

面积高度积分的面积依赖与空间分布特征

赵洪壮^{1, 2}, 李有利^{1, 2}, 杨景春¹, 吕红华^{1, 2}, 司苏沛¹

(1 北京大学城市与环境学院, 北京 100871;

2 北京大学地理科学中心地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 面积高度积分作为揭示区域构造相对活动性的指标, 其面积依赖和空间分布两大特性会影响到它对构造活动的解释。以北天山 10 条河流域作为研究区域, 研究表明, 在不同集流面积阈值下, 天山北麓流域次集水盆地的平均面积高度积分与平均面积、平均高差都具有负相关关系。受北天山褶皱逆断裂构造带的影响, 流域面积高度积分值的分布与构造带走向相一致, 上游山地型次集水盆地面积高度积分值大于中游山麓丘陵型次集水盆地面积高度积分, 揭示了面积高度积分存在空间分布依赖的特性。在大小不同观测尺度下, 构造活动和基岩岩性差异对面积高度积分有着不同的影响。在玛纳斯河流域中, 以不同集流阈值提取的不同面积大小的次集水盆地与各年代地层以及活动构造做 GIS 叠加分析, 可以发现当集流阈值小于 9km^2 时, 面积高度积分值受到岩性与构造的双重影响, 而当集流阈值大于 20km^2 时, 面积高度积分值主要反映构造活动的影响。

关键词: 面积高度积分; 面积依赖; 空间分布; 构造活动; 天山

文章编号: 1000-0585(2010)02-0271-12

1 引言

晚新生代以来, 受印度洋板块向欧亚板块深俯冲产生的远距离效应影响^[1-4], 天山这一古老的最早形成于晚古生代的造山带重新复活, 晚新生代以来天山地区强烈抬升, 形成规模宏大的年轻的板内再生造山带^[5]。探索控制大陆内部构造变形的因素与量化描述, 成为构造地貌学的研究热点之一。有学者为探讨构造运动对地形所造成的变化, 将地形分析的方法应用到构造活动的分析上, 借助地形计量的方法进行系统化的描述、分析, 并利用量化的构造地形指标描述地表形态的变动, 以此来探讨构造活动的特征^[6-8]。

Strahler^[9] 提出以集水盆地的相对高度比 (h/H) 为纵轴、相对面积比 (a/A) 为横轴, 绘出的曲线 (图 1) 称为集水盆地的面积高度曲线 (hypsometric curve)。面积高度曲线下方的面积即为面积高度积分 (Hypsometric integral, HI), 代表了该集水盆地的原始地形面在受到风化、侵蚀作用后所残留在地表的土地体积比例。Strahler 等学者^[9-12] 将面积高度曲线的形状分为凸形 (幼年期)、S 形 (壮年期) 及凹形 (老年期)。流域地形演化时间越长, 侵蚀程度越高, 其面积高度曲线呈现凹形, 面积高度积分值较低 ($HI < 0.4$), 表示此集水区已进入 Davis 地貌循环的老年期阶段 (图 1-(3)); 地形演化时间越短, 受侵蚀程度越低, 大部分的地形面高程相对高于平均高程, 则其面积高度曲线呈凸形, 面积

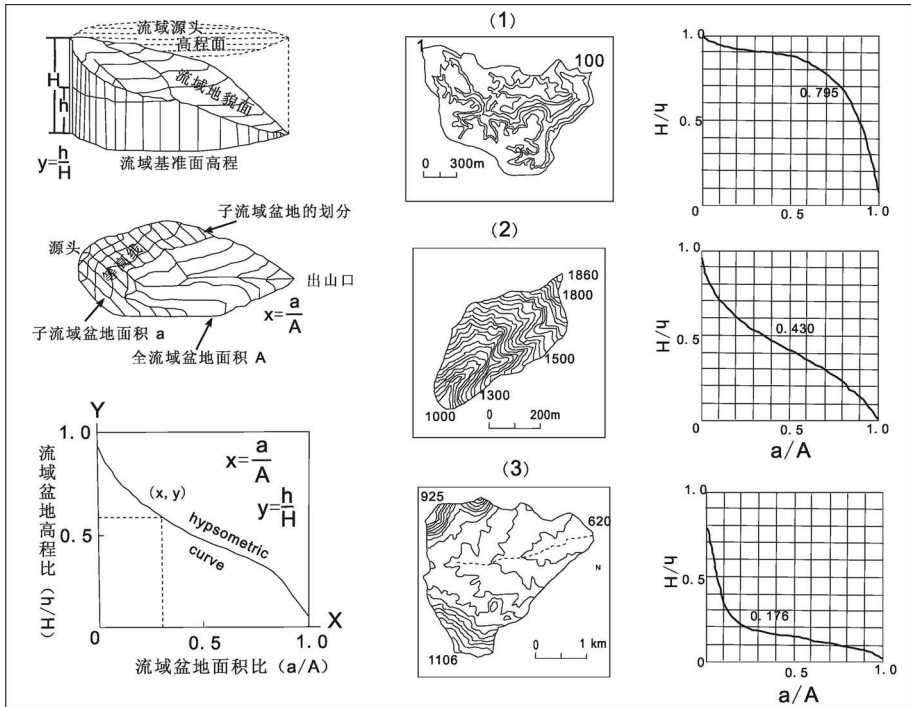
收稿日期: 2008-12-03; 修订日期: 2009-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40571013)

