

# 天山北麓流域面积高度积分特征及其构造意义

赵洪壮<sup>1,2</sup>, 李有利<sup>1,2</sup>, 杨景春<sup>1</sup>, 司苏沛<sup>1,2</sup>

(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:** 提取了天山北麓河流域的常规地貌计量指标(盆地大小、面积和高差)以及面积高度积分, 通过对流域面积高度积分曲线形态特征、面积高度积分值的分析, 结合区域地质构造活动, 探讨了面积高度积分对板内再生造山带新构造活动的指示意义以及天山北麓流域的地貌发育过程。研究表明, 北天山流域的次集水盆地面积高度积分与次集水盆地的面积和高差都没有相关性, 堆积作用和轻微构造抬升作用都会影响冲积扇区次集水盆地, 使其面积高度积分值偏高。河流面积高度积分曲线形态和面积高度积分值在空间分布上的差异, 反映了天山北麓3排逆断裂褶皱带的不同的构造活动特征。面积高度积分曲线的循环形态特征, 揭示了强烈构造运动与河流剥蚀作用影响面积高度曲线形态发育的动态演绎过程。

**关键词:** 面积高度积分; 构造运动; 河流; 天山

**中图分类号:** P931.2

**文献标识码:** A

造山带系统内部水系发育的模式及其对构造隆升、气候变化的响应和反馈作用一直以来是构造地貌和河流地貌研究的热点<sup>[1-3]</sup>。构造地貌学探讨构造运动对地貌所造成的变化, 将地貌分析的方法应用到构造活动的分析上, 并尝试利用定量的构造地形指标来描述地表形态的变动。许多构造地形指标已被用来表达这些地形的变动(Keller and Pinter, 1996; Sung et al., 1998)<sup>[4-5]</sup>。面积高度积分的地形分析, 是以二维的面积高度曲线来描述地表被侵蚀后的三维体积残存率(Thorn, 1988)<sup>[6]</sup>, 它反应地形的演化程度, 而地形的演化又常与地壳变动有关。Lifton and Chase(1992)与 Hurtrez et al. (1999)的研究都发现<sup>[7, 8]</sup>, 集水区的面积高度积分值与地壳抬升速率之间具有显著的相关性。Chen J. F. (1999)与 Chen Y. C. (2003)在台湾西部麓山带的研究指出, 次集水盆地的面积高度积分反应了近期活动的褶皱构造。<sup>[9, 10]</sup>天山在地质历史上经历过多期、不同方式的构造活动, 具有十分复杂的演化历史<sup>[11]</sup>。新生代期间, 由于印度与欧亚板块间的碰撞挤压作用,

天山构造得以复活, 山体再次隆升, 河流地貌发育充分。有学者注意到了北天山流域水系特征对构造运动的响应, 遗憾的是他们的研究重心仍然是通过流域地貌形态特征的描述, 辅之以年代学数据来定性解释和演绎构造运动<sup>[12-15]</sup>。本文尝试以流域面积高度积分作为地形测量指标, 通过对 SRTm<sup>3</sup>-DEM 数据<sup>[16, 17]</sup>处理分析, 提取天山北麓河流域常规地貌计量参数指标(盆地大小、面积和高差)以及面积高度积分, 通过对流域面积高度积分曲线形态特征、面积高度积分值的分析, 结合区域地质构造活动, 探讨面积高度积分对板内再生造山带新构造活动的指示意义以及天山北麓流域的地貌发育过程。

## 1 研究区的构造背景

晚新生代以来, 受印度洋板块向欧亚板块深俯冲的影响, 天山这一最早形成于晚古生代的造山带重新复活, 导致天山地区的地壳遭受到强烈的挤压缩短, 并强烈抬升, 形成规模宏大的年轻的板内再生

收稿日期(Received date): 2008-10-11; 改回日期(Accepted): 2009-01-30.

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(40571013) [Supported by National Natural Science Foundation of China No. 40571013]

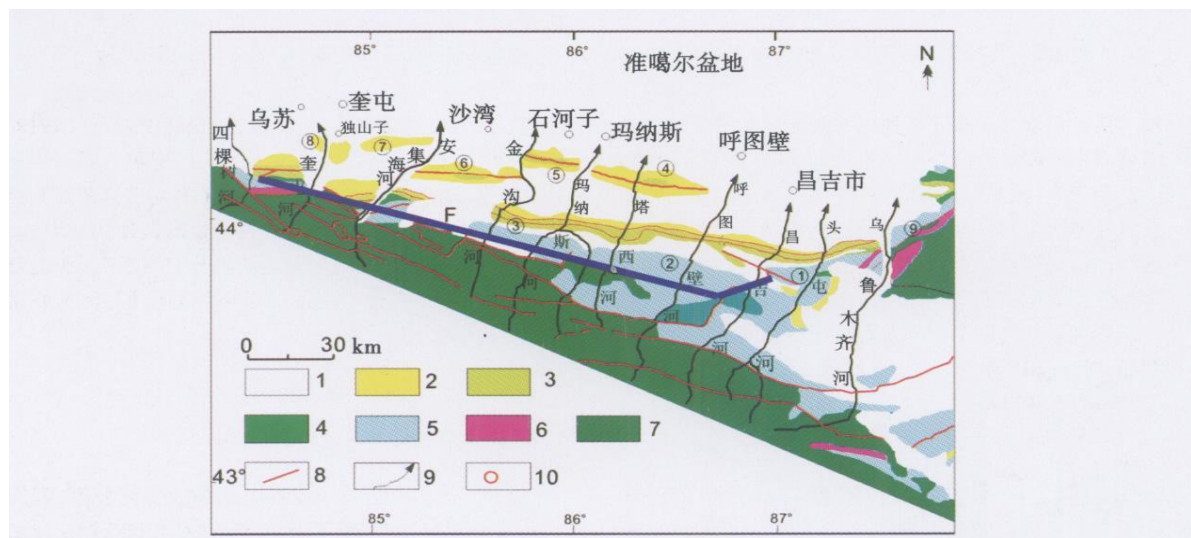
作者简介(Biography): 赵洪壮(1974-), 男, 汉, 山东莱州人, 在读博士生, 研究方向为GIS与地貌及环境演变模型与可视化。[Zhao Hong-zhuang Male Doctoral Student Mainly engaged in the model and 3D visual of the geological and environment evolution] Tel 13683199840

