

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

戴 岩¹, 王先彦¹, 王胜利², 李一泉¹, 鹿化煜¹

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023)

摘要: 宛川河为黄河的一级支流, 位于青藏高原东北部的兰州盆地东部。该区域历史时期曾发生多次6级以上地震。以DEM数据为基础, 通过河流水系分析和地貌形态指数的计算, 讨论了区域新构造活动特征。山前曲折度指数(SMF)在宛川河北为1.03~1.18, 在兴隆山北前缘为1.83~2.88; 河谷宽高比指数(VF)在宛川河北部为0.36~2.34, 在南部的兴隆山为0.55~1.3。SMF与VF值的大小和分布特征表明研究区新构造活动活跃, 且宛川河以北(前人推测有断层存在)新构造活动的活跃程度更高。流域盆地非对称性指数(AF)在宛川河北部东南端的异常揭示存在掀斜断块和褶皱运动; 结合裂点分布和沟谷错断等地貌特征, 发现宛川河北正断裂的东南端也存在西北—东南向走滑活动。

关键词: 地貌指数; 河流纵剖面; 区域构造; 断层; 宛川河

DOI: 10.11821/dlxb201603005

1 引言

利用现代地表形态可反演近地表的构造活动过程, 如何从现有的地貌形态中提取相关的构造活动信息是构造地貌研究的核心问题。现代3S技术的发展尤其是高分辨率数字高程模型(DEM)的出现, 为构造地貌的定量化研究提供了新的契机。地貌形态指数是对由内力作用形成地貌的外在形态特征定量化的表达, 它可以作为一个基本的勘查工具来识别正在经历快速构造变形的区域, 将这些形态指数的结果综合起来分析, 可以评估研究区域新构造活动状况, 从而很好地揭示隐含在构造地貌中的构造活动信息^[1]。很多年轻的构造活动会很好地保留在现代地形当中, 因此, 地貌形态指数被广泛地运用到评估新构造活动研究中^[2-6]。构造活动对流域的地形和地貌的发展会产生控制和扰动作用, 通过对扰动性质的研究, 可以得到关于原始构造活动的方向及大小的信息^[7-8]。因此, 对河流及其流域盆地形态的定量研究是了解构造活动与地表过程耦合作用的重要途径。

宛川河流域位于兰州东部地区, 该区域位于青藏高原东北缘, 新构造活动活跃。为了更好地理解该区域的新构造活动特征, 对该区域DEM高程数据进行处理, 利用TecDEM及ArcGIS10.0提取河流纵剖面裂点及计算地貌形态指数, 对其地表形态进行量化表达与分析。本文将选取山前曲折度(SMF)、河谷宽高比(VF)、流域盆地的非对称性(AF)等定量地貌形态指数, 结合河流裂点的识别, 分析宛川河流域一带的区域新构造活动特征。

收稿日期: 2015-11-12; 修订日期: 2015-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41522101) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41522101]

作者简介: 戴岩(1991-), 女, 安徽安庆人, 硕士, 主要研究方向为构造地貌。E-mail: happy_dy00014@163.com

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

2 研究区概况

宛川河为黄河的一级支流, 其主体流经兰州东部的榆中盆地, 全长 75 km, 流域面积为 1801 km²。宛川河发源于兴隆山与马衔山之间的深切河谷中, 流向东北, 而后又转向西北, 经桑园峡流入黄河(图1)。

宛川河流经的榆中盆地属于民和盆地浅凹的一部分, 是一个较为独立的、边缘由断裂控制的中、新生代陆内盆地。榆中盆地整体呈向东敞开, 构造形态整体表现为走向北西、向东宽缓撒开的帚型复式褶皱构造, 盆地地表大部分被第四系松散沉积物所覆盖^[9]。

研究区处在祁连山地震带与南北地震带的复合部位。位于研究区南部的马衔山—兴隆山为北西西向左旋逆走滑活动断裂系, 由马衔山北缘左旋逆走滑断裂, 兴隆山北缘逆断裂, 兴隆山南缘逆断裂, 马衔山南缘逆断裂组成(图1)。

马衔山北缘断裂是兰州东部地区规模最大、新活动性最强的断裂, 晚第四纪以来, 其构造变形以走滑运动为主, 其余3条为其伴生的1组逆冲断裂带^[10]。兴隆山和马衔山都是基岩山地, 马衔山为前震旦系混合岩、花岗岩、片麻岩、变质岩构成的复背斜断块中高山, 兴隆山为震旦系变质火山岩、变质砂岩、千枚岩和硅质灰岩构成的复向斜断块中山^[11]。另外, 推测有位于宛川河北部的断裂, 为兰州市区金城关断裂的东延部分, 性质为半隐伏断裂^[12]。宛川河北部及东北部地区沉积不同厚度的风成黄土, 是以变质岩为基底的黄土梁、峁地形^[13]。

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源

研究数据主要采用的是 ASTER DEM (30 m 分辨率), 利用 TecDEM^[14-15]提取研究区的河网水系。拼接而成的 DEM 覆盖研究区面积为 5400 km²。共提取 54 条河流及沟谷, 利用 TecDEM 河流纵剖面、盆地分析功能, 对每条河流纵剖面识别裂点及生成流域不对称性 (AF) 矢量图; 山前曲折度 (SMF) 及河谷宽高比 (VF) 计算、成图则是借助于 ArcGIS10.0 平台完成。研究区地质构造图是通过一系列地质图矢量化及叠加, 修改后得到需要的地质概况图。

