

文章编号: 1008-2786-(2015)2-183-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000024

白龙江流域河流纵剖面与基岩侵蚀模型特征

常直杨^{1,3}, 王建^{*1,2}, 白世彪^{1,2}, 张志刚¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023;
3. 南京旅游职业学院, 江苏 南京 211100)

摘 要: 构造地形指标的发展对于构造运动的量化研究具有重要意义。白龙江流域位于青藏高原与西秦岭造山带之间的过渡地带, 对该流域地貌是否处于构造隆升与河流侵蚀的均衡状态, 以及内部构造活动性的差异如何等问题尚缺乏细致研究。基于 Arcgis9.3 与 ASTERGDEM 数据, 提取了白龙江流域 32 条支流的纵剖面, 拟合其最佳函数形态, 并利用基岩侵蚀模型提取了各个支流的标准化陡峭指数、凹曲度及拟合系数值, 来揭示白龙江流域河流对构造运动的响应特征。结果表明: 白龙江流域河流拟合函数以指数函数为主, 河流大多发育处于侵蚀作用强烈阶段; 中上游地区标准化河流陡峭指数较下游地区偏大, 凹曲度值和拟合系数中上游较下游值偏小, 反映了白龙江流域中上游与下游构造活动强度的差异性; 32 条支流的凹曲度大部分小于均衡状态经验平均凹曲度值(0.49), 表明白龙江流域地貌形态发育大部分还没有达到均衡阶段。

关键词: 白龙江; 构造运动; 河流纵剖面; 基岩侵蚀模型; 陡峭指数; 凹曲度

中图分类号: P931.2, P542

文献标志码: A

构造活动的速率通常十分缓慢, 其效果需要长期积累, 目前人类历史不可能记录长时间尺度的变化, 而以地形对地壳构造运动反映所发展的地形指标, 则可以提供长时间尺度的记录^[1]。在阿尔卑斯山、喜马拉雅山、青藏高原、美国科罗拉多高原及埃塞俄比亚高原的研究^[2-8]均表明, 地形指标适用于研究地貌与构造作用之间的关系。而河流对构造运动极其敏感, 水系的相对平衡状态因构造活动而改变, 基岩侵蚀模型^[3]和河流纵剖面形态拟合特征^[9]的发展使构造运动的研究进一步得以量化。

青藏高原东缘的龙门山与四川盆地是青藏高原周边最陡的地形梯度带, 东北缘被认为是青藏高原最年轻的部分^[10], 对东缘、东北缘的研究可以为青藏高原的变形机制提供线索。且该地区跨越黄河和长江两大流域, 是许多大江大河的发源地, 其中, 白龙江流域地处我国南北地震构造带中段, 构造活动和地震活动强烈, 青藏高原的隆升及断裂褶皱构造

对该地区的水系和地貌产生了重要的影响^[11]。随着 GIS 技术及 DEM 数据的发展, 越来越多的学者提取了相邻流域岷江、龙门山北段平通河、洮河、渭河、黄河水系、祁连山河道^[5-6, 11-18]的剖面形态及流域地貌参数, 以反映长时间尺度的构造活动特征。而对白龙江流域的河流纵剖面形态及基岩侵蚀模型是如何反映构造活动特征的, 白龙江流域在地貌发育上是否处于均衡状态等问题尚缺乏细致研究。本文尝试利用 ASTER GDEM 数据及基岩侵蚀模型提取白龙江 32 条支流的河道纵剖面拟合函数、标准化河流陡峭指数、凹曲度、拟合系数值, 对该流域地貌特征及其反映的构造活动性进行分析。

1 研究区概况

白龙江流域位于青藏高原向西秦岭造山带过渡的斜坡急剧变形带(图 1a), 流域面积约 31 808

收稿日期(Received date): 2013-09-01; 修回日期(Accepted): 2013-12-11。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(40871010)。[Supported by National Nature Science Foundation of China (40830742).]

作者简介(Biography): 常直杨(1987-), 男, 河南济源人, 博士研究生, 从事 GIS 在地貌研究中的应用研究。[Chang Zhiyang(1987-), male, was born in Jiyuan, Henan Province, Ph.D student, major in the study of geomorphology with GIS.] E-mail: changzhiyang1@126.com

* 通信作者(Corresponding author): 王建(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事地貌演化发展研究。[Wangjian (1962-), male, Dr. & professor, mainly engaged in the study of evolution of geomorphology.] E-mail: jwang169@vip.sina.com

km², 平均海拔 3 500 m, 天然落差达 2 783 m, 区域内夷平面和河流阶地等层状地貌发育, 地貌类型包括山地地貌、河谷地貌、黄土地貌、重力地貌等^[19]。地势西北高东南低, 水系不对称发育, 一级支流有白水江、达拉沟、腊子沟、岷江、拱坝河等, 属高原大陆性气候, 年内降水主要集中于 6—9 月。晚新生代以来, 伴随着青藏高原的不断隆升与扩展, 构造活动程度强烈。中上游地区发育的活动构造主要有沿北西向构造线方向形成的大致互相平行的逆冲褶皱构造带: 合作—宕昌—两当断裂带(F₁)、光盖山—迭山断裂带(F₂)、迭部—白龙江断裂带(F₃)、塔藏断裂(F₄)、文县断裂(F₅) (图 1b), 这些地区断裂活跃, 地壳活动性明显且突出, 历史上发生过许多大的地震, 如 1879 年武都—文县 8.0 级特大地震。下游地区构造带的方向偏转为近东西向或北东东向: 青川断裂(F₆)、北川—林庵寺断裂(F₇)、江油断裂(F₈)。流域内地层岩性复杂, 从志留系到第四系均有出露, 从岩相上, 其基岩可以分为千枚岩、页岩、板岩、泥质岩等软弱岩石及岩浆岩类和石灰岩等坚硬岩石。另外, 采用考虑了岩石物理力学特性及结构条件的工程地质岩组划分方法, 可得 11 种岩组^[20] (图 1b)。

