

# 中条山北麓韩阳段冲沟发育及其新构造意义

慈洪娟<sup>1</sup>, 闫冬冬<sup>2</sup>, 李有利<sup>1</sup>, 钟岳志<sup>1</sup>, 吕胜华<sup>3</sup>, 熊建国<sup>1</sup>

(1. 北京大学 城市与环境学院, 北京 100871; 2. 河北省地矿局第三地质大队,  
河北 张家口 075000; 3. 国土资源部青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071)

**摘要:**基于数字高程模型数据(DEM),运用河长坡降指标(SL)、河流 Hack 剖面、面积高度积分值(HI)及盆地流域形态因子(BS)分析方法对山西省中条山北麓韩阳段 6 条冲沟地貌发育进行了量化分析。结果表明:中条山北麓韩阳段流域处于地貌演化的壮年期阶段,断层活动性自西南至东北方向呈现先增强后降低的趋势。野外发现盘底村和三新村沟口东岸阶地发育明显而西岸发育相对较弱的一致性规律,说明沟谷东侧山地抬升较强烈、西侧抬升较弱,从而验证韩阳段自西南向东北方向新构造活动性呈现逐渐增强的趋势。

**关键词:**地貌指标;新构造活动;中条山断裂;冲沟;沟口阶地

中图分类号:P931

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)04-0363-05

## Geomorphic Indices in the Hanyang Segment of Zhongtiaoshan Mountains, Shanxi and Its Implication for Neotectonics

CI Hongjuan<sup>1</sup>, YAN Dongdong<sup>2</sup>, LI Youli<sup>1</sup>, ZHONG Yuezhi<sup>1</sup>, LYU Shenghua<sup>3</sup>, XIONG Jianguo<sup>1</sup>

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. No. 3 Geological Brigade, Hebei Provincial Geological Prospecting Bureau, Zhangjiakou, Hebei 075000,

China; 3. Qingdao Institute of Marine Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao, Shandong 26607, China)

**Abstract:**Based on DEM data, the quantitative study on the geomorphic indices has been carried out in the Hanyang segment of Zhongtiaoshan Mountains. The indices include stream length-gradient index (SL), hack profile of river, hypsometric integral (HI), and index of drainage basin shape (BS). It is revealed that the Hanyang River Basin is in the mature phase of geomorphic evolution. Moreover, the fault activity presents a trend of increasing firstly and decreasing later from southwest to northeast. The field investigation finds that in both Pandi and Sanxin villages, the eastern terrace developed clearly while the western did not. The phenomenon indicates that the lift of eastern side of the valley is higher than the western side, which further proves the fault activity trend.

**Keywords:**geomorphic indices; Neotectonics; Zhongtiaoshan fault; river terraces

中条山北麓断裂是控制山西省运城盆地地貌和新  
生代地质演化的关键断裂<sup>[1-2]</sup>,就历史地震资料显示,自  
公元前 48 年以来发生 3 次 6 级以上地震,分别在 1556  
年,1642 年,1815 年,时间间隔百年左右<sup>[3-4]</sup>。然而前人  
古地震研究认为中条山北麓断裂总体活动性水平低,地  
震重复时间间隔长,尤其是中条山北麓韩阳段最新地震  
活动时间距今 7 千年,重复间隔 1.2 万年<sup>[5-6]</sup>,由此可知  
关于中条山北麓新构造活动性存在争议性认识。

随着数字高程模型和各种空间技术的引入,使得  
提取山麓地区的冲沟及河谷的地形数据指标以及做  
定量化研究地貌演化过程成为可能。定量化研究地

貌指标能够定量直观的揭示目标区的地貌演化特征  
及其构造活动性强弱<sup>[8-9]</sup>。因此本文利用数字高程模  
型数据(DEM),系统提取中条山北麓韩阳段盘底沟  
到鹿峪沟等 6 条冲沟的各项指标,探讨中条山北麓韩  
阳段地貌形态对构造活动的响应以及断层活动规律。