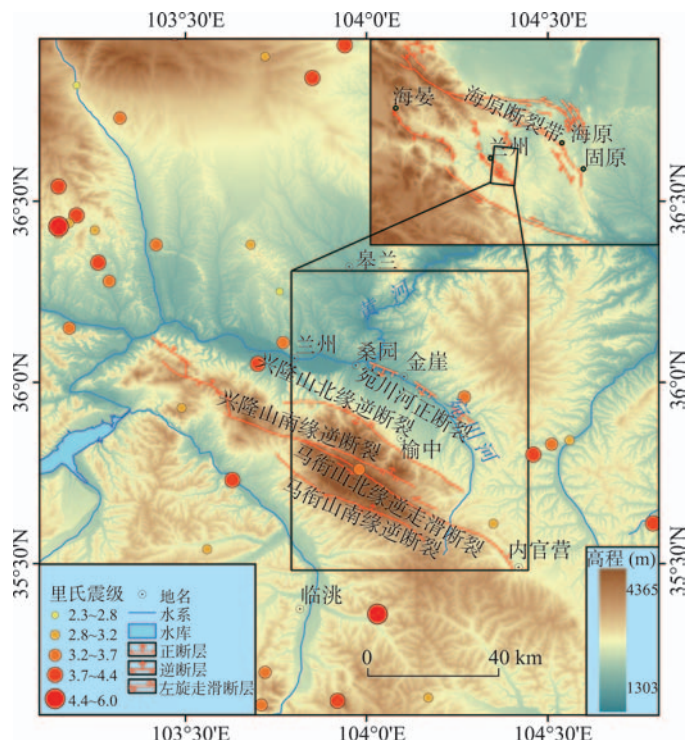


图1 宛川河流域构造概况和近30年地震的分布(地震数据引自《中国地震信息网》)

Fig. 1 Tectonic map of Wanchuan valley and the distribution of the earthquakes in recent 30 years (The seismic data from China Seismic Information)

3.2 河流纵剖面裂点提取及地貌形态指数计算原理、方法

3.2.1 河流纵剖面裂点提取 在河流地貌研究中, 河流纵剖面形态对流域内构造活动的响应极为敏感^[16]。在河流纵剖面上, 裂点的发育是瞬态不平衡地貌系统最为典型的特征之一^[17]。在均衡条件下, 河流纵剖面为平滑下凹形态; 一旦河流发育受到扰动, 如构造活动, 河流系统就会处于瞬态的不平衡状态^[18], 在河流纵剖面上就会出现上凸的异常部位, 即裂点^[19-20]。因此, 河流裂点的分布及发育特征可以反映流域内断裂的活动情况。

河流裂点的提取有多种方法, 主要有纵剖面高程陡降法^[21]、点坡度法^[22]、DS图识别法^[19]及S-A双对数法^[23-24]等。本文使用的是河流纵剖面高程陡降法, 即目视解译法, 通过纵剖面高程值陡降点判断裂点。在TecDEM功能界面中, 直接利用Knickpoints Selection功能对提取出来的沟谷纵剖面识别裂点。

3.2.2 山前曲折度(SMF) 山前曲折度SMF (Mountain Front Sinuosity) 描述的是山前缘的形态, 反映过去及现在沿着山前缘发生的构造活动^[5]。SMF是对山前地貌形态定量化表达, 这个指数常常被用作研究区域地质构造活动^[25-29], 并且也反映了山前缘的断裂活动与河流水系侵蚀之间的平衡关系^[2]。断层活动活跃的地区, 往往会形成一系列的断层崖和断层三角面, 山前缘的形态比较顺直。如果区域内构造活动稳定、由侵蚀活动占主导, 则形成不规则的山前缘面^[30]。SMF的计算公式如下:

$$SMF = Lmf/Ls \quad (1)$$

式中: SMF 为山前曲折度; Lmf 为沿着山前缘的实际距离; Ls 为山前的直线距离。沿着山麓与谷底的相交处, 测量 Lmf 的大小, 为了测量的准确性, Ls 的大小没有使用同一值。山前缘的形态越顺直, SMF 的值越接近于 1, 表明区域的构造活动越活跃。如果侵蚀活动比较强烈, SMF 的值大于 2, 表明区域构造稳定^[2]。构造活动活跃的山前缘曲折度值在 1.0~1.4 之间, 较活跃及不活跃的山前缘曲折度值分别为 1.4~3.0 和 > 3.0 ^[31]。

3.2.3 河谷宽高比(VF) 河谷宽高比 VF (Valley Floor Height-to-Width Ratio) 指数被用来定量描述河谷的横剖面形态, 进而指示区域隆升状况^[1]。如果区域构造活动强烈, 河流下切侵蚀, 河谷形态呈深而窄的 V 形。若河道侵蚀基准面趋于稳定且构造活动不活跃, 河谷将发生侧向侵蚀, 谷底拓宽, 形成宽而浅的河谷。VF 值间接指示了河流的下切侵蚀速率, 反映了区域的隆起速率。VF 值的算法公式如下:

$$VF = 2Vfw / [(Eld - Esc) + (Erd - Esc)] \quad (2)$$

式中: VF 为河谷宽高比; Vfw 为谷底宽度; Eld 、 Erd 分别为河谷两侧谷肩高程; Esc 为谷底高程。若 VF 值低 (< 1), 河谷为“V”形, 表明区域存在快速隆升, 河流下切侵蚀强烈^[2]; 若 VF 值高, 河谷较宽, 表明构造活动不强烈, 河流向下侵蚀速率小。断裂活动发生后, 地形对其的响应会不断向上游传递, 因此, 将分析的河谷横剖面选定在靠近断层线附近^[2]。一般选取距离断层向上游 500~1000 m 处计算 VF 的值^[32]。

