.2为技术平台,利用现有的嵌入水文分析模块(Hydrology)实现。

#### 2.2.1 水系网络提取

对原始DEM数据进行洼地填充、水流方向提取、汇流累积量计算后通过反复比较,将汇流累积量的阈值设为1 000 m<sup>2</sup>时,得到的格尔木河流域河网与实际较为符合,同时结合ETM遥感影像,对不符合实际情况及拓扑关系错误的个别河网进行调整,得到格尔木河流域水系网络图(图3)。

水系级别的定义采用Strahler分类系统<sup>[6,19]</sup>。Strahler分级是将所有河网弧段中没有支流的河网弧段定为第1级,两个1级河网弧段成的河网弧段为第2级,如此下去为第3级,第4级,……,一直到河网出水口。

#### 2.2.2 亚流域盆地获取

要获得准确的水系流域盆地,首先要定义汇水点的位置,所谓汇水点是指沿水系的分水岭方向,相对较窄,并且是整个盆地内流水以及沉积物最终集中的地区。汇水点在河流地貌学中具有重要意义,它是河流的侵蚀基准面,起着控制上游河段下切的作用。通常情况下,汇水点位于河流主流,流域盆地的级序也相应地等同于盆地内最高一级水系的级序。



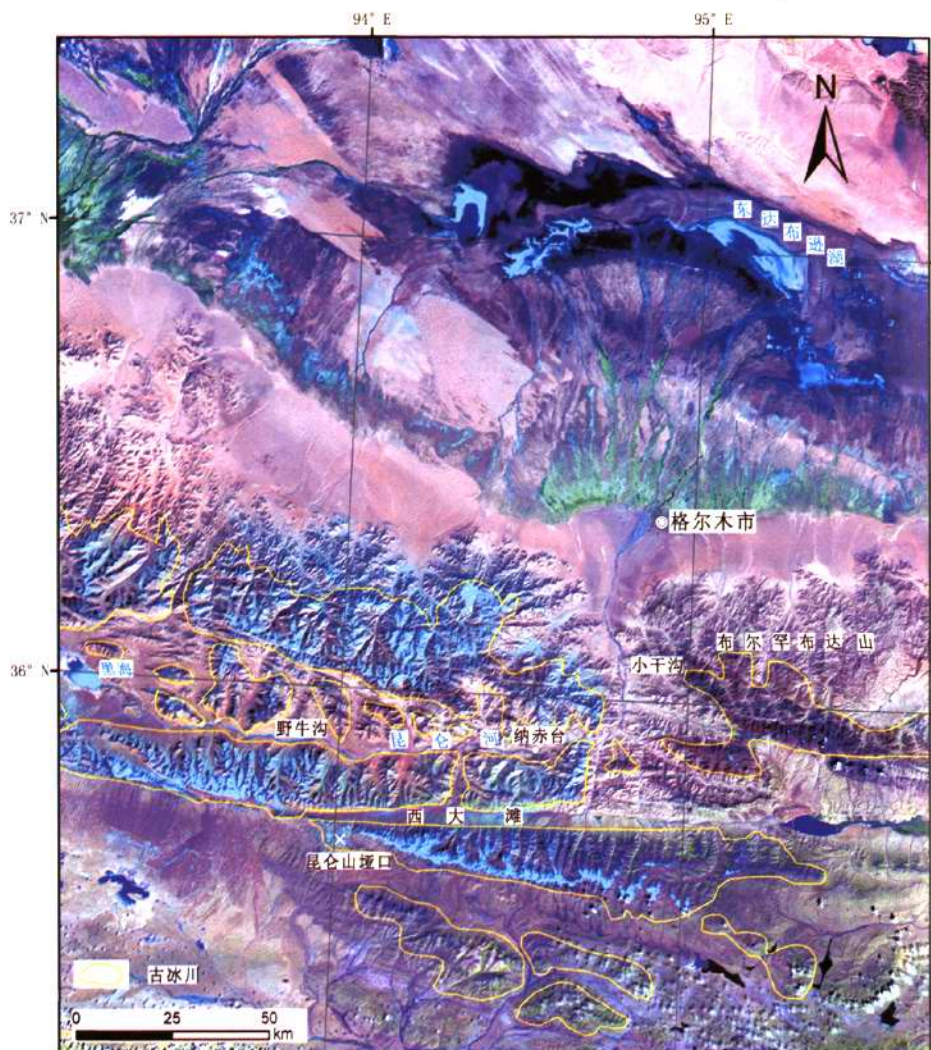


图2 研究区 ETM 7、4、2 波段合成影像及冰川地貌分布图

Fig. 2 The ETM image combined by band 7, 4, 2 and glacial landform distribution

本文将昆仑山与柴达木盆地的结合处南山口定义为整个格尔木河流域的汇水点,而相应各亚流域盆地的汇水点,则分别定义为位于格尔木河主流上的各支流汇入格尔木河主流的交汇点。据此,本文系统提取了三级及部分二级流域的亚流域盆地(图4)。

### 2.2.3 地貌形态参数获取

在成功提取格尔木河水系网络、亚流域盆地的基础上,各亚流域盆地的最大高程、最小高程、相对高差、流域面积等也可以通过 ArcGIS 的要素拓扑获得,结果见表1、表2。

### 2.2.4 面积-高程积分值

对目标流域进行了面积-高程积分值提取。面积-高程积分(Hypsometric Integral, HI)的分析方法由美国地貌学家 Strahler 于 1952 年提出<sup>[19]</sup>,目前被广泛应用在侵蚀地貌发育阶段定量研究中。高程-面积积分值的通常计算方法是:设全流域面积为  $A$ ,流域内某条等高线以上的面积为  $a$ ,该等高线与流域最低点的高差为  $h$ ,流域最高点与流域最低点的高差为  $H$ ,记  $X = a/A$ ,  $Y = h/H$ ,显然  $X, Y$  均在  $[0, 1]$  内取值。根据一系列  $(X, Y)$  值,以  $X$  为横坐标,  $Y$  为纵坐标绘出的曲线即为面积-高程曲线,曲线左下方与坐标轴之间的面积即为面积-高程积分值<sup>[20]</sup>(图5)。



