

基于 DEM 的活动构造研究

李利波 徐 刚 胡健民 于新兵

(国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 10081)

摘要:地形地貌参数指标是分析区域活动构造的有力工具。本文以渭河上游流域的活动构造研究为例,通过提取地貌的参数指标,如面积-高程积分(Hh)、流域盆地不对称度(AF)、山前曲折度(Smf)以及谷底宽度与谷肩高度的比值(VF)、盆地形状指数(Bs)等,然后对地貌参数指标等级进行算术平均化(S/n),可得到区域的相对构造活动程度(Iat),分为:低、中等、高、较高四类等级。研究认为渭河上游流域的构造活动程度相对高($Iat=1.50$),这种方法对探讨整个区域活动构造的差异性具有很好的效果和意义。

关键词:地貌参数;活动构造;构造地貌;DEM;渭河上游流域

中图分类号:P546 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2012)03-0595-10

1 引言

地形地貌是构造、气候和地表侵蚀相互作用的结果,反映了深部的固体地球物理构造和浅表侵蚀的耦合关系^[1-3]。构造-地貌-气候系统可以揭示内、外动力作用的关系,是构造地质学和大构造学研究的新动向^[4-7],近年来,国内外对地貌过程和构造活动的耦合关系的研究程度在不断深入。

在活动构造区域,水系的相对平衡状态由于构造活动而改变,河流水系将重新调整以适应构造或气候变化达到新的平衡状态。在构造地貌研究中,河流会持续记录地貌演化过程的构造活动信息,河流地貌分析可反映出长时间尺度的构造活动特征和构造活动程度^[8-11]。国内外关于流域地貌的构造活动的研究虽然已取得了大量的成果^[12-30],但是这些研究还处在定性或半定量的过程,或者侧重于地貌的形态测量及年代学研究,而构造地貌的成因和地表过程的研究需要对地貌参数的量化分析。

数字高程模型(DEM)是对地球表面地形的数

字表达与模拟^[9],基于 DEM 的地形地貌研究实质上就是进行数值计算的过程^[10]。获取地貌形态宏观参数,可显示地表形态。随着 DEM 精度的提高和地理信息系统(GIS)技术的发展,国内外许多学者对构造活动、地壳形变、气候演化等进行了多层次的地质分析及应用^[10-14,31-37],显示出 DEM 在地学领域广阔的应用前景。本文以渭河上游流域的活动构造研究为例,利用 DEM 数据和 3S 技术,对区域地形地貌进行三维可视化和统计分析,以不同尺度对地貌特征进行研究,获取地貌形态参数,从而定量地分析区域的活动构造及动力学意义。

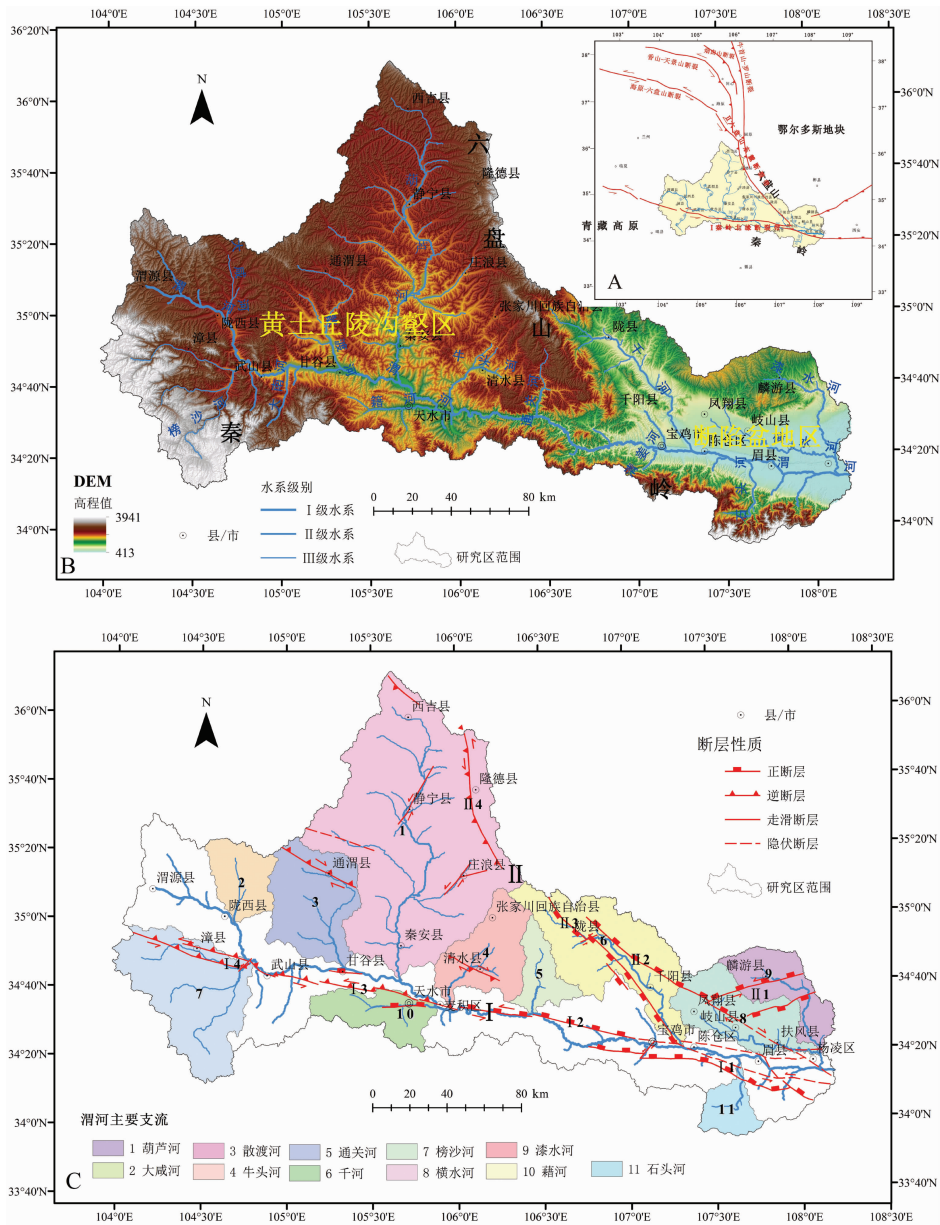
2 区域概况

渭河上游流域位于秦岭北缘活动构造带与青藏高原东北缘的六盘山东缘活动构造带的复合部位^[19](图 1-A)。不同构造系统的活动断裂相互叠加与改造,控制着区域地貌的发育,并形成渭河流域地貌的基本骨架。研究区地貌可分为东西两部:西为黄土丘陵沟壑区(即陇西高原),东为断陷盆地区(即渭河