作者简介: 赵洪壮 (1974-), 男, 山东莱州人, 博士生。研究方向为 GIS、地貌及环境演变模型与可视化。

E-mail: zhaohongzhuang@pku.edu.cn

高度积分值较高 ($HI > 0.6$)，此时流域地貌演化是幼年期阶段 (图 1- (1))；介于中间的面积高度积分值 ($0.4 < HI < 0.6$)，面积高度曲线呈 S 形，代表次集水区已发展至壮年期的阶段 (图 1- (2))。张瑞津等^[13] 研究台湾高屏溪谷与潮州断崖地区的地貌后，指出面积高度积分值一般在 0.45 以上为幼年期地形，0.15~0.45 之间为壮年期地形，在 0.15 以下则为老年期地形。因此，有学者以面积高度积分作为考察区域构造活动的指标^[14~19]，并与其他地形计量指标互相对比，解释研究区的构造活动性。



h 为子流域集水盆地内某点的高程与流域最低高程的高差， H 为该流域的最大高差 a 为子流域集水盆地内某一高程的截面积， A 为该流域最低高程的截面积。图中 (1)、(2)、(3) 三图分别表示流域地貌演化处于幼年期、壮年期、老年期阶段的等高线图。面积高度积分为曲线下方的面积总和，(1) 图积分为 0.795 属幼年期地形，(2) 图积分为 0.43 属壮年期地形，而 (3) 图积分值仅 0.175 代表地形面已进入老年期。

图 1 集水盆地面积高度积分的定义、计算方式与代表的地形面 (Strahler, 1952)

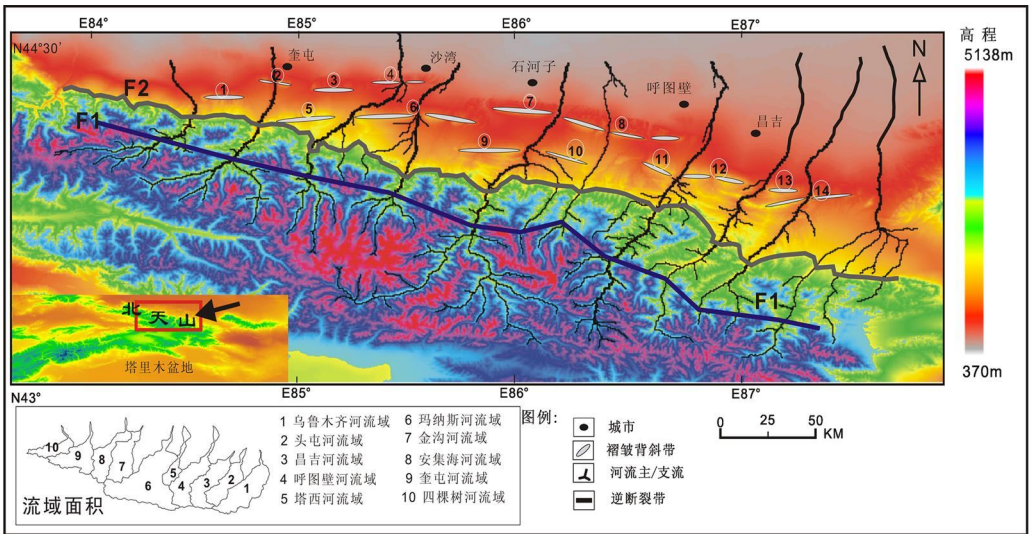
Fig 1 The definition and formula of the Hypsometric Integrate and the different phases of the river evolution

但是，在地貌演化过程中，地貌形态受到构造、岩性、气候等因子的不断影响，流域面积高度积分则是上述影响因子综合作用的体现。前人研究^[20,21] 指出不同面积大小的流域盆地，其面积高度积分会表现出不同地形因子的影响特征，并且河流上、下游不同河段的主要营力作用不相同：上游以侵蚀作用为主，下游则以堆积作用为主，其面积高度积分指标会受到影响。本文研究目的是在构造运动活跃，并且河流侵蚀外力作用表现明显的板内再生造山带—北天山流域地区，在不同的流域面积尺度和不同的空间分布情况下，探讨面积高度积分的特征以及它所揭示的构造指示意义。

2 区域构造背景

晚第三纪以来的新构造运动, 使古生界构成的天山主体山地沿复活性断裂带产生断块剧烈上升运动, 使老第三级呈准平原化的古天山发生断块抬升, 形成天山阶梯状断块山地以及山间断陷盆地相间排列的地貌格局^{22~24]}。在古生界组成的北天山山系主体中, 北天山中段北坡中山带和高山带之间, 存在着一条形成于华力西期而晚近地质时期重新复活的大断裂—南山断裂(图 2 中的 F1), 全长约 600km, 总体走向北西西, 断层面向南倾, 上盘为石炭系, 下盘为侏罗系。山麓带的准噶尔南缘断裂(图 2 中的 F2)是北天山山前褶皱带与乌鲁木齐山前拗陷的构造边界大断裂, 断层向南倾斜, 古生代变质岩系分别与中、新生代不同时段的地层呈断层接触, 构成中山带与低山丘陵带的分界^[25]。此外, 北天山山前发育一个由中新世组成、东西长近 300km、南北宽 50~80km 的推覆构造带, 分布着 3 排 NWW 向羽状或雁列状排列的背斜带, 顺背斜带还发育有不同规模的逆断裂。背斜带狭窄, 两个背斜带之间发育宽缓的向斜。由南往北, 背斜带出露的地层总体上由老变新。各背斜带两翼具有南缓(30°~50°)北陡(60°~90°)的特点^[26, 27]。

天山北麓的河流受区域地形的影响, 发源于天山高山冰川, 自南向北流经不同的地貌带: 即山地地貌带, 山前褶皱低山丘陵带, 串珠状冲积扇带, 平原曲流带, 河尾间沙漠、湖泊带^{28]}。本研究以发源于北天山山脉, 并流经天山北麓山前褶皱背斜带, 直至山前冲积扇的 10 条河流为研究对象(图 2)。



F1—依连哈比尔尕斯断裂带 F2—准噶尔南缘断裂带; 北天山山前三排逆断裂褶皱带: ①—托斯台背斜 ②—独山子背斜 ③—哈拉安德背斜 ④—安集海背斜 ⑤—南安集海背斜 ⑥—霍尔果斯背斜 ⑦—玛纳斯背斜 ⑧—土鲁背斜 ⑨—南玛纳斯背斜 ⑩—清水河构造 ⑪—阿克屯背斜 ⑫—昌吉背斜 ⑬—齐古背斜 ⑭—喀拉扎背斜

