地貌指数在当雄县宁中盆地及邻域构造活动性评价中的应用

马少谦[1,2] 李家存[1,2,3] 王 俊[1,2] 刘晓东[4]

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048; 2. 首都师范大学城市环境过程与数字模拟国家重点实验室,北京 100048;
3. 首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室,北京 100048; 4. 长春市天测科技有限公司,吉林 长春 130000)

摘要:遥感技术作为研究构造活动性的一种重要手段,可获取构造地貌的空间分布及水平位移分量,但无法量算垂直位移分量. 应用高分辨率数字高程模型(digital elevation model,DEM)数据,得到的地貌指数可定量化表达地貌表面的三维特征,对垂直位移分量的量算具有独特优势,可弥补遥感解译方法的不足. 本文以当雄县宁中盆地及邻域为研究区,利用12.5 m分辨率DEM数据计算7种地貌指数,包括山前曲折度指数、横向地形对称指数、流域非对称性指数、河谷宽高比指数、面积-高程积分指数、纵剖面和裂点以及河流坡降指数,通过与遥感解译结果进行对比验证,综合分析研究区的构造活动性,并探讨地貌指数的适用条件. 研究表明,在相同的分级标准下,F1断层为正断层,活动性较弱;F2断层为左旋走滑兼正断层,活动性最强;F3断层为左旋走滑兼正断层,活动性较强.

关键词:地貌指数;遥感解译;构造活动;宁中盆地

中图分类号:P315.5;P627 **DOI**:10.19789/j.1004-9398.2020.05.010

0 引 言

青藏高原新生代期间的强烈抬升对东亚季风的起源和演化,以及全球气候的变化,都产生了重大影响. 晚新生代期间伴随青藏高原内部的东西向伸展运动,沿念青唐古拉山东南麓发生强烈的正断层和左旋走滑断裂活动,引起剧烈的山脉隆升和冰川作用[1]. 宁中盆地地处藏北与藏东构造、地貌和地层的分界线,研究其构造活动的强弱能为揭示青藏高原的构造运动模式提供有效参考[2-3].

到目前为止,部分学者已对当雄地区地震烈度的评定、发震机制和第四纪地质演化等方面做了研究[1,4-5],但研究区域尺度较大,多以宏观分析为主,无法展现地貌构造微观特征. 其研究方法主要以地质调查分析[1,6-7]、遥感解译[3]及二者相结合为主. 地质调查方法易受自然条件影响且周期较长,而遥感解译方法仅能获取构造活动的水平位移分量,无法获取垂直位移分量且遥感影像解译多以目视解译为主,解译结果随机性较大. 20世纪50年代,Strahler[8]首先提出地貌指数方法并应用于地貌研究,随着地理信息技术的不断发展,不同类型的地貌指数被提出并被应用于地貌特征的半定量化-定量化研究[9-11],目前主要用来识别存在构造活动的区域以及分析构造活动性的强弱[12-16]. 地貌指数可定量化表达地貌表面的三维特征,结合多种地貌指数综合分析,不仅能够获取构造活动在水平、垂直方向上的位移分量,还可识别快速隆升的区域,在构造活动性分析中发挥越来越重要的作用. 但不同地貌指数对不同断裂类型的敏感度和使用范围存在差异,且无法表达构造地貌的空间分布. 而根据断层类型选择合适的地貌指数并结合遥感解译方法,是准确分析构造活动的关键.

本文以宁中盆地及邻域为研究区,结合遥感解译数据,利用高分辨率数字高程模型(digital elevation model,DEM)计算7种地貌指数来综合评估宁中盆地及邻域的构造活动性,确定不同类型地貌指数的使用范围,为揭示整个青藏高原的构造运动模式,以及用地貌指数评估构造活动性提供参考依据.

1 区域概况

宁中盆地位于西藏自治区拉萨市当雄县宁中乡(30°06′~30°35′N, 90°20′~91°09′E),藏南与藏北的交界地带,平均海拔4 200 m. 宁中盆地及邻域地

收稿日期:2019-10-23

貌多样,念青唐古拉山脉横穿全境,地势由西北向东南倾斜,西北部和东南半壁皆为高峻山地,其间夹着同念青唐古拉山走向一致的山间构造洪积宽谷盆地——宁中盆地,呈现岭谷平行相间的较有规则的条状地形.形成 3 个地貌单元,分别为西北部的冰蚀高山、极高山,东南部的高寒中山和中部的洪积宽谷盆地.宁中盆地北侧念青唐古拉山山体是一个平缓的复背斜,其岩石性质较为单一,东南侧为粗粒球状黑云母片岩,与山体一侧的花岗闪长岩呈断层接触[2].

依据中国活动构造图(编号:2004CB418400)绘制研究区构造地貌(图 1),研究区依次分布着 NE 走向的近似平行的 3 条(F1、F2 和 F3)断层.目前,对 F1 和 F3 断层的活动性研究较少.F2 断层属于亚东-谷露断裂带中段的一部分,在亚东-谷露断裂带中段晚第四纪以来,其构造变形存在拉张运动和左旋走滑运动[3].复杂的地貌环境和恶劣的自然条件使该区域的构造活动性研究比较匮乏,因此采用地貌指数方法对该区域的构造活动性研究显得尤为重要.