收稿日期:2011-09-25;改回日期:2011-12-30

基金项目:中国地质调查局“全国地形形变遥感地质调查综合研究项目”(1212011140043)及“中国主要活动构造带构造研究及系列构造图编制”项目(1212011120099)资助。

作者简介:李利波,1984年生,男,硕士生,主要从事基础地质、构造地貌和GIS研究;E-mail:licags@126.com。



断裂: I 秦岭北缘断裂带; I 1 秦岭北麓断裂; I 2 宝鸡—天水断裂; I 3 天水—武山断裂; I 4 漳县断裂;
II 六盘山东缘断裂带; II 1 麟游断裂; II 2 陇山—岐山断裂; II 3 八渡—虢镇断裂; II 4 六盘山东麓断裂

图 1 研究区位置、DEM 流域和构造简图

Fig.1 Relief framework of location, DEM river basin and geology in the study area

盆地,或称渭河裂谷)(图 1-B)。渭河上游流域也是青藏高原向大陆内部扩展增生的前缘部位。晚新生代以来,伴随着青藏高原的不断隆升与扩展,研究区新构造活动强烈,发育的主要活动构造有:秦岭北麓断裂、宝鸡—天水断裂、天水—武山断裂、漳县断裂、六盘山东麓断裂、陇山—岐山断裂、八渡—虢镇断裂、渭河断裂、麟游断裂等(图 1-C)。

3 技术与方法

基于 DEM 数据研究地表地形,可直观地揭示地表构造地貌,使地形特征真实地可视化。利用 GIS 和 RS 等分析技术,可从不同时间和空间尺度定量地研究山体侵蚀、水系发育的空间分布特征和演化历史,对地表过程进行量化研究^[38-40]。利用 DEM

分析区域地貌,可为传统的地貌研究地形可视化、统计分析等领域提供了新的研究手段,不但能够直观地进行坡度和坡向分析、地形起伏以及高程统计等研究,而且可以对区域进行不同尺度的地貌特征研究。

地貌参数可有效地研究与表达地貌形态特征,量化分析构造地貌信息。本文利用 DEM 数据和 ArcGIS 软件,提取区域流域河流的地貌特征参数,如面积-高程积分(H_i)、流域盆地不对称度(AF)、河长坡降度(SL)、山前曲折度(S_{mf})、谷底宽度与谷肩高度的比值(V_f)、盆地形状指数(B_s)等典型参数指标,结合区域地质背景及野外考察验证结果,定量地分析渭河上游流域地貌的发育演化及其活动构造程度等(图 2)。

3.1 面积-高程积分(H_i)

面积-高程积分是描述区域内的高程值分布的

参数指标^[40]。流域中的 H_i 值是独立的,定义为面积-高程曲线下的面积,能反映流域盆地是否被侵蚀的响应,可由下面公式计算^[41-42]:

$$H_i = (\text{平均高程值} - \text{最小高程值} / \text{最大高程值} - \text{最小高程值}) \quad (1)$$

公式(1)中,最大高程值和最小高程值很容易从 DEM 中获取,平均高程值是流域盆地或 DEM 中随机的至少 50 个高程值的平均值。 H_i 值与活动构造没有直接的联系,但是高值表明大多数地形地貌相对平均值较高,可能与近期的活动构造有关,中等至低值反映地形地貌被侵蚀时期较老,很少受近期的活动构造影响^[33,42]。

按照戴维斯地貌侵蚀旋回理论,当流域的 H_i 值 > 0.50 时,侵蚀剧烈,地貌发育不均衡,为幼年期阶段。当 H_i 值 ≤ 0.50 时,侵蚀过程缓和,地貌形态趋于稳定状态,是地貌发育的均衡阶段,该阶段又可

