

# 天山北麓河流纵剖面与基岩侵蚀模型特征分析

赵洪壮<sup>1,2</sup>, 李有利<sup>1,2</sup>, 杨景春<sup>1</sup>, 吕红华<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:** 本文提取分析天山北麓 10 条河流的纵剖面, 通过函数拟合纵剖面形态特征, 同时运用基岩侵蚀力模型来研究河流纵剖面形态的发育演化过程, 来揭示河流纵剖面的发育与构造活动之间的内在关系。研究表明: 天山北麓河流地貌地形发育阶段处于河流侵蚀作用强烈的前均衡状态时期。塔西河的纵剖面凹曲度最大, 向东西两侧河流凹曲度依次降低, 乌鲁木齐河与四棵树河凹曲度最小, 河流的凹曲度 ( $\theta$ ) 和河道坡度 ( $K_s$ ) 的数值分布规律与所对应构造部位晚更新世以来的抬升速率和地壳缩短速度相一致, 排除时间、气候因素和基岩性质影响因素后, 发现晚更新世以来天山北麓河流纵剖面形态变化主要受构造抬升作用的影响。

**关键词:** 河流纵剖面; 基岩侵蚀模型 (S-A 模型); 河流凹曲度; 河道坡度; 构造运动; 天山

## 1 引言

在活动构造地区, 河流地貌对构造活动具有明显的响应<sup>[1-4]</sup>。随着高精度数字地形数据的成功获取<sup>[5,6]</sup>, 地貌研究所需的相关指标能够快速定量分析和解释, 大量定性层面上的地貌问题能够通过模型和数学运算进行验证<sup>[7]</sup>。有学者以河流纵剖面作为研究基础来探讨活动构造区的构造地形的变化, 并利用一些适合的数值模型来预测构造地形的演化。很多学者建立了基岩河床下切侵蚀作用的数值模型, 建立了构造稳定均衡区域的经验常数, 并结合区域已有的岩层抗侵蚀力、水力、水文信息, 推导出区域的抬升量与侵蚀关系<sup>[8-11]</sup>。但是, 对于构造运动活跃的地区 (如天山地区), 河流的纵剖面形态以及基岩侵蚀模型的特征是如何反映构造运动的影响, 是否与 Davis 所谓的均夷剖面相一致? 国内少见有研究成果。此外, 前人的研究 (Rădoaneet, 2003)<sup>[12]</sup> (张会平、张培震等, 2008)<sup>[13]</sup> (陈彦桀, 2004) 多以一条主干河流的某一河段为基础, 选取其中的细支流作为研究对象, 研究区的范围相对小, 不能反映大尺度构造运动的特征。本文选择新生代构造活动强烈, 并且河流地貌发育完善的北天山及其山麓褶皱带, 以天山北麓河流纵剖面的提取分析为基础, 利用基岩河道水力侵蚀模型 (stream-power incision model), 尝试揭示晚新生代以来强烈构造活动在天山北麓水系河流纵剖面形态特征上的表现, 探讨晚新生代以来天山北麓活动构造新的特征。

## 2 河流纵剖面与基岩侵蚀力模型

### 2.1 河流纵剖面及拟合函数

河流纵剖面的形态反应了汇水盆地流域中各种内在因素 (如河道中的基岩类型、沉积物来源的岩性、地质构造、降雨量大小等) 的综合作用, 用线性、指数、对数和乘幂等 4 种回归方程式 (图 1), 来量化这些内在因素与河流纵剖面形态之间的关联性<sup>[14-18]</sup>, 探讨流

收稿日期: 2008-12-10; 修订日期: 2009-03-03

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

作者简介: 赵洪壮 (1974-), 男, 汉, 山东莱州人, 在读博士生, 研究方向为基于 GIS/RS 技术的地貌和环境演变建模及可视化。E-mail: zhaohongzhuang@pku.edu.cn

域地貌特征与演化或对未来演化趋势的评估提供数学模型上的参考。从 Davis 提出地貌循环理论模型到 Snow 和 Slingerland 的数值仿真分析<sup>[17]</sup>，以及 Rădoanet 的研究结果<sup>[12]</sup>皆显示：在造山运动不甚强烈、气候变化不剧烈的相对稳定条件下，河流纵剖面的下凹程度与形态变化反应了河流演化发育的过程：(1) 当流域地形受到构造抬升作用后，河流会以搬运作用为主且河床物质粒径较大，初始形成的河流其纵剖面的下凹程度应较小或近乎直线，可用线性函数剖面来拟合；(2) 然后随着侵蚀作用在中上游进行，并将侵蚀下来的物质搬运至下游堆积，使得河流纵剖面的下凹程度变大而逐渐演化成指数的剖面；(3) 而后当河流上游侵蚀与下游堆积作用反复进行，使河床高低差异逐渐减少，河床上的急流、险滩逐渐清除，其纵剖面形成一条圆滑下凹的曲线，此时河流的上游侵蚀与下游堆积渐趋平衡，河流纵剖面的形态接近 Davis 所称的均夷平衡剖面，即对数剖面；(4) 当河流在演化至对数剖面的均夷状态后，若由于气候雨量的增加（河水流量增加）或地质构造活动造成地质酥松带（增加输沙量），将使得河流所受到的净侵蚀力大大增加，破坏原先的均夷平衡，上下游河床物质、几何形态与大小几乎一致，结果河流纵剖面的下凹程度快速增大而呈现出乘幂剖面。因此，河流纵剖面对应的演化顺序应为：线性剖面 => 指数剖面 => 对数剖面 => 乘幂剖面。