2 数据与方法

2.1 数据来源

所使用的数字高程模型数据 (ASTER—GDEM) 下载自中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站 (<http://datamirror.csdb.cn>), 经过拼接、裁切而成, 格网大小为 30 m。该 DEM 高程基准为 EGM96, 水平基准为 WGS—1984, 垂直精度为 ±20 m, 水平精度为 ±30 m。利用该数据及 Arcgis9.3 的水文分析模块提取了白龙江流域的 32 条支流 (均为白龙江的一级支流), 其中, 干流右侧 14 个, 左侧 18 个 (图 1a)。

2.2 河流纵剖面及拟合函数

河流纵剖面的下凹曲线形态是最容易从河流纵剖面上直接观察到的现象, 其形态可用线性、指数、对数和幂函数 4 种回归方程式表示^[9]

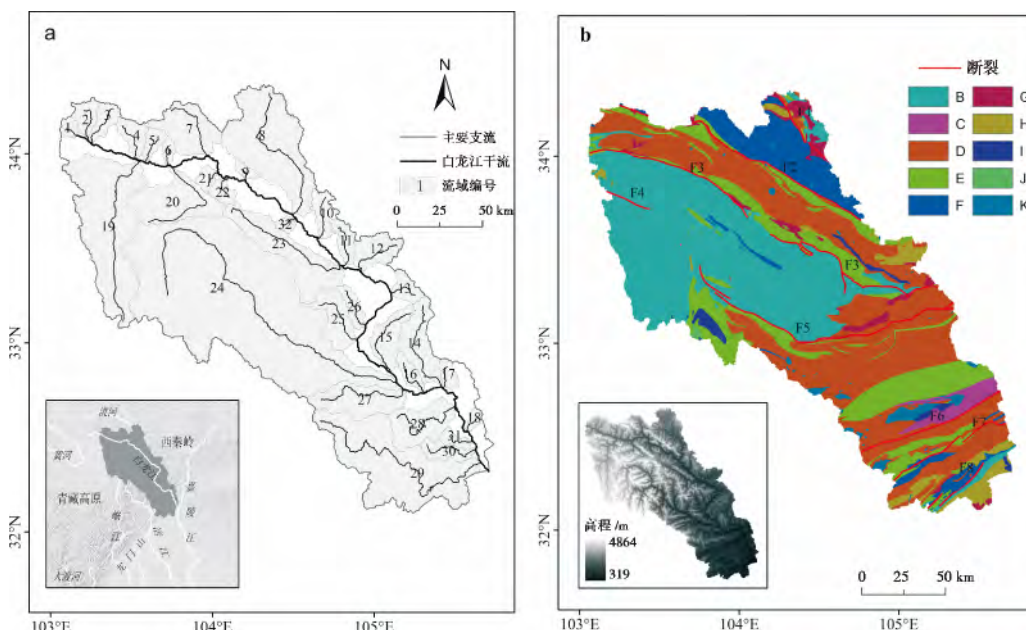
$$\text{线性函数: } Y = a + bX \quad (1)$$

$$\text{指数函数: } Y = ae^{bX} \quad (2)$$

$$\text{对数函数: } Y = a \log X + b \quad (3)$$

$$\text{幂函数: } Y = aX^b \quad (4)$$

式中 Y 为河流纵剖面的高程, X 为河流纵剖面的长度, a 与 b 为常数。越来越多的研究表明, 河流纵剖面对应的演化顺序为线性函数 = > 指数函数 = > 对数函数 = > 幂函数^[9, 21]。地形面受到构造抬升作用后, 初始形成的河流其纵剖面的下凹程度较小或近乎直线, 可用线性函数拟合, 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较大而逐渐演化成指数



(地质图及断裂来源于 1:50 万地质图)

图 1 研究区位置及主要支流 (a) 和构造简图 (b)

Fig. 1 The location of study area and river system (a) and structure geology (b)

F₁: 合作—宕昌—两当断裂带; F₂: 光盖山—迭山断裂带; F₃: 迭部—白龙江断裂带; F₄: 塔藏断裂; F₅: 文县断裂; F₆: 青川断裂; F₇: 北川—林庵寺断裂; F₈: 江油断裂
B: 变质砂岩、变质砾岩、板岩岩组; C: 变质安山岩、变质凝灰岩、变质玄武岩岩组; D: 千枚岩、板岩、薄层灰岩岩组; E: 中厚层灰岩、板岩岩组; F: 中厚层砂岩、板岩夹灰岩岩组; G: 厚层砾岩、砂砾岩岩组; H: 粉砂岩、泥岩、薄层砂砾岩岩组; I: 砂卵砾岩岩组; J: 粘性土; K: 岩浆岩岩组