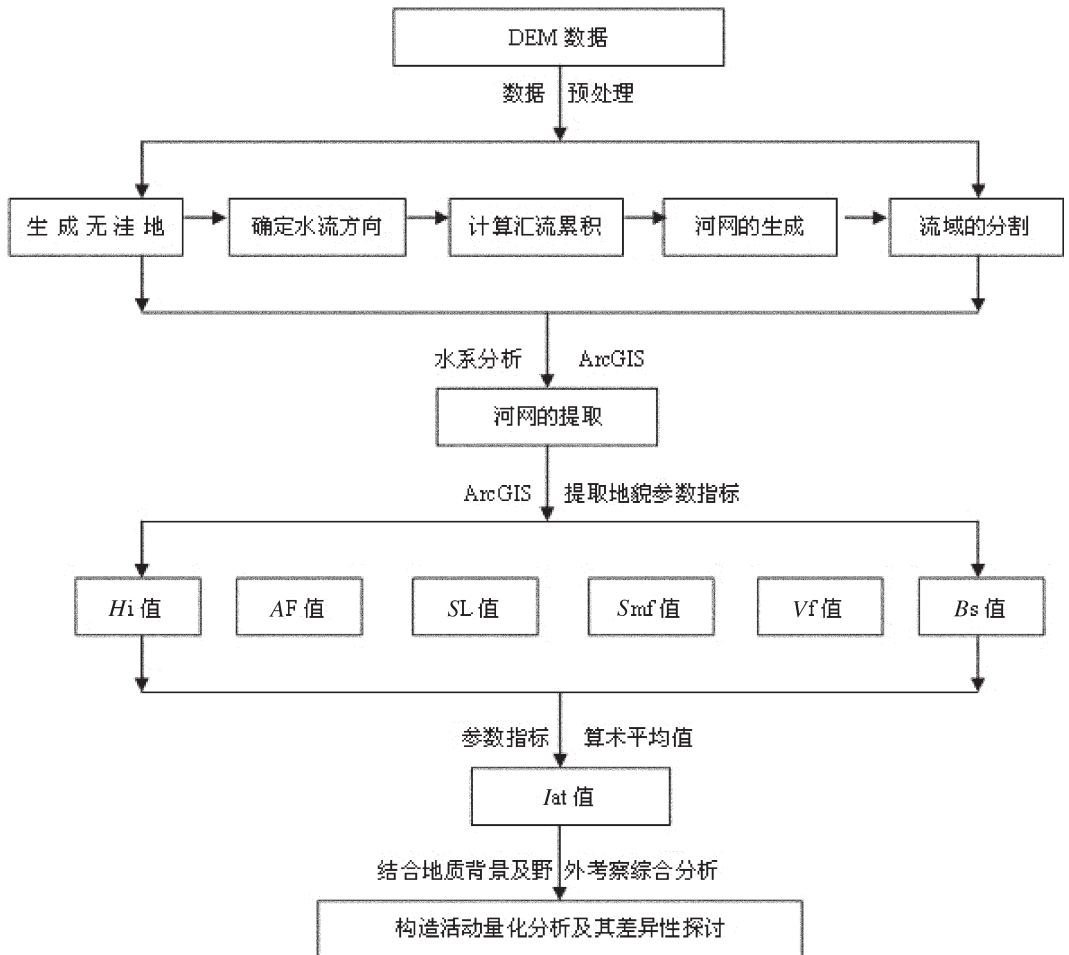


图 2 基于 DEM 量化分析活动构造的技术流程图

Fig.2 Technical flowchart for relative tectonic activity of geomorphology based on DEM

划分为: $0.40 \leq Hi \leq 0.50$ 时, 为壮年期阶段; $Hi < 0.40$ 时, 为老年期阶段。根据公式(1), 利用 DEM 数据^①和 ArcGIS 软件, 计算出渭河上游流域的 Hi 值为 0.45, 面积-高程积分曲线见图 3。反映渭河上游的发育阶段为壮年期, 地形地貌发育趋于相对均衡状态。

3.2 流域盆地不对称度 (AF)

流域盆地不对称度是评价流域盆地的构造活动掀斜程度的参数指标, 可适用于大区域的范围研究。AF 值定义为^[33,43-44]:

$$AF = 100 (Ar/At) \quad (2)$$

其中, Ar 为盆地干流右侧的面积 (面向下游方向), At 为整个盆地的面积 (图 4)。若 AF 值接近于 50, 盆地处于稳定状态, 很少或没有掀斜; 而 AF 值大于或小于 50, 盆地左侧或右侧掀斜, 可能受活动构造或岩性结构等地质条件的变化影响。在相同的岩性条件下, AF 值的变化能很好地反映构造活动的程度。

根据公式(2)可计算出渭河上游流域的右侧面积 Ar 为 12 766.32 km², 总面积 At 为 41 958.02 km², AF 值为 30.43。AF < 50, 表明流域盆地右侧 (南岸) 掀斜程度较强, 说明渭河南岸构造活动强烈, 反演了秦岭北缘不断隆升的结果。

3.3 河长坡度度 (SL)

河长坡度度是关于河流侵蚀和沉积过程的参数指标之一, 是研究河流剖面的环境变化影响, 来分析河流的平衡状态为地貌研究中量化方法。SL 值定义^[45]:

$$SL = (\Delta H / \Delta L) L \quad (3)$$

其中, $\Delta H / \Delta L$ 为河段的坡度 (ΔH 为河段的

高程值变化, ΔL 为河段的长度), L 为分水岭到河段中点的整个河流长度 (图 5)。SL 值对河床坡度的

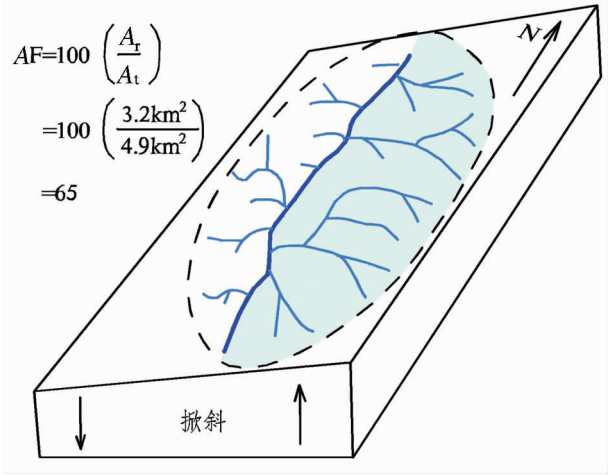


图 4 流域盆地不对称度 (AF) 的计算 (Keller and Pinter, 2002^[33])

Fig.4 Block diagram showing calculation method of the asymmetry factor (after Keller and Pinter, 2002)

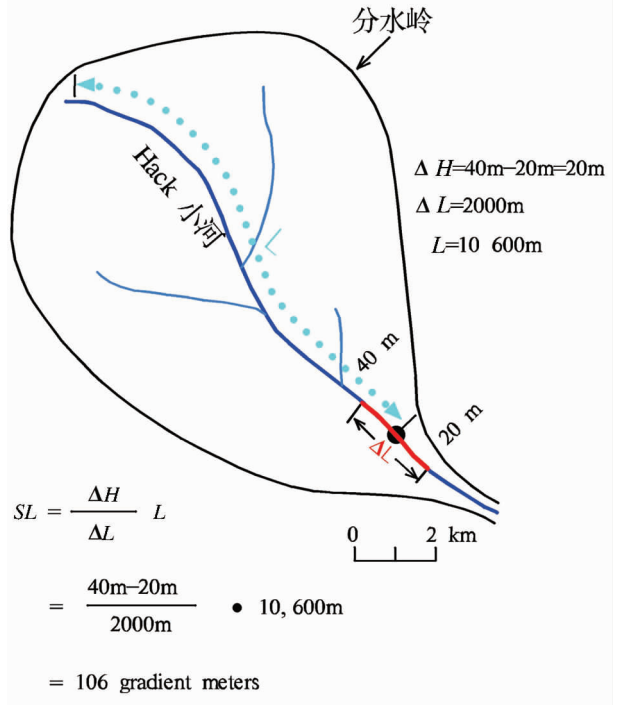


图 5 河长坡度度 (SL) 的计算 (Keller and Pinter, 2002^[33])

