

文章编号: 1008 - 2786 - (2018)3 - 372 - 10

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000333

内蒙古“十大孔兑”流域主河道纵剖面发育动力特征

顾珍逵^{1, 2}, 师长兴¹, 刘晓菲^{1, 2}, 李慧娟¹

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100101)

摘 要: 地貌发育动力特征是探索流域产沙机制的基础。位于鄂尔多斯台地北缘和河套盆地之间的“十大孔兑”是黄河内蒙古段的十条重要支流(孔兑, 季节性洪水沟, 蒙古语)。流域内存在严重的风-水两相侵蚀作用, 产沙量大, 对入汇段黄河的输水输沙过程产生重要影响。本文以 DEM 数据为依据, 采用数学函数形态拟合、河长坡降指数分析以及 Hack 剖面分析的方法, 并结合区域地质和气候特征方面的数据, 对流域主河道纵剖面的形成和演化特征进行了分析。结果显示: 除了壕庆河之外, 孔兑各流域主河道纵剖面目前均表现为指数函数拟合形态, 处于侵蚀演变的早期阶段; 纵剖面指数函数的拟合度自西向东呈下降趋势, 而对数函数拟合度则呈现上升趋势, 说明其发育程度在该方向上趋于增高, 产沙量随之减小; 孔兑各流域构造活动性普遍较弱, 并存在自西向东降低的趋势; 纵剖面平均高程与莫霍面平均深度, 河长坡降指数平均值(SL)与纵剖面指数函数拟合系数关系均很密切, 表明纵剖面特征的基本格局受内营力特征影响; Hack 剖面特征表明各流域均处于隆升状态, 其中西部孔兑流域高于东部; 从纵剖面演化的时空模式上讲, 孔兑流域东部和西部的差异性隆升大致出现在上新世前后, 西部孔兑流域海拔增长较快, 使得纵剖面因受侵蚀而降低的高程得以弥补, 而东部流域纵剖面由于隆升速度慢, 外营力的作用效应相对凸显, 纵剖面下凹较甚, 演进程度相对较高。

关键词: 十大孔兑; 纵剖面; 函数形态拟合; 河长坡降指数; Hack 剖面

中图分类号: P942

文献标志码: A

河流活动是地球表面最为活跃的外营力因素, 不仅承载着地表侵蚀、搬运和沉积的功能, 而且记录了丰富的因素信息^[1, 2, 3, 4]。由于河流活动是通过河道完成对物质和能量输送的, 而在此过程中河道纵剖面会因构造活动和气候变化而导致的物质流和能量流的变化产生适应性调节, 局部的坡度以及整个河道的形态都会发生变化。可以认为河道纵剖面能够综合地反映出流域地貌演化的特点, 是构造、气候以及岩石抗蚀性三者的函数。对于河道纵剖面的研究历来是地貌学研究的重要方面。在河道纵剖面的研究方法上, 除了借助比降、凹度值^[5]和河长坡

降指数^[3, 6]等指标之外, 利用数学模型分析河流纵剖面形态也是一个重要方法^[7, 8, 9], 其中直接利用数学函数拟合可以简单地描述纵剖面的形态和河流的发育特征^[10], 目前仍然在一定程度上得到应用^[2, 11], 但该方法对于纵剖面与发育动力之间关系的解释程度往往不够。20 世纪 80 年代以后, 随着各种定量模型的提出和完善^[12, 13], 一方面对于纵剖面形态演变动力机制的认识变得进一步清晰, 另一方面又使得利用模型特征解释地貌演变过程以及动力特征等问题变得更为方便^[14]。

位于黄河内蒙古段南岸的十大孔兑流域风-水

收稿日期(Received date): 2017-06-30; 改回日期(Accepted date): 2017-10-27

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金面上项目(41671004; 41371036)。[National Natural Science Foundation of China (41671004; 41371036)]

作者简介(Biography): 顾珍逵(1987-), 男, 博士生, 研究方向为河流地貌与第四纪沉积。[GU Zhenkui (1987-), male, Ph. D. candidate, mainly research on geomorphology and quaternary deposits.] E-mail: bygzk853@126.com

* 通讯作者(Corresponding author): 师长兴(1963-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为河流地貌与泥沙输移。[SHI Changxing (1963-), male, Ph. D., professor, mainly engaged in researches on fluvial geomorphology and erosion and sediment delivery processes.] E-mail: shicx@igsrr.ac.cn

两相侵蚀作用强烈,具有洪水易发、产沙量大的特点,对黄河的输水输沙过程造成巨大影响,其产沙机制^[15, 16]、输沙量^[17]和风-水两相作用特点^[18, 19]等问题历来受到关注,但对区域地貌特点与地貌演化的内外动力关系等问题缺少分析。实际上地貌特征之中往往同时蕴含着内外营力两种作用的特点,是分析地表产沙等问题的基础,因此本文主要借助一些目前应用较为成熟的地貌分析指标和方法,并结合岩性分布以及气候特征等方面的特征信息,针对各孔兑流域主河道纵剖面进行地貌动力作用以及演化特点方面的问题进行分析,分析结果将有助于进一步认识区域地貌发育规律。

1 研究区概况

“十大孔兑”是黄河内蒙古段南岸的十条重要支流(图1),由南向北穿过中游段的库布齐沙漠后直接汇入黄河,具有洪水多发、产沙量大的特点。自西向东分别为毛不拉孔兑、卜尔色太沟、黑赖沟、西柳沟、罕台川、壕庆河、哈什拉川、母花沟、东柳沟和

呼斯太河(MBL, BES, HLG, XLG, HTC, HQH, HSL, MHG, DLG和XLG)。流域在气候上属于温带大陆性季风气候,生物气候为干旱草原地带,西部过渡为半荒漠地带^[15]。其中西部年均降水量大概为250 mm,东部逐渐增加至350 mm附近,每年7—8月降水量占全年降水量的50%~60%,主要以暴雨形式出现,其中西柳沟和罕台川上游南侧的东胜隆起带为骤发性暴雨中心和大风中心,大风天气主要出现在每年3—5月,易致沙尘暴^[17]。流域具有风-水两相侵蚀作用特点。就区域地质概况来讲,流域主要分布在两个构造单元上,其中下游为冲积平原,处于河套盆地内,为一新生代断陷盆地,上游区域位于鄂尔多斯台地北缘断裂以南,为沟壑区,位于伊盟隆起区的东北部位,中生代以来经历过多期构造隆升,是伊盟隆起区隆起时间较早、较强的部位^[20],在地质历史时期长期为陆相环境控制^[21],海拔最高处在1600 m左右,覆盖岩层主要为中生代灰绿色或紫红色河湖相碎屑岩,岩性结构松散,抗蚀性差,又被称为砒砂岩,表面覆盖薄层风沙残积土,下游区基本为第四纪沉积物所覆盖。

