

# 基于DEM的灞河流域活动构造地貌参数研究

王迎国<sup>1,2,3,4</sup>, 徐艳<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

<sup>2</sup>陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

<sup>3</sup>自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

<sup>4</sup>陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

收稿日期: 2021年9月29日; 录用日期: 2021年10月28日; 发布日期: 2021年11月4日

## 摘要

本文基于高精度DEM数据, 提取灞河流域水系网络, 并提取可表征该区域地貌的相关参数, 灞河流域部分地貌参数(Hack剖面、区域地形起伏度、面积-高程积分)显示灞河流域可能整体处于构造活动壮年期中早阶段, 河流侵蚀较强, 地貌演化可能主要受强烈的北秦岭构造活动影响, 同时为灞河流域生态保护提供依据。

## 关键词

灞河流域, 构造地貌参数, 构造活动程度

# Research on Active Tectonic Geomorphologic Parameters of Bahe River Basin Based on DEM

Yingguo Wang<sup>1,2,3,4</sup>, Yan Xu<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Shaanxi Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

<sup>3</sup>Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, The Ministry of Natural Resources, Xi'an Shaanxi

<sup>4</sup>Shaanxi Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi

Received: Sep. 29<sup>th</sup>, 2021; accepted: Oct. 28<sup>th</sup>, 2021; published: Nov. 4<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Based on high-precision DEM data, this paper extracts the Bahe River Basin water system network and extracts the relevant geomorphological parameters that can characterize the geomorphology of the region. Some geomorphic parameters of the Bahe River Basin (regional topographic undulation, hypsometric integral and Hack profile) indicate that the Bahe River Basin as a whole may be in the middle and early stages of the strong tectonic activity, with strong river erosion, and the geomorphological evolution may be mainly influenced by the strong North Qinling tectonic activity while providing a basis for ecological protection of the Bahe River basin.

## Keywords

Bahe River Basin, Tectonic-Geomorphic Parameters, Degree of Tectonic Activity

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

新生代以来, 青藏高原发生多期隆升, 其本身及其远场效应对亚洲地貌和环境产生巨大的影响, 这种阶段性的构造隆升导致了我国东西向地形的倒转以及现代黄河、长江等大型水系的形成与发育[1] [2], 并进一步影响大气环流格局, 诱发并加强了东亚季风环流[3] [4], 甚至对全球气候变化产生深远影响[5]。青藏高原隆升造成的区域地貌形态改变和气候变化也同时影响着高原东北部的黄土高原及其周边水系与河谷地貌发育, 并很好地记录保存下来[6], 因此高原周边河流地貌是推测青藏高原构造运动远程效应造成区域构造地貌形态改变和气候演变的重要依据。

地貌参数是对地貌单元各阶段特征的描述, 会受构造运动、气候变化及岩性特征等因素影响, 且不同的特征定量参数对不同地貌有不同的解释, 因此单一地貌参数在描述流域地貌形态变化时可能存在偏差, 需要多个地貌参数综合分析结果。流域地貌研究经历了从对陆地表面自然地貌单元简单定性描述到定量研究的发展阶段。从 Davis 提出侵蚀轮回说后, 流域地貌研究逐渐发展[7]。到近年来借助高分辨率的卫星影像和数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)进行构造地貌量化研究, 流域地貌研究得到突飞猛进地发展。常见的流域地貌参数包括基本地形参数(如坡度、曲率、地形起伏度等)和指示流域地貌演化阶段的参数(如 Hack 剖面、面积 - 高程积分、流域盆地不对称度等)及河道形态参数(如河长坡降指数、标准化河道陡峭指数等), 这些指标有助于揭示区域构造相对活动性, 再运用综合分级方法可以进一步评估区域构造活动强弱[8] [9], 通过 DEM 数据所提取的构造地貌参数反映构造活动强度的信息是可行的, 有助于进一步揭示流域地貌对构造活动及第四纪冰期 - 间冰期气候转变等的响应, 可利用流域地貌参数指示区域地貌的演化规律, 同时可对地区生态可持续发展等做出重要贡献。