E-mail: zhaohongzhuang@pku.edu.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

造山带<sup>[18]</sup>。由于天山的隆升,在天山北麓形成了3条近东西向的逆断裂褶皱带。自南而北是齐古单斜褶皱带、霍尔果斯-玛纳斯背斜带、独山子-安集海背斜带。齐古单斜褶皱带在地表由侏罗纪、白垩纪、古近纪和新近纪地层构成,深部为多条向北逆冲的古生代及三叠纪地层冲断岩席及其上的被动顶板反向逆断层构成的断层楔。霍尔果斯-玛纳斯背斜带

和独山子-安集海背斜带是由古近纪、新近纪和第四纪地层构成向东倾伏并消失的背斜,这3排构造格局控制着天山北麓河流地貌的发育和演化<sup>[19-23]</sup>。天山北麓的河流受区域构造格局(图1)的影响,发源于北天山冰川,自南向北流经不同的地貌带: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<sup>[24]</sup>。



1. 更新-全新统; 2. 独山子组(N<sub>2</sub>); 3. 古近系-中新统(E<sub>2</sub>-N<sub>1</sub>); 4. 白垩系(K); 5. 侏罗系(J); 6. 三叠系(T); 7. 前三叠系; 8. 断层; 9. 河流; 10. 城镇; ①. 喀拉扎背斜; ②. 齐古背斜; ③. 清水河构造; ④. 吐谷鲁背斜; ⑤. 玛纳斯背斜; ⑥. 霍尔果斯背斜; ⑦. 安集海背斜; ⑧. 独山子背斜; ⑨. 妖魔山构造; F. 准噶尔南缘断裂

图1 北天山构造简图(据新疆维吾尔自治区地质矿产局(1993)修改)

Fig. 1 A simplified structural map of northern Tianshan

## 2 面积高度积分所表示的地形演化期

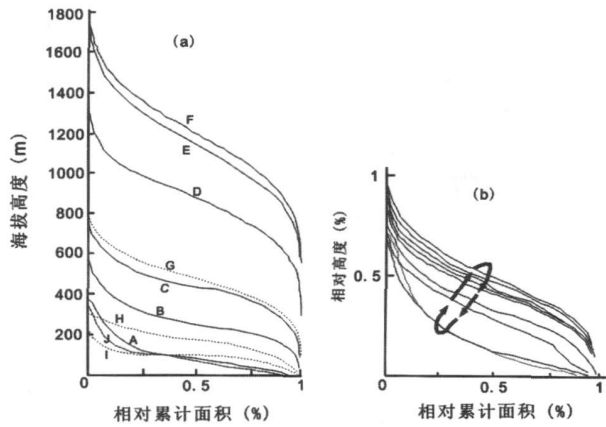
以Davis的地形侵蚀循环为依据,从面积高度曲线的形态可以了解集水盆地流域的地形演化期(Strahler 1952, Ohmori 1993, Wilgoose 1994)<sup>[25-27]</sup>。地表经迅速的造山抬升后,构造活动便停止作用,地表因河流侵蚀作用,集水区的面积高度积分值随着演化时间的增长而逐渐变低,演化阶段为幼年期的集水区,其风化侵蚀程度较低,面积高度曲线呈现凸形,面积高度积分值较高( $HI > 0.6$ );演化至老年期阶段的集水区,因其风化侵蚀程度较高,面积高度曲线会呈现凹形,面积高度积分值较低( $HI < 0.4$ );若面积高度曲线呈现S形,则表示集水区演化至壮年期阶段( $0.4 < HI < 0.6$ )。然而在板块构造活动活跃,抬升作用强烈的地区(例如:天山地区),集水区的面积高度积分值则反应了集水区同时受到持续抬

升与侵蚀的结果,故不能单纯以Davis的地形侵蚀循环解释。Ohmori(1993)用电脑仿真集水盆地在造山地区一边抬升、一边侵蚀的演化条件下,面积高度积分曲线的变化是从凹形逐渐往S形发展然后再回到凹形的一个循环过程,而值得注意的是,面积高度曲线从未发展到凸形。面积高度积分先是受到构造抬升作用逐渐增加,但尔后又因剥蚀作用而降低,当构造再度活动,面积高度积分又开始增加,显示为一循环的过程(图2)。