## 1 区域地质与地貌背景

山西地堑系位于鄂尔多斯断块东南缘,由一系列  
NE 或近 NE 方向的构造隆起和盆地组成,在平面上呈  
现“S”型展布。分布于山西地堑系西南端的运城盆地  
在燕山运动后期到第三纪初期一直保持相对稳定状

态,而在新生代晚期喜马拉雅运动影响下,运城盆地内部发生强烈的正断层断陷<sup>[1-3]</sup>。中条山北麓断裂是控制运城盆地地貌和新生代地质演化的关键断裂。断裂长达 137 km,走向沿 NE 到 NNE 方向,倾角为  $58^{\circ}\sim 75^{\circ}$ ,是一条高角度的正断层<sup>[4]</sup>。根据中条山北麓断裂走向的差异,以西姚温 and 磨河村附近为转折点,将中条山北麓断裂自西向东分为 3 个几何段落,即韩阳段、解州段和夏县段<sup>[4-5]</sup>。本文研究区韩阳段海拔高度为 300~1700 m,地势北高南低、东高西低,黄河为该段冲沟以及河流的侵蚀基准面,韩阳段断裂走向  $N30^{\circ}E$ ,长约 20 km,由多条次级断层左阶斜列组成<sup>[5]</sup>。

中条山北麓山前洪积物主要为全新世早期冲洪积物和晚期洪积扇砂砾石层,岩性多为砂、砾石以及少量黏土和粉砂。山前全新世早期的冲积物和洪积物基本上以 400 m 等高线为分界,洪积物主要分布在中条山北麓断裂西端上源头以东。全新世晚期洪积扇在中条山北麓断裂西段山前发育不好,仅在东北段西姚温附近、鹿峪村、下寺村和牛家村附近发育,牛家村以西山前地貌表现基本上都为冲沟深切山前全新世早期黄土台地。韩阳上源头采石场出露的两条断层分别错断中更新世的加砾石层褐色粉砂层和晚更新世黄土层,而在南盘沟沟口,见断层错断冲沟  $T_2$  阶地的砾石层顶面,在虎峪附近废弃的窑洞洞壁,见多条断层错断离石黄土中的古土壤。

## 2 地貌计量指标分析

本文通过提取中条山北麓韩阳段 6 条冲沟的 DEM 数据利用 Hack 提出的河长坡降指标 (SL), Strahler 研究的面积高度积分值 (HI) 以及 Bull 等人提出的流域盆地形态因子 (BS) 等地貌量化指标<sup>[7-8]</sup>来分析中条山北麓韩阳段山前地貌受断层活动的影响。

### 2.1 河长坡降指标 (SL) 和 Hack 剖面

河长坡降指标 (SL) 对冲沟坡度变化反映非常敏感,用这一指标可以分析研究区岩性、构造活动、地形等因素对河流纵剖面地貌形态演化的影响<sup>[10-11]</sup>。图 1 显示沿着河谷纵剖面每条冲沟的河长坡降指标值均出现明显的波动,且河长坡降指标异常高值对应冲沟高程在 500~1300 m 范围内。野外调查发现 6 条冲沟在出山口有天然断层露头,盘底沟沟口发育了 6.4 m 高跌水且沟口阶地非常发育;鹿峪口沟口窑洞内发现的错断的红色古土壤的断层揭示可能为更新世断层;其余 4 条冲沟在室内航片解释和野外实地考察中发现明显的断层陡坎,说明这些地点附近断层活动性明显。因此推断研究区受中条山北麓韩阳段断裂活动影响,使河谷纵剖面变陡,从而出现河长坡降指标异常值。