本文以黄土高原东南缘的灞河流域为研究对象, 利用 DEM 数据, 提取流域构造地貌参数特征, 利用部分地貌参数尝试进行灞河流域地貌形成的主控因素分析, 包括反映流域盆地定量研究的区域地形起伏度和面积 - 高程积分(HI)及反映河道特征的 Hack 剖面等, 量化地分析研究区的构造地貌特征, 可望从流域地貌的角度反映黄土高原乃至青藏高原区域地貌特征及演化规律。

## 2. 研究区概况

灞河作为渭河南岸最大的一级支流, 发源于北秦岭的蓝田县灞源镇, 于西安市未央、灞桥区之间汇入渭河, 全长约 109 km, 全流域位于西安市东南部, 面积约 2581 km<sup>2</sup>, 处东经 109°00′~109°47′, 北纬 33°50′~34°27′之间(图 1)。研究区内分布有太古界黑云母片麻岩、混合岩等北秦岭最古老的结晶基底, 而流域内山体抬升所出露的地层主要为太古代结晶基底、前寒武变质岩和中-古生代花岗岩类及沉积层[10]。渭河盆地内最老的新生界地层沉积一般堆积在骊山、秦岭山前地带。盆地内整体缺失古新统地层, 研究区内发育有较为连续完整的新近纪地层沉积。研究区内的新生代河湖相沉积地层从老到新依次为古近系地层(始新统红河组、渐新统白鹿原组), 新近系地层(中新统冷水沟组、寇家村组、灞河组、晚中新统-上新统沔河组)和第四系地层(下更新统三门组、中更新统泄湖组、上更新统乾县组以及全新统地层)[11][12], 第四纪风成黄土-古土壤序列。以上地层在灞河流域以骊山为中心, 向蓝田地区呈扇状分布, 并有五级不对称阶地分布。研究区主要涉及渭河断陷盆地内的骊山凸起与西安凹陷两个二级构造单元, 大部位于骊山凸起构造单元上是渭河盆地东南缘断裂活动非常强烈的地区, 断裂构造纵横交错, 主要活动断裂有骊山山前断裂、长安-临潼断裂、华山山前断裂、秦岭北缘断裂等。这些断层主要表现为 EW 走向断裂系、NE 走向断裂系、NW 走向断裂系, 均表现为正断层性质[13]。