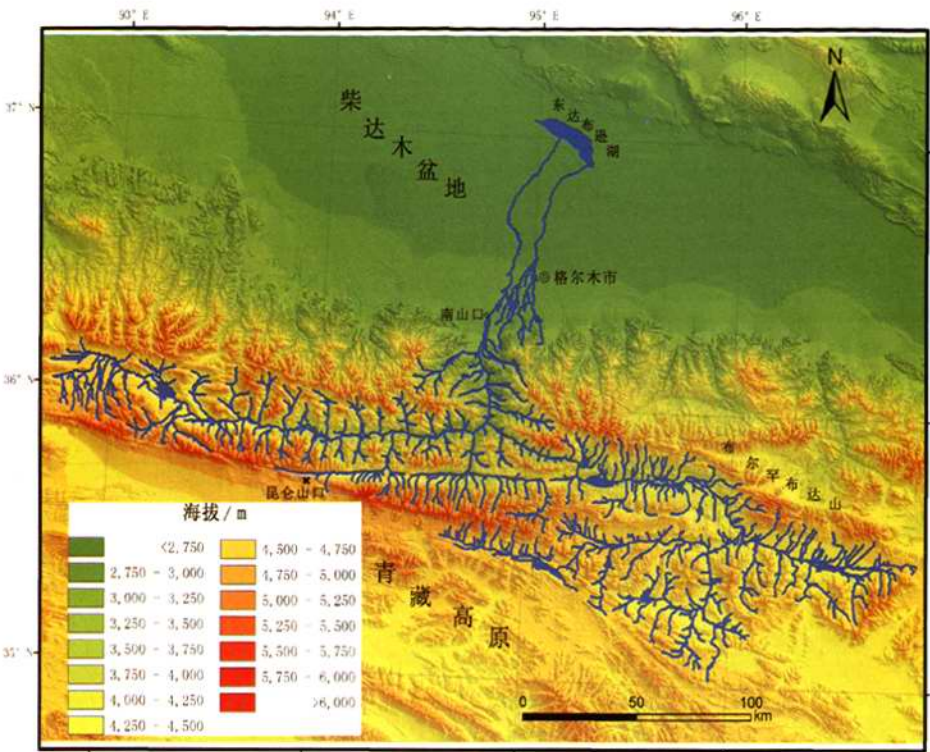


图3 格尔木河流域水系网络图  
Fig.3 The hydrographic net in Golmud river drainage basin

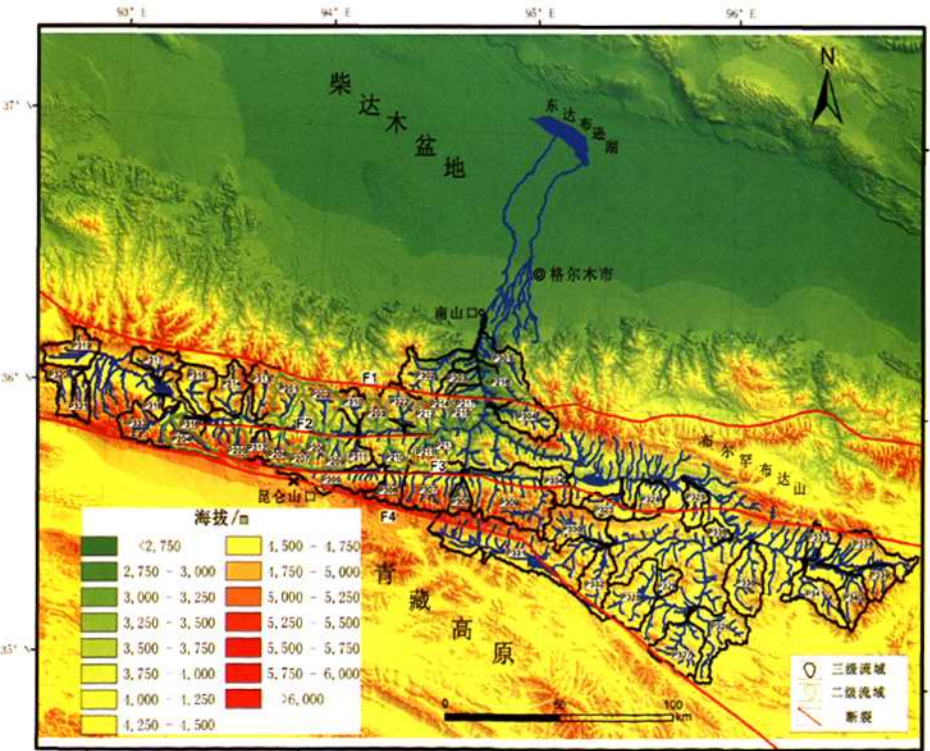


图4 格尔木河三级流域及部分二级流域分布图  
Fig.4 The third order basins and some of the second order basins in the Golmud river drainage basin

表 1 三级流域的最低高程、最高高程、相对高度、流域面积及 HI

Table 1 The minimum altitude, maximum altitude, relative height, area and HI value of the third order basins

