

DOI: 10.12401/j.nwg.2023135

地质构造对黄河中游北段水系展布特征的影响

王凯¹, 王晓勇¹, 李明阳^{1,2}, 薛强¹

(1. 中国地质调查局造山带地质研究中心, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 黄河中游流域水系的平面形态、河流走向等区域地貌样式的控制因素, 以及其对水土流失、生态和经济发展的影响是长久以来备受关注的热点问题。笔者选择黄河中游北段皇甫川、孤山川和朱家川—县川流域为研究对象, 通过基于高精度 DEM 提取水系样式和统计水系走向, 对区域内基岩节理、断层和黄土内发育的垂直节理等构造样式调查研究和产状系统测量统计, 结合研究区新生代以来的构造背景, 提出黄河中游北段受区域伸展作用影响形成的一系列垂直节理和断层, 是影响或控制区域内水系样式发育程度和展布特征的关键要素。

关键词: 水系样式; 垂直节理; 断层; 新构造; 黄河中游

中图分类号: P546; P641.6

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)06-0166-10

Influence of Geological Structure on the Distribution Characteristics of River System in the Northern Reaches of the Middle Yellow River

WANG Kai¹, WANG Xiaoyong¹, LI Mingyang^{1,2}, XUE Qiang¹

(1. Research Center for Orogenic Geology of China Geological Survey, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. China University of Geoscience (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The influence and control factors of the regional geomorphic patterns, such as the plane shape and the flow directions of the mainstream and tributaries of the river system, in the middle reaches of the Yellow River, and the effects of the regional geomorphic patterns on soil and water loss, ecological and economic development, have long been one of the hot debates that have received much attention. In this study, we select the Huangfuchuan, Gushanchuan and Zhujiachuan—Xianchuan drainage in the northern reaches of the middle Yellow River as the research objects. Based on high-precision DEM extraction of the drainage system, statistics of flow direction, as well as systematic investigation and measurement of the structural styles and attitudes of the joints and/or faults in bedrock and loess, combined with the tectonic background of the study area since the Cenozoic, it is proposed that the series of vertical joints and faults formed by regional extension in the northern reaches of the middle Yellow River are key factors that influence or control the development and spreading char-

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2023-07-02; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 中国地质调查局项目“北方造山带重要地区区域地质调查”(DD20230005), “东天山—北山地区区域地质调查”(DD20230214), “黄河中上游生态地质调查”(DD20221774、DD20211398)和国家自然科学基金(42002229)联合资助。

作者简介: 王凯(1986-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事区域地质调查、构造解析等调查研究工作。E-mail: wangk@mail.cgs.gov.cn。

acteristics of the drainage patterns.

Keywords: drainage patterns; vertical joints; faults; neotectonics; middle Yellow River

世界上主要大河水系的展布特征受地质作用及区域构造样式的控制,同时水系的演化也是构造应力场变化特征的响应,记录着地质演化过程(钱宁等, 1987; Lin et al., 2001; Potter et al., 2006; 郑洪波等, 2009; 金德生等, 2015)。新构造运动对流域水系格局以及河流走向总体趋势的控制特征非常显著(Jackson et al., 1996),已经受到不同学者的关注,并从地质学的角度出发对水系发育形状进行分析。例如, Howard(1967)根据平面形态不同将水系划分为树枝状、平行状、格子状、长方形、放射状、环状、多湖盆状、多棱角状等8种主要类型、12种变异类型和4种复合类型。钱宁等(1987)将常见的水系平面形态总结为6种基本类型和4种变异类型,其中放射状或环状水系主要受地表形态如穹窿、盆地或拗陷影响,控制这种地貌特征的主要因素是基岩岩性或地质构造。最常见的树枝状水系形态又可以细分为羽毛状、平行状、格子状、长方形及多棱角状(扭曲水系)等(Howard, 1967; 钱宁等, 1987),其主要区别在于支流与干流的夹角以及支流的密度。研究表明,支流的密度主要与基岩岩性、产状以及物质成分的均一程度等有关,而支流与干流的夹角不同反映是否受到地质构造的影响或控制。例如:如果支流与干流均为近直角相交、同级水系近平行且有规律分布,则可以推断其主要受基岩节理或断层控制;如果支流与干流的夹角以及同级水系形态没有存在明显规律,则可能未受地质构造影响或受地质构造影响的因素较小(Howard, 1967; 钱宁等, 1987)。因此,建立水系形态与地质构造之间的关系,对于通过水系样式解析地质作用或从地质角度指导对水系展布的认识具有重要意义。