图 2 北天山主要河流流域与 DEM 示意图(修改自, 新疆地质矿产局, 1993)

Fig. 2 The location and DEM of the 10 rivers in the north Tianshan Mountains

3 研究方法与数据处理

3.1 研究区 DEM

本文的研究区采用美国的 SRTM (SRTM-Shuttle Radar Topography Mission) 高程数据, 空间分辨率为 90m^[29, 30]。在利用 DEM 分析地形特征时, DEM 栅格的分辨率和高程值精度是影响分析结果的两大主要因素。一般而言, 当 DEM 的栅格较小, 而研究分析的地貌形态尺度相对较大时, 则精确度愈大, 此时 DEM 高程值精度的影响几乎可以忽略^[31, 32]。史明昌^[33]指出在不同地势起伏状况下, DEM 分辨率和 DEM 高程值平均标准差之间存在着定量化的关系, 由此定量关系计算 SRTM-DEM 90m 的分辨率会有 35m 的误差 (平均高程标准差)。朗玲玲^[34]研究发现, 中国低山丘陵地区计算基本地貌形态类型的最佳尺度 DEM 为 1:25 万比例尺 (采样网格大小为 100m), 而 1:10 万比例尺 (采样网格大小为 25m) DEM 适用于没有连绵起伏的更小范围的低山丘陵区。

综合以上对 DEM 的分辨率与精度分析, 虽然北天山研究区平均高程值约有平均 35m 的误差, 但本研究要侧重于分析北天山流域地形的定性特性, 而非提供地形参数的精确计量。因此利用北天山 SRTM-DEM 90m 栅格分辨率的数据, 运用面积高度积分指标分析地形地貌特征, 其误差是可接受的。

3.2 流域盆地的划分

研究中使用 GIS 软件从 DEM 中提取水系流域, 并给定一个集流阈值 (threshold of accumulation), 流域划分出来的次集水盆地, 其面积大小和数量多少与集水盆地面积指定的集流阈值有关 (见表 1): 设定的集流阈值越大, 水系越简单, 次集水盆地的面积越大, 数量越少。

把按不同集流阈值所提取出来的次集水盆地平均面积、平均高差和平均面积高度积分值 (HI) 做统计分析, 可以显示不同集流阈值下划分的次集水盆地的平均面积高度积分值 (Average HI) 的变化情形。研究发现: 次集水盆地的平均面积、平均高差和平均 HI 之间都呈现负相关关系, 相关系数达 0.89 以上 (见图 3)。由此可知, 按不同的集流阈值划分流域次集水盆地时, 次集水盆地平均 HI 会随着次集水盆地平均面积的减小、平均高差的减小而升高。

如果把研究区每条河流完整

表 1 集流阈值与提取次集水盆地个数、平均面积、平均 HI 和平均高差的关系 (以玛纳斯河 I 级河道为例)

Tab 1 The relationships among threshold accumulation, the number of subbasins, average area and average HI

流域阈值 (km ²)	次集水盆地数量 (个)	平均面积 (km ²)	平均 HI	平均高差 (m)
0.1	14247	0.2374	0.5409	148.5890
0.5	3024	1.1231	0.5211	215.7440
1	1459	2.3100	0.5138	261.8530
2	719	4.5699	0.4970	301.1390
3	470	7.2545	0.5017	354.9530
4	364	9.3437	0.5046	372.3740
6	253	13.2478	0.4991	380.9960
9	180	17.8518	0.4939	329.2220
15	95	36.1864	0.4961	406.9260
20	68	48.3020	0.4886	409.7350
30	44	78.6015	0.4978	451.3410
40	34	98.3459	0.4872	439.5880
50	28	130.6380	0.4789	460.4290
60	24	149.6250	0.4796	442.2920
80	16	228.7130	0.4752	552.6250
100	12	275.5190	0.4815	596.9170

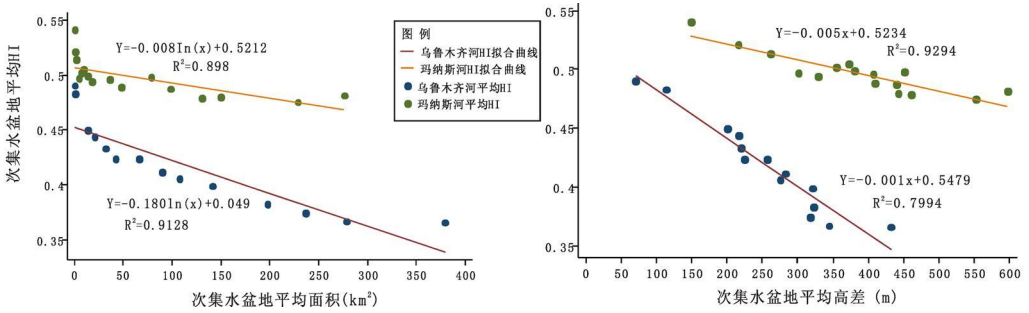
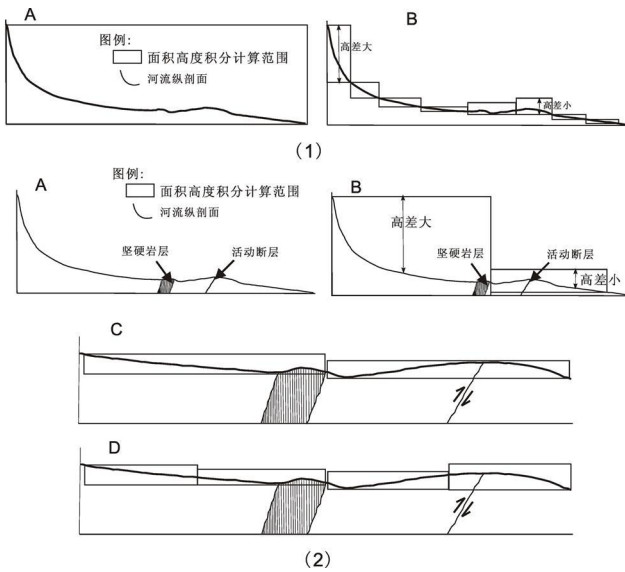


