

# 长江源地区通天河段水系格局演化与构造活动的关系

于 洋,王先彦,李一泉,戴 岩,鹿化煜

(南京大学地理与海洋科学学院,南京 210023)

**摘要:** 青海玉树地区长江源区通天河段构造运动活跃,地震频发,如2010年曾发生7.1级地震;该地区分布有黄河、雅鲁江、澜沧江等水系上游河网,水系呈直角状、倒勾状分布,是研究水系演化与新构造活动关系的理想区域。通过地形分析、河流水系分析和地貌指数计算,探讨了该地区水系格局演化对走滑断层相关构造活动样式的响应过程。该地区主要发育北西—南东和南西—北东两组流向的水系,其中北西—南东向河谷多为低河流比降、宽阔的不适称谷地,而南西—北东向河谷多为高河流比降、陡峭的峡谷。河流陡峭度指数( $k_r$ )在通天河东南段为高值,在通天河流域西南段多采曲—宁恰曲流域、登艾龙曲流域、叶曲流域、巴塘河流域为低值;河流坡降指数(SL)在流域内整体差异不大,但在水系倒勾状或直角交汇区域的值高;流域高程积分值(HI)在通天河两侧大于0.45,在多采曲—宁恰曲流域、登艾龙曲流域、叶曲流域、巴塘河流域为0.15~0.45。地形、水系和地貌指数的分布特征表明该地区水系可能原为南东流向的平行水系,后期由于走滑断裂剪切作用导致河流改向、袭夺而演化为倒勾状水系。其中当江、立新乡、隆宝镇、上拉秀乡北部等地区断陷形成局部积水中心,而通天河南西—北东向细小支流如宁恰曲等由于断层东北向的逆冲抬升而溯源侵蚀加强,袭夺了原南东流向的河流。

**关键词:** 新构造活动;倒勾状水系;河流袭夺;走滑断层;通天河;青藏高原

DOI: 10.11821/dlxb201807012

## 1 引言

地壳运动可以造成河道的变迁、径流以及侵蚀强度的变化,而构造与侵蚀相互作用的结果基本取决于构造运动的速度、侵蚀的强度以及岩石的抗侵蚀性<sup>[1]</sup>。如果构造变形具有“灾变”的性质(变形强度和速率都较高),构造抬升速率大于河流侵蚀速率,则河流改道<sup>[1]</sup>。河流地貌发育过程与构造活动的密切关系在许多研究中被证实<sup>[2-4]</sup>。河流地貌特征的分析,被广泛用于新构造活动的研究,比如通过对沿甘孜—玉树—鲜水河断裂水系的错段等的分析,获得该断裂走滑速率为4.6~12 mm/a<sup>[5]</sup>。流域的高程积分指数(HI)、流域非对称指数(AF)、河流纵剖面特征等地貌参数,被应用到地貌面的隆升过程、构造样式和强度等的研究<sup>[6-14]</sup>。山前曲折度(SMF)、河谷宽高比(VF)等地貌指数也被用来探讨构造活动的模式和强度<sup>[6-7, 10]</sup>。

近年来,关于构造运动对河流发育和演化过程的影响也开展了一些研究。河流形

收稿日期: 2017-08-07; 修订日期: 2018-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41522101); 国家重点研发计划(2016YFA0600500); 中央高校基础研究基金项目(020914380043); 中荷交流项目 [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41522101; National Key Research and Development Program, No.2016YFA0600500; The Fundamental Research Funds for the Central Universities, No.020914380043; Dutch-Chinese Exchange Program]

作者简介: 于洋(1991-), 男, 河南林州人, 硕士, 主要从事构造地貌研究。E-mail: 939603313@qq.com

通讯作者: 王先彦(1978-), 男, 教授, 主要从事地貌过程研究。E-mail: xianyanwang@nju.edu.cn

态、河流陡峭度等的分析,证明了长江下游逐步向上游袭夺、三江分水岭的形成以及雅鲁藏布江的改向等河流地貌过程<sup>[15]</sup>。也有研究认为昆仑山与柴达木之间的强烈差异运动,导致加鲁河、格尔木等河流强烈溯源侵蚀,切过布尔汉布达山,袭夺了近东西向的大河,使分水岭向南推移了6~10 km<sup>[16]</sup>。在黄河源区,程捷<sup>[17]</sup>提出随着现今黄河的形成和晚更新世湖泊的消失,南岸支流之一的多曲向南溯源侵蚀加强,并穿越巴颜喀拉山,夺取了巴颜喀拉山南侧原属于长江流域的贝敏曲和洛曲,使分水岭向南推进了25 km。在长江源区,李亚林等<sup>[18]</sup>认为早期近南北流向的那若曲,受走滑断裂的影响,东—西流向的河流快速溯源侵蚀而导致河流的袭夺,致使古河道被遗弃,而在断裂构造与古河道交汇处残留了早期近南北向的古河道和冲积扇。

本文研究区域为长江上游河段通天河,位于青藏高原中部,为新构造运动活跃地区,并分布有黄河源区各支流、雅砻江上游各支流、澜沧江上游及长江上游通天河河段。研究该地区的水系分布特征及其演化可以为理解陆陆碰撞过程中大型走滑运动对水系格局演化的影响提供新的数据,同时可以为长江、黄河和澜沧江源头地区河流发育与演化过程与构造活动的关系提供一定的借鉴。

## 2 研究区域概况

### 2.1 地貌概况

研究区域位于95°E~98°E, 32.5°N~34.5°N,为青藏高原腹地——三江(长江、黄河、澜沧江)源地区,以山地和盆地地貌为主,平均海拔4200 m以上,地势起伏较大,局部地区有冰川,属于高寒高海拔地区。该地区覆盖长江上游通天河、澜沧江上游、黄河上游和雅砻江上游(图1),主要发育北西—南东和南西—北东两组流向的河谷,其中北西—南东向河谷多为宽阔的不适称谷地,而南西—北东向河谷多为陡峭的峡谷;水系多呈直角状、倒勾状水系(图1)。

### 2.2 地质构造背景

区域内主要发育达日断裂、巴颜喀拉山主峰断裂、五道梁—长沙贡玛断裂、五道梁

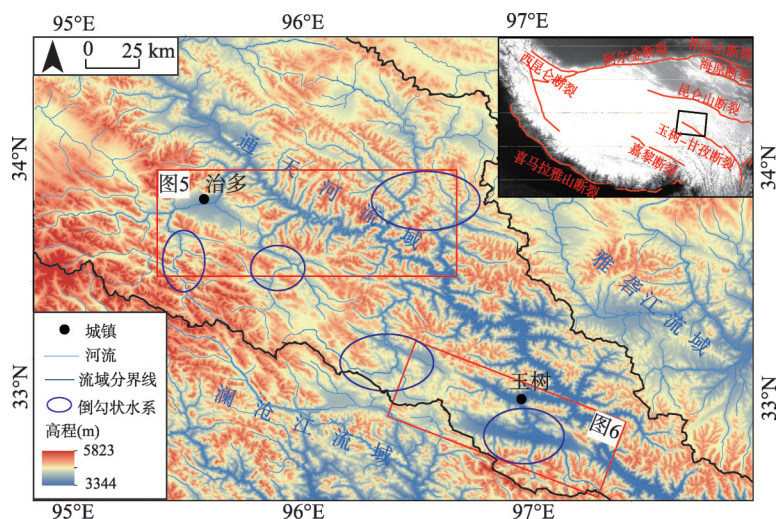
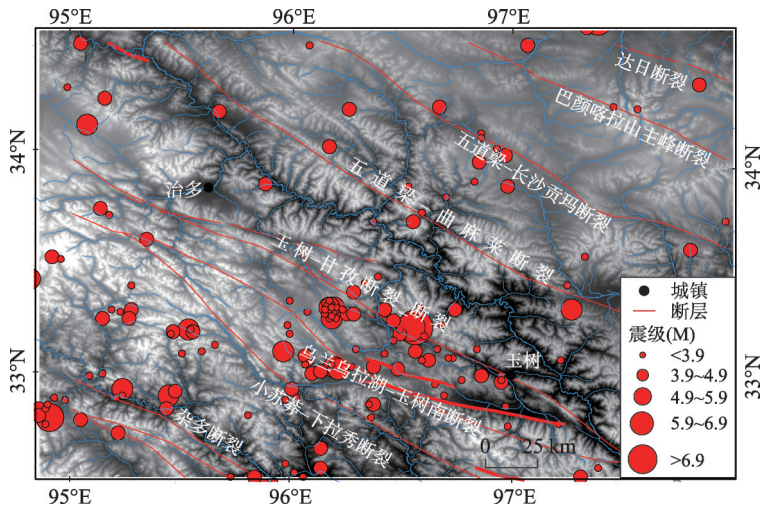