黄河作为中国第二大河,是哺育中华民族的母亲河,也是中华民族文化和历史的发源地。黄河中游的演化过程,以及对水土流失、生态和经济发展影响是长久以来备受关注的热点问题(杨雯, 1957; 赵明甫, 1957; Cao et al., 2010; Nie et al., 2015; Baker, 2021; 计文化等, 2022; Yu et al., 2022; 刘颢等, 2023)。黄河中上游位于华北腹地鄂尔多斯盆地东北缘,是黄河流域重要的输沙源区(杨根生等, 1988; 李华华等, 2023),也

是认识黄河演化过程的关键区域(Pan et al., 2011; Xiong et al., 2022)。华北地区受控于新特提斯构造域和环太平洋构造域共同作用影响,主体构造格架形成于中生代晚期,中新世以来以发育伸展构造作用为主(张岳桥等, 2019)。认识黄河中游流域新构造作用对流域水系的平面形态和河流走向等区域地貌样式的影响和控制,对于研究黄河演化过程和科学指导水土流失的治理尤为关键。

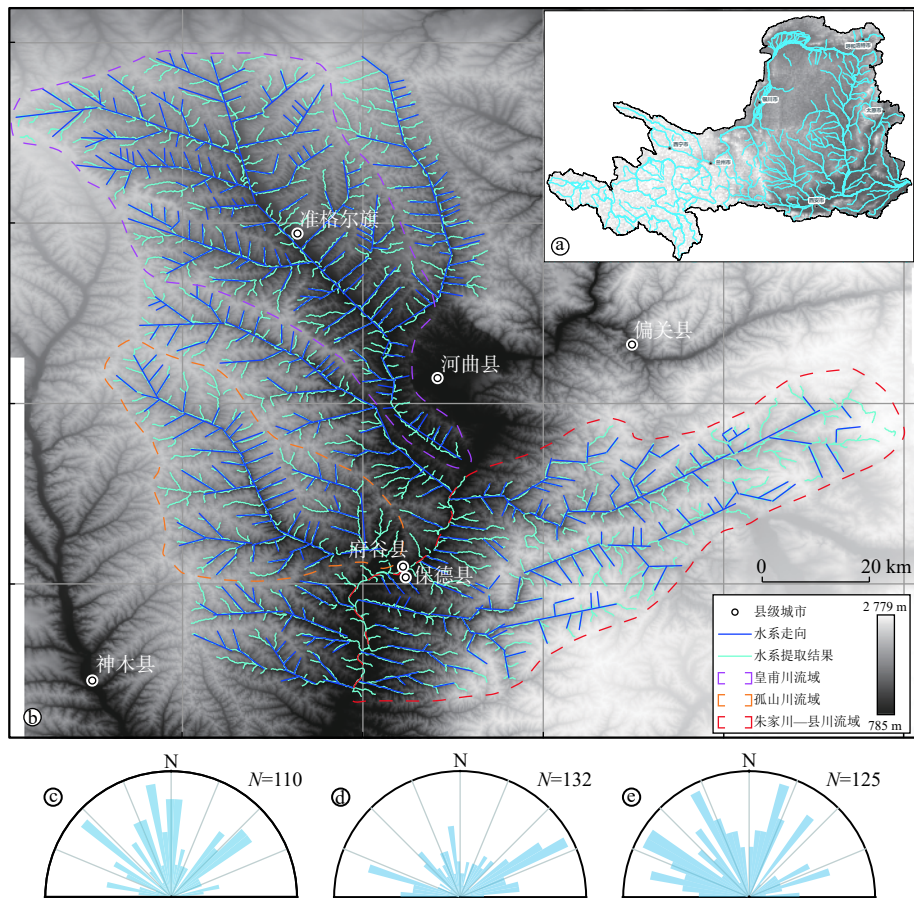
笔者选择黄河中游北段皇甫川、孤山川和朱家川—县川流域为研究对象,尝试通过对水系的发育特征和基岩节理和断层构造样式的调查研究,讨论水系的构造控制因素,为厘清黄河中上游鄂尔多斯盆地东北缘区域水系的发育与地质构造之间的关系、认识黄河中游水土流失的构造控制因素和演化过程提供地质依据。

1 黄河中游北段水系样式特征

在黄河“几”字湾东北角分别选择河西岸北侧的皇甫川流域、孤山川流域和黄河东岸朱家川—县川流域为研究对象(图1a),以分辨率为2米的DEM(Digital Elevation Model 数字高程模型)为基础数据,应用Arcmap软件中Spatial Analyst工具提取并获得水系的展布样式(图1b中浅蓝色线条),显示总体为树枝状或者近平行状,进一步观察可以发现同一级支流的走向主体一致或近平行,且与更高一级的支流成大角度甚至垂直交汇。