流域 编号	最低高 程 $B/m$	最高高 程 $T/m$	相对高 度 $H_0/m$	流域面积 $A/km^2$	面积 - 高程 积分值 $HI$	流域 编号	最低高 程 $B/m$	最高高 程 $T/m$	相对高 度 $H_0/m$	流域面积 $A/km^2$	面积 - 高程 积分值 $HI$
P301	2 914	5 214	2 300	227.2	0.308	P322	3 663	5 494	1 831	210.9	0.411
P302	3 047	5 469	2 422	346.3	0.427	P323	3 964	5 029	1 065	180.2	0.532
P303	3 121	5 105	1 984	127.0	0.315	P324	3 969	4 959	990	178.7	0.391
P304	3 275	5 573	2 298	286.8	0.429	P325	4 014	4 765	751	144.8	0.317
P305	4 072	6 148	2 076	365.3	0.308	P326	4 324	4 887	563	403.6	0.304
P306	4 073	6 160	2 087	158.2	0.330	P327	4 336	5 196	860	353.9	0.276
P307	3 633	5 689	2 056	440.6	0.467	P328	4 388	5 011	623	426.0	0.198
P308	3 653	5 638	1 985	94.1	0.526	P329	4 388	4 891	503	99.1	0.274
P309	3 653	5 769	2116	761.3	0.449	P330	4 476	5 292	816	357.9	0.319
P310	3 778	5 423	1 645	128.7	0.438	P331	4 486	5 773	1 287	1 108.6	0.213
P311	3 776	5 200	1 424	108.3	0.350	P332	4 485	5 019	534	285.0	0.204
P312	4 067	5 916	1 849	94.2	0.433	P333	4 437	5 561	1 124	265.7	0.422
P313	4 127	5 491	1 364	213.7	0.434	P334	3 952	5 186	1 234	145.4	0.424
P314	4 199	5 480	1 281	242.3	0.338	P335	4 195	4 590	395	68.7	0.365
P315	4 308	5 457	1 149	255.3	0.188	P336	4 230	5 099	869	377.3	0.349
P316	4 293	5 373	1 080	68.6	0.291	P337	4 319	4 977	658	78.7	0.265
P317	4 435	5 442	1 007	166.8	0.253	P338	4 347	5 386	1 039	384.4	0.237
P318	4 436	5 252	816	62.0	0.200	P339	4 408	5 265	857	168.4	0.301
P319	4 510	5 426	916	251.4	0.185	P340	4 408	5 265	857	194.8	0.270
P320	4 617	5 382	765	184.9	0.218	P341	4 321	4 960	639	280.9	0.396
P321	4 614	5 710	1 096	118.3	0.222						

表 2 部分二级流域的最低高程、最高高程、相对高度、流域面积及 HI

Table 2 The minimum altitude, maximum altitude, relative height, area and HI value of some of the second order basins

流域 编号	最低高 程 $B/m$	最高高 程 $T/m$	相对高 度 $H_0/m$	流域面积 $A/km^2$	面积 - 高程 积分值 $HI$	流域 编号	最低高 程 $B/m$	最高高 程 $T/m$	相对高 度 $H_0/m$	流域面积 $A/km^2$	面积 - 高程 积分值 $HI$
P201	4 016	5 447	1 431	171.2	0.421	P210	3 875	5 215	1 340	55.9	0.347
P202	3 860	5 381	1 521	196.0	0.380	P211	3 565	5 322	1 757	83.3	0.545
P203	3 745	5 516	1771	74.8	0.433	P212	3 551	5 469	1 918	76.3	0.499
P204	4 417	5 683	1 266	156.3	0.437	P213	3 527	5 185	1 658	62.3	0.462
P205	4 186	5 920	1 734	72.7	0.470	P214	3 485	5 321	1 836	41.3	0.492
P206	4 023	5 416	1 393	81.0	0.576	P215	3 451	5 079	1 628	54.0	0.420
P207	3 888	5 397	1 509	71.5	0.611	P216	3 160	5 263	2 103	103.2	0.345
P208	3 863	5 271	1 408	72.5	0.451	P217	3 275	5 079	1 804	50.5	0.399
P209	3 831	5 031	1 200	81.0	0.391						

面积 - 高程积分值的具体意义是流域单元内未被侵蚀掉的物质体积和流域单元被侵蚀之前总物质体积的比值<sup>[21]</sup>。即

$$HI = V_1 / (V_1 + V_2)$$

式中  $V_1$  为流域在地表面所确定的不规则曲面与其在流域高程最小值所在的水平面上的水平投影面

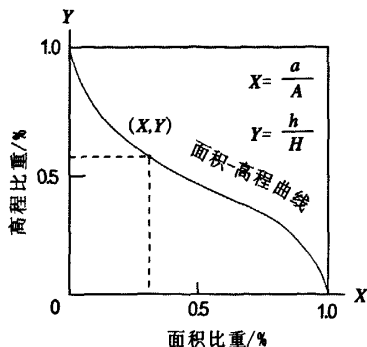


图5 面积-高程积分值的计算方式(据文献[19])

Fig. 5 The computation of HI value

之间所夹的体积,即流域未被侵蚀掉的物质体积; $V_2$ 为流域的不规则曲面在流域高程最大值所在的水平面上的水平投影面之间所夹的体积,即流域被侵蚀掉的物质体积。

因此,只要计算出 $V_1$ 和 $V_2$ 便可以计算出面积-高程积分值。可以借助 ArcGIS 9.2 软件平台中 ArcToolbox 中的 Surface Volume 模块进行计算。

分别计算格尔木河各三级流域及部分二级流域的最低高程、最高高程、相对高差、流域面积及面积-高程积分值(见表1、表2)。

### 3 讨论

利用流域的面积-高程积分值,可以表示流域地貌面受侵蚀的程度,并以此判断流域的发育阶段。但流域地貌发育并非全按 Davis 地貌旋回理论进行,在流域地貌发育过程中,因构造、岩性、气候等因子的突变,导致地貌过程的突变和形态的转折。作为地形因子综合作用的结果,面积-高程积分分析成了检验构造活动性、岩性变化、冰川作用强度在地貌演变过程中的相对作用强度的有用手段。

此外,流域的高程-面积积分值还具有面积依赖、空间依赖等特性<sup>[22-24]</sup>。所以在探讨高程-面积积分值所反映的地貌学意义时,要综合考虑各种因素对 HI 值的影响。

近年来,许多学者在面积-高程分析的影响因素及其地貌学意义方面做了大量工作,并取得了许多新认识<sup>[21-27]</sup>。一般认为,构造活跃地区,水系的发展常受到干扰,流域常具有幼年期的特征,HI 偏高;构造稳定的地区,为各支流水系提供了足够的发展演化时空,流域常具有老年期的特征,HI 较低。