图1 三江源地区地形和水系特征

Fig. 1 Topography and drainage pattern in the Sanjiangyuan area

—曲麻莱断裂、玉树—甘孜断裂、乌兰乌拉湖—玉树南断裂、打贝通—小苏莽断裂、杂多断裂带(图2)。其中玉树—甘孜断裂和乌兰乌拉湖—玉树南断裂晚第四纪以来构造运动活跃,发生过一系列的地震(图2),例如2010年玉树曾发生7.1级地震<sup>[19]</sup>。玉树—甘孜断裂东南起甘孜,往西北经玛尼干戈、邓柯、玉树,至治多当江,全长约500 km,往西北与风火山断裂相连,往南东以左行左阶甘孜拉分盆地与鲜水河断裂相接,整体呈北西向展布,断层倾向以北东为主,倾角70°~85°,并参与协调羌塘块体与巴颜喀拉块体、川滇块体三者之间的相对运动<sup>[19-20]</sup>。前人研究表明,甘孜—玉树活动断裂的形成、演化及新活动特征与青藏高原的动力学过程密切相关,是川滇弧形旋扭活动构造体系外弧带北缘主边界断裂的重要组成部分<sup>[21]</sup>;它是在前第四纪基岩断裂带的基础上、晚第四纪以来重新强烈活动,且与强震活动密切相关的大型左行走滑活动断裂带<sup>[22-24]</sup>。已有研究认为该地区在断层弯曲处产生挤压抬升,在两条断层交汇处形成挤压脊<sup>[25]</sup>。

本文研究主要集中在甘孜—玉树断裂带的西北段,变形以走滑逆冲作用为主,伴有褶皱和拉伸作用;沿断层发育隆宝湖、巴塘乡、玉树等一系列串珠状盆地。



注: 断层数据来源于中国活动构造图<sup>[26]</sup>; 地震数据来源于中国地震台网。

图2 三江源地区活动断层和地震的分布

Fig. 2 Tectonic map of the Sanjiangyuan area and the distribution of earthquakes (The fault data are derived from the Structure of China activities<sup>[26]</sup>, and the seismic data from China Seismic Information.)

3 研究方法与数据来源

为了探讨研究区水系格局分布特征与新构造的耦合关系及该地区的水系演化,对该地区的DEM高程数据进行了分析,并利用ArcGIS 10.2和Matlab 2015提取了河流的纵剖面,并计算地貌形态指数。

3.1 数据来源

研究数据主要采用的是ASTER GDEM (30 m和90 m分辨率), 30 m分辨率的DEM主要用于对该地区的坡度和起伏度等宏观地貌的空间分析, 90 m分辨率的DEM主要用于TecDEM脚本程序<sup>[27-28]</sup>对河流水系纵剖面进行分析。拼接而成的DEM覆盖研究区面积为65500 km<sup>2</sup>。利用TecDEM自动提取河流纵剖面及流域, 计算河流陡峭指数、坡降指数和各流域的HI值。



### 3.2 地貌参数计算原理、方法

**3.2.1 坡度** 坡度 (slope) 是一项基本的地貌指标, 其定量描述了地表单元内地面的倾斜程度, 可以反映地表物质剥蚀和堆积的发展。地表坡度能够指示地貌成因、地貌的发育阶段及程度, 对研究新构造具有重要意义。使用 ArcGIS 10.2 空间分析的坡度分析自动生成了研究区坡度图, DEM 分辨率为 30 m。

**3.2.2 起伏度** 地形起伏是指一定范围内最大高程值与最小高程值之间的差值, 能够直观的反应异构体内地形起伏特征。计算地形起伏度, 一般使用公式:

$$R = H_{\max} - H_{\min} \quad (1)$$

式中:  $R$  表示地形起伏度;  $H_{\max}$ 、 $H_{\min}$  分别是分析窗口内的最大高程值和最小高程值。利用 ArcGIS 10.2 的空间分析模块中的焦点统计工具, 采用分析窗口 (330 m×330 m) 统计出最大高程值和最小高程值, 再使用栅格计算器根据公式 (1) 计算地形起伏度。

**3.2.3 河流陡峭指数 ( $k_s$ )** 在构造活动强烈的地区, 主要发育基岩河道或基岩-冲积混合河道<sup>[29-31]</sup>。河流侵蚀力对于基岩河道是一种剪应力, 均衡态河流的坡度与流域面积呈现反比关系<sup>[29, 32]</sup>, 局部河段河道坡度  $S$  和汇水面积  $A$  符合幂函数关系<sup>[33-35]</sup>:

$$S = k_s A^{-\theta} \quad (2)$$

式中: 指数  $\theta$  代表均衡河道纵剖面凹曲指数 (concavity index); 参数  $k_s$  为均衡河道纵剖面陡峭指数 (steepness index)。利用 DEM 计算河道坡度和汇水面积, 将数据投在双对数图上, 即可判断河道是处于稳定态还是过渡态, 稳定态的河段数据呈直线分布, 线性拟合获得的斜率与截距就是凹曲指数和陡峭指数。

本文通过 TecDEM 加载 DEM 数据, 半自动提取了 78 条河流, 并通过 TecDEM 中 Stream Profiles 中的 Concavity & Steepness Index 功能计算了河道坡度和汇水面积, 投影在双对数图上, 线性拟合获得河流的陡峭指数。

**3.2.4 河流坡降指数 ( $SL$ )** 河流的坡降指标 ( $SL$ ) 可以反映河流的坡度变化, 是一个测量河流纵剖面的凹凸形态变化的指数。Hack<sup>[36]</sup>定义了“坡降指标”的参数:

$$SL = k = L_n (\Delta H_i / \Delta L_i) \quad (3)$$

式中:  $SL$  为河流的坡降指标;  $H$  是海拔;  $L$  是河流长度。在一个集水流域内, 均衡河流的坡降指标从源头到河口符合指数函数分布。局部河段坡降指标的变化, 反映岩性的变化或者构造运动, 也可以间接反映河流发育的新、老阶段。本文采用 TecDEM 的 Hank Gradient Index 功能自动提取 242 个河段的  $SL$  值。

