

鄂尔多斯西北缘桌子山地区河流袭夺和分水岭迁移研究

林玲玲^{1,2}, 李雪梅³, 张会平¹, 马字发¹
LIN Lingling^{1,2}, LI Xuemei³, ZHANG Huiping¹, MA Zifa¹

1. 中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029;
2. 防灾科技学院, 河北省地震动力学重点实验室, 河北 三河 065201;
3. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041

1. *State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China;*
2. *Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, China Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China;*
3. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China*

LIN L L, LI X M, ZHANG H P, et al., 2021. River capture and divide migration of the Zhuozishan area in the northwestern margin of the Ordos Block [J]. Journal of Geomechanics, 27 (2): 294–303. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.02.027

Abstract: Divide is a dynamic feature of a landscape that routinely migrates, either through progressive or discrete river capture, in some cases even leading to the complete reorganization of river networks. Most of the existing geomorphological or drainage evolution studies focus on the single river capture, and few report on the overall movement and the geomorphologic adjustment of divide. Recently, it was proposed in a digital study of fluvial geomorphology that the chi (χ) value difference on both sides of the drainage divide could be used to explain the large-scale river capture and demonstrate the reorganization of drainage when describing the dynamic migration process of divide. In this paper, the chi (χ) values were calculated using the 12.5 m DEM data. The chi (χ) values were higher in the east and lower in the west, indicating an eastward migration. The lithological erosion resistance is the main factor controlling the eastward migration of the divides in Zhuozishan under the condition that there are no obvious differences in the tectonic uplift and precipitation conditions on the east and west sides. When the Cambrian and Ordovician limestones with stronger erosion resistance lie in the west wing of the Zhuozishan anticline, the other weak sedimentary clastic rocks located in its lower part, the river in the west wing would be through the core of the anticline, laterally capturing the rivers on the east of the anticline.

Key words: river capture; divide migration; Ordos; Zhuozishan

摘 要: 分水岭是水系演化中的动态因素, 通过连续或不连续的水系袭夺而发生迁移, 从而导致水系重组。传统的对水系演化的研究主要集中单个河流袭夺事件, 而新提出的利用分水岭两侧 chi (χ) 值差异来描述分水岭的动态迁移过程, 能够解释大尺度的河流袭夺事件, 描述水系的整体演化过程。文章基于 12.5 m DEM 数据提取了鄂尔多斯西北缘桌子山地区的 chi (χ) 值揭示其空间分布具有东高西低的特点, 反映桌子山的水系处于向东迁移过程。综合分析进一步揭示, 在桌子山东西两侧的构造升降和降水条

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41761144071); 科技部第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0704); 廊坊市科技局科学研究与发展计划自筹经费项目 (2019013086)

This research is financially supported by the National Science Foundation of China (Grant No. 41761144071), the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (STEP) (Grant No. 2019QZKK0704), the Langfang Science and Technology Support Plan Project (Grant No. 2019013086)

第一作者简介: 林玲玲 (1982—), 女, 在读博士, 讲师, 构造地貌研究方向。E-mail: linlignlingbj@qq.com

通讯作者: 李雪梅 (1988—), 女, 博士, 构造地貌研究方向。E-mail: lixuemeibj@126.com

收稿日期: 2020-12-01; **修回日期:** 2021-02-24; **责任编辑:** 吴芳

引用格式: 林玲玲, 李雪梅, 张会平, 等. 2021. 鄂尔多斯西北缘桌子山地区河流袭夺和分水岭迁移研究 [J]. 地质力学学报, 27 (2): 294–303. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.02.027

件都无明显差异的条件下,岩性抗侵蚀能力差异是控制桌子山分水岭向东迁移的主要因素,当抗侵蚀能力更强的寒武系、奥陶系灰岩位于背斜西翼,而中元古宙长城系(Pt)沉积碎屑岩位于其下部时,背斜西翼的河流具有更强的侵蚀能力,西翼河流可能会穿过背斜核部,从而侧向袭夺东侧的河流。

关键词: 河流袭夺;分水岭迁移;鄂尔多斯;桌子山

中图分类号: P931.2 **文献标识码:** A

0 引言

认识地貌随时间的演化是重建过去的构造、气候过程以及沉积序列的基础,而地貌演化与水系演化是基本耦合的,因此水系演化是识别地貌演化过程,重建构造、气候过程和沉积序列的重要切入点(Tucker and Slingerland, 1997; Mather, 2000; Hancock and Anderson, 2002; Bonnet, 2009; Pritchard et al., 2009; Kirby and Whipple, 2012; Willett et al., 2014)。水系是地貌演化动态系统中的一部分,在这一系统中河道几何形态、河道梯度、水系形态都向着构造隆升与侵蚀之间的平衡状态(Howard, 1965)以及与气候条件和基岩抗侵蚀能力有关的平衡状态调整(Whipple, 2001)。分水岭是分隔相邻两个流域的界线,是地貌演化的动态因素,通过连续或不连续的水系袭夺而发生迁移,从而导致整个水系重组(Willett et al., 2014)。因此,水系袭夺和分水岭迁移研究能够解译水系和地貌演化过程,是水系演化研究的重点(Vacherat et al., 2017)。