为了统计比对3个研究区水系的走向特征,需要尽可能较为客观地标绘出水系的走向(图1中深蓝色线条)。为避免支流数据太多稀释干流数据量而影响统计结果,在标绘干流水系时以每出现1条次级支流即用1条线段表;当水系弯曲程度超过 10° 时,则分段标绘或取平均走向。通过Arcmap给每条线段的起点和终点赋坐标值,利用三角函数计算出每1条(段)支流和干流的走向。

水系走向结果统计显示,皇甫川流域、孤山川流域和黄河东岸的朱家川—县川流域水系流向特征不尽相同(图1c~图1e)。皇甫川流域水系主要流向表现



a. 黄河中上游流域地形地貌及水系分布图; b. 皇甫川、孤山川和朱家川—县川流域水系展布特征;
c. 皇甫川流域水系流向统计; d. 孤山川流域水系流向统计; e. 朱家川—县川流域西段水系流向统计

图1 黄河中游北段地形地貌及水系特征图

Fig. 1 Topography of the northern section of the middle Yellow River and the characteristics of drainage

为NE-SW向(约 45° 或 225°)、NW-SE向(约 135° 或 315°)和NNW-SSE向(约 170° 或 350°)(图1c);孤山川流域水系主要流向为NEE-SWW向(约 65° 或 245°)、NW-SEE向(约 110° 或 290°)和NNW-SSE向(约 160° 或 340°)(图1d)。黄河东岸的朱家川、县川及其支流的展布特征较为相似,而且二者流域范围相对较小,将其合并统计,显示水系流向主要表现为NNE-SSW向(约 20° 或 200°)、NEE-SWW向(约 70° 或 250°)、NW-SEE向(约 300° 或 120°)和NNW-SSE向(约 330° 或 150°)(图1e)。

2 黄河中游北段地质构造特征

2.1 皇甫川流域

皇甫川流域主要出露地层为三叠纪碎屑岩,上覆全新世风成黄土和少量冲洪积物。三叠纪地层近水平展布,以灰白色细砂岩和紫红色泥质砂岩互层为主

要岩石组合特征。地层中发育一系列近直立节理,节理面从三叠纪碎屑岩一直向上延伸到风成黄土内部。

对三叠纪碎屑岩中节理产状统计结果显示,主要发育NNW向和NEE向两组近垂直节理,风成黄土中的节理与基岩中的节理走向总体一致,二者产状的微小差异可能是岩性不同、能干性不同导致(图2),指示节理的形成是区域伸展作用的结果。

2.2 孤山川流域

孤山川流域以出露侏罗纪延安组碎屑岩地层为主,地层产状近水平或缓倾向西,倾角小于 10° (图3a)。上覆黄褐色黄土,厚度不等,最厚可达数十米。在侏罗纪中厚层细砂岩和粉砂岩互层的地层中可见发育两组分别为NNE向和SEE向的节理。在基岩上覆的中更新世黄土中同样可观测到发育有两组垂直节理,其优选产状为近S-N向和近EW向,可能是由于受黄土质地较为松软的影响,节理产状在后期



a、b. 三叠纪厚层砂岩中发育2组近直交的垂直节理；c. 三叠纪中层砂岩夹紫红色厚层泥岩地层中砂岩层中保存2组垂直节理；d. 全新世风成黄土中发育两组垂直节理；图中赤平投影为下半球等面积投影

图2 皇甫川流域三叠纪地层和全新世风成黄土的野外特征及节理产状统计图

Fig. 2 Field characteristics and attitude statistics of joints in Triassic strata and Holocene eolian loess within Huangfuchuan drainage system

发生变化而导致统计结果不够集中。此外,黄土中保存的节理与基岩节理产状近似一致或有小角度偏差。形成二者节理产状不同的原因可能与基岩和黄土不同物质组成及结构导致的能干性不同有关(图3)。