**3.2.5 流域高程积分 ( $HI$ )** 流域高程积分 ( $HI$ ) 能够反映区域的地表发育程度<sup>[37-38]</sup>, 描述流域在给定高度下的面积占整个流域面积的比值。它表示尚未被侵蚀的盆地的体积, 由以下等式定义:

$$HI = (h_{\text{mean}} - h_{\min}) / (h_{\max} - h_{\text{mean}}) \quad (4)$$

式中:  $HI$  为流域高程积分;  $h_{\text{mean}}$  为流域内高程的平均值;  $h_{\min}$  和  $h_{\max}$  分别为流域内高程最小值和最大值。与 Davis 地形侵蚀循环相对应,  $HI$  值的大小反映地表侵蚀及地貌发育的程度:  $HI < 0.15$ , 面积—高程曲线呈现凹形, 反应地表侵蚀强烈, 处于老年期地貌;  $0.15 < HI < 0.45$ , 面积—高程曲线呈现 S 形, 反应该地表有一定侵蚀, 处于壮年期地貌;  $HI > 0.45$ , 面积—高程曲线呈现凸形, 反应地表未被侵蚀, 构造活动强烈, 地貌处于幼年期<sup>[38]</sup>。

本文通过 TecDEM 中 Hypsometric Integral 功能界面自动提取了 196 个流域的  $HI$  值, 流域盆地设定的 Strahler 等级为 4。



## 4 结果分析

### 4.1 宏观地形地貌特征

**4.1.1 坡度** 按照自然断点法进行分级试验, 经过反复试验, 认为按照 $5^{\circ}$ 、 $15^{\circ}$ 、 $25^{\circ}$ 、 $35^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 来分级最能体现研究区的坡度变化。研究区的坡度范围在 $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 之间; 黄河上游和雅砻江上游区域坡度平缓, 澜沧江上游及通天河区域坡度大, 而通天河的支流多采曲—宁恰曲流域西北部、登艾龙曲流域、叶曲流域、巴塘河流域中部坡度较缓(图3a)。西南部分地形坡度大可能是由于该地区构造活动比较活跃, 而多采曲—宁恰曲流域、登艾龙曲流域、叶曲流域、巴塘河流域坡度较缓可能与该地区河流的长时间侵蚀有关。

**4.1.2 起伏度** 该地区绝大部分为山地地貌, 中间夹杂若干盆地, 东北地区为平原上夹杂着山地, 沿玉树—甘孜断裂带、乌兰乌拉湖—玉树南断裂分布着山间盆地(图3b)。东部地区的平均高度在4600 m左右, 呈现平原地貌特征; 而通天河右侧地形的平均高度变化较大, 盆地平均高度小于4300 m, 而山地大于5000 m, 反映该地区盆山相间分布的地貌特征。

### 4.2 地貌形态指数

**4.2.1 河流陡峭指数** 河流的陡峭指数分布呈现区域特征(图4a), 沿通天河河谷(图中黑色椭圆区域)的河流的陡峭度普遍较高, 数值在82~146之间; 而通天河西南侧支流(图中红色椭圆区域)的河流的陡峭度较低, 大多数小于80。雅砻江上游和黄河上游河流陡峭指数数值低, 多数小于36, 均匀分布。澜沧江上游地区各支流的陡峭指数高, 局部交汇点的河流的陡峭度大于200, 而上游细小支流的陡峭度小于80。河流陡峭度指数的值与区域地层和岩性的分布没有明显的关系(图4a)。

**4.2.2 河流坡降指标** 研究区SL指标整体差异不大, 大部分小于300, SL值与地层和岩性的分布没有明显的对应关系(图4b)。通天河东南段河流和图4b中箭头所指的水系发生大角度偏转处南西—北东向峡谷SL值普遍较高, 大于300。通天河东南段SL高值可能与该地区的强烈构造活动有关; 前人研究也表明玉树断裂带自西向东拉张效应逐渐减弱、挤压效应逐渐增强<sup>[25]</sup>。而南西—北东向峡谷的河流SL高值表明这些河段为幼年期地形, 可能是后期河流袭夺形成的峡谷。

**4.2.3 流域高程积分** 流域的HI值分布如图4c所示, 所有流域HI值都大于0.15, 说明该地区地貌处于壮年期或幼年期, 表明该地区构造活动活跃, 和(或者)河流比较年轻。通天河两侧大部分流域的HI值大于0.45, 处于幼年期地貌; 玉树断裂带西南侧及周边流域的HI值为0.15~0.45之间, 处于壮年期地貌。

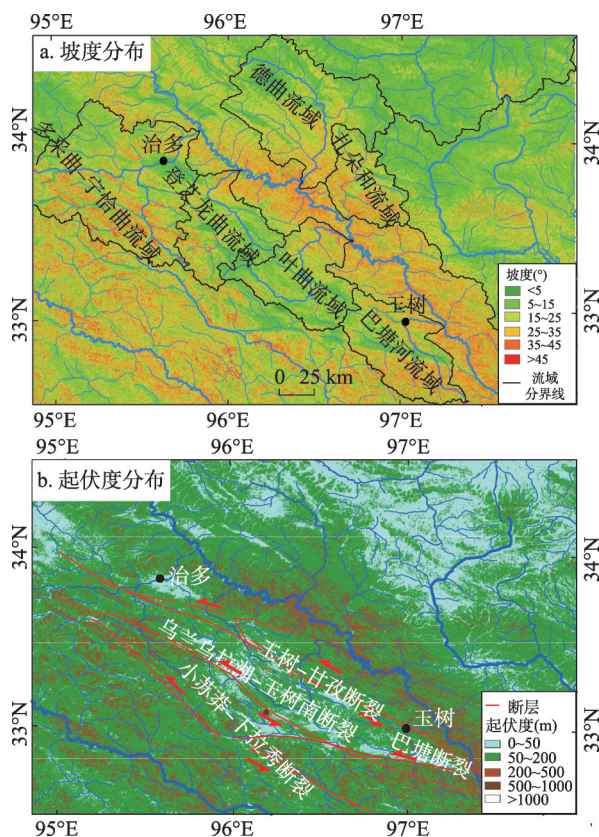


图3 三江源地区坡度和起伏度的分布

Fig. 3 Distribution of slope and relief in the Sanjiangyuan area

## 5 讨论

### 5.1 倒勾状水系分布特征与构造的关系

不同的水系格局对应不同的地质构造背景。前人研究表明:倒勾状水系一般分布在河源地区,支流汇入干流时指向上游;大多数倒勾状水系是河流袭夺的结果,地壳的穹形隆起或掀升作用、或者冰川作用也可以形成倒勾状水系<sup>[1]</sup>。图1水系分布显示,通天河两侧的支流呈不对称分布,干流右侧发育比较大的支流(多采曲—宁恰曲、登艾龙曲、叶曲、巴塘河),且次级支流分布密集,左侧除德曲流域面积较大外,其余支流流域都较小。研究区主要发育北西—南东和南西—北东两组流向的水系,其中北西—南东向河谷多为宽阔的不适称谷地(图5d、5e、图6f),而南西—北东向河谷多为陡峭的峡谷(图5f)。直角状、倒勾状水系主要分布在两组河流交汇处,且交汇区河流坡度大。根据北西—南东向不适称宽谷及相间的分水岭处遗存有古河道宽谷(图6a、6b、6c、6d)的分布,推测研究区早期存在多条近北西—南东向的河谷(图7),后期由于河流袭夺,导致水系呈倒勾状分布。

走滑断裂的剪切作用可产生包括剪切断层、褶皱、正断层、逆断层等构造变形样式;其中的伸展变形区一般形成正断层和地堑,挤压变形区则在断裂带上产生逆冲断层和褶皱。李跃华等<sup>[25]</sup>指出玉树断裂带发育的串珠状拉分陷盆地规模的大小反映了玉树断裂带自西向东拉张效应逐渐减弱、挤压效应逐渐增强。而图2显示沿玉树断裂带分布的倒勾状河流和串珠状湖泊,也可能反映了该区域构造运动的复杂性。图5a、5b、5c和图6e显示,在研究区走滑断裂带上两条断层交汇处或断层沿走向弯曲部位产