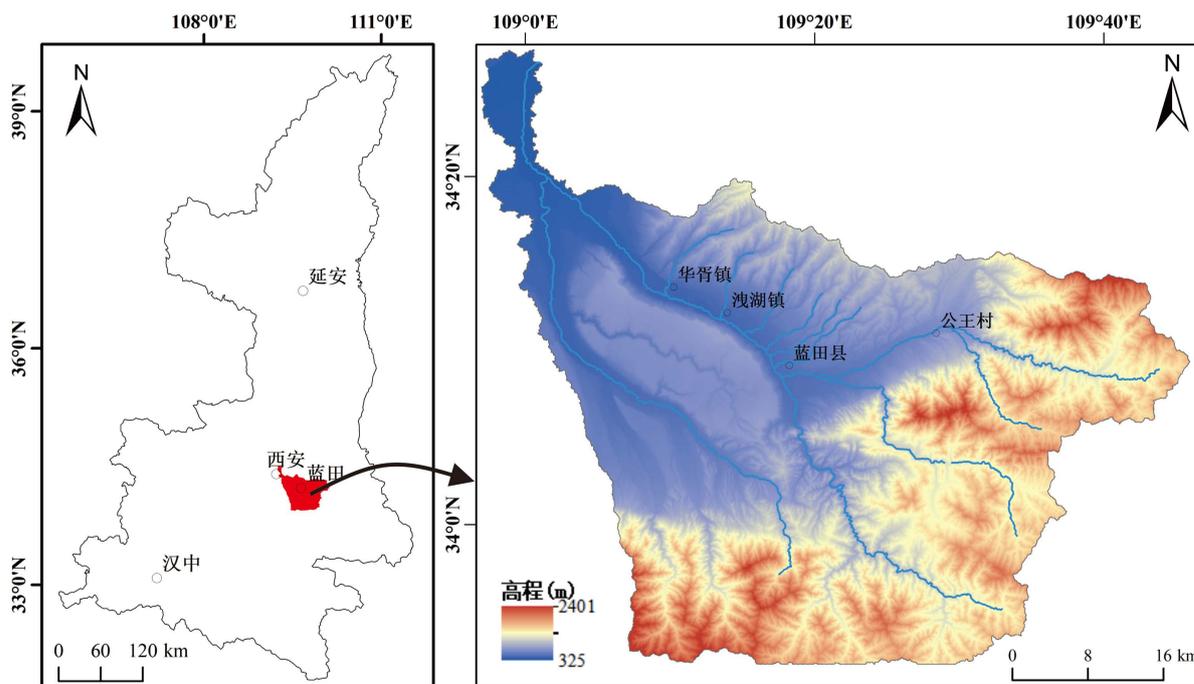


Figure 1. Geomorphology of the Bahe River Basin

图 1. 灞河流域地貌图

## 3. 数据分析

本研究采用地形精确度较高的“ALOS W3d30” (Advanced Land Observing Satellite World 3D Digital Surface Model version 2.1)数据[14], 水平分辨率为 30 m, 数据来源于 <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm>。

在流域地貌分析前, 首先需利用 DEM 提取灞河流域水系分布图。通过对 DEM 数据进行填洼、计算流向、流量、水流长度, 之后利用栅格计算器提取流量>10,000 的栅格点, 再通过栅格河网矢量化将

栅格点串联作为灞河流域河流[15]。之后将水系矢量图层导出到 Google Earth 软件中, 进行水系对比, 流域内主要河流二者对应较好, 说明水系提取较好, 最终得灞河流域水系分布(图 2), 可开展下一步工作。之后本文尝试利用部分地貌参数进行灞河流域地貌, 包括反映流域盆地定量研究的区域地形起伏度和面积 - 高程积分(HI)及反映河道特征的 Hack 剖面等, 以期量化地分析研究区的构造地貌特征及其发育阶段。