剖面,而后是对数剖面。之后如果河流流量增加或由于构造运动形成破碎带导致输沙量增加,破坏之前侵蚀作用与堆积作用的平衡,使得河流纵剖面的下凹程度快速增大而呈现出乘幂剖面。河流纵剖面的拟合分析就是对河流进行4种函数模型的数学拟合,判断数学函数是否为最佳拟合函数的依据主要有两个^[21]:一是判断参考函数与实际河流纵剖面间统计回归判定系数,二是目视判断该简单数学函数的下凹曲线形态与实际河流纵剖面的下凹曲线形态是否相接近。

2.3 基岩侵蚀模型

河水沿着河道而流,同时也侵蚀着河道,其侵蚀力相对于河道而言是一种剪切力的形式,而侵蚀的结果往往是造成河道的下切。理论计算表明,河水对河道的下切速率(E)、集水盆地面积(A)与河段坡度(S)关系方程为^[22-23]

$$E = KA^m S^n \quad (5)$$

式中 K 为同时反映岩层抗蚀强度与河流侵蚀能力的有量纲的侵蚀系数, m 与 n 为正值常数。河道的高程 z 可以表示为抬升速率 U 和侵蚀速率 E 的函数

$$dz/dt = U(x, t) - E = U - KA^m S^n \quad (6)$$

式中 x 表示位置, t 表示时间。河道某点的高程不随时间的变化而变化,河道纵剖面处于均衡状态。即 $dz/dt = 0$, 此即均衡河道剖面。则有

$$U = KA^m S^n \quad (7)$$

$$S = (U/K)^{1/n} A^{-m/n} \quad (8)$$

该公式与大量的实测数据^[24-25]一致,实测数据得出河道比降是流域面积幂函数

$$S = k_s A^{-\theta} \quad (9)$$

式中 系数 k_s 表示河道的陡峭指数, θ 表示河道的凹曲度。通过式(8)(9)对比可以得出以下关系

$$k_s = (U/K)^{1/n} \quad (10)$$

$$\theta = m/n \quad (11)$$

由公式(10)可知在定量理解 K 和 n 的前提下,陡峭指数 k_s 可以定性-半定量的描述基岩隆升速率,对公式(9)两边式子取对数,则有

$$\log S = -\theta \log A + \log k_s \quad (12)$$

从式(12)可知,此二个指标可直接在 $S-A$ (slope-area) 的双对数坐标图($\log-\log$ 图)中以直线回归的方式得出,亦即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直线的形态,从而可得河道的陡峭指数 k_s (Y 轴截距)和凹曲度 θ (直线斜率), k_s 与 θ 可反映一定的地形

意义,拟合系数则为河流实测纵剖面与理论纵剖面的拟合度。河流陡峭指数、凹曲度及拟合系数的计算是基于 Kirby 等人^[3-5]和 Snyder 等人^[26]发展的分析方法和步骤。

3 结果与讨论

3.1 河流剖面函数拟合

基于上述判断河流纵剖面最佳拟合函数形态的依据,32条支流的最佳拟合函数主要有指数函数、对数函数、幂函数三种形态,且以指数函数为主(图2a)。指数函数型支流主要分布在白龙江流域中上游,下游地区主要以对数函数及幂函数两种形态为主(支流27、28、29、31)。影响河流纵剖面形态的因素主要有气候、基岩类型和区域构造活动等因子。就气候因子而言,白龙江流域周围23个气象站点年平均降水量空间插值的结果表明,上下游年平均降雨量变化差异不大,气候因素对支流剖面的影响不是主导因素。就基岩特性而言,白龙江流域多发育千枚岩、板岩、灰岩等,不同岩组的抗侵蚀强度不同。支流1~6流经岩组均为千枚岩、板岩、薄层灰岩岩组(图1b),各支流却表现出不同的拟合函数形态,支流16、17、27也有类似的情况;另外,支流27以流经中厚层石灰岩、板岩岩组为主,支流28以流经千枚岩、板岩、薄层石灰岩岩组为主,其拟合形态均一致,支流8、19、24也是流经岩组不同,而拟合形态一致。可以看出,岩性差异也不足以解释各支流纵剖面下凹程度的差异。

就构造抬升因素而言,中上游地区的地壳活动性明显且突出,在空间分布上各地的活动性和强度显著不同,干流左侧相对径流长度短,流域面积小,可能是在构造抬升作用下,河流侵蚀作用主要表现为下切侵蚀,溯源侵蚀作用减弱,因此河道发育短,下凹程度有所增加,支流拟合形态以指数函数为主。干流右侧河道及左侧支流8河长较长,这些支流多通过了多条断裂(如支流8、19),由于断裂之间的活动性差异,受断裂影响,河段对构造运动的响应不同,为了调整不同河段之间的差异,也会通过下切侵蚀作用力求达到平衡,河道纵剖面的下凹程度也会增大;支流20、23、24是受迭部-白龙江断裂及塔藏断裂带等一系列平行断裂带的控制,由于走滑断裂活动的作用,造成断裂带附近岩石破碎度高,有利于物理搬运和化学风化,使支流不断下蚀^[27],下凹程