图 3 不同集流阈值所提取出的次集水盆地平均面积、平均高差与平均 HI 的关系 (以乌鲁木齐河、玛纳斯河数据为例)。

Fig 3 The relations between average area and average HI of the subbasins sorted by the different threshold accumulations in Urumqi River and Manas River



(1) 图中 A 以整个流域为计算范围时, 面积高度积分无法呈现流域原始地形面的细微特征。B 将全流域细分为多个次集水盆地, 缩小计算范围, 则能细致地表现流域内各部分的地形特征。(2) 图中 A、流域主流纵剖面示意图, 并夸大表示岩性及构造对纵剖面的影响。B、太大的面积高度积分计算面积, 将无法反映构造活动及岩性对流域地形的影响。C、缩小面积高度积分计算面积, 便可能检测到构造活动对流域地形的影响。D、继续缩小计算尺度, 面积高度积分能够检测到岩性差异及构造活动对流域地形的影响。

图 4 不同观测尺度、面积高度积分的指示意义 (陈彦傑, 2003)

Fig 4 The implication of HI with the different scales

的流域 (从河流源头到汇水口的总集水范围) 当成一个集水盆地, 计算出来的面积高度积分值, 将明显低于把完整流域划分为多个较小次集水盆地的平均值 (图 4 (1) 中 A), 而且分割得越细, 所观察的现象将越接近流域的原始地形 (图 4 (1) 中 B)。由表 1 玛纳斯河不同集流阈值划分结果和图 1 中 HI 的计算公式可知, 初始集流阈值设置的越小, 流域内划分出的次集水盆地数目越多, 单个次集水盆地的 HI 值就越偏高。

Tarboton 等^[35]认为初始集流阈值存在一个概念上的临界值, 小于这一临界值的初始集流阈值所提取的水系无法符合地形学的 Horton's Laws 法则理论, 而以超过这个临界值的初始集流阈值进行提取, 则能产生符合 Horton's Laws 法则理论的水系, 且流域次集水盆地的多少与初始集流阈值的大小设定之间是负相关的关系。Baker^[36]在其研究中对地形地貌单元和相对应的影响尺度范围进行归类, 认为 1~10km 范围属于侵蚀-堆积作用地形单元, 如集水盆地、三角洲、山麓、冲积(扇)平原等地貌单元。郑光佑和 Chen 等^[15, 37]在分析台湾西部麓山带构造地形特征的研究中, 以三迭溪、急水河流域为测试区, 以 0.3km²、0.6km²、1km²、2km²、3km²、5km²等不同初始集流阈值提取 6 组不同面积的次集水盆地, 进行面积高度积分对高差的相关分析和次集水盆地的面积依赖分析, 指出运用面积高度积分分析台湾地区构造活动性时, 其较佳的初始集流阈值约为 3~5km²。

由于北天山地区此项研究还处于空白, 没有可以直接参考的合适的集流阈值。考虑到(1)研究区范围内的天山北麓 10 条河流流域面积达到 5 万多 km², 其中河流平均流域面积为 5600km², 最大的流域面积达到 19800km², 最小的流域面积为 981km², 以流域面积最大的玛纳斯河为例, 当指定的集流阈值为 9km²时(表 1), 次集水盆地数量为 180 个, 次集水盆地平均面积为 17km², 如果指定的集流阈值小于 9km², 划分出的次集水盆地太多, 无法符合地形学的 Horton's Laws 法则理论^[35]。(2)对比研究区流域特征和台湾地区流域特征可知, 台湾地区河流流域面积小, 水急流短, 坡度陡峭, 上游侵蚀剧烈而下游堆积严重, 其划分次集水盆地的集流阈值 3~5km², 相对于北天山流域集流阈值要偏小。

因此, 本文依据上述研究成果以及其他地区学者的研究^[38], 选取玛纳斯河流域作为数据采集区, 分别以 9km²、20km²、40km²、60km²、100km²为集流阈值, 提取 5 组不同级别的次集水盆地。

4 结果与分析

4.1 HI 的面积依赖特征

通过对玛纳斯河 5 组次集水盆地的高差与面积高度积分进行相关性分析, 运用对数回归方程计算流域中每个次集水盆地的面积高度积分残差标准值(z-value), 按照每个次集水盆地面积高度积分的残差标准值的大小, 将次集水盆地分为 5 级(见图 5), 残差标准值低于-1 者为面积高度积分偏低异常区; 高于 1 者为偏高异常区。并在 GIS 软件中, 将残差标准值添加到每个次集水盆地图层的属性数据域中; 同时将不同集流阈值下玛纳斯河的次集水盆地的残差标准值与玛纳斯河地质图中的岩层界线、构造线进行叠加比较, 细致地观察流域中次集水盆地面积高度积分的差异分布情况(图 5)。

由图 5 可发现, (1)集流阈值在 100km²、60km²、40km²及 20km²时, 玛纳斯河上游次集水盆地的面积高度积分残差为正值数量明显高于中下游次集水盆地。当集流阈值设定为 9km²时, 提取的次集水盆地面积缩小, 数量增加, 在整个流域的上、中、下游位置都出现了面积高度积分残差值小于 0 的情况。

(2)而集流阈值大于 20km²时, 则各次集水盆地大都跨越两个以上的年代地层, 此时岩性差异的影响就被掩盖掉, 构造的影响力增加。如图 5-D 准噶尔南缘断裂(F2)和山麓断裂带(F3)之间向斜附近的次集水盆地便呈现较低的面积高度积分残差值, 山麓背斜附近则呈现较高的残差值。但是当集流阈值大至 100km²时, 次集水盆地范围更是跨