2.2 河道基岩侵蚀力模型

基岩河道 (bedrock channel) 的发育和演化能够记录活动造山带地区基岩的隆升以及河流的下切过程，基岩河道侵蚀模型通过河道纵剖面上的坡度变化与河流集水面积之间的相互关系来推导河流与基岩河床之间的营力作用。Whipple<sup>[9, 19]</sup>和陈彦桀<sup>[20]</sup>的研究中都定义基岩河床侵蚀力模型的公式为：

$$dz/dt = U - E = U - KA^m S^n \tag{1}$$

公中： $dz/dt$  代表河床高程随时间变化的情况， $U$  为构造抬升作用引起的地壳抬升速率， $E$  为河流下切侵蚀速率， $A$  为河道上游的流域面积， $S$  为河道坡度， $K$  为侵蚀系数（包括岩层强度、河床物质、河道宽度、径流量、土石流失率...等）， $m$  和  $n$  为常数（代表水文、侵蚀作用等）。

当  $dz/dt = 0$  时， $U = KA^m S^n$  则

$$S = (U/K) 1/n A^{-m/n} \tag{2}$$

令  $\theta = m/n$ ， $k_s = (U/K)^{1/n}$ ，那么

$$S = K_s A^{-\theta} \tag{3}$$

即： $\log(S) = -\theta \cdot \log(A) + \log(K_s)$

式中：参数  $\theta$  为均衡河道纵剖面的下凹程度指数 (concavity index)，而  $k_s$  则为均衡河道纵剖面的陡度指数 (steepness index)。可直接在  $S-A$  (Slope-Area) 的双对数坐标关系图 ( $\log-\log$  plot) 中以直线回归的方法得出，回归直线的斜率和截距即为  $\theta$  与  $k_s$ 。当地形达到均衡状态时，其集水盆地内河流的  $S-A$  在双对数坐标关系图上会呈现一条直线形态 (图 2a)。因此本文利用  $S-A$  关系图作为分析判断地形是否达到均衡状态的主要依据。当造山带内部基岩隆升速率大于河流的下切侵蚀速率时，也即河床高度随着时间的变化而逐渐

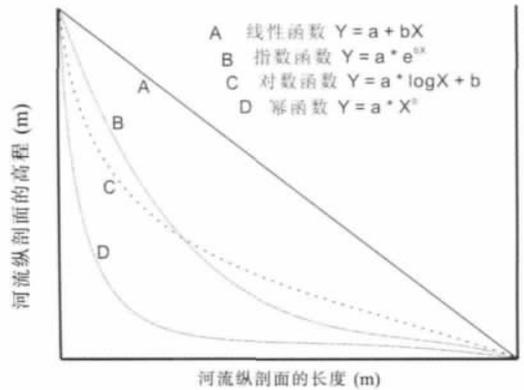


图 1 4 种函数的剖面拟合形态比较 (a 与 b 皆为常数, 修改自: 陈彦桀, 2004<sup>①</sup>)  
Fig. 1 Fit to the river profile by four mathematic models

① 陈彦桀, 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, 台湾国立成功大学 地球科学研究所, 博士论文, 2004.

