



引文格式: 段丰浩, 王芊, 李永军, 等. 青藏高原东北缘黄河流经带地质构造特征及成因机制: 以兰州-中卫沙坡头河段为例[J]. 西北地质, 2026, 59(2): 1-12. DOI: 10.12401/j.nwg.2025032

Citation: DUAN Fenghao, WANG Qian, LI Yongjun, et al. Tectonic Characteristics and Mechanism of the Yellow River Flowing Zone on the Northeasten Qinghai-Tibet Plateau: Example from Lanzhou-Shapotou Section[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(2): 1-12. DOI: 10.12401/j.nwg.2025032

青藏高原东北缘黄河流经带地质构造特征及成因 机制: 以兰州-中卫沙坡头河段为例

段丰浩^{1,2}, 王芊³, 李永军^{3,*}, 彭建兵^{1,2}, 王盼龙³, 程三友³

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省黄河科学研究院, 陕西 西安 710054;

3. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 青藏高原是印度板块向北挤入碰撞时, 遭遇阿拉善和鄂尔多斯两个斜向稳定刚性块体的联合阻挡作用, 所形成的一系列 NW-SE 向的造山隆起带。造山过程中, 形成了多条 NW-SE 向的巨型断裂带和 NE 向张性走滑断裂带。兰州-中卫一带位于青藏高原的东北缘, 壮观的 NW-SE 向山系和相间的凹陷带, 以及 NE 向断裂带由此而形成。这些 NE 向断裂在第四纪强烈活动, 产生了劈山开谷导河的重要作用, 造就了黄河河道分别于兰州罗泉湾、景泰县五佛乡两地, 突然 NE 向拐弯横穿或斜穿 NW-SE 向山系。黄河河道大多产于大地构造单元结合部和区域性断裂带形成的构造破碎带、断层碎裂岩带中。断裂构造是控制河道延伸与拐弯, 尤其是劈山开谷、引导黄河偏离原主河道方向, 大角度短线式横穿或斜穿山系的主控因素。

关键词: 黄河; 河道成因; 大角度拐弯; 青藏高原; 兰州-中卫

中图分类号: P548

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)02-0001-12

Tectonic Characteristics and Mechanism of the Yellow River Flowing Zone on the Northeasten Qinghai-Tibet Plateau: Example from Lanzhou-Shapotou Section

DUAN Fenghao^{1,2}, WANG Qian³, LI Yongjun^{3,*}, PENG Jianbing^{1,2}, WANG Panlong³, CHENG Sanyou³

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University,

Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Academy of Yellow River Sciences of Shaanxi Province, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. School of Earth

Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The Qinghai-Tibetan Plateau is composed of a series of NW-SE-trending orogenic uplift belts

收稿日期: 2024-07-30; 修回日期: 2025-02-05; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项“黄河九道弯形成与演化研究”(300102274902), 陕西省“双一流”建设专项“黄河流域地质图编制”, 国家自然科学基金项目(42041006、41790440、42202022), 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBQN-0324)联合资助。

作者简介: 段丰浩(1991-), 男, 讲师, 主要从事构造地质学研究。E-mail: chddf@163.com。

* 通讯作者: 李永军(1961-), 男, 博士生导师, 主要从事区域地质学及构造地质学教学与科研。E-mail: yongjunl@chd.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

formed by the joint obstruction of two obliquely stable rigid blocks, Alxa and Ordos, when the Indian Plate was squeezed and collided with the Eurasian Plate to the north. Several NW-SE-trending giant fault zones and NE-trending extensional strike-slip fault zones were formed during the orogenic process. Lanzhou-Zhongwei area is located in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau, where the spectacular NW-SE mountain system and alternating depression zones, as well as the NE-trending fault zones were thus formed. These NE-trending faults were strongly active during the Quaternary, which played an important role in splitting mountains, expanding valleys and guiding rivers, resulting in suddenly turning NE of the Yellow River channel and crossing or obliquely crossing the NW-SE-oriented mountain ranges at Luoquanwan of Lanzhou and Wufo of Jingtai, respectively. The Yellow River channel is mostly produced in the junction of tectonic units, and tectonic fracture zones, fault cataclastic rock zones formed by regional fault zones. The fault structure is the main controlling factor for the extension and turning of river channels, especially for splitting mountains, expanding valleys and guiding the Yellow River to deviate from its original direction, crossing or obliquely crossing the mountain ranges in a short-line, large-angle manner.

Keywords: Yellow River; Causes of riverway; large angle turning; Qinghai-Tibet Plateau; Lanzhou-Zhongwei

长期以来,地貌演化对黄河的形成与演化有决定性作用,并且将夷平面视为确定深切河谷(潘保田等, 1995, 1996, 2002; Pan et al., 2012; 莫钦鸿, 2022)以及河流形成演化最直接的证据(Maddy et al., 2001; Pan B et al., 2011; Hu et al., 2016)。基于这一基本思想,有两个极为重要的问题值得深思:一是地貌演化对黄河之所以能产生一定作用,是建立在“构造相对稳定的背景下,长期的侵蚀作用使前期形成的地层、构造变形和地形被夷平,最终形成跨水系并逐渐降低直至与海平面平缓衔接的准平原”这一理论基础上(李吉均, 1996, 1998, 1999)。然而,黄河的形成与演化,多是发生在构造相对活跃时期,尤其是断裂构造发育极为强烈的过程中(Holbrook et al., 1999; Wang et al., 2014; Su et al., 2019; 李正晨等, 2021)。已有大量地质事实证明,现代大型河流的源头大多位于大型造山带(林旭等, 2023),地球上一旦发生大规模的洋—陆、陆—陆碰撞,构造隆起过程可能产生大型河流(Brookfield et al., 1998; 刘静等, 2018);二是究竟是河流塑造地表地貌?还是地貌在约束控制河道?如果地貌演化过程是河流形成、发育与演化的主控因素,又是什么机制在控制地貌的演化过程。即,真正直接约束控制河道的机制究竟是什么?

地貌学尤其是夷平面是以记录深切河谷形成的过程、时间等为主线。黄河的形成与演化中,另一个极为重要的记录信息是河道的产出位置、形态与变化、河道与两岸地质体间的关系,尤其是离开原流向,突然折线式大角度(大多呈直角状)拐弯,横穿地势上总

体相对较高的山系,这显然难以用地貌学观点合理解释,是否还有比地貌演化更重要、更直接的诱发因素或控河机制?黄河的突然改道,是在突发构造重大事件条件下,而非构造相对稳定的背景。在银川和河套地区,黄河河道沿主要断裂带(如贺兰山东麓断裂和银川地堑)展布,晚新生代以来的构造演化,控制着河道空间分布河流的侵蚀和沉积过程,断裂活动导致的局部抬升和沉降是黄河河道改道与地貌演化的重要驱动力(Deng et al., 1984; Zhang et al., 1990)。因此,阶地、夷平面等地貌记录,尽管对河流的形成与演化有一定的价值,但寻找更为直接的证据是本文的主题。

青藏高原是一个由多条山脉与相间条带状盆地复合而成的造山系,总体 NWW-NW 向延伸并且略向 NE 凸出,地势上整体西高东低。发育在青藏高原东北段的黄河,按常理应该沿着高原两山系夹持的近 SEE 向盆地向东流淌,但为何河道在某些地段不合常理,没有沿着山前顺地势自然东流,而是突然发生大角度拐弯,横穿或斜穿地貌上远高于原河道的山系。

第一个实例是黄河兰州段在榆中县罗泉湾的诡异拐弯。西固—兰州段的河道在 NWW-SEE 向南、北两山夹持的断陷盆地中(图 1)。河之南为兰州南山(属皋兰山系),河之北为白塔山—马刺梁—魏家大山。从地貌地势上来看,兰州市雁滩以东直至榆中县罗泉湾一带,仍然处在两山夹一河的总体格架内,罗泉湾及其以东的金崖镇(海拔 1 550 m)—夏官营镇一带仍是兰州盆地的东沿段,与兰州中山黄河铁桥处的海拔 1 520 m 接近,从白塔山—夏官营镇之北的王家山一带,