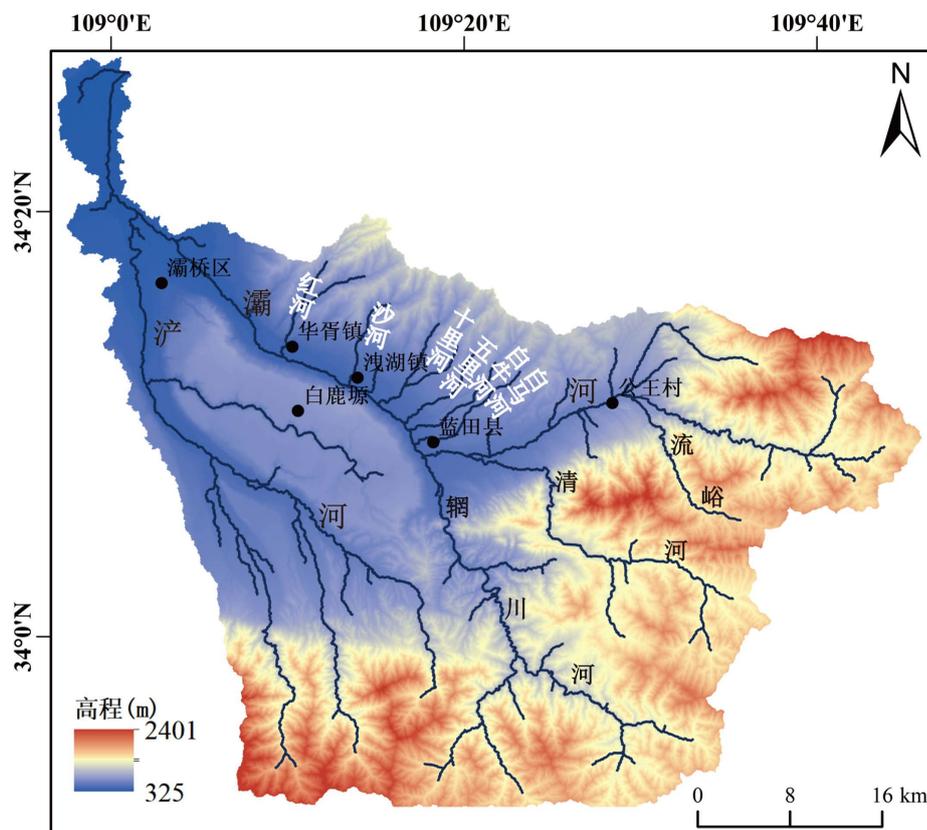


Figure 2. Distribution of water system in the Bahe River Basin  
图 2. 灞河流域水系分布图

### 3.1. 区域地形起伏度分析

区域地形起伏度是指在特定区域范围内最低点的高程值与最高点的高程值之间的差值[16], 见公式 1, 可以用来反映区域内地形的切割剥蚀程度, 深刻表征构造活动强度在不同区域的差异性。公式如下[16]:

$$RF_i = H_{\max} - H_{\min} \quad (1)$$

$RF_i$ 为地形起伏度,  $H_{\max}$ 、 $H_{\min}$ 分别为分析窗口内最大、最小高程值。

最佳分析窗口获取是确定地形起伏度的关键。本研究基于窗口递增法来计算灞河流域地形起伏度, 应用邻域分析工具分析灞河流域 DEM 数据, 地形起伏度随分析窗口面积增大而增大, 而增加由快变缓的拐点处对应的即为最佳分析窗口, 最终以  $18 \times 18$  像元大小作为最佳分析窗口, 得到灞河流域地形起伏度(图 3)。

灞河中游地形起伏最小的地带为河漫滩及河流阶地分布的区域, 越向北靠近骊山地形起伏度逐渐增

加显示灞河中游北部骊山构造运动相对较为活跃。另外值得注意的是灞河上游即越靠近北秦岭地区, 地形起伏度越大, 且越靠近断层地形起伏度越大, 说明灞河流域上游地区构造运动相比中游地区更为活跃, 这可能导致灞河上游地区河流阶地形成后受构造活动影响大而不易保存的原因所在。