3.2.4 流域盆地非对称性指数(AF) 流域盆地非对称性指数 AF (the drainage basin asymmetry factor) 由 Cox^[33] 提出, 通过盆地横向地形的对称性来研究河道迁移原因。尽管 AF 指数并没有为区域掀斜提供直接的证据, 但是它只靠地形图就能快速识别构造区域可能存在的掀斜要素。因此对于构造活动隐蔽的区域, 如表面断层极少出露或没有出露, AF 指数有助于估测近期发生的构造活动。AF 计算公式如下:

$$AF = Da/Dd \quad (3)$$

式中: AF 为流域盆地非对称性指数; Da 为盆地中线到河流主干的距离; Dd 为盆地中线到盆地边界的距离。AF 指数的计算借助于 TecDEM 半自动化完成, 流域盆地中线采用距离曲率方法得到^[15]。提取流域盆地设定的 Strahler 等级为 3, 手动依次提取盆地中线及主

河流, 采用距离为 2 km 的等间距进行计算。Strahler 等级为 3 及 2 km 的等距离间隔都是为了可以获得比较合理的盆地分布图及非对称性矢量图, 本文共计算了研究区 29 个小流域盆地的 AF 值。

4 计算结果

4.1 裂点的分布

通过 TecDEM 程序界面对 52 条河(沟)谷纵剖面进行了裂点的识别, 提取出了多个裂点。宛川河南部支流谷地纵剖面多为下凹、平滑的曲线(图 2c), 较少的沟谷有个别裂点发育(图 2d); 而宛川河北部支流纵剖面往往发育多个裂点(图 2a、图 2b)。

裂点主要集中分布于宛川河的北侧, 南侧靠近兴隆山附近分布较少(图 3)。宛川河北侧的沟谷裂点沿着宛川河断裂依次向后排列分布, 裂点多且密集; 南部的裂点主要分布于兴隆山断层线以南, 且分布于河流中上游区域。

4.2 山前曲折度(SMF)

沿着同一基准面(山麓与谷底的交界面), 在宛川河南部的兴隆山前缘测量了 6 处山前缘的曲折度, 在宛川河北测量了 8 处, 结果如表 1 所示。

兴隆山北前缘 SMF 在 1.83~2.88, 均值为 2.25; 宛川河北 SMF 值为 1.03~1.18, 均值为 1.11。两处的 SMF 值均小于 3.0, 兴隆山北 SMF 值要大于宛川河北(图 4a)。

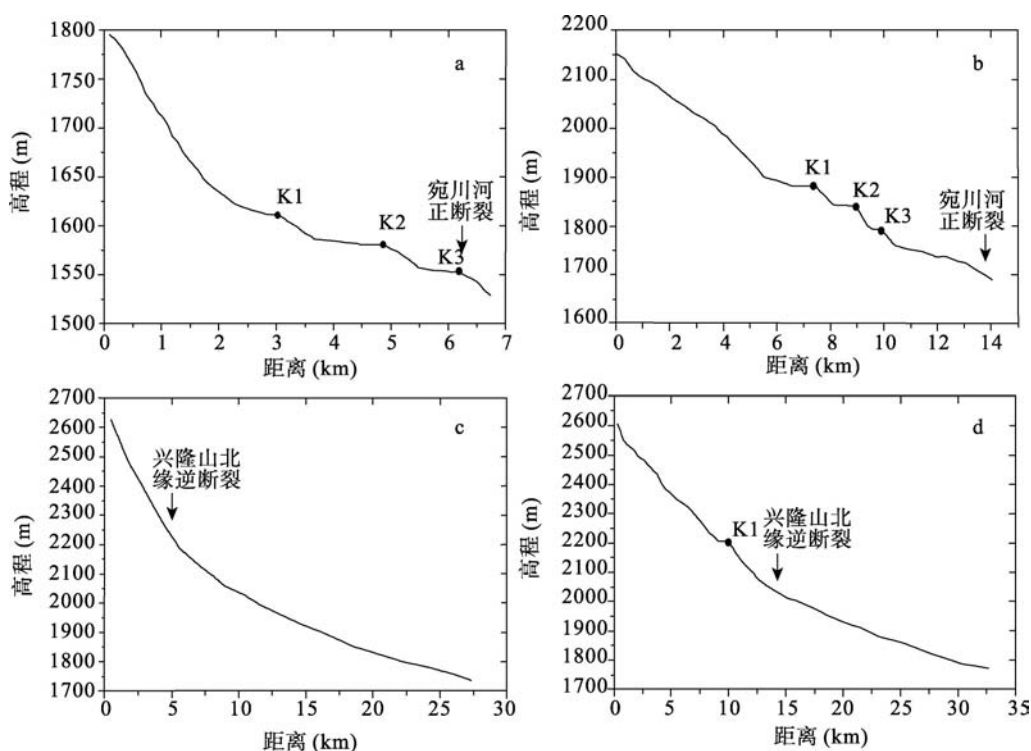


图2 宛川河北部支流(a、b)和南部支流(c、d)的典型河(沟)纵剖面图
(K-裂点; a、b、c、d 支流位置见图 3)

Fig. 2 Longitudinal river profiles of the branches in the north (a, b) and south (c, d) of Wanchuan valley
(K-Knickpoints; The locations of the river a, b, c, d are also shown in Fig. 3.)