2.3 朱家川—县川流域

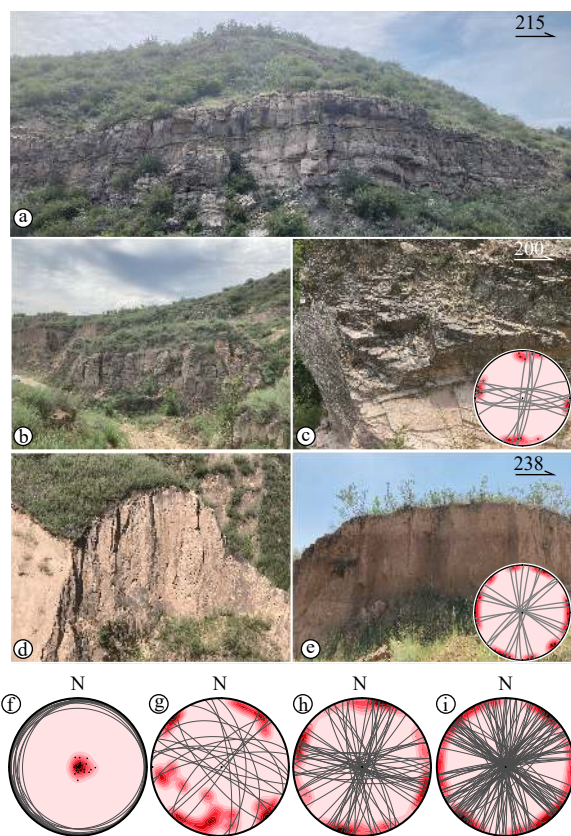
朱家川—县川一带主要出露中奥陶世马家沟组灰岩和石炭纪—二叠纪碎屑岩。地层近水平或缓倾向西,局部地层缓倾向东。在黄河东岸出露的中奥陶世灰岩地层中较好地记录并保存着脆性构造变形样式。通过野外调查,发现在中奥陶世马家沟组厚层灰岩中发育有陡倾向西的正断层,露头尺度所记录的断距约为10~15 cm(图4)。在中薄层灰岩中可以识别出发育一系列平行产出的正断层陡倾西向或东(图5,图6),倾向不同的正断层往往相邻产出,且断层产状显示二者可能为共轭关系,指示为伸展作用的结果。其中西倾的正断层控制了第四系的沉积边界,指示该正断层为活动断层(图5)。

向东可以识别出中薄层灰岩地层发育宽缓背斜

(图7),背斜的枢纽近S-N向,同时发育走向直交的两组节理面。结合相邻地区发育的正断层,指示该宽缓背斜为近E-W向伸展作用下形成的横弯褶皱。

中奥陶世马家沟组中厚层灰岩和与之互层的泥质灰岩能干性不同,发育的节理产状不同或节理面不连续。受区域伸展作用的持续影响,原本不连续的节理面会发生追踪贯通并形成连续的破裂面。在侵蚀作用下,地层极易沿着破裂面发生局部失稳滑坡(图8)。

综上对朱家川—县川流域内岩石地层出露情况和变形特征的观测和产状的系统测量统计显示(图9),地层多为近水平产出,层理缓倾向东或西,倾角多小于10°。地层中主要保存近S-N向和SE-NW向两组近直立的节理。露头尺度所保存的断层多为脆性断层,往往与节理伴生产出,断层的断距较小,主要为近S-N向或NNE向和NW-SE向两组,且与节理面近平行。



a、b. 延安组砂岩地层中沿着垂直节理面发生破裂；c. 延安组细砂岩中发育近直交的两组垂直节理；d、e. 风成黄土中发育垂直节理；f. 中生代地层层理产状极射赤平投影；g. 基岩断层产状极射赤平投影；h. 基岩节理产状极射赤平投影；i. 更新世—全新世黄土节理产状极射赤平投影

图3 孤山川流域出露的岩石组合和变形特征图

Fig. 3 Rock assemblages and deformation characteristics in Gushanchuan drainage system.

3 水系样式的控制因素

岩石受构造作用影响形成的节理或断层等破裂面容易被风化、侵蚀形成沟壑或水系等地貌特征。对黄河中游北段皇甫川、孤山川和朱家川—县川流域水系走向的统计以及黄土和基岩地层节理、断层等构造样式和产状数据统计显示：

皇甫川流域的水系走向主要为 NE 向、NW 向和近 S-N 向或 NNW 向等。在流域内出露的新生代黄土中发育有 NEE 向和 NW 向两组近垂直节理，中生代基岩地层中主要发育 NE 向和 NW 向两组近垂直的节理(图 10)。基岩和黄土中的节理走向与 NE 向、NE 向的水系展布特征具有较好的耦合性。但在基岩地



图4 中奥陶世厚层灰岩中发育正断层野外照片

Fig. 4 Normal faults in the thick-bedded limestone of Middle Ordovician



图5 中奥陶世中薄层灰岩中发育脆性正断层并控制更新世冲洪积物野外照片

Fig. 5 Normal faults in the medium-thin-bedded limestone of Middle Ordovician which controlled the deposition of the Pleistocene pluvial alluvial sediments

层和黄土中均未明显发育与近 S-N 向或 NNW 向水系特征相近的节理。

孤山川流域的水系走向主要为 NEE 向、NWW 向和近 S-N 向或 NNW 向等。在流域内出露的黄土中主要发育 NE 向、NW 向和近 S-N 向垂直节理；基岩地层中主要发育 NWW 向、NNE 向和少量 NEE 向节理(图 10)。NEE 向水系与 NE 向的黄土节理相近，NWW 向的水系可能受控于 NWW 向的基岩或黄土中发育的节理，近 S-N 向或 NNW 向的水系与黄土中近 S-N 向节理及基岩地层中 NNE 向节理较为一致。推测孤山川流域流向南的水系与黄土内其中一组节理走向平行，而其他支流的流向主要平行于基岩中节理走向。

