

文章编号: 1008-2786-(2018)3-470-12
DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000343

长江源区河网纵剖面分析

李贝贝^{1,2}, 李志威^{1,2*}, 胡旭跃², 余国安³

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 长沙 410114;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 101004)

摘 要: 长江源区河流的河网形态和辫状河型独具特色。基于 SRTM3 DEM、Landsat 4-5 TM 遥感影像和 Google Earth 卫星影像数据提取长江源区 22 条河流纵剖面, 利用简单数学函数拟合纵剖面形态, 并结合 Hack 剖面、凹曲指数及河长坡降 SL 指标等参数分析河流纵剖面的发育与构造活动之间的内在关系。研究表明: 长江源区大部分河流纵剖面的最佳拟合形态为指数函数 ($R^2 \geq 0.99$), 间接地说明该区域河流侵蚀作用较强。这 22 条支流的凹度值约为 1.0, 其中当曲的凹曲度最大, 色吾曲最小, 属于高凹曲度和极端凹曲度值。在各河流形态的统计结果中, 三大源流 Hack 剖面均为曲线, 沱沱河—通天河、当曲、楚玛尔河分别出现了 8 次、4 次、3 次宽窄交替的藕节状形态, 其中宽谷段为辫状河段, 窄段为峡谷限制段, 标准河流坡降指数 SL/K 值介于 2~10 之间, 表示河流发育处于微陡河段, 地区构造活动较强。不考虑气候和基岩性质影响因素, 可推测晚更新世以来新构造运动在长江源河流纵剖面演变中起主导作用。

关键词: 长江源; 河网; 纵剖面; 节点; 平面形态; 辫状河道

中图分类号: TV147

文献标志码: A

长江源地处西藏与青海交界的唐古拉山地区, 下边界为玉树巴塘河口, 数十万年以来, 该地区发育和形成了 8 条规模较大的高原河流, 包括沱沱河、楚玛尔河、当曲、通天河、布曲、冬曲、尕尔曲和北麓河, 其中以沱沱河—通天河为长江正源。长江源地区地势上南高北低、西高东低, 由于受区域地形和新构造运动的强烈影响^[1], 源区水系具有平行状水系格局, 河谷形态以窄谷和宽谷交替出现^[2], 分别对应河道节点和辫状河道。同时, 长江源区平均海拔 4500 m 以上, 自然条件恶劣, 针对此区的水系分布和河网形态的研究较少, 目前只是在多次长江源科学考察中才揭开长江源的起源和水系特点^[3]。

关于河流纵剖面的研究, 从 1870 年以来, Gilbert^[4]指出当河流达到了侵蚀与沉积的平衡状态,

此时的河流纵剖面为均衡纵剖面, 该成果对构造地貌学而言意义重大。1960 年代, 钱宁和周文浩^[5]在研究黄河下游纵剖面时发现, 纵剖面的变化与上游来水来沙是一个长期相互调整的过程。长江源区的纵剖面也是冲积河床对构造运动长期响应的结果, 其河流的纵剖面形态及其拟合特性可作为进一步研究长江源辫状河群的分布、形态与成因的基本变量^[6]。研究河流纵剖面, 不仅有助于了解河流发育过程, 也对解释阶地成因具有重要理论和实际意义。

构造活动对河流的形态、发育等有重要影响。近 10 余年, 采用纵剖面、Hack 剖面、凹曲度指数等参数来分析构造运动对地形演变的影响, 已成功应用于尼泊尔 Siwalik 山脉、Santa Ynez 山脉、美国 San Gabriel 山脉以及中国的祁连山脉、天山北麓、岷江、

收稿日期 (Received date): 2017-05-19; **改回日期** (Accepted date): 2018-04-15

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (91547112, 91647118, 41571009); 湖南省教育厅优秀青年项目 (16B010)。[National Natural Science Foundation of China (91547112, 91647118, 41571009); The Project for Excellent Youthful Teacher of Hunan Provincial Education Department (16B010)]

作者简介 (Biography): 李贝贝 (1995-), 女, 湖南衡阳人, 博士研究生, 主要从事河流动力学研究。[LI Beibei (1995-), female, born in Heng Yang, Hunan province, Ph. D. candidate, research on river dynamics] E-mail: 464159838@qq.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 李志威 (1984-), 男, 湖北云梦人, 副研究员, 主要从事河流动力学研究。[LI Zhiwei (1984-), male, born in Yun Meng, Hubei province, associate professor, research on river dynamics] E-mail: lzhiwei2009@163.com

龙门山北段平通河、洮河、渭河、黄河水系等。Kirby等^[7,8]提取并计算了整个青藏高原东缘的河流陡峭指数 K_s 及凹曲度,研究指出该地区地貌形态主要是受差异构造抬升作用所致,河流演化及流域地貌发育状态也可用河流纵剖面的拟合函数及凹度表示^[9]。Harkins^[10,11]、Qureshi^[12]利用河流坡降指数 SL 等对博德瓦尔高原地区进行了地形分析。国内学者在该领域也产生了诸多较重要成果,以宏观地形发育和水系平面展布等数据为基础,提取了青藏高原循化—贵德盆地黄河水系的纵剖面形态^[13],计算了鸭绿江望天鹤火山区河流裂点的溯源迁移速率,分析了南北地震带部分地貌演化特征^[14]。利用 Hack 剖面、河长坡降指标 (SL 参数) 以及 SL/K 指数等构造地貌参数及其流域面积 A —高程 H 积分值,分析了龙门山河流的地貌发育特征及构造运动^[15]。同时,也有研究表明,水系形态可用做研究地区构造变形活动的重要地貌标志之一,该方法适用于世界上其他构造活动区域^[16]。上述研究多侧重于一维地貌参数、半定量与基本的数字地形分析等,而对使用多地貌参数、地貌响应时间及地貌过程模拟的研究尚未成熟。

长江源辫状水系密布,空间尺度大小不同,河道形态变化万千,河道演变过程难以捕捉。该地区只有部分可接近的冲积河段(青藏公路两侧),而且缺少长系列的水文资料和高精度的河床地形数据^[17-20]。本文以 SRTM3 (Shuttle Radar Topography Mission) 雷达影像数据生成的数字高程模型 DEM (分辨率 90 m)、Landsat4-5TM 遥感影像和 Google Earth 卫星影像数据为基础,采用 GIS 空间分析技术,提取长江源区 22 条主要支流水系及其纵剖面形态,对其进行简单数学函数拟合,并计算河道纵剖面的凹曲指数 (concavity index)、河长坡降指标 (SL 参数)、标准河流坡降指数 (SL/K 指数)、坡度等地貌参数对该地区的构造活动、河流形态及演化特征进行分析,对研究该区域新构造演化过程提供了坚实可靠的依据。

1 研究区简介

长江源地质构造位于金沙江缝合带南侧的羌塘体北部,第四纪以来,已成为青藏高原构造活动性最活跃的地区之一。沱沱河的主要河流沿南北走向的地堑和正断层发育,如当曲、北麓河、莫曲等^[17,19,20]。晚更新世晚期,估计 35 kyrBP 切穿贯通通天河的盆