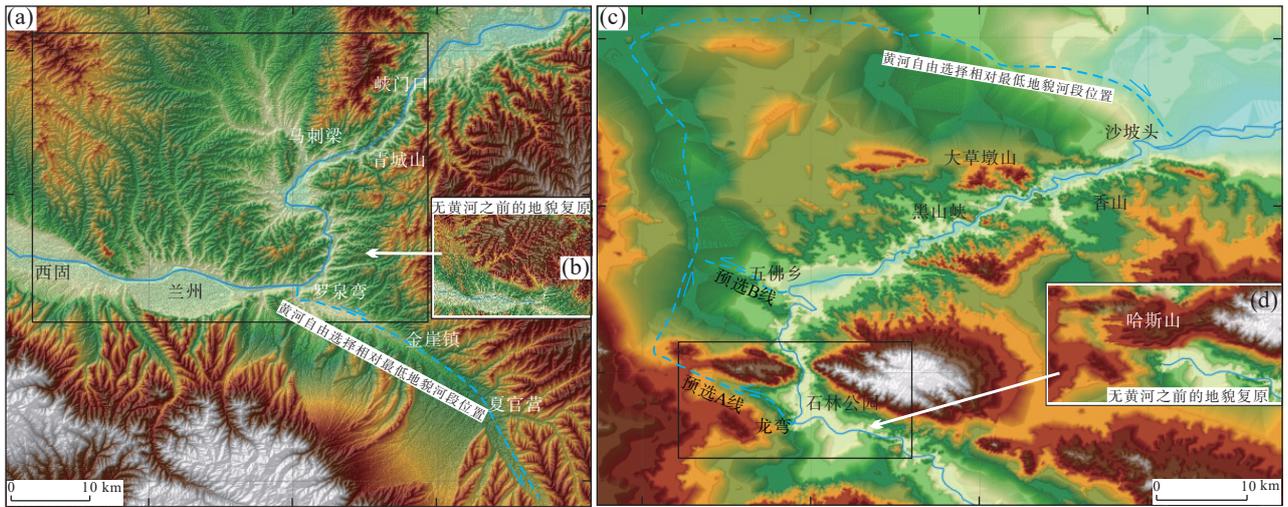


图1 兰州市—皋兰县峡门口(a~b)及景泰县石林公园—中卫市沙坡头(c)黄河流域地貌图

Fig. 1 Geomorphological map of Lanzhou-Xiamenkou of Gaolan County (a~b) and Jingtai stone forest geopark-Shapotou of Zhongwei (c) of the Yellow River Basin

山系总体连续, 山脉的走向并未发生较大变化, 如果没有断裂的破坏和现今黄河河道的侵蚀, 马刺梁与青城山之间不会存在大的峡谷, 总体可能是相连的(图1b), 尤其是罗泉湾—金崖镇是一个与兰州盆地走向相连的河床阶地(图1a), 可以推测, 如果黄河一直由罗泉湾向东, 金崖镇、夏官营镇一带的河谷海拔如果有黄河的侵蚀作用发生, 极易低于兰州中山黄河铁桥处的海拔1520 m, 从河道流向趋势和古地貌地形来看, 河道应该首选罗泉湾向金崖镇方向流淌, 向东后极容易汇入渭河。也有文献指出, 黄河曾经在始新世于此地东流汇入渭河(Lin Aiming et al., 2001)。但奇怪的是, 在更新世之后, 黄河却在罗泉湾大角度(夹角约100°)短线式拐弯NE向横穿白塔山(海拔1553 m)—魏家大山(海拔2371 m)—青城山(海拔2484 m)。

第二个实例是黄河诡异穿越景泰县五佛乡—中卫市沙坡头段(图1c)。黄河到达石林公园之西的龙湾村后, 并没有选择沿NWW向盆山边缘凹陷带(预选A线)前行, 而是近S-N向横穿哈思山(如果没有石林公园一带近SN向断裂作用和黄河的侵蚀, 哈思山东西两端总体极大可能是相连的(图1d)), 并且到达五佛乡后也没有选择沿五佛乡(海拔1300~1400 m)—景泰县城(海拔1274 m)方向相对低洼的山前洪积阶地(预选B线)前行, 而是斜穿海拔远高于五佛乡—景泰县城的大草墩山(海拔1691~2113 m)、香山(西段海拔1580~1914 m)NEE向前行。此外, 黄河流域此类横穿山脉的河道还有青藏高原青海省达日县德昂

乡—玛沁县科赛村一带, 以及青海省同德县罗果鲁—兴海县曲什安—兴海县唐乃亥—龙羊峡河段等。

上述横穿山脉各河段的共同特点是, 黄河从原有的平行山系(主构造线)突然转向近直角状横穿或斜穿原山系, 拐点处与两端的河道连线呈近直线型, 共同构成了显示几何学样式的大角度而非不规则弧形或是圆滑样式? 这一诡异现象引起了笔者的好奇, 探索其成因是本文的核心科学问题。

本文选择黄河从兰州至沙坡头流域内的2次诡异拐弯横穿山脉河段, 查寻河道拐弯的原因, 探索其形成机制, 完善和丰富有关黄河河道拐弯的成因机制与理论分析。

1 兰州东—峡门口一带黄河河道地质构造特征及控河机制

1.1 兰州东—峡门口一带地质构造

兰州东—峡门口一带位处中祁连构造带(图2a)。区内最老地质体为中元古代皋兰岩群(Pt_2G_1), 为黑云石英片岩、石榴十字黑云石英片岩、石榴石黑云母片岩或黑云母片岩和黑云角闪片岩组合; 不整合覆于其上者为白垩纪河口群, 河口群下部为辫状河相紫红色、黄灰色厚层—块状砾岩夹少量同色砂岩和泥岩, 上部为河湖相紫红色泥岩夹紫灰色中—薄层状细砂岩夹灰绿色条带。区内侵入岩极为发育, 侵入于皋兰岩群中, 产出受NNE向构造控制, 主要有早志留世乌金峡闪长