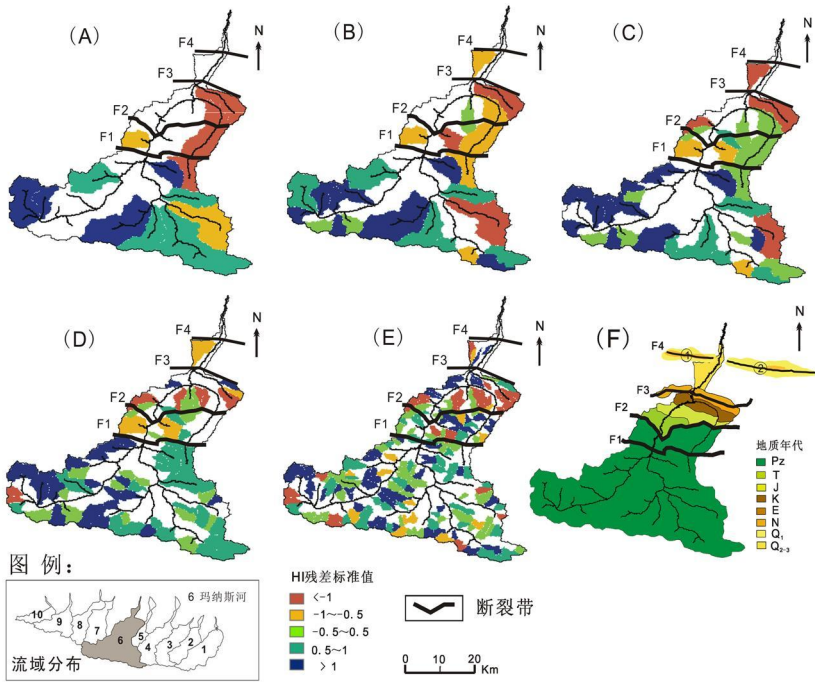
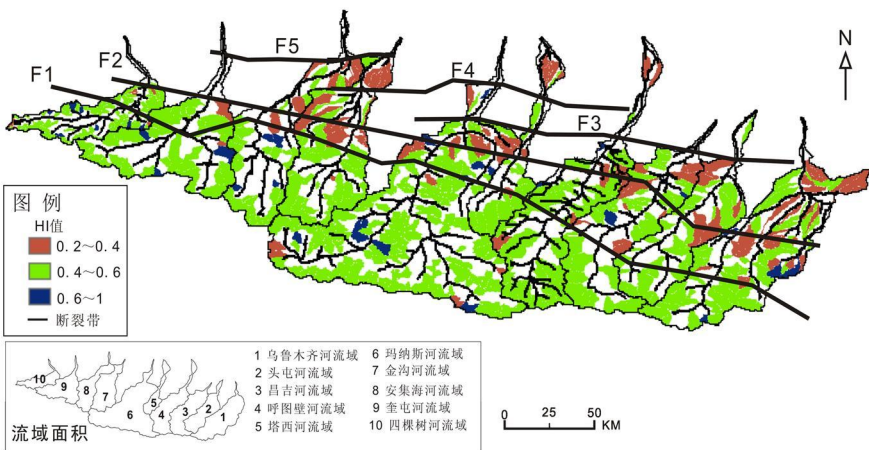


图 5 玛纳斯河流域不同细分程度的次集水盆地 HI 残差异常区与构造对比
 Fig 5 The relationships between the unnormal residual and the geological tectonics of Manas River

细化程度由集流阈值控制, 集流阈值分别为: (A) 100km², (B) 60km², (C) 40km², (D) 20km², (E) 9km², (F) 玛纳斯流域地质构造, 其中 Pz、T、J、K、E、N、Q 代表地质年代。
 F1—依连哈比尔尕断裂带; F2—准噶尔南缘断裂带; F3—山麓逆断裂带(第 1 排褶皱带); F4—玛纳斯—土谷鲁断裂带(第 2 排褶皱带) ①—玛纳斯背斜; ②—土谷鲁背斜

图 5 玛纳斯河流域不同细分程度的次集水盆地 HI 残差异常区与构造对比

Fig 5 The relationships between the unnormal residual and the geological tectonics of Manas River



F1—依连哈比尔尕断裂带; F2—准噶尔南缘断裂带; F3—天山北麓第 1 排逆断裂褶皱带;
 F4—第 2 排逆断裂褶皱带; F5—第 3 排逆断裂褶皱带

图 6 北天山构造带和流域次集水盆地面积高度积分值分布图(次集水盆地阈值为 9km²)

Fig 6 The DEM and structural belts and the subbasins' HI of the ten rivers in the north Tian shan Mountains

越数条构造线, 则单一构造线的影响便无法从面积高度积分上看起来。这时面积高度积分的构造指示意义是表示较大地表范围的整体垂直运动状况, 与尺度更大的大地构造有关。

(3) 在任何集流阈值尺度下, 在 F4 和 F3 之间以及准噶尔南缘断裂带 (F2) 南侧, 是玛纳斯河流域 HI 残差值偏低的区域。如果集流阈值在 9km^2 尺度以下 (图 5-E), 次集水盆地 HI 残差值可能同时受到岩性差异、构造活动或其他因素的影响, 呈现出较复杂的特征信息, 不利于构造运动的判断。

由上述分析可知, 以次集水盆地初始集流阈值 9km^2 为标准, 来划分一级河 (Stream Order 1) 次集水盆地, 适合于研究本文研究区内的构造地形特性, 由此探讨流域盆地的空间分布对次集水盆地面积高度积分的影响, 进而揭示其对构造指示意义的响应。