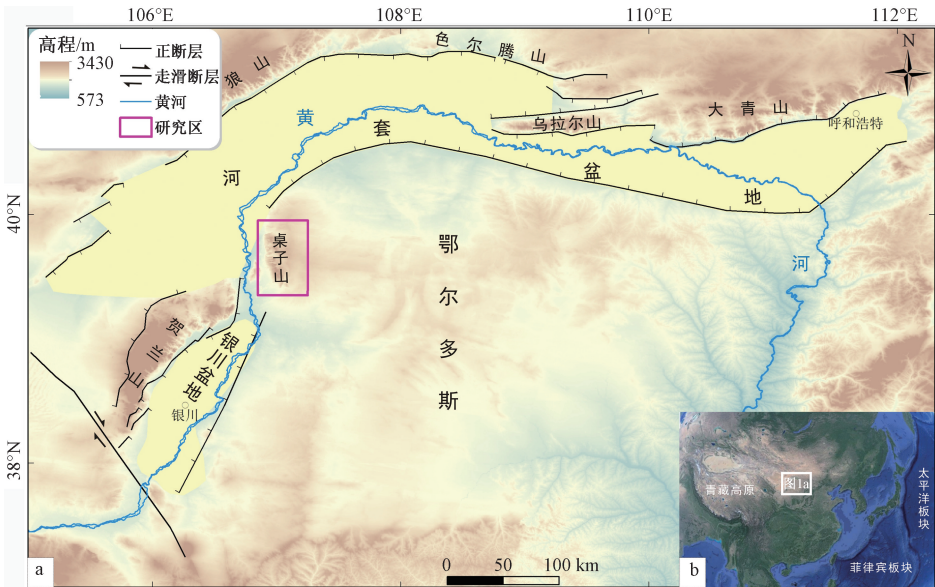
已有的大多数地貌或水系演化研究主要关注单个河流袭夺或分水岭迁移事件,主要依据不规则水系形态、风口、古河道、断头河、裂点、阶地、沉积物物源/粒度变化等地质、地貌证据(Bishop, 1995; Stokes et al., 2002; Clark et al., 2004; Maher et al., 2007; Prince et al., 2010, 2011)。然而,这些地质和地貌证据很难保存和识别,尤其是在侵蚀强烈的地区,并且这些研究很难描述流域分水岭的整体迁移过程。在基岩河道河流水力侵蚀模型中河道上任意点对上游流域面积的积分称为 χ (χ) 值。近期,河流地貌数字化研究利用分水岭两侧 χ (χ) 值差异来描述分水岭的动态迁移过程,为解释大尺度的河流袭夺事件,描述水系的整体演化过程提供条件(Perron and Royden, 2013; Willett et al., 2014; Yang et al., 2015; Vacherat et al., 2017)。

位于鄂尔多斯块体西北缘的桌子山地区,是属于东西向的逆冲推覆构造体系中的一个背斜构造,总体呈南北走向(赵红格等, 2006)。对桌子山地区卫星影像和水系进行分析,发现该区域的水系样式存在明显异常。流经桌子山西麓奥陶系地层的水系河道平直,河谷深切;而流经背斜核部的水系则迅速侧向扩展。背斜核部的河流与两翼的河流之间可能存在着相互袭夺的关系,为水系袭夺研究提供了良好场所。文章通过桌子山地区的水系样式分析和基于 12.5 m DEM 数据桌子山地区 χ (χ) 值的提取来研究桌子山地区河流袭夺和分水岭迁移。

1 区域背景

桌子山地区位于鄂尔多斯盆地西北缘(图1),处于鄂尔多斯稳定地块与阿拉善古陆的结合部位,中—新生代以后受印支运动、燕山运动、喜马拉雅运动影响较为明显,属于鄂尔多斯盆地西缘巨型冲断带的一部分(郑文俊等, 2019; 康玉柱等, 2019)。桌子山地区现今的地形地貌表现为由西向东一系列的背斜夹向斜构造组成的大型褶皱体系,其向斜和背斜翼部多含有断层。该区总体的构造特征为东西向的逆冲推覆为主的断裂、背斜、向斜夹杂的复合构造体(赵红格等, 2006)。桌子山属于该构造体系中的一个背斜构造,总体呈南北走向,最高海拔 2149.4 m,相对高差 600 m。

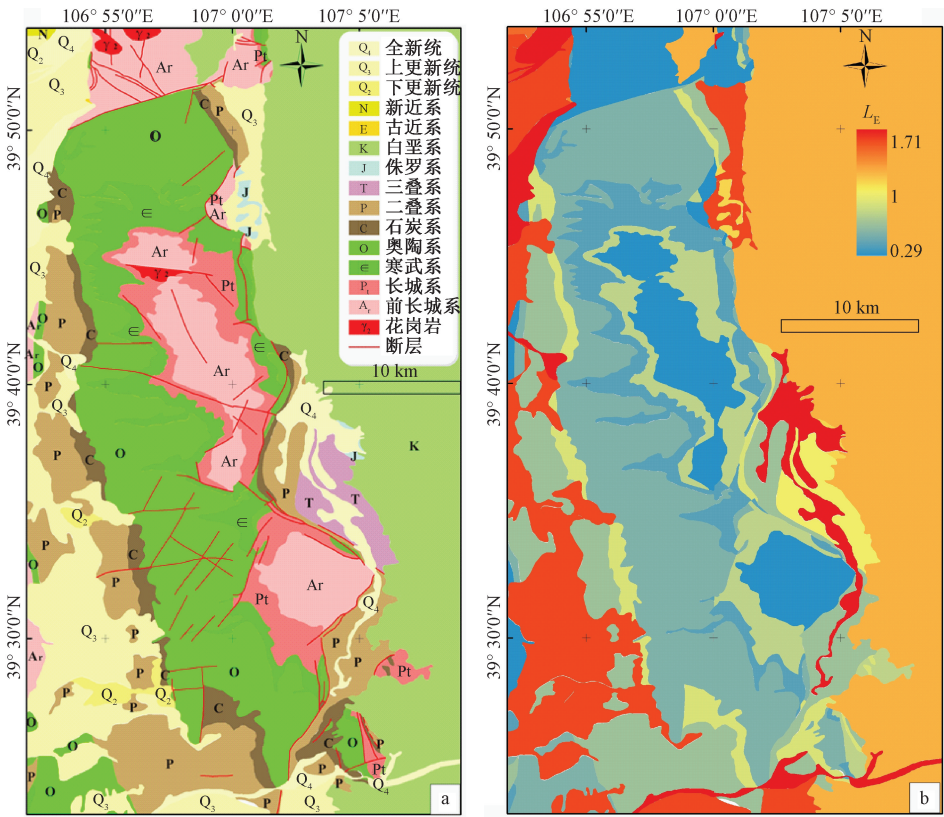
桌子山地区中—新生代出露地层较全,从太古界到第四系基本都有,岩性主体以砂岩为主(图2a)。桌子山背斜核部分布上太古界千里山岩群、上元古界青白口—震旦系西勒图组地层,岩性主要为石榴石黑云斜长片麻岩、各种混合质片麻岩、大理岩、石英片岩。背斜两翼分布元古代(Pt)石英砂岩、白云质灰岩,寒武纪(Є)和奥陶纪(O)灰岩,石炭纪(C)、二叠纪(P)、三叠纪(T)、侏罗纪(J)和白垩纪(K)砂岩。