升高，即  $dz/dt > 0$  (图 2b)，此时造山带地形发育处于前均衡状态。

### 3 天山北麓河流纵剖面的提取和函数拟合

为了完整分析天山北麓河流的纵剖面形态特征，我们利用 SRTM2-DEM (第 4

版)<sup>[21]</sup>数据，选定天山北麓的 10 条 1 级河流水系为研究对象 (图 3)，提取了所有河流的最长主干河道河流纵剖面 (图 4)。由河流纵剖面曲线图与统计数据可以看到：北天山河流的纵剖面总体特点是基本呈现轻微下凹形态，上游属于陡坡型剖面特征，下游剖面逐渐变得平缓。天山北麓河流纵剖面的下凹程度是受到流域发育时间、地区气候、河床基岩岩性和区域构造运动等因子影响。(a) 就时间因子而言，河流发育时间愈长，其河流剖面下凹程度愈大<sup>[12]</sup>，但天山北麓河流纵剖面下凹程度却以塔西河下凹曲度最大，以研究区东西两侧的乌鲁木齐河与四棵树河最小 (基岩侵蚀模型的  $\theta$  值也证实此现象)，没有研究结果表明塔西河是天山北麓地区发育最早的河流，因而无法说明时间因素对天山北麓河流纵剖面形态特征差异的形成有着显著的影响。(b) 就气候因子而言，高山地区受地形降水的影响要比低山或冲积扇地区大，在雪线以上降雪会增加冰川体积，加大冰川侵蚀，雪线以下降雨会增加河水流量，都会促使侵蚀下切能力增大，从而使得河道剖面的下凹度增大。天山北麓位于西风带内，受西风带携带来自大西洋暖湿气流的影响，在天山北麓地区多地形降水，夏季降水量的分布规律总体上是自西向东减少<sup>[22, 23]</sup>，由此我们应可以推论出天山北麓河流的下凹度也应是自西向东逐渐减小，但研究区的河流剖面下凹度实际情况却是：中间河流下凹度大，东西两侧河流的下凹度小，因此无法说明气候因素对河流剖面具有显著影响。(c) 就基岩地质特性而言，研究区内各河流皆发育于北天山，流经天山山地地区、山前低山丘陵地区和山前冲积扇地区，从天山北麓的地质构造上这些河流流经同样的地质构造带，河流与河流之间没有差别，只是每条河流的上下游之间在地质构造上有区别，由上游至下游三个不同的地质区域其基岩岩性由强到弱<sup>[24, 25]</sup>，上游地区位于高海拔的山区，岩性为抗侵蚀力较强的中生代的变质岩类，山麓低山丘陵地带以及山前冲击扇带海拔高度较低，且该地区地层为晚新生代的泥岩、沙砾石层等，基岩抗侵蚀力比较弱，这也仅能说明河流上下游之间纵剖面下凹度由小到大变化的原因，却不足以解释天山北麓河流之间下凹曲度的差异。(d) 就构造抬升因素而言，邓起东等根据天山北麓河流阶地年龄数据以及褶皱变形几何模型和实地测量数据，计算了北天山山前各主要逆断裂一背斜带晚更新世以来不同时期的褶皱抬升速率<sup>[26]</sup>。从表 1 中可看到，土谷鲁背斜东侧中段晚更新世以来的隆升速率最大

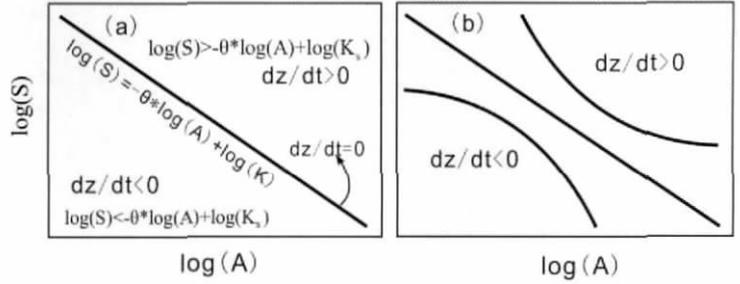


图 2 河流水力侵蚀模型 S - A 双对数图解<sup>[20]</sup>  
Fig. 2 Standard logarithmic S-A plot of stream-power incision model

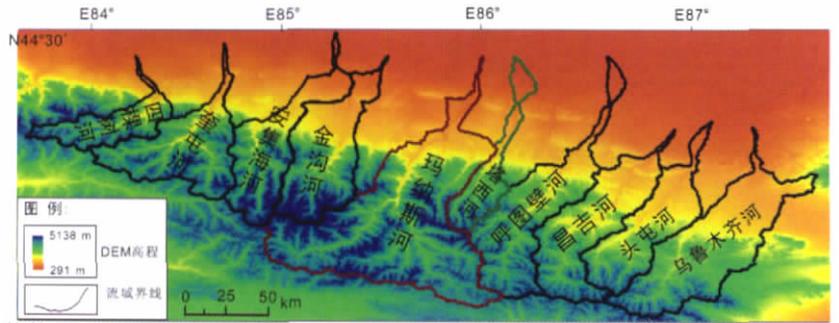


图 3 天山北麓河流流域范围示意图

Fig. 3 The fields of the ten rivers at the foot of the north Tianshan Mountains

(3.46~3.75 mm/a)，横切土谷鲁背斜的塔西河的纵剖面下凹度最大。

河流纵剖面的拟合分析就是对河流进行 4 种函数模型的拟合 (表 2)。判断数学函数是否为最佳拟合函数的依据是参考数学函数与实际河流纵剖面的统计回归判定系数值 (coefficient of determination,  $R^2$ )。由