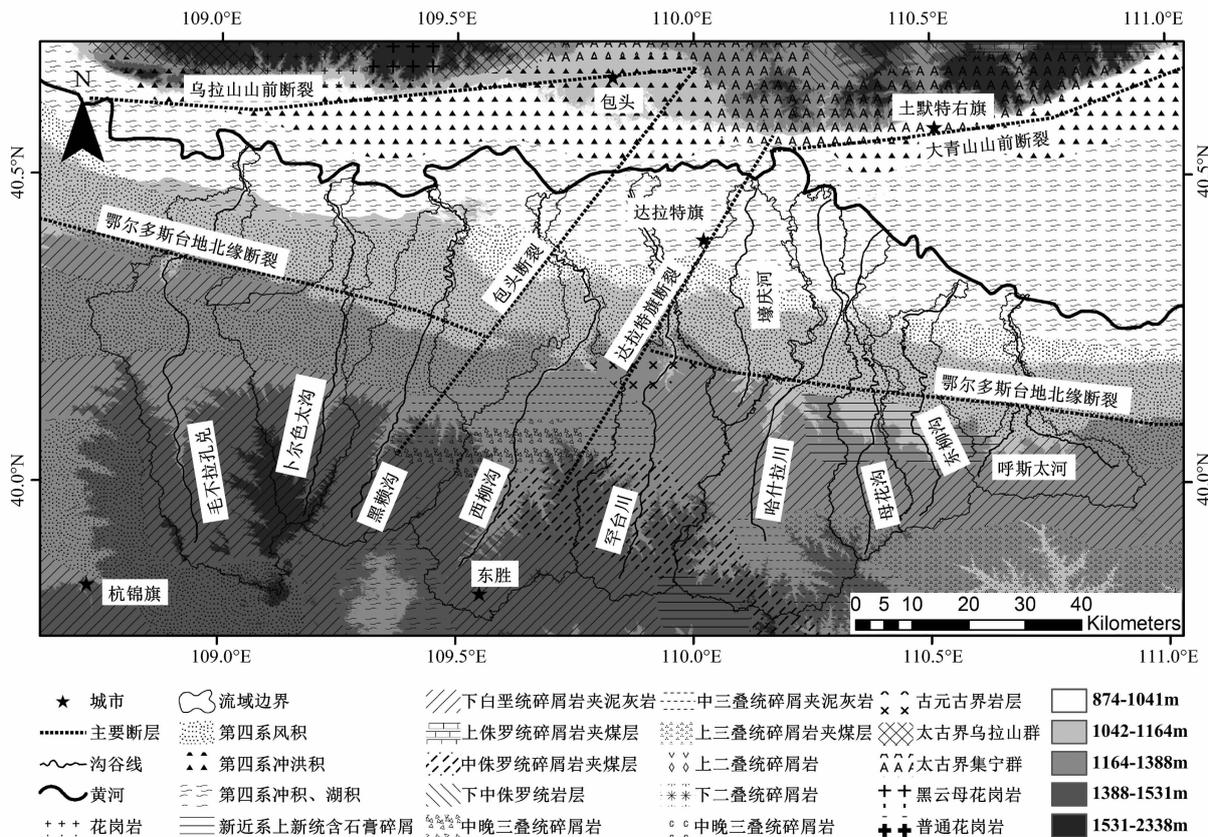


图1 研究区地质地貌概况(断层数据来源于文献^[22];岩性数据来源于文献^[23])

Fig.1 Geology and geomorphology of the study area (The data of faults and stratigraphy come from Teng et al. (2010) and Ma (2007))

2 数据和方法

2.1 河道纵剖面拟合函数特征

影响河流纵剖面形态特征的因素主要包括流量、输沙量、河道沉积物粒度、基岩抗蚀性以及构造活动等^[8, 11], 概括地讲, 河流纵剖面形态是气候变化、构造活动以及岩性特征的函数。因此, 通过分析河流纵剖面形态可以了解河道沉积物、构造运动以及河流的演化等情况^[10, 24]。目前, 通过简单函数对纵剖面形态进行拟合是了解纵剖面演化阶段的常用方法^[10, 11]。一般认为在气候变化以及构造活动不甚剧烈的条件下, 河道纵剖面的下凹程度与形态变化能够反映河道的演化过程, 其先后顺序依次为线性剖面、指数剖面、对数剖面以及乘幂剖面。侵蚀发育初期由于纵剖面的下凹程度较小, 接近于直线形态, 随着上游的侵蚀作用和下游的堆积, 河流纵剖面的下凹程度增加, 会演化为指数剖面, 此时由于上游坡度增加会导致侵蚀加剧, 同时下游由于坡度降低形成更多堆积, 当其侵蚀与堆积达到平衡状态时形成均衡夷平剖面, 即对数剖面, 随后若降雨量增加或构造活动导致河床组成物质松散而抗蚀力降低时, 河流的输沙能力将增加, 就会使得河流纵剖面的下凹程度继续增加, 形成乘幂剖面^[2, 25]。这一演变过程大体上代表了纵剖面侵蚀演变的四个阶段, 通过函数拟合可以了解孔兑流域纵剖面的侵蚀发育状态。文中主要采用美国地质调查局最新公布的 30 m 空间分辨率 SRTM 1"DEM 数据进行分析 (https://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM1/), 垂直误差 5 m 左右。分析过程中在 ArcGIS 软件平台进行流域划分和河道提取后, 利用 Interpolate line 工具直接提取纵剖面高程数据后进行函数形态拟合。

2.2 河长坡降指数

河长坡降指数是关于河流侵蚀和沉积过程的参数指标, 是研究河流剖面的构造影响、分析河流平衡状态的地貌量化方法^[8]。由于该指标对纵剖面坡度变化敏感, 其数值偏高的河段构造活动特征一般较强或其岩性具有较高的抗侵蚀能力, 反之则偏低^[3, 26]。定义公式为:

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

式中, ΔL 为某一河段长度, ΔH 为该河段的最高程差, L 为分水岭到该河段中点的河流长度。在构造活动比较一致的区域该指标可以用来分析岩石的抗

蚀性, 在岩性特征较为相似的区域则可用来反映构造活动的强弱^[27], 河流在经过活动上升区时 SL 值会升高, 而在走滑断层区略低^[28]。用来反映构造活动时 SL 值一般被分为 3 个等级^[29], 即 500 时构造活动较强, $300 \leq SL \leq 500$ 时构造活动适中, $SL \leq 300$ 时构造活动较弱。计算过程中以从 DEM 数据中直接提取纵剖面数据为基础并进行等间隔重采样, 将 ΔL 设为 10 km 固定值, 通过 Matlab 7.0 脚本程序进行滑动计算。

2.3 Hack 剖面

Hack 剖面是一种简化的河流纵剖面, 在岩性条件较为一致的情况下可以指示较大空间尺度的构造运动。其形态如为直线表示纵剖面处于均衡状态, 自然界中一般表现为上凸或下凹, 形态越凸表示构造抬升速度越快^[30, 31]。与 SL 参数主要反映局部特征不同的是 Hack 主要反映河流纵剖面整体变化, 计算公式为:

$$H = c - k \times \log L$$

式中, H 为河流纵剖面的高度, c 为常数, k 为斜率即参数 SL , L 为河段中点到源头的距离^[8]。为了定量比较 Hack 剖面的凹凸程度, 将 Hack 剖面以下的面积与以河口至河源连线为对角线的矩形面积的比值作为凸度值, 在岩性条件一致时, 凸度值为 0.5 代表纵剖面处于均衡状态, 凸度值越大构造隆升速率越快。

3 结果与讨论

3.1 河道纵剖面拟合函数特征分析

根据河道纵剖面函数形态拟合结果 (表 1), 除壕庆河是对数函数形态之外, 绝大多数流域的主河道纵剖面最佳拟合函数形态均为指数函数, 可以说绝大多数河道纵剖面处于各自发育过程中的较早时期, 未达到侵蚀-沉积平衡特征的形态。从其演变规律上看, 各纵剖面侵蚀严重区域主要集中在上游河段, 而下游河段将会接受更多沉积。另外, 由于指数函数拟合系数自西向东大体呈现下降趋势 (图 2a), 拟合形态逐渐向对数形态靠近 (图 2b)。可见, 在研究区, 纵剖面指数函数拟合系数从大到小的变化反映了纵剖面发育程度的变化。而且通过对比各孔兑拟合系数与产沙模数关系, 发现产沙模数会随指数函数拟合系数下降而降低 (图 2c), 即纵剖面发育程度较高时输沙量会减小。

表1 河道纵剖面的四种拟合函数拟合度统计表

Tab.1 The determination coefficients of mathematical functions fitting stream profiles

纵剖面	长度 /km	高差 /m	线性函数			指数函数			对数函数			乘幂函数		
			$y = a + bx$			$y = ae^{bx}$			$y = a \log x + b$			$y = ax^b$		
			a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
MBL	87	463	1528.5	-5.1787	0.9986	1548.0	-0.004	0.9989 *	-133.0	1747.7	0.7651	1827.3	-0.102	0.7328
BES	66	534	1548.7	-8.2316	0.9855	1573.0	-0.007	0.9894 *	-157.7	1766.6	0.7826	1854.9	-0.124	0.7486
HLG	81	417	1454.9	-6.0612	0.9852	1471.6	-0.005	0.9634 *	-135.5	1662.1	0.9852	1737.0	-0.111	0.7402
XLG	90	381	1412.8	-4.6523	0.9694	1426.9	-0.004	0.9742 *	-120.5	1613.9	0.9694	1681.2	-0.100	0.7392
HTC	82	419	1404.0	-5.1127	0.9548	1416.9	-0.004	0.9648 *	-129.5	1622.7	0.9548	1692.8	-0.108	0.7977
HQH	70	286	1162.1	-4.1429	0.8684	1163.3	-0.004	0.8821	-62.64	1240.8	0.9253 *	1248.6	-0.057	0.9144
HSL	72	370	1352.4	-4.3029	0.9789	1362.9	-0.004	0.9862 *	-107.4	1530.6	0.8163	1580.1	-0.0091	0.7916
MHG	46	185	1290.8	-4.7619	0.9449	1296.6	-0.004	0.9606 *	-96.27	1435.4	0.8890	1464.5	-0.0083	0.8687
DLG	64	273	1241.1	-4.3430	0.9193	1244.7	-0.004	0.9366 *	-85.09	1367.8	0.9102	1388.6	-0.0750	0.8941
XLG	50	223	1196.8	-4.1075	0.9227	1199.5	-0.004	0.9360 *	-71.1	1293.5	0.8998	1307.0	-0.0640	0.8852