## 3 北天山面积高度积分值的特征

### 3.1 面积高度积分与集水盆地面积、盆地高差之间的关系

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<sup>[28]</sup>。本文中的次集水盆地是采用D8算法,初始集流面积阈值设为3



低缓准平原 (A) 汇水集水区之面积高度积分值偏低, 之后构造活动开始, 地表逐渐抬升, 虽然河流侵蚀能力增强, 但是汇水集水区的面积高度积分值逐渐增加 (B - C - D - E), 当剥蚀率等于抬升速率时, 山脉维持在相同的高度, 汇水集水区的面积高度积分达到最高 (F - 稳定期)。当构造活动停止, 山脉的高度因剥蚀作用开始降低, 逐渐侵蚀成低缓的丘陵, 面积高度曲线开始减缓, 变成接近凹形的曲线 (I), 当构造活动再度开始时, 丘陵再度受到抬升作用, 曲线又再度上升 (J), 而这条曲线和最初仿真的地形 (A) 几乎相同。

图 2 原始地表同时受到抬升和剥蚀作用, 集水区的地形高度特征与面积高度曲线的变化情形 (修改自 Ohmori 1993)

Fig 2 The dynamic state of the elevation and hypsometric curve of the subbasin terrain suffered from uplift and corrosion

$\text{km}^2$ 时所划分出的 I 级河道 (Strahler Order I) 次集水盆地, 天山北麓 10 条河流一共划分出次集水盆地 2 096 个, 其平均面积为  $6.85 \text{ km}^2$ 。次集水盆地最大面积  $35.42 \text{ km}^2$ , 最小面积  $3 \text{ km}^2$ , 其中 1 756 个 (占总数 83.8%) 次集水盆地面积  $< 10 \text{ km}^2$  (图 3)。我们将次集水盆地面积与面积高度积分作相关分析, 发现: 无论是以天山流域全区作为整体来分析 (相关系数  $R^2 = 0.0029$ ), 还是以研究区内每一条河流作为分析对象 (例如, 玛纳斯河  $R^2 = 0.0092$ , 塔西河  $R^2 = 0.0089$ ), 都发现次集水盆地的面积大小和盆地的面积高度积分之间没有相关性。

天山北麓河流发育于数千米的高山, 流经天山山地、山麓褶皱低山丘陵带, 最后经冲积扇直至流入内陆沙漠。为探讨不同地貌带次集水盆地的地形指标特征, 本文将北天山流域的次集水盆地简单分类为以下 3 类: 1 冲击扇型次集水盆地 (盆地地势高差  $< 100 \text{ m}$ ); 2 褶皱低山型次集水盆地 (地势高差在  $100 \sim 500 \text{ m}$ ); 3 山地型次集水盆地 (地势高差  $> 500 \text{ m}$ )。在总计 2 096 个次集水盆地中, 冲击扇型

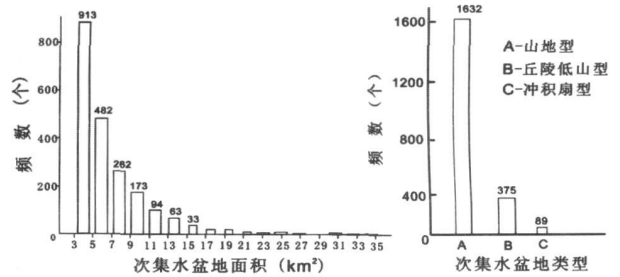
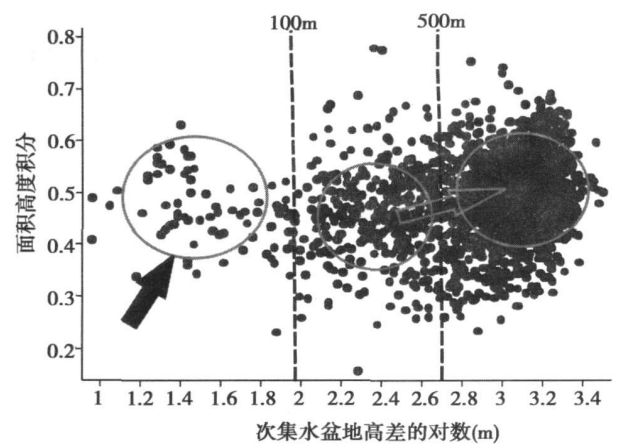


图 3 天山北麓 10 条河流以激流阈值为  $3 \text{ km}^2$ , 提取 I 级河道后的次集水盆地面积与盆地类型的分布频数图

Fig. 3 The frequent of the sub-basin's area and type of the ten rivers in the north Tianshan

次集水盆地占 89 个 (约占 4%), 褶皱低山型次集水盆地占 375 个 (约占 18%), 山地型次集水盆地占 1 632 个 (约占 78%) (见图 3)。同样将次集水盆地高差与面积高度积分作相关分析, 发现: 无论是以天山流域全区作为整体来分析 (相关系数  $R^2 = 0.0648$ ), 还是以研究区内每一条河流作为分析对象 (如, 玛纳斯河  $R^2 = 0.0319$ , 塔西河  $R^2 = 0.2726$ ), 都发现两者之间并无相关性存在。