Fig.5 Idealized diagram showing calculation method of stream length-gradient index (after Keller and Pinter, 2002)

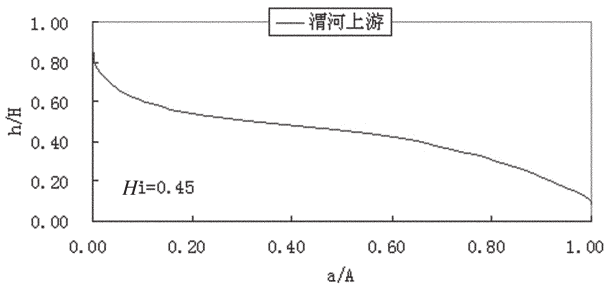


图 3 研究区的面积-高程积分曲线 (Hi)

Fig.3 Hypsometric integral of the study area

①DEM 数据来源于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>)。

变化很敏感,反映可能的活动构造,常用于评价构造活动强度,河流流经活动抬升区,SL 值变大;流经走滑断层控制的河谷区,SL 值变小^[36]。

渭河上游流域 SL 值可以用 Hack 剖面曲线计算出,Hack 剖面表示为与高程值的关系,方程为 $H=C-K' \times \log L$ ^[46]。其中 H 为纵剖面的高度, L 为河段距河源的距离, C 为常数,斜率 K' 即为河流的 SL 值。由此可绘制出研究区的 Hack 剖面曲线(图 6),计算 SL 值为 453。从图中看出,Hack 剖面曲线上凸,表明渭河上游受构造抬升影响,构造活动程度强烈。

3.4 山前曲折度 (Smf)

山前曲折度是一种反映山前带侵蚀过程的平衡状态的参数指标,Smf 值定义于^[34]:

$$Smf=L_{mf}/L_s \tag{4}$$

其中, L_{mf} 为沿着从山脉到山麓带坡度变化的山前带的长度; L_s 为山前带的直线距离(图 7)。

Smf 反映山前带侵蚀过程的平衡,河流侧蚀使山前带更曲折,纵向活动构造发育平直的山前带^[34]。因此,活动构造和活动抬升有关的山前带,相对平直,Smf 值低;而如果抬升速率降低或停止,沿着山前带的侵蚀过程发育更曲折,Smf 值较高。

研究区东南部为渭河断陷盆地,山前带相对较为平直,根据公式(4)计算 Smf 值为 1.07,与秦岭北缘的抬升和渭河盆地的沉降有关。西部为黄土丘陵沟壑区,渭河南北两岸发育较多小型河谷盆地,山前带也较为平直,Smf 值为 1.09,受秦岭北缘活动断裂带的影响,该区域构造活动强烈。

3.5 谷底宽度与谷肩高度的比值 (Vf)

谷底宽度与谷肩高度的比值是用来分析构造抬升与河流侵蚀程度的参数指标,Vf 值定义为^[34,47]:

$$Vf=2Vf_w/[(Eld-Esc)+(Erd-Esc)] \tag{5}$$

其中 Vf_w 为谷底宽度; Eld 和 Erd 分别为河谷左侧和右侧分水岭(面向下游方向)的高程值; Esc 为谷底的平均高程值(图 8)。 Vf 值可反映构造活动的程度,低值与较快的抬升速率和侵蚀作用有关, Vf 值变大,反映活动构造程度减弱,抬升速率减小。不同的河谷中, Vf 值不同,一般“V”型河谷, Vf 值相对较低;“U”型河谷, Vf 值相对较高。

由于研究区东西两部分的地貌差异,渭河南北两岸的岩性(基岩与黄土)不同,以及渭河上游不同河段的发育程度不一致,河流的河谷形态迥异。笔者选取数个较为典型的河谷剖面,根据公式(5)计算谷底宽度与谷肩高度的比值,求取平均值,得到研究区的相对 Vf 值为 0.91。

在黄土区,河谷宽而浅;在基岩区,河谷相对窄而深,水流湍急。在宝鸡至天水麦积一带,渭河河床形态较弯曲,受宝鸡—天水断裂活动的影响较大。

3.6 盆地形状指数 (Bs)

盆地形状指数或延长率是描述流域盆地的水平投影形状, B_s 值定义为^[35]:

$$B_s=B_l/B_w \tag{6}$$

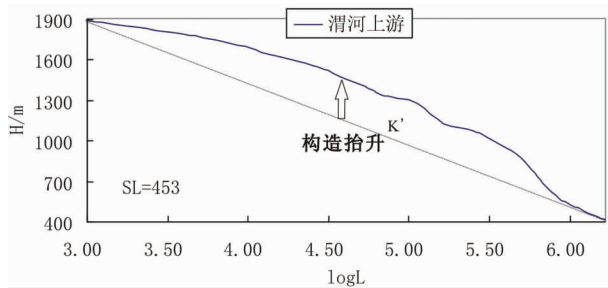


图 6 研究区的 Hack 剖面曲线
Fig.6 Hack profile of the study area

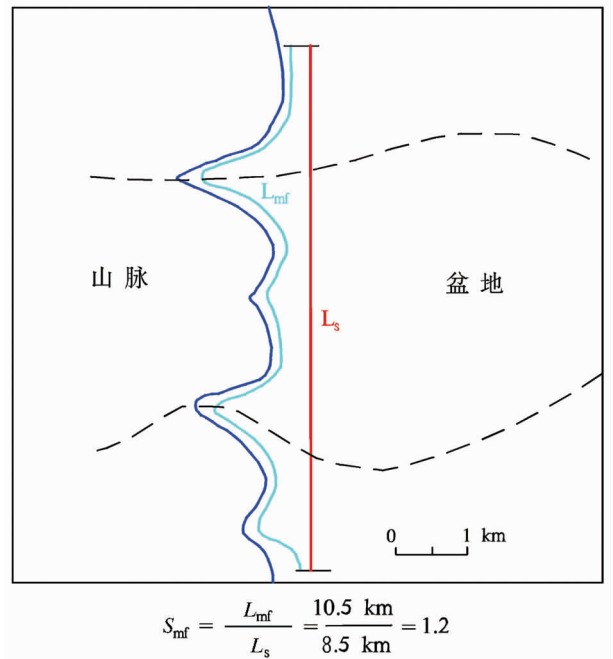


图 7 山前曲折度 (Smf) 的计算 (Keller and Pinter, 2002^[33])
Fig.7 Idealized diagram showing calculation method of mountain front sinuosity (after Keller and Pinter, 2002)