a—研究区位置图，位于鄂尔多斯块体的西北部；b—研究区与青藏高原块体的位置

图 1 研究区构造位置图

Fig. 1 Tectonic position of the study area. (a) Location of the study area, which is in the northwestern margin of the Ordos Block. (b) Micro map showing the position of the study area and the Tibet Plateau Block



a—桌子山地质图（据新召幅 1:20 万区域地质图，1981 修改）；b—岩石的抗侵蚀强度分布图（ L_e 为岩性的抗侵蚀指数）

图 2 桌子山地质图与岩石的抗侵蚀强度分布图

Fig. 2 Maps showing the geology and intensity of erosion resistance in the Zhuozishan area. (a) Geological map of the Zhuozishan area (Distribution of lithology and faults were modified from the 1:200, 000 geological map of Xinzhaio, 1981). (b) Intensity of erosion resistance in the Zhuozishan area (L_e is the lithological erosion resistance index)

2 理论与结果分析

2.1 chi (χ) 值原理

在基岩河道河流水力侵蚀模型中, 侵蚀速率 E 与河道梯度 S 、上游流域面积 A 呈幂次函数关系 (Whipple and Tucker, 1999; Kirby and Whipple, 2012):

$$E = KA^m S^n \quad (1)$$

公式中 K 为侵蚀系数, 代表流域内基岩河流的可侵蚀效率, 包含气候、岩性、沉积物通量、河道几何形态等对侵蚀效率的影响; m 为面积指数, n 为河道梯度指数。假定构造引起的基岩抬升速率为 U , 河道上某点的高程为 z 随时间 t 变化, 其沿河道的溯源距离为 x (即从出水口到分水岭的方向), 由此可得河道高程变化速率为:

$$\frac{\partial z(x, t)}{\partial t} = U(x, t) - K(x, t)A(x, t)^m \left| \frac{\partial z(x, t)}{\partial x} \right|^n \quad (2)$$

当地貌演化达到稳定状态, 即 $\frac{\partial z}{\partial t} = 0$, 则可得:

$$\left| \frac{dz}{dx} \right| = \left(\frac{U}{K} \right)^{\frac{1}{n}} A(x)^{-\frac{m}{n}} \quad (3)$$

对 (3) 式两端进行积分, 可得:

$$\int dz = \int \left(\frac{U(x)}{K(x)A(x)^m} \right)^{\frac{1}{n}} dx \quad (4)$$

$$z(x) = z_b + \int_0^x \left(\frac{U(x)}{K(x)A(x)^m} \right)^{\frac{1}{n}} dx \quad (5)$$

$$z(x) = z_b + \left(\frac{U}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \int_0^x \frac{dx}{A(x)^{\frac{m}{n}}} \quad (6)$$

公式 (5)、(6) 中 z_b 为河道起始点的高程, 将河道上任意点 x 对上游流域面积的积分定义为 χ , 即

$$\chi = \int_0^x \left| \frac{A_0}{A(x)} \right|^{\frac{m}{n}} dx \quad (7)$$

则方程 (6) 可转化为

$$z(x) = z_b + \left(\frac{U}{KA_0^m} \right)^{\frac{1}{n}} \chi \quad (8)$$

公式 (8) 中 A_0 为参考流域面积, 可以取任意值。

在基岩河流水力侵蚀模型中, 通常将反映河道

梯度变化得河道陡峭指数定义为 $k_{sn} = \left(\frac{U}{K} \right)^{\frac{1}{n}}$,

河道凹度指数定义为 $\theta = m/n$ 。当区域平均的凹度指数被确定为参考凹度指数 θ_{ref} 时, 可获得能够用于区域比较的标准河道陡峭指数 k_{sn} 。由此, 方程 (8) 可以转变为:

$$z(x) = z_b + (k_{sn}/A^{\theta_{ref}}) \chi \quad (9)$$

公式 (9) 反映出河道高程 z 与 χ 值之间存在线性关系, 当 A_0 取特定值时, 直线的斜率可以近似等于标准河道陡峭指数 k_{sn} 。从图 3 可以看出, χ 值的差异不仅与流域面积的变化有关, 也与标准河道陡峭指数 k_{sn} 以及河道初始高程 z_b 有关。在设定不同流域的初始高程为相同值的情况下, 分水岭两侧 χ 值的差异主要受河道陡峭程度的影响, 标准河道陡峭指数 k_{sn} 较大的一侧所对应的 χ 值较小, 标准河道陡峭指数 k_{sn} 较小的一侧所对应的 χ 值较大。标准河道陡峭指数 k_{sn} 主要与抬升速率 U 和侵蚀系数 K 相关, 因而 χ 值的变化也主要与区域构造抬升速率和侵蚀效率相关。

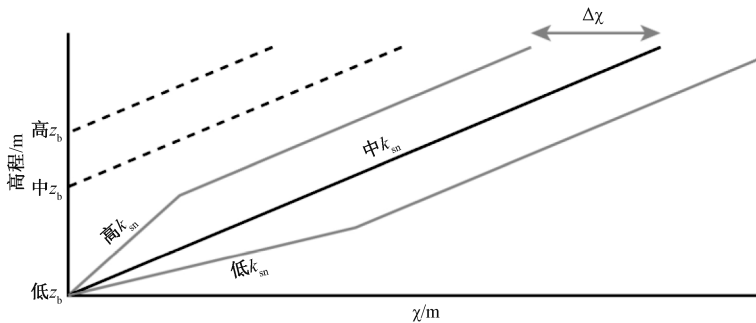


图 3 河道高程和 chi (χ) 值的线性关系 (据 Whipple et al., 2017 修改)

