

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.02.026

文章编号: 1006-6616 (2021) 02-0280-14

太行山地貌计量指标空间特征及其构造地貌意义

关雪, 逢立臣, 姜雨彤, 吕红华, 郑祥民

GUAN Xue, PANG Lichen, JIANG Yutong, LYU Honghua, ZHENG Xiangmin

华东师范大学地理科学学院, 上海 200241

School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China

GUAN X, PANG L C, JIANG Y T, et al., 2021. Spatial characteristics of quantitative geomorphic indices in the Taihang Mountains, north China: Implications for tectonic geomorphology [J]. Journal of Geomechanics, 27 (2): 280-293. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.02.026

Abstract: Tectonic geomorphology focuses on the coupling relationship between tectonics and surface processes, as well as their influence on topographic evolution. Spatial analysis techniques based on digital elevation model (DEM) and geographic information system (GIS) have gradually become one of the quantitative methods of tectonic geomorphologic study. The Taihang Mountains is located at the boundary of China's second and third topographic steps, and has important tectonics and geomorphological significance. However, at present, there are still few studies on the relationship between topographic evolution status of the Taihang Mountains and geological tectonics. Based on the ASTER GDEM data (30 m × 30 m) and GIS spatial analysis method, we selected the elevation, slope, hypsometric integral, stream length-gradient index *SL* and Hack Profile of river slopes in the mainstream of the Taihang Mountains for analysis. Combining with the lithology and tectonics, we discussed the regional landform evolution status of the Taihang Mountains. The results show that, among the 11 rivers analyzed, the HC of 7 rivers is S-shaped, the *HI* between 0.35 and 0.60, indicating that the geomorphy is in the prime of evolution, while that of the other 4 rivers is concave, *HI* less than 0.35, indicating strong erosion and destruction effect in the old age. The Hack profiles of 7 rivers are up-convex with relatively high *K* value, demonstrating the relatively active regional neotectonic activity, while that of the other 4 rivers are approximately straight with low *K* value, demonstrating the weak regional neotectonic activity. On the whole, the average *HI* of the Taihang Mountains is 0.36, and the HC is nearly concave S-shaped. The geomorphological evolution of this area is generally in the transitional stage from the "prime age" to the "old age". The neotectonic activity (fault activity) of the Taihang Mountains shows difference in space, with strong activity in the east and relatively weak activity in the west.

Key words: hypsometric integral; stream length-gradient index *SL*; Hack profile; tectonic geomorphology; the Taihang Mountains

摘要: 系统的地貌计量指标分析有助于理解造山带新构造活动特征与地貌演化。太行山地处中国第二、三地形阶梯的边界, 具有重要的构造地貌意义。基于 ASTER GDEM 地形数据, 对太行山按流域进行了面积高程积分、河长坡降指标 (*SL*) 和 Hack 剖面等地貌计量指标的分析, 结合地层、构造等资料, 探讨了太行山构造地貌演化特征。结果表明, 在分析的 11 条河流中, 7 条河流的面积高程曲线 (HC) 呈 S 形,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771013)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation (Grant No. 41771013)

第一作者简介: 关雪 (1997—), 女, 在读硕士, 从事构造地貌研究。E-mail: xguangeo@163.com

通讯作者: 吕红华 (1978—), 男, 教授, 主要构造地貌研究。E-mail: hhlv@geo.ecnu.edu.cn

收稿日期: 2020-12-10; **修回日期:** 2021-02-03; **责任编辑:** 范二平

引用格式: 关雪, 逢立臣, 姜雨彤, 等, 2021. 太行山地貌计量指标空间特征及其构造地貌意义 [J]. 地质力学学报, 27 (2): 280-293. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.02.026

面积高程积分值 (HI) 在 0.35~0.60 之间,表明其地貌演化处于壮年阶段,4 条河流的 HC 呈凹形, HI 值小于 0.35,表明其地貌已遭受强烈侵蚀改造,目前处于地貌演化的老年阶段;7 条河流的 Hack 剖面呈上凸形态,均衡坡降指标值 (K) 偏高,表明流域所在区域新构造活动较为活跃,4 条河流的 Hack 剖面近似直线, K 值偏低,表明河流所在区域新构造活动性较弱;从整体上看,太行山的 HI 平均值为 0.36, HC 为接近凹形的 S 形,表明太行山地貌演化整体上处于“壮年期”向“老年期”过渡阶段;太行山新构造活动性(断裂活动)在空间上存在差异性,东部活动性较强,西部地区活动性相对较弱。

关键词: 面积高程积分; 河长坡降指标; Hack 剖面; 构造地貌; 太行山

中图分类号: P931.2; P542 **文献标识码:** A

0 引言

构造地貌学主要关注构造、气候、地表过程之间的相互耦合关系及其对地貌演化的影响(刘静等, 2018)。近年来,伴随测年技术的改进和地貌形态测量技术的革新,构造地貌研究逐渐由定性分析转变为半定量一定量研究。基于光释光、AMS 碳十四、宇宙成因核素、磁性地层等定年方法建立的时间标尺,构造活动速率与地震复发周期能够得以限定(王岸和王国灿, 2005),甚至通过仪器观测可以获得现今构造变形速率(刘静等, 2018)。而地貌计量指标分析可以揭示构造地貌演化的空间规律及其控制因素,近年来也已受到重视(Chen et al., 2003; 张天琪等, 2015; 武登云等, 2018)。

目前,流域尺度下内、外地质营力的复杂关系及其在地貌上的表现是构造地貌研究重点关注的内容之一(赵洪壮等, 2009; 张敬春等, 2011; 程璐等, 2017; 文力等, 2020)。一些学者已成功将数字高程模型(DEM)与地理信息系统(GIS)的空间分析技术相结合,并应用于流域尺度的构造地貌研究(史兴民等, 2004; 王岸和王国灿, 2005)。通过坡度(刘亢等, 2012; 钱程等, 2012)、河流陡峭指数(胡小飞等, 2010; 梁欧博等, 2018)、面积高程积分值(HI) (Strahler, 1952; Walcott and Summerfield, 2008; 赵洪壮等, 2010a; 张敬春等, 2011)、河长坡降指标(SL)与 Hack 剖面(Hack, 1973; 赵洪壮等, 2010b; 吉亚鹏等, 2011)等地貌计量指标分析,探讨不同因素对地貌演化的作用,特别是基于地貌指标分析揭示区域新构造活动特征,推断区域地貌演化阶段。如赵国华等(2014)运用河长坡降指标(SL)与 Hack 剖面及面积高程积分,探讨了龙门山中段地区的构造活动特性;张天琪等(2015)运用面积

高程积分刻画了新疆乌鲁木齐河流域的地貌演化特征,发现地貌演化与区域构造背景密切相关。这些研究均表明,基于 DEM 的空间分析方法可以用于探讨新构造活动的空间特征。

太行山位于华北平原西侧、黄河晋陕峡谷以东地区,地处中国第二、三地形阶梯的边界。其特殊的地理位置、齐全的地层序列以及发育良好的层状地貌面(如夷平面、山麓剥蚀面、河流阶地等),为研究华北构造地貌发育史创造了良好的条件(张蒙和李鹏霄, 2014; Zhang et al., 2018; 张琪琪和张栓宏, 2019),因此具有重要的地貌学、构造地貌学研究价值。目前,关于太行山地质与地貌方面的研究主要包括以下几个方面:地貌系统的发育背景、形成条件及特征(樊克峰和杨东潮, 2006; 高亚峰和焦慧元, 2007),局部或整体的地质遗迹特征与成因(吴忱, 2001; 徐志萍等, 2015; Chang et al., 2019),新构造活动特征(张岳桥等, 2003; 孙启凯等, 2018),太行山东、中、南段沉积相、断裂构造特征、河流阶地及夷平面研究(韩慕康等, 1983; 王辉等, 2018; 张蕾等, 2018),造山过程、机制及其相关的岩浆源区特征、作用与时空变化(吴忱等, 1999; 曹现志等, 2013),中生代变形过程、特征、机制与演化模式(吴忱等, 1999; 程世秀等, 2014)等。相对而言,基于 DEM 的地貌计量指标的空间分析来探讨太行山地貌演化阶段及其与区域构造背景的关系,这方面的工作还相对缺乏。此外,太行山地处“华北地震带”。据统计,该地区 8 级以上地震发生过 1 次,7~7.9 级地震发生过 5 次,这对京、津、唐等地区的人民生活产生了较为严重的影响(吴奇, 2012)。另外,国家级新区雄安新区就位于太行山东麓,受太行山山前断裂的控制。该地区构造上属于渤海断陷盆地,于晚中生代发生强烈的伸展断块活动,至第四纪进入

裂谷热沉降阶段（何登发等，2018；刘开明等，2020）。因此，对太行山开展地貌演化阶段和新构造活动强度的研究具有重要的理论和现实意义。基于此，文章以数字高程模型为基础数据，基于 ArcGIS 空间分析技术进行面积高程积分、河长坡降指标（*SL*）与 Hack 剖面等主要地貌计量指标的分析，进一步结合区域地层、构造等资料，探讨太行山地貌演化阶段及其反映的区域新构造特征。