地,形成现代通天河^[18]。近期,Zheng 等人^[21]发现构造运动(青藏高原整体抬升、高原东南缘大型走滑运动及我国东部地区拉张凹陷)是长江源河流发育最重要的控制因素,河岸植被和河道水沙过程的相互作用在该地区河流演化的过程中也发挥重要作用^[20]。

水系形态能够记录构造活动模式。长江源区水系由三大源流组成,包括沱沱河、当曲和楚玛尔河,构成长江源区水系的基本格局,图 1 为长江源主要水系和 6 级河网分布。沱沱河—通天河右侧主要有支流当曲、莫曲、牙哥曲、科欠曲、宁恰曲、登艾龙曲、叶曲,左侧主要有支流扎木曲、日阿尺曲、北麓河、然池曲、楚玛尔河、色吾曲、德曲,共同组成了长江源的主要水系(图 2)。从长江源区整个水系格局来看,在中山和高山区,水系为平行式水系格局(如沱沱河坎巴钦以南上游段、布曲雁石坪以南等河段),这些地区为高山峡谷段,河道蜿蜒,比降也较大。由于它独特的地理位置和高海拔,其河道演变与其他类型的河流,如冲积平原河流、沙漠干旱区河流、极地寒带河流等,对比鲜明。综上所述,长江源区水系具有以下特点^[20-21]:(1)起源于冰川雪山,水系发达;(2)冲积河型为复杂且大型的卵石夹沙辫状河道;(3)大型河道形态受构造运动控制。

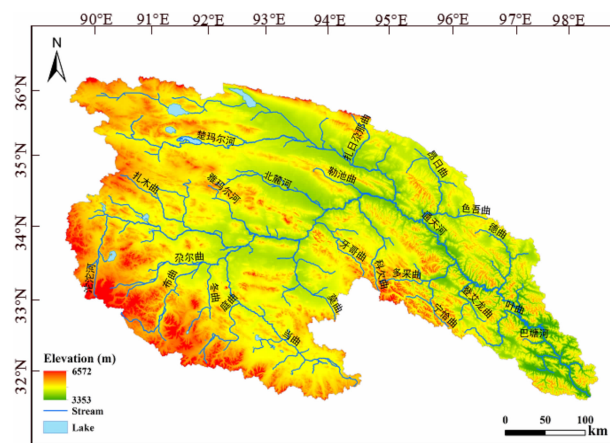


图1 长江源区位置与主要水系分布

Fig. 1 Location and main river system distribution of the Yangtze River source region

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文采用的数据来源于数字地形高程模型 DEM、Landsat4-5TM 遥感影像及 Google Earth 卫星

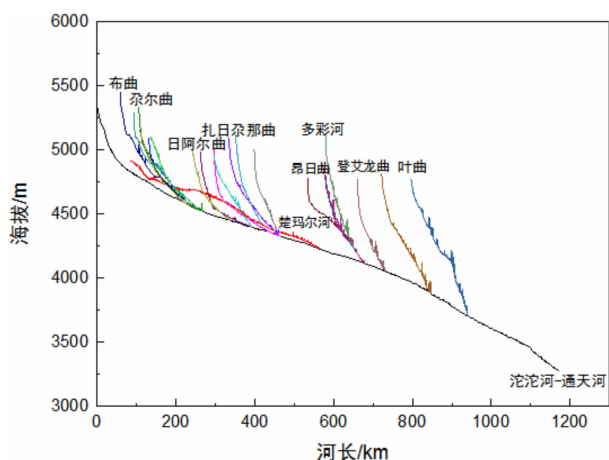


图2 长江源区水系纵剖面沿程分布

Fig. 2 Longitudinal profile distribution of river system along the Yangtze River source region

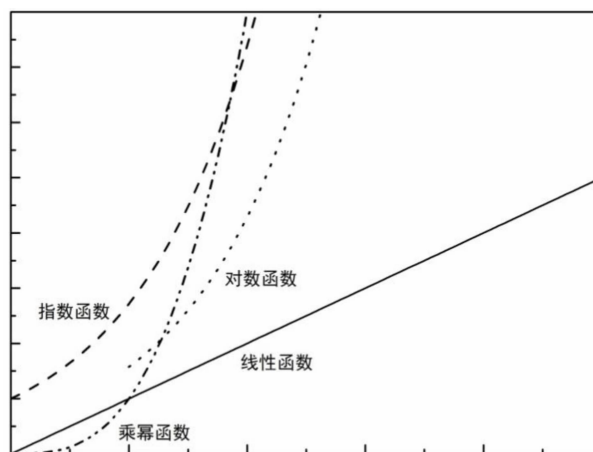


图3 四种简单拟合剖面形态示意图

Fig. 3 Sketch of 4 kinds of simple fitting profiles

影像数据,利用 GIS 技术提取研究区 22 条基岩河流长度、高程等,并结合 Origin 进行河床纵剖面拟合 (Nonlinear Curve Fit—非线性曲线拟合函数)。

2.2 河流纵剖面及函数拟合

河流纵剖面通常定义为从源头到河口沿着主流线将河床最低点相连成的剖面。随着河流不断地被下切侵蚀,纵剖面形态也处在不断的变化当中^[25]。近年来,利用简单数学函数(线性、指数、对数和乘幂函数)进行河流纵剖面拟合的研究发展迅速,不管是使用数值模型还是野外实测的拟合分析,均取得了良好效果。以下四式中 y 为河流纵剖面的高程, x 为纵剖面的长度, a 、 b 为常数^[31]。

$$y = a + bx \quad (1)$$

$$y = ae^{bx} \quad (2)$$

$$y = a \log x + b \quad (3)$$

$$y = ax^b \quad (4)$$

基于上述 4 种简单函数,陈彦桀^[24]认为在构造运动、气候变化等相对稳定的条件下,河流纵剖面凹曲程度的演化顺序为:线性→指数→对数→乘幂剖面(图 3)。具体过程如下:地表受到构造运动后,最初形成的纵剖面凹曲度较小;随着河流中上游侵蚀作用逐渐加强,纵剖面凹曲度增大而演化成指数剖面形态;若之后河流流量或输沙量增加,从而出现乘幂剖面形态^[9],此时纵剖面的形态发展与河流发育时间密切相关。

2.3 凹曲指数

简单来说,凹曲度指数是指纵剖面下凹的程度。不同学者对凹曲指数的计算方式不同,具体是指抛物线方程的指数 n ,如下:

$$h = H(l/L)^n \quad (5)$$

式中, h 为方程上某点的高程(m), H 为最高点高程(m), l 为某点距河口的距离(km), L 为纵剖面水平距离, n 即方程指数,为纵剖面形态指标。凹度反映了河段总体形态,而坡降体现纵剖面形态的细节。

Whipple^[25]把凹曲度分为四个区间段:低凹曲度(<0.4)、中凹曲度($0.4 \sim 0.7$)、高凹曲度($0.7 \sim 1.0$)、极端凹曲度(>1 或为负)。低凹曲度主要发生在下游侵蚀作用较强的河流。中等凹曲度主要出现在活跃造山带中河道基岩接近均质的河流。高凹曲度出现在河道基岩隆升或基岩强度愈往下游愈小的情形。极端凹曲度主要出现在沿河道基岩性质差异较大或由下切作用过渡到堆积作用的情形。