Fig. 3 Linear relationship between the channel height and chi (χ) value (modified after Whipple et al., 2017)

Willett et al. (2014) 提出利用分水岭两侧 chi (χ) 值差异来描述分水岭的动态迁移过程, 能够

解释大尺度河流袭夺事件, 描述水系的动态演化过程 (Perron and Royden, 2013; Willett et al.,

2014; Yang et al., 2015; Vacherat et al., 2017)。当分水岭两侧的构造抬升速率 U 或侵蚀效率 K 存在明显差异时, 分水岭两侧水系的 χ (X) 值会处于不平衡状态, 分水岭会由 χ (X) 值较小的一侧向 χ (X) 值较大的一侧迁移 (图 4a)。由公式 (7) 可以计算出, 当河流袭夺发生时, 袭夺河的流域面积会相应增加, 使得 χ (X) 值变大; 被袭夺河的流域面积会相应减小, 使得 χ (X) 值减小 (图 4b), 最终导致分水岭两侧的 χ (X) 值差异减小, 水系演化趋于均衡状态 (图 4c、4d)。

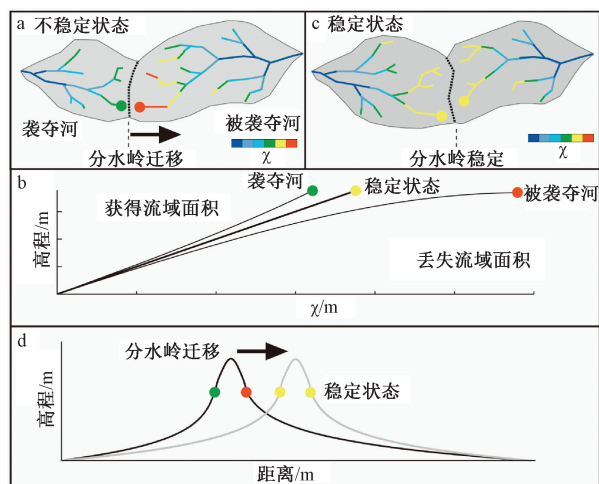


图 4 均衡和非均衡状态的流域盆地及河道 χ (X) 值剖面 (据 Willett et al., 2014 修改)

Fig. 4 Drainage basins and river profiles in equilibrium and disequilibrium. The parameter χ provides a prediction of the steady-state elevation for a given point on a channel. The basin on the right (aggressor) has lower steady-state elevation at channel heads and therefore drives the drainage divide toward the basin on the left (victim). (modified after Willett et al., 2014)

2.2 桌子山水系样式分析及 χ (X) 值计算

流经桌子山背斜构造的水系均为垂直于南北向构造线的横向水系, 但东西两侧的河流样式存在差异, 流经背斜西翼的水系河道平直, 河谷深切, 并直接汇入黄流干流; 而流经背斜东翼的河流先汇入山前的纵向河流再从褶皱的南北两端汇入到黄河干流。西翼的横向河流又可以分成两种模式, 一种是发源于山前, 流域面积较小的; 另一种模式是河流穿过背斜核部, 源头在腹地, 具有较大的汇水面积, 例如中部的苏拜沟穿越了背斜核部并迅速侧向扩展 (图 5a)。因此桌子山南北向的主分水岭不连续, 被中部穿过核部的苏拜沟分成了南北两段。分水岭北段, 从北往南分水岭

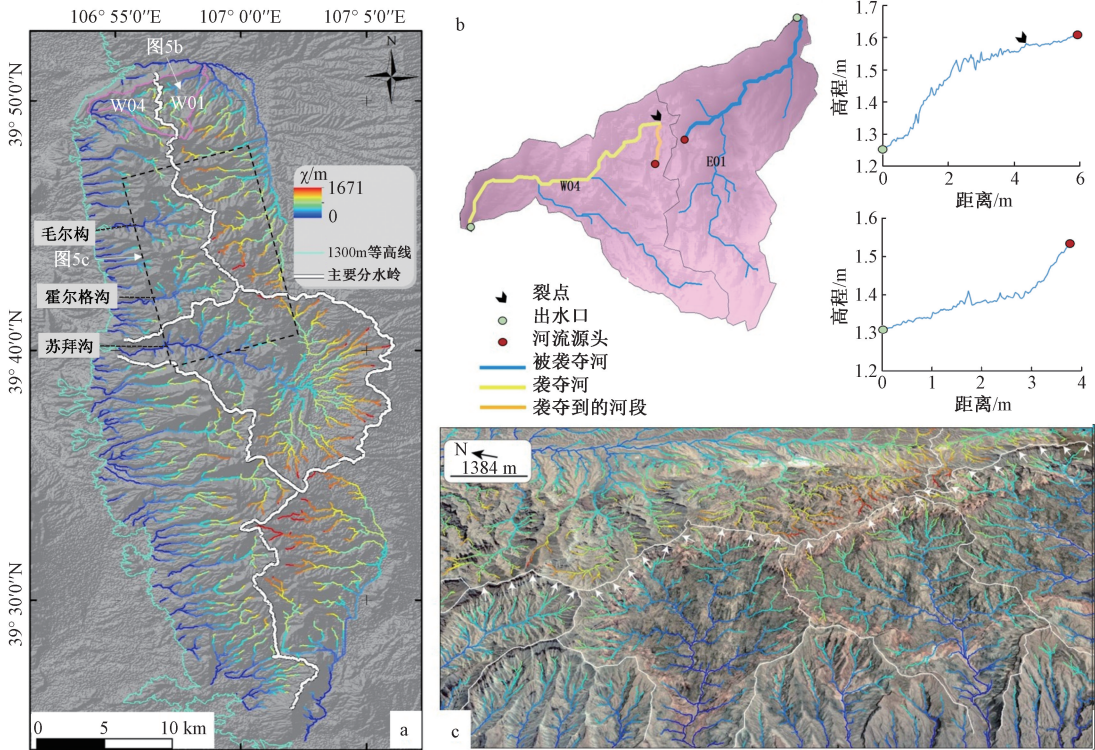
向东偏移的程度越来越大, 仔细观察分水岭两侧的水系样式, 西翼的部分流域仍保留了上游有裂点的肘状拐弯 (图 5b), 如西翼的 W04 流域与共南北向分水岭的 E01 流域, W04 的河道源头有明显的肘状拐弯, 从两条河流的纵剖面看, 西翼的河流河道坡度更大从而具有更强的侵蚀能力, 存在袭夺东翼河流的现象。