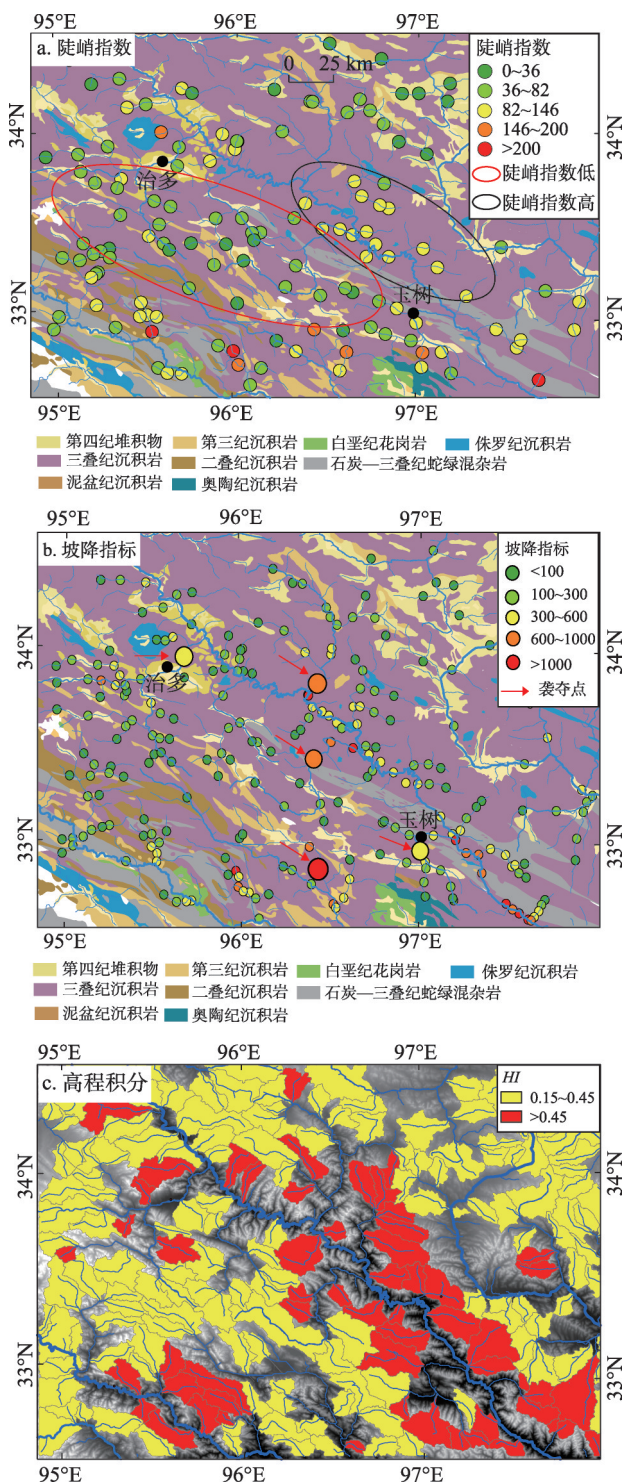
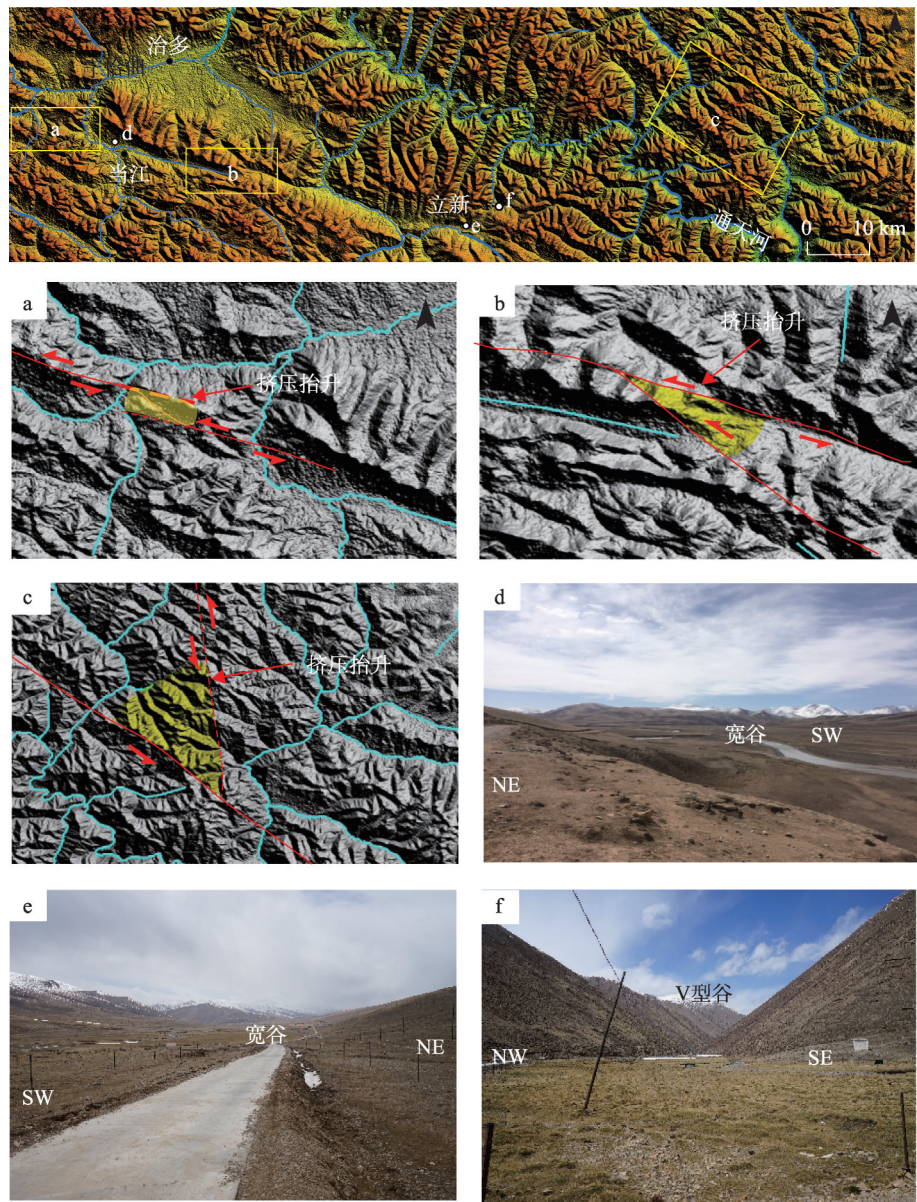


图4 陡峭指数、坡降指数、高程积分形态指数分布  
Fig. 4 The distribution of steepness index, stream length-gradient index and hypsometric integral index



生挤压脊和断陷盆地，可能导致了北西—南东流向的河流在挤压抬升处河流流向发生变化，而在局部断陷处形成积水中心。

由走滑运动产生的局部隆起形成了北西—南东流向河流间的分水岭，而分水岭上多存在北西—南东向宽谷（风口）（图 6a、6b、6c、6d），可能表明该地区的北西—南东向的河谷、以及风口宽谷在挤压脊抬升形成前为连通的河谷（图 7，图 8a）。在隆宝镇东部近分水岭（风口）位置（图 8a），分布有高出河面 30 m 的河流砾石层（图 8c、8d），砾石