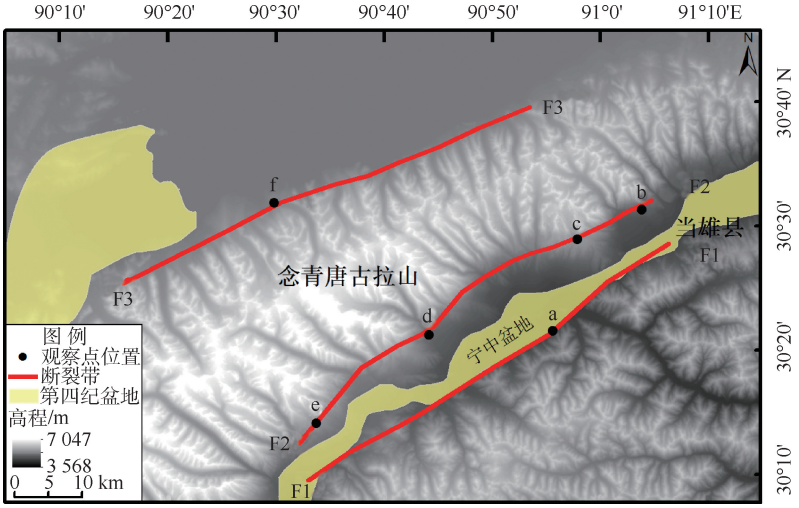


图 1　研究区概况

注:F1 为正断层,命名为念青唐古拉山东南麓断裂;F2 为左旋走滑断层,命名为亚东-谷露断裂;F3 为左旋走滑断层,命名为纳木错东南岸断裂;a ~ f 为地貌观察点.

2　研究方法

以宁中盆地及邻域为研究区,利用高分辨率 Google Earth 影像(分辨率为 0.6 m)进行遥感解译,基于高分辨率 ALOS DEM(分辨率为 12.5 m),利用 ArcGIS 软件和 Valley Morph Tool[13]、TecDEM[17-18]等插件,测量 14 处山前缘的山前曲折度指数(mountain front sinuosity index,SMF),计算 43 个流域的面积-高程积分指数(area-elevation integral index,HI),河谷宽高比指数(valley floor width to valley height ratio,VF),横向地形对称指数(transverse terrain symmetry index,T)和流域非对称性指数(uneven basin asymmetry factor,AF),并计算其中 16 个流域的纵剖面和裂点(knicks)以及主河道河流坡降指数(stream gradient index,SL).结合已有地质资料,评估该区的构造活动情况.

2.1　遥感解译

地貌特征是记录构造活动性的最直接证据[15].活动断裂是第四纪以来或晚第四纪以来,有过活动或至今仍在活动的断层,级别较大的活动断裂可引起地表的破裂,造成断裂两侧的地貌差异和扭动变形等[19].遥感影像尤其是高分辨影像可有效识别这些地貌特征,根据断层解译标志分析活动断裂的空间展布特点,进而分析其活动性.

2.2　地貌指数

DEM 数据是对地面形态的数字化表达,主要包括高程在内的地貌因子,为地貌指数的计算提供基础数据.地理信息系统(GIS)提供可靠的环境来提取并计算有用信息,高分辨率 DEM 使计算结果更精确.此外,这种方法不仅能够识别构造活跃的区域,而且能识别出流域的特殊特征及其对构造变形的脆弱性.

2.2.1　SMF

山前地貌形态主要受构造作用与侵蚀作用的控制.构造活跃的区域,往往会形成断层崖和断层三角面,山前缘的形态比较平直,构造作用占主导

地位. 随着构造活动趋于稳定,侵蚀活动占主导时,山前缘的形态会逐渐变得曲折. 因此,山前缘的平面曲直形态是解释构造的重要标志之一[14]. 利用 SMF 对研究区域地貌特征进行定量化计算,可以反映构造作用与侵蚀作用的强度,为评估长期变形和构造活动性提供必要的基础数据[14]. 一般来说,大多数构造活跃区域的山前缘的 SMF 为 1.00 ~ 1.40,此时构造作用占主导地位;较不活跃山前缘的 SMF 为 1.40 ~ 3.00;不活跃的 SMF > 3.00,此时侵蚀作用占主导地位[10]. 该指数定义为山前缘的实际距离与山前缘直线距离之比. 指数计算公式为

$$I_{SMF} = L_{mf}/L_s, \quad (1)$$

式中 L_{mf} 为山前缘的实际距离,L_s 为山前缘的直线距离.

2.2.2　HI

任何流域的等高线都能计算出给定高度以下或以上的面积,是区分构造活动区和非活动区的有力工具. 等高线的形状和 HI 值不仅为盆地的侵蚀阶段提供有价值的信息,而且为控制构造、气候和岩性因素提供重要的信息. HI > 0.60 的区域表明地形相对于平均值较高,地貌发育阶段处于幼年期;HI≤0.40 反映地形长期暴露受侵蚀作用较大,地貌发育为老年期;0.40 < HI≤0.60 则为地貌发育的壮年期阶段[20]. Pike 和 Wilson[21] 提出计算高程积分的一种方法,计算公式为

$$I_{HI} = (H_{mean} - H_{min})/(H_{max} - H_{min}), \quad (2)$$

式中 H_{mean} 为平均高程,H_{min} 和 H_{max} 分别为盆地的最低和最高高程,见图 2(b). H_{max} 和 H_{min} 可直接从 DEM 中读取,H_{mean} 通过在 DEM 上随机至少采集 50 个高程点并计算其平均值. 通过绘制相对面积(a/A)与相对高度(h/H)之间的关系,创建盆地的面积-高程曲线,见图 2(c). 其中,A 是流域的总面积,a 是在给定的高程 h 之上的流域内的表面积,H 是流域最大高差.