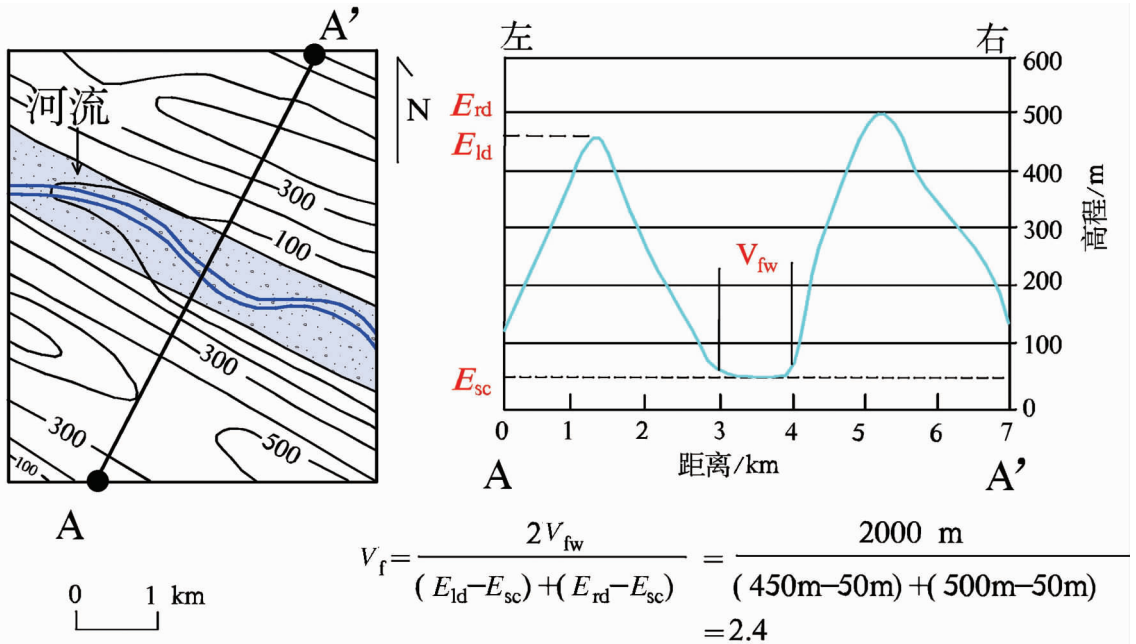


图 8 谷底宽度与谷肩高度的比值 (V_f) 的计算(Keller and Pinter, 2002^[56])

Fig.8 Idealized diagram illustrating calculation method of the ratio of valley floor width to valley height (after Keller and Pinter, 2002)

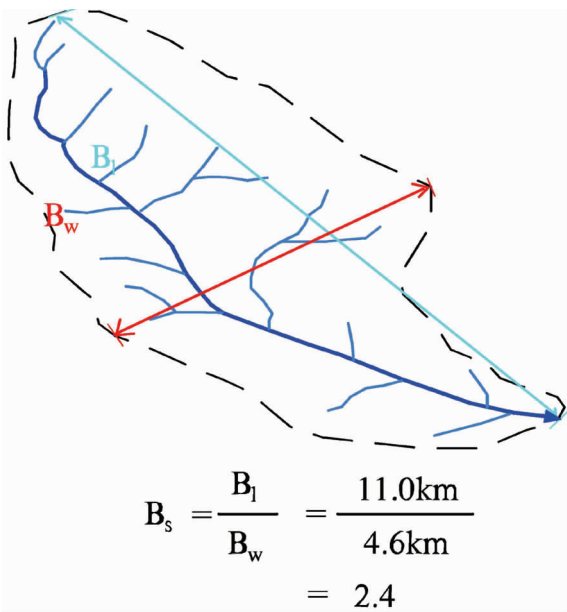


图 9 盆地形状指数 (B_s) 的计算 (Ramírez- Herrera, 1998^[55])

Fig.9 Idealized diagram showing calculation method of basin shape index (modified after Ramírez- Herrera, 1998)

其中, B_1 为盆地从河口到最远分水岭的距离, B_w 为盆地最宽处的宽度(图 9)。构造活动区域, 相对年轻的流域盆地在形状上, 山脉的地形坡度延长^[55]。因此, 盆地形状指数可反映活动构造的抬升幅度。 B_s 值较高表明盆地延长, 构造活动相对较强; 低值表明盆地规则, 构造活动相对较弱。山前带迅速隆升的区域, 一般发育长而陡的盆地, 而构造活动减弱或停止, 盆地将变宽。

根据公式(6)可计算出渭河上游流域的盆地形状指数 B_s 值为 4.01, 反映该区域的构造活动程度较强, 秦岭北缘断裂带和六盘山东缘断裂带对渭河上游流域盆地的形成和发育有很重要的影响。

4 活动构造的差异性探讨

国内外的一些学者曾经利用一种或某几种参数, 对山前带的活动构造程度进行了半定量地分析。如马保起等(1989)利用 V_f 值分析了大青山河谷地貌的形成和演化^[14]。王林等(2008)应用 H_5 值等分析方法, 研究了岱海流域地貌及其演化, 对构造活动性具有一定的指示意义^[11]。Bull and Mc Fadden (1977), Silva et al.(2003)利用 S_{mf} 和 V_f 值比较分析

表 1 根据地貌参数指标值的活动构造程度分类

Table 1 Classification of relative tectonic activity depending on geomorphic indexes

构造活动等级 <i>S</i>	面积-高程积分(<i>H</i>)	流域盆地不对称度(<i>AF</i>)	河流坡降度(<i>SL</i>)	山前曲折度(<i>Smf</i>)	谷底宽度与谷肩高度的比值(<i>Vf</i>)	盆地形状(<i>Bs</i>)
Class 1(强)	$H_i \geq 0.50$	$ AF-50 > 15$	$SL \geq 500$	$Smf < 1.10$	$Vf < 0.50$	$Bs \geq 4$
Class 2(中等)	$0.40 \leq H_i < 0.50$	$ AF-50 : 7-15$	$300 \leq SL < 500$	$1.10 \leq Smf < 1.50$	$0.50 \leq Vf < 1.0$	$3 \leq Bs < 4$
Class 3(弱)	$H_i < 0.40$	$ AF-50 < 7$	$SL < 300$	$Smf \geq 1.50$	$Vf \geq 1.0$	$Bs < 3$