4.3 河谷宽高比(VF)

为了确保选定的河谷横剖面均靠近断层线附近,借助ArcGIS10.0平台,首先对宛川河北断裂及兴隆山北缘断裂线作其缓冲区,范围为1 km,在缓冲区边缘提取沟谷剖面,宛川河北提取14处沟谷横剖面,兴隆山北侧提取10处。根据计算公式(2)计算其VF值。南部兴隆山的VF值在0.55~13,均值为5.68;宛川河北部的VF值范围在0.36~2.34,平均值为0.77(表1)。宛川河河北VF值要远远小于兴隆山北侧的VF值,且约79%左右的 $VF < 1$ 的区域分布在宛川河北(图4b),说明宛川河北有强烈的新构造活动。

4.4 流域盆地非对称性(AF)

通过TecDEM半自动化的程序计算了研究区29个小流域盆地的AF值,得到AF矢量分布(图5)。

宛川河南北两侧AF指向都呈一定的规律性。在南部兴隆山附近的AF指数分布分为两个部分,以1桑园峡为界,在其左侧AF指向为

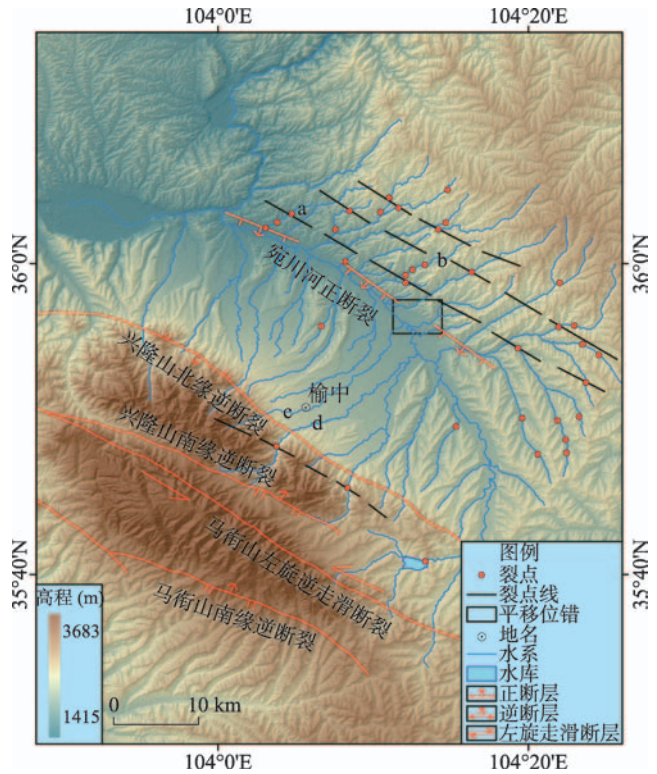


图3 宛川河流域裂点分布(a、b、c、d为图2中选取的典型纵剖面对应的支流;虚线为高度相近的裂点连线)

Fig. 3 Knickpoints distribution of Wanchuan Valley (a、b、c、d in Fig. 2 are the typical river longitudinal profiles of the corresponding branches; the dotted line is the connection of the knickpoints with similar altitude.)

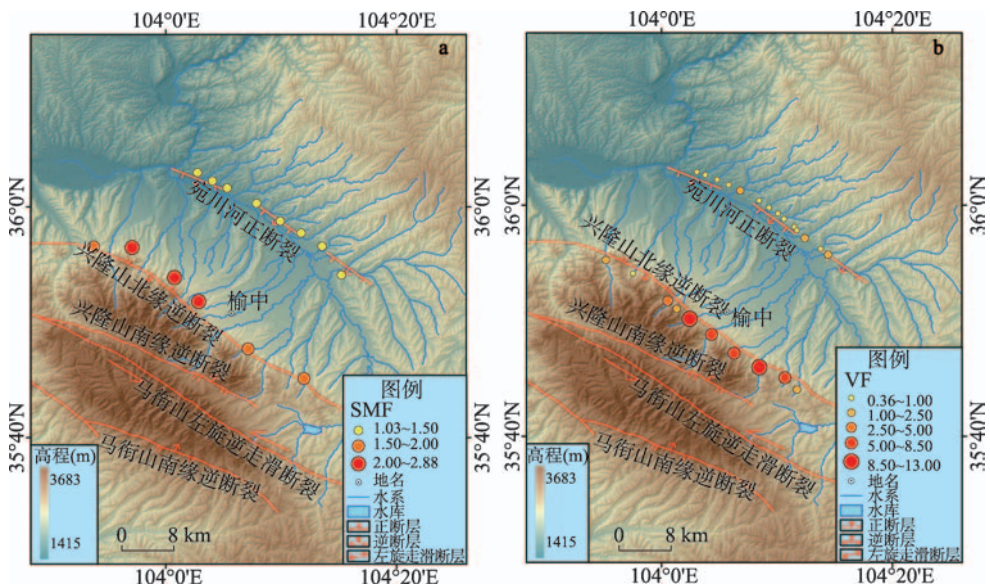


图4 宛川河流域SMF(a)和VF(b)形态指数分布

Fig. 4 The distribution of mountain front sinuosity index and valley floor height-to-width ratio index