1 研究区概况

太行山地理位置介于 $34^{\circ}34' \sim 40^{\circ}43'N$ ； $110^{\circ}14' \sim 116^{\circ}34'E$ 之间（图 1a）。从宏观地貌格局来看，太行山处于中国第二地形阶梯东缘，总体上呈北东—南西走向。西侧以山西地堑系盆地与吕梁山相隔，东侧为华北平原，南侧则以黄河与秦岭相望。太行山地势北部高、南部低，并呈自东向西逐渐变缓的趋势。自北向南，主要发育 11 个水系，即永定河、沧头河、子牙河、白沟河、上唐河、大沙河、滹沱河、汾河、漳河、沁河、涑水河（图 1b）。就大地构造位置而言，太行山位于华北克拉通中南部，以东是以渤海湾盆地为代表的一系列裂陷盆地，以西是汾渭地堑系，以南是西安—郑州—徐州裂谷转换带，东南部展现为桌状隆起（樊克峰和杨东潮，2006；王辉等，2018）。相关学者对于太行山主要隆升成山时期有不同的看法（吴忱等，1999；龚明权，2010；孟元库等，2015）。吴忱等（1999）基于对太行山地区发育的深切曲流河谷进行分析，认为太行山开始隆升于中新世，第四纪期间新构造运动活跃、逐渐形成现今地貌形态。龚明权（2010）联合地貌面分析与盆地沉积地层研究，认为太行山主要隆起于古近纪末至上新世初。孟元库等（2015）则运用磷灰石裂变径迹分析方法，认为太行山主体在前新生代为剥蚀夷平—准平原化过程，在古近纪时期则为抬升—剥蚀夷平过程，中新世是山体快速隆升阶段。总的来说，太行山主要隆升于新近纪。

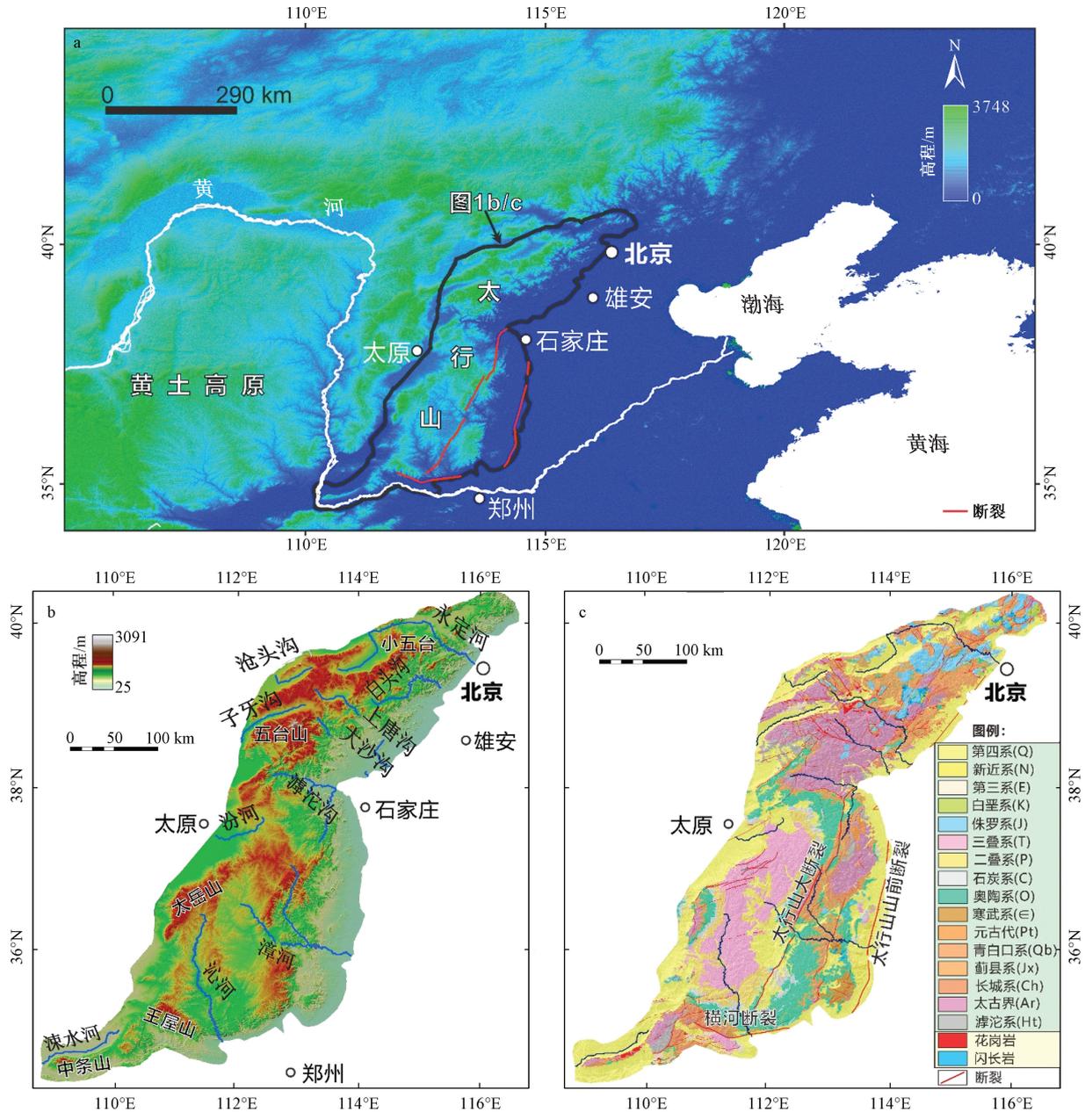
太行山内断裂较多，可概括为两条断裂带，即太行山山前断裂带、太行山大断裂带（图 1c；吴奇，2012；朱建佳等，2019）。位于太行山东部的太行山山前断裂带是太行山隆起带（断块隆起区）与华北平原裂陷盆地区的构造分界线，自北向南由黄庄—高丽营、顺义—良乡、保定—石家庄、

邯郸、汤东、汤西等十多条北东—北北东向断裂组成（徐杰和高战武，2000）。而位于太行山中东部的太行山大断裂带自北向南由乌龙沟、紫荆关、晋获断裂三条北东—北北东向断裂组成（曹现志等，2013）。这两条断裂带在新近纪以来均有不同程度的活动，控制着区内的构造格局。

太行山地区地层包含基底和盖层两个部分。基底是太古宙至元古代地层，包括阜平群、五台群和滹沱群，其变质作用和构造变形强烈。盖层发育有两个阶段。其一为中元古代至古生代，其中，长城系以较厚的石英砂岩地层为主，主要分布在北部的山地地区以及太行山大断裂带附近；寒武至奥陶纪地层以海相碎屑岩—碳酸盐岩为主，夹有页岩、泥岩等地层，主要分布在南部的汾渭地堑系周围地区；石炭至二叠系以零散分布的含煤碎屑岩地层为主，零星分布在南部的沁河流域及汾渭地堑系。其二为中生代至新生代，其中，中生代受太平洋板块向欧亚板块北西向俯冲和挤压的作用进入了活跃期，且伴有岩浆侵入作用，在侏罗纪达到顶峰；新生代由于印度板块向北与欧亚板块碰撞，致使太行山加速隆升。太行山北部广泛分布中元古代长城系石英砂岩，南部则广泛分布早古生代寒武系—奥陶系碳酸盐岩（张蒙和李鹏霄，2014；王辉等，2018）。总体来说，太行山地层主要为太古界（阜平群、五台系）、下元古界（滹沱群）、中上元古界（长城系、蓟县系、青白口系、震旦系）、古生界（寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系）、中生界（三叠系）、新近系和古近系沟谷沉积，第四纪地层主要分布在河谷和低凹地区（图 1c；孟元库等，2015；黄倩雯等，2019）。

2 数据与方法

文中所选取的数字高程模型（DEM）数据来自于地理空间数据云网站（<http://www.gscloud.cn/>），其空间分辨率为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ ，所得图像的水平精度为 30 m ，垂直精度为 20 m （赵国松等，2012）。基于此数据，运用 ArcGIS10.4 的空间分析工具（Spatial Analyst）及 3D 分析工具（3D Analyst），提取太行山地区的 DEM，对其面积高程积分、河长坡降指标（*SL*）和 Hack 剖面等地貌计量指标进行分析。



a—研究区位置; b—太行山地形与水系格局; c—地层与构造

图 1 研究区地理位置与地形、地质图

Fig. 1 Geographical location, topographic and geological maps of the study area. (a) Location of the study area. (b) Topography and river systems. (c) Stratigraphy and tectonics of the Taihang Mountains, north China

面积高程曲线 (HC) 可以用来刻画流域侵蚀与地貌演化状态, 假设 a 为某一子流域的面积, A 为流域总面积, h 为流域某一高程与最低高程的差, H 为流域最大高程差, 面积高程曲线 (HC) 以某一流域的相对面积比 (a/A) 为横坐标、相对高度比 (h/H) 为纵坐标来表示 (Strahler, 1952)。而面积高程积分值 (HI) 是面积高程曲线下方的积分面积 (Strahler, 1952)。Strahler (1952) 通过对面积高程曲线 (HC) 的形态和面积高程积分值

(HI) 分析, 发现在 Davis (1899) 地貌侵蚀循环理论的框架下, 这些地貌指标可以用于探讨流域的新构造活动特征与地貌演化阶段。流域地貌演化的早期 (即河流地貌发育的幼年期), 地表受构造抬升作用影响较大, 外力作用影响较小, 使得地貌受侵蚀破坏较弱, 土地残积率较大, 故而面积高程积分值较高 ($HI > 0.60$), 面积高程曲线呈上凸形态。在流域地貌演化的后期 (即河流地貌发育的老年期), 地表受外力侵蚀破坏作用影响较

大,使得土地残积率较小,故而面积高程积分值较低 ($HI < 0.35$),面积高程曲线呈下凹形态 (Strahler, 1952)。而介于流域地貌演化幼年期和老年期之间的壮年期,面积高程曲线形态呈 S 形,面积高程积分值为 $0.35 < HI < 0.60$ (Strahler, 1952)。