表 2 根据地貌参数指标的算术平均值的活动构造程度分类

Table 2 Classification of relative tectonic activity depending on the arithmetic average of geomorphic indexes

<i>Iat</i> 值 (<i>S/n</i>)	<i>Iat</i> 等级	构造活动程度
$1.0 \leq Iat < 1.5$	Class 1	较高
$1.5 \leq Iat < 2.0$	Class 2	高
$2.0 \leq Iat < 2.5$	Class 3	中等
$2.5 \leq Iat \leq 3.0$	Class 4	低

了山前带的活动构造,并利用 *Af* 值和 *Bs* 值量化了构造掀斜程度^[34,36]。本文利用这些研究成果,根据这些参数指标的大小,可对区域活动构造程度的分类标准进行了总结^[34,36,48-50](表 1)。

这些研究只是对某单一山前带或河谷的构造活动程度进行评价,而没有对整个区域的活动构造进行分析。本文通过提取亚流域的几个参数指标,对地貌参数指标等级进行算术平均化(*S/n*),可以对整个区域的相对构造活动程度(*Iat*)进行分析。根据 *Iat* 值的大小,将区域的活动构造程度分为低、中等、高和较高四类等级(*Iat*)(表 2):第 1 级: $1.0 \leq Iat < 1.5$,为构造活动程度较高;第 2 级: $1.5 \leq Iat < 2.0$,为构造活动程度高;第 3 级: $2.0 \leq Iat < 2.5$,为构造活动程度中等;第 4 级: $2.5 \leq Iat \leq 3.0$,为构造活动程度低。由此可对整个区域的构造活动程度进行划分对比,探讨区域的构造活动的差异性。

根据上述分类标准,对渭河上游流域的地貌参数指标进行等级划分(表 3),可以计算出 *Iat* 值为 1.50,*Iat* 等级为 2,说明渭河上游流域的活动构造程度较高。秦岭北缘活动断裂带全新世早期以来的平均左旋走滑速率为(2.94±0.15)mm/a,六盘山东缘断裂带的平均滑动速率为(2.55±0.26)mm/a^[20],研究结果与地质背景一致。

5 分析讨论

地形地貌参数指标是量化分析区域构造活动程度的有力工具。这些地貌参数指标可通过 GIS 和 RS 等软件直接或间接计算获取,在区域上对鉴别和分析与活动构造有关的地貌异常很有帮助,尤其是在构造活动强烈,而研究程度很少的地区。

本文介绍了地形地貌参数指标的提取方法,对参数指标值的分类标准进行了总结。这些地貌参数包括面积-高程积分(*H*)、流域盆地不对称度(*AF*)、山前曲折度 (*Smf*)、谷底宽度与谷肩高度的比值 (*Vf*)、盆地形状指数(*Bs*)等,我们对地貌参数指标等级进行算术平均化(*S/n*),从而得到整个流域的相对构造活动程度(*Iat*),分为低、中等、高、较高四类等级。

通过上述方法获取了渭河上游流域地貌形态参数。渭河南岸发生掀斜现象,受秦岭隆升活动影响较大;上游河谷盆地和断陷盆地的山前带较平直,受秦岭北缘断裂带的影响较大;整个流域盆地形状不规则

表 3 研究区的地貌参数指标和相对构造活动程度 (*Iat*) 等级

Table 3 Classification of indices and *Iat* (relative tectonic activity index) degrees of the study area

地貌参数指标	<i>H</i> =0.45	$ AF-50 =19.57$	<i>SL</i> =453	<i>Smf</i> =1.08	<i>Vf</i> =0.91	<i>Bs</i> =4.01
构造活动等级	2	1	2	1	2	1
<i>Iat</i> 值	1.50		<i>Iat</i> 等级		2	

则,受秦岭北缘断裂带和六盘山东缘断裂带的影响和控制。计算得到 I_{at} 值为 1.50, I_{at} 等级为 2, 研究认为渭河上游流域的构造活动程度高。但由于区域构造活动相对程度的差异性,需要对其流域进行进一步细致的划分。此外,研究区东西部地貌的差异和渭河河流南北两岸的岩性不同,构造活动的相对程度划分标准有待于进一步研究。

参考文献(References):