2.2.3　VF

河流横截面的形态轮廓主要受构造作用、侵蚀作用和岩石性质的影响. VF 作为衡量河流横截面形态的定量指标,尤其在岩性相同或已知岩性的区域,可以很好地反映构造作用情况[15]. VF 是以狭窄或宽阔的谷底(V 或 U 型谷剖面)来评估构造隆升的另一个灵敏的指标,VF≤1.0 为河流下切侵蚀的 V 型谷,通常与构造活跃的快速抬升有关;1.0 < VF≤1.5 表示中度活跃的构造;VF > 1.5 为主要受到横向侵蚀的 U 型谷,表明构造活动不活跃. 根据构造活动对河流的影响,其计算公式为

$$I_{VF} = 2V_{fw}/[(E_{ld} - E_{sc})/(E_{rd} - E_{sc})], \quad (3)$$

式中 V_{fw} 为选定的横剖面处的谷底宽度,E_{ld} 和 E_{rd} 分别为面向下游时所选横剖面的左侧和右侧河谷谷肩高程,E_{sc} 为谷底高程,见图 2(a). 一般将河谷横剖面选在断层线附近[14].

2.2.4　*T*

T 是以河流迁移来表示地块可能存在的抬升或掀斜,是识别地块抬升或掀斜方向的有力指标. 对于完美对称的流域,$T = 0$,随着不对称性的增加,T 趋向于 1[11]. T 计算公式为

$$T = D_a/D_d, \quad (4)$$

式中 D_a 为流域中线到干流中线的距离,D_d 为流域中线到流域边界的距离,见图 2(d).

2.2.5　AF

流域在构造活动的作用下形成的排水网具有特有的图案和几何形状. AF 用来检测地块的抬升或掀斜是较成熟的并被定义为 $I_{AF} = 100(A_r/A_t)$[11]. 为使计算结果更加直观便于表达,将公式改为

$$I_{AF} = (A_r - A_t/2)/(A_t/2), \quad (5)$$

式中 A_r 为面向下游时干流右侧的流域面积,A_t 为流域的总面积. 在没有构造活动或侵蚀作用占主导地位的流域,AF 值应趋近于 0;对于构造较为活跃的区域,AF 值随着构造作用的增加而变大,趋近于 1 或 -1,其中正值代表河流向流域左侧迁移,负值代表河流向右侧迁移.

2.2.6　河流纵剖面和裂点

河流纵剖面是河源到河口沿干流的剖面,表示河流沿水流方向的几何形态. 河流侵蚀模型与实地测量研究表明,河流处于均衡状态时的纵剖面表现为一条平缓圆滑下凹的曲线[22-23]. 受构造运动、岩性的差异以及长期的气候变迁等因素的影响,河流纵剖面会出现上凸曲线或裂点等不均衡状态特征,见图 2(e). 其中构造运动和岩性差异是最主要的因素,分析这些不均衡状态特征的影响因素,可以评估构造活动. 特别是形成凸起形状和局部剖面凸起,裂点可用来标记正、逆断层运动[14,24].

2.2.7　SL

SL 是反映流域内河流、河段的坡度变化并确定其主导因素的指标,特别是岩性和构造活动. 由于构造作用和侵蚀作用的影响,当水流通过不同的岩性或构造段时,SL 会出现高度异常或低度异常,显

示出不同的侵蚀阻力构造活动[12]. 在岩性相同的区域中,异常值与构造活动更相关. 因此 SL 是一个更有用的参数,不仅可以在纵向剖面的凸、凹段上提供低、中、高值,而且也显示相对的上升速率. 该指数被用来验证差异侵蚀的假设,以及岩性和结构控制的发生. SL 计算公式[9]为

$$I_{SL} = (\Delta H/\Delta L) \times L, \quad (6)$$

式中 ΔH 为河段的高差,ΔL 为河段的长度,L 为河段中点至河源的河段长度,见图 2(f). $\Delta H/\Delta L$ 是无量纲比,单位统一即可,由于地图上的等高线一般以 m 为单位,故 L 以 m 为单位计算,得到的 SL 单位为 m.