河长坡降指标 (SL) 是河流纵剖面的坡度与距河流源头的距离的乘积,即:

$$SL = (\Delta H / \Delta L) \times L \quad (1)$$

其中, ΔH 表示某河段的高程差; ΔL 表示该河段的长度; L 表示此河段中点到河流源头的距离。 SL 可以用来反映河流纵剖面坡度的变化,常用来讨论中—小时空尺度的构造运动或岩性差异等问题。当 SL 值较大时,揭示该河段构造活动性较强或地层抗侵蚀性较强;当 SL 值较小时,揭示该河段构造活动性较弱或地层抗侵蚀性较弱 (Hack, 1973; 武登云等, 2018)。

Hack 剖面是以河流纵剖面高度为纵坐标,河段距河流源头的距离取对数为横坐标,即:

$$H = C - K \times \log L \quad (2)$$

其中, H 表示河流纵剖面的高程; C 为常数; K 表示斜率; L 同上。Hack 剖面可以用来反映河流纵剖面形态的变化。当 Hack 剖面呈上凸形态时,指示该河段构造活动性较强;当 Hack 剖面呈下凹或直线形态时,指示该河段构造活动性较弱 (Hack, 1973; Zhang et al., 2018)。自河流源头至河流出水口连接一条直线,这条直线可表示河流达到动态平衡时的状态 (均衡剖面状态),即 K 为均衡坡降指标,可以用来反映河道的陡缓状态以及河流的侵蚀力 (Hack, 1973; 赵洪壮等, 2010b; Zhang et al., 2018)。当 K 值较大时,该河道较陡且流域内构造活跃、侵蚀力较强;当 K 值较小时,该河道较缓且流域内构造不活跃、侵蚀力较弱。一般来说,河流的规模与 K 值呈正相关,规模较大的河流具有较大的 K 值,规模较小的河流具有较小的 K 值。据此,为比较不同河流的河长坡降指标 (SL),需要用 K 对 SL 进行标准化,得到标准化河长坡降指标 (SL/K)。Seeber and Gornitz (1983) 在对喜马拉雅地区的河流进行研究时,将 SL/K 进行划分,即 2~10 为陡河段,大于 10 为极陡河段。本研究采用此标准对河段进行划分。

面积高程积分是用二维的面积高程曲线来描述三维原始地表受侵蚀后的土地体积残存率

(Strahler, 1952),其可以用来表征流域整体的地貌演化阶段。河长坡降指标 (SL) 对中小空间尺度的变化 (岩性的差异、局部的断裂活动性等) 反馈较为敏感,常常用来指示河流纵剖面的局部坡度变化状况 (Hack, 1973),而 Hack 剖面可以用来反映整个河流纵剖面的变化与调整。与河长坡降指标 (SL) 相比, Hack 剖面更适合用来探讨较大空间尺度的构造变动 (Chen et al., 2003),以此来弥补河长坡降指标 (SL) 的不足。相较于河长坡降指标 (SL) 和 Hack 剖面来讲,面积高程积分则更好地反映了流域内地貌发育的整体趋势。综合利用面积高程积分、河长坡降指标 (SL) 和 Hack 剖面,可以在不同空间尺度上为研究流域内的地貌演化提供依据。

3 太行山地貌计量指标分析

3.1 面积高程积分和面积高程曲线

面积高程积分具有面积、空间依赖性,面积不同的集水盆地,其 HI 值能反映出不同地形因子的影响。对于河流的上、中、下游地区,其在地形高差、岩性、内外作用营力等方面都存在着差异,同时,这亦使得 HI 值受到相应地影响。因此,选择不同的面积高程积分分析其所适宜的最佳集流阈值,对于某一流域而言,可能有所不同。已有研究 (Walcott and Summerfield, 2008; Pedrera et al., 2009; 张天琪等, 2015) 也表明,不同研究区适用的面积阈值亦不相同。为了更好地探讨子集水盆地面积与高差对太行山面积高程积分的影响,并基于已有研究认识 (Pedrera et al., 2009; 张天琪等, 2015),以 12 组集流阈值 (4.5 km^2 , 8.1 km^2 , 9 km^2 , 18 km^2 , 54 km^2 , 90 km^2 , 126 km^2 , 162 km^2 , 198 km^2 , 234 km^2 , 270 km^2 , 306 km^2) 将太行山划分为若干次集水盆地 (表 1)。对提取出的次集水盆地的 HI 平均值与其平均面积、平均高差进行相关性分析,结果表明 (表 1, 图 2): ①当集流阈值小于 18 km^2 时,流域内划分出的次集水盆地数量过多且面积较小,不适于分析流域尺度的构造活动性;②当集流阈值大于 18 km^2 时,流域内的 HI 值与集流阈值大小、次集水盆地的平均高差、平均面积均呈显著负对数相关关系 ($R^2 > 0.85$)。

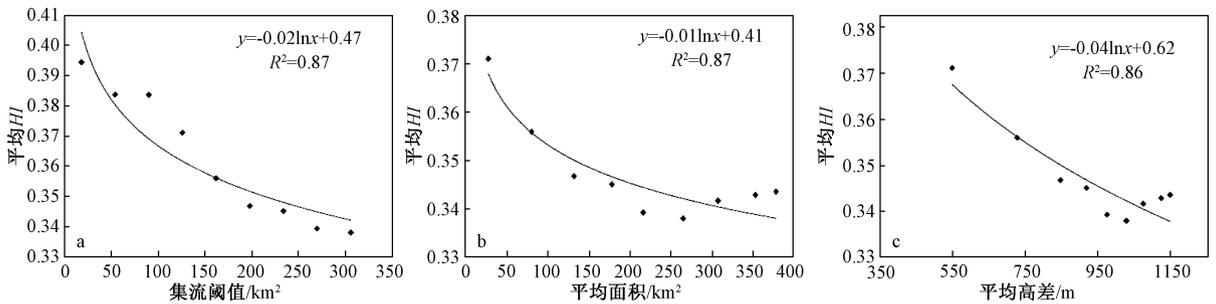
基于上述 12 个面积阈值所划分得到的若干次

集水盆地 (表 1), 得到相应的 HI 值及其空间分布特征 (图 3), 以探讨构造、岩性等因素对太行山 HI 值的影响。为更好地展示 HI 值的空间分布特征, 将地貌演化壮年期的 HI 值范围 ($0.35 < HI < 0.60$) 划分为两个区间, 即 $0.35 \sim 0.50$ 和 $0.50 \sim 0.60$, 进一步分析显示: ① HI 较高值分布在海拔较高的区域, 太行山隆起带及小五台山、五台山、太岳山、王屋山、中条山等地区的 HI 值较高, 多在 $0.35 \sim 0.50$ 之间; ② 当集流阈值 $\leq 90 \text{ km}^2$ 时, 次集水盆地的面积较小且分布在岩性相同的地区, HI 值与岩性有较好的对应关系 (图 1c、图 3a—3c), 如山地地区的中太古界与奥陶系—寒武系的石英砂岩、碳酸盐岩地层所对应的 HI 值较大; ③ 当集流阈值在 $126 \sim 198 \text{ km}^2$ 的范围内, 次集水盆地跨越多个地层单位, 岩性的影响被综合, 构造

表 1 不同集流阈值下太行山次集水盆地数量、平均面积、平均高差和平均 HI

Table 1 Attributes of the sub-catchment basins defined by the area threshold

集流阈值/ km^2	次集水盆地 数量/个	平均面积/ km^2	平均高差/ m	平均 HI
4.5	20277	6.98	369	0.39
8.1	10449	13.49	439	0.38
9	9085	15.52	440	0.38
18	5072	27.63	549	0.37
54	1712	80.27	728	0.36
90	1027	132.02	847	0.35
126	749	178.12	919	0.35
162	611	216.42	975	0.34
198	493	265.36	1028	0.34
234	418	307.80	1075	0.34
270	362	353.37	1124	0.34
306	335	378.44	1149	0.34



a—平均 HI 与集流阈值; b—平均 HI 与平均面积; c—平均 HI 与平均高差

图 2 太行山次集水盆地平均 HI 与集流阈值、平均面积、平均高差的相关关系图

Fig. 2 Correlations between mean HI and area threshold, mean area and mean altitude difference of the sub-catchment basins in the Taihang Mountains. (a) Mean HI vs. area threshold. (b) Mean HI vs. mean area. (c) Mean HI vs. altitude difference