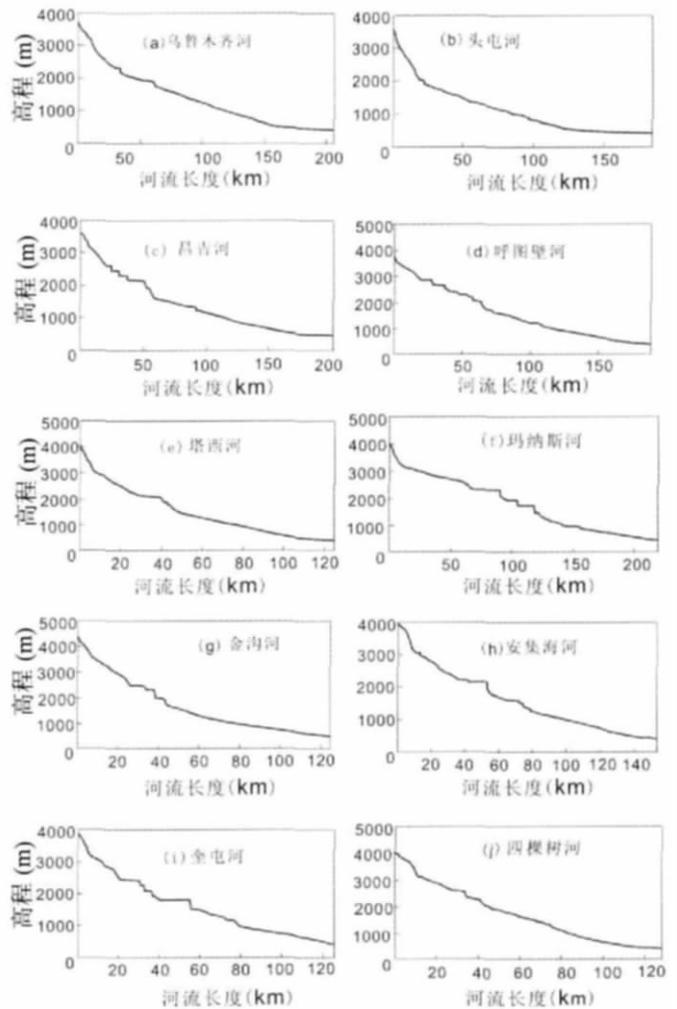
表 2 拟合函数的判定系数 ( $R^2$ ) 可知: (1) 研究区内的河流剖面以指数函数为最佳拟合结果, 从函数模型上表明北天山地区河流处于侵蚀作用强烈时期, 亦即 Davis (1909) 提出的河流发育壮年期早期阶段。 (2) 乘幂型的数学模型拟合判定系数 ( $R^2$ ) 很低, 表明该数学模型并不适用于本研究范围, 其原因在于: 新生代以来天山属于构造运动活跃地区, 北天山以 17.8 mm/a 的速率隆升<sup>[28]</sup>, 地形虽然一直被侵蚀, 但受山体抬升的影响, 两者之间可以说是互有消涨, 因此目前北天山流域地区还未达到乘幂型函数所代表的地貌发育阶段。 (3) 头屯河与玛纳斯河出现了有二个数学函数与实际河流纵剖面拟合非常接近, 即判定系数 ( $R^2$ ) 都高, 并且数值非常接近。我们通过仔细对比两条河流的 DEM 高程数据, 并对照拟合参数与河流纵剖面曲线的特征, 认为这是由于在实际河流纵剖面上, 某段纵剖面突然变得较为平滑 (玛纳斯河) 或更为下凹 (头屯河), 结果整个河流纵剖面呈现类似复合剖面的形态, 而使得其能同时适用 2 个数学函数来拟合。此时具有相对较高  $R^2$  值的数学函数, 其下凹曲线的形态不一定与实际河流纵剖面的下凹曲线形态吻合, 因此需参考整条河流纵剖面的下凹曲线形态来判断哪一个为其最佳拟合函数。通过与实际

表 1 北天山山前部分逆断裂—背斜晚更新世以来抬升量 (修改自邓起东, 2000)

Tab. 1 The ratio of uplift of thrust belt in front of the north Tianshan Mountains since Late Pleistocene

河流名称	构造部位	抬升量 (m)	抬升速率 (mm/a)
呼图壁河	土谷鲁背斜东侧伏端	11.4	0.88-0.95
塔西河	土谷鲁背斜东侧中段	45.0	3.46-3.75
玛纳斯河	土谷鲁背斜与玛纳斯背斜结合部位	32.5	2.50-2.71
金沟河	霍尔果斯河背斜中段	37.0	2.90-3.10
特里肯萨拉河	哈拉安德背斜东段	12.0	0.92-1.03
奎屯河	独山子背斜中段	25.0	1.92-2.08