2.4 Hack剖面与河流坡降指数

1970 年代,Hack^[28]在研究美国河流时,指出河流纵剖面及河流坡降指数可以用下列方程表示:

$$H = C - K' \log(L) \quad (6)$$

$$SL = (\Delta h / \Delta L) L \quad (7)$$

式中, H 指河流纵剖面高程, K' 为直线斜率, L 为河口到某个微小河段的距离, C 为常数。

“直线状”Hack 剖面说明河流与地貌发育处于均衡状态(理想均衡剖面),是构造地貌发育的必然结果,此时 K 值即均衡坡降指数;“曲线状”Hack 剖面说明地貌发育处于非均衡状态,凸起程度的不同反映了构造活动的强弱。使用 SL 指数和 Hack 剖面刻画纵剖面局部河段坡度及整体变化特性,水系的形态异常会明显地反映在 SL 指数和 Hack 剖面上。为了对不同河流的 SL 指数进行比较,通常利用均衡坡降指数 K 对 SL 指数进行标准化,形成标准河流坡降指数 SL/K 。Seeber and Gornitz^[30]在分析喜马

拉雅地区各河流的坡降指标时,指出在相对于理想剖面时,若 SL/K 小于 2,表明河流发育接近于均衡阶段; SL/K 值介于 2~10 之间为微陡河段; SL/K 大于 10,则为极陡河段。

3 研究结果

3.1 河流纵剖面提取与函数拟合

为了完整分析长江源区河流的纵剖面形态特征,本文计算了各支流凹曲指数、坡降等基本参数,统计结果见表 1。

河流纵剖面反映了地势的高低与岩石抬升速率的快慢^[32],以下 6 条河流纵剖面形态均呈现出不一样的凹曲程度(图 4),主要原因是河流上游段主要是水流的汇集区和地表的侵蚀区,以溯源侵蚀为主,坡度较陡,下游为沉积区,中游地区则是两者的过渡区。在本文研究的河流纵剖面拟合中,22 条河流中最佳拟合函数有对数、指数和乘幂函数,并且以指数函数为主(20 条),对数函数 1 条,幂函数 1 条,判定系数 R^2 均大于 0.99,拟合程度较好,间接表明该地区河流发育处于侵蚀作用强烈的壮年期。

影响纵剖面形态的主要因素有气候、基岩类型和构造运动等。首先,长江源区属高寒半干旱气候,水系水量主要是由降水及冰川融水供给,年平均降雨量变化不大,气候因素不是主导因素。就基岩类

型而言,长江源区流域基岩性质复杂,各河流抗侵蚀能力不同,不能仅用基岩性质来说明纵剖面的形态特征。就区域构造运动而言,长江源区构造活动强烈,由于河流下切侵蚀,溯源侵蚀作用的减弱,河道下凹程度较大,纵剖面拟合形态趋向于指数函数。其中沱沱河、楚玛尔河相对于其他河流拥有足够长的时间调整自身纵剖面形态,最佳拟合函数为对数、乘幂函数。因此,新构造运动在长江源河流发育演化中起主要作用,而其他因素则起到次要作用。

3.2 河流凹度分析

一般而言,河流发育时间越长,纵剖面下凹程度越大;反之,下凹程度就越小^[25]。本文统计了长江源区 22 条河流的凹曲值(图 5),其中当曲凹曲指数最大为 1.59,色吾曲最小为 0.72,其他支流凹曲度均在 1.0 左右。根据 Whipple^[27] 的划分,长江源区河流凹曲指数 n 值均属于高凹度值和极端凹度值,凹度指数与河流纵剖面的形态特征一一对应,这些特征主要是由该地区强烈的构造活动,下游基岩强度逐渐减弱等因素所控制。

3.3 河流坡降与平面形态的关系

长江源的冲积河型以辫状河道为主导,平面形态破碎,从目前来看运用平面几何和河流动力学均难以准确解释其内在演变规律^[21]。从单个河流来说,河流平面形态特点之一,是河道平面出现多次宽窄相间的藕节状形态;其二是河流平面形态在短距

表 1 长江源区水系纵剖面基本参数

Tab. 1 Basic parameters of longitudinal profile in the Yangtze River source region

河流名称	平均坡降 $S/\%$	最佳拟合函数	R^2	河流名称	平均坡降 $S/\%$	最佳拟合函数	R^2
沱沱河— 通天河	0.26	对数函数 指数函数	0.999 0.998	然池曲	0.92	指数函数	0.999
当曲	0.19	指数函数	0.995	扎日朶那曲	0.90	指数函数	0.999
布曲	0.49	指数函数	0.995	科欠曲	0.53	指数函数	0.999
朶尔曲	0.54	指数函数	0.998	多彩曲	1.22	指数函数	0.999
扎木曲	0.45	指数函数	0.999	昂日曲	0.43	指数函数	0.994
庭曲	0.49	指数函数	0.995	色吾曲	0.71	指数函数	0.999
日阿尔曲	0.51	指数函数	0.998	宁恰曲	0.69	指数函数	0.998
莫曲	0.43	指数函数	0.997	德曲	0.80	指数函数	0.997
楚玛尔河	0.15	乘幂函数	0.989	登艾龙曲	1.27	指数函数	0.998
北麓河	0.40	指数函数	0.999	叶曲	0.81	指数函数	0.998
牙哥曲	0.54	指数函数	0.999				