北西西向, 右侧的AF指向大致为北东东向。宛川河北部的AF指向除2、3处异常外, 其余指向均为东南向。

5 结果分析与讨论

河谷裂点主要与断层和岩性有关,而宛川河北部及东北部地区主要地层为变质岩基底和其上覆的不同厚度的风成黄土^[13], 区域岩性均一, 因此其裂点的形成主要与构造活动有关。南部裂点以兴隆山北缘断层线为界, 兴隆山主要是以变质岩为主, 岩性基本一致^[11], 因此位于山体上的裂点也主要受构造控制; 榆中盆地基底为前寒武系变质岩, 盆地中沉积厚层的第四纪冲洪积卵砾石(最大厚度达300 m)^[34], 因而盆地内形成的裂点可能与冲积扇堆积体有关。另外兴隆山东部一裂点位于水库边缘, 可能与水库有关, 指示水库出口。断裂活动发生后, 穿过断层支流的纵剖面受到扰动, 出现裂点, 之后河流纵剖面通过不断向均衡状态调整而持续向上游迁移, 裂点会平行后退, 尽管不同支流流域面积大小不一致, 但裂点的纵向迁移速度相近, 最后会出现在相近的高度, 近似与断层走向平行分布^[23]。宛川河流域北部裂点分布尽管很密集, 但是在宛川河断裂东北方向的裂点近水平方向呈现一定的规律性, 裂点的展布基本与断层线平行, 且同一展布线上裂点大致分布在一定的高度(图3)。此外在宛川河断裂东南也分布有数个与断层线并不平行分布的裂点。南部位于兴隆山南缘断层线以北地区的裂点连线, 同样近似于断层线平行展布。这两个区域裂点连线与断层总体呈近平行分布的特征, 也证实了这些裂点与切割了支流的边界

表1 兴隆山北与宛川河北SMF和VF值
Tab. 1 The values of the mountain front sinuosity index and the valley floor height-to-width radio index in the Xinglong Mountain and the north of Wanchuan Valley

兴隆山北		宛川河北	
SMF	VF	SMF	VF
1.83	0.55	1.03	0.36
1.86	1.97	1.08	0.38
2.10	1.90	1.09	0.44
2.21	2.11	1.09	0.47
2.60	4.18	1.13	0.51
2.88	5.09	1.14	0.54
	7.71	1.17	0.59
	8.46	1.18	0.65
	11.86		0.65
	13.00		0.81
			0.88
			1.06
			1.05
			2.34

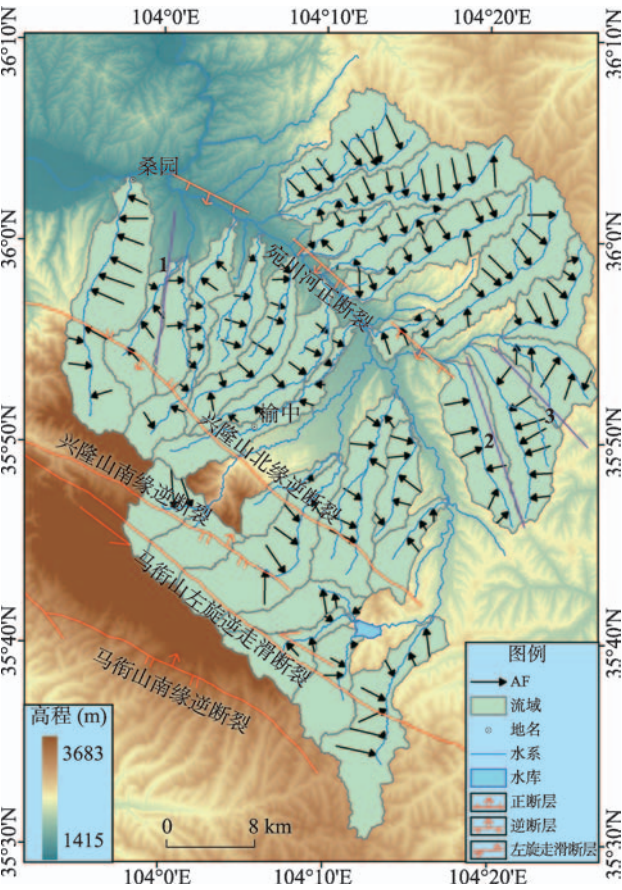


图5 宛川河流域AF矢量分布
Fig. 5 The distribution of the drainage basin asymmetry factor

断裂的断层活动相关。位于平行边界断层的同一直线上海拔高度相近的裂点,应该形成于同一次断裂活动中,并且以大致相同的纵向溯源侵蚀速度不断后退^[23-24]。相比与兴隆山断层以南裂点分布在一条与断层平行的直线上,宛川河断裂东北方向裂点分布总体上表现出的多条近平行的不同海拔的线状分布,可能表明宛川河断裂存在多期新构造活动,导致多期裂点在断层的下盘(上升盘)形成,并向上游溯源侵蚀,最后分布在不同的高度。而在一些支流(如图2和图3中的支流b)在相近的与断层平行的裂点连线间,存在相比于其它支流更多的裂点,可能是由于河道的崩塌形成,也有可能是DEM数据精度较低形成的误差导致,需要进一步调查和分析。而宛川河断裂东南方向散布的与断层面并不平行的裂点与宛川河断裂的下盘抬升可能没有关系。