为了更直观地描述桌子山背斜不同部位河流之间可能存在着相互袭夺的关系, 文章利用桌子山地区 12.5 m 的 DEM 数据计算水系的 χ (X) 值来研究该区域分水岭的迁移趋势。首先, m/n 设为 0.45 (Perron and Royden, 2013; Willett et al., 2014; Yang et al., 2015; Vacherat et al., 2017), A_0 设为 0.3 km², 即河源处的最小汇水面积为 0.3 km², 为使东西坡流域具有相同高程的出水口, 选取 1300 m 等高线为基准面。根据公式 (7) 可计算出该区域水系的 χ (X) 值。

结果表明, 分水岭两侧不同流域的 χ (X) 值存在明显差异 (图 5)。①在桌子山北部和中部, 背斜东翼的水系 χ (X) 值明显大于背斜核部的水系。这表明背斜核部的水系比东翼的水系侵蚀袭夺能力强, 分水岭会向背斜东翼迁移; 背斜核部和西翼的水系 χ (X) 值差异不明显, 只有桌子山中部的地区 χ (X) 值有差异。表明背斜核部和西翼的水系袭夺关系不明显, 分水岭较稳定。②桌子山南部背斜东翼的 χ (X) 值明显大于西翼, 表明西翼的水系侵蚀袭夺能力更强, 分水岭向东翼迁移。由此可见, 背斜核部和西翼的侵蚀袭夺能力比东翼强, 分水岭向东翼迁移。

3 讨论

流域分水岭的稳定性可能受到许多因素的影响, 如不对称的构造隆升 (Goren et al., 2014; Willett et al., 2014; Forte et al., 2015; Whipple et al., 2017)、降水量的差异 (Willett, 1999; Bonnet, 2009; Goren et al., 2014; Forte et al., 2015; Forte and Whipple, 2018)、岩石强度 (Goren et al., 2014; Forte and Whipple, 2018) 和侵蚀基准面的变化等。其中, 构造抬升会影响当地气候和岩石强度, 也可能引发山体滑坡 (Willett, 1999; Korup et al., 2007; Agliardi et al., 2013; Liu et al., 2015), 进一步复杂化了内部水系调整的过程。已有数值模



a—桌子山 chi (X) 值空间分布；b—W04 与 E01 河流袭夺的肘状拐弯和两条河流的纵剖面；c—北段南北向分水岭向东迁移的立体图（底图为 Google Earth 影像图）

图 5 桌子山 chi (X) 值分布与分水岭迁移方向

Fig. 5 Maps showing the distribution feature of the chi (X) value and divide migration in the Zhuozishan area. (a) Chi (X) value in the Zhuozishan area. (b) River captures evidenced by the elbows of capture and the river profile of W04, E01 in the Zhuozishan area. (c) Stereo map of the eastward migration of the main divide in the north of the Zhuozishan area (The basemap is a Google Earth image)

型表明，流域分水岭会对构造隆升的不对称性作出响应（Goren et al.，2014；Willett et al.，2014；Whipple et al.，2017）。例如初始存在稳定的位于山脉中心的分水岭，假设两侧的岩性均一，气候条件相同，分水岭将向抬升速率高的一侧移动以达到稳态，如果下一阶段分水岭两侧构造抬升速率一致时分水岭还会返回到山脉的中心即它的初始位置（Goren et al.，2014；Whipple et al.，2017）。桌子山地处大陆深处，属于显著的大陆性暖温带气候，年均降水量少，降水量大致可以认为是空间均匀的。在桌子山地区中—新生代隆升事件的已有研究中并没有证据指示桌子山分水岭两侧存在差异隆升现象（刘睿和马保起，2014；卓鱼周，2015；徐东卓等，2018；梁宽，2019），且桌子山东西两侧水系的侵蚀基准都为黄河，因此此次研究中可以主要考虑该区域岩性抗侵蚀能力差异对分水岭迁移的影响。

3.1 岩性差异对桌子山分水岭迁移的影响

从桌子山地区的地质图（图 2a）看该区域中—

新生代出露地层较全，从太古界到第四系基本都有，但桌子山东西坡地层的分布是不对称。桌子山西坡大面积出露寒武纪（ ϵ ）和奥陶纪（O）灰岩，东坡则主要出露二叠纪（P）、三叠纪（T）、侏罗纪（J）和白垩纪（K）砂岩。而桌子山的山顶即背斜核部则分布太古界（Ar）的石榴石黑云斜长片麻岩、各种混合质片麻岩、大理岩、石英片岩（图 2a）。Campforts et al.（2020）开发出一种结合了岩性组成（Aalto et al.，2006）和非火成岩地层的年龄信息的经验混合分类方法来确定岩石的抗侵蚀强度。

$$L_E = \frac{2}{7}L \tag{10}$$

$$L = \begin{cases} \frac{L_A + L_L}{3} (\text{非火成岩}) \\ \frac{L_L}{2} (\text{火成岩}) \end{cases} \tag{11}$$

公式（10）中 L_E 为岩性的抗侵蚀强度指数， L 为岩石的强度，其值在 1~6；公式（11）中 L_A

为基于地层年龄的无量纲可侵蚀性指数，从寒武系到第四系， L_A 从 1 到 6 之间变化，越老的地层取值越小； L_L 是基于岩性强度的无量纲可侵蚀性指数， L_L 在 2（如花岗岩）到 12（如松散崩积沉积物）之间变化，越坚硬的岩石取值越低。

通过公式（10），（11）计算获得桌子山地区

表 1 岩石抗侵蚀强度分类表

Table 1 Classification of the erosion resistance values of different rocks based on the lithological strength