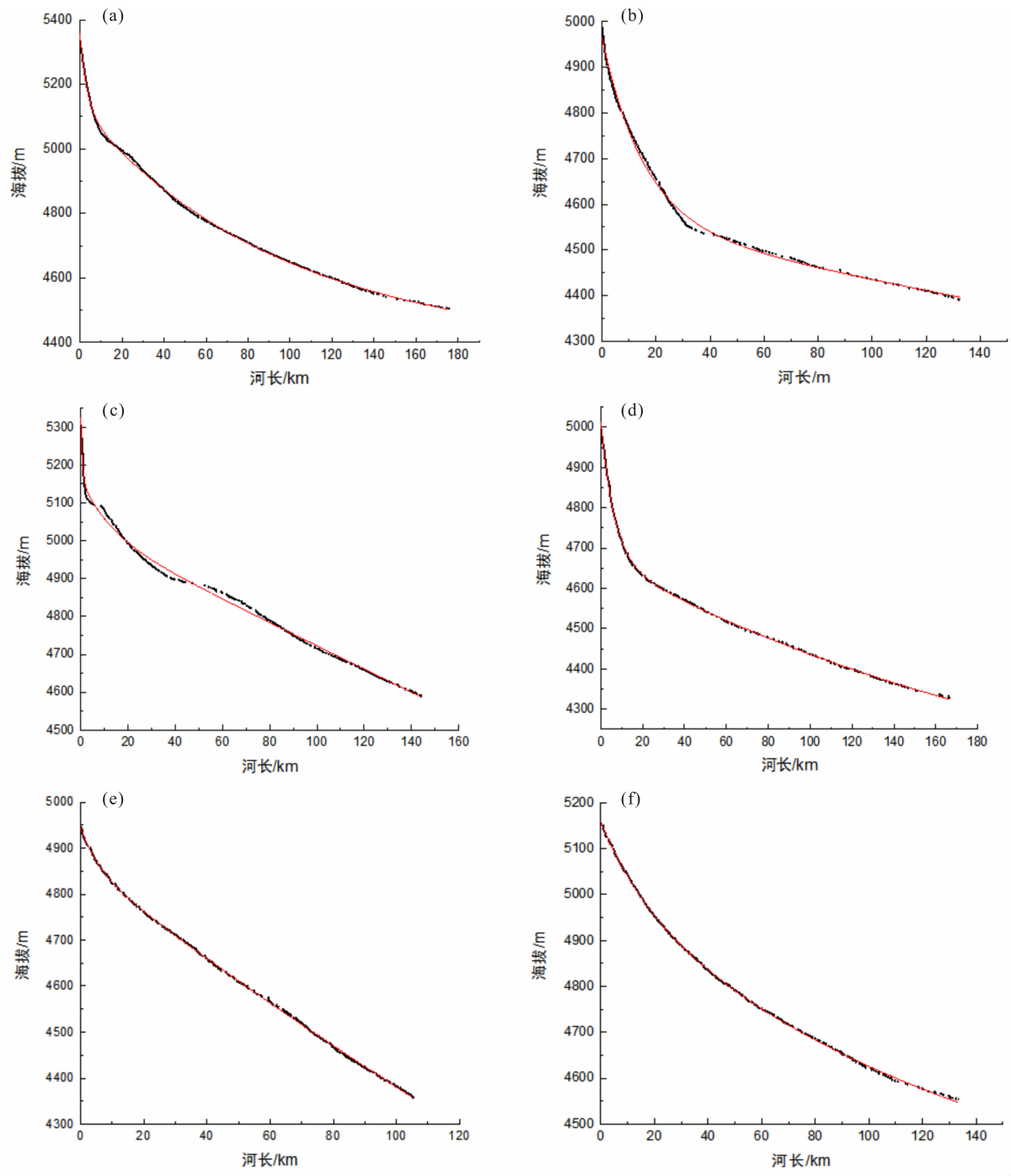


图4 河流纵剖面及拟合曲线

(a) 尕尔曲;(b) 莫曲;(c) 庭曲;(d) 北麓河;(e) 牙哥曲;(f) 扎木曲

Fig.4 River longitudinal profile and fitting curve

(a) Gaerqu River; (b) Moqu River; (c) Tingqu River; (d) Beilu River; (e) Yage River; (f) Zamu River

离内可快速变化,呈“直角状”和不规则的“锯齿状”,如在改纳一曲桑钦段,当曲在南北 30 km 范围内,河流流向发生 4 次大的变化,平面上总体呈反“Σ”形态,出现这种快速变化河道形态的主要原因是河道流路受制于地形限制和新构造作用,甚至青藏高原抬升影响。

3.3.1 沱沱河—通天河纵剖面分析

沱沱河—通天河的两侧支流具有平行状水系格局^[23],平均坡降为 2.6‰,其坡降呈现先陡后缓再陡的特点,是因为沱沱河在流出冰川源头 25 km 后,经历一段 5.3 km 的陡峭峡谷,河段坡降局部有微小变化。沱沱河—通天河 Hack 剖面为曲线状,说明

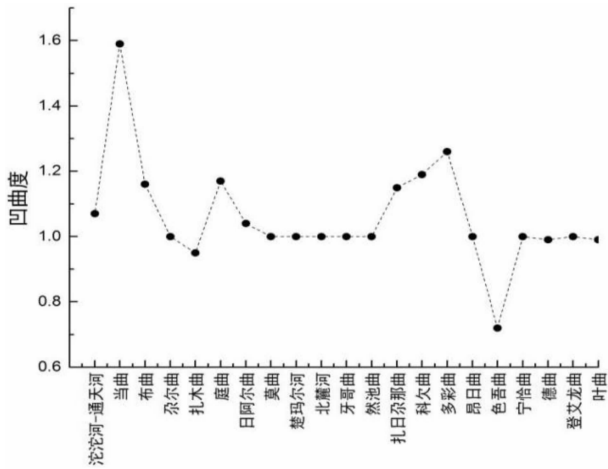


图5 长江源区支流凹曲指数分布

Fig. 5 Concavity index distribution of the Yangtze River source region

构造地貌发育处于非均衡状态。本文按照垂直间距(15 m)对纵剖面进行采样并计算河长坡降指标(SL 指数)和标准河流坡降指数(SL/K 指数)值,结果如下:均衡坡降指数 K 为517, SL 值为3045, SL/K 值为5.89。根据Seeber and Gornitz^[30]坡降指标分析, SL/K 值介于2~10之间,表明沱沱河—通天河发育处于微陡河段,该地区构造活动较强。

纵剖面上节点可简单表示为局部的收缩,亦或是一个交汇点。在沱沱河—通天河统计河段中,河道出现了8次宽窄交替的藕节状形态(图6、图7),呈现出一个宽谷河段紧跟一个窄谷段的情形,宽谷河段与辫状、分汊河型对应,窄谷河段与弯曲河型对应。其中每个窄谷河段作为一个节点,对河道走向和维持上游辫状河型、防止下游泥沙下泄起着控制作用^[20-21]。第1次节点出现在沱沱河发源地格拉丹东冰川附近(33°37′42″N,90°59′43″E),其余节点

在辫状、分汊、弯曲型河段均有出现(图6(b)中所示节点与图7一一对应),特别是辫状、弯曲河段(通天河)偏多,主要是河谷宽窄不一、河床比降差异及泥沙粒径细等原因造成的。同时,沱沱河—通天河两侧支流的入汇也加剧了辫状河型的发育。

3.3.2 当曲纵剖面分析

当曲是长江南源,是三大源流中径流量最大的河流,平均坡降为1.9‰,其坡降呈现先陡后缓再陡的变化(图8)。主要是因为当曲从高山下来要经历一段峡谷,再流经一片高原湖泊湿地。当曲Hack剖面为曲线状,说明构造地貌发育还未达到均衡状态。本文计算当曲均衡坡降指数 $K=157$, $SL=620$, $SL/K=3.95$ 。与沱沱河—通天河类似, SL/K 值介于2~10之间,说明当曲发育处于微陡河段,该地区构造活动较强。在统计过程中,当曲河道平面呈现出了4次宽窄相间的藕节状形态(图8、图9),其中第1次出现在上游(33°37′57″N,92°47′00″E)处,图8(b)中所示节点与图9一一对应。当曲流经分汊河段时,河道处在峡谷中,时有沙洲出现,河道较窄;流经辫状河段时,河道宽阔多汉流,河谷植被覆盖良好;流经弯曲河段时,河道处在峡谷,两岸山体植被覆盖较好。

3.3.3 楚玛尔河纵剖面分析

楚玛尔河是长江北源,发源于可可西里山黑脊山南麓,河流含沙量比较大,河床平均坡降为1.5‰。本文统计河床纵向坡降时发现有几处突变,如一处弯道顶部(35°11′44″N,92°38′43″E),大体呈现先缓—陡—缓的变化(图10),主要是经过多尔改错后,楚玛尔河先流经一片面积较大高原湖泊湿地,再经历一段峡谷段,最后流经风沙区和宽谷区的原