SMF及VF分别是对山前形态、河谷横剖面形态定量化,其值大小能指示研究区构造活动状况。SMF值在1.0~1.4之间表明构造活动非常活跃,构造活动活跃或不活跃的SMF值分别为1.4~3.0和>3.0^[31]。测量得到的SMF值均在3.0以下,说明研究区的断层活动活跃。宛川河北SMF均值为1.11,说明断层活动性强。野外观察到宛川河北部山前断层崖出露明显,整个山前缘近乎呈平直的延伸(图6d)。如图6a和图6b宋家窑断裂是宛川河断裂的一部分,线性顺直的断层陡崖发育;断层面(崖)走向为东南—北西向,向南西倾,倾角为约80°;断层性质为正断层,断层面为第三纪红色砂岩组成,断层下盘被错断抬升于地表之上,被约50 m黄土覆盖,上盘被第四纪松散堆积埋藏于地表之下。断层下盘第三纪红色碎屑岩沉积层面上紧临断层崖处发育多组东南—北西向平行于断层崖的裂缝(图6c)。

此外,穿过断层崖近西北—东南方向多条支沟在沟尾形成跌水和裂点。如图6c中部的支沟,其坡度约为10°,沟尾位于断层崖,形成跌水,该支沟向北延伸3 m和12 m分别形成两个裂点(图6c)。这些特征显示了宛川河断裂的正断层性质的活动特征。兴隆山北侧SMF均值为2.25,说明地表侵蚀程度高,山前表现为被侵蚀后的不规则形态。兴隆山北侧河流沟谷水系相对宛川河北部而言河流裂点并不发育,且其地表侵蚀程度更高,表明引起地形特征变化的最后一次断裂活动发生时间年代较久。宛川



图6 宛川河北断层活动形成的断层崖和地表裂缝(a. 宋家窑村(金崖镇东, 金崖镇位置见图1)断层面(崖)(拍照镜头向东南, 断层面(崖)倾向西南); b. 宋家窑村西断层面(崖)(照片镜头向东北; 断层面倾向西南; 断层下盘第三纪红色碎屑岩, 被错断抬升至地表之上, 断层上盘被第四纪松散堆积物埋藏于地表之下; 位置见图6d); c. 宋家窑村西断层下盘第三纪红色碎屑岩层面上东南—西北向分布(平行于断层面走向)的裂隙(照片镜头向下); d. Google earth影像显示的宛川河北断层面)

Fig. 6 Photos showing the fault scarp and fracture (a. Fault facet at Songjiayao village (east of Gaoya, see location in Fig.1 and Fig. 6d; the lens to the southeast); b. Fault facet at west of Songjiayao village (see location in Fig.6d; the lens to the northeast); c. The cracks on the surface of the Tertiary sandstone in the footwall of the fault (the lens to the surface); d. Fault facet in Google earth image)

河支流沟谷断层线向上游1 km处的VF均值为0.77, 远远小于兴隆山北缘断层线均值5.68, 且宛川河北部支流VF值普遍小于1, 也表明宛川河北存在影响侵蚀基准面的活动构造, 导致穿过宛川河边界断层支流沟谷强烈下切侵蚀, 河谷呈“V”形。一些断层活动往往造成区域范围内的发震活动, 地震资料记录表明马衔山北缘断裂带在1125年发生7级地震, 宛川河在406年曾发生6级地震^[12]。近30年以来, 研究区也发生过多次小型地震(图1)。这与SMF、VF值指示的这两条断层存在新构造活动的认识一致。

图5中1处桑园峡AF的分布在两侧呈现相反的方向, 表明该处可能存在褶皱隆起。该区域的构造变形机制分析表明, 马衔山北缘逆断裂的走滑运动控制及影响该区域的构造变形^[10]。在其东端由于断裂的张扭作用形成内官营拉分盆地, 西部则因断层弯曲产生褶皱和冲断作用, 包括桑园峡隆起^[35]。1处右侧的AF指向大致为北东东向, 揭示了该区域可能存在北东东向掀斜断块运动。宛川河在中下游流向为北西西向, 其河道的迁移极有可能是受到该掀斜断块的影响。在区域北东东向构造应力场作用下, 形成了北西西向挤压逆冲山(马衔山—兴隆山)^[36], 因此位于1处右侧AF的指向指示了该区域的构造应力场方向。宛川河北部的AF指向为东南向, 指示该处可能也存在该方向的掀斜逆冲断块, 此处有可能受到海原大型左旋走滑断层的影响。宛川河北2、3处AF指向异常, 2处为相向分布, 3处为相反分布, 推测3处可能存在褶皱隆升, 2处可能为一断陷盆地。2处两侧可能是断层边界, 发生逆冲掀斜运动; 宛川河北断裂东南部散布的裂点也可能与推测的逆冲掀斜运动有关; 还需要更多的野外调查工作来证实。宛川河在2处之前的流向为向北方向, 经过此处后河流的流向发生了偏转, 有可能为该处断块掀斜逆冲运动, 形成了北陡南缓的地形, 导致河流流向由北改向西北。前面的研究确认了宛川河断裂的存在, 同时发现该处存在多期断裂活动, 而宛川河东端支流沟谷的平移位错(如图3中黑色矩形框中穿过断层支流的東西向位错), 可能指示宛川河断裂的东端存在走滑运动。由此推测2、3处的异常可能是由走滑运动形成的, 即断裂的张扭与弯曲作用形成了2处的断陷与3处的褶皱隆起。