注：*表示相应纵剖面最佳拟合函数类型；a、b为具体参数值。

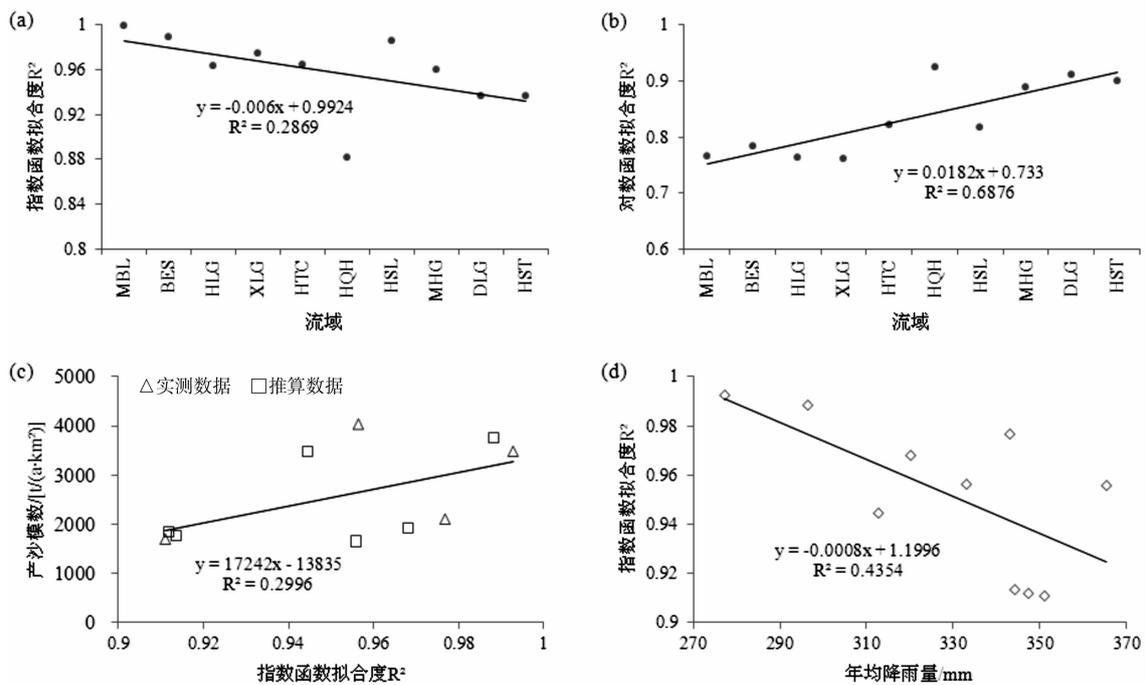


图2 河道纵剖面指数(a)对数(b)函数拟合度的空间变化趋势及其与产沙模数(c)和降雨量(d)的回归关系(产沙模数数据来源于文献^[18];年均降雨量数据根据1980—2010年流域内及周缘气象站点记录的多年平均(<http://data.cma.cn/>),空间插值并提取流域平均值)

Fig.2 Spatial variations of determination coefficients of exponential (a) and logarithmic functions and relationship of determination coefficients of exponential functions with specific sediment yield (c) and rainfall (d) (Data of specific sediment yield come from Xu (2014); rainfall is the catchment means of spatially interpolated mean annual rainfall recorded at weather stations within and around the study area in 1980 - 2010 (<http://data.cma.cn/>))

影响河道纵剖面形态特征的因素主要包括构造活动、气候和基岩抗蚀性。由于各孔兑都下切入中生代砒砂岩中,孔兑流域之间岩性差异可能不大,所

以导致孔兑纵剖面形态差异的主要因素是构造活动和气候。根据近30年流域及周缘年均降雨量的空间插值数据,流域年均降雨量大概在387~237mm

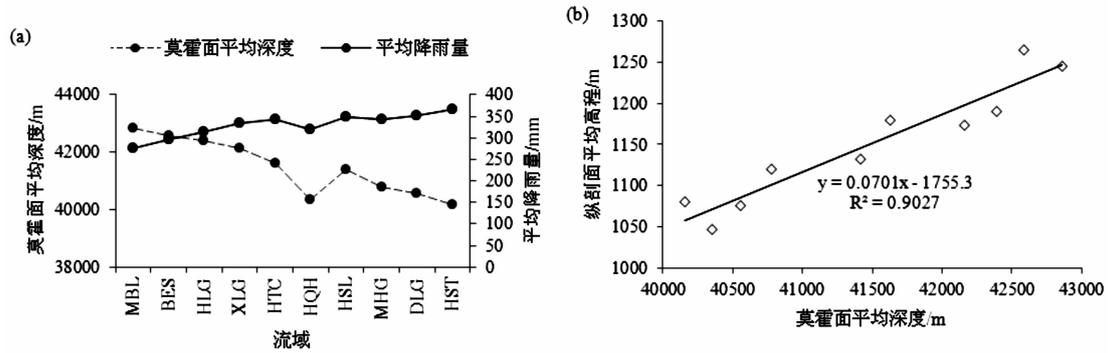


图3 流域莫霍面与降雨特征 (a) 及纵剖面平均高程与莫霍面深度关系 (b) (莫霍面深度数据根据文献^[33])

Fig.3 Average Moho depth and annual rainfall of Ten Kongdus (a) and relationship between the average elevation of longitudinal profile and Moho depth (b) (Data of Moho depth come from Wang et al. (2010))

之间,这反映出流域气候存在一定差异。理论上讲,在较长的时间尺度上,气候因素的差异必然会对地貌演化的空间分异性产生作用。图 2d 显示纵剖面的指数拟合系数会随着降雨量的增加而降低,即降雨量相对充沛的区域,纵剖面演进程度相对较高。这一现象符合地貌演变的一般认识,即降水条件优越时,河流输沙能力较强,从而加速剖面的演化。但是,降雨量的空间差异未必是导致“十大孔兑”流域间地貌的巨大差异的主要因素。东部区域纵剖面相对较高的演化阶段也有可能是较低的隆升速率和略高的降雨量二者的叠加效应,即构造作用在其中也扮演重要角色。虽然已有鄂尔多斯块体伊盟隆起区构造历史的研究成果^[20, 32]不能揭示“十大孔兑”区域东西向构造活动的差异,但构造作用在岩性分布特征上仍然有所体现。由图 1 可见,各孔兑流域上游区域除表层覆盖的第四纪薄层风成堆积物之外,沟谷侵蚀区裸露的均是中生代以来形成的碎屑岩,岩性结构均较为松散,其中西部区域以中生代沉积层为主,东部区域则除了中生代地层外还存在着一定面积的上新世沉积层。若降雨量是地貌格局形成的主导因素,那么东部区域由于降雨量多,沉积层更易受侵蚀,裸露岩层应当更为古老,事实则与之相反,因而仅从这一点可以大体认为构造活动对现前纵剖面基本特征的形成起到了主要的控制作用因而仅从这一点可以大体认为构造活动对现代纵剖面基本特征的形成起到了主要的控制作用。另外,由于莫霍面深度的调整对地壳运动影响很大,而孔兑流域莫霍面埋深具有西部深而东部浅的特征(图 3a),孔兑流域地形与地壳深部莫霍面埋深分布特征完全一致(图 3b),这至少也说明纵剖面高程分布特点与地球深部莫霍面的埋深存在着极大的相关性,易受

地壳深部因素影响。

结合以上诸方面的信息,可以认为孔兑流域基本地形格局主要由构造活动控制,且孔兑流域主河道纵剖面大体上曾经经历过这样一种演化模式,即孔兑流域在隆起过程的初期,东部和西部的隆升速率差异可能并不大,直到上新世前后隆升呈现出不平衡性,西部孔兑流域海拔增长较快,使得纵剖面因受侵蚀而降低的高程得以弥补,而东部流域纵剖面由于隆升速度相对较慢,气候效应相对凸显,纵剖面下凹较甚,逐渐偏离指数形态特征,向着对数剖面演进。