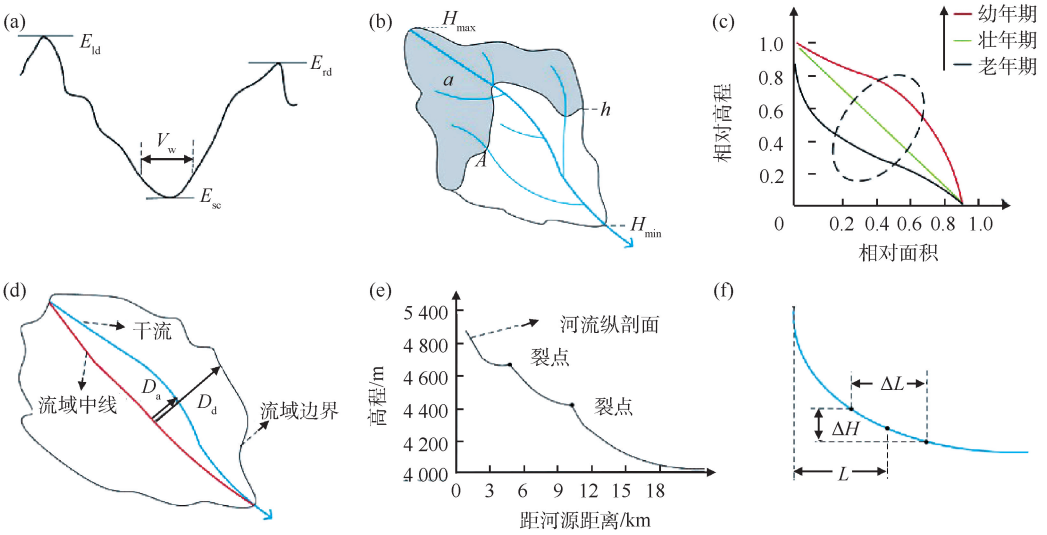


图 2　地貌指数

(a)河谷宽高比;(b)面积-高程积分;(c)面积-高程曲线;(d)横向地形对称;(e)河流纵剖面和裂点;(f)河流坡降

3　结果分析

3.1　遥感解译

F1 断层总体呈 NE 走向(图 1),全长约 64 km. 其 a 地貌观察点可看到沿断层多发育断层三角面及沿线性布展的冲洪积扇,见图 3(a). 部分三角面两侧被冲洪积扇严重侵蚀,下降盘淹没于第四纪盆地堆积物中,冲洪积扇发育对称,未见明显水系偏转. 表明断裂以正断活动为主,无走滑运动或分量较小.

F2 断层总体呈 NE 走向(图 1),全长约 66 km,由多条 NE、NEE 走向次级断裂组成,构造地貌特征明显,其 b 地貌观察点可看到地表破碎带、断层槽地和水系的同步偏转,测量 2 个水系左旋累计位移量分别约为 282 和 376 m,见图 3(b). 在 c 地貌观察

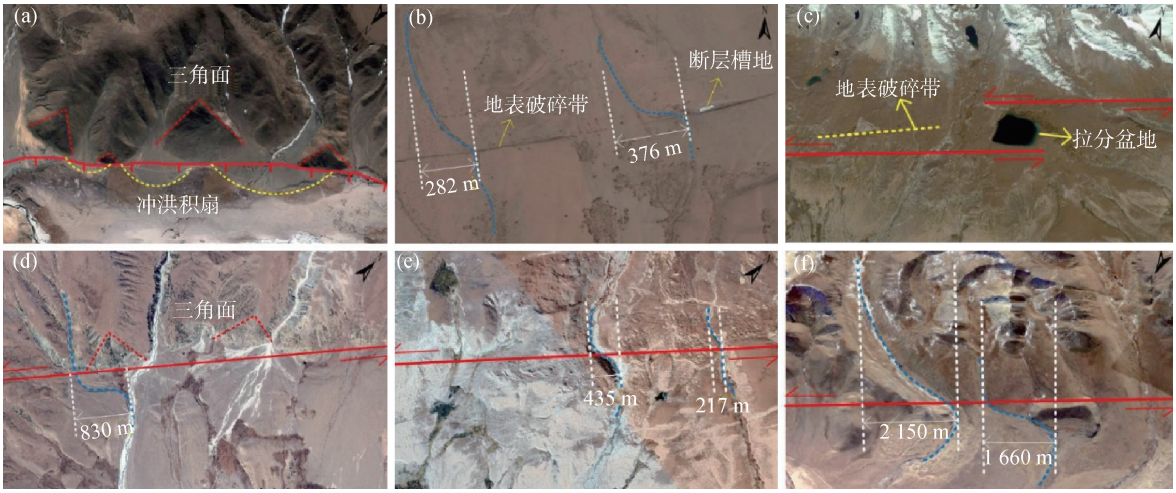


图 3　断裂带典型地貌特征

(a) F1 断层 a 处地貌观察点;(b) F2 断层 b 处地貌观察点;(c) F2 断层 c 处地貌观察点;(d) F2 断层 d 处地貌观察点;(e) F2 断层 e 处地貌观察点;(f) F3 断层 f 处地貌观察点

点可看到由 2 条左旋次级断裂形成左旋左接的拉分盆地,长轴、短轴分别约为 1 300 和 1 000 m,并发现明显的地表破碎带,见图 3(c). 在 d、e 地貌观察点也可看到大量地表破碎带、断层三角面、水系同步偏转等特征,见图 3(d)和(e). 表明该处发生过多期构造活动,断层以左旋走滑活动为主,兼有正断活动.

F3 断层总体呈 NE 走向(图 1),全长约 65 km. 断层连续性较差,其 f 地貌观察点可看到左旋累计位移量分别达 2 150 和 1 660 m 的水系偏转,存在少量断层三角面,未发现较明显地表破碎带,见图 3(f). 表明该处构造活动性较强,以左旋走滑活动为主,兼有正断活动.