注: 抬升速率计算的年代时间以北天山山前分布最为广泛的 II 级阶地年代数据 (12-13  $10^3$ a) 为标准



图例: 河流纵剖面线

图 4 天山北麓河流纵剖面曲线图

Fig. 4 the profiles of the ten rivers in front of the North Tianshan Mountains

河流纵剖面的对比，我们认为指数函数也是玛纳斯河与头屯河的最佳拟合函数模型。

### 4 基岩侵蚀模型体现的剖面特征

以北天山研究区内 10 条河流为研究对象，对 10 条河流的基岩河道进行统计，建立  $\log(A)$  和  $\log(S)$  的关系图 (图

5)。坡度 ( $S$ ) 为相邻等高线两点间的高程差除以河段的距离 ( $\Delta H/\Delta L$ )，上游区汇水面积 ( $A$ ) 为源头至该高程点范围内的累计汇水面积之和。

由  $S$ - $A$  关系图 (图 5) 以及  $\theta$ 、 $\log ks$  统计图 (图 6) 能够看到：

(1) 天山北麓 10 条河流中有 7 条河流的凹曲度 ( $\theta$ ) 数值集中在 0.10~0.18 之间；此外，塔西河的凹曲度  $\theta > 0.2$ ，乌鲁木齐河与四棵树河的凹曲度  $\theta < 0.1$ 。Snyder (2000)<sup>[27]</sup>在加州地区的研究表明均衡 (steady-state) 区域的凹曲度 ( $\theta$ ) 经验平均值约为 0.49。天山北麓河流的凹曲度 ( $\theta$ ) 值远低于经验平均值 ( $0.25 < 0.49$ )，即天山北麓的河流演化还没有达到均衡阶段。研究区的 10 条河流  $S$ - $A$  关系图都呈现  $dz/dt > 0$  的形态特征，表明北天山陆内造山带内部基岩隆升速率大于河流的下切侵蚀速率，此时造山带地貌地形发育处于前均衡状态。

(2) 河流凹曲度 ( $\theta$ ) 分布：以塔西河  $\theta$  值最大，向东西两侧河流的凹曲度 ( $\theta$ ) 呈现下降变小趋势，这与在河流纵剖面分析中塔西河的纵剖面下凹度最大，东西两侧的乌鲁木齐河与四棵树河的下凹度最小相一致。从数值分布上，10 条河流的  $\theta$  具有和  $ks$  同样的分布特征

表 2 天山北麓 10 条河流纵剖面拟合函数 (判定系数  $R^2$ )

Tab. 2 The fit-function of the ten rivers' profile in front of the north Tianshan Mountains

序号	河流名称	线性函数 ( $R^2$ )	指数函数 ( $R^2$ )	对数函数 ( $R^2$ )	幂函数 ( $R^2$ )
1	乌鲁木齐河	0.91	0.98*	0.92	0.75
2	头屯河	0.84	0.96*	0.96*	0.83
3	昌吉河	0.90	0.99*	0.91	0.77
4	呼图壁河	0.95	0.99*	0.86	0.71
5	塔西河	0.91	0.99*	0.92	0.74
6	玛纳斯河	0.97*	0.96*	0.79	0.63
7	金沟河	0.89	0.99*	0.90	0.77
8	安集海河	0.94	0.98*	0.88	0.72
9	奎屯河	0.94	0.99*	0.89	0.73
10	四棵树河	0.96	0.98*	0.86	0.68