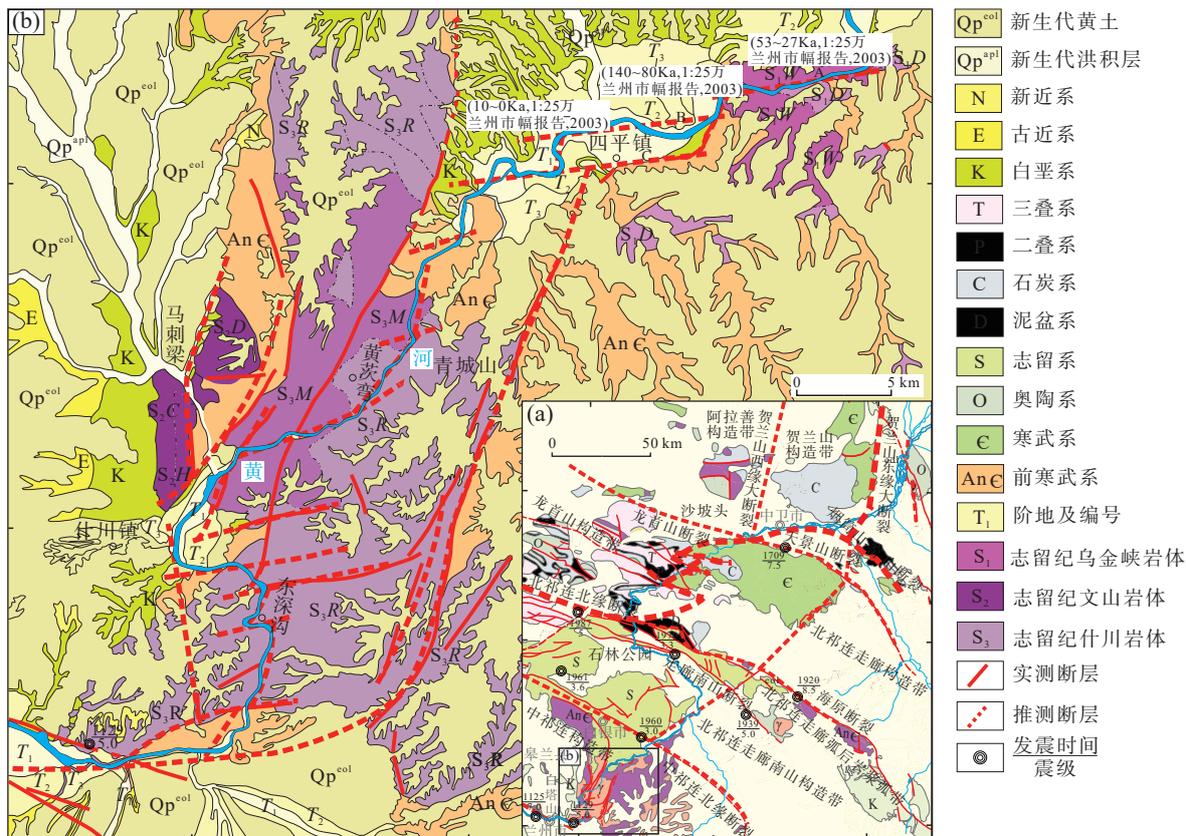


图2 兰州-中卫沙坡头地质构造图(a)、兰州东—峡门口一带黄河河道横穿山脉地质构造图
(据 1 : 25 万兰州市幅地质图改编)(b)

Fig. 2 (a) Lanzhou-Zhongwei Shapotou Geological Tectonics, (b) Geological structure map of the Yellow River crossing the mountain range in eastern Lanzhou-Xiamentou (modified from 1 : 250 000 Lanzhou geological map)

岩和晚志留世什川二长花岗岩,河口群不整合于其上。

大量的低温热年代学、沉积学和古地磁学等方法约束了祁连山新生代在 55~40 Ma(常宏等, 2009; Lin Xu et al., 2019)、30~25 Ma(Lu Haijian et al., 2022; Wang Weitao et al., 2022)、15~7 Ma(Lin Xiubin et al., 2010; Zheng Dewen et al., 2017; Hu Xiaofei et al., 2019)和~3.6 Ma(Li Jijun et al., 2014; Fang Xiaomin et al., 2019)存在显著的变形、隆升造山与生长过程。

第四系主要为黄河阶地冲洪积堆积。中南部以三级阶地疏松砂砾石层夹土黄色含砂砾亚砂土为主,而在峡门口—四平镇一带还有一、二级堆积阶地。一、二、三级阶地的黄河下切速率分别为 50~100、58~77、70~80 cm/ka,下切时间分别为 10~0、53~27、140~80 ka,依据 ^{14}C 获得的下切时间为 6 680~141.39 ka(甘肃地质调查院, 2003)。区内断裂构造极为发育,主要有 NNE 向和 NEE 向(近 E-W 向)两组。在马刺梁及其南西段还见有一条近 S-N 向断裂。

NNE 向断裂,以十字沟断裂为代表,是一条左旋

走滑断裂,倾角 55°~80°,切割皋兰岩群、什川岩体和白垩纪河口群。断裂规模大,次级断裂发育,具多期活动特征,尤其在新近纪以来表现为活动断裂,如黄茨弯、东深沟、青城山、四平镇等断裂,早期主要为挤压破碎带。十字沟断裂晚期的张性裂缝带 ESR 测年为 73 ka(甘肃地质调查院, 2003)。十字沟断裂与海原断裂带等共同构成祁连构造带的复杂断裂系统,在地表表现为线性沟谷、断层崖和错断地貌。

NEE(近 E-W)向断裂早期为逆断层,破碎带由碎裂岩、断层角砾岩、断层泥组成,极破碎,次级断裂发育,主断裂面发育复合与分叉等多期活动痕迹;晚期主要表现为左行走滑张裂。如金城关—沙金坪正断层(F_{19})和刘家堡正断层(F_{18})为兰州盆地的控盆断裂,垂直断距最大可达 250 m(何文贵等, 2008),其南盘在第四系多级阶地后缘见一系列次级正断层,两断层分别于 1125 年、1129 年发生 7 级、5 级地震,金城关—沙金坪断裂最新年代约为 10 ka(赵振明等, 2003)。宋家沟冲断层(F_{10})控制着兰州盆地和七里河盆地的南界。

断层南盘河口群逆冲在北盘第四系及新近系之上。

1.2 罗泉湾—峡门口一带断裂构造与河道成因分析

NNE 向断裂是区内早期断裂, 切断大多数地质体, 并控制盆—山边界及区内微地貌走向。该区河道总体为 NNE 向延伸, 占比极高的河段主要产于该组断裂带中, 少数小河段河道产于此组两条平行断裂夹持的碎裂化岩块密集小断裂带中。NNE 断裂是最早开谷成河断裂, 引导黄河离开兰州—罗泉湾段近 E-W 向河道转而近 90° 夹角向北前行。

NEE 向(局地近 E-W 向)断裂是区内晚期断裂, 大多因左行走滑, 导致早期 NNE 向断裂组被错断后发生右旋转向, 因而才有了多数河段反复阶梯式斜列变化, 形成了区内较为规则的河道排列样式。3 地的两向断裂组间距不同, 形成了 3 组迥异的河道组合样式。同时, NNE 向断裂的左行走滑位移量的显著差异, 也导致了区内 5 处 NNE 向相对较长河道的形成(图 2b)。

马刺梁 S-N 向断裂是区内最早一期断裂, 后被 NNE 向断裂错断。自第四纪以来有过强烈活动, 因而控制了河道在什川镇的较大拐弯, 并限制了河道向西的扩展。罗泉湾—峡门口一带的河道总体显示短线式阶梯状斜列组合, 共同特点是晚期 NEE 向断裂错断

早期 NNE 断裂, 由此在东深沟、黄茨湾、四平镇等 3 地分别形成 3 组斜列式锯齿状摆动河道。东深沟晚期断裂相对密集, 错断后的断裂组纵向上由南而北逐渐变短, 总体显示出 NNE 向河段有规律阶梯式逐渐缩短变化; 黄茨湾 NNE 向间距最大, NEE 向断裂间距相较最密集, 形成的斜列式河道纵向上、下两组间距极小, 陡斜率斜列状; 而四平镇一带 NEE 向断裂间距较短, 而 NNE 向一组断裂间距最大, 形成了极缓斜率斜列状分布河道组合(图 2b)。上述 3 地的河道高频率的斜列式变道是由 3 组各自特色迥异的断裂组高频率交切形成的。

2 五佛乡—中卫沙坡头一带黄河河道地质构造特征及控河机制

2.1 五佛乡—中卫沙坡头一带地质构造

五佛乡—中卫一带, 黄河总体呈 NE 向前行。大多数河段沿两个一级大地构造单元结合部前行(图 3)。因此, 该处成为华北与祁连两个一级大地构造单元结合部的控河构造, 也是断裂构造控河的经典范例。