3.2　地貌指数

3.2.1　SMF

通过选定 14 处研究区内的典型山前缘,并计算其山前曲折度,见图 4. 计算得到的 SMF 为 1.01 ~ 1.42,SMF 的总平均值为 1.15,表明构造活动占主导作用,除编号 3 处的 SMF > 1.40 外,所选山前缘都具有较强构造活动性. F1、F2 和 F3 处 SMF 平均值分别为 1.05、1.19 和 1.23,表明 F1 断层活动性最强、F2 断层活动性较强和 F3 断层活动性较弱.

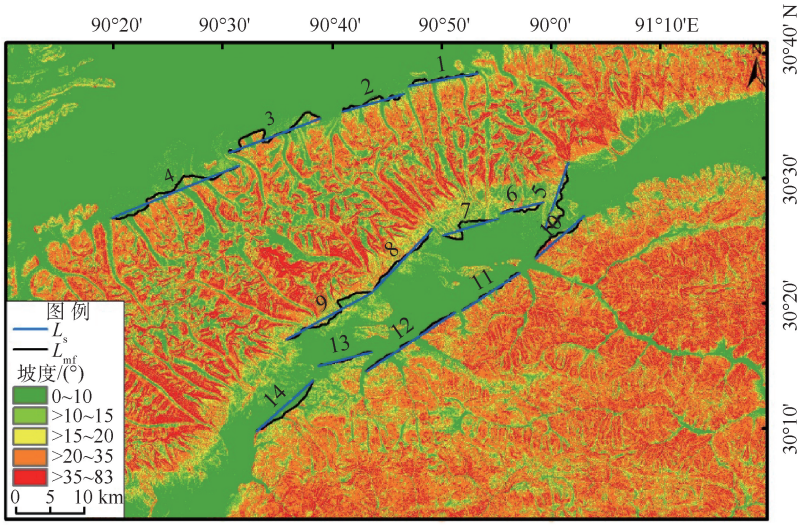


图 4　研究区山前曲折度量取位置

注:1 ~ 14 为选定的典型山前缘位置.

3.2.2　HI

对选定的 43 个流域计算 HI 值和高程曲线. 研究区内 HI 为 0.26 ~ 0.62,其中 HI > 0.60 的有 4 个流域,其显著的凸型面积-高程积分曲线表明,该流域的地形变化较少、侵蚀程度较低、具有较强的构造活动特征(图 5). 其中,F1、F2 和 F3 断层 HI 平均值分别为 0.43、0.55 和 0.45,可见 F2 断层构造活动性较强.

3.2.3　VF

对提取的流域在出水口上游 500、1 000、1 500 和 2 000 m 处分别计算并求出 VF 平均值,依据分级标准对计算结果可视化,见图 6. 计算结果表明:在计算的 43 个流域的 VF 指数中,24 个 V 型深度下切的山谷,与快速隆升或活动变形相关;15 个 U 型山谷反映下游冲积层可能发育的宽谷或 U 型谷的发育情况. 由 VF 分级图可知:F1 处计算的 13 个河谷中,表示构造活跃的河谷有 6 个,较活跃的有 3 个,不活跃的有 4 个;F2 处计算的 14 个河谷中,表示构造活跃的河谷有 13 个,不活跃的有 1 个;F3 处计算的 16 个河谷中,表示构造活跃的河谷有 5 个,较活跃的有 1 个,不活跃的有 10 个. VF 结果表明 F2 断层构造活动较为强烈,明显大于 F1 和 F3.

3.2.4　*T*

对研究区内每个流域每隔 500 m 计算一处 *T* 值,并计算出每个流域的平均 *T* 值,43 个流域的计算结果为 0.01 ~ 0.31,中值为 0.09,整体平均值为 0.12(表 1). *T* 值的大小更接近于 0,表明宁中盆地附近的河流整体迁移不明显,也表明 *T* 不适用于断层方向与流域方向垂直的区域.