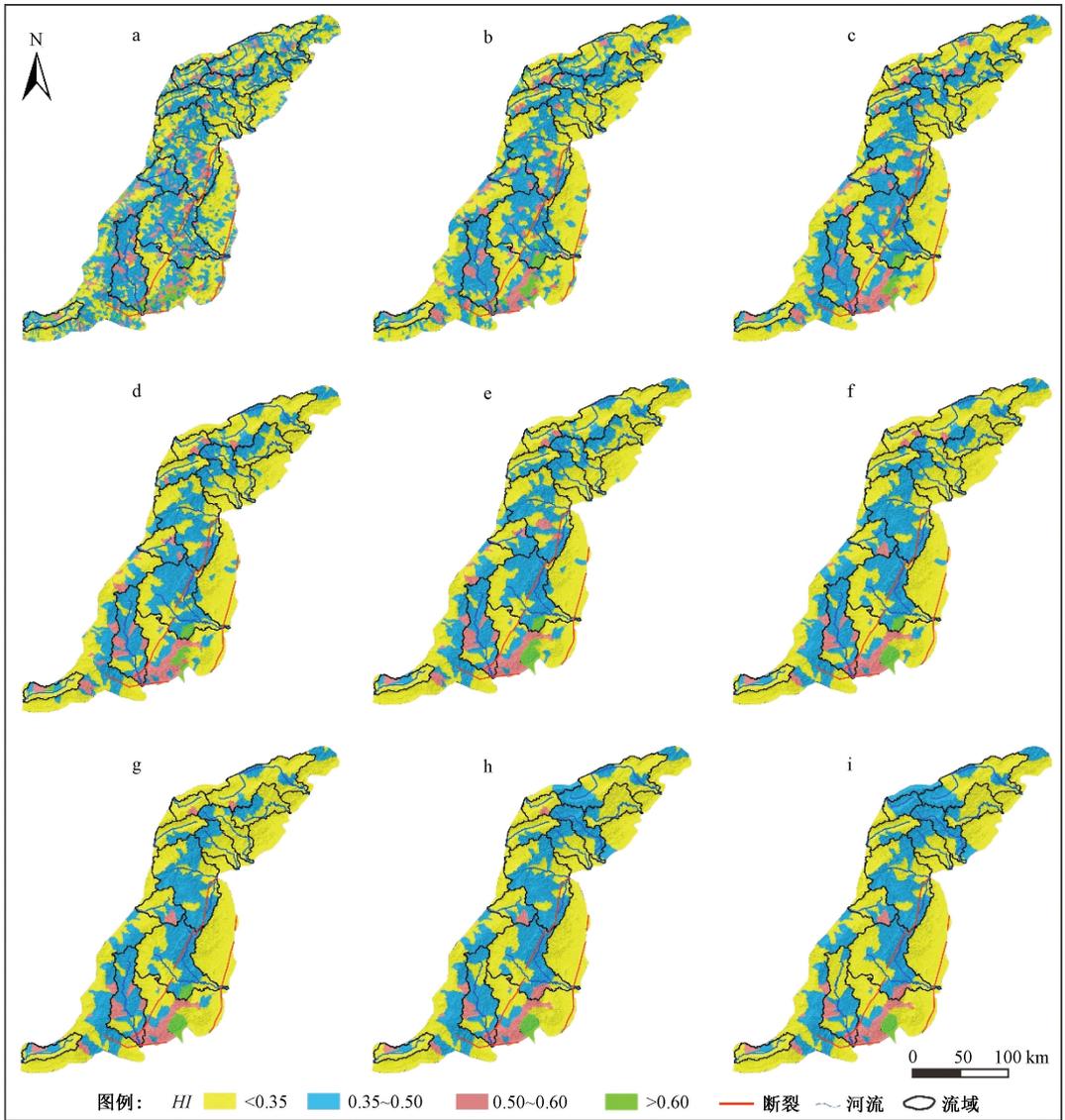
因素的影响被突显 (图 3d—3f), 如流域内总体的 HI 值与流域内的断裂带走向 (北东—南西走向) 基本一致, 深受流域内的太行山山前断裂与太行山大断裂的影响; ④ 当集流阈值 $\geq 234 \text{ km}^2$ 时, 次集水盆地跨越了不同的断裂带, HI 值反映更大空间尺度上的构造活动特性 (图 3g—3i)。由以上分析可得, 为探讨太行山地区各构造分区的地貌演化特征, 合适的集流阈值应为 $126 \sim 198 \text{ km}^2$ 。

对太行山地区整体的面积高程积分分析只能反映出该地区地貌演化的总趋势, 而研究区内不同地区的地貌演化不尽相同, 使得区域内的地貌演化呈现出差异, 对研究区内不同流域进行分析, 能更好地揭示一个地区内部的地貌演化。因此, 对太行山地区发育的 11 条主要河流, 选用集水面积阈值 162 km^2 进行面积高程积分分析。根据结果可将其分为两类 (图 4a): ① 面积高程曲线 (HC)

形态呈“S”形, 面积高程积分值为 $0.35 \leq HI < 0.60$, 白沟河、汾河、滹沱河、沁河、上唐河、永定河及漳河的 HC 近似地呈“S”形, 且 HI 值在 $0.35 \sim 0.60$ 之间, 依次为 $0.49, 0.40, 0.50, 0.41, 0.38, 0.35$ 及 0.49 ; ② 面积高程曲线 (HC) 形态呈“凹”形, 面积高程积分值为 $HI < 0.35$, 沧头河、大沙河、涑水河以及子牙河的 HC 呈“凹”形, 并且其 HI 值均小于 0.35 , 依次为 $0.34, 0.27, 0.17, 0.29$ 。对太行山整体的分析可知 (图 4b), 太行山的 HI 值为 0.36 , HC 为接近“凹”形的“S”形, 表明太行山地貌演化处于“壮年期—老年期”的过渡阶段。

3.2 河长坡降指标 (SL) 和 Hack 剖面

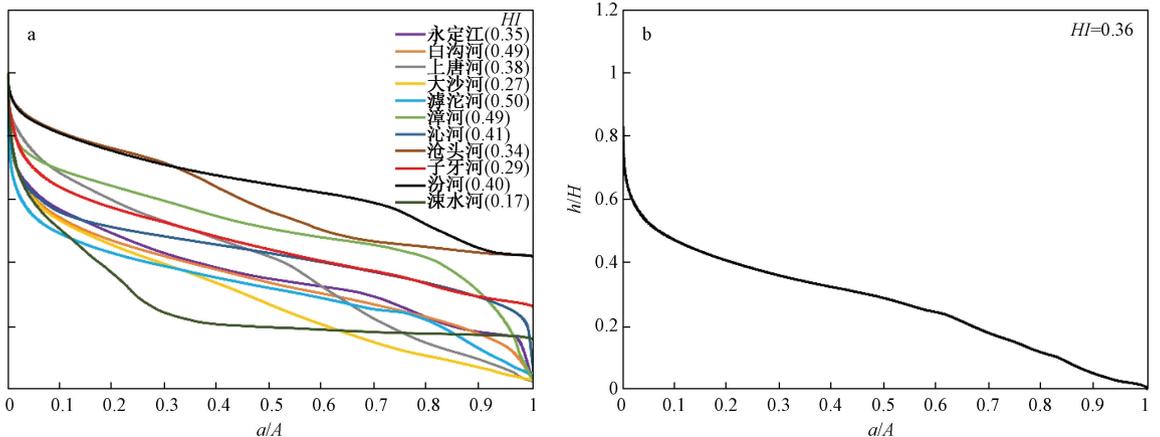
通过对标准化河长坡降指标 (SL/K) 的数值进行统计 (图 5), 太行山 11 条河流中 31% 的标准化河长坡降指标值处于 $0 \sim 2$ 之间, 19% 的标准化



a—18 km²; b—54 km²; c—90 km²; d—126 km²; e—162 km²; f—198 km²; g—234 km²; h—270 km²; i—306 km²

图3 不同集流阈值下太行山面积高程积分值

Fig. 3 Spatial distributions of the HI values in the Taihang Mountains at different area thresholds



a—太行山的面积高程曲线; b—太行山11条河流干流河段的面积高程曲线

图4 面积高程曲线 (HC)

Fig. 4 Hypsometric curves. (a) HC of the Taihang Mountains; (b) HC of the eleven analyzed rivers