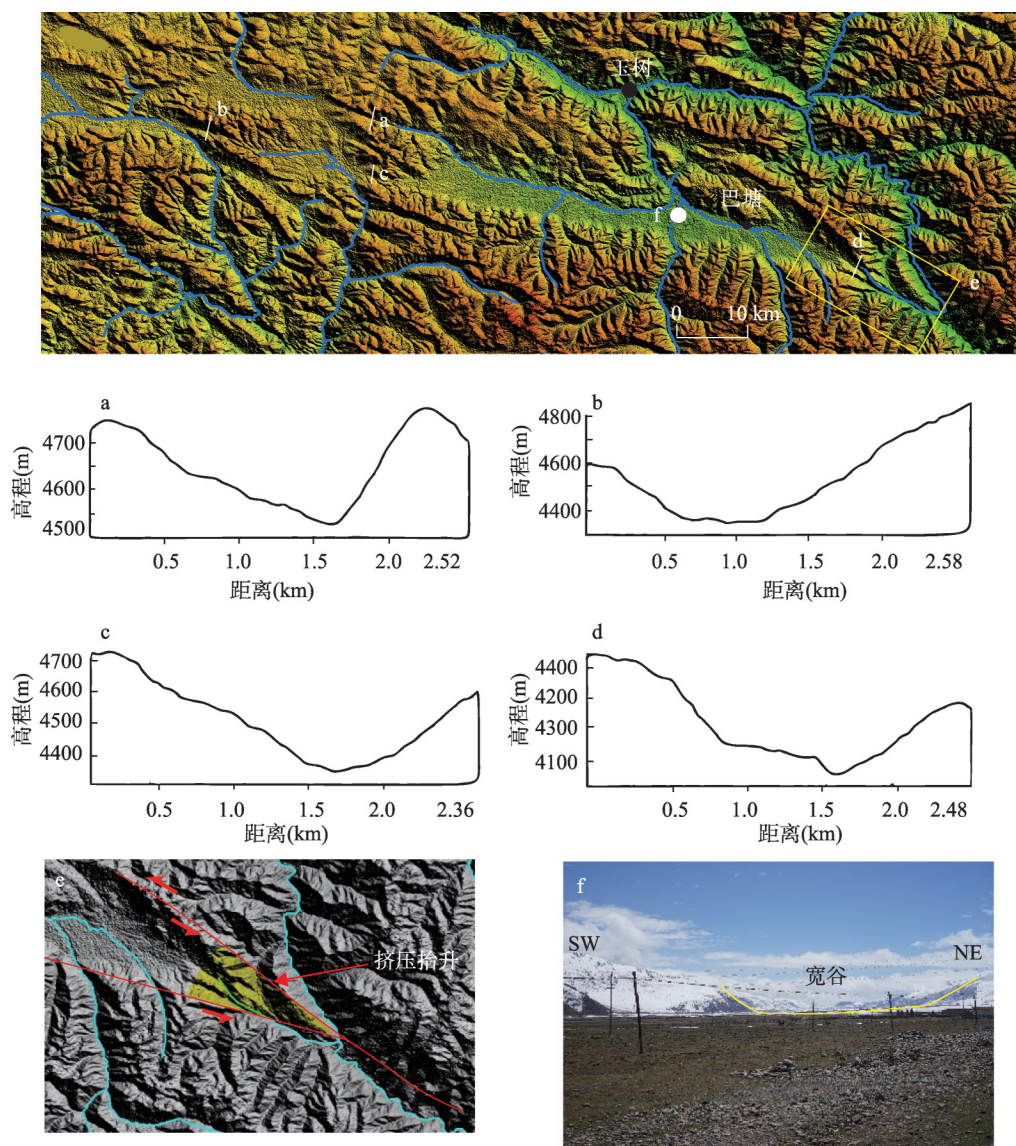


注：a、b、c为走滑断层产生挤压脊；d、e为分水岭处残留的北西—南东向宽谷谷地；  
f为南西—北东向的“V”型峡谷。

图5 治多及周边地区河谷的地形特征及其与活动断层分布的关系

Fig. 5 Terrain characteristics of the valley and its relationship with the distribution of the active faults in Zhiduo





注: a、b、c、d分水岭处残留的北西—东南向宽谷谷地(风口), e为走滑断层产生挤压脊, f为北西—南东向的宽谷。

图6 玉树县及周边地区河谷的地形特征及其与活动断层分布的关系

Fig. 6 Terrain characteristics of the valley and its relationship with the distribution of the active faults in Yushu

粒径为3~15 cm, 厚约1.5 m, 砾石扁平面总体上指向240°方向, 指示该处砾石堆积时河流流向与现代该处河流流向相反, 也表明挤压脊将原河谷抬升到现在分水岭的位置, 而水流的流向发生反转。此外, 现代河流河道沉积物颗粒相对较细, 为砂和极少量细颗粒砾石, 可能反映了现代河道与河谷的不适称关系; 反映南西—北东向陡峭的幼年期河流(图5f)袭夺原北西—南东向壮年期宽谷, 形成倒钩状水系(图8a)。

## 5.2 地貌形态指标对水系格局演化的指示

从地貌演化特征上看, 坡度的大小直接影响着地表物质流动和能量转换的规模与强度。多采曲—宁恰曲流域西北部、登艾龙曲流域、叶曲流域、巴塘河流域中部坡度偏小

(图 3a), 可能与河流的长时间侵蚀有关。地表起伏度指标在一定程度上反映了地貌的发育阶段。一般而言, 年轻的、近期强烈抬升/褶皱或断裂形成的地貌形态, 常常具有较大的起伏度; 老年的、经长期夷平作用的地貌, 具有较小的起伏度<sup>[39]</sup>。研究区东北部起伏度为 0~50 m (图 3b), 表明该地区经过长期的侵蚀夷平作用, 为老年期地貌; 中部及西南部起伏度为 50~200 m, 中间夹杂着起伏度为 200~500 m 的低山和 0~50 m 的山间盆地 (图 3b), 表明该地区为相对年轻的地貌特征, 可能与该地区全新世的构造活动有关<sup>[19]</sup>。

$HI$  值在通天河周边均大于 0.45 (图 4c), 表明通天河周边为年轻地貌; 而南侧较大支流  $HI$  值小于 0.45 (图 4c), 表现为壮年期流域。从侧面也反映了多采曲—宁恰曲流域、登艾龙曲流域、叶曲流域、巴塘河流域侵蚀程度较强, 河流发育时间较长。

陡峭指数主要受到岩石岩性和抬升速率的影响<sup>[40-42]</sup>, 已经被广泛用于分析抬升速率的分布规律<sup>[43]</sup>;  $k_s$  值高的地区构造抬升速率高,  $k_s$  值低的地区构造抬升速率也低<sup>[38]</sup>。构造抬升速率高的地区, 河流以下切为主, 多形成“V”型谷等幼年期地形特征; 构造抬升速率低的地区河流以侧向侵蚀为主, 多发育宽谷等老年期地形特征。研究区岩性分布均一, 主要为不同时期形成的沉积岩, 局部地区分布第四纪堆积物, 陡峭指数值和地层与岩性的分布没有明显的对应关系 (图 4a), 说明研究区岩性对陡峭指数的影响不大。图 4a 中黑色椭圆区域的陡峭指数高, 说明该区域构造运动活跃, 表现为幼年期河谷; 红色椭圆区域的陡峭指数低, 说明该地区河流地貌表现为老年期河谷。陡峭指数低值分布的区域可能为流向为北西—南东贯通的古河谷 (图 7); 后期由于走滑运动导致立新乡东部、上拉秀向东北部地区抬升, 形成分水岭, 而拉伸应力状态下的当江、隆宝镇地区则形成断陷盆地, 形成局部积水中心。通天河南西—北东向支流区域陡峭指数值高, 表明南西—北东向支流可能为幼年期谷地, 快速向上游方向溯源侵蚀, 最终可能袭夺了北西—南东流向的河流, 导致水系呈直角状、倒勾状分布 (图 9)。