山地带因构造活动的历史较长, 其面积高度积分值较高, 其次应该是低山丘陵区, 而平坦的冲击扇与平原带的面积高度积分值应最低 (Ohmori 1993)。图 4 为 3 种类型次集水盆地的高差对数值 ( $\lg(\text{drop})$ ) 与  $HI$  的分布图, 天山山地带与褶皱低



空心箭头的方向表示地形在一边抬升、一边侵蚀的模式下, 发育愈久其高差与  $HI$  值皆会增加。实心箭头表示冲击扇区的面积高度积分值因冲击扇位于下游受到空间依赖的影响而增高。

图 4 次集水盆地  $HI$  与高差对数关系图

Fig 4 The relation of the subbasin  $HI$  and drop

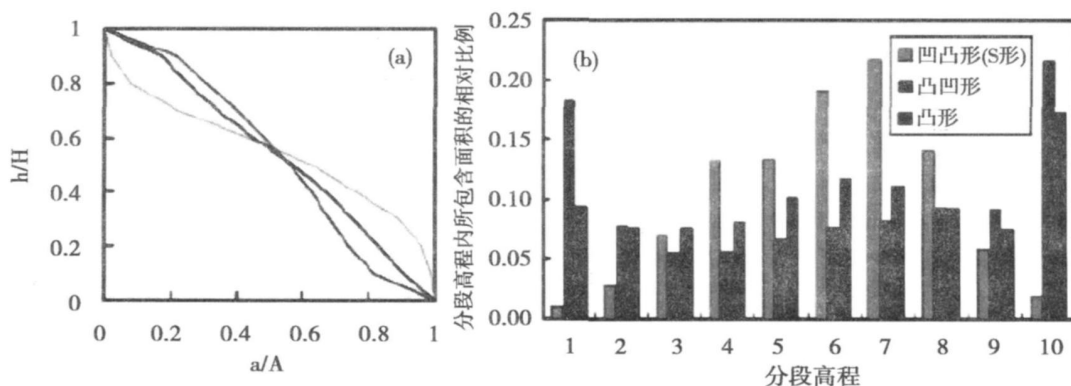
山带的次集水盆地基本上符合 Ohmori (1993) 的模式, 然而起伏度较小的冲击扇带集水盆地面积高度积分值却偏高于褶皱低山带。综合前人对地形演绎模式与空间依赖的认识<sup>[1]</sup>, 我们认为原因如下: 1. 从大尺度地貌带角度来看, 由于天山北麓冲积扇区是河流堆积作用强烈地带, 此“冲积扇”与 Ohmori (1993) 或 Strahler (1952) 模型中所论述的具有残丘 (monadnock) 的“准平原”不同。由于上游侵蚀物受到堆积作用的影响, 会造成位于冲积扇的次集水盆地的残余土地体积比例增加, 从而形成较高的面积高度积分值。2. 就小尺度地貌带而言, 集水区的面积高度积分值和盆地起伏度 (高差) 具有正相关性 (Ohmori 1993), 因而冲击扇区的次集水盆地高差较小, 因此只要受到轻微的构造抬升作用, 就会增加次集水盆地的起伏度, 就有可能造成整个次集水盆地面积高度积分值的迅速增高。

### 3.2 面积高度曲线与高程频率分布图

由于面积高度积分值是面积高度曲线下方的面积, 不同形态的面积高度曲线其面积高度积分值却有可能相同。图 5 中 3 个次集水盆地都具有相同的面积高度积分值 0.54, 但其面积高度曲线却呈现不同的形态, 一为凸形, 一为上凹下凸的凹凸形 (S 形), 另一则为上凸下凹的凸凹形 (图 5a), 由于形态

的不同其相对高度间所包含的面积也不同, 凸形曲线的面积大致上平均分布在每个高程中, 而 S 形曲线的面积主要分布在中间高程的部分, 而凸凹形的面积主要出现在最低与最高高程之两侧, 中间高程的面积反而比较少 (图 5b)。因此, 在分析面积高度积分值的分布时, 若能进一步配合面积高度曲线形态的分析, 就能够更深入地了解地形的演绎过程。

由图 6 可以看到: (1) 天山北麓 9 条河流的面积高度曲线都呈现上凹下凸形 (S 形状), 可以认为河流地貌发育处于壮年期阶段。(2) 由东向西与河流分布位置相一致的是, 9 条河流的  $HI$  的值从 0.39 增长到 0.59, 即由东部的乌鲁木齐河向西直到四棵树河,  $HI$  的值趋向于越来越大。(3) 按照  $HI$  数值大小可将河流分为 3 组:  $HI < 0.4$ ,  $0.4 < HI < 0.5$  和  $HI > 0.5$ 。东部的乌鲁木齐河、头屯河、昌吉河的平均  $HI$  值  $< 0.4$  并且流域盆地内海拔集中分布在低高程区间内。中部的呼图壁河、玛纳斯河、金沟河、安集海河的平均  $HI$  值介于  $0.4 \sim 0.5$  间, 并且流域盆地内的高程值在低高程与较高高程区间都有分布, 但是高程分布已经体现出向流域盆地内较高高程区间转移的趋势。西部的奎屯河、四棵树河的平均  $HI$  值  $> 0.5$  并且流域盆地内高程基本上都集中在较高海拔区间内。