6 结论

通过对河流纵剖面、山前缘形态、河谷横剖面以及盆地地形等地貌特征的定量计算和分析, 讨论了研究区新构造活动的特征, 获得以下认识:

(1) 裂点反映了研究区存在多期构造活动, 将裂点的分布与野外观察到的断层崖(面)相结合, 发现前人推测的宛川河北断裂存在活动性。

(2) SMF及VF值揭示宛川河流域存在区域构造抬升运动, 且宛川河北部新构造活动可能比南部马衔山—兴隆山一带活跃的事实。

(3) AF矢量图清楚地显示了区域的构造应力场方向, 识别出了掀斜逆冲断块及褶皱隆起。断块的掀斜逆冲是河流改向的原因, 同时发现宛川河北断裂也存在走滑活动。

参考文献(References)

- [1] Keller E A, Pinter N, Green D J. Active Tectonics, Earthquakes, Uplift, and Landscape. *Environmental and Engineering Geoscience*, 1997, 3(3): 463-463.
- [2] Peters G, van Balen R T. Tectonic geomorphology of the northern Upper Rhine Graben, Germany. *Global and Planetary Change*, 2007, 58(1): 310-334.
- [3] Xu Yueren, He Honglin, Deng Qidong, et al. Quantitative river geomorphical parameters surrounding Mts. Huoshan, Shanxi Province and their tectonic implications. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(4): 746-759. [徐岳仁, 何宏林, 邓起东等. 山西霍山山脉河流地貌定量参数及其构造意义. *第四纪研究*, 2013, 33(4): 746-759.]

- [4] Zhang Chen, Pan Baotian. Geomorphic index analysis in Yumu Shan and its implications for active tectonics. Sciencepaper Online, 2012. [张忱, 潘保田. 榆木山地貌指数及活动构造意义. 中国科技论文在线, 2012.]
- [5] Dar R A, Romshoo S A, Chandra R, et al. Tectono-geomorphic study of the Karewa Basin of Kashmir Valley. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 92: 143-156.
- [6] Domínguez-González L, Andreani L, Stanek K P, et al. Geomorpho-tectonic evolution of the Jamaican restraining bend. *Geomorphology*, 2015, 228: 320-334.
- [7] Gloaguen R, Marpu P R, Niemeyer I. Automatic extraction of faults and fractal analysis from remote sensing data. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2007, 14(2): 131-138.
- [8] Kurz T, Gloaguen R, Ebinger C, et al. Deformation distribution and type in the Main Ethiopian Rift (MER): A remote sensing study. *Journal of African Earth Sciences*, 2007, 48(2): 100-114.
- [9] Shen Jianlin, Sun Wenli, Xu Bing. Sedimentary-structural features and coal prospecting orientation in Yuzhong basin, Gansu Province. *Coal Geology of China*, 2014(10): 17-21. [沈建林, 孙文礼, 徐冰. 甘肃省榆中盆地沉积—构造特征及找煤方向. 中国煤炭地质, 2014(10): 17-21.]
- [10] Yuan Daoyang, Liu Xiaofeng, Zheng Wenjun, et al. Tectonic deformation feature and mechanism of the Maxianshan-Xinglongshan active fault system in the Lanzhou area. *Earthquake Research in China*, 2003, 19(2): 125-131. [袁道阳, 刘小凤, 郑文俊, 等. 兰州马衔山—兴隆山活动断裂系的构造变形特征和机制. 中国地震, 2003, 19(2): 125-131.]
- [11] Su Huai. The studies on fluvial terraces in Eastern Lanzhou Region during last 1240 ka [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006. [苏怀. 兰州东部地区 1240 ka 以来的河流阶地研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.]
- [12] Dai Juchang, Yuan Daoyang. Principal features of the active tectonics in Lanzhou area. *Earthquake Research in Plateau*, 2002(3): 35-40. [戴聚昌, 袁道阳. 兰州地区活动构造的基本特征. 高原地震, 2002(3): 35-40.]
- [13] Hu Xiaofei, Pan Baotian, Su Huai, et al. Terrace formation age and river incision mechanism of Wanchuan River. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(6): 808-813. [胡小飞, 潘保田, 苏怀, 等. 宛川河阶地的年代与下切机制. 地理科学, 2007, 27(6): 808-813.]
- [14] Shahzad F, Gloaguen R. TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part 1: Drainage network preprocessing and stream profile analysis. *Computers & Geosciences*, 2011, 37(2): 250-260.
- [15] Shahzad F, Gloaguen R. TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part 2: Surface dynamics and basin analysis. *Computers & Geosciences*, 2011, 37(2): 261-271.
- [16] Burnett A W, Schumm S A. Alluvial-river response to neotectonic deformation in Louisiana and Mississippi. *Science*, 1983, 222(4619): 49-50.
- [17] Whipple K X. Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens. *Annu. Rev. Earth Planet. Science*, 2004, 32: 151-185.
- [18] Gardner T W. Experimental study of knickpoint and longitudinal profile evolution in cohesive, homogeneous material. *Geological Society of America Bulletin*, 1983, 94(5): 664-672.
- [19] Bishop P, Hoey T B, Jansen J D, et al. Knickpoint recession rate and catchment area: The case of uplifted rivers in Eastern Scotland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(6): 767-778.
- [20] Crosby B T, Whipple K X. Knickpoint initiation and distribution within fluvial networks: 236 waterfalls in the Waipaoa River, North Island, New Zealand. *Geomorphology*, 2006, 82(1): 16-38.
- [21] Wang Tingting, Yang Xin, Ye Juanjuan, et al. Identification of fluvial knickpoints and analysis of its scale effect based on DEMs. *Journal of Geo-information Science*, 2014, 16(6): 882-899. [王婷婷, 杨昕, 叶娟娟, 等. 不同尺度 DEM 的河流裂点提取及其效应分析. 地球信息科学学报, 2014, 16(6): 882-899.]
- [22] Hayakawa Y S, Oguchi T. DEM-based identification of fluvial knickzones and its application to Japanese mountain rivers. *Geomorphology*, 2006, 78(1): 90-106.
- [23] Zhang H P, Zhang P Z, Fan Q C. Initiation and recession of the fluvial knickpoints: A case study from the Yalu River-Wangtian'e volcanic region, northeastern China. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(11): 1746-1753.
- [24] Boulton S J, Stokes M, Mather A E. Transient fluvial incision as an indicator of active faulting and Plio-Quaternary uplift of the Moroccan High Atlas. *Tectonophysics*, 2014, 633: 16-33.
- [25] Wells S G, Bullard T F, Menges C M, et al. Regional variations in tectonic geomorphology along a segmented convergent plate boundary Pacific coast of Costa Rica. *Geomorphology*, 1988, 1(3): 239-265.
- [26] Marple R T, Talwani P. Evidence of possible tectonic upwarping along the South Carolina coastal plain from an examination of river morphology and elevation data. *Geology*, 1993, 21(7): 651-654.
- [27] Burbank D W, Anderson R S. *Tectonic Geomorphology*. John Wiley & Sons, 2011.