Hack 剖面是以河段高程为纵坐标,以河段到河流源头距离的对数值为横坐标,绘制的河流剖面发育形态的半对数曲线。Hack 剖面形态能指示较大时空尺度的构造活动,研究表明当 Hack 剖面形态呈上凸型,表明该区域构造垂直活动性强,活动构造速率大;如果河流 Hack 剖面形态呈现直线或凹形,则该区域的构造活动性较弱,活动构造速率中等或较小<sup>[11,14]</sup>。韩阳段 6 条冲沟的 Hack 剖面中西南向的盘底沟、贺家沟和石家沟的剖面曲线呈现凸型,南山底沟和山底沟的凸型较为明显,而鹿峪沟的剖面曲线近乎直线型,初步判断石家沟及南山底沟的构造活动性较强,而鹿峪沟的断层活动性相对较低。

### 2.2 面积高度积分值 HI

面积高度积分值 HI 是由 Strahler<sup>[12]</sup> 提出,用于反映流域盆地原始地形面在受到风化侵蚀作用后残留在地表的土地体积比率,从而描述流域盆地地形的演化阶段。Strahler 等人根据面积高度积分曲线呈现的三种不同形态(凸型、S 型、凹形)及对应的 HI 值所在的三个阈值范围区间 ( $HI>0.6$ ,  $0.4<HI<0.6$ ,  $HI<0.4$ ) 来判断流域盆地演化所处的阶段(幼年期、壮年期、老年期)。中条山北麓韩阳段 6 条冲沟的集水盆地采用 D8 算法,计算出每个流域面积高度积分值并绘制相应的面积高度积分曲线(图 2)。中条山北麓韩阳段 6 条冲沟的面积高度积分值处于  $0.4\sim 0.6$ ,最大值为南山底沟流域  $HI=0.62$ ,最小值为盘底沟  $HI=0.43$ ,平均值为 0.52。自西向东,从盘底沟流域到鹿峪沟流域面积高度积分值处于先增大后减小趋势。南山底沟面积高度积分曲线呈现凸型,其余 5 条冲沟的面积高度积分曲线为 S 型,也可证明南山底沟流域演化处于构造活动的幼年期阶段,而两侧流域地貌演化处于壮年期阶段。初步分析中条山北麓韩阳段盘底沟至鹿峪沟流域新构造活动比较活跃且活动性处于先增强后降低的趋势。

### 2.3 流域盆地形态因子 BS

流域盆地形态因子 BS 是描述某区域流域盆地形态及其演化阶段的指标。通常构造活动活跃区,流域盆地形态多为狭长形,随着地貌演化过程构造活动减弱或停止,狭长形的流域盆地将会演化成浑圆形态<sup>[13]</sup>。其中 Bl 是流域盆地河谷的分水岭到出山口的直线距离, Bw 是流域盆地的最大宽度, BS 为 Bl 与 Bw 比值。若 BS 值越大说明盆地越狭长,表明该盆地所在区域的构造活动速率比较高;反之,该流域盆地所在区域的构造活动性较弱。本文根据 Ramirez-errera 等研究理论将研究区域流域盆地因子划分为  $BS\geq 4$ ,  $3<BS<4$  和  $BS\leq 3$  这三个等级,前两个等级盆地形态狭长化程度高,定为构造极活跃区和构造活跃区<sup>[13]</sup>。