朱家川—县川流域的水系走向主要为 NNE 向、NNW 向和 NWW 向 3 组。由于区内黄土保存较差，



白色字体为层理产状、红色字体为断层产状

图 6 中奥陶世中厚层灰岩中发育共轭正断层野外照片

Fig. 6 Conjugate normal faults in the medium-thick-bedded limestone of Middle Ordovician



白色字体为层理产状、红色字体为断层产状

图 7 中奥陶世中厚层灰岩发育宽缓背斜野外照片

Fig. 7 Bending folds in the medium-thick limestone of Middle Ordovician

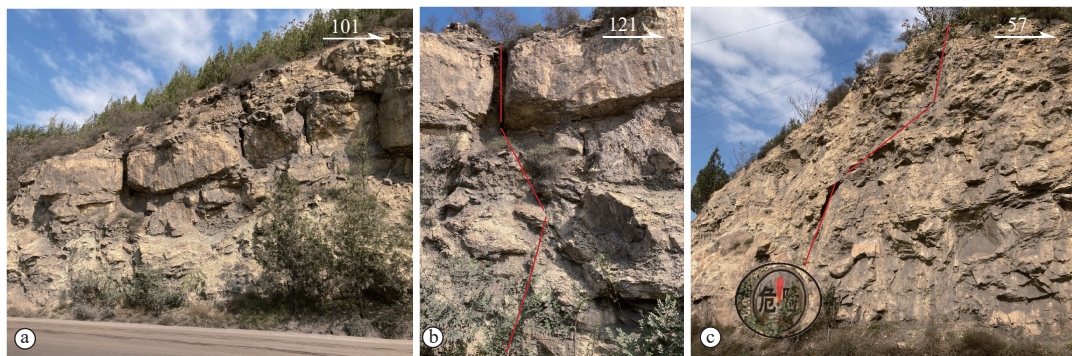


图 8 中奥陶世地层中发育追踪张节理并造成地质灾害隐患野外照片

Fig. 8 Tracing tension joints in the Middle Ordovician strata which induce geological hazard

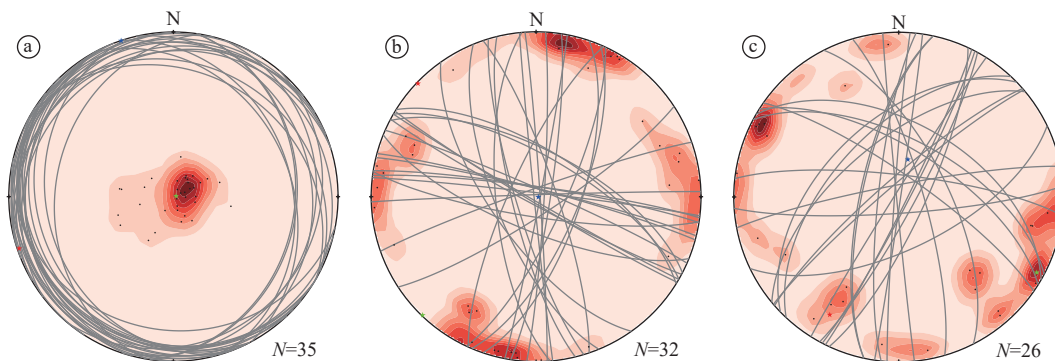


图 9 朱家川-县川流域基岩层理(a)、节理(b)和断层(c)产状极射赤平投影图

Fig. 9 (a) Beddings, (b) joints and (c) faults stereographic projection of strata in Zhujiachuan-Xianchuan