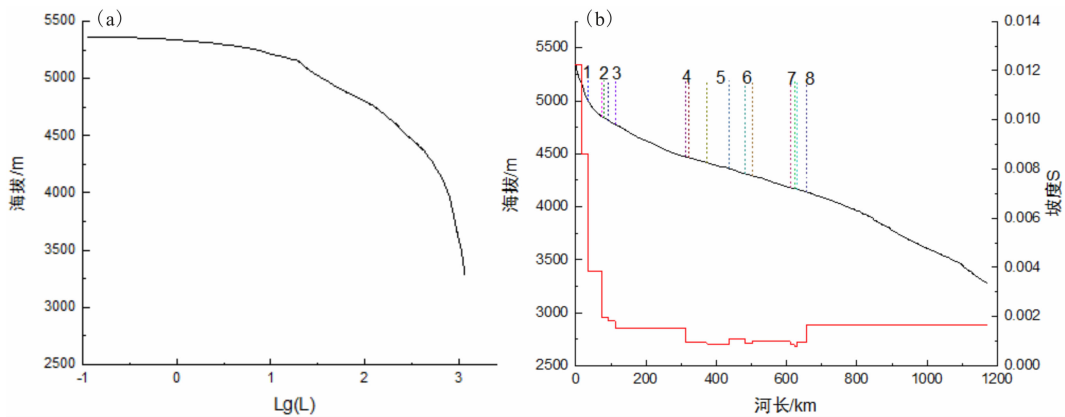


图6 (a) 沱沱河—通天河 Hack 剖面; (b) 沱沱河—通天河纵剖面(以节点分段)

Fig. 6 (a) Hack profile of Tuotuo river and Tongtian river;

(b) Longitudinal profile of Tuotuo river and Tongtian river (nodes' subsection)

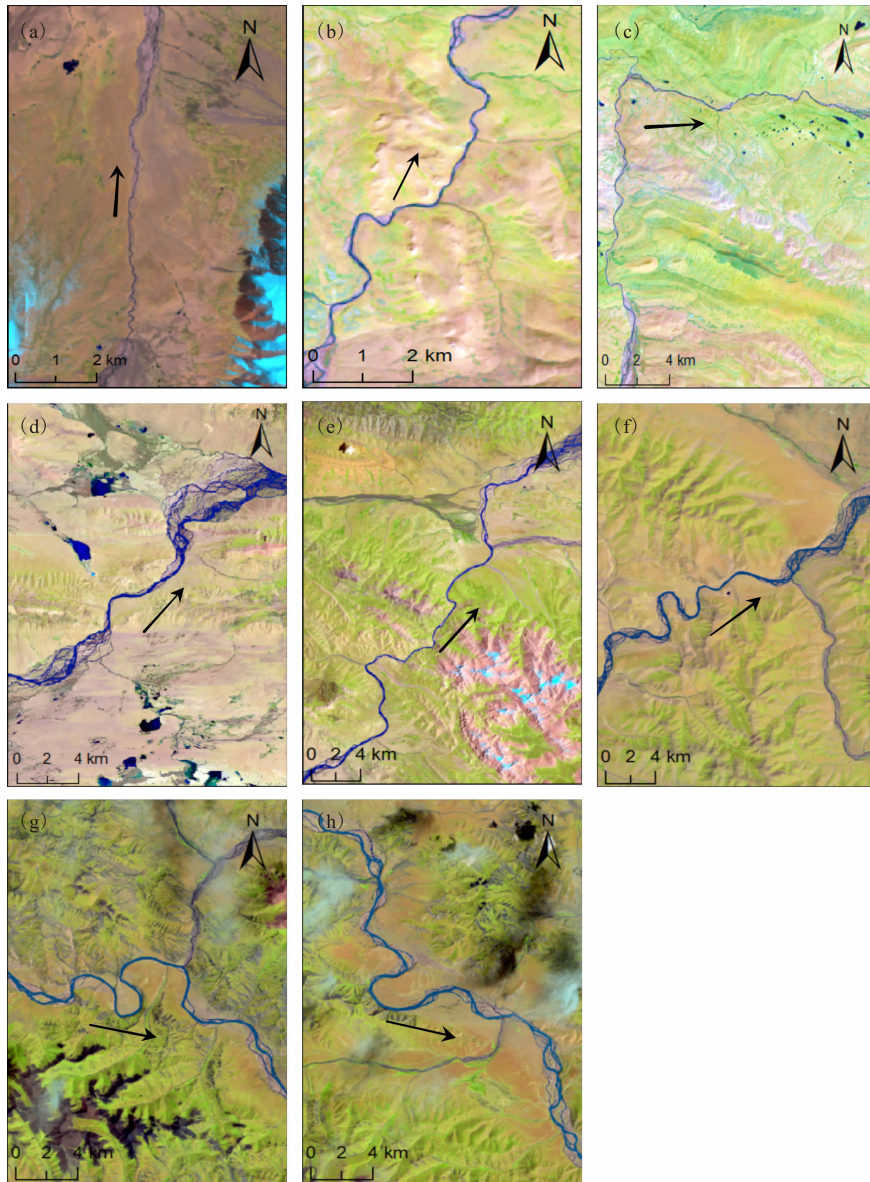


图7 沱沱河—通天河节点段 Landsat 遥感影像

(a) $33^{\circ}37'42''\text{N}90^{\circ}59'43''\text{E}$ (1999 年 9 月 28 日); (b) $34^{\circ}06'37''\text{N}91^{\circ}03'56''\text{E}$; (c) $34^{\circ}19'44''\text{N}91^{\circ}05'32''\text{E}$ (2001 年 10 月 3 日); (d) $34^{\circ}08'53''\text{N}93^{\circ}01'30''\text{E}$; (e) $34^{\circ}19'12''\text{N}93^{\circ}51'27''\text{E}$ (2001 年 7 月 8 日); (f) $34^{\circ}40'20''\text{N}94^{\circ}23'41''\text{W}$; (g) $34^{\circ}29'08''\text{N}95^{\circ}19'44''\text{E}$; (h) $34^{\circ}13'16''\text{N}95^{\circ}34'07''\text{E}$ (1998 年 9 月 19 日)

Fig. 7 Landsat images for nodes' subsection of Tuotuo - tongtian River

(a) $33^{\circ}37'42''\text{N}90^{\circ}59'43''\text{E}$ (Sep. 28 1998); (b) $34^{\circ}06'37''\text{N}91^{\circ}03'56''\text{E}$; (c) $34^{\circ}19'44''\text{N}91^{\circ}05'32''\text{E}$ (Oct. 3 2001); (d) $34^{\circ}08'53''\text{N}93^{\circ}01'30''\text{E}$; (e) $34^{\circ}19'12''\text{N}93^{\circ}51'27''\text{E}$ (July 8 2001); (f) $34^{\circ}40'20''\text{N}94^{\circ}23'41''\text{E}$; (g) $34^{\circ}29'08''\text{N}95^{\circ}19'44''\text{E}$; (h) $34^{\circ}13'16''\text{N}95^{\circ}34'07''\text{E}$ (Sep. 19 1998)