河流坡降指标可以反映河流坡度的变化。均衡河流的坡降指标处于同一水平, 或者说发育时间越长, 河流的坡降指标越低<sup>[38]</sup>。研究区河流的坡降指标整体处于较低水平, 而局部河段的坡降指标高 (图 4b), 可能指示河流响应构造运动后调整和演化的时间短, 比较年轻, 为河流袭夺形成的峡谷。这也印证了此前的推测: 河流原为东南流向 (图 7), 局部河段的高坡降指数是由于后期河流溯源侵蚀袭夺形成的 (图 9)。

河流溯源侵蚀与袭夺会造成分水岭的迁移, 支流分布的不对称, 而构造运动会造成河流改向并加强溯源侵蚀。该地区正是由于走滑断层剪切作用产生的一系列构造样式 (剪切断层、褶皱、正断层、逆断层) 造成河流改向 (图 9), 逆冲抬升作用加强了通天河南西—北东向支流的溯源侵蚀, 袭夺原北西—南东流向河流, 使该地区河流水系多呈倒勾状、直角状分布。

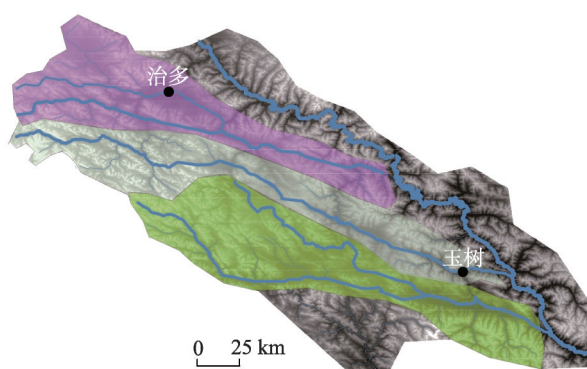


图 7 根据地貌和水系特征复原的玉树地区原始近平行状古水系(彩色阴影部分)

Fig. 7 The original near-parallel paleo-water system in the Yushu area, which is restored according to terrain characteristics and drainage system (colored shades)



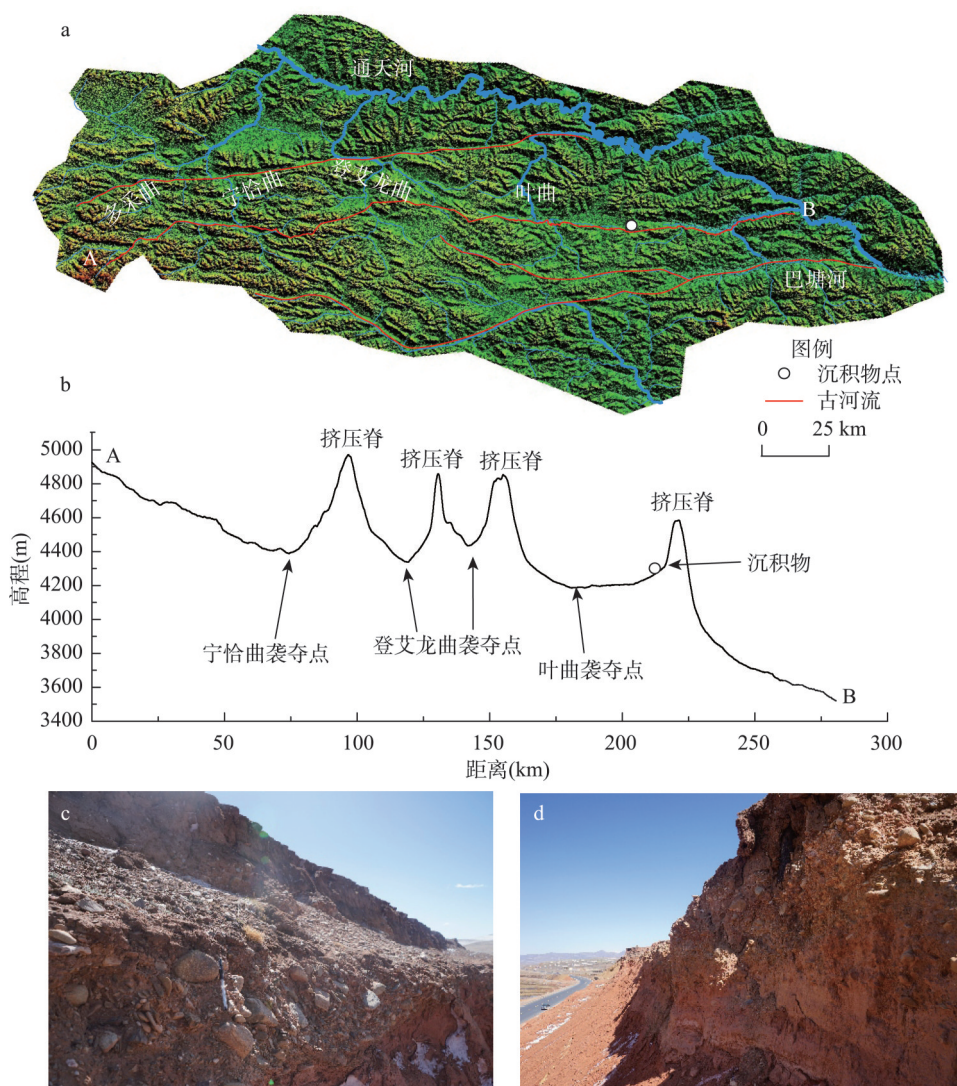


图8 治多南至玉树北西—南东向古河流 (a. 北西—南东向宽谷与分水岭处谷地的分布反演的古河流(红线为古河流; 白色圆点为c和d图沉积物观察点); b. 古河流纵向断面现代地形特征及河流袭夺点的分布; c、d. 拔河约30 m河流沉积物(c和d镜头分别朝向北东和北西))

Fig. 8 The reconstructed NW-trending ancient river in the area south of Zhiduo to Yushu (a. the NW-trending valleys and the ancient river based on the distribution of wind gaps, wide valleys, and fluvial sediments (red line is the ancient river); b. the longitudinal ancient river profile (A-B) and the distribution of the capture points; c and d: river sediment about 30 m above the present river level)

## 6 结论

本文通过对玉树地区的宏观地貌分析(坡度、起伏度),并结合该地区河流的纵剖面形态特征分析( $k_s$ 、 $SL$ )及流域形态特征( $HI$ )分析,发现该地区北西—南东向河谷多为低河流比降、宽阔的不适称谷地;而南西—北东向河谷多为高河流比降、陡峭的峡谷。通天河两侧细小支流的 $k_s$ 值高,西南侧多采曲—宁恰曲流域、登艾龙曲流域、叶曲