河长坡降指标值处于 2~10 (陡河段) 之间, 50%

的标准化河长坡降指标值大于 10 (极陡河段)。

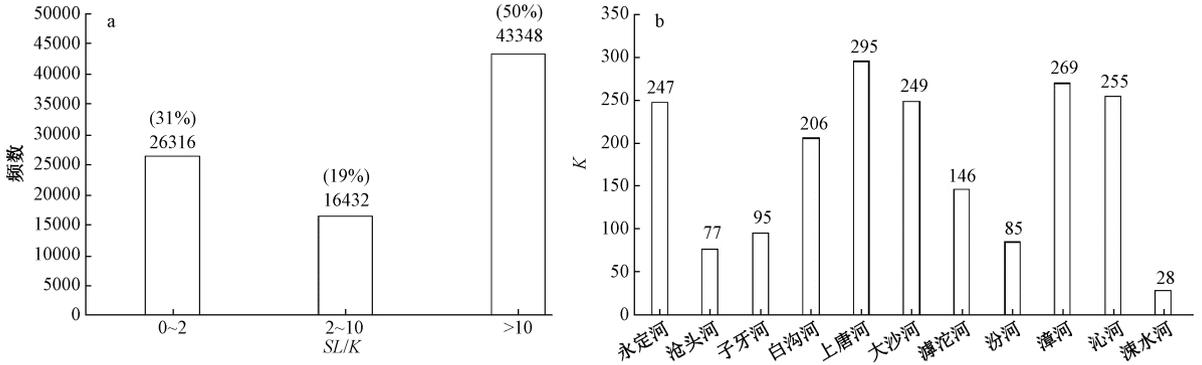
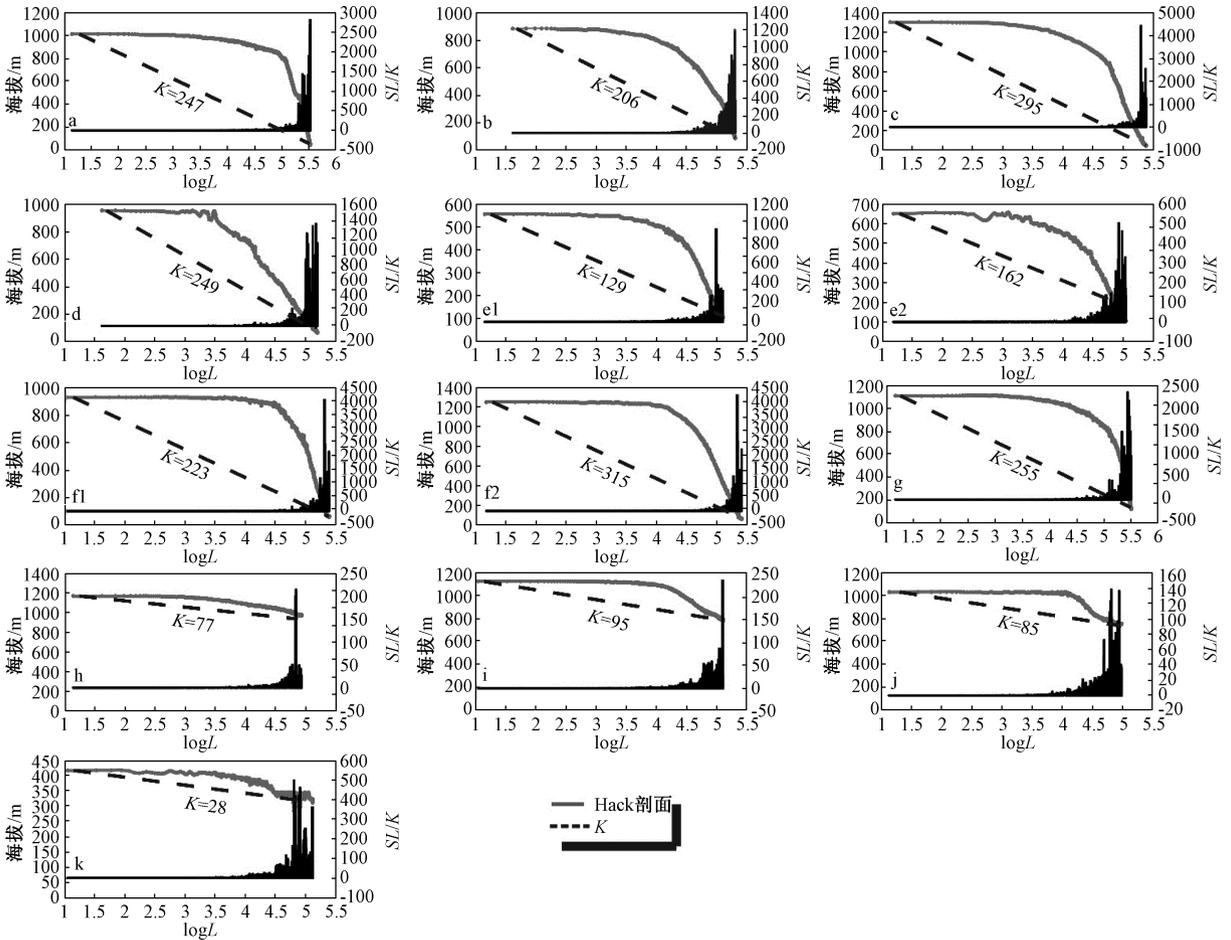


图 5 太行山 11 条河流的标准化坡降指标 (SL/K) 和均衡坡降指标 (K)

Fig. 5 SL/K and K for the eleven analyzed rivers in the Taihang Mountains

河流的纵剖面形态、河流的 Hack 剖面及河长坡降指标 (SL) 如图 6 所示。①太行山 11 条河流的 Hack 剖面曲线均呈现不同程度的上凸形态, 但是它们的凸度不尽相同, 其中, 永定河、白沟河、

上唐河、滹沱河、漳河、沁河的凸度相近, 曲线较为平滑, 大沙河也呈上凸形态, 但曲线不平滑的程度较大, 沧头河、子牙河、汾河、涑水河的 Hack 剖面曲线上凸形态最小, 近似为直线; ② K



a—永定河; b—白沟河; c—上唐河; d—大沙河; e1, e2—滹沱河; f1, f2—漳河; g—沁河; h—沧头河; i—子牙河; j—汾河; k—涑水河

图 6 太行山 11 条河流干流河段的 SL/K 和 Hack 剖面

Fig. 6 SL/K and Hack profiles of the main stream sections of the eleven rivers in the Taihang Mountains.

a—the Yongding River; b—the Baigou River; c—the Shangtang River; d—the Dasha River; e1, e2—the Hutuo River; f1, f2—the Zhang River; g—the Qin River; h—the Cangtou River; i—the Ziya River; j—the Fen River; k—the Sushui River

值统计结果表明太行山隆起带以东的河流包括永定河 ($K=247$)、白沟河 ($K=206$)、上唐河 ($K=295$)、大沙河 ($K=249$)、滹沱河 ($K=146$)、漳河 ($K=269$)、沁河 ($K=255$)，其 K 值普遍大于以西的河流，包括沧头河 ($K=77$)、子牙河 ($K=95$)、汾河 ($K=85$)、涑水河 ($K=28$)；③ Hack 剖面与标准化河长坡降指标 SL/K 之间存在较好的地形地貌对应关系。 SL/K 值较低的地区对应 Hack 剖面曲线上凸的位置，而 SL/K 值较高的地区对应 Hack 剖面曲线下凹的位置，如沧头河在海拔近 1000 m 处其 Hack 剖面曲线下凹时，所对应的 SL/K 值偏高。

4 讨论

地貌计量指标受到诸如构造、岩性、地貌演化阶段等多种因素的影响 (Chen et al., 2003; 张天琪等, 2015; 程璐等, 2017)。因此, 运用单一的地貌计量指标解释新构造活动性可能存在局限, 而综合使用多种地貌计量指标可以剔除其他一些影响因素, 更好地揭示区域新构造活动特征 (Silva et al., 2003; El Hamdouni et al., 2008; Lee and Tsai, 2010; 赵洪壮等, 2010a; Alipoor et al., 2011)。文中选用面积高程积分值 (HI) 与面积高程曲线 (HC)、河长坡降指标 (SL) 及 Hack 剖面 4 个地貌计量指标进行综合分析, 以探讨太行山的地形演化阶段与区域新构造活动特征。

4.1 太行山面积高程积分及其构造地貌意义

面积高程曲线 (HC) 与面积高程积分值 (HI) 能用于探讨区域构造活动特征及地貌演化阶段, 已有学者在渭河上游 (李利波等, 2012)、龙门山中段山前地区 (赵国华等, 2014)、白龙江流域 (常直杨等, 2014)、天山北麓 (赵洪壮等, 2009) 等区域均取得了不错的效果。由于面积高程积分具有空间依赖性, 不同的研究区域适用的集流阈值也有所不同, 因此, 每个研究区要选择合适的集流阈值就显得尤为重要。程璐等 (2017) 在钱塘江流域、赵洪壮等 (2010a) 在北天山玛纳斯河流域、张天琪等 (2015) 在北天山乌鲁木齐河流域的研究均表明, 构造、岩性、气候等因素是面积高程积分值 (HI) 的主要影响因子, 但这些因素的贡献会随研究区域空间尺度的不同而变化。本研究中, 集流阈值 $\leq 90 \text{ km}^2$ 时, 集水盆地

的 HI 值主要受岩性的影响; 集流阈值 $\geq 234 \text{ km}^2$ 时, 各次集水盆地跨越不同的构造区, 此时 HI 值与大空间尺度的构造活动特性相关。已有研究结果显示, 不同流域所适宜的集流阈值也有所不同。赵洪壮 (2010a) 等对玛纳斯河流域的构造研究发现适合该流域的集流阈值为 $9 \sim 20 \text{ km}^2$; 常直杨 (2014) 对白龙江流域构造研究分析后发现适合该流域的集流阈值为 10 km^2 ; 张天琪等 (2015) 等对北天山乌鲁木齐河流域地貌研究分析发现适合该流域的集流阈值为 $9 \sim 27 \text{ km}^2$ 。研究中适合太行山构造地貌特征分析的集流阈值为 162 km^2 。此外, 在面积高程积分值 (HI) 相同的地区, 其面积高程曲线 (HC) 的形态也会有差异。因此, 在分析面积高程积分值 (HI) 时, 还需将其与面积高程曲线 (HC) 的形态相结合, 以便于揭示区域地貌演化特征。

研究中, 太行山的 HI 值为 0.36 ($0.35 \sim 0.60$), HC 显示为近“凹”形的“S”形或“凹”形, 揭示太行山地貌演化进入了近“老年期”或“老年期”阶段。然而, 在太行山的一些地区也出现了 HI 高值区。地质图显示 (图 1c), 这些 HI 高值区主要为太古宇、奥陶系、寒武系等地层出露的地区, 区域内存在侵入岩、碳酸盐岩等抗侵蚀能力较强的岩性组合。已有研究表明, 侵入岩和碳酸盐岩等岩性分布区的 HI 较高 (赵国华等, 2014; 王辉等, 2018)。据此认为, 太行山 HI 高值区可能主要缘于岩性因素。不过, 太行山地区夷平面也比较发育。新生代以来, 太行山经历了多期次的构造隆升、剥蚀夷平过程 (吴忱, 2001; 吴奇, 2012; 王辉等, 2018)。太行山地区存在晚白垩纪末期形成的北台期夷平面、渐新世末期形成的甸子梁期夷平面以及早上新世末期至第四纪初期形成的唐县期夷平面 (王辉等, 2018)。这些夷平面风化壳发育, 受侵蚀程度较小, 亦可能导致这些区域的 HI 值偏高 (赵国华等, 2014; 王辉等, 2018)。