注：\* 表示为判定系数  $R^2$  所指示的最佳拟合函数

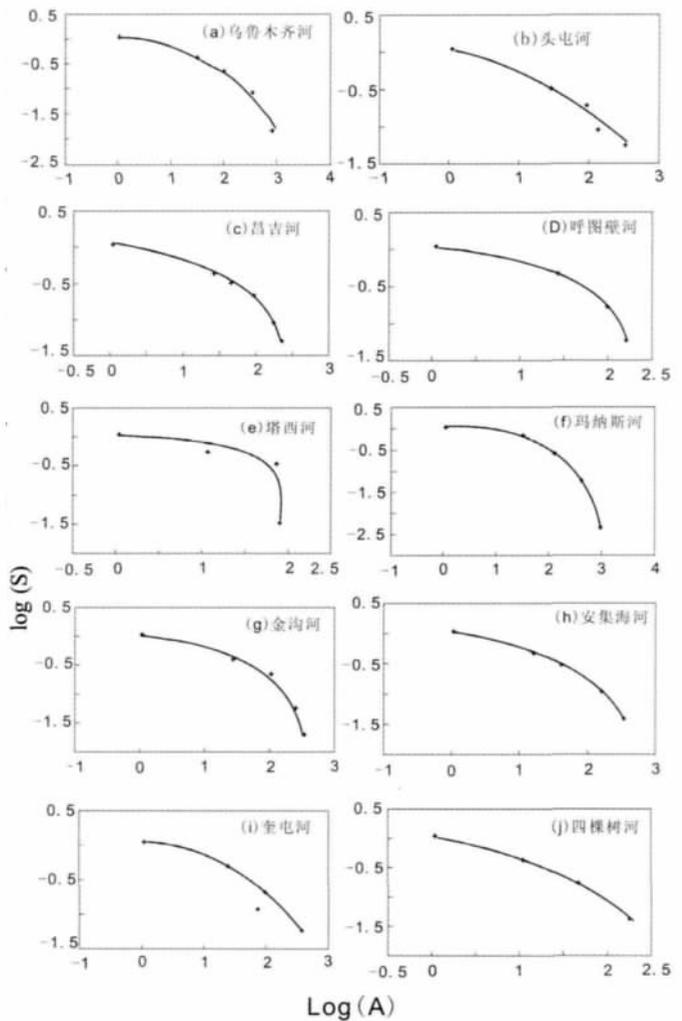


图 5 北天山河流水力侵蚀模型 S-A 双对数图  
Fig. 5 Standard logarithmic S-A plot of the ten rivers in front of the north Tianshan Mountains

(图 6), 说明研究区内的河流的下凹度 ( $\theta$ ) 与河道坡度 ( $K_s$ ) 具有一致性。

(3) 当各集水盆地所呈现的  $\theta$  值接近一致时, 坡度指数 ( $\log k_s$  值) 变化趋势与该集水盆地构造抬升有关<sup>[27]</sup>, 位于较高抬升速率的地区, 集水盆地  $\log k_s$  值亦较高; 而位于较低抬升速率地区, 集水盆地  $\log k_s$  值则较低。本研究区内玛纳斯河 ( $\theta = 0.1535$ )、金沟河 ( $\theta = 0.135$ )、安集海河 ( $\theta = 0.143$ )、奎屯河 ( $\theta = 0.103$ ), 这 4 条河的凹曲度 ( $\theta$ ) 很接近, 而坡度指标 ( $\log k_s$  值) 却呈现由东向西减小的规律 ( $0.602 > 0.473 > 0.487 > 0.386$ )。虽然玛纳斯河的  $K_s$  大于金沟河的  $K_s$  值, 但是其构造抬升速率却小于金沟河 (表 2)。对照图 3, 发现玛纳斯河穿过的只是土谷鲁背斜东倾伏端, 现有数据并不能代表玛纳斯背斜的最大抬升量与抬升速率。因此, 我们又以地壳缩短量作为补充指标, 发现  $\log k_s$  值 (坡度) 与 4 条河流所对应构造部位晚更新世以来的抬升速率 (表 1) 和地壳缩短速度<sup>[28]</sup>具有很很大的一致性。

综合前文对时间、气候、基岩地质特性以及构造活动的分析, 可以认为在北天山—构造活跃的造山带区域, 河流纵剖面形态变化受构造抬升作用的影响很大。RădoaneI<sup>[12]</sup>对罗马尼亚地区以及陈彦桀<sup>①</sup>对台湾地区的研究也都证实, 地形的抬升速率才是最主要的影响因素。晚更新世以来, 北天山地区河流的演化过程并没有随时间的推移进化到均衡阶段, 其主要原因就是北天山地区受新构造运动影响, 天山山体持续隆升, 并引发北麓山前三排褶皱构造变形活动, 河流地貌演化一直表现为壮年期早期阶段的特征。

### 5 结论

(1) 天山北麓河流的纵剖面总体特点是基本呈现轻微下凹形态, 上游属于陡坡型剖面特征, 下游剖面逐渐变得平缓。河流纵剖面下凹程度以塔西河下凹程度最大 ( $\theta = 0.232$ ), 东西两侧的乌鲁木齐河与四棵树河最小 ( $\theta$  值分别为 0.095, 0.027)。

(2) 研究区内的河流纵剖面以指数函数为最佳拟合结果 (判定系数  $R^2 \geq 0.96$ ), 表明北天山地区河流发育处于侵蚀作用强烈的壮年期中早期阶段。

(3) 北天山研究区内的 10 条河流中, 7 条河流的凹曲度 ( $\theta$ ) 数值集中在 0.10~0.18 之间, 最大值 0.25, 最小值 0.027,  $\theta$  值远低于经验平均值 (0.49), S-A 关系图亦都呈现