3.2.5　AF

由计算结果和河流迁移方向可知,提取的 43 个流域中有 33 个流域 AF 值在 0 ~ 0.2,迁移程度较小,只有 10 个流域迁移程度较大且迁移方向

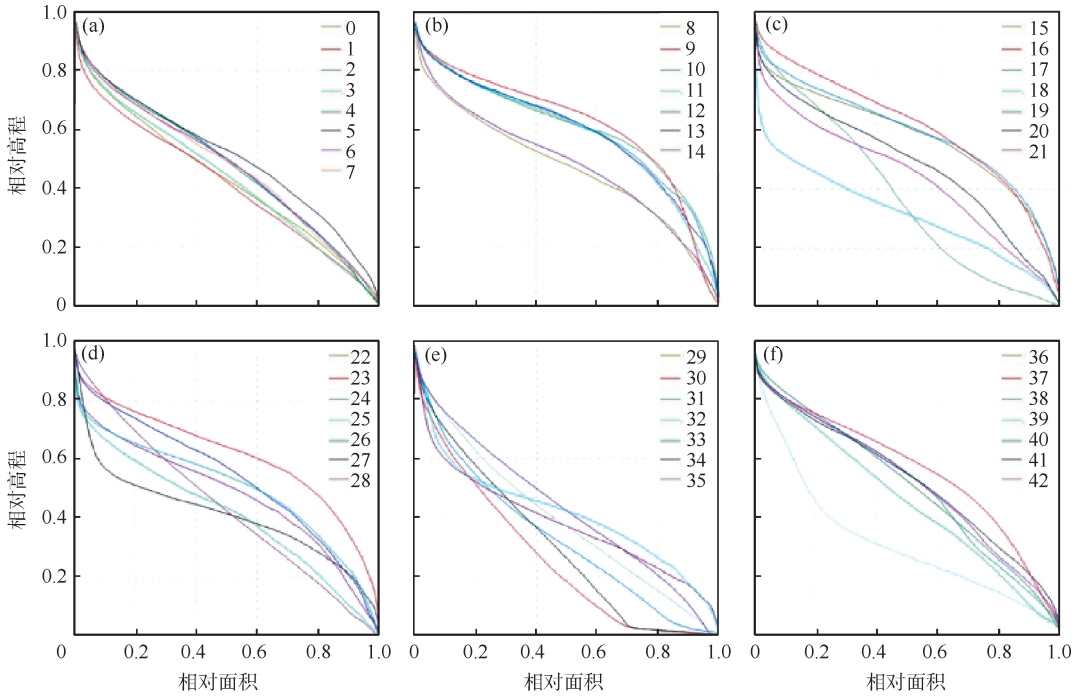


图 5 不同流域的面积-高程曲线

表 1 横向地形对称指数(*T*)计算结果

流域编号	*T*	流域编号	*T*	流域编号	*T*	流域编号	*T*
0	0.08	11	0.06	22	0.17	33	0.16
1	0.08	12	0.06	23	0.14	34	0.04
2	0.07	13	0.27	24	0.15	35	0.10
3	0.16	14	0.13	25	0.06	36	0.05
4	0.06	15	0.21	26	0.31	37	0.10
5	0.02	16	0.29	27	0.03	38	0.02
6	0.12	17	0.14	28	0.02	39	0.19
7	0.03	18	0.02	29	0.22	40	0.03
8	0.25	19	0.11	30	0.09	41	0.07
9	0.08	20	0.05	31	0.26	42	0.27
10	0.01	21	0.15	32	0.02		

没有规律.表明附近的地块掀斜不明显且方向没有规律性(图 6).这与 *T* 值结果分析一致,由于断层方向与流域方向垂直,构造作用可能引起的抬升或掀斜对河流迁移影响较小,表明 AF 也不适用于断层方向与流域方向垂直的区域.

3.2.6 河流纵剖面和裂点

本文在提取的 43 个流域中,随机选取 16 个流域分别提取河流纵剖面,并从中提取出 32 个裂点(图 7).F1 断层附近没有裂点,F2 断层附近分布较多裂点,F3 断层附近分布少量裂点,在念青唐古拉山岩性相同的情况下,构造活动是裂点形成的主要原因,说明 F2 断层活动性较强,F1、F3 断层构造活动性较弱.大部分裂点位置分布在念青唐古拉山的河道中上游附近,考虑到研究区域海拔较高,常年积雪,猜测中上游裂点的成因可能与冰川侵蚀有较大的关系.

3.2.7 SL

本文以 $\Delta L = 50$ m 计算了 16 条主河道的河流梯度指数,计算的 SL 为 63 ~ 1 171,找出异常高值和异常低值与断层、裂点的相对位置,发现异常高

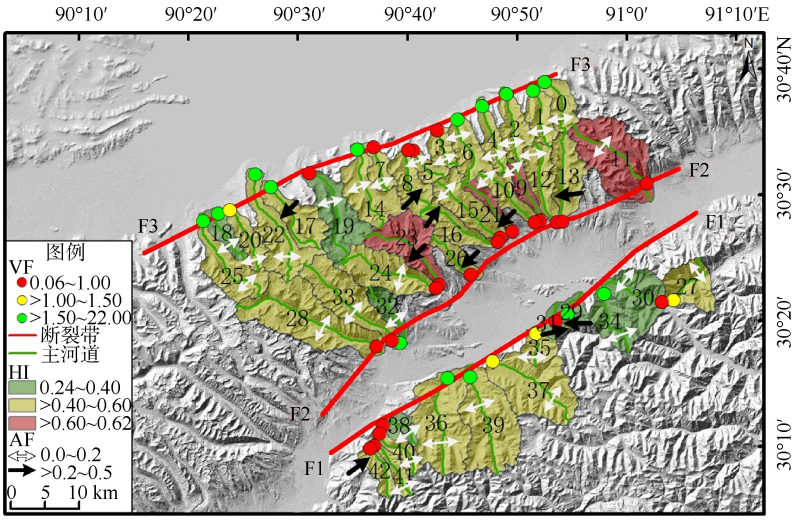


图 6　VF、HI 和 AF

注:0 ~ 42 为流域的编号;箭头表示河流迁移方向,双箭头表示河流迁移程度较小.