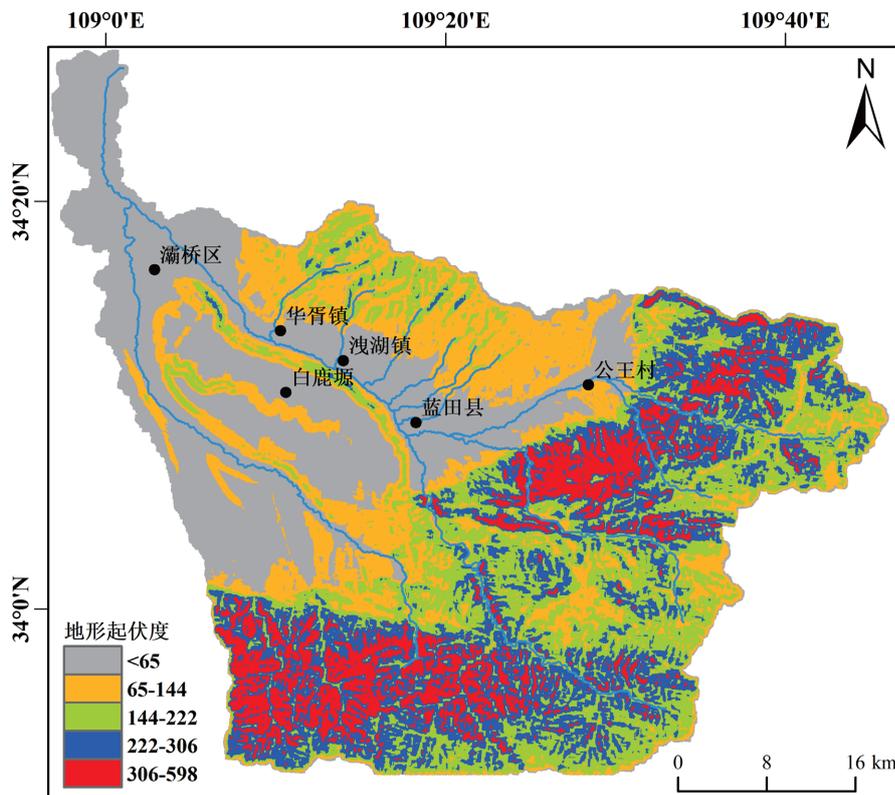


Figure 3. Topographic relief map of the Bahe River Basin  
图 3. 灞河流域区域地形起伏图

### 3.2. 面积 - 高程积分(HI)分析

面积 - 高程积分是 Strahler (1952)提出以汇水盆地的相对高度比( $h/H$ )为纵轴, 相对面积比( $a/A$ )为横轴, 绘制出曲线与横纵坐标轴之间的闭合区间即为面积 - 高程积分(Hypsometric Intergral, HI) [17]。面积 - 高程积分(HI)对构造活动变化信息十分敏感, 因此是判断流域盆地构造活动的重要地貌指标, 同时是侵蚀循环周期的一种指示。侵蚀周期可分为 3 个阶段, 当地貌演化阶段处于侵蚀程度低的幼年期时( $HI > 0.60$ ), 面积 - 高程积分曲线呈现为凸形; 当地貌演化阶段处于侵蚀程度高的老年期时( $HI < 0.35$ ), 面积 - 高程积分曲线则呈现凹形; 壮年期( $0.35 < HI < 0.60$ )的面积 - 高程积分曲线则呈现为 S 形。

利用水文分析单元中的分水岭工具, 将灞河流域划分为若干个亚流域盆地, 亚流域盆地的级别和盆内最高级水系的级别相同。由于小于  $1 \text{ km}^2$  的亚流域 HI 值可能反映区域构造活动和岩性的共同影响, 因此剔除小于  $1 \text{ km}^2$  的亚流域, 使 HI 值只反映区域构造活动信息。灞河中游蓝田县城 - 华胥镇一带主要为第四纪沉积物覆盖, 中游北部靠近骊山附近处于壮年期, 河道及各支流出口处为老年期, 靠近白鹿塬一侧为幼年期(图 4), 说明白鹿塬一侧遭受强烈的侵蚀作用, 这种“壮 - 老 - 幼”的结构, 可能说明北部骊山处于较强烈的掀斜式构造活动时期使得白鹿塬一侧不断遭受侵蚀, 构造活动仍较为强烈。