3.2 河长坡降指数特征分析

河长坡降指数(SL)数值大小的影响因素主要有两种,即构造活动和岩石抗蚀性^[3, 34]。计算结果显示,该指数的高值区主要集中在中-下游河段(图 4)。这些河段的沉积几乎全部形成于第四纪时期(图 1),一般以砂质和粉砂质为主^[35, 36],沉积固结时间短,而且由于各孔兑纵剖面 SL 平均值存在着较大差异并表现出明显的空间变化规律(图 5a),抗蚀性差异的影响应该较小,同时 SL 值高值区往往有断层分布,因此大体可以认为 SL 值所反映的主要为构造活动特征差异。按照 SL 值指示的构造活动性强弱来讲,仅有毛不拉孔兑、卜尔色太沟和黑赖沟中下游局部河段显示出构造活动强度适中情况,其余河段及各孔兑纵剖面所反映出来的构造活动普遍较弱,而且从 SL 平均值所反映情况看,构造活动存在着自西向东降低的趋势(图 5a)。另外,根据 SL 平均值与纵剖面指数函数拟合度的关系(图 5b),构造活动略强流域的纵剖面也越接近于指数函数形态,活动性略弱的流域纵剖面逐渐偏离指数函数形态,这一结果符合上节的判断,即西部孔兑构造活动性

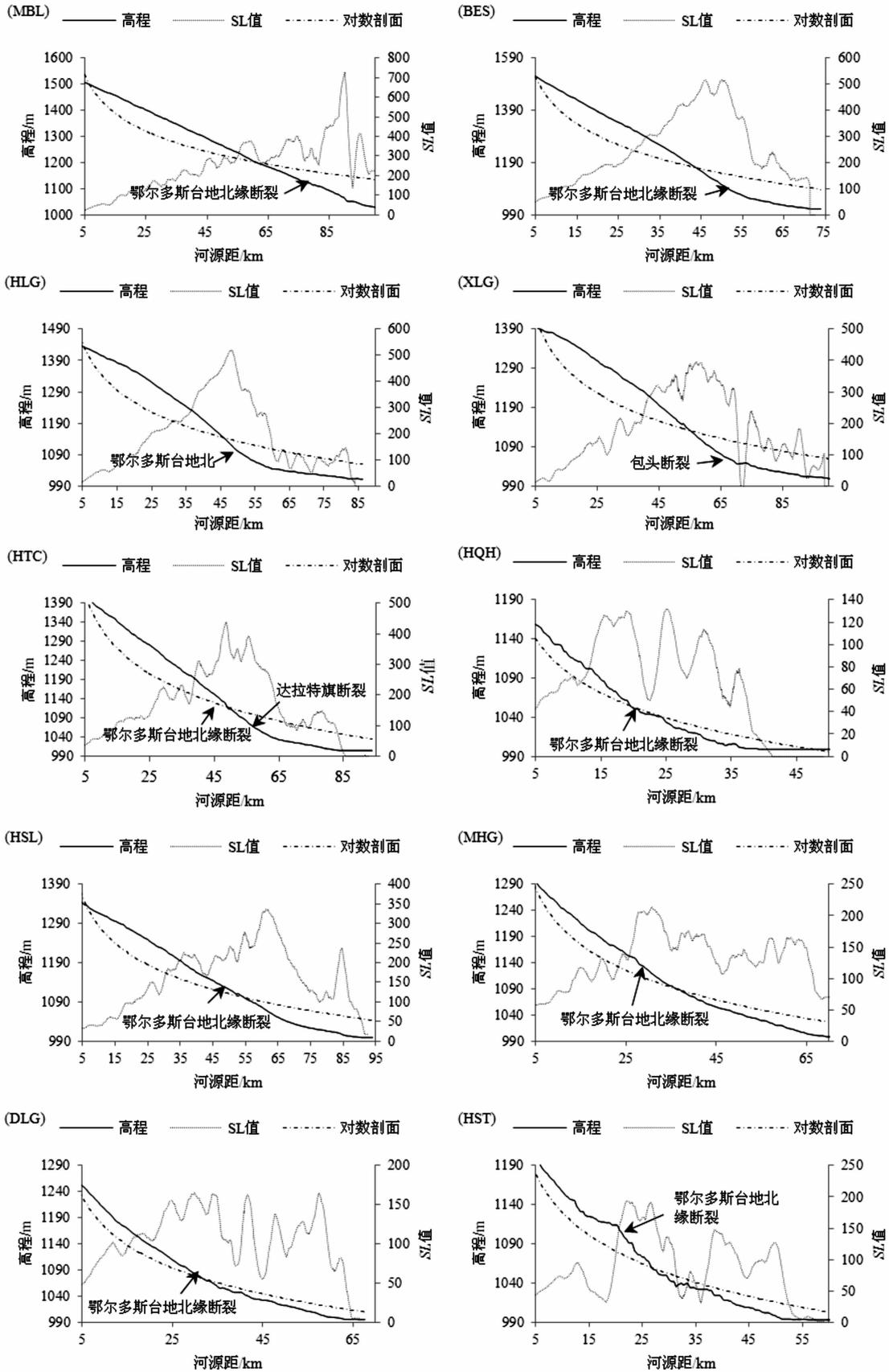


图4 河道纵剖面、理论平衡剖面以及SL值

Fig.4 The observed, steady-state, and SL longitudinal profiles of Ten Kongduis

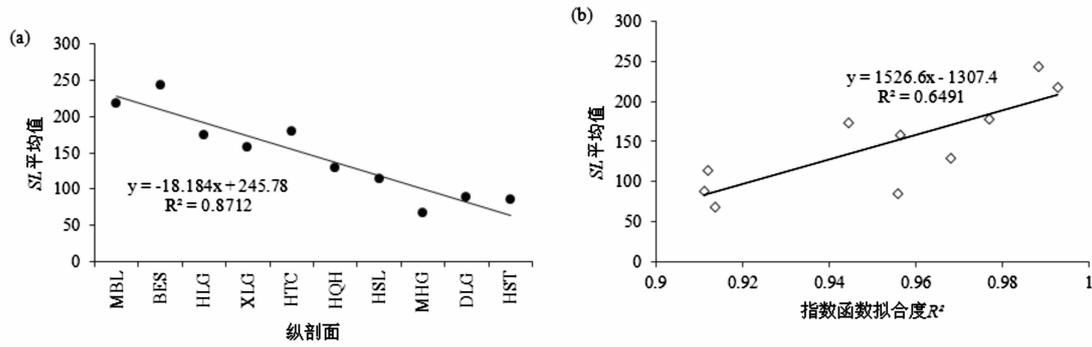


图 5 各孔兑流域纵剖面 SL 平均值 (a) 及其与指数函数拟合度的关系 (b)