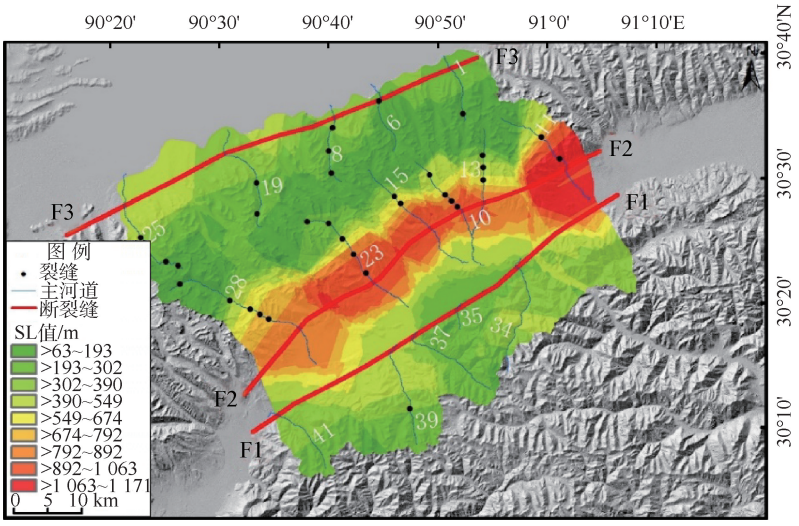


图 7　裂点位置和 SL 值

注:图中编号为流域编号,在提取的 43 个总流域中随机选取 16 个流域.

值多集中在断层附近(图 8). 对 SL 分级后进行克里金插值,有插值图可知异常高值多集中在 F2 附近(图 7). 在研究区岩性相同的情况下,表明 F2 断层附近为一个快速隆升区域,构造活动性较强.

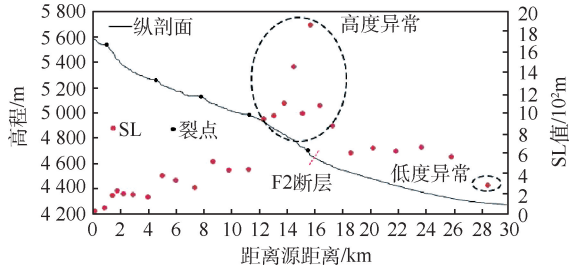


图 8　编号 23 的流域纵剖面、SL 以及裂点位置

4　讨　论

本文共计算了 7 种地貌指数,对 T 和 AF 分析得出这 2 种指数不适用于该研究区断层方向与流域方向垂直的情况. 因此,结合其余 5 种地貌指数结果和遥感解译结果对 F1、F2 和 F3 断层的活动性及地貌指数的适用条件进行综合探讨.

F1 断层的 SMF 平均值最小(1.05)表现出相对强烈的的构造活动迹象,但其他 4 种地貌指数结果表明构造活动相对较弱. 结合遥感解译结果可知,F1 断层以正断活动为主,山前缘线相对以走滑运动为主的 F2、F3 断层较为平直. F1 断层处裂点提取较少,由此表明侵蚀占主导作用,河道剖面较为平滑.

在侵蚀作用占主导因素的情况下,F1 断层依旧表现出平直的山前缘线. F2、F3 断层正断活动较弱,也表现出较为平直的山前缘线,表明 SMF 对正断运动较为灵敏,其结果可以快速识别有正断活动的区域. 此外,F1 断层为正断层,但裂点和 SL 表明构造活动较弱,这是由于裂点和 SL 是在河流纵剖面上量算的,侵蚀作用会最先在河流上表现出来,使河流纵剖面较为平滑. 可见裂点和 SL 对快速隆升的区域识别较好.

F2 断层 5 种地貌指数都表现出存在较强的构造活动,遥感解译结果也证明此处存在较强的构造活动. 表明近期以来发生的断裂活动多次经过此处,构造活动性仍处于较强的状态.

F3 断层的遥感解译结果有强构造活动的地貌证据,表明构造活动性最强,但 5 种地貌指数结果表明构造活动性相对 F2 断层较弱,处于中等的活跃状态. 表明此处构造活动相对较活跃,侵蚀作用明显,部分构造地貌特征被逐渐侵蚀.

5 结 论

地貌指数方法对垂直位移量的量算有较好的的效果,与遥感解译方法相结合可以综合评估同时存在水平、垂直位移量区域的构造活动特征,能为以后类似的评估构造活动性提供参考. 本文获得的主要认识如下:

(1) 宁中盆地 3 个断层的活动性质及活动性:F1 断层为正断层,活动性较弱;F2 断层为左旋走滑兼正断层,活动性最强;F3 断层为左旋走滑兼正断层,活动性较强.

(2)SMF 对正断运动较为灵敏,可快速识别正断运动的区域;*T* 和 AF 不适用于断层方向与流域方向垂直的情况;裂点和 SL 适用于快速隆升的区域.

参 考 文 献

[1] 吴中海. 西藏当雄 - 羊八井盆地及邻区第四纪地质演化与活动断裂研究[D]. 北京:中国地质科学院,2004.

[2] 吴章明,曹忠权,申屠炳明,等. 念青唐古拉山南东麓断层的初步研究[J]. 地震研究,1990,13(1):40 - 50.

[3] 王德华,张景发,杨佳佳,等. 遥感技术在西藏当雄地区活动断裂调查中的应用[J]. 大地测量与地球动力学,2018,38(5):487 - 492.

[4] 唐荣昌,李天祁,李介成. 当雄 7.5 级地震地质构造背景及其成因的初步认识[J]. 地震研究, 1980(1):87 - 96.