地层符号	岩性	岩性强度分类	地层时代	是否火成岩	L_A	L_L	L_E
Q ₄	冲积、湖积、风积砂土、粘土、砂砾	松散沉积物	第四系全新统	否	6.0	12	1.71
Q ₃	湖积洪积砂砾层	松散沉积物	第四系上更新统	否	6.0	11	1.62
Q ₂	冲洪积半固结砂层、砂土层	半固结沉积物	第四系下更新统	否	6.0	11	1.62
N	桔黄色泥质砂砾岩、细砂岩	弱的沉积岩	新近系	否	5.8	10	1.50
E	砖红色泥岩、细砂岩、砂质泥岩	弱的沉积岩	古近系	否	5.2	10	1.45
K	杂色砂岩、砂砾岩	弱的沉积岩	白垩系	否	4.2	10	1.35
J	黄绿色砂岩与泥岩互层，黑色页岩与钙质砂岩互层	弱的沉积岩	侏罗系	否	3.3	10	1.27
T	灰紫色砂岩与紫色泥岩互层、细粒长石石英砂岩	弱的沉积岩	三叠系	否	2.7	10	1.21
P	紫红色细粒砂岩、灰白色砂岩	强的沉积岩	二叠系	否	2.5	4	0.62
C	灰黑—黑色页岩、灰黑色粉砂质页岩	弱的沉积岩	石炭系	否	1.8	10	1.12
O	青灰色厚层灰岩、灰色白云质灰岩	强的沉积岩	奥陶系	否	1.2	4	0.50
Є	灰岩、鲕状灰岩、竹叶状灰岩	强的沉积岩	寒武系	否	1.0	4	0.48
Pt	中粒石英砂岩、紫红色页岩、白云质灰岩夹石英砂岩	强的沉积岩	长城系	否	1.0	6	0.67
Ar	黑云母斜长片麻岩	变质岩	前长城系	是	0.0	2	0.29
γ ₂	元古代花岗岩	花岗岩	元古代	是	0.0	2	0.29

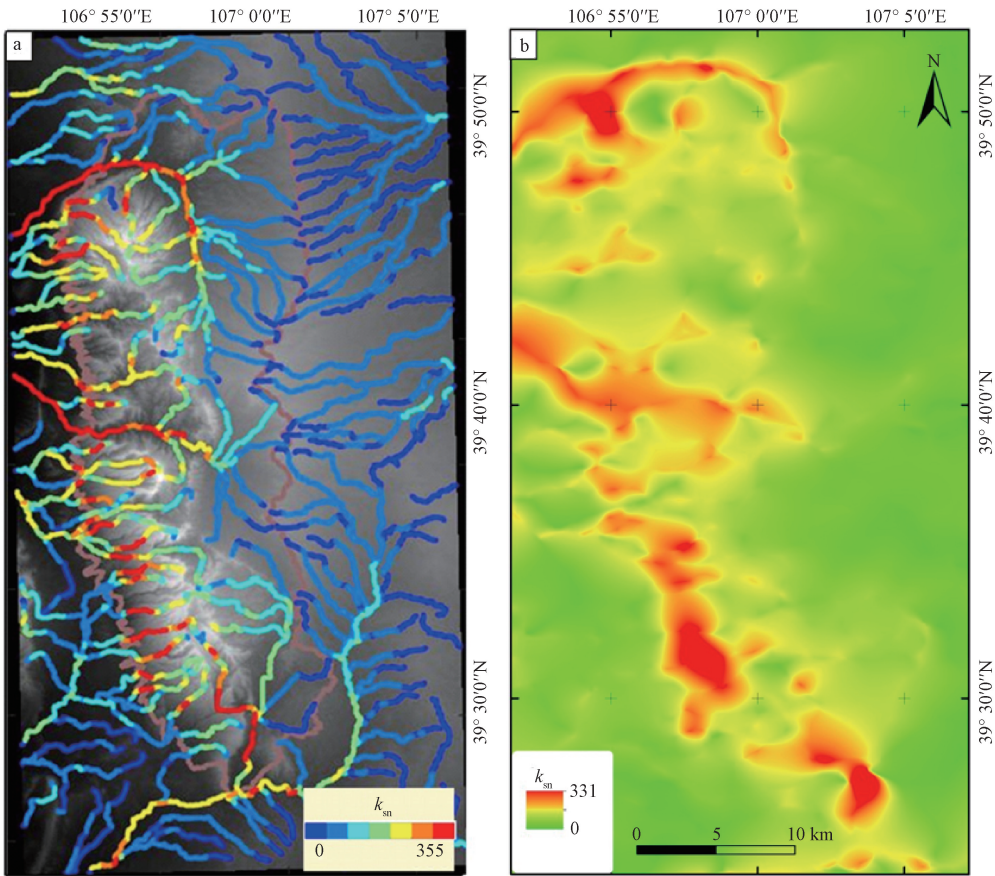
Collignon et al.（2016）通过数值模拟来评估和分析流经褶皱区的水系模式，得出流经褶皱区的横向河流能否从前陆盆地穿过褶皱核部到达腹地，取决于流经褶皱区域上下地层的抗侵蚀能力之比。当上层地层比下伏地层更易侵蚀时，河流不会穿越褶皱核部，而是侧向偏转改道；反之，当下伏地层比上层地层更易侵蚀时，河流就会一直溯源，穿过褶皱核部，到达腹地。这正好可以解释桌子山西翼横向河流的两种模式，桌子山中部的苏拜沟沟谷已经切割到寒武系和奥陶系的灰岩，该岩性比下伏地层中元古宙长城系（Pt）中粒石英砂岩、紫红色页岩、白云质灰岩夹石英砂岩的抗侵蚀能力更强，所以河流切穿了分水岭。苏拜沟北侧的霍尔格沟和毛尔沟也有相同的岩性特征，因此，霍尔格沟和毛尔沟也继续向东穿越。在背斜核部，抗侵蚀能力最强的元古宙黑云母斜长片麻岩出露为最上面的地层时，也符合下伏地层比上层地层更易侵蚀，河流也会继续穿越背斜核部，形成穿越型横向河流。而西翼其他河流源头发育于中元古宙长城系的砂岩内的河流则相反，其上层地层比下伏地层更易侵蚀，则河流不会穿越核部，而是侧向偏转。