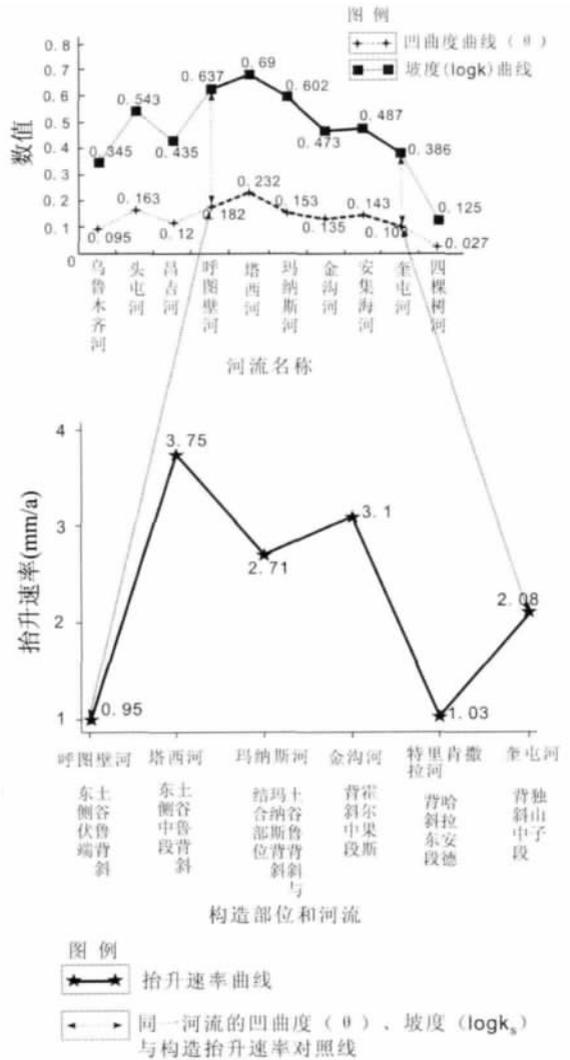


图 6 10 条河流的凹曲度 ( $\theta$ )、坡度 ( $K_s$ ) 和构造抬升速率曲线对照图

Fig. 6 The plot of concavity index and steepness index and their correspondence to the tectonic rate

$dz/dt > 0$  的形态特征。表明北天山陆内造山带内部基岩隆升速率大于河流的下切侵蚀速率,造山带地貌地形发育处于前均衡状态。

(4) 河流的凹曲度 ( $\theta$ ) 与河道坡度 ( $K_s$ ) 分布规律具有一致性,并且与河流所对应构造部位晚更新世以来的抬升速率和地壳缩短速度相对应一致,我们认为构造活跃的造山带区域,河流纵剖面形态变化受构造抬升作用的影响很大。晚更新世以来,天山北麓山前构造活动速率由土谷鲁背斜向东西两侧减小,从而影响了河流纵剖面的发育,即塔西河的凹曲度最大,向东西两侧依次降低,乌鲁木齐河与四棵树河凹曲度最小。

## 参考文献 (References)

- [1] Shi Xingmin, Li Youli, Yang Jingchun et al. Response of the foreland of the Manas River to the tectonic movement in Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(2): 281-288. [史兴民, 李有利, 杨景春等. 新疆玛纳斯河前地貌对构造活动的响应. *地质学报*, 2008, 82(2): 281-288.]
- [2] Yang Xiaoping, Deng Qidong, Zhang Peizhen et al. Fold deformation along the Tugulu reverse fault-fold zone since Late Pleistocene, north Tianshan. *Research on Active Fault*, 1995, (4): 46-62. [杨晓平, 邓起东, 张培震等. 利用阶地变形资料研究北天山吐谷鲁逆断裂-背斜带晚更新世以来的褶皱变形特征. *活动断裂研究*, 1995, (4): 46-62.]
- [3] Zheng Wentao, Yang Jingchun, Duan Fengjun. A study on the relation between deformation of river terraces and neotectonic activity for the Wuwei basin. *Seismology and Geology*, 2000, 22(3): 318-328. [郑文涛, 杨景春, 段锋军. 武威盆地晚更新世河流阶地变形与新构造活动. *地震地质*, 2000, 22(3): 318-328.]
- [4] Shi Xingmin, Yang Jingchun, Li Youli et al. Deformation of manas river terraces and neotectonics in northern front of the Tianshan Mountains. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2004, 40(6): 971-978. [史兴民, 杨景春, 李有利等. 天山北麓玛纳斯河流阶地变形与新构造运动. *北京大学学报(自然科学版)*, 2004, 40(6): 971-978.]
- [5] Farr T G, Rosen P A, Caro E et al. The shuttle radar topographic mission. *Review of Geophysics*, 2007, 45: 1-33.
- [6] 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.
- [7] Burbank D W, Anderson R S. *Tectonic geomorphology*. Malden, Mass.: Blackwell Science, 2001, 274.
- [8] Seidl M A, Dietrich W E. The problem of channel erosion into bedrock in functional geomorphology. Schmidt K H, Ploey J De. *Catena*, 1992, 23(suppl.): 101-124.
- [9] Whipple K X, Hancock G S, Anderson R A. River incisions into bedrock: Mechanics and relative efficacy of plucking abrasion, and cavitations. *Geological Society of America Bulletin*, 2000, 112(3): 490-503.
- [10] Whipple K X, Tucker G E. Implications of sediment-flux dependent river incision models for landscape evolution. *Geophysics Res.*, 2002, 107: 2039.
- [11] Snyder N P, Whipple K X, Tucker G E et al. Importance of a stochastic distribution of floods and erosion thresholds in the bedrock river incision problem. *Geophysics Res.*, 2003, 108(B2): 2117.
- [12] Rădoane M, Dumitriu D. Geomorphologic evolution of longitudinal river profiles in the Carpathians. *Geomorphology*, 2003, 50: 293-306.
- [13] Zhang Huiping, Zhang Peizhen, Wu Qinglong et al. Characteristics of the Huanghe River longitudinal profiles around Xunhua-guide area (NE Tibet) and their tectonic significance. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(2): 300-309. [张会平, 张培震, 吴庆龙等. 循化—贵德地区黄河水系河流纵剖面形态特征及其构造意义. *第四纪研究*, 2008, 28(2): 300-309.]
- [14] Hack J T. Studies of longitudinal stream profile in Virginia and Maryland. *U.S Geol Survey Prof Paper*, 1957, 294(B): 45-95.
- [15] Hack J T. Stream-profile analysis and stream-gradient index. *U.S. Geol. Surv, J. Res*, 1973, 1: 421-429.
- [16] Shepherd R G. Regression Analysis of River Profile. *Journal of Geology*, 1973, 93: 377-384.
- [17] Snow R S, Slingerland R L. Mathematical modeling of graded river profile. *Journal of Geology*, 1987, 95: 15-33.
- [18] Ohmori H. Change in the mathematical function type describing the longitudinal profile of a river through an evolutionary process. *Journal of Geology*, 1991, 99: 97-110.
- [19] Whipple K X. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2004, 32: 151-185.
- [20] Chen Yanjie, Song Guocheng, Chen Zhaonan. Stream-power incision model for non-steady state orogens. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(7): 865-869. [陈彦桀, 宋国城, 陈昭男. 非均衡山脉的河流水力侵蚀模型. *科学通报*, 2006, 51(7): 865-869.]
- [21] United States Geological Survey. Shuttle radar topography mission documentation: SRTM Topo. <http://edcftp.cr.usgs>.