4.2 主要河流的面积高程积分、河长坡降指标 (SL) 和 Hack 剖面及其构造地貌意义

研究区 4 条河流 (沧头河、子牙河、大沙河、涑水河) 的 HI 值在 $0.15 \sim 0.35$ 之间 (图 4), 其面积高程曲线 (HC) 表现为“凹”形, 表明这 4 条河流地貌受外力侵蚀破坏作用的影响较大, 地貌演化进入了老年阶段。7 条河流 (永定河、白沟

河、上唐河、滹沱河、漳河、沁河、汾河) 的 HI 值在 0.35~0.60 之间, 其面积高程曲线 (HC) 表现为“S”形, 表明这 7 条河流流域地貌处于演化的壮年期。面积高程积分易受岩性和构造的影响, 当区域构造活动凸显时, 面积高程曲线 (HC) 会由“凹”形向“S”形发展; 而当区域外力侵蚀破坏显著时, 面积高程曲线 (HC) 会由“S”形向“凹”形发展 (赵洪壮等, 2010a, 2010b)。由于东部的断裂带 (太行山山前断裂带、太行山大断裂带) 自第四纪以来有活动 (曹现志等, 2018; 孙启凯等, 2018), 加之东部地区降水丰富、地表侵蚀相对强烈, 造成东部 6 条河流 (永定河、白沟河、上唐河、滹沱河、漳河、沁河) 的 HC 表现为“S”形, HI 值处于 0.35~0.60 之间 (吉亚鹏等, 2011; 钱程等, 2012)。而位于西部的沧头河、子牙河、涑水河, 流域地表层主要为第四系地层 (图 1c), 易受地表侵蚀作用的影响, 而且流域内断裂不发育, 因此其 HC 表现为“凹”形, HI 值小于 0.35。总体来看, 太行山地区 11 条河流的面积高程曲线 (HC) 自东向西呈现出由“S”形向“凹”形转变的特点, 与太行山地区新构造活动 (断裂活动性) 自东向西逐渐减弱的趋势一致。

河长坡降指标 (SL) 与 Hack 剖面分析结果表明 (图 6), 太行山东部河流 (永定河、白沟河、上唐河、大沙河、滹沱河、漳河、沁河) 的 Hack 剖面表现为明显的上凸形态且 K 值较大 (>125), 而西部河流 (沧头河、子牙河、涑水河) 的 Hack 剖面表现为近似直线的形态且 K 值较小 (<96)。经流域构造背景分析发现, ①东部的河流流经若干第四纪活动断裂, 如永定河、白沟河及上唐河主要受太行山山前断裂带的北部影响, 其北部的黄庄-高丽营断裂与顺义-良乡断裂自晚更新世以来活动较为活跃 (安慧婷等, 2015); 滹沱河与沁河则主要受太行山大断裂带的影响, 其中, 影响滹沱河的乌龙沟断裂自更新世以来活动强烈, 影响沁河的晋获断裂自更新世以来存在强烈的垂直差异性构造运动 (曹现志等, 2013); 漳河不仅深受太行山山前断裂带南部的邯郸断裂与汤东断裂的影响, 还受太行山大断裂带 (紫荆关断裂与晋获断裂) 的影响, 这些断裂均在第四纪以来存在强烈的垂直差异构造活动。②相对比而言, 西部的沧头河、子牙河、涑水河则没有流经第四纪活

动显著的断裂构造。因此, 太行山东部河流呈上凸形态的 Hack 剖面和较大的 K 值反映流域新构造运动相对活跃, 而西部河流近似直线的 Hack 剖面和较小的 K 值则是流域地层岩性的影响结果。综合来看, 河长坡降指标 (SL) 与 Hack 剖面分析结果 (图 6) 表明太行山地区新构造运动 (断裂活动性) 存在空间上的差异, 即构造活动性呈现出自东向西逐渐变弱的趋势, 与面积高程积分的分析结果以及与地质记录 (龚明权, 2010; 曹现志等, 2013) 一致。

有两条河的分析结果需要进一步解释。一是汾河, 其位于太行山西 (图 1b), 除了 K 值 (85) 偏低以外, 其 Hack 剖面呈上“凸”形态, HC 曲线近似为“S”形, HI 值 (0.40) 处于 0.35~0.60 之间。造成这一现象可能与提取的流域不完整有关, 较小的流域面积使得 K 值偏低。另外, 自第四纪以来, 汾河流域发生了三次构造抬升运动 (胡小猛等, 2002), 这也能造成汾河的 Hack 剖面呈上“凸”形态、HC 曲线呈“S”形、 HI 值偏高 (0.40)。二是大沙河, 其位于太行山东部 (图 1b), K 值高 (249), Hack 剖面表现为上“凸”形态, 然而, 其 HC 曲线却表现为下“凹”形态, HI 值为 0.27。构造上, 大沙河位于太行山山前断裂带北段的南端, 受到断层构造抬升的影响而使得 K 值偏高, Hack 剖面上“凸”, 但第四纪沉积地层导致其 HI 值偏低, HC 曲线下“凹”。这两个因素可能造成了大沙河的面积高程积分与 SL 、Hack 剖面的分析结果不一致。

已有研究发现太行山主要隆升于新生代 (吴忱等, 1999; 龚明权, 2010; 孟元库等, 2015)。中新世以来, 由于受青藏高原隆升的影响, 华北地块中部的山地 (太岳山、五台山、小五台山等) 相应隆升, 而盆地则相应下沉 (吴奇, 2012)。第四纪以来, 新构造运动开始, 山地地区的再一次抬升, 使得山麓地区相应上升并且其上升的速度较大, 从而逐渐形成了现今的太行山山地地区, 相应形成太行山地区广泛分布的 4 级河流阶地。研究结果显示, 新构造运动时期, 太行山地区东部的断裂 (太行山山前断裂) 活动较强, 而西部地区不仅断裂较少且活动较弱 (安慧婷等, 2015; 张岳桥等, 2019)。这些认识, 与文中根据面积高程积分、河长坡降指标 (SL) 与 Hack 剖面分析得到的结果一致。

5 结论

通过对太行山的面积高程积分、河长坡降指标 (SL) 和 Hack 剖面进行分析, 可获得以下主要认识。

(1) 集流阈值 $\leq 90 \text{ km}^2$, 面积高程积分值 (HI) 主要反映岩性差异, 当集流阈值为 $126 \sim 198 \text{ km}^2$, HI 主要反映构造活动差异, 而当集流阈值 $\geq 234 \text{ km}^2$, HI 主要反映更大空间尺度的构造活动。文中选用 162 km^2 的集流阈值进行面积高程积分分析。

(2) 在分析的 11 条河流中, 7 条河流 (永定河、白沟河、上唐河、滹沱河、漳河、沁河、汾河) 的面积高程曲线 (HC) 表现为“S”形, 面积高程积分值 (HI) 位于 $0.35 \sim 0.60$ 之间, 揭示其处于地貌演化的壮年阶段, 4 条河流 (沧头河、子牙河、大沙河、涑水河) 的 HC 表现为“凹”形, HI 值小于 0.35 , 揭示其处于地貌演化的老年阶段。而太行山整体的面积高程积分值 (HI) 为 0.36 , 面积高程曲线 (HC) 接近“凹”形, 揭示其地貌演化处于“壮年期—老年期”过渡阶段。

(3) 7 条河流 (永定河、白沟河、上唐河、大沙河、滹沱河、漳河、沁河) 的 Hack 剖面表现为上“凸”形态, 河流的 K 值 (> 125) 偏高, 50% 的标准化河长坡降指标 (SL/K) 值大于 10 (极陡河段), 并且这 7 条河流均位于太行山东部地区且流经断裂带, 揭示该区的断裂带新构造活动较为活跃。总体来看, 太行山东麓山前断裂带与中东部的大断裂带新构造抬升作用相对显著, 而西部活动性相对较弱, 呈现东强西弱的空间差异; 太行山整体处于地貌演化从壮年期到老年期的过渡阶段。

References

ALIPOOR R, POORKERMANI M, ZARE M, et al., 2011. Active tectonic assessment around Rudbar Lorestan dam site, High Zagros Belt (SW of Iran) [J]. *Geomorphology*, 128 (1-2): 1-14.

AN H T, XU L Q, LI S Z, et al., 2015. Meso-cenozoic stress fields and their transition mechanisms in the eastern Taihang mountain fault zone [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39 (4): 571-586. (in Chinese with English abstract)

CAO X Z, LI S Z, LIU X, et al., 2013. The intraplate morphotectonic inversion along the Eastern Taihang Mountain Fault Zone, North China and its mechanism [J]. *Earth Science Frontiers*, 20 (4):

88-103. (in Chinese with English abstract)

CAO X Z, XU L Q, LI S Z, et al., 2018. Neotectonics in the central North China block [J]. *Chinese Journal of geology*, 53 (3): 835-859. (in Chinese with English abstract)

CHANG J, QIU N S, LIU S, et al., 2019. Post-Triassic multiple exhumation of the Taihang Mountains revealed via low-T thermochronology: Implications for the paleo-geomorphologic reconstruction of the North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 68: 34-49.

CHANG Z Y, WANG J, BAI S B, et al., 2014. Appraisal of active tectonic in Bailongjiang basin based on DEM data [J]. *Quaternary Sciences*, 34 (2): 292-301. (in Chinese with English abstract)

CHEN Y C, SUNG Q, CHENG K Y, 2003. Along-strike variations of morphotectonic features in the Western Foothills of Taiwan: tectonic implications based on stream-gradient and hypsometric analysis [J]. *Geomorphology*, 56 (1-2): 109-137.