的岩性抗侵蚀强度指数 L_E （表 1，图 2b）。从结果看桌子山背斜西翼大面积出露的寒武系、奥陶系灰岩的抗侵蚀强度要大于东翼石炭系—白垩系以沉积碎屑岩为主岩性的抗侵蚀强度，因此西翼河道具有更大的河道坡度和更快的下切能力，迫使分水岭将向东迁移。

桌子山地区的河流陡峭指数空间分布显示，西翼河流陡峭指数大，特别是流经寒武系、奥陶系的灰岩地区的河流（图 6a、6b）。由于桌子山东西两侧构造抬升速率无明显差异，且两侧水系的侵蚀基准相同，因此河流陡峭指数主要受桌子山东西两侧侵蚀系数 K 差异的影响。桌子山背斜西翼寒武纪（Є）和奥陶纪（O）灰岩盖板的抗侵蚀能力强（即侵蚀系数 K 较小），使得河道陡峭指数较大，从而导致水系 chi（ χ ）值较小，河流的袭夺能力更强，促使分水岭向背斜东翼迁移。因此，岩性抗侵蚀能力的差异是桌子山分水岭向东迁移的主要因素。

3.2 桌子山水系演化过程

许多研究证实侵蚀基准面的变化将对河流体系造成影响，即当基准面上升将造成河流的溯源堆积，基准面下降造成河流的溯源侵蚀（Davis, 1899）。从桌子山地区现今的河流分布看，不管是西侧的河流直接汇入黄河还是东侧的河流先汇入山前纵向河流再汇入黄河，黄河都是该地区河流的局部侵蚀基准面。而在西坡中部的大河和两端的河流切穿桌子山之前，桌子山东西坡的河流具有不同的侵蚀基准面，西坡还是和现在一样汇入



a—桌子山河道陡峭指数分布图; b—河道陡峭指数归一后插值图

图 6 桌子山地区域河道陡峭指数分布图

Fig. 6 Diagrams showing the distribution of channel steepness index in the Zhuozishan area. (a) Distribution of the channel steepness index in the Zhuozishan area. (b) Interpolation map of the channel steepness index after normalization

黄河, 东坡的河流则是流入鄂尔多斯高原。绕着鄂尔多斯高原边界流动的黄河自然比高原面低, 因此, 该阶段桌子山地区西坡的河流较东坡河流具有更低的局部侵蚀基准面, 河流的溯源侵蚀能力更强, 促使西坡的河流穿越背斜端部和核部袭夺东坡的河流。当水系贯穿背斜后, 东西两坡具有相同的侵蚀基准面后, 岩性抗侵蚀能力差异则成为控制东西两侧河流侵蚀能力差异的主要因素。

4 结论

(1) 通过对桌子山地区的水系样式分析得出该地区东西坡的水系均为垂直于构造线的横向河流, 但存在两种模式, 其中穿越背斜核部的河流可能有袭夺事件发生。

(2) 描述分水岭的动态迁移过程的地貌参数 χ (X) 值显示桌子山地区东坡高西坡低, 表明该区的分水岭处于不稳定状态, 将可能进一步向东

迁移。

(3) 在桌子山东西两侧的构造升降和降水条件都无明显差异的条件下, 岩性抗侵蚀能力差异是控制桌子山分水岭向东迁移的主要因素, 当抗侵蚀能力更强的寒武系、奥陶系灰岩位于背斜西翼, 而其他时代抗侵蚀能力较弱的中元古宙长城系 (Pt) 中粒石英砂岩、紫红色页岩、白云质灰岩夹石英砂岩等靠近背斜核部时, 背斜西翼的河流具有更强的侵蚀能力, 西翼河流将可能穿过背斜核部, 进而侧向袭夺东侧的河流。

致谢: 匿名审稿专家对本文提出宝贵的建设性意见, 让笔者获益良多, 在此一并表示感谢!

References

AALTO R, DUNNE T, GUYOT J L, 2006. Geomorphic controls on Andean denudation rates [J]. The Journal of Geology, 114 (1): 85-99.