度增大,表现出指数函数拟合形态。下游地区,青川断裂、北川-林庵寺断裂、江油断裂在该地区以走滑为主,且活动性不甚强烈^[28-30],该特征可能来源于岷山隆起所造成的屏蔽作用^[31],因而该地区支流相对于中上游支流有足够长的时间调节自身形态,河流剖面拟合函数以对数函数、幂函数为主。据此可以认为,河流纵剖面不同的拟合形态是受白龙江流域上下游构造活动性的差异影响,且中上游河流剖面最佳拟合形态以指数函数为主,表明白龙江流域中上游地区河流处于侵蚀作用强烈时期。

3.2 河流陡峭指数

基于 ArcGIS 系统及 MATLAB 脚本程序,计算了白龙江流域 32 条支流的陡峭指数,且在反演计算时,河流源区的崩积河道部分(汇水流域面积 $< 10^5 \text{ m}^2$,图 3 中虚线左边)被排除,只对冲积河道进行了回归分析(图 3)。为了方便不同河长之间进行对比,通过公式 $K_{sn} = K_s A (\theta_{ref} - \theta)$ ^[3] 对河流陡峭指数进行了标准化处理。这里 K_{sn} 为标准化陡峭指数, K_s 为陡峭指数, A 为集水盆地面积, θ_{ref} 为参考的河道的下凹曲度值,通常取 0.45 ^[4]; θ 为观察到的凹曲度指

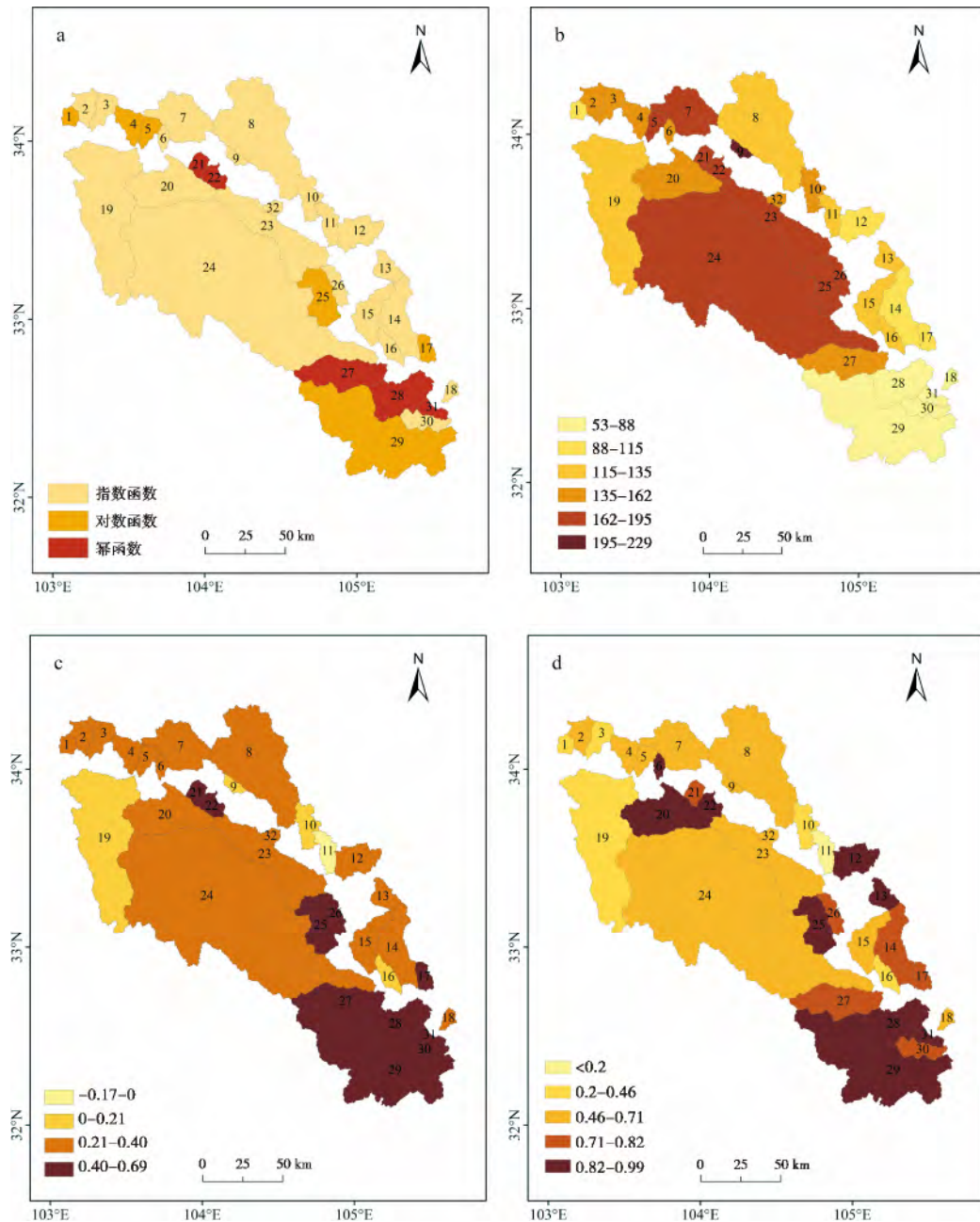


图 2 各支流的拟合函数(a) 河流陡峭指数(b) 凹曲度(c) 拟合系数(d)

Fig. 2 Fit function、Normalized Steepness index (a) 、Concavity (c) and Regression fit values from longitudinal profiles