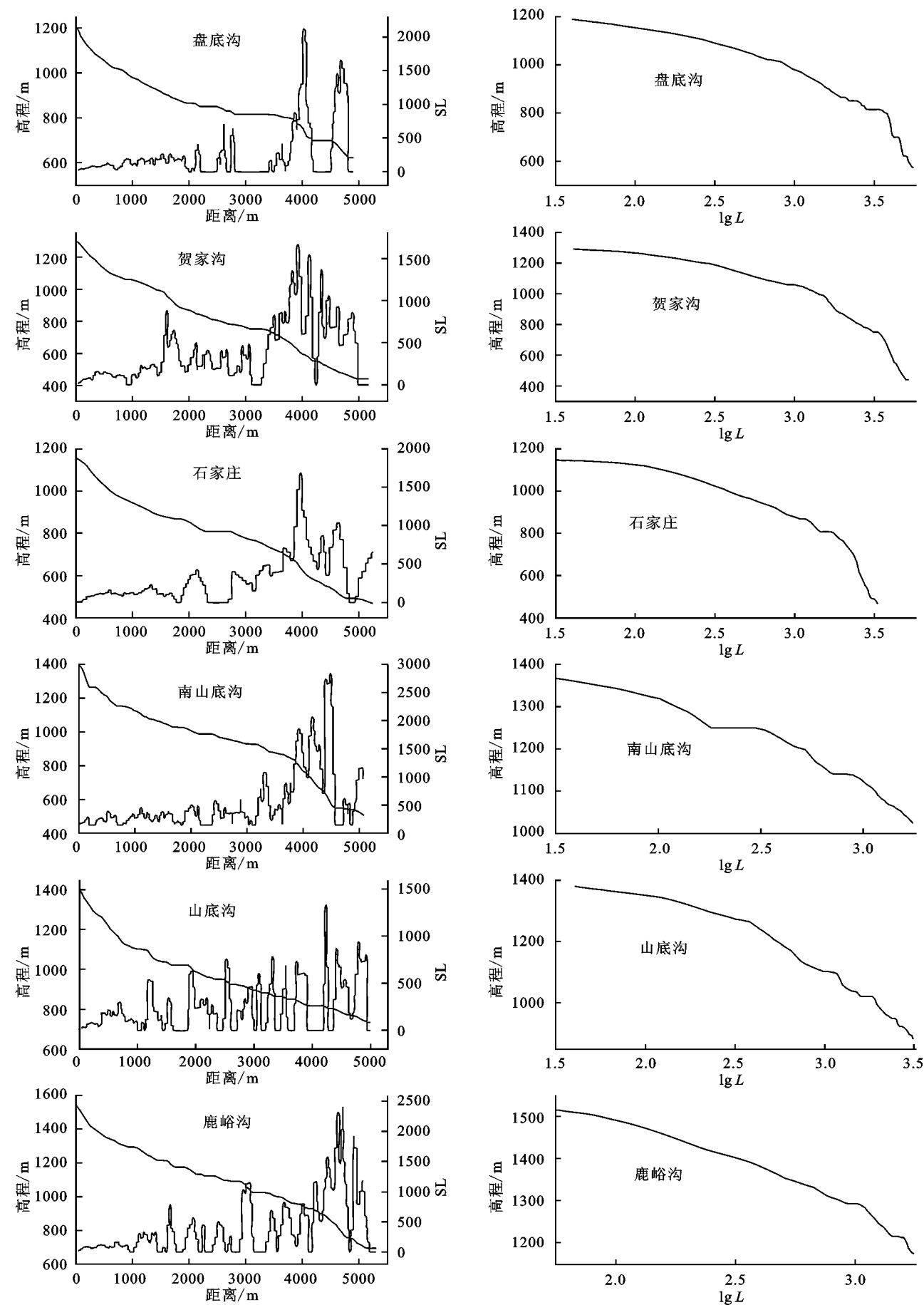


图 1 中条山北麓韩阳段 6 条冲沟河长坡降指标 SL 和 Hack 剖面

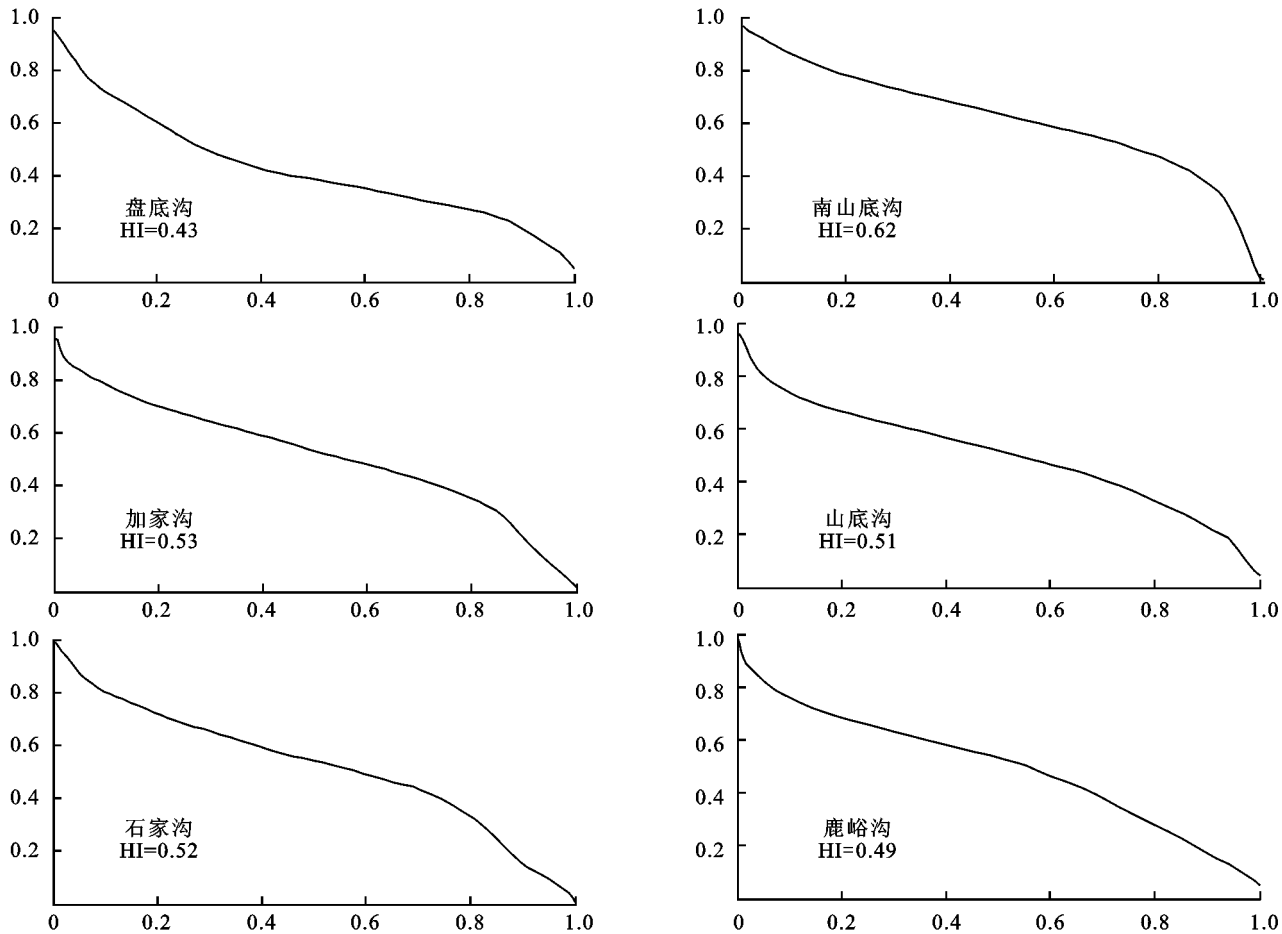


图 2 中条山北麓韩阳段 6 条冲沟面积高度积分值 HI

研究区流域盆地形态因子值很高,6 条冲沟均可属于典型的狭长型集水盆地,表明该山前带的活动断层的构造活动速率比较大。研究区西段盘底沟、贺家沟流域盆地形态因子  $3<BS<4$  为构造活跃区,研究区向东北方向石家沟、南山底沟、山底沟和鹿峪沟的盆地形态因子均大于 4,最大值为 4.87,最小值为 4.12,平均值为 4.4(表 1),说明东北段构造活动性较西南段增强,该段为构造极活跃区。综述中条山北麓韩阳段 6 条冲沟的流域盆地形态因子高值指示中条山北麓西段的新构造活动非常强烈并且西南向东北方向呈现先增高后降低趋势。