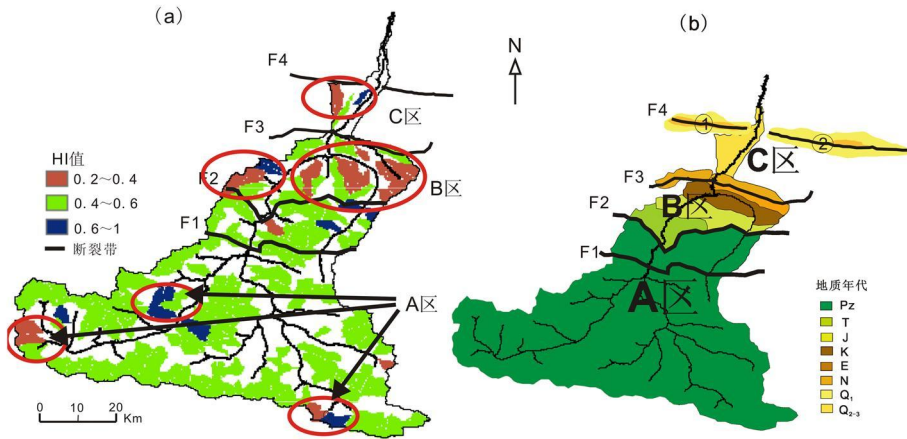
4.2 HI 的空间分布特征

将次集水盆地面积高度积分值, 导入到次集水盆地图层的属性数据域中, 细致地观察流域中次集水盆地面积高度积分的分布情况 (图 6)。发现其分布特征如下: (1) 按照河流流向, 无论是整个河流流域, 还是分支流域, 上游次集水盆地的面积高度积分值一般都大于下游的次集水盆地面积高度积分值。(2) 从图 6 的 HI 值分布中可以看出, 天山山前褶皱低山丘陵带的次集水盆地面积高度积分值多位于 $0.2 \sim 0.4$ 之间, 普遍低于山地带次集水盆地的 HI 值, 并且 HI 数值分布与天山山前构造分布带走向一致, 呈北西西—南东东向条带状分布, 这种规律性分布很明显是受到准噶尔南缘断裂带 (图 6 中 F2) 和山前 3 排逆断裂褶皱带 (图 6 中 F3、F4、F5) 的影响。(3) 在整个天山北麓流域中始终有面积高度积分异常地区, 在河流上游 HI 值偏高地区, 却出现了 HI 低值地区, 如玛纳斯河与呼图壁河上游。同样, 在河流下游 HI 值相对较低地区, 也出现了 HI 值较高的现象 (见图 7)。这种分布情况, 若要以构造活动的特性解释, 不免有些牵强。因此, 我们认为以次集水盆地面积高度积分值的高低, 直接判断构造活动特性的方法, 并不适用于像北天山这种包括了山地、丘陵和冲积扇等多种类型子流域的次集水盆地。

4.3 HI 对构造、基岩岩性的响应

由图 7 可以看出, 北天山的地质构造将玛纳斯河分为 3 个部分: A 区——准噶尔南缘断裂带 (图 7 中 F2) 以南的山地部分, 天山山体主要是由二叠系—石炭系的古生界 (Pz) 地层组成, 河床基岩为古生代岩层; B 区——准噶尔南缘断裂带以北到第 1 排逆断裂背斜带之间的山麓低山次集水盆地, 组成地层为侏罗系、白垩系岩层, 下更新统西域砾岩是卷入第 1 排背斜带最年轻的地层, 河床基岩出露为中生界岩层; C 区——第 1 排逆断裂褶皱带与第 2 排逆断裂褶皱带之间的丘陵冲积扇次集水盆地, 背斜核部出露始新统到渐新统一安集海河组灰绿泥岩, 两翼出露有中新统、上新统、下更新统的砂岩和砾岩^[39], 河床基岩为新生代第三纪和第四纪岩层。

我们可以发现: (1) 玛纳斯河上游 (图 7b 中 A 区域内) 的绝大部分次集水盆地面积高度积分值都在 $0.4 \sim 0.6$ 之间, 处于流域地貌发育的壮年期阶段, 但是其中三个红色圈内的次集水盆地的流域地貌却分别表现出老年期阶段 ($0 < HI < 0.4$) 和少年期阶段 ($0.6 < HI < 1$) 特征。由于 A 区域次集水盆地都处于古生界地层, 因此造成 A 区域内出现 HI 三个异常区的原因应是局部的小构造断裂造成的, 因此通过 HI 异常区可以发现局部的小断裂构造对次集水盆地发育的影响。(2) 在准噶尔南缘断裂带和山麓第 1 排逆断裂褶皱带区域内 (图 7-b 中的 B 区域) 的次集水盆地的面积高度积分值 (HI) 普遍低于 0.4, 表



(a) 玛纳斯河流域次集水盆地 (9km²) 面积高度积分分布, 红色圈内区域为面积高度积分异常区;

(b) 玛纳斯河流域地质构造示意, A 区为古生界地层区; B 区为中生界地层区; C 区为新生界地层区;

F1—依连哈比尔尕断裂带; F2—准噶尔南缘断裂带; F3—天山北麓第 1 排逆断裂褶皱带; F4—第 2 排逆断裂褶皱带;

图 7 玛纳斯河流域面积高度积分与地质构造图

Fig 7 The overlap of the HI and dem of the Manas River

明这些次集水盆地流域地貌发育已经处于河流演化的老年期阶段。B 区域内的次集水盆地均跨越中生代不同的地层, 因此可排除岩性差异的作用。第 1 排逆断裂褶皱带晚更新世以来逆断裂构造活动处于停止状态³⁷, 没有了构造抬升作用的影响, 受河流侵蚀下切作用强烈, 面积高度积分值 ($HI < 0.4$) 表明本区域次集水盆地流域地貌发育大多处于幼年期阶段。(3) 图 7 中 C 区内次集水盆地处于天山北麓第 1 排褶皱带与第 2 排褶皱带之间的向斜部, 但次集水盆地 HI 值却揭示了不同的地貌发育阶段特征。其原因应是次集水盆地的基岩不同, 不同地质年代的基岩抗侵蚀力是不同的, 次集水盆地因岩性的差异而产生不同的面积高度积分值, 基岩地层越老, 抗侵蚀力越强, HI 值偏高表现为幼年期特征; 反之, 则表现为老年期特征。