面积高度积分值相近 ( $HI = 0.54$ ) 但却有不同形态的面积高度曲线 (a) 与其分段高程内的相对面积柱状图 (b)

图 5 面积高度曲线图与分段高程面积比例图

Fig 5 The hypsometric curve and the proportion of area sorted by altitude class

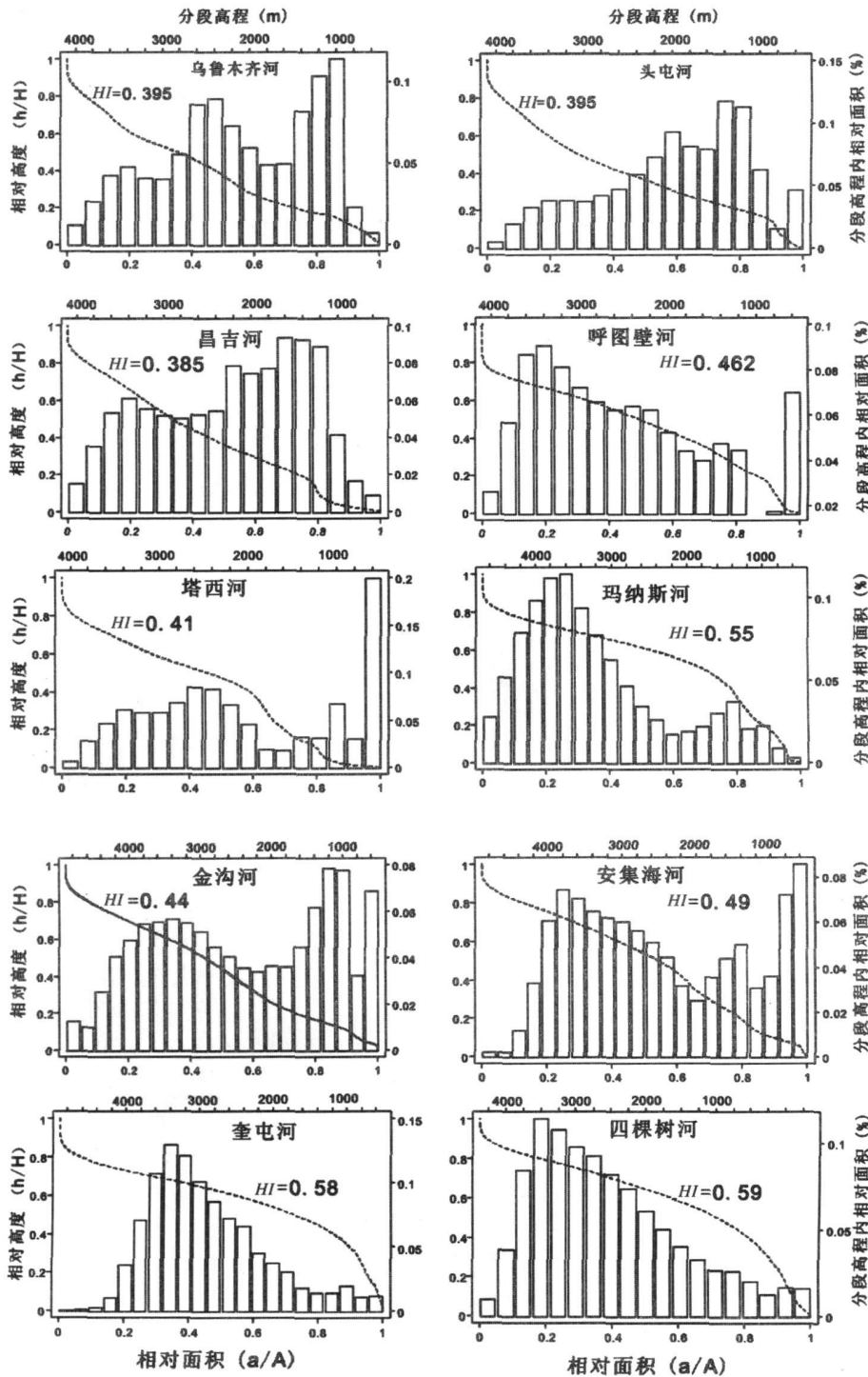
### 3.3 面积高度曲线与高程频率分布的构造指示意义

河流上游侵蚀强烈,  $HI$  曲线下凹, 山麓地带受山前褶皱构造带抬升作用的影响,  $HI$  曲线发生程度不同的上凸度, 河流面积高度曲线的凹凸程度自东向西逐渐增大, 以流经第 3 排褶皱带的奎屯河与四

棵树河上凸最明显,  $HI$  值自西向东部递减。第 3 排褶皱构造活动开始时间晚 ( $0.7 \text{ Ma}$ )<sup>[18-19-23]</sup>, 褶皱抬升后受河流侵蚀下切作用影响小, 因而奎屯河与四棵树河  $HI$  值最大, 面积高度曲线上凸程度最大; 而在东部影响乌鲁木齐河发育的第 1 排褶皱构造带,

其构造活动开始时间早 (10~ 8 Ma)<sup>[18, 19-23]</sup>, 流域受河流侵蚀下切作用影响时间长, 面积高度曲线呈现下凹状,  $HI$  值最低。由于天山北麓 3 排逆断裂褶皱带的构造活动开始时间不同<sup>[30]</sup>, 因而不能用抬升速