表 1 中条山北麓韩阳段河谷流域盆地形态因子

序号	沟谷名称	Bl/km	Bw/km	BS
1	盘底沟	6.04	1.95	3.10
2	贺家沟	4.59	1.35	3.40
3	石家沟	3.02	0.62	4.87
4	南山底沟	4.50	1.03	4.36
5	山底沟	7.47	1.81	4.12
6	鹿峪沟	6.71	1.58	4.25

3 讨论

河长坡降指标偏高主要受两种因素影响,其一由

于强烈的构造活动使得局部河段坡度发生变化;其二该研究区地层岩性较为坚硬抗侵蚀能力强,在长期河流侵蚀作用的影响下与相邻地区形成差异化侵蚀,造成河段坡度变陡河长坡降指标偏高。中条山北麓韩阳段山前洪积物主要为全新世早期冲洪积物和晚期洪积扇砂砾石层,岩性多为砂、砾石、卵石以及少量黏土,岩性抗侵蚀能力弱,说明研究区河长坡降指标主要受构造活动性影响,反映该区域构造活动性较活跃。

地貌量化指标揭示,南山底沟及山底沟的 Hack 剖面线凸型较为明显,西南端盘底沟、贺家沟和史家沟曲线呈现凸型,而东北向的鹿峪沟剖面曲线近乎线型;面积高度积分值 HI 揭示南山底沟  $HI=0.62$ ,盘底沟和鹿峪沟  $HI<0.5$ ,且盘底沟 HI 值偏小,其余冲沟 HI 处于 0.5,0.6 之间;研究区 6 条冲沟的盆地形态因子 BS 除西南向盘底沟和贺家沟小于 4 外,其余四条冲沟 BS 均大于 4。根据地貌量化指标综合分析可知韩阳段西南方向盘底沟及贺家沟附近断裂活动性较低,东北向石家沟和南山底沟附近断裂活动性增强,直到鹿峪沟附近断层活动性又有所降低。然而仅依据室内地貌指标量化研究对野外断裂活动性认识将会存在一定偏差,需结合野外考察做验证性判断。

中条山北麓韩阳段断裂的东北段山前断层三角

面形态十分清晰,并且呈现自东北向西南三角面越来越不发育的趋势,到贺家沟以西基本呈现缓缓的山坡形态。盘底沟沟口发育有  $T_1$ 、 $T_2$  两级基座阶地,河谷两侧阶地发育不对称,东侧阶地发育较完全,西侧阶地发育相对较弱(图3)。三新村山前冲沟沟口发育  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  三级阶地,东岸比较发育,而西岸相对发育较弱,其中第二级阶地又可以进一步划分为  $T_{2a}$ 、 $T_{2b}$ (图4)。以上两个阶地发育比较典型的沟谷都表现出东岸阶地较发育而西岸发育相对较弱的一致性规律,说明沟口西岸遭受侵蚀、东岸接受沉积,沟谷东侧山地抬升较强烈、西侧抬升较弱,从而说明中条山北麓西段断裂自东北向西南新构造活动性呈现逐渐减弱的趋势。