Fig. 5 The mean SL values (a) and their relationships with the determination coefficients of exponential functions (b)

相对东部较强,东部孔兑构造活动性略弱。

3.3 Hack 剖面特征分析

通过对各孔兑流域主河道的 Hack 剖面的分析发现,该指标形态特征具有一定的相似性,即 Hack 剖面都呈现为凸形,但凸度值具有较大的差异(图 6)。一般认为 Hack 剖面形态特征的影响因素主要包括岩性和构造活动^[30, 31],然而降雨量的巨大差异也会影响到纵剖面的发育特征,也应该被视为影响因素。研究区各孔兑下游河段都主要为第四纪沉积

物覆盖,上游河段皆为裸露的中生代地层。因此,可以排除岩石抗蚀性差异作为主要影响因素的可能性。从降雨量来看,在流域范围内的确存在东西方向的差异(图 3a),这必然会对 Hack 剖面有所影响。分析发现在降雨量较高的流域 Hack 剖面的凸度值会有所降低(图 7a),但二者的关联程度远小于 Hack 剖面凸度值与莫霍面深度的关联,而莫霍面深度则与构造活动密切相关。总而言之,孔兑流域主河道 Hack 剖面主要反映构造运动,降雨量仅可作为

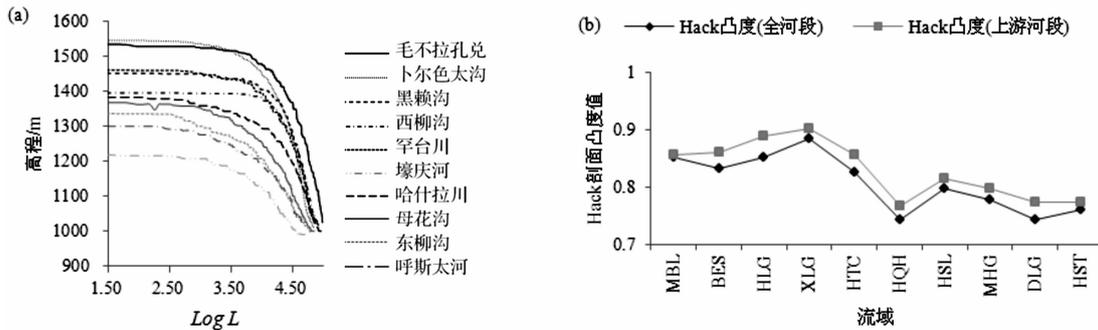


图 6 Hack 剖面特征 (a) 和凸度值 (b)

Fig. 6 Characteristics of Hack profiles (a) and the changes in their convexity values (b)

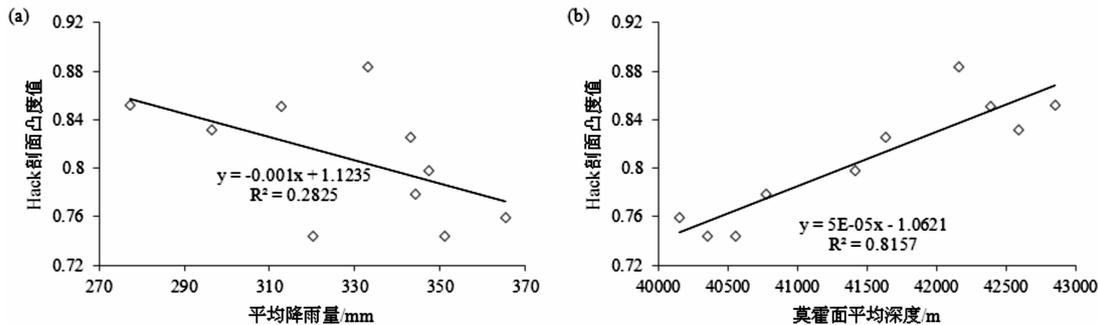


图 7 Hack 剖面凸度值与 (a) 降雨量及 (b) 莫霍面深度关系

Fig. 7 The relationships of convexity values of Hack profiles with rainfall (a) and Moho depth (b)

次要因素加以考虑,岩性特征的影响则更小。由于Hack剖面均呈凸形(图6a),表明孔兑流域目前均表现为隆升状态。此外,还需要考虑到一点,即流域下游是盆地区,Hack剖面呈凸形是否是因为盆地区下沉的原因?为了对此进行判断,文中又进一步对上游河段的Hack剖面的凸度值进行了计算,发现其变化趋势与全流域河段并无根本差别(图7b)。因此,可以认为构造隆升活动主要集中在流域上游,而且由于凸度值较高的区域主要集中在西部,这又进一步说明西部孔兑流域隆升较快。这一结论基本又佐证了前文的判断。

4 结论

本文以DEM数据为基础,借助河流纵剖面拟合函数、河长坡降指数以及Hack剖面,并结合地表岩性、气候以及构造特征方面的信息,对位于黄河内蒙古段的十大孔兑流域主河道纵剖面进行了分析,结果显示:

(1)除壕庆河是对数函数形态之外,孔兑各流域主河道纵剖面目前均表现为指数函数拟合形态,处于侵蚀演变的早期阶段,上游河段将长期遭受侵蚀,下游河段将长期接受沉积。纵剖面指数函数拟合度由西向东呈下降趋势而对数函数拟合度则相应呈现上升趋势,表明其发育程度在该方向上趋于增高,产沙量则随之减小。

(2)孔兑各流域构造活动性普遍较弱,并存在由西向东降低的趋势。纵剖面平均高程与莫霍面平均深度,河长坡降指数平均值(SL)与纵剖面指数函数拟合系数关系均很密切,表明纵剖面特征的基本格局受内营力特征影响。Hack剖面特征表明孔兑流域目前均处于隆升状态,其中西部流域隆起速度高于东部流域。

(3)从纵剖面演化的时空模式上讲,孔兑流域东部和西部的差异性隆升大致出现在上新世前后,西部孔兑流域海拔增长较快,使得纵剖面因受侵蚀而降低的高程得以弥补,而东部流域纵剖面由于隆升速度慢,外营力的作用效应相对凸显,纵剖面下凹较甚,演进程度相对较高。