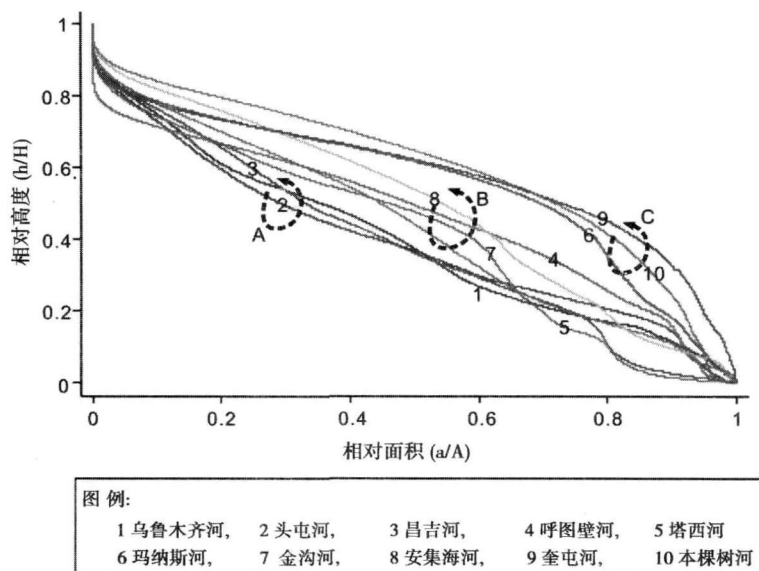
率、地壳缩短量作为影响因素直接进行对比。因此, 我们认为引起天山北麓东西部河流  $HI$  值大小不同的原因中, 同性质的构造运动对流域发育影响的时间长短才是最重要的因素。



分类高程是将盆地的高程以海拔 800 m 为起始高程, 由低到高按照 200 m 的区间分组, 组别级数越小代表海拔越高。

图 6 天山北麓 9 条河流子流域盆地的面积高度积分曲线和高程频率分布图

Fig 6 The hypsometric curves and the proportion of area sorted by altitude class of the ten rivers' sub-basins



A - 第一排褶皱带面积高度积分循环(乌鲁木齐河、头屯河、昌吉河) B - 第2排褶皱带面积高度积分循环(呼图壁河、塔西河、玛纳斯河、金沟河、安集海河) C - 第3排褶皱带面积高度积分循环(奎屯河、四棵树河)

图 7 天山北麓 10 条河流的面积高度曲线与循环过程

Fig 7 The cycle process of the hypsometric curves of the 10 rivers in the north Tianshan

在流经第 2 排褶皱背斜的河流中, 以玛纳斯河  $HI$  值最大,  $HI$  曲线上凸最明显, 这应是由于在土谷鲁褶皱背斜 - 玛纳斯背斜 - 霍尔果斯背斜中, 玛纳斯背斜的抬升量与地壳缩短量<sup>[18 29]</sup>最大, 强烈的抬升作用常使得集水区的演化阶段停留在幼年 ~ 壮年期, 其面积高度积分值亦较高。

就整体而言, 河流受构造抬升与剥蚀作用的相互影响使其面积高度积分曲线的发展形成一个循环过程, 面积高度积分先是受到构造抬升作用逐渐增加, 但尔后又因剥蚀作用而逐渐降低, 当构造再度活动, 面积高度积分又开始增加, 若构造活动再度停止后, 面积高度积分又会逐渐降低, 显示为一循环的过程<sup>[26]</sup>。分析图 7 中 A、B、C 3 个面积高度曲线循环过程, 可发现: 第 1 排褶皱断裂带构造抬升启动时间早 (10~8 Ma), 现已停止活动,  $HI$  值下降, 面积高度曲线呈现下凹形态 (A 段循环); 依据前人年代数据<sup>[19-23 31]</sup> 第 2 排褶皱构造启动时间在 2.58 Ma 流经该区域河流德  $HI$  值大于流经第 1 排褶皱带 (A 段循环) 的河流, 其中以玛纳斯河的  $HI$  值最大, 面积高度曲线上凸, 形成 S 形状 (B 段循环)。第 3 排褶皱带启动时间最晚 (0.78 Ma), 受构造抬升作用影响最大,  $HI$  值最大, 面积高度曲线上凸最明显 (C 段循环)。A - B - C 循环表明了天山北麓 3 排褶皱的构造运动对流域面积高度积分的作用过程。未来随

着天山北麓地壳深层大断裂带破碎断裂向北发展的影响, 构造抬升中心将向北移 (例如, 西湖隆起和呼图壁隆起), 现有的山前 3 排褶皱的构造活动将依次减弱直至停止 (第 1 排褶皱现已停止活动), 地体抬升速率、地壳缩短量都将减小, 而持续不多的侵蚀下切作用势必会使流域地势降低, 面积高度积分降低, 面积高度曲线逐渐往凹形发展。

## 4 结论与讨论

本文选择晚新生代以来构造运动活跃的天山北麓地区, 以发源于北天山并流经天山北麓山前 3 排褶皱构造带的 10 条河流的流域面积高度积分地貌计量指标为切入点, 初步探讨分析了构造活动活跃地区的流域面积高度积分的特征及其影响因素。最终得到如下认识:

北天山流域的次集水盆地面积高度积分与次集水盆地的面积和高差都没有相关性。山地区、低山丘陵区、冲击扇区 3 种类型的次集水盆地中, 冲击扇区的次集水盆地内因上游侵蚀物受到堆积作用的影响, 会造成位于冲积扇的次集水盆地的残余土地体比例增加, 加之轻微的构造抬升作用就会增加盆地高差, 二者皆会引起子流域盆地面积高度积分值的增加。



天山北麓 3 排逆断裂褶皱带的构造活动对河流域的影响有所不同: 第 1 排褶皱带构造活动开始时间早, 现今已停止活动, 地形抬升作用已停止, 受河流侵蚀作用影响大, 如乌鲁木齐河、头屯河的面积高度积分曲线趋向下凹状态,  $HI$  值较低。第 2 排褶皱带目前仍在抬升, 同时受构造抬升与河流侵蚀作用, 如塔西河、玛纳斯河、金沟河的面积高度积分曲线呈现上凹下凸近 S 形状, 除玛纳斯河外, 其他几条河流的面积高度 S 形曲线趋向于平衡状态的直线形。由于玛纳斯背斜的抬升量与地壳缩短量大, 强烈的抬升作用使得玛纳斯河流域的演化阶段停留在幼年 ~ 壮年期, 其面积高度积分值亦较高。第 3 排褶皱构造带活动启动时间最晚, 构造抬升作用影响大于河流侵蚀作用, 如奎屯河、四棵树河的面积高度曲线上凸度最大,  $HI$  值最高。除构造抬升速率与抬升幅度外, 时间因素也是构造活动对流域发育影响重要的因素。

综合来说, 北天山河流域的面积高度曲线的特征是强烈构造运动与河流剥蚀作用共同相互影响的结果, 面积高度积分曲线的循环过程表明二者影响面积高度曲线形态发育的动态过程。揭示了在空间分布上, 自东向西北天山流域面积高度曲线上凸度逐渐变大,  $HI$  值也逐渐变大的特征表明了空间分布上的构造运动的差异性。未来, 随着构造活动抬升中心将向北推移, 天山北麓流域的面积高度曲线的下凹程度降加剧,  $HI$  值会更小。

## 参考文献 (References)

- [1] Molnar P, England P. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: Chicken or egg? [J]. *Nature*, 1990, 346: 29~34
- [2] Zhang P, Molnar P, Downs W R. Increased sedimentation rates and grain sizes 2~4 Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates [J]. *Nature*, 2001, 410: 892~897
- [3] Burbank D W, Anderson R S. Tectonic Geomorphology [M]. Massachusetts Blackwell Science, 2002: 1~274
- [4] Keller E A, Pinter N. Active Tectonics: Earthquake, Uplift and Landscape, Upper Saddle River [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1996
- [5] Sung Q C, Chen Y C, Chao P C. Spatial variation of fractal parameters and its geological implications [J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 1998, 9(4): 655~672
- [6] Thom C E. An Introduction to Theoretical Geomorphology [M]. Boston, Univ in Hyman, 1988
- [7] 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 [J]. *California. Geomorphology*, 1992, 5: 77~114
- [8] Hurler 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) [J]. *Earth Surface Process Landforms*, 1999, 24: 799~808
- [9] Chen J F. Geomorphic indices of active structures in the Chiayi-Tainan area: Master thesis [A]. In: Tainan [C]. Institute of Earth Sciences, National Cheng Kung University, 1999
- [10] 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 [J]. *Geomorphology*, 2003a, 56: 109~137
- [11] Xinjiang Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences. Evolutions of the Tianshan Mountains [M]. Beijing: Science Press, 1986: 16~80 [中国科学院新疆地理研究所. 天山山体演化 [M]. 北京: 科学出版社, 1986: 16~80]
- [12] Zhou Shanji, Jiao Keqin, Zhao Jingdong, et al. Study for the Uluqi river landform and the uplift of Tian Shan in quaternary period [J]. *Science in China (Series D)*, 2002, 32(02): 157~162 [周尚哲, 焦克勤, 赵井东, 等. 乌鲁木齐河谷地貌与天山第四纪抬升研究 [J]. 中国科学 D 辑, 2002, 32(02): 157~162]
- [13] Shi Xingmin, Yang Jingchun, Li Youli, et al. Deformation of Manas River Terraces and Neotectonics in Northern Front of the Tianshan Mountains [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2004, 40(6): 971~978 [史兴民, 杨景春, 等. 天山北麓玛纳斯河河流阶地变形与新构造运动 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2006, 40(06): 971~978]
- [14] Shi Xingmin, Yang Jingchun, Li Youli, et al. Response of the foreland of the Manas river to the tectonic movement in Xinjiang Uygur autonomous region [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(02): 281~288 [史兴民, 李有利. 新疆玛纳斯河山前地貌对构造活动的响应 [J]. 地质学报, 2008, 82(02): 281~288]
- [15] Cui WeiGuo, Mu GuiJin, Wen Qin, et al. Evolution of Alluvial Fans and Reaction to the Regional tectonic Activity at Ridge-Front of Manas River Valley [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(01): 161~163 [崔卫国, 穆桂金. 玛纳斯河山麓冲积扇演化及其对区域构造活动的响应 [J]. 水土保持研究, 2007, 14(01): 161~163]
- [16] Rabus B, Eineder M, Roth A, et al. The shuttle radar topography mission-A new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2003, 57: 241~262
- [17] United States Geological Survey. Shuttle Radar Topography Mission documentation: SRTM Topo [EB/OL]. <http://edcftp.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/Documentation/SRTM-Topo.txt>, 2003
- [18] Deng Qilong, Feng Xianye, Zhang Peizhen, et al. Active Tectonics of the Tianshan Mountains [M]. Beijing: Seismology Press, 2000: 1~399 [邓起东, 冯先岳, 张培震. 天山活动构造 [M]. 北京: 地震出版社, 2000: 1~399]
- [19] Sun J M, Zhu R X, An Z S, et al. Tectonic uplift in the northern Tibetan Plateau since 13.7 Ma ago inferred from molasses deposits along the Altyn Tagh Fault [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 235: 641~653.
- [20] Chameau J, Chen Y, Giller S, et al. Magnetostratigraphy and rock