- [28] Cuong N Q, Zuchiewicz W A. Morphotectonic properties of the Lo River fault near Tam Dao in North Vietnam. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2001, 1(1/2): 15-22.
- [29] Silva P G, Goy J L, Zazo C, et al. Fault-generated mountain fronts in southeast Spain: Geomorphologic assessment of tectonic and seismic activity. *Geomorphology*, 2003, 50(1): 203-225.
- [30] Sarpa G, Gecena R, Toprak V, et al. Morphotectonic properties of Yenice Basin Area in Turkey. 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE34), 2011: 10-15.
- [31] Bull W B, McFadden L D. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California. *Geomorphology in arid regions. Proceedings of the Eighth Annual Geomorphology Symposium*. Binghamton: State University of New York, 1977: 115-138.
- [32] Viveen W, Van Balen R T, Schoorl J M, et al. Assessment of recent tectonic activity on the NW Iberian Atlantic Margin by means of geomorphic indices and field studies of the Lower Miño River terraces. *Tectonophysics*, 2012, 544: 13-30.
- [33] Cox R T. Analysis of drainage-basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: An example from the Mississippi Embayment. *Geological Society of America Bulletin*, 1994, 106(5): 571-581.
- [34] Shen Yuchang, Gong Guoyuan. *The Introduction of Fluvial Geomorphology*. Beijing: Science Press, 1986: 56-71. [沈玉昌, 龚国元. 河流地貌学概论. 北京: 科学出版社, 1986: 56-71.]
- [35] Liu Hefu, Xia Yiping. Coupling mechanism of strike-slip orogen and basin. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(3): 121-132. [刘和甫, 夏义平. 走滑造山带与盆地耦合机制. 地学前缘, 1999, 6(3): 121-132.]
- [36] Wang Minxin, Lu Hongtu. Exploration of features of the tectonic traces and the new tectonic stress field in Lanzhou area. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 1985(2): 16. [王民新, 吕鸿图. 兰州地区主要构造形迹与新构造应力场特征探讨. 兰州大学学报(自然科学版), 1985(2): 16.]

The neotectonic activity of Wanchuan catchment reflected by geomorphic indices

DAI Yan¹, WANG Xianyan¹, WANG Shengli², LI Yiquan¹, LU Huayu¹

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Wanchuan River, located in the northeastern Tibetan Plateau, is one of the tributaries of the Yellow River. This area has witnessed many earthquakes of magnitude 6 on the Richter scale. Based on DEM data, this paper discussed the characteristics of neotectonic activity by analyzing the drainage networks and calculating geomorphic indices. It turns out that the mountain front sinuosity index is between 1.03 and 1.18 to the north of Wanchuan River (NWR) and from 1.83 to 2.88 in Xinglong Mountain (XLM); while the valley floor height-to-width ratio index is about 0.36-2.34 in NWR while it ranges from 0.55 to 13 in XLM. The values and distribution of the mountain front sinuosity index and the valley floor height-to-width ratio indicate that neotectonics are still active in the study area, and the movements in the north of Wanchuan River catchment are more active. The abnormal AF index in the southeast part means that there should be tilted fault block and folds in the northwest of Wanchuan River catchment. There exists a strike-slip fault in the southeast of the northern Wanchuan River valley, indicated by analyses of the distribution of knickpoints and off-set valley.

Keywords: geomorphic indices; river longitudinal profiles; regional tectonic; fault; Wanchuan River