CHENG L, WU D Y, JIN W, et al., 2017. Geomorphic evolution of the Qiantang River drainage basin based on the analysis of topographic indexes [J]. *Quaternary Sciences*, 37 (2): 343-352. (in Chinese with English abstract)

CHENG S X, LI S Z, XU L Q, et al., 2014. Junction and transition of meso-cenozoic intraplate deformation between Taihang mountains and Qinling mountains [J]. *Geological Review*, 60 (6): 1245-1258. (in Chinese with English abstract)

DAVIS W M, 1899. The geographical cycle [J]. *The Geographical Journal*, 14 (5): 481-504.

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

FAN K F, YANG D C, 2006. Geomorphologic system in Taihang Mountain area [J]. *Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition)*, 7 (1): 51-53. (in Chinese with English abstract)

GAO Y F, JIAO H Y, 2007. Landform features of Zhangshiyan and Yuntai mountain at the middle-south section of the Taihang mountains [J]. *Urban Geology*, 2 (4): 44-48. (in Chinese with English abstract)

GONG M Q, 2010. Uplift process of southern Taihang mountain in Cenozoic [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese with English abstract)

HACK J T, 1973. Stream-profile analysis and stream-gradient index [J]. *Journal of Research of the U. S. Geological Survey*, 1 (4): 421-429.

HAN M K, ZHU S L, ZHAO J Z, et al., 1983. Geomorphic expressions of Quaternary tectonic stress field in the southern section of the eastern piedmont fault zone of Taihangshan Mountain [J]. *Acta Geographica Sinica*, 38 (4): 348-357. (in Chinese with English abstract)

HE D F, SHAN S Q, ZHANG Y Y, et al., 2018. 3-D geologic architecture of Xiong'an New Area: Constraints from seismic reflection data [J]. *Science China Earth Sciences*, 61 (8): 1007-1022.

- HU X F, PAN B T, KIRBY E, et al., 2010. Spatial differences in rock uplift rates inferred from channel steepness indices along the northern flank of the Qilian Mountain, northeast Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 55 (27): 3205-3214.
- HU X M, FU J L, LI Y L, 2002. Response of landform development to the tectonic movement and the climate changes in Fenhe drainage basin [J]. Acta Geographica Sinica, 27 (3): 310-318. (in Chinese with English abstract)
- HUANG Q W, SHI Y, QIN K L, et al., 2019. Geochronology and geochemistry of intrusions in the Qinling Complex: implications for the Paleozoic Tectonic evolution [J]. Geology and Exploration, 55 (5): 1185-1201. (in Chinese with English abstract)
- JYI P, GAO H S, PAN B T, et al., 2011. Implication of active structure in the upper reaches of Weihe river basin from stream length-gradient index (SL index) and Hack profile [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 47 (4): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- LEE C S, TSAI L L, 2010. A quantitative analysis for geomorphic indices of longitudinal river profile: A case study of the Choushui River, central Taiwan [J]. Environmental Earth Sciences, 59 (7): 1549-1558.
- LI L B, XU G, HU J M, et al., 2012. Quantitative analysis of relative active tectonics of the upstream region of Weihe river based on DEM [J]. Quaternary Sciences, 32 (5): 866-879. (in Chinese with English abstract)
- LIANG O B, REN J J, LV Y W, 2018. The response of fluvial geomorphologic characteristics of the Fujiang drainage basin to activity of the Huya fault zone [J]. Seismology and Geology, 40 (1): 42-56. (in Chinese with English abstract)
- LIU J, ZHANG J Y, GE Y K, et al., 2018. Tectonic geomorphology: An interdisciplinary study of the interaction among tectonic climatic and surface processes [J]. Chinese Science Bulletin, 63 (30): 3070-3088. (in Chinese with English abstract)
- LIU K, QU G S, NING B K, et al., 2012. The application of slope analysis method in fault segmentation in Kunming basin [J]. Journal of Institute of Disaster-prevention Science and Technology, 2012, 14 (4): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- LIU K M, XU Q M, DUAN L F, et al., 2020. Quaternary stratigraphic architecture and sedimentary evolution from borehole GB014 in the western Xiong'an New Area [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65 (20): 2145-2160. (in Chinese with English abstract)
- MENG Y K, WANG X W, CHEN J, 2015. Geological evidence of the Cenozoic tectonic uplifting in Taihang Mountains-Apatite fission track evidence from Well Qincan 1 [J]. Journal of Guilin University of Technology, 35 (1): 15-28. (in Chinese with English abstract)
- PEDRERA A, PÉREZ-PEÑA J V, GALINDO-ZALDÍVAR J, et al., 2009. Testing the sensitivity of geomorphic indices in areas of low-rate active folding (eastern Betic Cordillera, Spain) [J]. Geomorphology, 105 (3-4): 218-231.
- QIAN C, HAN J E, ZHU D G, et al., 2012. An analysis of geomorphologic characteristics of the Yellow River source region based on ASTER-GDEM [J]. Geology in China, 2012, 39 (5): 1247-1260. (in Chinese with English abstract)
- SEEBER L, GORNITZ V, 1983. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics [J]. Tectonophysics, 92 (4): 335-337, 341-367.
- SHI X M, YANG J C, LI Y L, et al., 2004. Deformation of Manas river terraces and neotectonics in northern front of the Tianshan mountains [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 40 (6): 971-978. (in Chinese with English abstract)
- SILVA P G, GOY J L, ZAZO C, et al., 2003. Fault-generated mountain fronts in Southeast Spain: Geomorphologic assessment of tectonic and seismic activity [J]. Geomorphology, 50 (1-3): 203-225.
- STRAHLER A N, 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography [J]. GSA Bulletin, 63 (11): 1117-1142.
- SUN Q K, HE Q L, LI L Y, et al., 2018. Evolution characteristics of the crust vertical deformation and the faults activity analysis in the northern area of North China [J]. Journal of Seismological Research, 41 (3): 438-445. (in Chinese with English abstract)
- WALCOTT R C, SUMMERFIELD M A, 2008. Scale dependence of hypsometric integrals: an analysis of southeast African basins [J]. Geomorphology, 96 (1-2): 174-186.
- WANG A, WANG G C, 2005. Review on morphotectonic and its analytical methods [J]. Geological Science and Technology Information, 24 (4): 7-12, 20. (in Chinese with English abstract)
- WANG H, LI J H, WU T W, 2018. Characteristics and genesis of Geoheritage resources of Taihang mountain [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 54 (3): 546-554. (in Chinese with English abstract)
- WEN L, WEI P F, LI X M, et al., 2020. Study on the river network, geomorphological features and tectonic activity in the Danjiangkou reservoir and its surrounding areas [J]. Journal of Geomechanics, 26 (2): 252-262. (in Chinese with English abstract)
- WU C, ZHANG X Q, MA Y H, 1999. The Taihang and Yan Mountains rose mainly in quarteranary [J]. North China Earthquake Sciences, 17 (3): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- WU C, 2001. Geomorphologic resources of tourism landscape in Taihang Mountain Area [J]. Geography and Territorial Research, 17 (4): 6-10. (in Chinese with English abstract)
- WU D Y, ZHANG T Q, CHENG L, et al., 2018. Neotectonic activation of the Urumqi River basin revealed by geomorphic indices [J]. Quaternary Sciences, 38 (1): 193-203. (in Chinese with English abstract)
- WU Q, 2012. Tectonic geomorphology and active tectonics in the center of the North China Block [D]. Qingdao: Ocean University of China. (in Chinese with English abstract)
- XU J, GAO Z W, SONG C Q, et al., 2000. The structural characters of the piedmont fault zone of Taihang Mountain [J]. Seismology and Geology, 22 (2): 111-122. (in Chinese with English abstract)
- XU Z P, JIANG L, YANG L P, et al., 2015. Structure characteristics of faults in the southeast segment of Taihang Mountain using Bouguer gravity data [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 35 (3): 503-507. (in Chinese with English abstract)