因此比较各亚流域 HI 的高低,判断 HI 异常偏高或偏低的地区,便可以推测各亚流域构造的活动性。

除了构造因素外,岩性的不同代表了流域不同地区的抗侵蚀性差异,其亦可能影响流域面积-高程积分的高低。在通常情况下,HI 在小空间尺度上深刻地受到岩性的影响,但从大空间尺度来看,HI 更多地体现了构造运动的强度,这就是高程-面积积分值的面积依赖性。如 Lifton 与 Chase<sup>[28]</sup>在加州 San Gabriel 山区的研究,显示较大尺度流域(1 000 km<sup>2</sup>)面积-高程积分受构造活动影响较显著,小尺度流域(100 km<sup>2</sup>)则明显较受岩性影响。

陈彦桀等<sup>[22]</sup>对这一现象给出了模型解释。因此,在讨论面积-高程分析所反映的构造活动性、岩性变化时,需要考虑亚流域的面积大小。

#### 3.1 面积-高程积分值所反映的构造活动性

本区主要断裂构造(F1、F2、F3和F4)穿过格尔木河三级流域及部分面积较大的二级流域(见图4),其面积适合用来解析各个断裂内部活动性的差异。

东昆南断裂(F4)和西大滩断裂(F3)实际为同一条左旋走滑断裂带,其在昆仑山垭口处分为南北两支(北支即为西大滩断裂)。以昆仑山垭口附近为界,将该断裂带分为东西两部分。

西侧:从西向东依次穿过 P320、P321、P333、P204、P205、P312、P206、P207、P208、P209、P311,HI 依次为 0.218、0.222、0.422、0.437、0.470、0.433、0.576、0.611、0.451、0.391、0.350。可以看出该段断裂活动性大致变化的规律也为:弱→强→弱。活动性最强的流域为 P207,两侧的活动性依次减小。

东侧:东昆南断裂(F4)从西向东依次穿过 P305、P306、P307、P308、P309、P330、P331、P332、P328、P327、P326,HI 依次为:0.308、0.330、0.467、0.526、0.449、0.319、0.213、0.204、0.198、0.276、0.304。HI 值大致变化的规律为:小→大→小,因此该段断裂活动性大致变化的规律为:弱→强→弱。西大滩断裂(F3)从西向东依次穿过 P305、P306、P307、P308、P309、P334、P323、P324、P325、P337、P338,HI 依次为:0.308、0.330、0.467、0.526、0.449、0.424、0.532、0.391、0.317、0.265、0.237。HI 值大致变化的规律为:小→大→小,因此该段断裂活动性大致变化的规律为:弱→强→弱。综合 F4 和 F3 可以看出,该段左旋走滑断裂带活动性最强的流域为 P308,两侧的活动性依次减小。

东昆中断裂(F2)从西向东依次穿过 P319、

P317、P315、P314、P313、P201、P202、P310、P203、P322、P212、P214、P215、P217、P304,  $HI$  依次为 0.185、0.253、0.188、0.338、0.434、0.421、0.380、0.438、0.433、0.411、0.499、0.492、0.420、0.399、0.429。可以看出除该段断裂左侧的 P319、P317、P315 的  $HI$  较低外,其余流域的  $HI$  相差不大,因此该段断裂活动性变化不大。

昆仑河-野牛沟断裂(F2)的活动引起区域性下沉,形成了野牛沟断陷谷地。它刚好处于野牛沟南北两侧亚流域交汇的地方,因此它主要起到较低野牛沟南北两侧亚流域侵蚀基准面的作用。它没有直接穿过亚流域,因此本文没有讨论昆仑河-野牛沟断裂(F2)内部活动性的差异。

$HI$  的空间依赖性:以东昆南断裂(F4)-西大滩断裂(F3)、东昆中断裂(F1)为界,将格尔木河三级流域划分为上游、中游、下游三段。上游包括 P305 - P309、P311、P312、P316、P318、P320、P321、P323 - P341,其平均值为 0.328。中游包括 P304、P310、P313 - P315、P317、P319、P322,其平均值为 0.335。下游包括 P301 - P303,其平均值为 0.350。若以构造活动性解释,则从上游、中游到下游,构造活动性逐渐增强,这显然与现阶段对该区域活动性的认识不符<sup>[29-30]</sup>。1979、2002 年的 2 期水准测量资料表明东、西大滩以南的昆仑主脊、以北的中昆仑山以及昆仑河以北三者隆升强度的依次递减<sup>[29]</sup>。西大滩断裂和东昆南断裂表现出明显的活动性,现代活动性非常强烈,地震活动频繁,沿断裂发育地裂缝和地震鼓包,东昆南断裂在 2001 年曾发生 MS 8.1 级地震,在山前形成 > 350 km 的地表破裂带<sup>[30]</sup>。而东昆中断裂地震活动记录并不明显。这说明在以大流域为研究对象时,必须考虑河流上、下游不同河段的主要河流作用并不相同,上游以侵蚀作用为主,下游则以堆积作用为主,其  $HI$  可能会受到影响,因此不能通过比较亚流域  $HI$  的高低,直接判断流域上、下游构造活动性的差异。这与陈彦桀等<sup>[22-23]</sup>在台湾西部及赵洪壮等<sup>[24]</sup>在天山北麓所做的跨越山地、丘陵和平原流域的研究结果相一致。

### 3.2 面积-高程积分值所反映的岩性变化

为排除构造活动的影响,主要从构造活动不明显及构造活动性变化不大的流域探讨岩性变化对面积-高程积分值的影响。图 6 可以看到,面积稍小的二级流域内岩性比较单一,其面积适合讨论岩性变化对面积-高程积分值的影响。