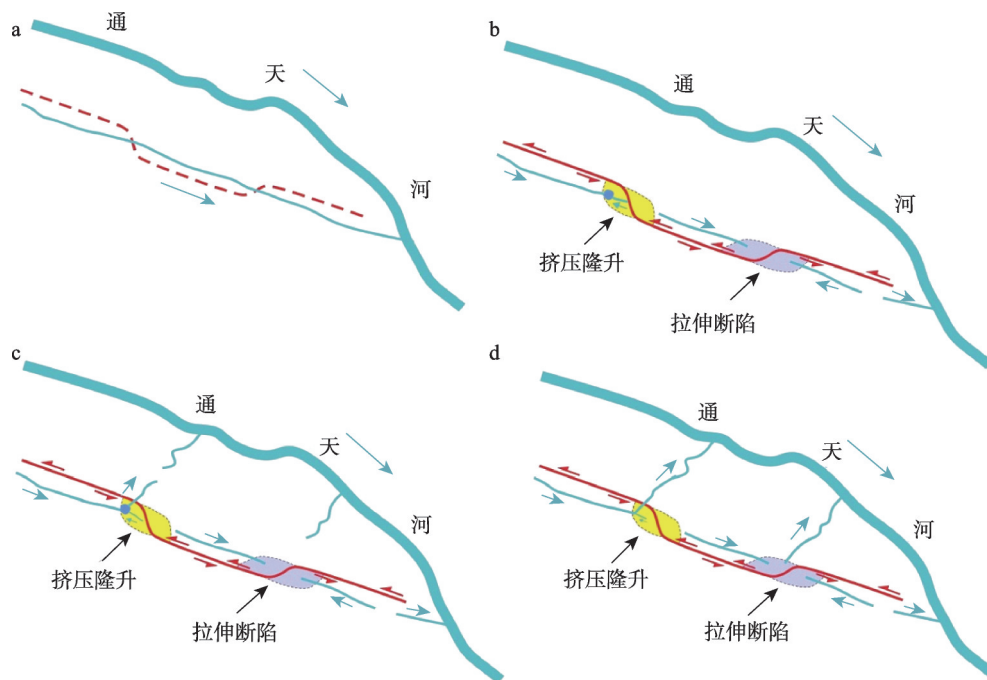


图9 研究区走滑断层活动引起的构造样式导致的水系变迁的示意图

(a. 北西—南东向的水系发育, 形成宽谷(在分水岭处还有保留, 形成风口); b. 走滑活动在局部分别形成挤压脊和断陷洼地; 挤压脊处老年期谷地抬升形成局部分分水岭, 分水岭西北河段倒流; 东南河段流入拉伸形成的洼地; c. 逆冲抬升导致南西—北东向通天河的支流快速溯源侵蚀; d. 通天河南西—北东向支流最终切穿抬升区域, 袭夺了老的河流, 形成北东向峡谷等)

Fig. 9 Schematic diagram of drainage changes caused by strike-slip fault movements (a. Development of the NW-trending drainage system and the wide valleys; b. Pressure ridges and pull-apart basins produced by strike-slip fault movement. Fossil Valleys in the uplifted pressure ridges that became drainage divides: the channels to the northwest of the local divides flowed backward, and the channels to the southeast flowed to the pull-apart basins; c. Headward erosion of the tributaries of the Tongtian River increased as a result of the uplift of the NE-trending thrusting; d. The tributaries of the Tongtian River finally cut through the uplifted area and captured the NE-trending wide channels.)

流域、巴塘河流域等河流的 $k_s$ 值小; 水系直角或倒勾状交汇区域 $SL$ 值高, 多发育峡谷; 通天河两侧大部分流域 $HI$ 值大于0.45, 多采曲—宁恰曲流域、登艾龙曲流域、叶曲流域、巴塘河流域 $HI$ 值为0.15~0.45之间。根据该地区断裂的分布, 及其与老年期或壮年期地貌(宽谷风口, 低起伏度、低的 $k_s$ 、 $SL$ 、 $HI$ 值)和幼年期地貌(峡谷, 高起伏度、高的 $k_s$ 、 $SL$ 、 $HI$ 值)分布的关系, 本文认为后期北西—南东向的走滑断裂剪切作用产生的局部差异的挤压抬升和断陷, 造成了河流的改向, 并且断层东北向的逆冲抬升使得通天河南西—北东向支流的溯源侵蚀加强, 进而袭夺了玉树地区原北西—南东流向的古河流, 形成该地区呈倒勾状、直角分布的水系格局。

## 参考文献(References)

- [1] Shen Yuchang, Gong Guoyuan. The Introduction of Fluvial Geomorphology. Beijing: Science Press, 1968. [沈玉昌, 龚国元. 河流地貌学概论. 北京: 科学出版社, 1986.]
- [2] Bernard Delcaillau. Geomorphic response to growing fault-related folds example from the foot hills of central Taiwan. *Geodinamica Acta*, 2001, 14: 265-287.
- [3] Li Youli, Yang Jingchun, Xia Zhengkai, et al. Tectonic geomorphology in the Shanxi Graben System, northern China.

- Geomorphology, 1998, 23: 77-89.
- [4] George Philip, Madho P S. Geomorphic signaures of active tectonics in the trans-Yamuna segment of the western Doon valley, northwest Himalaya. *India International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 1999(1): 54-63.
- [5] Yan Bing, Lin Aiming. Systematic deflection and offset of the Yangtze River drainage system along the strike-slip Ganzi-Yushu-Xianshuihe Fault Zone, Tibetan Plateau. *Journal of Geodynamics*, 2015, 87: 13-25.
- [6] Bojan Matoš, José Vicente Pérez-Peña, Bruno Tomljenović. Landscape response to recent tectonic deformation in the SW Pannonian Basin: evidences from DEM-based morphometric analysis of the Bilogora Mt. area, NE Croatia. *Geomorphology*, 2016, 263: 132-155.
- [7] José Vicente Pérez-Peña, Antonio Azor, et al. Active tectonics in the Sierra Nevada (Betic Cordillera, SE Spain): Insights from geomorphic indexes and drainage pattern analysis. *Geomorphology*, 2010, 119(1): 74-87.
- [8] Shi Feng, He Honglin, Alexander L Densmore, et al. Active tectonics of the Ganzi-Yushu fault in the southeastern Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 2016, 676: 112-124.
- [9] Schoenbohm L M, Whipple K X, Burchfiel B C, et al. Geomorphic constraints on surface uplift, exhumation, and plateau growth in the Red River region, Yunnan Province, China. *Geological Society of America Bulletin*, 2004, 116(7): 895.
- [10] Dai Yan, Wang Xianyan, Wang Shengli, et al. The neotectonic activity of Wanchuan catchment reflected by geomorphic indices. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(3): 412-421. [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. *地理学报*, 2016, 71(3): 412-421.]
- [11] Hu Xiaofei, Pan Baotian, 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. *Chinese Science Bulletin*, 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. *科学通报*, 2010, 55(23): 2329-2338.]
- [12] Wang Nairui, Han Zhiyong, Li Xusheng, et al. Tectonic uplift of Mt. Lushan indicated by the steepness indices of the river longitudinal profiles. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1516-1525. [王乃瑞, 韩志勇, 李徐生, 等. 河流纵剖面陡峭指数对庐山构造抬升的指示. *地理学报*, 2015, 70(9): 1516-1525.]
- [13] Chang Zhiyang, Wang Jian, Bai Shibiao, et al. Appraisal of active tectonic in Bailongjiang basin on DEM data. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(2): 292-301. [常直杨, 王建, 白世彪, 等. 基于DEM的白龙江流域构造活动定量分析. *第四纪研究*, 2014, 34(2): 292-301.]
- [14] Zhang Huiping, Yang Nong, Zhang Yueqiao, et al. Geomorphology of the Minjiang drainage system and its structural implications. *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. *第四纪研究*, 2006, 26(1): 126-135.]
- [15] Clark M K, Schoenbohm L M, Royden L H, et al. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns. *Tectonics*, 2004, 23(1): TC1006.
- [16] Li Changan, Yin Hongfu, Yu Qingwen. Tectonic uplift and water system evolution and development trend of East Kunlun Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(2): 211-213. [李长安, 殷鸿福, 于庆文. 东昆仑山构造隆升与水系演化及其发展趋势. *科学通报*, 1999, 44(2): 211-213.]
- [17] Cheng Jie, Tian Mingzhong, Zhang Xujiao. The Yellow River in its source area captured the branches of the Yangtze River. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(1): 251-256. [程捷, 田明中, 张绪教. 黄河源区黄河袭夺长江水系之初探. *地质前缘*, 2007, 12(1): 251-256.]
- [18] 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. *Geology in China*, 2006, 33(2): 374-382. [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. *中国地质*, 2006, 33(2): 374-382.]
- [19] Wen Xueze, Xun Xiwei, Zheng Rongzhang, et al. The average slip rate of Ganzi-Yushu fault and the fragmentation of modern earthquake. *Science in China (Seires D)*, 2003, 33(1): 199-208. [闻学泽, 徐锡伟, 郑荣章, 等. 甘孜-玉树断裂的平均滑动速率与近代大地震破碎. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(1): 199-208.]
- [20] Chen Zhengwei, Yang Panxin, Li Zhimin, et al. Characteristics of Ms7.1 Yushu earthquake fault and the surface rupture. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(3): 628-631. [陈正位, 杨攀新, 李智敏, 等. 玉树7.1级地震断裂特征与地震地表破碎带. *第四纪研究*, 2010, 30(3): 628-631.]
- [21] Wu Zhonghai, Zhao Xitao, Fan Taoyuan, et al. Active faults and seismologic characteristics along the Dali-Ruili railway in western Yunnan Province. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(2/3): 191-217. [吴中海, 赵希涛, 范桃园, 等. 泛亚铁路滇西大理至瑞丽沿线主要活动断裂与地震地质特征. *地质通报*, 2012, 31(2/3): 191-217.]