数,可以代表实际河道纵剖面的下凹程度,计算结果如表1所示。当排除岩性、气候条件的影响时, K_{sn} 可以反映构造信息^[5-6]。与岩性及降雨量变化对河流拟合函数的影响分析类似,白龙江流域降雨量的变化不足以解释 K_{sn} 值大小的不同,流经不同岩性支流的 K_{sn} 值较接近(支流23、24、25、26),而流经相同岩性的支流(支流19、20、24) K_{sn} 值反而有较大差异,可见降雨量及岩性不是控制 K_{sn} 值大小的主要因素。所以,白龙江流域 K_{sn} 值的变化反映的主要信息应该是构造活动的信息。另外,在美国加州北部King Range地区、Santa Ynez山脉、San Gabriel山脉、Siwalik山、祁连山北翼、天山北麓的研究^[3-6,26,32],也均表明河流陡峭指数与构造抬升之间有很好的—致性。

支流18、28、29、30、31的 K_{sn} 值较低(分别为88、72、87、59、53),分布在白龙江流域的下游地区,该区地势差异不明显,地壳抬升速率较低。支流7、9、8、10、11、12的 K_{sn} 值(分别为185、229、122、148、128、115)存在由西向东减小的变化规律,与该地区地壳抬升速度由西向东逐渐减小^[20]及光盖山—迭山断裂带由东向西活动性逐渐增强^①的特征相一致。支流23、24、25、26的 K_{sn} 值较高,表明该地区经历了较高的基岩抬升速率,与岷山构造带第四纪迅速隆起的向北延伸^[27]及东昆仑断裂向西秦岭断裂的传递转换有关^[33-34]。

3.3 河流凹曲度

Whipple(2004)^[4]把河流凹曲度值(θ)分为四个区间,低凹曲度(<0.4)、中等凹曲度($0.4 \sim 0.7$)、高凹曲度($0.7 \sim 1.0$)、极端凹曲度(>1 或为负值)。低凹曲度发生在较陡的集水区范围内,主

要受泥石流的影响,或者发生在愈往下游河流下切作用或岩石强度愈大的河流内,通常伴随着裂点的分布。中等凹曲度出现在活跃造山带中河道基岩接近均质的河流内,同时河流经历均匀或近乎均匀的上升运动。高凹曲度发生在基岩隆升或基岩强度往下游递减,或者下游地区直接进入冲积平原的情况下。极端凹曲度发生在沿河道基岩的性质有明显差异而形成裂点,或者是基岩的隆升速率在时空上明显差异的情况,也包括了由下切侵蚀作用过渡到堆积作用的情况。

白龙江流域 θ 值的计算范围为 $-0.017 \sim 0.69$ (表1)根据Whipple的划分,大多数河流的 θ 值属于低凹曲度值(图2c),白龙江中上游干流左侧支流短,裂点分布较多,凹曲度值普遍较低,另外,支流11属于极端凹曲度值($\theta = -0.017$),河道纵剖面为上凸形(图4a)。干流右侧支流19、20、23、24及干流左侧支流8支流长,凹曲度反而也较低,这主要是由于这些支流流经多个断裂带,受断裂作用的影响(图4b)。中等凹曲度值多分布在白龙江下游流域(图2c,图4c),反映了下游地区近乎均匀的抬升作用。研究区低凹曲度指数与河流纵剖面的指数形态特征相一致,中等凹曲度值与河流纵剖面的对数函数或幂函数相一致,影响这些特征的内在因素为研究区的构造抬升作用。另外,Snyder^[35]在加州地区的研究表明均衡区域的凹曲度经验平均值约为0.49,32个支流中只有支流28、29、30的凹曲度值大于经验平均值(0.49)(表1),其余支流均小于经验平均值,表明白龙江流域地貌形态发育大部分还没有达到均衡阶段。

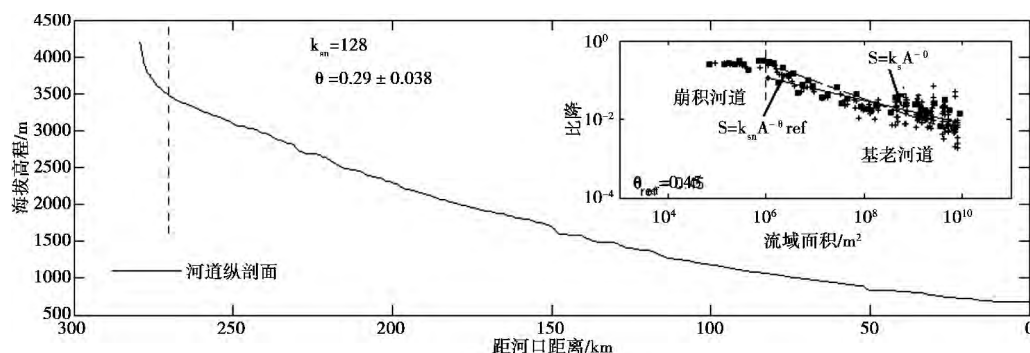


图3 支流24河道纵剖面与流域面积-比降对数图

Fig. 3 The river profile and Area-Slope plot of tributary 24

①白龙江干流武都以上河段(甘肃境内)梯级开发规划调整报告,中国水电西北勘测设计研究院,2004。

表 1 白龙江流域 32 条支流的标准化河流陡峭指数(K_{sn})、凹曲度值(θ)、拟合系数(r^2)