- magnetism of the Neogene Kuitun He section ( northwest China): implications for Late Cenozoic uplift of the Tianshan Mountains[ J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 230: 177~192.
- [ 21] Chen J, Burbank D W, Scharer K M, *et al*. Magnetostratigraphy of the Upper Cenozoic strata in the Southwestern Chinese Tianshan rates of Pleistocene folding and thrusting[ J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 195: 113~130
- [ 22] Huang B C, Piper J D A, Peng S T, *et al*. Magnetostratigraphic study of the Kuche Depression, Tarim Basin, and Cenozoic uplift of the Tianshan Range, Western China[ J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 251: 346~364
- [ 23] Sun Z M, Yang Z Y, Pei J L, *et al*. Magnetostratigraphy of Paleogene sediments from northern Qaidam Basin, China: Implication for tectonic uplift and block rotation in northern Tibetan plateau[ J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237: 635~646
- [ 24] Shi Xingming, Yang Jingchun, Li Youli. Study on the Landform of Manas River Valley[ J]. *Journal of Sichuan Normal University (Natural Science)*, 2007, 30( 03): 406~409[ 史兴民, 李有利. 玛纳斯河流域地貌初步研究[ J]. *四川师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 30( 03): 406~409]
- [ 25] Strahler A N. Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography[ J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1952, 63: 1117~1142
- [ 26] Ohmori H. Changes in the hypsometric curve through mountain building resulting from concurrent tectonics and denudation[ J]. *Geomorphology*, 1993, 8: 263~277
- [ 27] Willgoose G R. A physical explanation for an observed area-slope-elevation relationship for catchments with declining relief[ J]. *Water Resources Research*, 1994, 30: 151~159
- [ 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*, 1994, 5: 77~114
- [ 29] Guo Zhaojie, Deng Songtao, Wei Guoqi *et al*. Comparative study of the foreland thrust belts of South and North Tianshan and implications for hydrocarbon accumulation[ J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14( 4): 123~131[ 郭召杰, 邓松涛, 魏国齐, 等. 天山南北缘前陆冲断构造对比研究及其油气藏形成的构造控制因素分析[ J]. *地学前缘*, 2007, 14( 4): 123~131]
- [ 30] Sun J M, Zhu R X, Bowler J. Timing of the Tianshan Mountains uplift constrained by magnetostratigraphic analysis of molasses deposits[ J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 219: 239~253

## Geomorphology Characteristic and Tectonic Response of the Northern Tianshan Represented by Hypsometric Integral

ZHAO Hongzhuang<sup>1, 2</sup>, LI Youli<sup>1, 2</sup>, YANG Jingchun<sup>1</sup>, Si Supel<sup>1, 2</sup>

(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 river-system developing pattern in the orogenic belt interior and its response and feedback to the tectonic uplift and climate change has been playing the role of tectonic geomorphology and river geomorphology research hotspots. The structure terrain indicator-hypsometric integral reflects the evolution and evolved degree of the topography, but the terrain evolution often concerns with the tectonic movement. This paper withdraws the conventional measuring indicators of the landform from the northern Tianshan Valley, such as the basin area, elevation and hypsometric integral. Based on the analysis of the regional hypsometric-curve morphological characteristic and the value of the hypsometric integral, combining the late Cenozoic stratigraphy and the activities of the regional geological structure, the article studies the hypsometric instruction significance to the neotectonic movement in the re-generated orogenic zone and to the basin landform evolution of the northern Tianshan Mountain. It indicates that the sub-basin hypsometric integral does not have the relevance with the difference of the area and the altitude. Also, the river accumulation and the minor tectonic uplift will affect the sub-basins in the alluvial fan region and make the value of hypsometric integral higher. The differences on the spatial contribution between the morphological feature of the hypsometric curve and the value of the hypsometric integral illustrate the active tectonic different patterns of three row folds in the northern piedmonts of the Tianshan Mountains. The circulating characteristic of the hypsometric curve explore the dynamic evolutionary process that how the strong tectonic activity and the river erosion control the shape transition of the hypsometric curve.

**Key words** hypsometric integral, hypsometric curve, neotectonic movement, river, Tianshan Mountains