- ZHANG J C, LI C C, ZHANG M, et al., 2011. Geomorphologic analysis of the Golmud river drainage basin based on hypsometric integral value [J]. *Journal of Mountain Science*, 29 (3): 257-268. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J J, ZHU W B, ZHAO F, et al., 2018. Spatial variations of terrain and their impacts on landscape patterns in the transition zone from mountains to plains-A case study of Qihe River Basin in the Taihang Mountains [J]. *Science China Earth Sciences*, 61 (4): 450-461.
- ZHANG L, ZHANG X J, WU F D, et al., 2018. Characteristics of weathering crust and formation of planation surface in Wangmangling at the Southern edge of Taihang mountain [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 39 (5): 635-642. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG M, LI X P, 2014. Discussion on the main uplift period of the Southern segment of Taihang mountains [J]. *Territory & Natural Resources Study* (4): 55-57. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Q Q, ZHANG S H, 2019. Devonian magmatism in the Northern margin of the North China block and its tectonic setting [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (1): 125-138. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG T Q, WANG Z, ZHANG X M, et al., 2015. Hypsometric integral analysis of the Urumqi River drainage basin and its implications for topographic evolution [J]. *Quaternary Sciences*, 35 (1): 60-70. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y Q, MA Y S, YANG N, 2003. Neotectonic activity of the southern marginal fault zone of the Taihangshan Mountains and its regional kinematic implications [J]. *Seismology and Geology*, 25 (2): 169-182. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y Q, SHI W, DONG S W, 2019. Neotectonics of North China: interplay between far-field effect of India-Eurasia collision and Pacific subduction related deep-seated mantle upwelling [J]. *Acta Geologica Sinica*, 93 (5): 971-1001. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO G H, LI Y, YAN Z K, et al., 2014. Tectonic Geomorphology Analysis of piedmont rivers of the middle MT. Longmenshan based on Hack profile and hypsometric integral [J]. *Quaternary Sciences*, 34 (2): 302-311. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO G S, DU Y, LING F, et al., 2012. Analysis of influencing factors on height differences between ASTER GDEM and SRTM3 [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 37 (4): 167-170. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO H Z, LI Y L, YANG J C, et al., 2009. Geomorphology characteristic and tectonic response of the northern Tianshan represented by hypsometric integral [J]. *Journal of Mountain Science*, 27 (3): 285-292. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO H Z, LI Y L, YANG J C, et al., 2010a. Influence of area and space dependence for hypsometric integral and its geological implications [J]. *Geographical Research*, 29 (2): 271-282. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO H Z, LI Y L, YANG J C, 2010b. Implication of active structure along the northern Tianshan by stream length-gradient index and hack profile [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 46 (2): 237-244.
- ZHU J J, LIU J T, LIANG H Z, et al., 2019. Vertical gradients of water supply and demand in Taihang Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30 (2): 472-480. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 安慧婷, 许立青, 李三忠, 等, 2015. 太行山东麓断裂带中、新生代构造应力场及转换机制 [J]. *大地构造与成矿学*, 39 (4): 571-586.
- 曹现志, 李三忠, 刘鑫, 等, 2013. 太行山东麓断裂带板内构造地貌反转与机制 [J]. *地质学前沿*, 20 (4): 88-103.
- 曹现志, 许立青, 李三忠, 等, 2018. 华北地块中部新构造运动 [J]. *地质科学*, 53 (3): 835-859.
- 常直杨, 王建, 白世彪, 等, 2014. 基于 DEM 的白龙江流域构造活动定量分析 [J]. *第四纪研究*, 34 (2): 292-301.
- 程世秀, 李三忠, 许立青, 等, 2014. 太行山—秦岭中、新生代板内变形及交接转换机制 [J]. *地质论评*, 60 (6): 1245-1258.
- 程璐, 武登云, 靳文, 等, 2017. 基于地貌计量指标分析的钱塘江流域地貌演化特征 [J]. *第四纪研究*, 37 (2): 343-352.
- 樊克锋, 杨东潮, 2006. 论太行山地貌系统 [J]. *长春工程学院学报 (自然科学版)*, 7 (1): 51-53.
- 高亚峰, 焦慧元, 2007. 太行山崞石岩地貌与云台山地貌特征 [J]. *城市地质*, 2 (4): 44-48.
- 龚明权, 2010. 新生代太行山南段隆升过程研究 [D]. 北京: 中国地质科学院.
- 韩慕康, 朱世龙, 赵景珍, 等, 1983. 太行山东麓断裂带南段第四纪构造应力场的地貌表现 [J]. *地理学报*, 38 (4): 348-357.
- 何登发, 单帅强, 张煜颖, 等, 2018. 雄安新区的三维地质结构: 来自反射地震资料的约束 [J]. *中国科学: 地球科学*, 48 (9): 1207-1222.
- 胡小飞, 潘保田, KIRBY E, 等, 2010. 河道陡峭指数所反映的祁连山北翼抬升速率的东西差异 [J]. *科学通报*, 55 (23): 2329-2338.
- 胡小猛, 傅建利, 李有利, 2002. 汾河流域地貌发育对构造运动和气候变化的响应 [J]. *地理学报*, 27 (3): 310-318.
- 黄倩雯, 时毓, 覃康禾, 等, 2019. 秦岭岩群 (杂岩) 侵入体的年代学地球化学特征及其对古生代构造运动的启示 [J]. *地质与勘探*, 55 (5): 1185-1201.
- 吉亚鹏, 高红山, 潘保田, 等, 2011. 渭河上游流域河长坡降指标 SL 参数与 Hack 剖面的新构造意义 [J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 47 (4): 1-6.
- 李利波, 徐刚, 胡健民, 等, 2012. 基于 DEM 渭河上游流域的活动构造量化分析 [J]. *第四纪研究*, 32 (5): 866-879.
- 梁欧博, 任俊杰, 吕延武, 2018. 涪江流域河流地貌特征对虎牙断裂带活动性的响应 [J]. *地震地质*, 40 (1): 42-56.
- 刘静, 张金玉, 葛玉魁, 等, 2018. 构造地貌学: 构造-气候-地表过程相互作用的交叉研究 [J]. *科学通报*, 63 (30): 3070-3088.
- 刘亢, 曲国胜, 宁宝坤, 等, 2012. 坡度分析在昆明盆地断层分段中的应用 [J]. *防灾科技学院学报*, 14 (4): 1-7.
- 刘开明, 胥勤勉, 段连峰, 等, 2020. 雄安新区西部 GB014 孔第四纪地层结构与演化过程 [J]. *科学通报*, 65 (20): 2145-2160.
- 孟元库, 汪新文, 陈杰, 2015. 太行山新生代构造隆升的地质学证

- 据-来自沁水盆地沁参 1 井的磷灰石裂变径迹证据 [J]. 桂林理工大学学报, 35 (1): 15-28.
- 钱程, 韩建恩, 朱大岗, 等, 2012. 基于 ASTER-GDEM 数据的黄河河源地区构造地貌分析 [J]. 中国地质, 39 (5): 1247-1260.
- 史兴民, 杨景春, 李有利, 等, 2004. 天山北麓玛纳斯河河流阶地变形与新构造运动 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 40 (6): 971-978.
- 孙启凯, 何庆龙, 李腊月, 等, 2018. 华北北部地区地壳垂直形变演化特征及断裂活动性分析 [J]. 地震研究, 41 (3): 438-445.
- 王岸, 王国灿, 2005. 构造地貌及其分析方法述评 [J]. 地质科技情报, 24 (4): 7-12, 20.
- 王辉, 李江海, 吴桐雯, 2018. 太行山地质遗迹特征与成因分析 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 54 (3): 546-554.
- 文力, 魏鹏飞, 李学敏, 等, 2020. 丹江口水库库区及周边地区河网形态、地貌特征及构造活动性意义 [J]. 地质力学学报, 26 (2): 252-262.
- 吴忱, 张秀清, 马永红, 1999. 太行山、燕山主要隆起于第四纪 [J]. 华北地震科学, 17 (3): 1-7.
- 吴忱, 2001. 论太行山地区旅游风景地貌资源 [J]. 地理学与国土研究, 17 (4): 6-10.
- 武登云, 张天琪, 程璐, 等, 2018. 地貌形态指标揭示的北天山乌鲁木齐河流域新构造活动特征 [J]. 第四纪研究, 38 (1): 193-203.
- 吴奇, 2012. 华北地块中部构造地貌与活动构造特征 [D]. 青岛: 中国海洋大学.
- 徐杰, 高战武, 宋长青, 等, 2000. 太行山山前断裂带的构造特征 [J]. 地震地质, 22 (2): 111-122.
- 徐志萍, 姜磊, 杨利普, 等, 2015. 利用布格重力资料研究太行山东南缘断裂构造特征 [J]. 大地测量与地球动力学, 35 (3): 503-507.
- 张敬春, 李川川, 张梅, 等, 2011. 格尔木河流域面积-高程积分值的地貌学分析 [J]. 山地学报, 29 (3): 257-268.
- 张蕾, 张绪教, 武法东, 等, 2018. 太行山南缘王莽岭地区风化壳的地球化学特征与夷平面形成环境 [J]. 地球学报, 39 (5): 635-642.
- 张蒙, 李鹏霄, 2014. 太行山南段主要隆升时期探讨 [J]. 国土与自然资源研究 (4): 55-57.
- 张琪琪, 张拴宏, 2019. 华北地块北缘泥盆纪岩浆活动及其构造背景 [J]. 地质力学学报, 25 (1): 125-138.
- 张天琪, 王振, 张晓明, 等, 2015. 北天山乌鲁木齐河流域面积: 高程积分及其地貌意义 [J]. 第四纪研究, 35 (1): 60-70.
- 张岳桥, 马寅生, 杨农, 2003. 太行山南缘断裂带新构造活动及其区域运动学意义 [J]. 地震地质, 25 (2): 169-182.
- 张岳桥, 施炜, 董树文, 2019. 华北新构造: 印欧碰撞远场效应与太平洋俯冲地幔上涌之间的相互作用 [J]. 地质学报, 93 (5): 971-1001.
- 赵国华, 李勇, 颜照坤, 等, 2014. 龙门山中段山前河流 Hack 剖面面积: 高程积分的构造地貌研究 [J]. 第四纪研究, 34 (2): 302-311.
- 赵国松, 杜耘, 凌峰, 等, 2012. ASTER GDEM 与 SRTM3 高程差异影响因素分析 [J]. 测绘科学, 37 (4): 167-170.
- 赵洪壮, 李有利, 杨景春, 等, 2009. 天山北麓流域面积高度积分特征及其构造意义 [J]. 山地学报, 27 (3): 285-292.
- 赵洪壮, 李有利, 杨景春, 等, 2010a. 面积高度积分的面积依赖与空间分布特征 [J]. 地理研究, 29 (2): 271-282.
- 赵洪壮, 李有利, 杨景春, 2010b. 北天山流域河长坡降指标与 Hack 剖面的新构造意义 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 46 (2): 237-244.
- 朱建佳, 刘金铜, 梁红柱, 等, 2019. 太行山区水资源供需关系的垂直梯度特征 [J]. 应用生态学报, 30 (2): 472-480.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