在昆仑河南侧的小南川至纳赤台地区分布着

P210、P211、P213 三个二级流域,该地构造活动不明显<sup>[31]</sup>。P210 流域分布的岩层主要是奥陶纪纳赤台群(ON),岩性有片岩、基性火山岩、硅质岩、结晶灰岩;P211 流域分布的岩性主要是加里东晚期-燕山早期侵入岩( $\gamma$ );P213 流域分布的岩层主要是新-中元古代万宝沟群( $Pt_{2-3}W$ ),岩性有碳酸盐岩、中基性火山岩。从流域  $HI$  值的相对大小来说,P211 (0.545) > P213 (0.462) > P210 (0.347)。根据这三个二级流域  $HI$  值的大小可以得出其抗侵蚀力为: P211 > P213 > P210。由此可以推断出:侵入岩的抗侵蚀力最大,片岩的抗侵蚀力最小,碳酸盐岩组合的抗侵蚀力居中。这可能反映该地区处于高寒干燥的气候条件下,基岩剥蚀主要以冻融风化,河流机械剥蚀为主。

在构造活动性变化不大的地区,如昆仑河北侧的二级流域 P212、P214、P215 (见图 6),同样反映了此规律。P212 流域的岩层主要是流域分布的岩性主要是加里东晚期-燕山早期侵入岩( $\gamma$ ),其次是奥陶纪纳赤台群(ON);P214 流域的岩层主要是新-中元古代万宝沟群( $Pt_{2-3}W$ );P215 流域的岩层主要是奥陶纪纳赤台群(ON)。小流域的  $HI$  值相对大小为: P212 (0.499) > P214 (0.492) > P215 (0.420)。也显示出岩石的抗侵蚀力:侵入岩 > 碳酸盐岩 > 片岩。值得注意的是 P212 仅稍大于 P214 的  $HI$  值,这可能是由于 P212 流域内有容易风化的片岩(ON)的缘故。

### 3.3 面积-高程积分值所反映的冰川作用强度

已有研究表明  $HI$  值可以用来指示冰川作用的强度<sup>[32]</sup>。根据该区域的古冰川及现代冰川分布范围(图 2)可以将亚流域分为没有冰川作用的流域、只有古冰川作用的流域、既有古冰川作用又有现代冰川的流域。本文以 P216、P213、P205 三个二级流域为例,探讨面积-高程分析所反映的冰川作用强度(图 7)。

P216 流域没有冰川作用,它所在的区域构造活动不明显,岩层主要为泥盆纪牦牛山组( $D_3m$ :中基-中酸性火山岩、碎屑岩)和二叠-石炭纪布青山群、格曲组和浩特洛哇组( $C_1$ :中基-中酸性火山岩、碎屑岩)。P213 流域只有古冰川作用遗迹,它所在的区域构造活动不明显,岩层主要为新-中元古代万宝沟群( $Pt_{2-3}W$ ),岩性有碳酸盐岩、中基性火山岩。P216、P213 的区域构造条件及岩性相差不大。 $HI$  值的相对大小为: P213 (0.462) > P216





## 4 结论

本文在 SRTM - DEM 数据的基础上,提取了格尔木河亚流域各种常规量化参数及面积 - 高程积分值。分析了流域面积及空间分布的不同对  $HI$  值的影响。探讨了  $HI$  值与构造活动性、岩性变化及冰川作用强度的关系。在以下几个方面取得了新认识:

1.  $HI$  值具有面积依赖性。在通常情况下,  $HI$  在小空间尺度上深刻地受到岩性的影响,但从大空间尺度来看,  $HI$  更多地体现了构造运动的强度。通过研究发现:格尔木河三级流域及部分面积较大的二级流域可以很好地用来探讨  $HI$  值与构造活动性的关系。部分面积稍小的二级流域可以很好地用来探讨  $HI$  值与岩性变化及冰川作用强度的关系。

2.  $HI$  值具有空间依赖性。以跨越山地、丘陵和平原的大流域为研究对象时,必须考虑河流上、下游不同河段的主要河流作用并不相同,不能根据亚流域  $HI$  值的相对大小,直接判断流域上、下游构造活动性的大小。

3. 地形参数和  $HI$  可以很好地指示同一构造带形成的断块山地的隆升中心。如,东昆南断裂(F4) - 西大滩断裂(F3)以昆仑山垭口附近为界,东、西两侧两个断块山地的活动中心位于中部,往两边依次减小。位于北侧的东昆中断裂(F1)的活动性相对变化不大。

4. 该地侵入岩的抗侵蚀力最大,碳酸盐岩组合的抗侵蚀力居中,片岩的抗侵蚀力最小。这可能与该地高寒干燥的气候条件下,岩石主要以冻融风化和机械剥蚀作用为主有关。

5. 该地气候变化对地貌发育的影响主要体现在冰川作用对地貌的改造作用。冰川作用强度大的流域,  $HI$  值较大并会出现 U 型谷。本区冰川地貌最发育的流域也是构造运动活跃的地域,构造运动与气候变化的耦合关系既直接,又复杂。

致谢 成文过程中,得到了北京大学地表过程与模拟教育部重点实验室刘雪萍高级工程师,北京大学遥感与 GIS 研究所郭伦教授、梁子旭硕士,美国田纳西大学李英奎教授,北京大学城市与环境学院胡斌博士的热情帮助,在此表示衷心的感谢!