[5] 谢英情,非明伦,李西,等. 2008 年西藏当雄 6.6 级地震烈度与震害[J]. 地震研究,2008,31(增刊 2):575 - 584.

[6] 喻成,乔学军,王伟,等. 亚东-谷露裂谷带与块体运动的特征[J]. 大地测量与地球动力学,2014,34(2):36 - 40.

[7] 才巴央增,赵俊猛. 藏南裂谷系的研究综述[J]. 地震研究,2018,41(1):14 - 21.

[8] STRAHLER A N. Hypsometric area-altitude analysis of erosional topography[J]. Geological Society of America Bulletin,1952,63:1117 - 1142.

[9] HACK J T. Stream-profile analysis and stream-gradient index[J]. Journal Research US Geological Suruey,1973,4(1):421 - 429.

[10] BULL W B,MCFADDEN L D. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault,California[J]. Synthetic Metals,1977,14(8):115 - 136.

[11] 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[J]. Geological Society of America Bulletin,1994,106(5):571 - 581.

[12] HAMDOUNI R E,IRIGARAY C, FERNÁNDEZ T,et al. Assessment of relative active tectonics,southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain)[J]. Geomorphology,2008,96(1/2):150 - 173.

[13] DAXBERGER H,DALUMPINES R,SCOTT D M,et al. The valley morph tool:an automated extraction tool for transverse topographic symmetry (T-) factor and valley width to valley height (Vf-) ratio[J]. Computers & Geosciences,2014,70:154 - 163.

[14] 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(3):412 - 421.

[15] AHMSD S,ALAM A,AHMAD B,et al. Tectono-geomorphic indices of the Erin basin,NE Kashmir valley,India[J]. Journal of Asian Earth Sciences,2018,151:16 - 30.

[16] CHENG Y,HE C,RAO G,et al. Geomorphological and structural characterization of the southern Weihe Graben,central China:implications for fault segmentation[J]. Tectonophysics,2018,722:11 - 24.
[17] SHAHZAD F,GLOAGUEN R. TecDEM:a MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology,part 1:drainage network preprocessing and stream profile analysis[J]. Computers & Geosciences,2011,37(2):250 - 260.
[18] SHAHZAD F,GLOAGUEN R. TecDEM:A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology,part 2:surface dynamics and basin analysis[J]. Computers & Geosciences, 2011,37(2):261 - 271.
[19] 李家存,吴中海,张铎,等. 青海玉树地区主要活动断裂的遥感影像解译及构造活动性[J]. 地质通报,2014,33(4):535 - 550.
[20] 常直杨,王建,白世彪,等. 面积高程积分值计算方法的比较[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(3):171 - 175.
[21] PIKE R J, WILSON S E. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis[J]. Geological Society of America Bulletin,1971,82(4):1079 - 1083.
[22] 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[J]. 地理学报, 2015,70(9):1516 - 1525.
[23] 陈苗,胡小飞,王维. 走廊南山河流纵剖面高海拔裂点的成因[J]. 地理学报,2018,73(9):1702 - 1713.
[24] PÉREZ-PEÑA J V,AZAÑÓN J M,AZOR A,et al. Spatial analysis of stream power using GIS:SLk anomaly maps[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2009,34(1):16 - 25.

Application of Geomorphic Index in Evaluating Tectonic Activity in Ningzhong Basin and Its Adjacent Areas of Dangxiong Country

MA Shaoqian[1,2] LI Jiacun[1,2,3] WANG Jun[1,2] LIU Xiaodong[4]

(1. Resource Environment and Tourism College of Capital Normal University, Beijing 100048; 2. National Key Laboratory of Urban Environmental Process and Digital Simulation of Capital Normal University, Beijing 100048;
3. 3D Information Acquisition and Application of Capital Normal University, Key Laboratory of Ministry of Education, Beijing 100048;
4. Changchun Tiance Technology Co. LTD, Changchun Jilin 130000)

Abstract: Remote sensing technology, as an important method to research tectonic activities, has a good effect on obtaining the spatial distribution and horizontal displacement components of tectonic landforms. But it cannot calculate the vertical displacement components. If high-precision digital elevation model (DEM) is used, the obtained geomorphic index can quantitatively express the three-dimensional characteristics of the geomorphic surface, which has unique advantages in the calculation of vertical displacement components and can make up for the shortcomings of remote sensing interpretation methods. This paper takes the Ningzhong Basin and its vicinity of Dangxiong County as the research area, and uses the 12.5 m resolution DEM data to calculate 7 types of geomorphic index, mountain front sinuosity index, transverse terrain symmetry index, uneven basin asymmetry factor, valley floor width to valley height ratio, area-elevation integral index and stream gradient index, the profile and the knicks. The results are compared with the remote sensing interpretation results to comprehensively analyze the tectonic activity of the research area and find out the application conditions of geomorphic indexes. Results show that under the same classing standard, F1 fault is a normal fault with weak mobility; F2 fault is a left-lateral strike-slip and normal fault with the strongest activity; F3 fault is a left-lateral strike-slip and normal fault with the medium activity.

Keywords: geomorphic index; remote sensing interpretation; tectonic activity; Ningzhong Basin