Table1 The Normalized Steepness index(a) ,Concavity(c) and Regression fit values of the tributaries of the Bailongjiang basin

河流编号	K_{sn}	θ	r^2	河流编号	K_{sn}	θ	r^2
1	105	0.38	0.40	17	107	0.42	0.82
2	141	0.34	0.62	18	88	0.38	0.71
3	144	0.29	0.25	19	129	0.21	0.36
4	158	0.40	0.67	20	152	0.34	0.85
5	172	0.30	0.71	21	195	0.54	0.79
6	162	0.35	0.86	22	182	0.47	0.99
7	185	0.36	0.70	23	173	0.39	0.64
8	122	0.27	0.67	24	189	0.30	0.60
9	229	0.17	0.49	25	171	0.43	0.87
10	148	0.20	0.34	26	170	0.44	0.74
11	128	-0.02	0.00	27	146	0.46	0.79
12	115	0.40	0.87	28	72	0.69	0.92
13	135	0.38	0.94	29	87	0.58	0.87
14	106	0.35	0.80	30	59	0.45	0.75
15	122	0.26	0.49	31	53	0.66	0.86
16	127	0.17	0.30	32	151	0.32	0.69

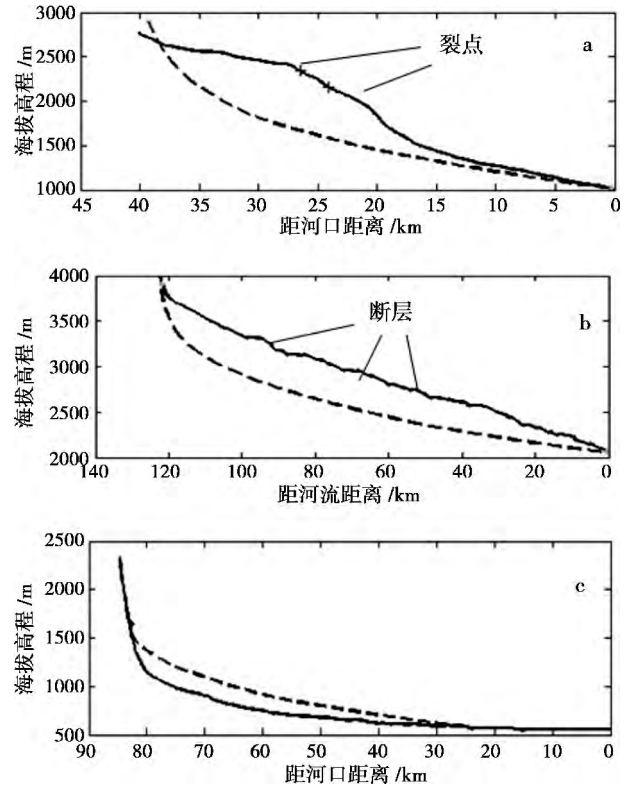
3.4 拟合系数

从表 1 可得白龙江支流河道纵剖面与理论纵剖面的拟合系数分布范围是 0.017 ~ 0.94 ,中上游支流的相关系数 r^2 值多为较小值或中等大小值(图 2d) ,河道纵剖面与理论纵剖面之间的偏差大 ,意味着该地区受到地壳抬升及区内断裂活动的影响。下游支流(支流 24、25、26、27)的拟合系数比较大 ,意味着下游地区支流发育成熟度较高 ,受构造运动作用的影响较小。

综合前文的分析 ,可以认为白龙江流域 32 条支流的河流纵剖面拟合形态、标准化河流陡峭指数、凹曲度值、拟合系数受构造抬升作用及断裂带差异性的活动影响很大 ,这与 Radoanel^[9] 对罗马尼亚地区 ,赵洪壮^[21] 对天山地区的研究相一致。

4 结论

利用 DEM 进行构造地貌形态及参数的分析 ,特别适合于大面积区域 ,基于这些构造地貌参数 ,研究者可以初步了解该地区的地貌特征 ,为今后进一步的研究奠定基础。本文利用 ASTER - GDEM 数据提取了白龙江流域河流的拟合函数形态、陡峭指数、



a 支流 11($\theta = -0.017$); b 支流 2($\theta = 0.39$);
c 支流 28(河道凹曲度值最大 $\theta = 0.69$)

图 4 研究区河流纵剖面(实线)及理论纵剖面(虚线)

Fig. 4 Examples of a longitudinal profile showing the observed (full line) and the predicted channel profiles(dashed line)

凹曲度及河流纵剖面与理论河流纵剖面的相关系数等构造形态参数。结果表明 ,构造因素对白龙江流域河流的纵剖面拟合形态 ,标准化河流陡峭指数的影响较大。白龙江中上游受构造抬升及其内部断裂活动的影响 ,河流纵剖面形态以现指数形态为主 ,河流发育处于侵蚀作用强烈阶段 ,陡峭指数值较高 ,凹曲度值及相关系数值较低。白龙江下游受构造抬升影响作用较弱 ,河流发育较成熟 ,纵剖面形态以对数函数和幂函数为主 ,陡峭指数较低 ,凹曲度值及相关系数数值较高。32 条河流的平均凹曲度大部分小于均衡状态经验平均凹曲度值(0.49) ,表明白龙江流域地貌形态发育大部分还没有达到均衡阶段。而白龙江干流及其部分支流 ,从上游至下游保存有较好的河流阶地 ,这些河流阶地的发育年龄及构造抬升速率有待进一步与构造地貌参数进行对比分析。另外 ,反映构造作用常用的构造地貌参数还有面积高程积分、河流阶梯指数等 ,开展多种构造地貌参数的分析 ,也是下一步研究的重点。