## 参考文献 (References)

[1] Summerfield M A. *Geomorphology and global tectonics* [M]. Lon-

don: John Wiley & Sons Ltd. Press, 2000: 1 - 367

- [2] 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 - 669 [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 - 669]
- [3] 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 Resources*, 200, (3): 62 - 66 [洪顺英, 申旭辉, 荆凤, 等. 基于 SRTM - DEM 的阿尔泰山构造地貌特征分析 [J]. *国土资源遥感*, 200, (3): 62 - 66]
- [4] Liu Jing, Ding Lin, Zheng Lingsen, et al. Large-scale terrain analysis of selected regions of the Tibetan plateau: discussion on the origin of plateau planation surface [J]. *Earth Science Frontier*, 2006, 13(5): 285 - 299 [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 [J]. *地质学前沿*, 2006, 13(5): 285 - 299]
- [5] Shi Wei. DEM drainage analysis of the Shanxi - Shaanxi gorge in the middle reaches of the Huanghe River and its neotectonic implications [J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(2): 288 - 298 [施伟. 黄河中游晋陕峡谷的 DEM 流域特征分析及其新构造意义 [J]. *第四纪研究*, 2008, 28(2): 288 - 298]
- [6] Zhang Huiping, Yang Nong, Zhang Yueqiao, et al. Geomorphology of the Minjiang drainage system (Sichuan, China) and its structural implications [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(1): 126 - 135 [张会平, 杨农, 张岳桥, 等. 岷江水系流域地貌特征及其构造指示意义 [J]. *第四纪研究*, 2006, 26(1): 126 - 135]
- [7] A P Stroeven, C Hättestrand, J Heyman, et al. Landscape analysis of the Huang He headwaters, NE Tibetan Plateau - Patterns of glacial and fluvial erosion [J]. *Geomorphology*, 2009, 103: 212 - 226
- [8] Li Shijie. The sedimentary characteristics and depositional environment of Quaternary sediments in Kunlun Pass, Qinghai Province [D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, CAS, 1985 [李世杰. 青海昆仑山垭口地区第四纪沉积物的沉积特征及沉积环境 [D]. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1985]
- [9] Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, et al. The Qinghai - Tibet plateau and continental dynamics: a review on terrain tectonics, collisional orogenesis, and processes and mechanisms for the rise of the plateau [J]. *Geology in China*, 2006, 33(2): 221 - 238 [许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 青藏高原与大陆动力学 - 地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力 [J]. *中国地质*, 2006, 33(2): 221 - 238]
- [10] Zhang Peizhen, Zheng Dewen, Yin Gongming, et al. Discussion on late Cenozoic growth and rise of northeastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(1): 5 - 13 [张培震, 郑德文, 尹功明, 等. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论 [J]. *第四纪研究*, 2006, 26(1): 5 - 13]
- [11] Zhang Xueting, Yang Shengde. *The regional geology of Qinghai Province: A guide to the geological map of Qinghai Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007 [张雪亭, 杨生德. 青海省区域地质概论——1:100 万青海省地质图说明书 [M]. 北京:

- 地质出版社,2007]
- [12] Cui Zhijiu, Wu Yongqiu, Liu Gengnian, et al. About Kunlun - Huanghe Movement[J]. Science in China; Series D, 1998, 28(1), 53 - 59 [崔之久, 伍永秋, 刘耕年, 等. 关于“昆仑 - 黄河运动”. 中国科学(D 辑), 1998, 28(10): 53 - 59]
  - [13] Wang Guocan, Hou Guangjiu, Zhang Kexin, et al. Mountain Building and its dynamic transition since middle Pleistocene in east of Eastern Kunlun, northeast Tibet plateau [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(1): 4 - 12 [王国灿, 侯光久, 张克信, 等. 东昆仑东段中更新世以来的成山作用及其动力转换[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2002, 27(1): 4 - 12]
  - [14] Wang Guocan, Wu Yangling, Xiang Shuyuan. Mountain building process and geomorphic migration of eastern Kunlun mountains during Quaternary[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2003, 28(6): 583 - 592 [王国灿, 吴燕玲, 向树元, 等. 东昆仑东段第四纪成山作用过程与地貌变迁[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2003, 28(6): 583 - 592]
  - [15] Li Changan, Yin Hongfu, Yu Qingwen. Evolution of drainage systems and its development trend in connection with tectonic uplift of eastern Kunlun Mt [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(2): 211 - 214 [李长安, 殷鸿福, 于庆文. 东昆仑山构造隆升与水系演化及其发展趋势[J]. 科学通报, 1999, 44(2): 211 - 214]
  - [16] An Wang, Jacqueline A. Smith, Guocan Wang, et al. Late Quaternary river terrace sequences in the eastern Kunlun Range, northern Tibet: A combined record of climatic change and surface uplift [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34: 532 - 543
  - [17] Cao Kai, Wang Guocan, Wang An. The analysis of the tectonics and the behavior of the longitudinal section of Kunlun river in east Kunlun [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2007, 32(5): 713 - 721 [曹凯, 王国灿, 王岸. 东昆仑山昆仑河纵剖面地貌分析及构造涵义[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2007, 32(5): 713 - 721]
  - [18] Wu Yongqiu, Cui Zhijiu, Liu Gengnian, et al. Glaciation sequences in the Kunlun Pass area [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 21(1): 71 - 76 [伍永秋, 崔之久, 刘耕年, 等. 昆仑山垭口地区的冰期系列[J]. 冰川冻土, 1999, 21(1): 71 - 76]
  - [19] Strahler A N. Hypsometric (Area - Altitude) analysis of erosional topography [J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1952, 63: 1117 - 1142
  - [20] Harlin. Watershed morphometry and time to hydrograph peak [J]. Journal of Hydrology, 1984, 67: 141 - 154
  - [21] Wang Lin, He Zhongtai, Ma Baoqi. Geomorphic evolution and its implication for the fault activity in the Daihai drainage basin [J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(2): 310 - 318 [王林, 何仲太, 马保起. 岱海流域地貌演化及其对断裂活动性的指示意义[J]. 第四纪研究, 2008, 28(2): 310 - 318]
  - [22] Chen Yen-Chieh, Cheng Kuang-Yu, Sung Quocheng. Influence of area and space dependence for hypsometric integral and its geological implications [J]. Journal of Geographical Science (Taiwan), 2005, (39): 53 - 69 [陈彦桀, 郑光佑, 宋国城. 面积尺度与空间分布对流域面积高度积分及地质意义的影响[J]. 地理学报(台湾), 2005, (39): 53 - 69]
  - [23] Yen-Chieh Chen, Quocheng Sung, Kuang-Yu Cheng. Along-strike variations of morphotectonic features in the Western Foothills of Taiwan; tectonic implications based on stream-gradient and hypsometric analysis [J]. Geomorphology, 2003, 56: 109 - 137
  - [24] Zhao Hongzhuang, Li Youli, Yang Jingchun, et al. Influence of area and space dependence for hypsometric integral and its geological implications [J]. Geographical Research, 2010, 29(2): 271 - 282 [赵洪壮, 李有利, 杨景春, 等. 面积高度积分的面积依赖与空间分布特征[J]. 地理研究, 2010, 29(2): 271 - 282]
  - [25] Xin Zhongbao, Xu Jiongxin, Ma Yuanxu. Hypsometric integral analysis and its sediment yield implications in the Loess Plateau, China [J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(3): 356 - 363 [信忠保, 许炯心, 马元旭. 黄土高原面积 - 高程分析及其侵蚀地貌学意义[J]. 山地学报, 2008, 26(3): 356 - 363]
  - [26] Jiang Luguang, Zhang Zulu. Altitude-area analysis on the drainage landform in the Luzhongnan Mountainous region [J]. Journal of Shangdong Normal University: Natural Science, 2003, 18(1): 63 - 66 [姜鲁光, 张祖陆. 鲁中南山地流域地貌的高程 - 面积分析[J]. 山东师范大学学报: 自然科学版, 2003, 18(1): 63 - 66]
  - [27] Zhao Hongzhuang, Li Youli, Yang Jingchun, et al. Geomorphology characteristic and tectonic response of the northern Tianshan represented by hypsometric integral [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(3): 285 - 292 [赵洪壮, 李有利, 杨景春, 等. 天山北麓流域面积高度积分特征及其构造意义[J]. 山地学报, 2009, 27(3): 285 - 292]
  - [28] Lifton, N A, Chase, C G. Tectonic, climatic and lithologic influences on landscape fractal dimension and hypsometry; implications for landscape evolution in the San Gabriel Mountains, California [J]. Geomorphology, 1992, 5: 77 - 114
  - [29] Wang Qingliang, Wang Jianhua, Zhu Guizhi, et al. Vertical deformations of the eastern Kunlun fault zone and west of Kunlun Mountain Pass Ms 8.1 earthquake [J]. Seismology and Geology, 2004, 26(2): 273 - 280 [王庆良, 王建华, 朱桂芝, 等. 东昆仑山断裂带及昆仑山口西 8.1 级地震垂直形变研究[J]. 地震地质, 2004, 26(2): 273 - 280]
  - [30] Xu Xiwei, Chen Wenbin, Yu Guihua, et al. Characteristic features of the surface ruptures of the Hou Sai HU (Kunlunshan) earthquake (Ms 8.1), Northern Tibetan Plateau, China [J]. Seismology and Geology, 2002, 24(1): 1 - 13 [徐锡伟, 陈文彬, 于贵华, 等. 2001 年 11 月 14 日昆仑山库赛湖地震 (Ms 8.1) 地表破裂带的基本特征[J]. 地震地质, 2002, 24(1): 1 - 13]
  - [31] Wang An, Wang Guocan, Xie Defan, et al. Fission track geochronology of Xiaonanchuan Pluton and the morphotectonic evolution of eastern Kunlun since Late Miocene [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2007, 32(1): 51 - 58 [王岸, 王国灿, 谢德凡, 等. 东昆仑山小南川岩体裂变径迹年代与中新世晚期以来的构造地貌演化[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2007, 32(1): 51 - 58]
  - [32] Simon H Brocklehurst, Kelin X Whipple. Hypsometry of glaciated landscapes [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29:



907 - 926

[33] Kirkbride M, Matthews D. The role of fluvial and glacial erosion in

landscape evolution: the Ben Ohau Range, New Zealand[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, 22: 317 - 327

## Geomorphologic Analysis of the Golmud River Drainage Basin Based on Hypsometric Integral Value

ZHANG Jingchun, LI Chuanchuan, ZHANG Mei, LIU Gengnian

(College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The interaction between tectonics and climate on landform has sparked much interest over years. The hypsometric integral (HI) value could reflect both tectonic activity and climate change, and might be a promising tool that links those two aspects. Based on SRTM - DEM data, this paper withdraws the measuring indicators of the landform and hypsometric integral from the third order basins and some of the second order basins in the Golmud river drainage basin using GIS spatial analysis, discusses the area and space dependence for hypsometric integral, and presents its significance in indicating tectonics, lithology and the degree of glacial erosion. The results show: the HI value depends on area and space; the southern fault of east Kunlun (F4) - Xidatan (F3) fault can be divided into two parts, the east and the west, by the Kunlun Pass; both of them show similar scenario that the activity decrease from the center to the sides; there is no apparent change in the activity of the central fault of east Kunlun (F1); intrusive rock shows greatest erosion-resistance while schist shows least and carbonate rocks shows modest, respectively; glacial processes could rework the landform and change the degree of erosion; the drainage basin with modern glacier and/or with extensively distributed paleo-glacier is of higher HI value and develops U-shaped valley, compared to those without or with limited paleo-glacier.

**Key words:** Golmud river drainage basin; hypsometric integral value; geomorphologic analysis

---

### 消息 1:《山地学报》网上投稿系统已试运行

尊敬的作者及审稿专家,《山地学报》网上投稿审稿系统开通了,请登录站点 <http://shandixb.paperopen.com>。我们的投稿系统网特别开辟了网上科普知识和考察游记栏,欢迎广大作者、读者赐稿。目前本系统处在试运行阶段,希望提出改进意见,帮助我们使其更加完善。

(然子桐)

作者: [张敬春](#), [李川川](#), [张梅](#), [刘耕年](#), [ZHANG Jingchun](#), [LI Chuanchuan](#), [ZHANG Mei](#), [LIU Gengnian](#)

作者单位: [张敬春, ZHANG Jingchun\(北京大学城市与环境学院, 北京, 100871; 中国科学院研究生院, 北京 100049\)](#), [李川川, 张梅, 刘耕年, LI Chuanchuan, ZHANG Mei, LIU Gengnian\(北京大学城市与环境学院, 北京, 100871\)](#)

刊名: [山地学报](#) **ISTIC PKU**

英文刊名: [JOURNAL OF MOUNTAIN SCIENCE](#)

年, 卷(期): 2011, 29(3)