图 7 中的玛纳斯河流域以准噶尔南缘断裂带 (图 7 中 F2) 为界限, A、B 两区的次集水盆地的面积高度积分值揭示 A、B 两区处于河流地貌演化的不同阶段。由于 A、B 两区都属于同一区域, 同一条河流, 所以我们可以排除时间因素和气候因素的差异作用。A 区在地貌带上属于天山山地带, 仍以 17mm/a 的速度抬升³⁹, 受地势持续抬升的作用, 次集水盆地面积高度积分值表现为壮年期的特征; 而 B 区的准噶尔南缘断裂带在晚近纪以来构造活动处于停止状态, 盆地长期遭受流水侵蚀的作用, 在面积高度积分上体现为老年期特征, 所以 A、B 两区次集水盆地在面积高度积分上的不同特征, 揭示了区域构造活动的差异。

5 结论与讨论

(1) 研究表明在北天山—构造运动活跃地区, 按不同的集流阈值细分流域次集水盆地时, 次集水盆地平均 HI 会随着次集水盆地平均面积的减小, 平均高差的减小而升高, 呈负相关关系。

(2) 以 9km²、20km²、40km²、60km²、100km² 为不同集流阈值, 通过对玛纳斯河

次集水盆地面积高度积分残差标准值的分析, 揭示了面积高度积分对构造运动的指示意义具有面积依赖特性, 较大尺度(如玛纳斯河 20km^2 以上)下, 次集水盆地面积高度积分受构造活动影响较显著, 小尺度(如玛纳斯 9km^2 以下)下次集水盆地面积高度积分则明显受河道基岩岩性的影响。

(3) 天山山前的构造带(准噶尔南缘断裂带与三排褶皱断裂带)在塑造了天山山地地貌和山麓地貌的同时, 也深深地影响了河流面积高度积分的空间分布特性, 即几条构造带(图6中的 F1、F2、F3、F4、F5)将面积高度积分划分为几条与构造带走向一致的 HI 分布带。其中, 上游次集水盆地的面积高度积分值一般大于下游次集水盆地面积高度积分值。在小流域或小范围区域内, 基岩岩性的差异对面积高度积分的表现有着很大的影响, 一般而言: 基岩抗侵蚀力强, HI 的值偏高, 流域多表现为幼年期特征; 反之, 基岩抗侵蚀力弱, HI 的值偏低, 流域多表现为老年期特征。在板内再造山带, 构造活跃地区的河流, 其面积高度积分的分布情况受区域的地质构造影响非常大, 体现了面积高度积分的空间依赖特性。

(4) 在板块活动活跃、抬升作用强烈的地区, 集水盆地的面积高度积分值反映了集水盆地同时受到持续抬升与侵蚀的结果, 故不能单纯以 Davis 的地形侵蚀循环解释, 强烈的抬升作用常使得集水盆地的演化阶段停留在幼年~壮年期, 其面积高度积分值亦较高。

面积高度积分在构造指示意义上的面积依赖和空间分布特性, 决定了我们在使用面积高度积分来论证区域构造活动时要小心对比分析, 本文只是对面积高度积分的这两种特性进行了初步的研究。其中次集水盆地面积高度积分值与盆地面积、盆地高差之间的关系还有待于进一步深入探讨, 以及通过次集水盆地的 HI 异常区, 来发现局部区域构造活动(如断层构造)的存在等问题还需要做进一步的研究。

参考文献:

- [1] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. *Science*, 1975, 189: 419~426
- [2] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia. In: Coward M P and Ries A C, eds. *Collision Tectonics*. Geol. Soc. Spec. Pub. 1986, 19: 115~157
- [3] Tapponnier P, Xu Zhiqin, Roger Françoise, *et al*. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau. *Science* 2001, 294(23): 1671~1677
- [4] Lu Huafu, Howell D G, Jia Dong, *et al*. Kalpin transpression tectonics, northwestern Tarim basin, western China. *International Geol. Review*, 1994, 36: 975~981
- [5] Avouac J P, Tapponnier P, Bai M, *et al*. Active thrusting and folding along the northern Tien Shan and Late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan. *Geophysic Res*, 1993, 98 (B4): 6755~6804
- [6] Hack J T. Stream-profile analysis and stream-gradient index. *U. S. Geol. Surv. Jour. Res*, 1973, 1: 421~429
- [7] Brookfield M E. The evolution of the great river systems of southern Asia during the Cenozoic India-Asia collision: rivers draining southwards. *Geomorphology*, 1998, 22: 285~312
- [8] Azor A, Keller E A, Yeats R S. Geomorphic indicators of active fold growth: South Mountain-Oak Ridge anticline, Ventura basin, southern California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 2002, 6: 745~753
- [9] Strahler A N. Hypsometric (Area-Altitude) analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1952, 63: 1117~1142
- [10] Ohmori H. Changes in the hypsometric curve through mountain building resulting from concurrent tectonics and denudation. *Geomorphology*, 1993, 8: 263~277