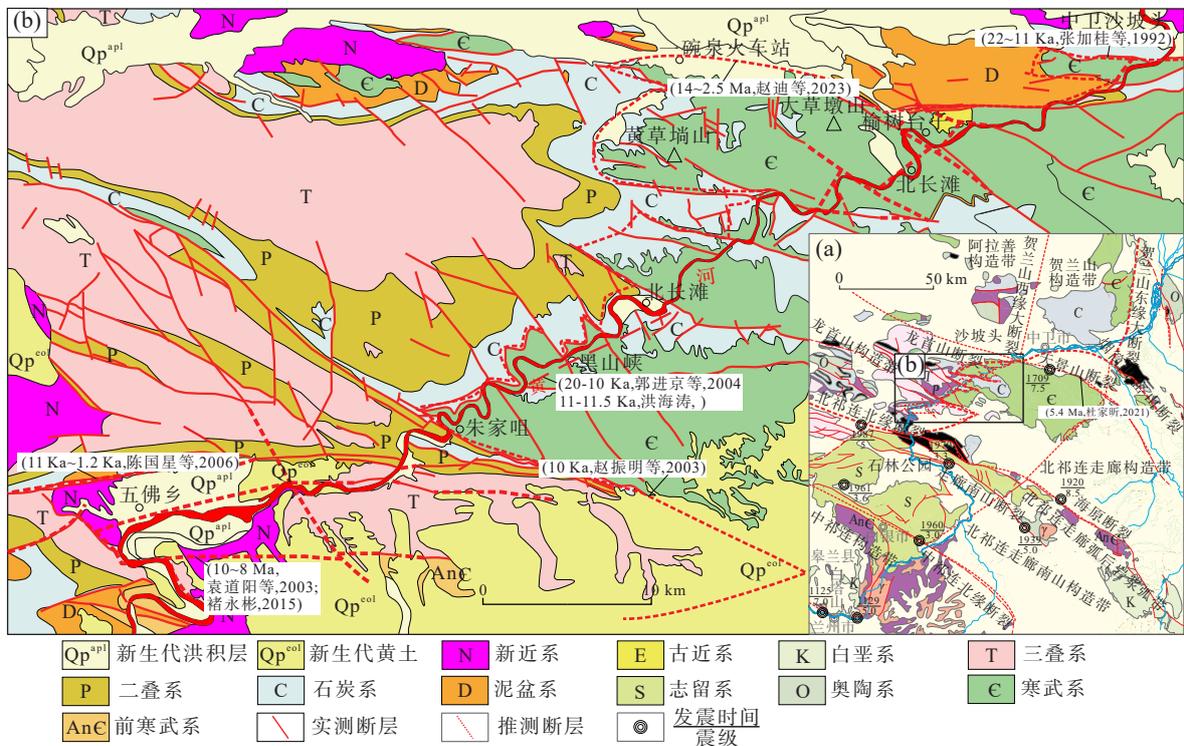


图 3 兰州-中卫沙坡头地质构造图(a)、五佛乡—中卫沙坡头一带黄河河道横穿山脉地质构造图(据 1:25 万景泰县幅地质图改编)(b)

Fig. 3 (a) Lanzhou-Zhongwei Shapotou Geological Tectonics, (b) Geological structure map of the Yellow River crossing

the mountain range in Wufu (Jingtai)-Shapotou (Zhongwei)(modified from 1 : 250 000 Jingtai geological map)

龙首山构造带:位于北祁连北缘断裂与龙首山断裂间的主构造线方向为近 E-W 向构造带,属于华北陆块西南缘构造带(图 3a)。带内主要有寒武系(徐家圈组、狼嘴子组、磨盘井组)变砂岩及砾岩,奥陶系米钵山组变砂岩夹砾岩及泥盆系、石炭系、三叠系等。晚新生代经历了~14 Ma、~5 Ma、5~2.5 Ma 共 3 次断裂带活动和强烈的山体隆升过程(赵迪等, 2023)。

北祁连走廊构造带(宁夏地质志称之为香山褶皱带): NE 以天景山断裂为界, SW 以五佛乡—海原断裂(香山南麓断裂)为界,呈 NW-NNW 向弧形展布,延伸大约 220 km(图 3a)。呈弯曲透镜状,最宽处达 50 km,带内建造主体为华北被动陆缘型奥陶系(天景山组、米钵山组、香山群),其次有泥盆系及石炭系—三叠系,山麓地带及山前盆地沉积了侏罗系、白垩系及新生代地层。燕山运动及喜马拉雅运动致使冲断带内部构造变形强烈,发育一系列线状褶皱及推覆岩席。岩席前锋为天景山北麓冲断层与尖山疙瘩推覆体,寒武系推覆到泥盆系—石炭系和新生界之上。

区内断裂早期为 NE 向,发育于两大构造带边界。近 E-W 向断裂属于第二期次断裂,规模较小,仅见于北祁连走廊构造带中部,晚期断裂最为发育,走向为 NW-NWW 向,局部转弯后近向 SW 弧形凸出并向近 E-

W 向过渡。该组断裂造成多个 NW 向断夹块不同程度的向 NW 向阶梯式走滑,形成了两大构造地质体沿接触面一带犬牙交错分布。其中在黄草塬山—大草墩山一带,走廊构造带寒武系越过黄河直抵一碗泉火车站附近(图 3b)。

2.2 五佛乡—中卫沙坡头一带断裂构造与河道成因分析

五佛乡—朱家咀河道主要位于五佛乡近 E-W 向断裂带中,朱家咀—沙坡头一带河道大部分沿两大一级构造单元结合部(部分平行河段于结合部)前行,仅在北大滩—榆树台子一带因黄草塬山—大草墩山岩片的 NW 向推覆,导致此段河道离开一级构造界面。朱家咀—沙坡头一带河道 NW 侧为华北陆块最西缘的龙首山构造带,SE 侧为祁连构造带的北祁连走廊构造带(图 3a),因此,该处成为两个一级大地构造单元结合部控河的又一实例,也是断裂构造控河的经典范例。

五佛乡之南的近 EW 向断裂是海原断裂的向西延伸发散段,在 10~8 Ma 以来发生 NE-SW 向强烈逆冲和后期走滑活动(袁道阳等, 2004; 褚永彬, 2015),滑动速率为 1~2 mm/a, 10 ka 以来的走滑速率为 5~8 mm/a,也是 1920 年海原 8.5 级大地震的发震断裂

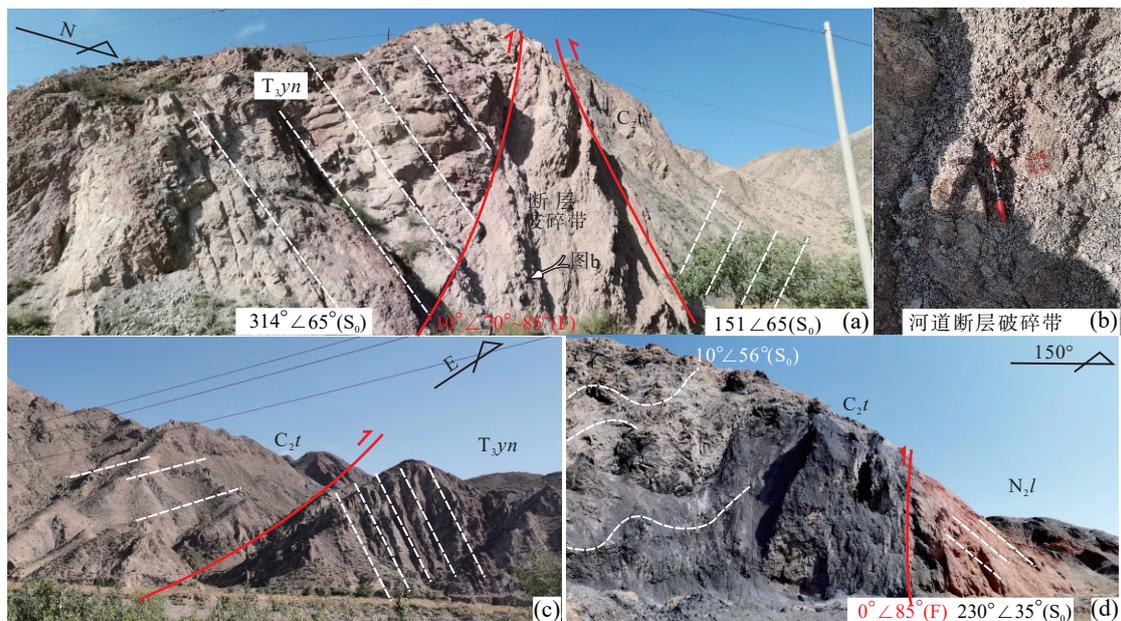


图4 五佛乡—中卫沙坡头一带黄河河道断层地质照片,地层产状示意(a)、河道断裂破碎带(b)、黄河河道断裂(c)、断裂与地层产状示意(d)