被引用次数: 1次

## 参考文献(33条)

1. [Summerfield M A](#) [Geomorphology and global tectonics](#) 2000
2. [张会平; 杨农; 刘少峰](#) [数字高程模型\(DEM\)在构造地貌研究中的应用新进展](#) [期刊论文] - [地质通报](#) 2006(06)
3. [洪顺英; 申旭辉; 荆凤](#) [基于SRTM-DEM的阿尔泰山构造地貌特征分析](#) [期刊论文] - [国土资源遥感](#) 2007(03)
4. [刘静; 丁林; 曾令森](#) [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](#) [期刊论文] - [地学前缘](#) 2006(05)
5. [施炜](#) [黄河中游晋陕峡谷的DEM流域特征分析及其新构造意义](#) [期刊论文] - [第四纪研究](#) 2008(02)
6. [张会平; 杨农; 张岳桥](#) [岷江水系流域地貌特征及其构造指示意义](#) [期刊论文] - [第四纪研究](#) 2006(01)
7. [A P Stroeve; C H\(a\) ttestrand; J Heyman](#) [Landscape analysis of the Huang He headwaters, NE Tibetan Plateau-Pattems of glacial and fluvial erosion](#) 2009
8. [李世杰](#) [青海昆仑山垭口地区第四纪沉积物的沉积特征及沉积环境](#) 1985
9. [许志琴; 杨经绥; 李海兵](#) [青藏高原与大陆动力学-地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力](#) [期刊论文] - [中国地质](#) 2006(02)
10. [张培震; 郑德文; 尹功明](#) [有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论](#) [期刊论文] - [第四纪研究](#) 2006(01)
11. [张雪亭; 杨生德](#) [青海省区域地质概论--1:100万青海省地质图说明书](#) 2007
12. [崔之久; 伍永秋; 刘耕年](#) [关于“昆仑—黄河运动”](#) 1998(10)
13. [王国灿; 侯光久; 张克信](#) [东昆仑东段中更新世以来的成山作用及其动力转换](#) [期刊论文] - [地球科学-中国地质大学学报](#) 2002(01)
14. [王国灿; 吴燕玲; 向树元](#) [东昆仑东段第四纪成山作用过程与地貌变迁](#) [期刊论文] - [地球科学-中国地质大学学报](#) 2003(06)
15. [李长安; 殷鸿福; 于庆文](#) [东昆仑山构造隆升与水系演化及其发展趋势](#) [期刊论文] - [科学通报](#) 1999(02)
16. [An Wang; Jacqueline A. Smith; Guoean Wang](#) [Late Quaternary fiver terrace sequences in the eastern Kunlun Range, northern Tibet: A combined record of climatic change and surface uplift](#) 2009
17. [曹凯; 王国灿; 王岸](#) [东昆仑山昆仑河纵剖面地貌分析及构造涵义](#) [期刊论文] - [地球科学-中国地质大学学报](#) 2007(05)
18. [伍永秋; 崔之久; 刘耕年](#) [昆仑山垭口地区的冰期系列](#) 1999(01)
19. [Strahler A N](#) [Hypsometric \(Area-Altitude\) analysis of erosiohal topography](#) 1952
20. [Harlin](#) [Watershed morphometry and time to hydrograph peak](#) [外文期刊] 1984
21. [王林; 何仲太; 马保起](#) [岱海流域地貌演化及其对断裂活动性的指示意义](#) [期刊论文] - [第四纪研究](#) 2008(02)
22. [陈彦桀; 郑光佑; 宋国城](#) [面积尺度与空间分布对流域面积高度积分及地质意义的影响](#) 2005(39)
23. [Yen-Chieh Chen; Quocheng Sung; Kuang-Yu Cheng](#) [Along-strike variations of morphotectonic features in](#)

[the Western Foothills of Taiwan:tectonic implications based on stream-gradient and hypsometric analysis](#) 2003

24. [赵洪壮;李有利;杨景春](#) [面积高度积分的面积依赖与空间分布特征](#)[期刊论文]-[地理研究](#) 2010(02)
25. [信忠保;许炯心;马元旭](#) [黄土高原面积-高程分析及其侵蚀地貌学意义](#)[期刊论文]-[山地学报](#) 2008(03)
26. [姜鲁光;张祖陆](#) [鲁中南山地流域地貌的高程-面积分析](#)[期刊论文]-[山东师范大学学报（自然科学版）](#) 2003(01)
27. [赵洪壮;李有利;杨景春](#) [天山北麓流域面积高度积分特征及其构造意义](#)[期刊论文]-[山地学报](#) 2009(03)
28. [Lifton, N A;Chase, C G](#) [Tectonic, climatic and lithologic influences on Landscape fractal dimension and hypsometry: implications for landscape evolution in the San Gabriel Mountains, California](#) 1992
29. [王庆良;王建华;朱桂芝](#) [东昆仑山断裂带及昆仑山口西8.1级地震垂直形变研究](#)[期刊论文]-[地震地质](#) 2004(02)
30. [徐锡伟;陈文彬;于贵华](#) [2001年11月14日昆仑山库赛湖地震\(Ms 8.1\)地表破裂带的基本特征](#)[期刊论文]-[地震地质](#) 2002(01)
31. [王岸;王国灿;谢德凡](#) [东昆仑山小南川岩体裂变径迹年代与中新世晚期以来的构造地貌演化](#)[期刊论文]-[地球科学-中国地质大学学报](#) 2007(01)
32. [Simon H Brocklehurst;Kelin X Whipple](#) [Hypsometry of glaciated landscapes](#) 2004
33. [Kirkbride M;Matthews D](#) [The role of fluvial and glacial erosion in landscape evolution: the Ben Ohau Range, New Zealand](#)[外文期刊] 1997

#### 引证文献(1条)

1. [王钧. 欧国强. 杨顺. 季宪军. 陆桂红](#) [地貌信息熵在地震后泥石流危险性评价中的应用](#)[期刊论文]-[山地学报](#) 2013(1)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_sdx201103001.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdx201103001.aspx)