参考文献(References)

- [1] DAVIS W M. The geographical cycle [J]. The Geographical Journal, 1899, **14**(5): 481 - 504
- [2] RĂDOANE M, RĂDOANE N, DAN D. Geomorphological evolution of longitudinal river profiles in the Carpathians [J]. Geomorphology, 2003, **50**(4): 293 - 306
- [3] FONT M, AMORESE D, LAGARDE J L. DEM and GIS analysis of the stream gradient index to evaluate effects of tectonics: The Normandy intraplate area (NW France) [J]. Geomorphology, 2010, **119**(3): 172 - 180
- [4] 胡小飞, 潘保田, 李琼. 基岩河道水力侵蚀模型原理及其最新研究进展[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, **50**(6): 824 - 831 [HU Xiaofei, PAN Baotian, LI Qiong. Principles of the stream power erosion model and its latest progress in research [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, **50**(6): 824 - 831]
- [5] 陆中臣, 周金星, 陈浩. 黄河下游河床纵剖面形态及其地文学意义[J]. 地理研究, 2003, **1**(1): 30 - 38 [LU Zhongchen, ZHOU J, CHEN H. Riverbed longitudinal profile morphology of the lower Yellow River and its implication in physiography [J]. Geographical Research, 2003, **1**(1): 30 - 38]
- [6] GAO M, ZEILINGER G, XU X, et al. DEM and GIS analysis of geomorphic indices for evaluating recent uplift of the northeastern margin of the Tibetan Plateau, China [J]. Geomorphology, 2013, **190**(439): 61 - 72
- [7] HACK J T. Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland [J]. United States Geological Survey Professional, 1957, **294**(B): 45 - 97
- [8] HACK J T. Stream-profile analysis and stream-gradient indices [J]. U. S. Geological Survey Journal of Research, 1973, **1**(4): 421 - 429
- [9] FLINT J J. Stream gradient as a function of order, magnitude, and discharge [J]. Water Resources Research, 1974, **10**(5): 969 - 973
- [10] OHMORI H, SAITO K. Morphological development of longitudinal profiles of rivers in Japan and Taiwan [J]. Bulletin of the Department of Geography University of Tokyo, 1993, **25**: 29 - 41
- [11] 毕丽思, 何宏林, 徐岳仁, 等. 霍山山前断裂带冲沟纵剖面数学拟合函数的构造响应特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2014, **53**(6): 37 - 44 [BI Lisi, HE Honglin, XU Yueren, et al. Mathematical functions fitting to the longitudinal profiles of the gullies across the Huoshan piedmont fault and their response to the tectonic movement [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2014, **53**(6): 37 - 44]
- [12] HOWARD A D, KERBY G. Channel changes in badlands [J]. Geological Society of America Bulletin, 1983, **94**(6): 739 - 752
- [13] HOWARD A D, DIETRICH W E, SEIDL M A. Modeling fluvial erosion on regional to continental scales [J]. Journal of Geophysical Research-Earth Surface, 1994, **99**(B7): 13971 - 13986
- [14] LARUE J P. Longitudinal profiles and knickzones: the example of the rivers of the Cher basin in the northern French Massif Central [J]. Proceedings of the Geologists' Association, 2011, **122**: 125 - 142
- [15] 许炯心. “十大孔兑”侵蚀产沙与风水两相作用及高含沙水流的关系[J]. 泥沙研究, 2013, **6**: 27 - 36 [XU Jiogxin. Erosion and sediment yield of 10 small tributaries joining Inner Mongolia reach of upper Yellow River in relation with coupled wind-water