Fig. 4 Field photos of fault in Wufu (Jingtai)-Shapotou (Zhongwei) of the Yellow River, (a) Attitude of strata, (b) Channel fracture zone, (c) Faults in the course of the Yellow River, (d) Attitude of strata and fault

(中国地震局地质研究所等, 1990), 海原断裂之南的走廊南山断裂也是活动断裂, 于 1939 和 1969 年发生过 3 次 4~5 级地震。该组断裂对五佛乡之南原河道由近 SN 向改为 NEE 向起了关键作用, 控制了五佛乡—朱家咀段 NE 向延伸(图 4)。

朱家咀—北长滩一带是断裂控河的典型河段, SE 盘北祁连构造带的早古生代推覆岩片低角度逆冲于 NW 盘的龙首山石炭系之上, 并在后期多组 NW 向走滑断裂的作用下, 形成了推覆体前缘的一系列弧形断层面, 而此段内的河道几乎与弧形断面重合, 反复拐弯前行(图 3b)。NEE 向断裂是区内最主要的控河断裂, 五佛乡—沙坡头两地的连线总体平行河道方向不是偶然, 而是必然。因为区内发育一系列或平行河道, 或与河道空间上完全重合的断裂。如五佛乡—朱家咀之间的弧形断裂与河道在中南段略呈弧形有较好的形态耦合, 又如朱家咀—北长滩河段, 河道弯曲的形态与弯曲的断面极为吻合, 黑山峡大柳树坝东南的 NE 向活断层活动时间距今最近者有 30 ka 和 10 ka 两次, 断层泥测年数据小于 20 ka(郭进京等, 2004a、b), 大柳树坝 F_7 断层最晚活动时间为 11~11.5 ka(洪海涛, 2002), F_{201} 断裂中段有 27~22 ka、17.2~13.1 ka、11~7.1 ka 三次活动(张加桂等, 1992; 郭进京等, 2004b), 小红山南侧断层主破裂带最新一次破裂事件发生于 11 ka 之后 1.2 ka 之前(陈国星等, 2006), 这些均佐证了活动断裂对河道的显著控制作用。

NW 向断裂是区内仅次于 NEE 向断裂的第二组控河断裂。北部的龙首山断裂西段远离黄河, 东段与烟筒山—窑山断裂相连, 晚新生代该断裂经历了~14 Ma、~5 Ma、5~2.5 Ma 共 3 次活动和强烈的山体隆升过程(赵迪等, 2023), 沙坡头—中卫市—中宁县余丁乡南一带的黄河产于此断裂带中。其南的天景山断裂的西延段和次级断裂组, 约 5.4 Ma 开始发生逆冲活动, 2.6 Ma 由逆冲转化为左旋走滑(Wang et al., 2013; 杜家昕, 2021); 祁连山以东的海原左旋走滑断裂, 景泰段走滑速率计算为 2.3~8.9 mm/yr(袁道阳等, 1997; Li Chuanyou et al., 2009; Jolivet et al., 2013; Matrau et al., 2019; Yao Wenqian et al., 2019, 2022; Shao Yanxiu et al., 2021; Chen Peng et al., 2022; Liu Jinrui et al., 2022); 海原断裂 NW 向延伸的古浪断裂左滑速率大于 1 cm/yr(Paul Tapponnier et al., 2001; Cécile Lasserre et al., 2002)。在本研究区该断裂导致朱家咀—北长滩之间的河段, 因 NW 向断裂导致很多个走向 NW 向的短

线状拐弯, 甚至出现了多个类似于箱状构造向 NW 向的凸出。图 5 中清楚的显示出, 绝大多数河道向 NW 向的近直角状拐弯凸出部位, 总是有 NW 向断裂相随。

中卫—同心断裂带西段曾发生过 5 次古地震事件, 时间为距今 1.2~30.97 ka; 东段发生的 3 次地震事件分别为距今 294 a(1709 年地震)、5.45 ka、8.85 ka(陈国星等, 2006), 沙坡头—中宁的河道产于此断裂中, 并且对榆树台—沙坡头河段的河道有明显控制作用。一碗泉—榆树台断裂是天景山断裂和烟筒山断裂交汇后的西延次级断裂, 总体平行于中卫—同心断裂带。沙坡头一带黄河第 V 级阶地的强烈活动时段约为 0.1~0.28 Ma(冯希杰等, 2002), 佐证天景山断裂在晚更新世后有过强烈的活动, 对原 NE 向河道突然向 NW 向的直角拐弯具有重要作用。

2.3 兰州—沙坡头河段断裂形成机制与控河

有关青藏高原的隆升与构造演化研究成果丰硕, 主流观点主要有三阶段和四阶段两种划分。前者将高原隆升分为 3 个不同动力机制阶段, 即 K_2 — E_2 的碰撞挤压缓慢隆升阶段、 E_3 —N 的陆内汇聚热动力中速隆升阶段和 Q 以来的均衡调整热动力快速隆升阶段(李廷栋等, 1995); 后者认为青藏高原经历了 45~38 Ma、25~17 Ma、13~8 Ma、~3 Ma 到现在 4 次快速隆升, 平均高度达到 3 000 m(钟大赉等, 1996), 是印度板块向北挤入碰撞, 使得地壳南北方向缩短, 垂向增厚, 高原得以向外扩展(England et al., 1986)。位于青藏高原东北缘的兰州—沙坡头一带在上述造山过程中形成了主边界左旋剪切、挤压汇聚的构造带, 以及高原内部 NNW 向右旋剪切构造带等三类构造带(袁道阳等, 2004; Zheng Wenjun et al., 2013)。这三类断裂在中更新世以来有过强烈的活动, 因而对黄河的河道形成、选择、产出与分布有重要作用。

区内的 NNW 向断裂早期逆冲推覆, 晚期大型走滑均是青藏高原由 SW 向 NE 挤入的响应, 而 NE、NEE 向具有拉张性质的左行走滑断裂是青藏高原物质向北东推移过程中受到阿拉善和鄂尔多斯两个稳定刚性块体的阻挡作用, 总体上沿 NW-SE 向发生了伸展变形, 形成了一系列 NW-SE 方向的造山带和断裂带, 并在垂直山系方向发生张裂与剪切, 形成 NE 向走滑断裂带(孟文等, 2022)。NNW-NW 向断裂一是造就了青藏高原整体西高东低的大格局, 因而约束了黄河总体自西向东的流向; 二是形成了兰州—沙坡头