因。结果表明,楚玛尔河的均衡坡降指数 $K = 182$, $SL = 727$, 即标准河流坡降指数 $SL/K = 3.99$ 。楚玛尔河 Hack 剖面为曲线,与沱沱河—通天河、当曲相似,说明河流发育还未达到均衡状态,处于微陡河段。在整个 338 km 的统计过程中,河道出现了 3 次宽窄交替的藕节状形态,第 1 次出现在入汇口附近处 ($35^{\circ}01'24''\text{N}, 94^{\circ}39'38''\text{E}$), 图 10(b) 中所示节点

与图 11 一一对应。楚玛尔河的弯曲河段不限于峡谷段,也会出现自然裁弯遗留下的牛轭湖。当楚玛尔河流经分汊河段时,河道处在峡谷中,河道较窄且时有稳定沙洲出现;流经辫状河段时,河道宽阔,泥沙粒径细且含沙量极大,这与该地区河谷风沙运动有密切关系^[21]。

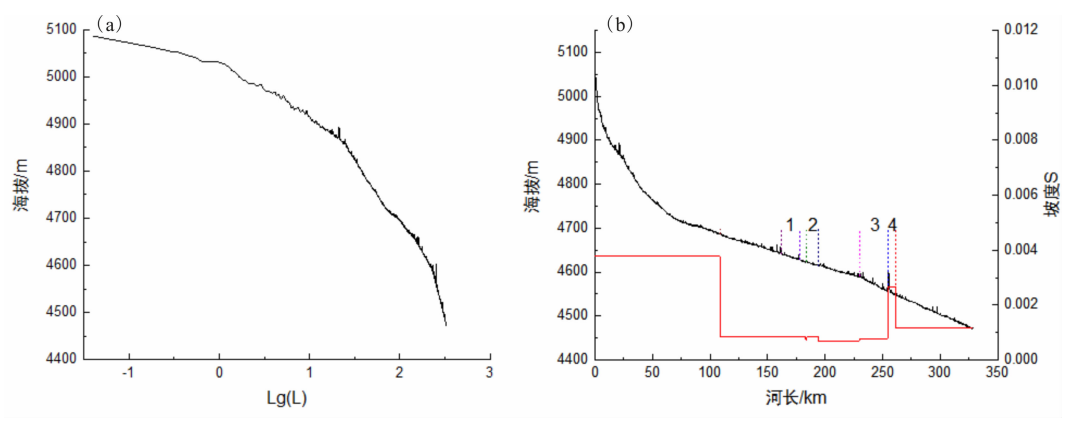


图8 (a) 当曲 Hack 剖面; (b) 当曲纵剖面(以节点分段)
Fig.8 (a) Hack profile of Dangqu River; (b) Longitudinal profile of Dangqu River (nodes' subsection)

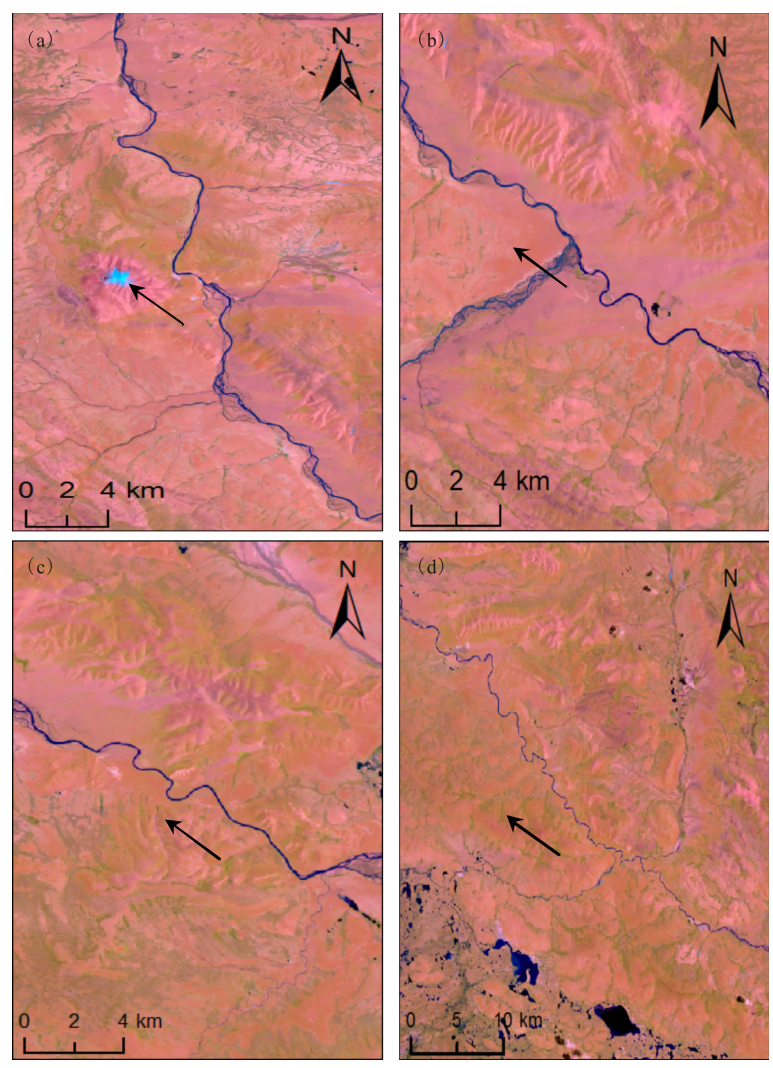


图9 当曲节点段 Landsat 遥感影像
(a) 33°37'57"N92°47'00"E; (b) 33°28'05"N92°56'22"E; (c) 33°21'30"N93°09'39"E; (d) 33°06'21"N93°30'14"E (2001 年 7 月 8 日)
Fig.9 Landsat images for nodes' subsection of Dangqu River
(a) 33°37'57"N 92°47'00"E; (b) 33°28'05"N 92°56'22"E; (c) 33°21'30"N 93°09'39"E; (d) 33°06'21"N 93°30'14"E (July 8 2001)

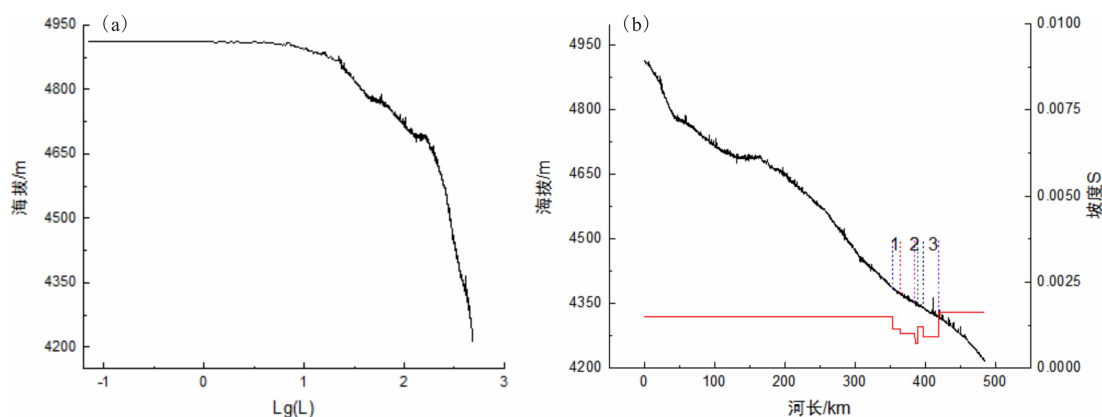


图 10 (a) 楚玛尔河 Hack 剖面; (b) 楚玛尔河纵剖面(以节点分段)