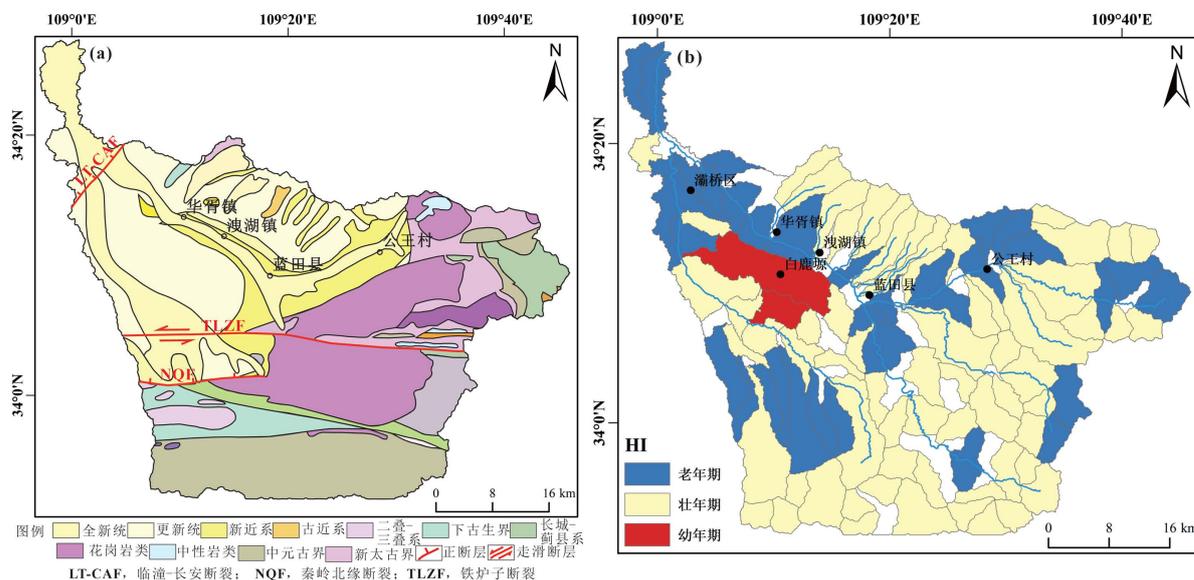


Figure 4. (a) Geological map and (b) the Hypsometric Intergral (HI) of the Bahe River Basin

图 4. 灞河流域地质简图(a)及面积 - 高程积分图(HI) (b)

### 3.3. Hack 剖面分析

河流纵剖面形态反映了区域地势高低、岩性及构造抬升速率的快慢[18]。河流纵剖面通常为沿着河流主干线从源头到河口将河床最低点高程相连的剖面。而 Hack (1973) 提出一个半对数方程来描述流域抗侵蚀能力的河流纵剖面(河流 Hack 剖面) [19], 见公式 2。Hack 剖面是将河流原始纵剖面中距离河堀长度取对数的绘制结果, 其形态可认为是河道整体响应构造运动而进行调整后的结果[20]。Hack 剖面呈“直线型”说明河流发育已处于均衡状态, 这是构造地貌发育的最终必然结果, 此时的  $k$  值可代表流域均衡坡降指数; 而河流一般会流经抗侵蚀能力不同的岩性区同时可能伴有不同的构造活动, 而最终使 Hack 剖面呈现为上凸、下凹等曲线形态, “曲线型” Hack 剖面则说明河流发育处于非均衡态, 凹凸程度的不同则代表区域构造活动的强弱不同。所以本文采用 Hack 剖面来表征河流坡降的局部特征, 进而反映区域构造活动性。公式如下[19]:

$$H = c - k * \log L \quad (2)$$

其中  $H$  为河流纵剖面高度,  $c$  为常数, 斜率  $k$  为河流坡降指数,  $L$  即出水口距河源的距离。

本次研究 Hack 剖面主要利用栅格转点工具、多值到点工具, 再将河流点矢量图层导出到 Excel。之后以 10 m 为插值间隔进行线性插值, 最后以距河源距离的对数值为横坐标, 高程为纵坐标绘制得到条河流的 Hack 剖面(图 5)。灞河及其中上游各支流的 Hack 剖面呈现出较明显的凸起形态, 推测河流可能处于幼年期, 河流受构造活动影响较大, 反映了灞河流域整体受北秦岭构造活动强烈, 另外泾河只有少部分上游河段位于秦岭内部, 因此整体凸起段较短, 相对受构造活动较弱。而越靠近下游, 灞河各支流越趋近于呈“直线型”, 但还是有部分河段呈凸起态, 说明下游河流虽趋于均衡态, 相比中上游地区构造运动强度逐渐减弱, 但一定程度上仍受构造运动的影响。

## 4. 结论

本文通过分析 30 米分辨率 DEM 数据, 在提取灞河流域水系及区域地形起伏度、河段 Hack 剖面、面积 - 高程积分(HI)的过程中进行了详细分析研究, 探讨了水系与构造运动之间的关系及灞河流域水系