gov/pub/data/srmt/Documentation/SRTM-Topo.txt. 2003.

- [22] Li Weihong, Chen Yaning, Hao Xingming et al. Response of the river in the northern frontland of Tianshan to the change of the climate. *Science in China (Series D)*, 2006, 36(S2): 39-44. [李卫红, 陈亚宁, 郝兴明等. 新疆天山北坡河川径流对气候变化的响应研究: 以头屯河为例. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2006, 36(S2): 39-44.]
- [23] Nan Feng, Li Youli, Shi Xingmin. Relation ship of the fluctuations of stream discharge of the Manas River and climatic changes. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(3): 59-61. [南峰, 李有利, 史兴民. 新疆玛纳斯河水量波动与气候变化之间的关系. *水土保持研究*, 2003, 10(3): 59-61.]
- [24] Li Jinyi, Wang Kezhou, Li Yaping et al. Geomorphological features, crustal composition and geological evolution of the Tianshan Mountains. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(8): 895-906. [李锦轶, 王克卓, 李亚萍等. 天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化. *地质通报*, 2006, 25(8): 895-906.]
- [25] Zhou Feng. Study of the fault and fold system in southern margin of Junggar Basin. *West China Petroleum Geosciences*, 2006, 2(3): 281-285. [周锋. 准噶尔盆地南缘断裂与褶皱体系研究. *中国西部油气地质*, 2006, 2(3): 281-285.]
- [26] Deng Qidong, Feng Xianyue, Zhang Peizhen et al. *Active Tectonics of the Tianshan Mountains*. Beijing: Seismology Press, 2000. 1-399. [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.]
- [27] Snyder N, Whipple K, Tucker G et al. Landscape response to tectonic forcing: Digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California. *Geological Society of America Bulletin*, 2000, 112: 1250-1263.
- [28] 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. *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. *地学前缘*, 2007, 14(4): 123-131.]

## The Longitudinal Profiles of the Ten Rivers in North Tianhan Mountains and Their Tectonic Significance

ZHAO Hongzhuang<sup>1,2</sup>, LI Youli<sup>1,2</sup>, YANG Jingchun<sup>1</sup>, LU Honghua<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:** In this paper we carry out a study on the longitudinal profile of the 10 rivers in the north Tianshan Mountains, by fitting the characteristics of the river longitudinal profile using four function patterns, and analyzing the evolution process of the 10 rivers' longitudinal profile based on the stream-power incision model. We reveal the relationships between the evolution process of the river and the tectonic activity. Our study indicates that the concavity index of the Taxihe River is the greatest one among the 10 rivers, and the concavity indexes of the other rivers become small one by one in turn on both sides, so the concavity indexes of the Urumqi River and the Sikeshuhe River are the least ones comparatively. The evolution phase of the river topographic form is the pre-steady-state topography. Consequent analysis reveals that the upward-convex features of the profiles and slope-area plots can be explained by the elevation of the bedrock profile getting higher and higher and the uplift being beyond the incision around the target area.

**Key words:** longitudinal profile; stream-power incision model; concavity index; stream slope; tectonic; river evolution process; Tianshan Mountains