- processes and hyperconcentrated flows [J]. *Journal of Sediment Research*, 2013, **6**: 27 – 36]
- [16] YAO H, Shi C, Shao W, et al. Changes and influencing factors of the sediment load in the Xiliugou basin of the upper Yellow River, China [J]. *Catena*, 2016, **142**: 1 – 10
- [17] 林秀芝, 郭彦, 侯素珍. 内蒙古十大孔兑输沙量估算[J]. *泥沙研究*, 2014, **2**: 15 – 20 [LIN Xiuzhi, GUO Yang, HOU Suzhen. Estimation of sediment discharge of ten tributaries of Yellow River in Inner Mongolia [J]. *Journal of Sediment Research*, 2014, **2**: 15 – 20]
- [18] 许炯心. 黄河内蒙古段支流“十大孔兑”侵蚀产沙的时空变化及其成因[J]. *中国沙漠*, 2014, **34**(6): 1641 – 1649 [XU Jiongxin. Temporal and spatial variations in erosion and sediment yield and the cause in the ten small tributaries to the Inner Mongolia Reach of the Yellow River [J]. *Journal of Desert Research*, 2014, **34**(6): 1641 – 1649]
- [19] 孙宝洋, 李占斌, 张洋, 等. 黄河内蒙古支流“十大孔兑”区风蚀强度时空变化特征[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(17): 112 – 119 [SUN Baoyang, LI Zhaobin, ZHANG Yang, et al. Spatiotemporal variation of wind erosion intensity in region of ten small tributaries in Inner Mongolia branch of Yellow River [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(17): 112 – 119]
- [20] 乔建新. 伊盟隆起中-新生代构造演化及其油气效应[D]. 西安: 西北大学, 2013, 24 – 43 [QIAO Jianxin. The Tectonic Evolution and Oil-Gas Effect of Meso-Cenozoic Yimeng Uplift [D]. Xi'an: Northwest University, 2013: 24 – 43]
- [21] 王鸿祯. 中国古地理图集[M]. 北京: 地图出版社, 1985, 17 – 74 [WANG Hongzhen. Atlas of the Palaeogeography of China [M]. Beijing: Sinomap Press, 1985: 17 – 74]
- [22] 腾吉文, 王夫运, 赵文智, 等. 阴山造山带-鄂尔多斯盆地岩石圈层、块速度结构与深层动力过程. *地球物理学报*, 2010, **53**(1): 67 – 85 [TENG Jiwen, WANG Fuyun, ZHAO Wenzhi, et al. Velocity structure of layered block and deep dynamic process in the lithosphere beneath the Yinshan orogenic belt and Ordos Basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, **53**(1): 67 – 85]
- [23] 马丽芳. 中国地质图集[M]. 北京: 地质出版社, 2007, 141 – 147 [MA Lifang. China's Geological Atlas [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 141 – 147]
- [24] SNOW R S, Slingerland R L. Mathematical modeling of graded river profiles [J]. *The Journal of Geology*, 1987, **95**(1): 15 – 33
- [25] 赵洪壮, 李有利, 杨景春, 等. 天山北麓纵剖面与基岩侵蚀模型特征分析[J]. *地理学报*, 2009, **64**(5): 563 – 570 [ZHAO Hongzhuang, LI Youli, YANG Jingchun, et al. The longitudinal profiles of the ten rivers in North Tianshan Mountains and their tectonic significance [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, **64**(5): 563 – 570]
- [26] AMBILI V, NARAYANA A C. Tectonic effects on the longitudinal profiles of the Chaliyar River and its tributaries, southwest India [J]. *Geomorphology*, 2014, **217**(2): 37 – 47
- [27] MAHMOOD S A, GLOAGUEN R. Appraisal of active tectonics in Hindu Kush: Insights from DEM derived geomorphic indices and drainage analysis [J]. *Geoscience Frontiers*, 2012, **3**(4): 407 – 428
- [28] KELLER E A, PINTER N. Active tectonics: earthquakes, uplift, and landscape [M]. Prentice Hall Earth Science, 2001
- [29] HAMDOUNI R E, IRIGARAY C, FERNÁNDEZ T, et al. Assessment of relative active tectonics, southwest border of Sierra Nevada (Southern Spain) [J]. *Geomorphology*, 2008, **96**(2): 150 – 173
- [30] MERRITTS D, VINCENT K R. Geomorphic response of coastal streams to low, intermediate, and high rates of uplift, Mendocino triple junction region, northern California [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, **110**(11): 1373 – 1388
- [31] 吉亚鹏, 高红山, 潘保田, 等. 渭河上游流域河长坡降指标 *SL* 参数与 Hack 剖面的性构造意义[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2011, **47**(4): 1 – 6 [JI Yapeng, GAO Hongshan, PAN Baotian, et al. 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)*, 2011, **47**(4): 1 – 6]
- [32] 邓起东, 程绍平, 闵伟, 等. 鄂尔多斯块体新生代构造活动和动力学的讨论[J]. *地质力学学报*, 1999, **5**(3): 13 – 21 [DENG Qidong, CHENG Shaoping, MIN Wei, et al. Discussion on Cenozoic tectonics and dynamics of Ordos block [J]. *Journal of Geomechanics*, 1999, **5**(3): 13 – 19]
- [33] 王谦身, 滕吉文, 安玉林, 等. 阴山山系与鄂尔多斯盆地北部的重力场与深部构造[J]. *地球物理学进展*, 2010, **25**(5): 1590 – 1598 [WANG Qianshen, TENG Jiwen, AN Yulin, et al. Gravity field and deep crustal structures of the Yinshan orogen and the northern Ordos basin [J]. *Progress in Geophysics*, 2010, **25**(5): 1590 – 1598]
- [34] 赵国华, 李勇, 颜照坤, 等. 龙门山中段山前河流 Hack 剖面 and 面积-高程积分的构造地貌研究[J]. *第四纪研究*, 2014, **34**(2): 302 – 311 [ZHAO Guohua, LI Yong, YAN Zhaokun, et al. Tectonic geomorphology analysis of piedmont rivers of the middle MT. Longmengshan based on Hack profile and hypsometric integral [J]. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(2): 302 – 311]
- [35] 张翔, 李鹏, 张洋. 东柳沟沉积泥沙粒径空间分布与特征[J]. *水土保持学报*, 2015, **29**(1): 75 – 79 [ZHANG Xiang, LI Peng, ZHANG Yang, et al. The spatial analysis of sediment in Dongliugou Watershed [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, **29**(1): 75 – 79]
- [36] 阳辉, 师长兴, 姚海芳. 黄河上游毛不拉孔兑表层沉积物粒度分布特征及影响因素[J]. *干旱区地理*, 2016, **39**(2): 353 – 360 [YANG Hui, SHI Changxing, YAO Haifang. Grain size distribution characteristics of fluvial deposits and influence factors in the Maobula River of the Upper Yellow River [J]. *Arid Land Geography*, 2016, **39**(2): 353 – 360]

Characteristics of Topographic Dynamics Reflected by Longitudinal Section Parameters of Ten Tributaries of the Yellow River in Inner Mongolia, China

GU Zhenkui^{1,2}, SHI Changxing^{1,2}, LIU Xiaofei^{1,2}, LI Huijuan^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The characteristics of landform dynamics are critical of understanding the sediment yield processes. The Yellow River has 10 tributaries, known as Ten Kongduis (Kongdui is the name of an ephemeral creek in Inner Mongolian), located between the North Ordos platform and the Hetao Basin in Inner Mongolia, China. Owing to strong interaction between wind and water erosion, and a high sediment yield in the basin, the sediment transport process of the Yellow River has been considerably affected, and it is raising geographer's awareness. In this study, the characteristics of the stream profiles of Ten Kongduis were analysed using DEM (digital elevation model) data through curve-fitting and calculating the stream length-gradient index (SL) as well as the Hack profiles. In addition, it investigated the relations of the characteristics of the stream profiles with the geological and climatic factors. The fitted functions showed that most mainstream channel profiles were characterised by an exponential function form, suggesting that these profiles were at the early stages of erosion evolution and their upper reaches would be eroded for a long term, with the lower reaches receiving the transported sediments. The correlation coefficients of the exponential function decreased, whereas those of the logarithmic function fitting the profiles increased from west to east, indicating that the development level of the profiles increased in this direction. The sediment yield of a basin reduced with a rise in the development level of the mainstream profile of the basin. The average SL values showed that the tectonic activity of the basins was generally weak and its intensity decreased from west to east. The relations between the average heights of the profiles and Moho depth as well as between the average SL values and the determination coefficients of the exponential function were all statistically significant, suggesting that the basic pattern of profile features was affected by the internal force. Furthermore, the Hack profiles showed that all these basins were being uplifted and that the uplift rate of the western kongdui basins was greater than that of the eastern ones. Based on the temporal and spatial evolution patterns, the difference in crust uplifting between the east and the west was found to have occurred since the Pliocene. The western basins rose faster than the erosion rate. In contrast, the eastern basins rose slowly, and the effects of external agents became relatively prominent, leading to their mainstream profiles possessing a relatively high degree of evolution.

Key words: Kongduis; stream profile; profile fitting; stream length-gradient index; Hack profile