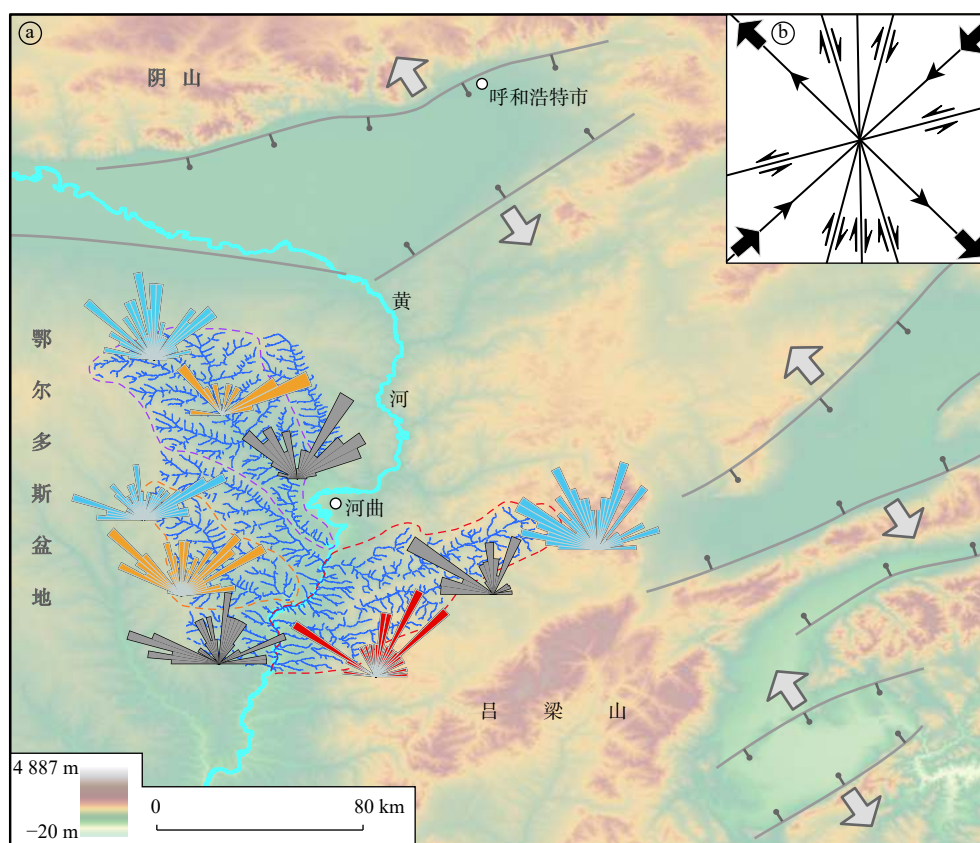
在野外对基岩中节理和断层的识别和产状统计结果显示主要发育 NWW 向、NEE 向以及近 S-N 向的节理和断层构造(图 10)。根据玫瑰花图统计结果显示 NNE 和 NWW 向的水系与基岩中节理或断层走向具有较好耦合关系。

根据上述对水系样式、走向和基岩、黄土等地质体内发育的节理和断层产状分析显示,研究区内水系的走向与基岩节理或断层的产状总体具有较好的耦合关系。因此,推断研究区内水系的发育总体受到地表破裂面的控制。此外,在黄河西岸近 S-N 向支流的发育除了受地表破裂面的影响以外,可能还受到流域内北高南低的地势控制,黄河东岸的朱家川-县川流域 NW 向或 NNW 向的水系可能受相邻的 NE 向吕梁山脉西北缘地势的控制(图 10)。

4 地质构造对地貌的控制特征

根据摩尔-库伦准则,岩石在应力作用下发生

脆性破裂形成的共轭断裂面的夹角为 60° 。Ram-say(1980)提出随着岩石的塑性压扁,共轭断裂的夹角由锐角逐渐变为钝角。Zheng 等(2004)通过自然和实验变形带的数据分析提出最大有效力矩准则,指出自然界广泛分布的韧性变形形成的共轭断裂夹角约为 110° 。侯泉林等(2018)从理论和实践结合的角度系统对比不同岩石变形准则,提出共轭剪切破裂的剪裂角受不同变形构造层次影响的同时,还受到如岩性特征、应变速率、孔隙压力、流体等其他因素的影响。Hancock 等(1989)对北美新构造节理系统研究认为,大陆地壳上部约 500 m 尺度内通常发育多组垂直共轭裂隙,地表剥蚀和构造隆升导致的卸载作用是其扩展的先决条件。近年报道的同地震发育的地表裂隙也多呈现近垂直共轭的特征(Robinson et al., 2001; Yue et al., 2012; Feng et al., 2020; 王雨晴等, 2022)。以上研究表明,在不同条件的应力作用下,由于岩石的物质组成和结构构造的不同、以及受岩石内先存破裂的影响,不同岩性



蓝色表示皇甫川、孤山川和朱家川-县川流域水系走向;黄色表示黄土节理走向;灰色表示基岩节理走向;红色表示断层走向玫瑰花图

图 10 黄河中游北段及邻区地貌构造简图与玫瑰花图(a)和断裂系模型图(b)(据 Shi et al., 2020)

Fig. 10 (a) Simplified structural and geomorphic map of the northern reaches of the Middle Yellow River and the adjacent area and (b) the fracture system model