Fig. 10 (a) Hack profile of Chumaer river; (b) Longitudinal profile of Chumaer River (nodes' subsection)

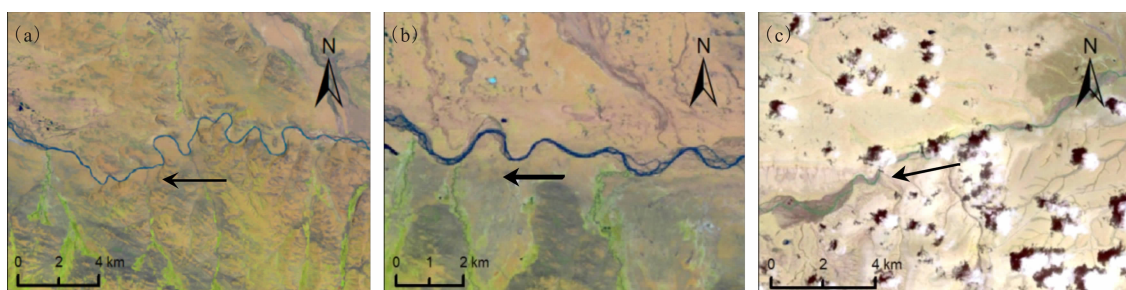


图 11 楚玛尔河节点段 Landsat 遥感影像

(a) 35°01'24"N 94°39'38"E; (b) 35°02'25"N 94°27'34"E (1998 年 9 月 19 日); (c) 35°13'02"N 94°02'16"E (2001 年 7 月 8 日)

Fig. 11 Landsat images for nodes' subsection of Chumaer River

(a) 35°01'24"N 94°39'38"E; (b) 35°02'25"N 94°27'34"E (Sep. 19 1998); (c) 35°13'02"N 94°02'16"E (July 8 2001)

4 结论

研究河流纵剖面的凹凸形态对于了解河道基岩形态、构造运动及流域演化等多种影响因子的特征具有重要意义。综合前人对长江源区的气候、基岩类型和构造运动等方面的分析,认为在长江源区内,河流纵剖面的形态变化受构造运动作用的影响显著。本文分析了长江源区河流对构造运动响应的基本特征及空间差异性,获得以下 3 点主要认识:

(1) 为完整分析长江源区河网的纵剖面形态特征,本文利用 GIS 技术提取了研究区 22 条河流纵剖面,拟合结果得出有 20 条支流纵剖面最佳拟合形态为指数函数,1 条拟合为对数函数(沱沱河),1 条拟合为幂函数(楚玛尔河)。推测出现上述情况主要是由于河流下切侵蚀,溯源侵蚀作用的减弱及与河流发育时间有关。22 条支流纵剖面的凹凸值均在 1.0 左右,属于高凹凸度及极端凹凸度值,主要是该地区的构造活动较强烈,下游基岩强度逐渐减弱

等原因所造成。

(2) 长江源区的冲积河型以辫状河道为主导,就河流坡降及河流平面形态而言,本文主要分析了长江源区水系的三大源流。三大源流 Hack 剖面均为曲线,在各河流的统计结果中,其中分汊河段、辫状河段、弯曲河段都有出现宽窄相间的藕节状形态,标准河流坡降指数 SL/K 值介于 2 ~ 10 之间,可知河流发育还未达到均衡状态,均处于微陡河段。

(3) 长江源区河流的纵剖面形态特征反映了自晚更新世晚期以来,河流的演化进程随着时间的推移主要表现为壮年期特征。源区冲积河流的发育、演化与地貌地质、气象水文及泥沙等多因子有关,本文初步分析形成目前辫状河型的原因主要有河床比降差异、泥沙粒径组成及河谷宽窄不一等。长江源河流演变机理复杂,使用不同时间、空间尺度去探究河道复杂形态动力学规律,如地貌过程模拟等方法,以及面临未来全球气候变暖导致河流来水量锐减后,如何预测河道演变趋势,该问题极具挑战。

参考文献 (References)