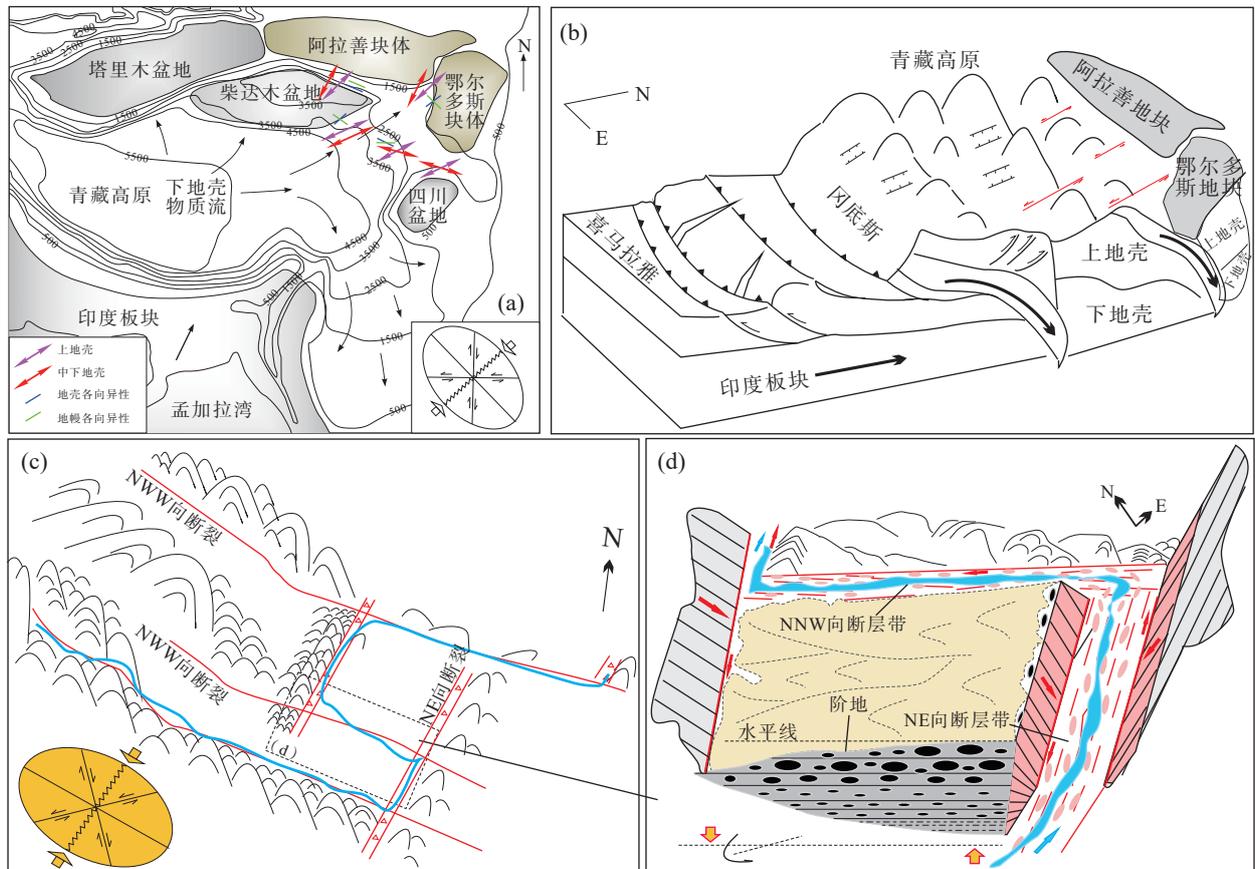


图5 青藏高原东北缘深部动力学机制示意图(据孟文等, 2022, 有改动)(a)、青藏高原隆升与S-N向断裂(据李汉敖, 2020, 有改动)(b)、黄河河道与断裂关系(c)、黄河河道形成与演化(d)

Fig. 5 (a) Deep dynamic mechanism model of the NE margin of the Tibetan Plateau (modified from Meng Wen et al., 2022), (b) Tibetan Plateau uplift and S-N fault(modified from Li Han'ao et al., 2020), (c) Relationship between the course of the Yellow River and faults, (d) Formation and evolution of the Yellow River channel

段总体山系与凹陷带的NW-SE向的走向与延伸及相间排列。

NE向断裂一是形成了沿断裂带两侧地貌上的显著差异,形成了NE向隆起与断陷相间的地貌格局和菱形构造块体;二是断裂带内多期次活动与强烈的破碎作用,为流水的侵蚀、搬运和开谷成河创造了条件,因而严格控制了兰州—中卫市沙坡头段的河道主流向,大多数河段产于NE向断裂带中,形成了总体NE向线型延伸的河道形态与格局。

印度板块多次的NE向运动与间隙回弹应力调整过程中,当受到四川地块、秦岭、鄂尔多斯地块联合构成的斜向(NNE向)基底阻挡后,加剧了NE向张性走滑断裂的活动,首先形成NE向强烈的岩石破碎带,为成谷开河创造了条件,导致河流由原SEE流向短线性大角度NE向拐弯(如罗泉湾等)。同时,导致了NWW-SEE向区域性大断裂的左行走滑,驱使NW盘

大幅度沉降,沿走滑断裂带形成东低西高的半地堑,河流向NE向前行在遇到前方下一个NWW-SEE向山脉或断裂带阻挡后,逼迫河流向NW-NWW向流趟(图5c~d)。

在本区,NE向断裂具有极为重要的劈山开谷导河的重要作用,因而形成了研究区2段河道并未沿原上游方向延伸的山前凹陷带NWW-SEE向自然流淌,而是突然发生大角度短线式拐弯,横穿或斜穿地貌上远高于原河道的NW向山系。

3 结论

青藏高原是印度板块向北挤入碰撞时,遭遇阿拉善和鄂尔多斯两个斜向稳定刚性块体的联合阻挡作用,所形成的一系列NW-SE向的造山隆起带。造山过程中,形成了多条NW-SE向的巨型断裂带和NE向

张性走滑断裂带。兰州—中卫一带位于青藏高原的东北缘, 壮观的NW-SE向山系和相间的凹陷带, 以及NE向断裂带由此而形成。

本区的NE-NEE向断裂在第四纪以来活动强烈, 具有劈山开谷导河的重要作用, 造就了黄河河道分别于兰州罗泉湾、景泰五佛乡两地, 并未沿着原上游方向延伸的山前凹陷带NWW-SEE向自然流淌, 而是突然NE向大角度短线式拐弯, 横穿或斜穿地貌上远高于原河道的山系。

罗泉湾拐弯后横穿中祁连构造带。河道大多数河段产于NE向断裂带中, 局地产于次级小断裂带、密集裂隙带中。NE向(局地过渡到近EW向)断裂经左行走滑导致NE向断裂组错断并右旋转向, 形成了数组阶梯式斜列河段。

五佛乡拐弯后河道依次穿越龙首山构造带(五佛乡—朱家咀段)、北祁连构造带(朱家咀—沙坡头段), 局部产于这两者的结合部, NE向断裂为主要控河断裂。NE向断裂遭遇后期多组NW向断裂剪切与走滑, 形成了多个箱状河道拐弯。

总之, 区内黄河河道多产于大地构造单元结合部和区域性断裂带形成的构造破碎带、断层碎裂岩带中。断裂构造是控制河道延伸与拐弯, 尤其是劈山开谷引导黄河偏离原主河道方向, 大角度短线式横穿或斜穿山系的主控因素。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 常宏, 金章东, 安芷生. 青海南山隆起的沉积证据及其对青海湖—共和盆地构造分异演化的指示[J]. 地质论评, 2009, 55(1): 49–57.
- Chang Hong, Jin Zhangdong, An Zhisheng. Sedimentary evidence of the uplift of the Qinghai Nanshan (the Mountains South to Qinghai Lake) and its implication for structural evolution of the Lake Qinghai-Gonghe Basin[J]. Geological Review, 2009, 55(1): 49–57.
- 陈国星, 田勤俭, 周本刚, 等. 黄河黑山峡大柳树坝址若干地震地质问题的研究[J]. 震灾防御技术, 2006, 1(3): 186–198.
- Chen Guoxin, Tian Qinjian, Zhou Bengang, et al. Some seismo-geological questions regarding to Daliushu Dam site in Heishanxia valley of Yellow River[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2006, 1(3): 186–198.
- 褚永彬. 祁连山地貌特征及对青藏高原隆升的响应[D]. 成都理工大学, 2015.
- Chu Yongbin. The geomorphy characteristic of Qilian Mountains and its response to Tibetan Plateau uplift[D]. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology, 2015.
- 杜家昕. 青藏高原东北缘的隆升、扩展与北部河流、沙漠地貌的形成演化研究[D]. 中国科学院空天信息创新研究院博士学位论文, 2021.
- Du Jiaxin. Role of tectonic uplift and expansion within and outside the northeastern Tibetan Plateau in the formation and evolution of river and desert landscapes[D]. Doctoral dissertation of Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- 冯希杰, 师亚芹. 宁夏沙坡头黄河大弯曲形成时代的讨论[J]. 西北地震学报, 2002, 24(4): 320–324.
- Feng xijie, Shi yaqin. Discussion on the forming time of the big winding of Yellow River in Shapotou, Ningxia Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2002, 24(4): 320–324.
- 甘肃地质调查院. (J48C004002) 兰州市幅 1: 250000 区域地质调查报告[R]. 全国地质资料馆, 2003.
- Geological Survey of Gansu Province. (J48C004002) 1: 250000 Regional Geological Survey Report of Lanzhou[R]. 2003.
- 郭进京, 杜东菊, 韩文峰, 等. 黄河黑山峡大柳树坝址区 F₂₀₁ 和 F₍₇₍₈₎₎ 断层的活动性[J]. 地质通报, 2004b, 23(12): 1259–1264.
- Guo Jinjing, Du Dongju, Han Wenfeng, et al. Activity of faults F₇₍₈₎ and F₂₀₁ in the Daliushu dam region, Heishan Gorge of the Yellow River[J]. Geological Bulletin of China, 2004b, 23(12): 1259–1264.
- 郭进京, 杜东菊, 韩文峰, 等. 青藏高原东北缘黄河黑山峡出口段阶地特征与断层活动[J]. 工程地质学报, 2004a, 12(4): 367–372.
- Guo Jinjing, Du Dongju, Han Wenfeng, et al. The characteristics of river terraces and activity of the faults in the outlet of Heishan Gorge of the Yellow River, the northeast Tibetan Plateau[J]. Journal of Engineering Geology, 2004a, 12(4): 367–372.
- 何文贵, 袁道阳, 葛伟鹏, 等. 兰州市金城关断层的活动特征[J]. 中国地震, 2008, 24(3): 247–252.
- He Wengui, Yuan Daoyang, Ge Weipeng, et al. Characteristics of activities of the Jinchengguan Fault in Lanzhou[J]. Earthquake Research in China, 2008, 24(3): 247–252.
- 洪海涛. 黄河大柳树水利枢纽主要工程地质问题及评价[J]. 水利水电工程设计, 2002, 21(2): 16–19+24.