地质体表现为不同的构造变形特征。

笔者以黄河中游北段为研究对象,对黄河两岸研究区内发育的节理和断层统计结果显示,在黄土和基岩地层中发育有相似的构造样式,均表现为近垂直的共轭节理或正断层。华北地区数值模拟显示新生代期间整体处于伸展构造背景(Liu et al., 2017),鄂尔多斯盆地周缘 GPS 速度场显示在鄂尔多斯盆地东北缘现今总体处于张应力作用的伸展背景(Wang et al., 2020; Hao et al., 2021)。Shi 等(2020)通过野外构造解析及应力场恢复显示晚中新世开始鄂尔多斯盆地东北缘由纯剪应变转变为简单剪切,并表现为 NW-SE 向的伸展作用(图 10)。据此推测,在伸展背景下,地壳浅部可以发育一系列张性节理或正断层,这些破裂面可能不完全与岩石变形准则吻合,而呈现为地表近直交、倾角近直立的共轭断裂系,受岩性差异、孔隙度及流体等不同因素影响,在基岩及黄土中断裂系的产状会有偏差,总体控制或影响

地表水系的展布特征。鄂尔多斯盆地东北缘由纯剪变形向简单剪切变形转换的时间与黄河中上游贯通时间相近,可能也是影响黄河演化的重要因素之一(Shi et al., 2020; 李明阳, 2023)。

综上所述,鄂尔多斯盆地东北缘地表发育的节理或断层是区域构造应力场作用的结果。黄河中游北段水系的展布特征受到这些节理和断层等新构造变形样式的影响和控制。反之,水系样式的展布特征也可恢复新构造应力场特征提供依据。

5 结论

(1)以黄河中游北段皇甫川、孤山川和朱家川-县川流域为研究对象,通过对高精度 DEM 水系样式的提取和流向的统计,以及对野外节理、断层等构造样式产状及性质的调查分析,显示水系流向与基岩地层和黄土中节理或断层走向具有相关性。

(2)鄂尔多斯盆地东北缘,新生代以来总体处于张应力背景下,发育一系列地表近垂直的节理或断裂,可能是影响或控制区域内水系样式发育程度和展布特征的关键要素。作为构造作用的响应,水系样式的展布特征也可以作为恢复地质构造应力场的有效载体。

致谢:两位匿名评审专家提出了有益的修改意见,笔者在此表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- 侯泉林,程南南,石梦岩,等.不同构造层次岩石变形准则的融合与发展[J].岩石学报,2018,34(6):1792-1800.
- HOU Quanlin, CHENG Nannan, SHI Mengyan, et al. The union of various rock deformation criteria at different structural levels and its further development[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(6): 1792-1800.
- 计文化,王永和,杨博,等.西北地区地质、资源、环境与社会经济概貌[J].西北地质,2022,55(3):15-27.
- JI Wenhua, WANG Yonghe, YANG Bo, et al. Overview of Geology, Resources, Environment and Social Economy in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 15-27.
- 金德生,乔云峰,杨丽虎,等.新构造运动对冲积河流影响研究的回顾与展望[J].地理研究,2015,34(3):437-454.
- JIN Desheng, QIAO Yunfeng, YANG Lihu, et al. A research of influence of neo-tectonic movement on alluvial rivers: Review and prospect[J]. Geographical Research, 2015, 34(3): 437-454.
- 李华华,张茂省,冯立,等.砒砂岩区水土流失机制及防治措施研究现状与展望[J].西北地质,2023,56(3):109-120.
- LI Huahua, ZHANG Maosheng, FENG Li, et al. Research Status and Prospect of Soil and Water Loss Mechanism and Prevention Measures in Pisha Sandstone Area[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 109-120.
- 李明阳.晚中新世以来黄河中游北段演化过程及影响因素[D].北京:中国地质大学(北京),2023.
- LI Mingyang. Evolution of the northern reaches of the Middle Yellow River since Late Miocene and its influencing factors[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2023.
- 刘颢,张茂省,冯立,等.榆林黄河中游粗泥沙区生态问题与生态格局构建[J].西北地质,2023,56(3):58-69.
- LIU Hao, ZHANG Maosheng, FENG Li, et al. Ecological Problems, Systematically Protection and Restoration Strategies of Yulin Coarse Sand Area in the Middle Yellow River[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 58-69.
- 钱宁,张任,周志地.河床演变学[M].北京:科学出版社,1987.
- QIAN Ning, ZHANG Ren, ZHANG Zhidi. Fluvial processing[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- 王雨晴,冯万鹏,张培震.交角~90°共轭断裂的现今形变及对构造应力场的指示意义—以2019年Mw≥6.4菲律宾地震序列为例[J].地震地质,2022,44(2):313-332.
- WANG Yuqing, FENG Wanpeng, ZHANG Peizhen. Present deformation of ~ 90° intersecting conjugate faults and mechanical implication to regional tectonics: A case study of 2019 Mw≥6.4 Philippines earthquake sequence[J]. Seismology and Geology, 2022, 44(2): 313-332.
- 杨根生,刘阳宣,史培军.黄河沿岸风成沙入黄沙量估算[J].科学通报,1988,33(13):1017-1021.
- YANG Gensheng, LIU Yangxuan, SHI Peijun. Estimation of the Amount of Eolian Sand into the Yellow River[J]. Chinese Science Bulletin, 1988, 33(13): 1017-1021.
- 杨雯.黄河中游水土保持座谈会[J].科学通报,1957,8(17):540-541.
- YANG Wen. Symposium on Soil and Water Conservation in the Middle reaches of the Yellow River[J]. Chinese Science Bulletin, 1957, 8(17): 540-541.
- 张岳桥,施炜,董树文.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,2019,93(5):971-1001.
- ZHANG Yueqiao, SHI Wei, DONG Shuwen. 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, 2019, 93(5): 971-1001.
- 赵明甫.如何进一步开展黄河中游的水土保持工作[J].科学通报,1957,8(18):555-559.
- ZHAO Mingfu. How to further carry out the work of soil and water conservation in the middle reaches of the Yellow River[J]. Chinese Science Bulletin, 1957, 8(18): 555-559.
- 郑洪波,贾军涛.大河的地质演化与构造控制[J].第四纪研究,2009,29(2):268-275.
- ZHENG Hongbo, Jia Juntao. Geological evolution of big river systems and tectonic control[J]. Quaternary Sciences, 2009, 29(2): 268-275.
- Baker Jessica C A. Planting trees to combat drought[J]. Nature Geoscience, 2021, 14(7): 458-459.
- Cao S, Wang G, Chen L. Questionable value of planting thirsty trees in dry regions[J]. Nature, 2010, 465: 31-32.