- [11] Willgoose G R. A physical explanation for an observed area-slope-elevation relationship for catchments with declining relief. *Water Resources Research*, 1994, 30: 151~159
- [12] Pike R J, Wilson S E. Elevation-relief ratio, hypsometric integral and geomorphic area-altitude analysis. *Geol Soc Am Bull*, 1971, 62: 1079~1084
- [13] 张瑞津, 石再天, 杨淑君, 等. 高屏溪谷与潮州断崖冲积扇的地形学研究. 国立台湾师范大学地理研究报告, 1995, 24: 39~86
- [14] 陈彦杰. 台湾山脉的构造地形指标特性—以面积高度积分、地形碎形参数与河流坡降指标为依据. 国立成功大学地球科学研究所博士论文, 2004.
- [15] 郑光佑. 台湾西部麓山带前缘流域面积高度积分之构造意义研究. 国立高雄师范大学地理学系硕士论文, 2002, 1~102
- [16] 张韵娴. 台湾地区流域面积高度积分之研究. 国立高雄师范大学地理学系硕士论文, 2003
- [17] 林贵昆. 利用数值地形模型自动化分析构造地形指标: 以中央山脉南段西南翼为例. 国立台湾大学地质学研究所硕士论文, 1999
- [18] 陈柔妃. 嘉南地区活动构造之地形计测指标研究. 国立成功大学地球科学研究所硕士论文, 1999
- [19] Delcaillau B, Deffontaines B, Floissac L, *et al*. Morphotectonic evidence from lateral propagation of an active frontal fold; Pakuashan anticline, foothills of Taiwan. *Geomorphology*, 1998, 24: 263~290
- [20] 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. *Geomorphology*, 1992, 5: 77~114
- [21] Hurtrez J E, Sol C, Lucazeau F. Effect of drainage area on hypsometry from an analysis of small-scale drainage basins in the Siwalik Hills (central Nepal). *Earth Surf. Process Landforms*, 1999, 24: 799~808
- [22] Chen Z N, Wu D, Zhang J, *et al*. Geological map of Xingjiang-Uygour Autonomous Region scale 1/2, 000, 000. *Bur. Of Geol. and Mineral Resources of Xinjiang*, Urumqi, 1985
- [23] Carroll A R, Yanhai S A, Graham X, *et al*. Junggar basin, northwestern China: Trapped late Paleozoic ocean. *Tectonophysics*, 1990, 181: 1~14
- [24] Windley B F, Allen C. Paleozoic accretion and Cenozoic reformation of the Chinese Tianshan range central Asia. *Geology*, 1990, 18: 123~131
- [25] 中科院新疆地理研究所. 天山山体演化. 北京, 科学出版社, 1986
- [26] 冯先岳, 邓起东, 石建邦, 等. 天山南北缘活动构造及其演化. 《活动断裂研究》编委会, 活动断裂研究(1), 北京, 地震出版社, 1991
- [27] 张培震, 邓起东, 徐锡为. 天山北麓玛纳斯活动逆断裂—褶皱带的变形特征与构造演化. 《活动断裂研究》编委会, 活动断裂研究(3). 北京, 地震出版社, 1994
- [28] 史兴民, 李有利, 杨景春. 玛纳斯河流域地貌初步研究. *四川师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 3(4): 54~62
- [29] 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
- [30] United States Geological Survey. Shuttle Radar Topography Mission documentation: SRTM Topo. <http://edftp.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/Documentation/SRTM-Topo.txt> 2003
- [31] Sung Q C, Chen Y C. Self-affinity dimensions of topography and its implications in morphotectonics: An example from Taiwan. *Geomorphology*, 2004, 62: 181~198
- [32] Cheng Y C, Lee P J, Lee T Y. Self-similarity dimensions of the Taiwan Island landscape. *Computer & Geosciences*, 1999, 25: 1043~1050
- [33] 史明昌, 沈晶玉. 不同地貌起伏状况下网格尺寸与 DEM 精度关系研究. *水土保持研究*, 2006, 13(03): 35~38
- [34] 郎玲玲, 程维明, 朱启疆, 等. 多尺度 DEM 提取地势起伏度的对比分析——以福建低山丘陵区为例. *地球信息科学*, 2007, 12(6): 1~6
- [35] Tarboton D G, Bras R L, Rodriguez-Iturbe I. On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes*, 1991, 5: 81~100
- [36] Baker, V R. Introduction: Regional Landform Analysis. In: Short, S R, N M, Blair, Jr R (eds.), *Geomorphology*

- from Space, A Global Overview of Regional Landforms. National Aeronautics and Space Administration, 1986, NASA SP-486, Washington, D. C.
- [37] Chen Y C, Sung Q C, Cheng K Y. Along-strike variations of morphotectonic features in the western foothills of Taiwan: Tectonic implications based on stream gradient and hypsometric analysis. *Geomorphology*, 2003, 56: 109 ~ 137.
- [38] 詹仕坚, 孙志鸿. 网格式数值高程模型截取河系集流阈值之探讨. *国立台湾大学地理学报*, 2000, 28: 27 ~ 45.
- [39] 邓起东, 冯先岳, 张培震, 等. 天山活动构造. 北京: 地震出版社, 2000, 1 ~ 399.

Influence of area and space dependence for hypsometric integral and its geological implications

ZHAO Hong-zhuang^{1,2}, LI You-li^{1,2}, YANG Jing-chun¹, LU Hong-hua^{1,2}

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. MOE Laboratory for Earth Surface Processes, Department of Geography, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The hypsometric integral (HI) of a drainage basin is a morphometric parameter for describing basin geomorphology. Lately the HI has become an index to infer activities of active tectonics in some orogenic belts. Some scholars take the hypsometric integral as an index to deduce the regional active tectonism. This paper examines two issues related to the HI: area dependence and space dependence. Our study calculates and analyzes the 10 rivers' hypsometric integrals of the Northern Tianshan Mountains, and the relations of the HI influencing factors. The result shows that there are x-logarithmic negative correlations not only between the average HI and the average area, but also between the average HI and the average drop, sorted by the different threshold accumulations of the drainage subbasins in the Northern Tianshan Mountains. Moreover, there are higher HIs on mountain-type subbasins at upper stream and lower HIs on hill-type subbasins at piedmont. The three east-west trending thrust-fold belts along the southern flank of the Jungar basin divide the study area based on HIs into several regions with the same tendency of the three thrust-fold belts. It opens out the spatial dependence of the HI. The abnormal districts of the HI in the smaller drainage basin, present the remarkable influence of the rocky ingredient and the lithologic difference. In Manas river basin, by overlaying lithologic and tectonic maps on different drainage areas of subbasin groups, we found that the HIs of subbasins showed the effect of lithology and tectonics using a threshold less than 9km^2 . However, the HIs showed almost entirely the effect of tectonic elements using a threshold more than 20km^2 .

Key words: hypsometric integral; area dependence; spatial distribution; tectonic geomorphology; Tianshan Mountains