- [1] LU Xixi, ZHANG Shurong, XU Jianchu. Climate change and sediment flux from the roof of the world [J]. *Earth Surface Process and Landforms*, 2010, **35**(6): 732–735
- [2] PAN Baozhu, WANG Zhaoyin, LI Zhiwei, et al. An exploratory analysis of benthic macroinvertebrates as indicators of the ecological of the upper Yellow and Yangtze Rivers [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, **23**(5): 871–882
- [3] WU Shanshan, YAO Zhijun, HUANG Heqing, et al. Glacier retreat and its effect on stream flow in the source region of the Yangtze River [J]. *Journal of Geographical Science*, 2013, **23**(5): 849–859
- [4] YU Guoan, BRIERLEY G, HUANG Heqing, et al. An environmental gradient of vegetative controls upon channel planform in the source region of the Yangtze and Yellow Rivers [J]. *Catena*, 2014, **119**(119): 143–153
- [5] 钱宁, 周文浩. 黄河下游河床演变 [M]. 北京: 科学出版社, 1965 [QIAN Ni, ZHOU Wenhao. *Riverbed evolution in lower reaches of the Yellow River* [J]. Beijing: Science Press, 1965]
- [6] YAN P, DONG G R, SU Z Z, et al. Desertification in problems in the Yangtze River source area, China [J]. *Land Degradation and Development*, 2004, **15**(2): 177–182
- [7] KIRBY E, WHIPPLE K X, TANG W, et al. Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau: inference from bedrock channel longitudinal profile [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(B4): 1–24
- [8] KIRBY E, OUMMENT W. Tectonic geomorphology along the eastern margin of Tibet: insights into the pattern and processes of active deformation adjacent to the Sichuan basin [J]. *Geological Society of London Special Publications*, 2011, **353**(1): 358–361
- [9] 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 [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]
- [10] HARKINS N, ANASTASIS D J, PAZZAGLIA F J. Tectonic geomorphology of the Red Rock fault, insights into segmentation and landscape evolution of a developing range front normal fault [J]. *Journal of Structure Geology*, 2005, **27**(11): 1925–1939
- [11] HARKINS N, KIRBY E, HEIMSATH A, et al. Transient fluvial incision in the headwaters of the Yellow River, northeastern Tibet, China [J]. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2007, **112**(F3): 1–21
- [12] AHMAD S. DEM based geomorphic analysis along kalabagh fault and poetwar plateau to constrain surface deformation: inferences from remote sensing and GIS [J]. *Pakistan Journal of Science*, 2012, (2): 108–117
- [13] 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 [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): 300–309]
- [14] 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**(6): 803–811 [ZHANG Huiping, ZHANG Peizhen, YUAN Daoyang, et al. Differences of geomorphic development in the middle segment of North South seismic belt and its relation to West Qinling Mountains tectonic belt [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, **30**(6): 803–811]
- [15] 赵国华, 李勇, 颜坤, 等. 龙门山中段山前河流 Hack 剖面面积-高程积分的构造地貌研究 [J]. *第四纪研究*, 2014, **34**(2): 302–311 [ZHAO Guohua, LI Yong, YAN Kun, et al. Tectonic geomorphology of the Hack section and area elevation integral of the pre stream River in the middle section of Longmen mountain [J], *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(2): 302–311]
- [16] 贾营营, 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 [JIA Yingying, FU Bihong, WANG Yanshi, et al. Late Cenozoic tectonic geomorphic growth and water system response of the Longmen Mountain Fault Zone on the eastern margin of the Tibetan Plateau [J], *Quaternary Sciences*, 2010, **30**(4): 825–836]
- [17] 赵洪菊, 贾小龙, 王永贵, 等. 长江源区新构造运动特征分析 [J]. *西北地质*, 2010, **43**(1): 60–65 [ZHAO Hongju, JIA Xiaolong, WANG Yonggui, et al. Analysis of neotectonics movement characters in the source region of the Yangtze River [J]. *Northwestern Geology*, 2010, **43**(1): 60–65]
- [18] 段志明, 李勇, 李亚林, 等. 青藏高原北部温泉活动沉积盆地的沉积特征及其地质意义 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2005, **25**(1): 180–188 [DUAN Zhiming, LI Yong, LI Yalin, et al. Sedimentary characteristics in the Wenquan Basin on the northern Qinghai-Xizang Plateau and their geological implications [J], *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2005, **25**(1): 180–188]
- [19] 李亚林, 王成善, 王谋, 等. 藏北长江源地区河流地貌特征及其对新构造运动的响应 [J]. *中国地质*, 2006, **33**(2): 374–382 [LI Yalin, WANG Chengshan, WANG Mou, et al. Morphological features of river valleys in the source region of the Yangtze River, northern Tibet, and their response to neotectonic movement [J], *Geology in China*, 2006, **33**(2): 374–382]
- [20] 李志威, 余国安, 徐梦珍, 等. 青藏高原河流演变研究进展 [J]. *水科学进展*, 2016, **27**(4): 617–628 [LI Zhiwei, YU Guoan, XU Mengzhen, et al. Progress in studies on river morphodynamics in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Advances in Water Science*, 2016, **27**(4): 617–628]
- [21] 李志威. 三江源河床演变与湿地退化机制研究 [D]. 北京: 清华大学, 2013: 11. [LI Zhiwei. *Fluvial Processes and wetland Degradation Mechanism of the Sanjiangyuan Source* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013: 11]
- [22] ZHENG H, CLIFTP D, WANG P, et al. Pre-Miocene birth of the

- Yangtze River [J]. PANS, 2013, **110**(19):7556–7561
- [23] 史立人. 江源地区的河流及其发育 [J]. 长江志季刊, 2001, (3):95–108. [SHI Liren. Rivers and their development in the source area of the Yangtze River [J], Annals of the Yangtze River, 2001, (3):95–108]
- [24] ZHANG Shifeng, HUA Dong, MENG Xiujing, et al. Climate change and its driving effect on the runoff in the “Three-River Head waters” region [J]. Journal of Geographical Science, 2011, **21**(6):963–978
- [25] 李奋生, 赵国华, 李勇, 等. 青藏高原东缘的隆升及其水系的响应 [J]. 长江流域资源与环境, 2016, **25**(3):420–428 [LI Fensheng, ZHAO Guohua, LI Yong, et al. The uplift of the Tibetan Plateau and the drainage response [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, **25**(3):420–428]
- [26] 毕丽思, 何宏林, 徐岳仁, 等. 霍山山前断裂带冲沟纵剖面数学拟合函数的构造响应特征 [J]. 中山大学学报, 2014, **53**(6):38–44 [BI Lisi, HE Honglin, XU Yueren, et al. Mathematical functions fitting to the longitudinal profiles of the Gullies across the Huoshan piedmont fault and their response to the Tectonic Movement [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2014, **53**(6):38–44]
- [27] WHIPPLE K X. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens [J]. Annual Review of Earth Planetary Sciences, 2004, **32**(1):151–185
- [28] HACK J T. Stream-profile analysis and stream-gradient index [J]. Journal of Research of the U. S. Geological Survey, 1973, **1**(4):421–429
- [29] YU G A, LIU Le, Li Zhiwei, et al. Fluvial diversity in relation to valley setting in the source region of the Yangtze and Yellow Rivers [J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, **23**(5):817–832
- [30] SEEBER L, GORNITZ V. River profile along the Himalayan arc as indicators of active tectonics [J]. Tectonophysics, 1983, **92**(4):335–337
- [31] 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 [HU X F, PAN B T, Kirby E, et al. Spatial differences in rock uplift rates inferred from channel steepness indices along the northern flank of the Qilian Mountain, northeast Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, **55**(23):2329–2338]
- [32] 戴岩, 王先彦, 王胜利, 等. 地貌形态指数反映的青藏高原东北部宛川河流域新构造活动 [J]. 地理学报, 2016, **71**:412–421 [DAN Yan, WANG Xianyan, WANG Shengli, et al. The neotectonic activity of Wanchuan catchment reflected by geomorphic indices [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, **71**(3):412–421]

Longitudinal Profile of River Networks in the Yangtze River Source Region

LI Beibei^{1,2}, LI Zhiwei^{1,2*}, HU Xuyue², YU Guoan³

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China;

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The geometrical morphology of river network and braided rivers in the source region of Yangtze River is unique and distinctive. In this study, the longitudinal profiles of 22 rivers in the source region of the Yangtze River were extracted which were based on SRTM3 DEM (resolution 90 m), the Landsat 4–5 TM remote sensing image, and Google Earth satellite imagery data, and a simple mathematical function (linear, exponential, logarithmic, and power function) was used to fit the longitudinal profiles, and the internal relationship between tectonic activity and development of different river longitudinal profile was analyzed based on the Hack profile, concavity index, and river slope parameter SL index etc. The results showed that the best fitting shape of the most river longitudinal profile in the source region of Yangtze River was exponential function ($R^2 \geq 0.99$), which confirmed that the riverbed erosion was much strong in this area indirectly. The concavity index value of the 22 branches were about 1.0, which Dangqu River was the largest, and Sewuqu River was the lowest. Thus, the concavity index corresponded to the morphological characteristics of the longitudinal profile of the river, belonging to the high and extreme value. In the statistical results of the river morphology, all Hack profiles of the three sources were curves

and the Tuotuo-Tongtian River, Dangqu River and Chumaer River were respectively appeared 8 times, 4 times, and 3 times of the torose form with alternate width where the broad valley was the braided river and the canyon was confined section. The standard river slope index SL/K was between 2 ~ 10, indicating that the river was in the steep river and the tectonic activity was strong. Except the influence of climate change and bedrock properties, the new tectonic movement had played a leading role in the longitudinal profile evolution of the Yangtze River since the late Pleistocene.

Key words: Yangtze River source; river networks; longitudinal profile; channel node; plane morphology; braided channel