- [22] Wen Xueze, Huang Shenmo, Jiang Zaixiong, et al. Neotectonic characteristics and seismic risk assessment of the Ganzi-Yushu fault zone. *Seismology and Geology*, 1985, 7(3): 23-32. [闻学泽, 黄圣睦, 江在雄, 等. 甘孜—玉树断裂带的新构造特征与地震危险性估计. *地震地质*, 1985, 7(3): 23-32.]
- [23] Zhou Rongjun, Wen Xueze, Chai Changxing, et al. Recent earthquakes and assessment of seismic tendency on the Ganzi-Yushu fault zone. *Seismology and Geology*, 1997, 19(2): 115-124. [周荣军, 闻学泽, 蔡长星, 等. 甘孜-玉树断裂带的近代地震与未来地震趋势估计. *地震地质*, 1997, 19(2): 115-124.]
- [24] Wang Shifeng, Fang Xiaomin, Wang Erchie. Late Cenozoic deformation along the northwestern continuation of the Xianshuihe fault system, Eastern Tibetan Plateau. *Geological Society of America Bulletin*, 2008, 120(3/4): 312-327.
- [25] Li Yuehua, Wu Zhonghai, Ye Peisheng, et al. The geomorphologic and geological marks of the active left-lateral strike-slip fault and the characteristics of geometry and kinematics along the Yushu fault zone in southeastern Tibet. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(9): 1410-1422. [李跃华, 吴中海, 叶培盛, 等. 玉树断裂带左旋滑动标志及其几何运动学特征. *地质通报*, 2013, 32(9): 1410-1422.]
- [26] Deng Qidong. *Map of Active Tectonics in China*. Beijing: Seismological Press, 2007. [邓起东. *中国活动构造图*. 北京: 地震出版社, 2007.]
- [27] Faisal Shahzad, Richard Gloaguen. TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part 1: Drainage network preprocessing and stream profile analysis. *Computers & Geosciences*, 2011, 37: 250-260.
- [28] Faisal Shahzad, Richard Gloaguen. TecDEM: A Matlab based toolbox for tectonic geomorphology, Part 2: Surface dynamics and basin analysis. *Computers & Geosciences*, 2011, 37: 261-271.
- [29] Whipple K X. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2004, 32: 151-185.
- [30] Howard A D, Dietrich W E, Seidl M A. Modeling fluvial erosion on regional to continental scales. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(B7): 13971-13986.
- [31] Howard A D. *Long Profile Development of Bedrock Channels: Interaction of Weathering, Mass Wasting, Bed Erosion, and Sediment Transport*. Rivers over Rock. Washington, DC: AGU Press, 1998: 297-319.
- [32] Dietrich W E, Whiting P. Boundary shear stress and sediment transport in river meanders of sand and gravel. *River meandering*, 1989, 12: 1-50.
- [33] Flint J J. Stream gradient as a function of order, magnitude, and discharge. *Water Resources Research*, 1974, 10(5): 969-973.
- [34] Howard A D. A detachment-limited model of drainage basin evolution. *Water Resources Research*, 1994, 30(7): 2261-2285.
- [35] Howard A D, Kerby G. Channel changes in badlands. *Geological Society of America Bulletin*, 1983, 94: 739-752.
- [36] Hack J T. Stream-profile analysis and stream-gradient index. *Geological Survey Journal of Research*, 1973, 1(4): 421-429.
- [37] Pérezpeña J V, Azañón J M, Azor A. CalHypso: An ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain. *Computers & Geosciences*, 2009, 35(6): 1214-1223.
- [38] Strahler A N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1952, 63(11): 1117-1142.
- [39] Zhou Chenghu, Cheng Weiming, Qian Jinkai. *Digital Landscape Analysis of Remote Sensing and Cartography*. Beijing: Science Press, 2009. [周成虎, 程维明, 钱金凯. *数字地貌遥感解析与制图*. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [40] Kirby E. Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis. *Geology*, 2001, 29(5): 415-418.
- [41] DiBiase R A, Whipple K X, Heimsath A M, et al. Landscape form and millennial erosion rates in the San Gabriel Mountains, CA. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 289: 134-144.
- [42] Kirby E, Ouimet W. Tectonic geomorphology along the eastern margin of Tibet: insights into the pattern and processes of active deformation adjacent to the Sichuan Basin. *Geological Society of London Special Publications*, 2011, 353(1): 358-361.
- [43] Kirby E. Expression of active tectonics in erosional landscapes. *Journal of Structural Geology*, 2012, 44: 54-75.



## The evolution of drainage pattern and its relation to tectonic movement in the upstream Yangtze catchment

YU Yang, WANG Xianyan, LI Yiquan, DAI Yan, LU Huayu

(School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** The Tongtian section of the Yangtze River is located in the central part of the Tibetan Plateau where the neotectonic activity is illustrated by frequent earthquakes, such as the Yushu earthquake (Ms 7.1) on April 14, 2010. The study area is situated in the upstream parts of the Yellow River Basin, the Yalong River and Lanchang River catchments. In this region the tributaries have developed an inverted drainage pattern with nearly right-angle intersection. Based on terrain and areal river system analysis, including geomorphic index calculation, this paper discusses the evolution of the drainage pattern related to the neotectonic movements in this area. Two groups of valleys are distinguished with NW-SE and SW-NE directions, respectively. The NW-trending rivers are unfit channels with gentle slope and large width, while most of the SW-trending rivers are canyons with steep slope and V-shaped transect. It turns out that the steepness index ( $k_s$ ) in the southeastern part of the Tongtian River is higher than that in the Duocai-Ningqia basin, Dengailong basin, Yequ basin and the southwestern part of the Batang basin. The stream length-gradient index (SL) is similar in the whole catchment, but the SL values in the inverted channels and nearly right-angle intersecting channels are abnormal. The value of the hypsometric integral (HI) is over 0.45 at both sides of the Tongtian River, while it is 0.15-0.45 in the Duocai-Ningqia basin, Dengailong basin, Yequ basin and Batang basin. The values and distribution of geomorphic indexes indicate that the pre-existing SE-trending parallel-drainage pattern turned to an inverted-drainage pattern as a result of strike-slip faulting. Dangjiang, Lixing, Longbao and the northeastern part of the Shanglaxiu regions became pull-apart basins, while the tributaries of the Tongtian River in the northeast eroded dramatically headward as a result of the uplift of the NE-trending thrust, and finally captured the former SE-trending channels.

**Keywords:** neotectonic movement; inverted drainage pattern; river capture; strike-slip fault; Tongtian River; Tibetan Plateau