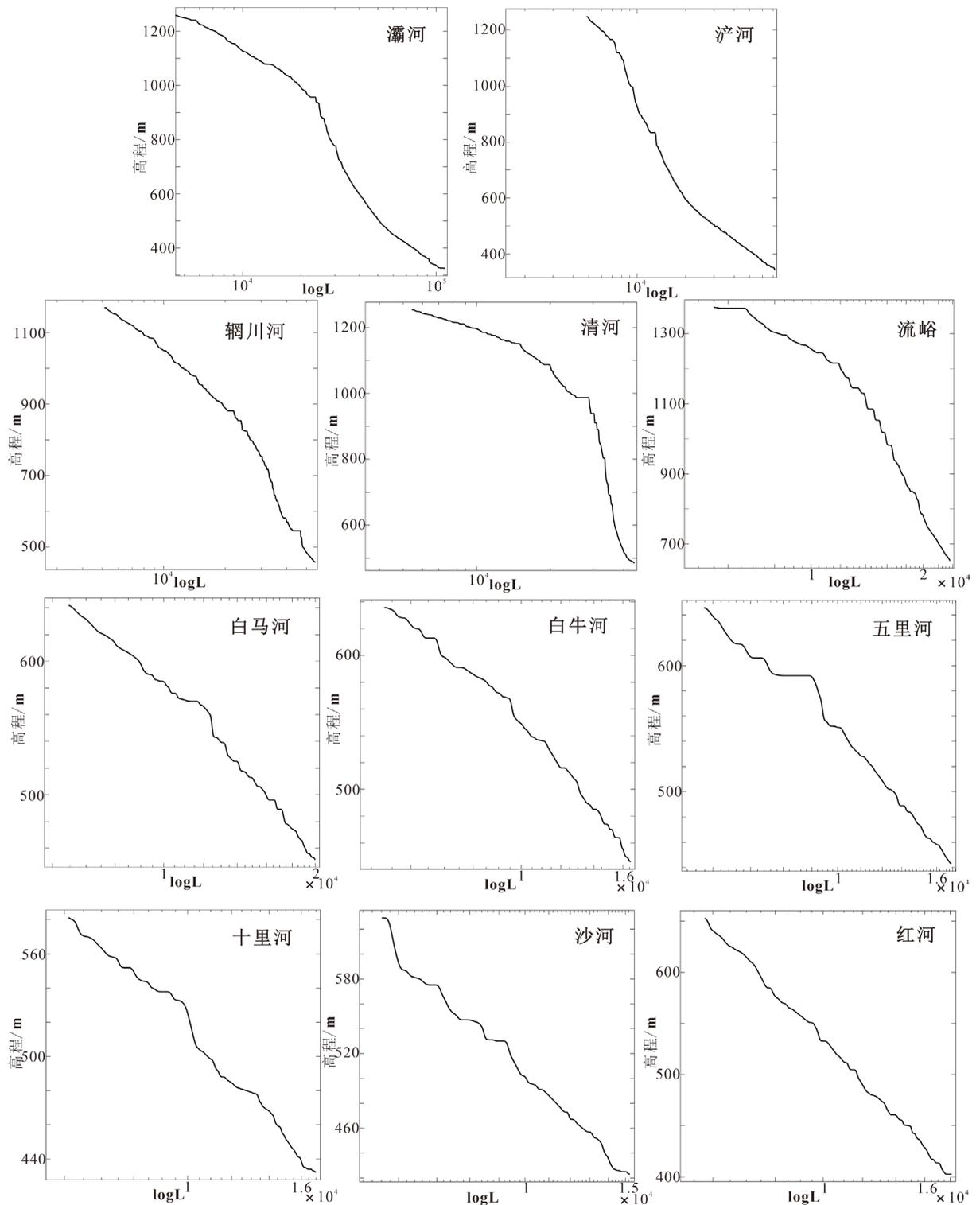


Figure 5. Morphology of Hack profiles of different rivers in the Bahe River Basin

图 5. 灞河流域不同河流 Hack 剖面形态

发育的不对称性特征。研究表明可以初步认为灞河流域地貌可能整体受强烈的构造运动影响，处于构造活动壮年期的中早阶段，河流侵蚀能力较强，其地貌可能主要受构造运动影响，尤其是灞河中游主要受

骊山山前断裂滑移引起掀斜抬升, 不断侵蚀灞河左岸白鹿塬一侧, 而灞河中游右岸地貌相对保存较好, 因此形成灞河中游两岸阶地分布不对称。同时灞河上游地区明显还受强烈的北秦岭构造抬升的影响, 这可能是导致灞河上游阶地遭受破坏严重而较少保存的原因, 这进一步揭示了灞河流域新生代以来的地貌特征与新构造运动的响应关系, 构造活动是灞河流域地貌演化的主控因素, 这为灞河流域构造地貌演化提供了新的研究资料, 并为灞河流域后续的环境保护、生态恢复与水土保持提供进一步的参考依据。