AGLIARDI F, CROSTA G B, FRATTINI P, et al., 2013. Giant non-

- catastrophic landslides and the long-term exhumation of the European Alps [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 365: 263-274.
- BISHOP P, 1995. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 19 (4): 449-473.
- BONNET S, 2009. Shrinking and splitting of drainage basins in orogenic landscapes from the migration of the main drainage divide [J]. *Nature Geoscience*, 2 (11): 766-771.
- CAMPFORTS B, VANACKER V, HERMAN F, et al., 2020. Parameterization of river incision models requires accounting for environmental heterogeneity: insights from the tropical Andes [J]. *Earth Surface Dynamics*, 8 (2): 447-470.
- CLARK M K, SCHOENBOHM L M, ROYDEN L H, et al., 2004. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns [J]. *Tectonics*, 23 (1): TC1006.
- COLLIGNON M, YAMATO P, CASTELLTORT S, et al., 2016. Modeling of wind gap formation and development of sedimentary basins during fold growth: application to the Zagros Fold Belt, Iran [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41 (11): 1521-1535.
- DAVIS W M, 1899. The geographical cycle [J]. *The Geographical Journal*, 14 (5): 481-504.
- FORTE A M, WHIPPLE K X, 2018. Criteria and tools for determining drainage divide stability [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 493: 102-117.
- FORTE A M, WHIPPLE K X, COWGILL E, 2015. Drainage network reveals patterns and history of active deformation in the eastern Greater Caucasus [J]. *Geosphere*, 11 (5): 1343-1364.
- GOREN L, WILLETT S D, HERMAN F, et al., 2014. Coupled numerical-analytical approach to landscape evolution modeling [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39 (4): 522-545.
- HANCOCK G S, ANDERSON R S, 2002. Numerical modeling of fluvial strath-terrace formation in response to oscillating climate [J]. *GSA Bulletin*, 114 (9): 1131-1142.
- HOWARD A D, 1965. Geomorphological systems; equilibrium and dynamics [J]. *American Journal of Science*, 263 (4): 302-312.
- KANG Y Z, XING S W, LI H J, et al., 2019. Features of structural systems in northern China and its control on basin and hydrocarbon distribution [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (6): 1013-1024. (in Chinese with English abstract)
- KIRBY E, WHIPPLE K X, 2012. Expression of active tectonics in erosional landscapes [J]. *Journal of Structural Geology*, 44: 54-75.
- KORUP O, CLAGUE J J, HERMANN S R L, et al., 2007. Giant landslides, topography, and erosion [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 261 (3-4): 578-589.
- LIANG K, 2019. Late quaternary tectonic activity characteristics of the northwestern margin of the ordos block [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administrator. (in Chinese with English abstract)
- LIU R, MA B Q, 2014. Preliminary study on the western margin fault of Zhuozhi Mountain [J]. *Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics* (26): 68-82. (in Chinese with English abstract)
- LIU X D, SUN H, MIAO Y F, et al., 2015. Impacts of uplift of northern Tibetan Plateau and formation of Asian inland deserts on regional climate and environment [J]. *Quaternary Science Reviews*, 116: 1-14.
- MAHER E, HARVEY A M, FRANCE D, 2007. The impact of a major Quaternary river capture on the alluvial sediments of a beheaded river system, the Rio Alias SE Spain [J]. *Geomorphology*, 84 (3-4): 344-356.
- MATHER A E, 2000. Impact of headwater river capture on alluvial system development: an example from the Plio-Pleistocene of the Sorbas Basin, SE Spain [J]. *Journal of the Geological Society*, 157 (5): 957-966.
- PERRON J T, ROYDEN L, 2013. An integral approach to bedrock river profile analysis [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38 (6): 570-576.
- PRINCE P S, SPOTILA J A, HENIKA W S, 2010. New physical evidence of the role of stream capture in active retreat of the Blue Ridge escarpment, southern Appalachians [J]. *Geomorphology*, 123 (3-4): 305-319.
- PRINCE P S, SPOTILA J A, HENIKA W S, 2011. Stream capture as driver of transient landscape evolution in a tectonically quiescent setting [J]. *Geology*, 39 (9): 823-826.
- PRITCHARD D, ROBERTS G G, WHITE N J, et al., 2009. Uplift histories from river profiles [J]. *Geophysical Research Letters*, 36 (24): L24301.
- STOKES M, MATHER A E, HARVEY A M, 2002. Quantification of river-capture-induced base-level changes and landscape development, Sorbas Basin, SE Spain [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 191 (1): 23-35.
- TUCKER G E, SLINGERLAND R, 1997. Drainage basin responses to climate change [J]. *Water Resources Research*, 33 (8): 2031-2047.
- VACHERAT A, BONNET S, MOUTHEREAU F, 2017. Drainage reorganization and divide migration induced by the excavation of the Ebro basin (NE Spain) [J]. *Earth Surface Dynamics Discussions*, doi: 10. 5194/esurf-2017-53.
- WHIPPLE K X, 2001. Fluvial landscape response time: how plausible is steady-state denudation? [J]. *American Journal of Science*, 301 (4-5): 313-325.
- WHIPPLE K X, FORTE A M, DIBIASE R A, et al., 2017. Timescales of landscape response to divide migration and drainage capture: Implications for the role of divide mobility in landscape evolution [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122 (1): 248-273.
- WHIPPLE K X, TUCKER G E, 1999. 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*, 104 (B8): 17661-17674.
- WILLETT S D, 1999. Orogeny and orography: the effects of erosion on the structure of mountain belts [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104 (B12): 28957-28981.

WILLETT S D, MCCOY S W, PERRON J T, et al. , 2014. Dynamic reorganization of river basins [J]. Science, 343 (6175): 1248765.

XU D Z, LI S H, YIN H Q, et al. , 2018. Late quaternary activity characteristics of western piedmont fault of Gangdeershan in the Wuhai fault depression, Inner Mongolia [J]. China Earthquake Engineering Journal, 40 (1): 92-100. (in Chinese with English abstract)

YANG R, WILLETT S D, GOREN L, 2015. In situ low-relief landscape formation as a result of river network disruption [J]. Nature, 520 (7548): 526-529.

ZHAO H G, LIU C Y, WANG F, et al. , 2006. Structural division and characteristics in western edge of Ordos basin [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27 (2): 173-179. (in Chinese with English abstract)

ZHENG W J, ZHANG P Z, YUAN D Y, et al. , 2019. Basic characteristics of active tectonics and associated geodynamic processes in continental China [J]. Journal of Geomechanics, 25 (5): 699-721. (in Chinese with English abstract)

ZHUO Y Z, 2015. The mesozoic and cenozoic uplift events and tectonic significance of Zhuozishan area in the northwest margin of Odros basin

[D]. Xi'an: Northwest University. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

康玉柱, 邢树文, 李会军, 等, 2019. 中国北方地区构造体系控盆作用与控油分布规律 [J]. 地质力学学报, 25 (6): 1013-1024.

梁宽, 2019. 鄂尔多斯块体西北缘晚第四纪构造活动特征研究 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所.

刘睿, 马保起, 2014. 桌子山西缘断裂的初步研究 [J]. 地壳构造与地壳应力文集, (26): 68-82.

徐东卓, 李胜虎, 尹海权, 等, 2018. 内蒙古乌海断陷岗德尔山西麓断裂晚第四纪特征分析 [J]. 地震工程学报, 40 (1): 92-100.

赵红格, 刘池洋, 王峰, 等, 2006. 鄂尔多斯盆地西缘构造分区及其特征 [J]. 石油与天然气地质, 27 (2): 173-179.

郑文俊, 张培震, 袁道阳, 等, 2019. 中国大陆活动构造基本特征及其对区域动力过程的控制 [J]. 地质力学学报, 25 (5): 699-721.

卓鱼周, 2015. 鄂尔多斯盆地西北部桌子山地区中-新生代隆升事件的确定及其构造意义 [D]. 西安: 西北大学.

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