- [1] Huetrez J E, Sol C, Lucazeau F. Effect of drainage area on hypsometry from an analysis of small-scale drainage basins in the Siwalik Hills (Central Nepal) [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24(9):799-808.
- [2] Whipple K X, Tucker G E. Dynamics of the stream-power river incision, model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs [J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*. 1999, 104(B8):17661-17674.
- [3] Kirby E, Whipple K X, Tang W Q, 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-solid Earth*, 2003, 108 (B4):2217, doi: 10.1029/2001JB000861.
- [4] 王岸, 王国灿. 构造地貌及其分析方法述评 [J]. *地质科技情报*, 2005, 24(4):7-13.
Wang An, Wang Guocan. Review on morphotectonic and its analytical methods [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2005, 24(4):7-13(in Chinese with English abstract).
- [5] Willett S D, Hovius N, Brandon M T, et al. Tectonics, Climate, and Landscape evolution [M]. *Geological Society of America*. 2006: 398, Penrose Conference Series, p.vii-xi, doi:10.1130/2006.2398(00).
- [6] 许炯心, 李炳元, 杨小平, 等. 中国地貌与第四纪研究的近今进展与未来展望[J]. *地理学报*, 2009, 64(11):1375-1393.
Xu Jiongxin, Li Bingyuan, Yang Xiaopin, et al. Recent progress in geomorphology and Quaternary geology in China and some perspectives [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11):1375-1393 (in Chinese with English abstract).
- [7] 王乃樑, 韩慕康. 构造地貌学的理论、方法、动向与应用[C]//中国地理学会第一次构造地貌学术讨论会论文集. 北京:科学出版社, 1984:1-9.
Wang Nailiang, Han Mukang. The theory and method of tectonic geomorphology and its application [C]//The Selected Papers Form the First Colloquium of Tectonic Geomorphology:The Geographical Society of China. Beijing:Science Press, 1984:1-9(in Chinese with English abstract).
- [8] 韩慕康. 构造地貌学[J]. *地球科学进展*, 1992, 7(5):61-62.
Han Mukang. Tectonic geomorphology [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1992, 7(5):61-62(in Chinese with English abstract).
- [9] Summerfield M A. *Geomorphology and Global Tectonics* [M]. London:John Wiley & Sons, Ltd. Press, 1999.
- [10] Székely B. On the surface of the Eastern Alps—a DEM study [M]. Germany:Universitat Tübingen Press, 2001:1-157.
- [11] 王林, 何仲太, 马保起. 岱海流域地貌演化及其对断裂活动性的指示意义[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(2):310-318.
Wang Lin, He Zhongtai, Ma Baoqi. Geomorphic evolution and its implication for the fault activity in the Daihai drainage basin [J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28 (2):310-318 (in Chinese with English abstract).
- [12] 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.
Zhang Huiping, Yang Nong, Zhang Yueqiao, et al. Geomorphology of the Mijiang drainage system (Sichuan, China) and its structural implications [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(1): 126-135(in Chinese with English abstract).
- [13] 郭芳芳, 杨农, 孟晖, 等. 地形起伏度和坡度分析在区域滑坡灾害评价中的应用[J]. *中国地质*, 2008, 35(1):131-143.
Guo Fangfang, Yang Nong, Meng Hui, et al. Application of the relief amplitude and slope analysis to regional landslide hazard assessments [J]. *Geology in China*, 2008, 35(1):131-143(in Chinese with English abstract).
- [14] 马保起, 李克, 吴卫民, 等. 大青山河谷地貌特征及新构造意义[J]. *地理学报*, 1989, 54(4):327-334.
Ma Baoqi, Li Ke, Wu Weimin, et al. Features and neotectonic significance of river valley landforms in Mt. Daqingshan. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(4):327-334(in Chinese with English abstract).
- [15] 崔军文, 李朋武, 李莉, 等. 青藏高原的隆升:青藏高原的岩石圈结构和构造地貌[J]. *地质论评*. 2001, 47(2):157-163.
Cui Junwen, Li Pengwu, Li Li, et al. Uplift of the Qinghai-Tibet Plateau:Tectonic geomorphology and lithospheric structure of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Geological Review*, 2001, 47 (2):157-163(in Chinese with English abstract).
- [16] Burbank D W, Anderson R S. *Tectonic Geomorphology* [M]. Massachusetts:Blackwell Science, 2002, 1-274.
- [17] Kirby E, Whipple K X. Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis[J]. *Geology*, 2001, 29(5):415-418.
- [18] 郭进京, 韩文峰, 梁收运. 青藏高原东北缘岷县—武都地区构造地貌演化与高原隆升[J]. *中国地质*, 2006, 33(2):383-392.
Guo Jinjing, Han Wenfeng, Liang Shouyun. Tectono-morphological evolution of the Minxian-Wudu area on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau and plateau uplift [J]. *Geology in China*, 2006, 33(2):383-392(in Chinese with English abstract).
- [19] 胡孟春. 渭河盆地的地质构造与构造地貌类型 [J]. *地理研究*, 1989, 8(4):56-64.
Hu Mengchun. The relationship between the tectonic landforms and structures in the Weihe river basin [J]. *Geographical Research*, 1989, 8 (4):56-64(in Chinese with English abstract).