- Hong Haitao. Main engineering geological problems and evaluation of Daliushu hydrojunction of the Yellow River[J]. *Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering*, 2002, 21(2): 16-19+24.
- 李汉敖. 青藏高原南北向正断层活动时限与伸展速率变化的深部过程及动力学机制探讨[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2020.
- Li Han'ao. The initial timing, extension rates of the N-S trends normal faults in Tibetan Plateau and its deep process and dynamics [D]. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Beijing). 2020.
- 李吉均, 方小敏, 马海洲, 等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 1996, 26(4): 316-322.
- Li Jijun, Fang Xiaomin, Ma Haizhou, Zhu Junjie, Pan Baotian, Chen Huailu. Geomorphological and environmental evolution in the upper reaches of the Yellow River during the Late Cenozoic[J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(4): 316-322.
- 李吉均, 方小敏. 青藏高原隆起与环境变化研究[J]. *科学通报*, 1998, 43(15): 1569-1574.
- Li Jijun, Fang Xiaomin. Study on the uplift of Qinghai-Xizang Plateau and environmental change[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(15): 1569-1574.
- 李吉均. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(1): 7-17.
- Li Jijun. Studies on the geomorphological evolution of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and Asian monsoon[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(1): 7-17.
- 李廷栋. 青藏高原隆升的过程机制[J]. *地球学报*, 1995(1): 1-9.
- Li Tingdong. The uplifting process and mechanism of the Qinhai-Tibet Plateau[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1995(1): 1-9.
- 李正晨, 王先彦, 于洋, 等. 岩性和侵蚀基准面对构造活跃区河流地貌演化的影响——以青藏高原东北缘老虎山和哈思山地区为例[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(6): 994-1008.
- Li Zhengchen, Wang Xianyan, Yu Yang, et al. The impacts of base level and lithology on fluvial geomorphic evolution at the tectonically active Laohu and Hasi Mountains, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2021, 51(6): 994-1008.
- 林旭, 刘静, 刘海金. 黄河形成于何时?. *地球科学*, 2023, <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20230905.1644.004>.
- Lin Xu, Liu Jing, Liu Haijin. When was the Yellow River formed? *Earth Science*, 2023, <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20230905.1644.004>.
- 刘静, 张金玉, 葛玉魁, 等. 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*, 2018, 63(30): 3070-3088.
- Liu Jing, Zhang Jinyu, Ge Yukui, et al. Tectonic geomorphology: An interdisciplinary study of the interaction among tectonic climatic and surface processes[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(30): 3070-3088.
- 孟文, 郭祥云, 李永华, 等. 青藏高原东北缘构造应力场及动力学特征[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(9): 3229-3251.
- Meng Wen, Guo Xiangyun, Li Yonghua, et al. Tectonic stress field and dynamic characteristics in the northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(9): 3229-3251.
- 莫钦鸿. 拉加峡谷段黄河形成发育与流域地貌演化研究[D]. 兰州大学硕士学位论文, 2022.
- Mo Qin hong. The study on the formation and geomorphic evolution of the Yellow River along the Lajia Gorge[D]. Master dissertation of Lanzhou University, 2022.
- 潘保田, 高红山, 李吉均. 关于夷平面的科学问题——兼论青藏高原夷平面[J]. *地理科学*, 2002, 22(5): 520-526.
- Pan Baotian, Gao Shan hong, Li Jijun. On problems of planation surface-A discussion on the planation surface in Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(5): 520-526.
- 潘保田, 李吉均, 曹继秀, 等. 化隆盆地地貌演化与黄河发育研究[J]. *山地研究*, 2002, 14(3): 153-158.
- Pan Baotian, Li Jijun, Cao Jixiu, Chen Fahu. Study on the geomorphic evolution and development of the Yellow River in the Hualong Basin[J]. *Mountain Research*, 2002, 14(3): 153-158.
- 潘保田. 贵德盆地地貌演化与黄河上游发育研究[J]. *干旱区地理*, 1994, 17(3): 43-50.
- Pan Baotian. A study on the geomorphic evolution and development of the upper reaches of Yellow River in Guide Basin[J]. *Arid Land Geography*, 1994, 17(3): 43-50.
- 潘保田, 李吉均, 朱俊杰, 等. 青藏高原: 全球气候变化的驱动力与放大器—II. 青藏高原隆起的基本过程[J]. *兰州大学学报*, 1995, 31(4): 160-167.
- Pan Baotian, Li Jijun, Zhu Junjie, et al. Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau: A driver and amplifier of global climatic changes—II. Uplift processes of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 1995, 31(4): 160-167.
- 袁道阳, 张培震, 刘百箴, 等. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J]. *地质学报*, 2004, 78(2): 270-278.
- Yuan Daoyang, Zhang Peizhen, Liu Baichi, et al. Geometrical imagery and tectonic transformation of Late Quaternary active tec-