- Feng Wapeng, Samsonov Sergey, Qiu Qiang, et al. Orthogonal Fault Rupture and Rapid Postseismic Deformation Following 2019 Ridgecrest, California, Earthquake Sequence Revealed From Geodetic Observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(5): e2019GL086888.
- Hancock Paul L, Engelder Terry. Neotectonic joints[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(10): 1197–1208.
- Hao Ming, Wang Qingliang, Zhang Peizhen, et al. “Frame Wobbling” Causing Crustal Deformation Around the Ordos Block[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(1): e2020GL091008.
- Howard Arthur David. Drainage Analysis in Geologic Interpretation: A Summation[J]. *AAPG Bulletin*, 1967, 51.
- Jackson James, Norris Richard, Youngson John. The structural evolution of active fault and fold systems in central Otago, New Zealand: evidence revealed by drainage patterns[J]. *Journal of Structural Geology*, 1996, 18(2–3): 217–234.
- 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.
- Liu Shaofeng, Gurnis Michael, Ma Pengfei, et al. Reconstruction of northeast Asian deformation integrated with western Pacific plate subduction since 200 Ma[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 175: 114–142.
- Nie J, Stevens T, Rittner M, et al. Loess Plateau storage of Northeastern Tibetan Plateau-derived Yellow River sediment[J]. *Nat Commun*, 2015, 6: 8511.
- 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.
- Potter P E, Hamblin W K. Big Rivers Worldwide[M]. Brigham Young University Geology Studies, 2006: 1–78.
- Ramsay J G. Shear zone geometry: A review[J]. *Journal of Structural Geology*, 1980, 2(1–2): 83–99.
- Robinson D P, Henry C, Das S, et al. Simultaneous rupture along two conjugate planes of the Wharton Basin earthquake[J]. *Science*, 2001, 292(5519): 1145–8.
- Shi Wei, Dong Shuwen, Hu Jianmin. Neotectonics around the Ordos Block, North China: A review and new insights[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 200: 102969.
- Wang Min, Shen Zhengkang. Present - Day Crustal Deformation of Continental China Derived From GPS and Its Tectonic Implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2): e2019JB018774.
- Xiong Jianguo, Liu Yunming, Zhang Peizhen, et al. Entrenchment of the Yellow River since the late Miocene under changing tectonics and climate[J]. *Geomorphology*, 2022.
- Yu Jingxing, Zheng Dewen, Pang Jianzhang, et al. Cenozoic mountain building in eastern China and its correlation with reorganization of the Asian climate regime[J]. *Geology*, 2022, (7):50.
- Yue H, Lay T, Koper K D. En echelon and orthogonal fault ruptures of the 11 April 2012 great intraplate earthquakes[J]. *Nature*, 2012, 490(7419): 245–9.
- Zheng Yadong, Wang Tao, Ma Mingbo, et al. Maximum effective moment criterion and the origin of low-angle normal faults[J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26(2): 271–285.