## 基金项目

陕西省土地工程建设集团内部科研项目(DJNY2020-14), 陕西省土地工程建设集团内部科研项目(DJNY2021-26)。

## 参考文献

- [1] Li, J.J. (1991) The Environmental Effects of the Uplift of the Qinghai-Xizang Plateau. *Quaternary Science Reviews*, **10**, 479-483. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(91\)90041-R](https://doi.org/10.1016/0277-3791(91)90041-R)
- [2] Zheng, H., Clift, P.D., Wang, P., et al. (2013) Pre-Miocene Birth of the Yangtze River. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **110**, 7556-7561. <https://doi.org/10.1073/pnas.1216241110>
- [3] Guo, Z.T., Ruddiman, W.F., Hao, Q.Z., et al. (2002) Onset of Asian Desertification by 22 MYR Ago Inferred from Loess Deposits in China. *Nature*, **416**, 159-163. <https://doi.org/10.1038/416159a>
- [4] 施雅风. 第四纪中期青藏高原冰冻圈的演化及其与全球变化的联系[J]. 冰川冻土, 1998, 20(3): 3-5.
- [5] An, Z.S., Wu, G.X., Li, J.P., et al. (2015) Global Monsoon Dynamics and Climate Change. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **43**, 29-77. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054623>
- [6] An, Z.S., Kutzbach, J.E., Prell, W.L., et al. (2001) Evolution of Asian Monsoons and Phased Uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene Times. *Nature*, **411**, 62-66. <https://doi.org/10.1038/35075035>
- [7] Davis, W.M. (1889) The Rivers and Valleys of Pennsylvania. *National Geographical Magazine*, **1**, 183-253.
- [8] Whipple, K.X., DiBiase, R.A., et al. (2017) Preservation or Piracy: Diagnosing Low-Relief, High-Elevation Surface Formation Mechanisms. *Geology*, **45**, 91-94. <https://doi.org/10.1130/G38490.1>
- [9] Kirby, E. and Ouimet, W. (2011) Tectonic Geomorphology along the Eastern Margin of Tibet: Insights into the Pattern and Processes of Active Deformation Adjacent to the Sichuan Basin. *Geological Society, London, Special Publications*, **353**, 165-188. <https://doi.org/10.1144/SP353.9>
- [10] 彭建兵. 渭河断裂带的构造演化与地震活动[J]. 地震地质, 1992, 14(2): 113-120.
- [11] 李智超. 渭河盆地新生代岩相古地理及环境演化[D]: [博士学位论文]. 西安: 西北大学, 2017.
- [12] 王斌, 郑洪波, 王平, 等. 渭河盆地新生代地层与沉积演化研究: 现状和问题[J]. 地球科学进展, 2013, 28(10): 1126-1135.
- [13] 杜建军, 马寅生, 黎敦朋. 渭河盆地东南缘主要断裂晚更新世以来的活动性及灾害效应[J]. 地球学报, 2017, 38(S1): 55-58.
- [14] Apeh, O.I., Uzodinma, V.N., Ebinne, E.S., et al. (2019) Accuracy Assessment of Alos W3d30, Aster Gdem and Srtm30 Dem: A Case Study of Nigeria, West Africa. *Journal of Geographic Information System*, **11**, 111-123. <https://doi.org/10.4236/jgis.2019.112009>
- [15] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1-579.
- [16] 涂汉明, 刘振东. 中国地势起伏度研究[J]. 测绘学报, 1991, 4(8): 311-319.
- [17] Strahler, A.N. (1952) Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography. *Geological Society of America Bulletin*, **63**, 1117-1142. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)
- [18] 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.
- [19] Hack, J.T. (1973) Stream-Profile Analysis and Stream-Gradient Index. *Journal of Research of the Us Geological Survey*, **1**, 421-429.
- [20] 毕丽思. 基于 DEM 的活动构造地貌参数研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2011.