参考文献(References)

- [1] Lee C S, Louis L T. A quantitative analysis for geomorphic indices of longitudinal river profile: a case study of the Choushui River, Central Taiwan[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 59(7): 1549 – 1558
- [2] Ferraris F, Firpo M, Pazzaglia FJ. DEM analyses and morpho-tectonic interpretation: the Plio – Quaternary evolution of the eastern Ligurian Alps, Italy[J]. *Geomorphology*, 2012, (149 – 150): 27 – 40
- [3] Wobus C, Whipple K X, Kirby E et al. Tectonics from topography: procedure, promise, and pitfalls[J]. *Geological Society American Special Paper*, 2006, 398: 55 – 74
- [4] Whipple K X. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens[J]. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 2004, (32): 151 – 185
- [5] Kirby E, Whipple K X, Tang W et al. Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau: inferences from bedrock channel longitudinal profiles[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(B4): 2217
- [6] Kirby E, Whipple K X. Expression of active tectonics in erosional landscapes[J]. *Journal of Structural Geology*, 2012, 44: 54 – 75
- [7] Ismail E H, Abdelsalam M G. Morpho-tectonic analysis of the Tekeze River and the Blue Nile drainage systems on the Northwestern Plateau, Ethiopia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2012, 69: 34 – 47
- [8] Brookfield M E. The evolution of the great river systems of southern Asia during the Cenozoic India – Asia collision: rivers draining southwards[J]. *Geomorphology*, 1998(22): 285 – 312
- [9] RAdoane M, RAdoane N, Dumitriu D. Geomorphological evolution of longitudinal river profiles in the Carpathians[J]. *Geomorphology*, 2003, 50: 293 – 306
- [10] Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 2001, 294: 1671 – 1677
- [11] Jia Yingying, Fu Bihong, Wang Yan et al. Late Cenozoic Tectono-geomorphic growth and drainage response in the Longmen shan fault zone, East margin of Tiber[J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(4): 825 – 836 [贾莹莹, 付碧宏, 王岩石, 等. 青藏高原东缘龙门山断裂带晚新生代构造地貌生长及水系响应[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(4): 825 – 836]
- [12] 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]
- [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[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(2): 299 – 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[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(2): 299 – 309]
- [14] Wang Yan, Liu Shaofeng, Gao Mingxing et al. Geomorphology of the Taohe River drainage system and its structural implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(4): 43 – 49 [王岩, 刘少峰, 高明星, 等. 洮河水系流域地貌特征及其构造指示意义[J]. *地质学前沿*, 2010, 17(4): 43 – 49]
- [15] Hu Xiaofei, Pan Baotian, Kirby E et al. Spatial difference in rock uplift rates inferred from channel steepness indices along the northern flank of the Qilian Mountain, northeast Tibetan Plateau[J]. *Chinese Sci Bull*, 2010, 55(23): 2329 – 2338 [胡小飞, 潘保田, Kirby E, 等. 河道陡峭指数所反映的祁连山北翼抬升速率的东西差异[J]. *科学通报*, 2010, 55(23): 2329 – 2338]
- [16] Ji Yapeng, Gao Hongshan, Pan Baotian et al. Implication of active structure in the upper reaches of Weihe river basin from stream length-gradient index(SL index) and Hack profile[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2011, 47(4): 1 – 6 [吉亚鹏, 高红山, 潘保田, 等. 渭河上游流域河长坡降指标 SL 参数与 Hack 剖面的新构造意义[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2011, 47(4): 1 – 6]
- [17] Cheng Sanyou, Wang Hongmei, Li Yingjie. Geomorphology Characteristics of the Wei River Basin and Its Formation Reasons[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2011, 27(3): 45 – 49. [程三友, 王红梅, 李英杰. 渭河水系流域地貌特征及其成因分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2011, 27(3): 45 – 49]
- [18] Yan Zhaokun, Liyong, Huang Runqiu et al. Geomorphic evolution process of Pingtong River watershed in the north Longmenshan, China[J]. *Mountain Research*, 2012, 30(2): 136 – 146. [颜照坤, 李勇, 黄润秋, 等. 龙门山北段平通河流域地貌演化过程[J]. *山地学报*, 2012, 30(2): 136 – 146]
- [19] Zhang Maosheng, Li Zhiheng, Wang Genlong et al. The geological hazard characteristics and exploration ideas of the Bailong River Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2011, 44(3): 1 – 9 [张茂省, 黎志恒, 王根龙, 等. 白龙江流域地质灾害特征及勘查思路[J]. *西北地质*, 2011, 44(3): 1 – 9]
- [20] Zhan Wenwu. The research of Engineering geological problems in the section of gansu province of Lanzhou – Haikou highway[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006: 8 – 44 [谯文武, 等. 兰州 – 海口高速公路甘肃段工程地质问题研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2006: 8 – 44]
- [21] Zhao Hongzhuang, Li Youli, Yang Jingchun et al. The longitudinal profiles of the Ten Rivers in North Tianhan Mountains and their tectonic significance[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(5): 563 – 570 [赵洪壮, 李有利, 杨景春, 等. 天山北麓河流纵剖面与基岩侵蚀模型特征分析[J]. *地理学报*, 2009, 64(5): 563 – 570]
- [22] Howard A D, Kerby G. Channel changes in badlands[J]. *Geological Society American Bulletin*, 1983, 94: 739 – 752
- [23] Whipple K X, Hancock G S, Anderson R A. River incisions into bedrock: Mechanics and relative efficacy of plucking abrasion, and cavitations[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2000, 112(3): 490 – 503
- [24] Flint J J. Stream gradient as a function of order, magnitude, and discharge[J]. *Water Resources Research*, 1974, 10: 969 – 973
- [25] Hack J T. Stream-profile analysis and stream-gradient index[J]. *Journal of Research of the U. S. Geological Survey*, 1973, 4: 421