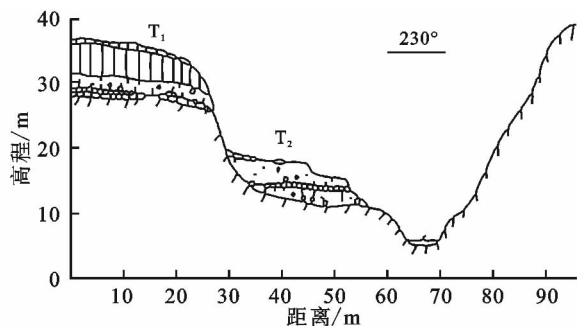


图3 韩阳段盘底沟沟口跌水及东岸阶地

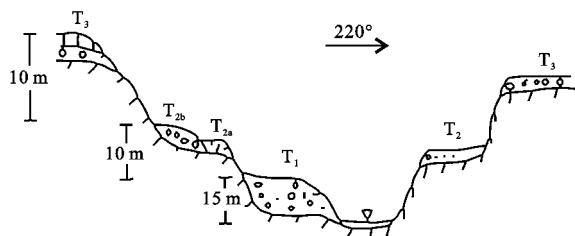


图4 三新村冲沟沟口阶地

## 4 结论

中条山北麓韩阳段盘底沟至鹿峪沟的河长坡降指标(SL)异常高值范围与断裂活动位置相吻合。6条冲沟的 Hack 剖面凸型明显,山麓山前沉积物主要是全新世早期冲洪积物抗侵蚀能力弱,揭示该研究区新构造活动性较强。

研究区6条冲沟的面积高度积分值介于0.4~0.6,并且 HI 由西南向东北呈现先增大后降低的趋势,依据 Strahler 分段模表明该流域处于地貌演化的壮年期阶段。流域盆地形态因子研究结果表明6条冲沟均属于狭长型集水盆地,西南向盘底沟和贺家沟 BS 介于3~4为新构造活跃区,其余东北向4条冲沟

BS均大于4,为新构造极活跃区。通过面积高度积分值和流域盆地形态因子综合分析,韩阳段断层活动性自西南至东北方向呈现先增强后降低的趋势。

野外考察结果显示中条山北麓韩阳段东北段山前断层三角面形态清晰,呈现自东北向西南方向三角面逐渐不发育的趋势。盘底沟和三新村沟的山前沟口表现出东岸阶地发育明显而西岸发育相对较弱的一致性规律,说明沟谷东侧山地抬升较强烈、西侧抬升较弱,从而验证说明中条山北麓韩阳段断裂自西南向东北方向新构造活动性呈现逐渐增强的趋势。

## 参考文献:

- [1] 王乃樑,杨景春,夏正楷,等. 山西地堑系新生代沉积与构造地貌[M]. 北京:科学出版社,1996.
- [2] 国家地震局鄂尔多斯周缘活动断裂系课题组. 鄂尔多斯周边活动断裂系[M]. 北京:地震出版社,1988.
- [3] 徐锡伟,邓起东,董瑞树,等. 山西地堑系强震的活动规律和危险区段的研究[J]. 地震地质,1992,14(4):305-316.
- [4] 苏宗正,程新原,安卫平,等. 山西运城盆地的中条山断裂[M]//中国地震局地质研究所活动断裂研究(8). 北京:地震出版社,2001.
- [5] 程绍平,杨桂枝. 山西中条山断裂带的晚第四纪分段模型[J]. 地震地质,2002,24(3):89-302.
- [6] Li Youli, Yang Jingchun, Xia Zhengkai, et al. Tectonic geomorphology in Shanxi Graben System, Northern China[J]. Geomorphology, 1998(23):77-89.
- [7] 李有利,杨景春. 山西运城盐湖沉积环境及其演化[J]. 地理研究,1994,13(1):70-75.
- [8] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 基于 DEM 的数字流域特征提取研究进展[J]. 地理科学进展,2013,32(1):031-040.
- [9] 赵洪壮,李有利,杨景春,等. 基于 DEM 数据的北天山地貌形态分析[J]. 地理科学,2009,29(3):445-449.
- [10] Keller E A, Pinter N. Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [11] Hack J T. Stream-profiles analysis and stream-gradient index[J]. Journal of Research of the U. S. Geological Survey, 1973, 1(4):421-429.
- [12] Strahler A N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography[J]. Geological Society of America Bulletin, 1952, 63:1117-1142.
- [13] 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.