- [20] 李传友. 青藏高原东北部几条主要断裂带的定量研究 [D]. 中国地震局地质研究所, 2005.
Li Chuanyou. Quantitative Studies on Major Active Fault Zones in Northeastern Qinghai—Tibet Plateau. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing, 2005 (in Chinese with English abstract).
- [21] 吴珍汉, 胡道功, 刘崎胜, 等. 西藏当雄地区构造地貌及形成演化过程[J]. 地球学报, 2002, 23(5):423-428.
Wu Zhenhan, Hu Daogong, Liu Qisheng et al. The formation and evolution of tectonic landform of Damxung area in central Tibetan plateau [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23 (5):423-428 (in Chinese with English abstract).
- [22] 杜国云, 王竹华, 李晓燕. 构造地貌分析体系及相关的构造地貌标志[J]. 烟台师范学院学报(自然科学版), 2002, 18(2):105-112.
Du Guoyun, Wang Zhuhua, Li Xiaoyan. Analysis system and mark for tectonic geomorphology [J]. Yantai Normal University Journal (Natural Science), 2002, 18 (2):105-112 (in Chinese with English abstract).
- [23] 史兴民, 杜忠潮. 中国构造地貌学的回顾与展望[J]. 西北地震学报, 2006, 28(3):280-284.
Shi Xingmin, Du Zhongchao. Review and prospect of tectonic geomorphology in China [J]. Northwestern Seismological Journal. 2006, 28(3):280-284(in Chinese with English abstract).
- [24] Fielding E J. Morphotectonic evolution of the Himalayas and Tibetan Plateau [C]//Summenqeld M A. Geomorphology and Global Tectonics [M]. London: John Wiley&Sons Press, Ltd., 2000:201-222.
- [25] 刘德民, 李德威, 谢德凡, 等. 喜马拉雅造山带中段北坡构造地貌初步研究 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2003, 28(6): 639-644.
Liu Demin, Li Dewei, Xie Defan, et al. Primary study on tectonic landforms in northern part of middle Himalayan orogen [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2003, 28 (6): 639-644(in Chinese with English abstract).
- [26] 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.
Zhang Huping, Zhang Peizhen, Yuan Daoyang. Differential landscape development of the central N-S Seismic Zone and its relation to the west Qinlin tectonic belt [J]. Quaternary Sciences, 2010, 30(4):803-811(in Chinese with English abstract).
- [27] 周荣军, 李勇, A L Densmore, 等. 青藏高原东缘活动构造[J]. 矿物岩石, 2006, 26(2):40-51.
Zhou Romgjun, Li Yong, A L Densmore, et al. Active tectonic of the Eastern margin of the Tibet plateau [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2006, 26(2):40-51(in Chinese with English abstract).
- [28] Javed N. Malik, C. Mohanty. Active tectonic influence on the evolution of drainage and landscape; Geomorphic signatures from frontal and hinterland areas along the Northwestern Himalaya, India [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 29(5/6):604-618.
- [29] 刘静, 曾令森, 丁林, 等. 青藏高原东南缘构造地貌、活动构造和地下壳流动假说[J]. 地质科学, 2009, 44(4):1227-1255.
Liu Jing, Zeng Linsen, Ding Lin, et al. Tectonic geomorphology, active tectonics and lower crustal channel flow hypothesis of the southeastern Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Geology, 2009, 44(4):1227-1255 (in Chinese with English abstract).
- [30] 刘静, 丁林, 曾令森, 等. 青藏高原典型地区的地貌量化分析——兼对高原“夷平面”的讨论 [J]. 地学前缘, 2006, 13(5): 285-299.
Liu Jing, Ding Lin, Zeng Linsen, et al. Large-scale terrain analysis of selected regions of the Tibetan Plateau: Discussion on the origin of plateau planation surface [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13 (5):285-299(in Chinese with English abstract).
- [31] Adams J. Active tilting of the United States midcontinent: geodetic and geomorphic evidence [J]. Geology, 1980, 8:442-446.
- [32] Saucier R. T. Geomorphologic interpretation of late Quaternary terraces in western Tennessee and their regional tectonic implications [C]// Russ D P, Crone A J. The New Madrid, Missouri, Earthquake Region—Geological, Seismological, and Geotechnical Studies. U. S. Geological Survey Professional, 1990, 1366-A.
- [33] Keller A Edward, Pinter Nicholas. Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape (Second Edition) [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2002, 121-185.
- [34] Bull W B, McFadden L D. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California [C]// Doehring D O. Geomorphology in Arid Regions. Proceedings of the Eighth Annual Geomorphology Symposium. State University of New York, Binghamton, 1977:115-138.
- [35] Ramírez-Herrera M. T. Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt [J]. Earth Surface Processes and Landforms. 1998, 23:317-332.
- [36] Silva P G., Goy J L, Zazo C. et al. Fault generated mountain fronts in Southeast Spain: geomorphologic assessment of tectonic and earthquake activity [J]. Geomorphology, 2003, 250:203-226.
- [37] 程三友, 刘少峰, 张会平, 等. 大别山构造地貌的 DEM 初步分析 [J]. 地质力学学报, 2005, 11(4):333-340.
Cheng Sanyou, Liu Shaofeng, Zhang Huiping, et al. DEM analysis of the tectonic geomorphology of the Dabie orogenic belt [J]. Journal of Geomechanics, 2005, 11 (4):333-340 (in Chinese with English abstract).
- [38] Singh Vimal, Tandon S K. Evidence and consequences of tilting of two alluvial fans in the Pinjaur dun, Northwestern Himalayan foothills [J]. Quaternary International. 2007, 59 (1), 21-31.
- [39] Singh Vimal, Tandon S K. The Pinjaur dun (intermontane longitudinal valley) and associated active mountain fronts, NW Himalaya: Tectonic geomorphology and morphotectonic evolution [J]. Geomorphology, 2008, 102(3/4):376-394.
- [40] Burbank D W, Anderson R S. Tectonic Geomorphology [M]. Massachusetts:Blackwell Science, 2002:1-274

- [41] Pike R J, Wilson S E. Elevation - relief ratio, hypsometric integral and geomorphic area—altitude analysis [J]. Geological Society of America Bulletin. 1971, 82:1079–1084.
- [42] Mayer L. Introduction to Quantitative Geomorphology [M]. Prentice Hall, Englewood, Cliffs, NJ. , 1990.
- [43] Hare P W, Gardner T W. Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya Peninsula, Costa Rica [C]//Morisawa M, Hack J T. Tectonic Geomorphology. Proceedings of the 15th Annual Binghamton Geomorphology Symposium, September 1984, Boston, Allen and Unwin, NY, 1985, 75–104.
- [44] Cox R T. Analysis of drainage -basin symmetry as a rapid technique to identify area of possible Quaternary tilt -block tectonics; an example from Mississippi embayment [J]. Geological Society of America Bulletin, 1994, 104:571–581.
- [45] Hack J T. Stream-profile analysis and stream-gradient indices [J]. U.S. Geological Survey Journal of Research, 1973, 1:421–429.
- [46] 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(3/4):285–312.
- [47] Cannon P J. Generation of explicit parameters for a quantitative geomorphic study of Mill Creek drainage basin [J]. Oklahoma Geology Notes. 1976, 36 (1), 3–16.
- [48] Dehbozorgi M, Pourkermani Arian M M, et al. Quantitative analysis of relative tectonic activity in the Sarvestan area, central Zagros, Iran [J]. Geomorphology, 2010, 121(3/4):329–341.
- [49] Molnar P, England P. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change:Chicken or egg? [J] Nature, 1990, 346: 29–34.
- [50] Strahler A. N. Hypsometric (area - altitude) analysis of erosional topography [J]. Geological Society of America Bulletin, 1952, 63: 1117–1142.

An analysis of relative active tectonics based on DEM

LI Li-bo, XU Gang, HU Jian-min, YU Xin-bin

(Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard, Ministry of Land and Resources; Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Geomorphic indices are useful tools for studying relative active tectonics. This paper presents a new method for evaluating relative active tectonics based on DEM data, using several tectonic geomorphic indexes which include hypsometric integral, drainage basin asymmetry, stream-gradient index, mountain-front sinuosity, valley floor width - valley height ratio, drainage basin shape etc. I_{at} is an index of relative active tectonics, which is obtained by the average of the different classes of geomorphic indices. The authors divide them into four classes: low, moderate, high, and very high from relatively low to the highest tectonic activity. Exemplified by the upstream region of the Weihe River, the authors consider the drainage is relatively higher tectonic activity ($I_{at}=1.50$), and that the method has ideal effects and significance for exploring diversities of relative tectonic activities on an areal basis.

Key words: geomorphic index; active tectonics; geomorphology; digital elevation model (DEM); upstream region of the Weihe River

About the first author: LI Li-bo, male, born in 1984, master, engages mainly in the study of basic geology, geomorphology and GIS; E-mail: licags@126.com.