- 429

- [26] Snyder N P, Whipple K X, Tucker G E, et al. Landscape response to tectonic forcing: Digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California [J]. Geological Society of American Bulletin, 2000, 112: 1250 - 1263
- [27] Zhang Huiping, Zhang Peizhen, Yuan Daoyang, et al. Differential landscape development of the central N-S seismic zone and its relation to the west Qinling tectonic belt [J]. Quaternary Science, 2010, 30(4): 803 - 811 [张会平, 张培震, 袁道阳, 等. 南北地震带中段地貌发育差异性及其与西秦岭构造带关系初探 [J]. 第四纪研究, 2010, 30(4): 803 - 811]
- [28] Li Zhiwu, Liu Shugen, Chen Hongde, et al. Structural segmentation and zonation and differential deformation across and along the Longmen thrust belt, West Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu university of technology: Science & Technology Edition, 2008, 35(4): 440 - 454 [李智武, 刘树根, 陈洪德, 等. 龙门山冲断带分段 - 分带构造格局及其差异变形特征 [J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2008, 35(4): 440 - 454]
- [29] Li Chuanyou, Song Fangmin, Ran Yongkang. Late quaternary activity and age constraint of the northern longmenshan fault zone [J]. Seismology And Geology, 2004, 26(2): 248 - 257 [李传友, 宋方敏, 冉永康. 龙门山断裂带北段晚第四纪活动性讨论 [J]. 地震地质, 2004, 26(2): 248 - 257]
- [30] Chen Lichun, Chen Jie, Liu Jinfeng, et al. Investigation of late quaternary activity along the northern range-front fault, longmenshan [J]. Seismology and Geology, 2008, 30(3): 710 - 722 [陈立春, 陈杰, 刘进峰, 等. 龙门山前山断裂北段晚第四纪活动性研究 [J]. 地震地质, 2008, 30(3): 710 - 722]
- [31] Deng Qidong, Chen Shefa, Zhao Xiaolin. Tectonics, seismisity and dynamics of Longmenshan mountains and its adjacent regions [J]. Seismology and geology, 1994, 16(4): 389 - 403 [邓起东, 陈社发, 赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学 [J]. 地震地质, 1994, 16(4): 389 - 403]
- [32] Duvall A, Kirby E, Burbank D. Tectonic and lithologic controls on bedrock channel profiles and processes in coastal California [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109: F03002.
- [33] Yuan Daoyang, Zhang Peizhen, Liu Baichi, et al. Geometrical imagery and Tectonic transformation of late Quaternary active Tectonics in Northeastern Margin of Qinghai - Xizang Plateau [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(2): 270 - 278 [袁道阳, 张培震, 刘百箴, 等. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换 [J]. 地质学报, 2008, 78(2): 270 - 278]
- [34] Yu Jingxing, Zheng Wenjun, Yuan Daoyang, et al. Late Quaternary active characteristics and slip-rate of pingding-huama fault, the eastern segment of guanggaishan-dieshan fault zone (West Qinling Mountain) [J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(5): 957 - 967 [俞晶生, 郑文俊, 袁道阳, 等. 西秦岭西段光盖山 - 迭山断裂带坪定 - 化马断裂的新活动性与滑动速率 [J]. 第四纪研究, 2012, 32(5): 957 - 967]
- [35] 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 [J]. Geophysics Res., 2003, 108(B2): 2117

Morpho-tectonic Analysis of the Bailongjiang Drainage Basin

CHANG Zhiyang^{1 3}, WANG Jian^{1 2}, BAI Shibiao^{1 2}, LIANG Zhong¹

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210046, China;

2. Key Laboratory of Virtual Geographical Environment (Ministry of Education), Nanjing Normal University, China;

3. Nanjing Institute of Tourism & Hospitality, Nanjing 211100, China)

Abstract: Geomorphic indices have been widely used for studying relative active tectonics. The research about tectonic activity can be quantified with the development of mathematical models for river and stream-power incision model. Bailongjiang drainage system is located in the transition area between Tibetan Plateau and West Qinling Mountain. There is little research about this drainage basin on that whether it is in a steady-state or what is the difference about the activity. We carry out a study on the longitudinal profile of the 32 rivers, by fitting the characteristics of the river longitudinal profile using four function patterns, and analyzing the evolution process of the 32 river's longitudinal profile based on the stream-power incision model. We can concluded that tectonic activity play an important role in this region's geomorphic indices and the upward-convex features of the profiles, the evolution phase of the river topographic form have not got to the steady state.

Key words: Bailongjiang; tectonic activity; longitudinal profile; stream-power incision model; concavity index; steepness indices