- tonics in northeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(2): 270–278.
- 袁道阳, 刘百箴, 吕太乙, 等. 利用黄土剖面的古土壤年龄研究毛毛山断裂的滑动速率[J]. *地震地质*, 1997, 19(1): 1–8.
- Yuan Daoyang, Liu Baichi, Lv Taiyi, et al. Slip rates of the Mao-maoshan fault zone in Gansu Province obtained by using ages of loess-palaeosoil sequence[J]. *Seismology and Geology*, 1997, 19(1): 1–8.
- 张加桂, 殷跃平, 刘传正. 黄河黑山峡大柳树坝区 F_{201} 断裂特征及工程评价[J]. *水文地质工程地质*, 1992, 19(5): 29–32.
- Zhang Jiagui, Yin Yueping, Liu Chuazheng. Characteristics and engineering evaluation of fault F_{201} in Daliushu dam region, Heishan Gorge of the Yellow River[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1992, 19(5): 29–32.
- 赵迪, 陈鹏, 李荣西, 等. 青藏高原东北缘龙首山晚新生代多阶段构造隆升的盆地记录[J]. *岩石学报*, 2023, 39(12): 3759–3774.
- Zhao Di, Chen Peng, Li Rongxi, et al. Basin response of multi-stage tectonic uplift of the Longshoushan area since the Late Cenozoic in northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(12): 3759–3774.
- 赵振明, 刘百箴. 青海共和至甘肃兰州黄河河谷地貌的形成与青藏高原东北缘隆升的关系[J]. *西北地质*, 2003, 36(2): 1–12.
- Zhao Zhenming, Liu Baichi. Relation between the formation of the Yellow River valley landforms from Gonghe, Qinghai to Lanzhou, Gansu and the uplifting in northeast part of Qinghai-Xizang plateau[J]. *Northwestern Geology*, 2003, 36(2): 1–12.
- 钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 1996, 26(4): 289–295.
- Zhong Dalai, Ding Lin. The uplift process and mechanism of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(4): 289–295.
- 中国地震局地质研究所, 宁夏回族自治区地震局. 海原活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社, 1990.
- Institute of Geology, China Earthquake Administration, Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region. Haiyuan Active Fault Belt[M]. Beijing: Seismological Press (in Chinese), 1990.
- Brookfield M E. The evolution of the great river systems of southern Asia during the Cenozoic India-Asia collision: rivers draining southwards[J]. *Geomorphology*, 1998, 22(3–4): 285–312.
- Chen Peng, Shi Wei, Liu Yuan, et al. Slip rate deficit partitioned by fault-fold system on the active Haiyuan fault zone, Northeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Structural Geology*, 2022, 155: 104516.
- Deng Qidong, Sung Fengmin, Zhu Shilong. Active faulting and tectonics of The Ningxia-Hui autonomous region, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B6): 4427–4445.
- England P, Houseman G. Finite strain calculations of continental deformation: 2. Comparison with the India-Asia Collision Zone[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, 91(B3): 3664–3676.
- Fang Xiaomin, Fang Yahui, Zan Jinbo, et al. Cenozoic magnetostratigraphy of the Xining Basin, NE Tibetan Plateau, and its constraints on paleontological, sedimentological and tectonomorphological evolution[J]. *Earth Science Reviews*, 2019, 190: 460–485.
- Gaudemer Y, Tapponnier P, Meyer B, et al. Partitioning of crustal slip between linked, active faults in the eastern Qilian Shan, and evidence for a major seismic gap, the ‘Tianzhu gap’, on the western Haiyuan Fault, Gansu (China)[J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 120(3): 599–645.
- Holbrook J, Schumm S A. Geomorphic and sedimentary response of rivers to tectonic deformation: A brief review and critique of a tool for recognizing subtle epeirogenic deformation in modern and ancient settings[J]. *Tectonophysics*, 1999, 305: 287–306.
- Hu Zhenbo, Pan Baotian, Guo Lianrong, et al. Rapid fluvial incision and headward erosion by the Yellow River along the Jinshaan gorge during the past 1.2 Ma as a result of tectonic extension[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 133: 1–14.
- Jolivet R, Lasserre C, Doin M P, et al. Spatio-temporal evolution of aseismic slip along the Haiyuan fault, China: Implications for fault frictional properties[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 337–378: 23–33.
- Li Chuanyou, Zhang Peizhen, Yin Jinhui, et al. Late Quaternary left-lateral slip rate of the Haiyuan fault, northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 2009, 28: TC5010.
- Li Jijun, Fang Xiaomin, Song, et al. Late Miocene-Quaternary rapid stepwise uplift of the NE Tibetan Plateau and its effects on climatic and environmental changes[J]. *Quaternary Research*, 2014, 81(3): 400–423.
- Lin Xu, Tian Yuntao, Donelick R A, et al. Mesozoic and Cenozoic tectonics of the northeastern edge of the Tibetan plateau: Evidence from modern river detrital apatite fission-track age constraints[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 170: 84–95.
- Lin Aiming, Yang Zhenyu, Sun Zhiming, et al. How and when did the Yellow River develop its square bend?[J]. *Geology*, 2001, 29(10): 951–954.
- Lin Xiubin, Chen Hanlin, Wyrwoll K H, et al. Commencing uplift of the Liupan Shan since 9.5 Ma: Evidences from the Sikouzi section at its east side[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010,

- 37(4): 350–360.
- Liu Jinrui, Ren Zhikun, Zhang Huiping, et al. Slip rates along the Laohushan Fault and spatial variation in slip rate along the Haiyuan Fault zone[J]. *Tectonics*, 2022, 41(2): e2021TC006992.
- Lu Haijian, Sang Shengping, Wang Ping, et al. Initial uplift of the Qilian Shan, northern Tibet since ca. 25 Ma: Implications for regional tectonics and origin of eolian deposition in Asia[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2022, 134(9–10): 2531–2547.
- Lasserre C, Gaudemer Y, Tapponnier P, et al. Fast late Pleistocene slip rate on the Leng Long Ling segment of the Haiyuan fault, Qinghai, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107(B11): ETG 4-1-ETG 4-15.
- Maddy D, Bridgland D, Westaway R. Uplift-driven incision and climate-controlled river terrace development in the Thames Valley, UK[J]. *Quaternary International*, 2001, 79(1): 23–36.
- Matrau R, Klinger Y, Van der Woerd J, et al. Late Pleistocene-Holocene slip rate along the Hasi Shan restraining bend of the Haiyuan Fault: Implication for faulting dynamics of a complex fault system[J]. *Tectonics*, 2019, 38(12): 4127–4154.
- Pan Baotian, Hu Zhenbo, Wang Junping, et al. A magnetostratigraphic record of landscape development in the eastern Ordos Plateau, China: Transition from Late Miocene and Early Pliocene stacked sedimentation to Late Pliocene and Quaternary uplift and incision by the Yellow River[J]. *Geomorphology*, 2011, 125(1): 225–238.
- Pan Baotian, Hu Zhenbo, Wang Junping, et al. The approximate age of the planation surface and the incision of the Yellow River[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2012, 356–357: 54–61.
- Shao Yanxiu, Liu Zengjing, van der Woerd J, et al. Late Pleistocene slip rate of the central Haiyuan fault constrained from optically stimulated luminescence, ^{14}C , and cosmogenic isotope dating and high-resolution topography[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2021, 133(7-8): 1347–1369.
- Su Qi, Ren Zhikun, Zhang Huiping, et al. The role of the Haiyuan Fault in accelerating incision rate of the Yellow River at the Mijia Shan Area, northeastern Tibetan Plateau, as revealed by $\text{in situ } ^{10}\text{Be}$ dating[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 179: 276–286.
- Tapponnier P, Ryerson F J, Vander Woerd J, et al. Long-term slip rates and characteristic slip: keys to active fault behaviour and earthquake hazard[J]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 2001, 333(9): 483–494.
- Wang Xianyan, Van Balen R, Yi Shuangwen, et al. Differential tectonic movements in the confluence area of the Huang Shui and Huang He rivers (Yellow River), NE Tibetan Plateau, as inferred from fluvial terrace positions[J]. *Boreas*, 2014, 43: 469–484.
- Wang Weitao, Zhang Peizhen, Garzione CN, et al. Pulsed rise and growth of the Tibetan Plateau to its northern margin since ca. 30 Ma[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(8): e2120364119.
- Yao Wenqian, Liu-Zeng jing, Klinger Y, et al. Late Quaternary slip rate of the Zihong Shan branch and its implications for strain partitioning along the Haiyuan Fault, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127(5): e2021JB023162.
- Yao Wenqian, Liu-Zeng jing, Oskin M E, et al. Reevaluation of the Late Pleistocene slip rate of the Haiyuan Fault near Songshan, Gansu Province, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(5): 5217–5240.
- Zheng Wenjun, Zhang Peizhen, He Wengui, et al. Transformation of displacement between strike-slip and crustal shortening in the northern margin of the Tibetan Plateau: Evidence from decadal GPS measurements and late Quaternary slip rates on faults[J]. *Tectonophysics*, 2013, 584(1): 267–280.
- Zheng Dewen, Wang Weitao, Wan Jinglin, et al. Progressive northward growth of the northern Qilian Shan-Hexi Corridor (northeastern Tibet) during the Cenozoic[J]. *Lithosphere*, 2017, 9(3): 408–416.
- Zhang Peizhen, Burchfiel B C, Molnar P, et al. Late Cenozoic tectonic evolution of the Ningxia-Hui autonomous region, China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1990, 102(11): 1484–1498.