

基于数字露头实景三维模型的沉积古流向分析方法

陈建华^{1,2}, 吴玉清^{2,3*}, 钟瀚霆^{1,4}, 王炳乾², 周文峰², 王夏^{1,4}, 徐钰皓²,
彭学礼², 林宗祺⁴

1) 成都理工大学, 深时地理环境重建与应用自然资源部重点实验室, 四川成都
610059

2) 成都理工大学, 地球物理学院, 四川成都 610059

3) 国家知识产权局专利局专利审查协作四川中心, 四川成都 610213

4) 成都理工大学, 沉积地质研究院, 四川成都 610059

摘要: 古流向分析在沉积岩石学、古地理重建等领域具有重要地位。传统野外测量古流向数据方法存在工作效率低、数据获取有盲区等问题。随着无人机技术和地理信息系统的发展, 数字露头实景三维模型提供了一种新的方式可实现古流向的测量和分析。本文基于无人机倾斜摄影构建的三维模型提供的高分辨率纹理信息, 准确识别指示古流向的沉积构造; 利用三维模型精确的空间信息, 构建数字露头实景三维平台进行模型的可视化显示, 通过空间三点法实现产状量测, 对野外常见的交错层理进行定量的古流向测量。基于极射赤平投影和空间几何关系校正算法, 进行古流向数据校正, 以消除地层构造变化的影响。对完成处理的古流向数据进行统计分析与可视化展示, 通过交互式方法绘制区域玫瑰花图, 直观展示古流向数据在区域范围内的分布情况和优势方向。进而, 本文以鄂尔多斯盆地关家崖露头为例, 开展了基于实景三维模型的沉积古流向分析应用。通过上述方法进行古流向分析, 能够有效替代野外古流向数据测量并减轻野外工作负担, 同时为解释物源方向、推断古斜坡等提供了数据支持。

关键词: 古流向分析; 无人机倾斜摄影测量; 数字露头; Cesium; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: P531 **收稿日期:** 2025-04-05

Sedimentary Paleocurrent Analysis Methods Based on Real-scene 3D Models of Digital Outcrops

Jianhua Chen^{1,2}, Yuqing Wu^{2,3*}, Hanting Zhong^{1,4}, Bingqian Wang², Wenfeng Zhou², Xia Wang^{1,4}, Yuhao Xu², Xueli Peng², Zongqi Lin⁴

1) Key Laboratory of Deep-time Geography & Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059

2) College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059

3) Patent Examination Cooperation Sichuan Center of the Patent Office, CNIPA,
Chengdu, Sichuan 610213

4) Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu,
Sichuan 610059

Abstract: Paleocurrent analysis plays an important role in the fields of sedimentary petrology and paleogeographic reconstruction. Traditional methods of field measurement for paleocurrent data are plagued by low work efficiency and blind spots in data acquisition. With the advancement of unmanned aerial vehicle (UAV) technology and geographic information systems, real-scene digital outcrop 3D models have provided a new method for the measurement and analysis of paleocurrents. This research is based on 3D models constructed using UAV oblique photography, which provide high-resolution texture information that allows geologists to accurately identify sedimentary structures which indicate paleocurrent directions. Utilizing the precise spatial information from 3D models, a platform for real-scene 3D models of digital outcrops is built for the visualization of the models. Paleocurrent measurements of commonly observed cross-bedding in the field are quantitatively carried out through a spatial three-point method. Computer correction of paleocurrent data is conducted based on azimuthal equidistant projection and spatial geometric relationship correction algorithms to eliminate the effects of stratigraphic structural changes. The processed paleocurrent data are subjected to statistical analysis and visual presentation. Interactive methods are used to draw regional rose diagrams, providing an intuitive display of the distribution and dominant directions of paleocurrent data within the region. Furthermore, this paper uses the Guanjiaya outcrops in the Ordos Basin as examples to implement sedimentary paleocurrent analysis based on real-scene digital outcrop 3D models. Through the aforementioned methods, the analysis of paleocurrents effectively replaces paleocurrent data field measurement and reduces the fieldwork burden. Additionally, It provides data support for interpreting source directions and inferring ancient slopes.

Keywords: Paleocurrent Analysis; Oblique Photogrammetry; Digital Outcrops; Cesium; Ordos Basin

古流向分析在沉积岩石学、古地理重建等领域具有重要地位，它有助于识别沉积物的来源、推断古斜坡的倾向、预测古海岸线的方位，以及确定沉积盆地边界的位置和走向。古流向的重建方法主要有磁组构分析、沉积结构分析、岩石成分分析、重矿物分析、颗粒大小分析、地貌分析和生物化石分析等，其中，沉积

构造是沉积物最常见的宏观特征之一，蕴含着沉积时大量的古流向信息，是确定古流向最直接、最明显且应用最广泛的标志之一 (Zhao et al., 2023)。传统的古流向分析方法主要包括野外数据采集和室内资料处理两个阶段。由于地质情况的复杂性和多样性，野外实地测量常面临较高的安全风险且测量难度大。此外，采集古流向数据是一项繁重的任务，为了确保数据具有统计意义，必须测得大量的数据，这对野外工作者的专业能力和工作强度提出了较高的要求。室内资料处理阶段，采集到的古流向数据通常以二维的表格、文字和照片的方式呈现，限制了数据的三维空间表达能力，在解释地质现象时不能直观地体现出数据与实际地质结构之间的空间关联，降低了数据的可解释性和直观性。

在野外，地质工作者使用罗盘直接进行岩层产状的测量，这个过程简单直接但通常较为耗时，并且容易受到地形等自然条件的限制 (卢立吉等, 2016)。地质工作者通常通过传统方法对数十个野外露头进行产状测量，投影校正后利用古流向玫瑰花图指示古水流的方向 (赵龙梅等, 2023)。此外，野外中存在较为明显的扁平砾石且定向排列，也可以指示古水流方向 (李彦杰等, 2022)。随着无人机和倾斜摄影技术的发展，利用无人机搭载的多镜头传感器采集倾斜影像可以构建包含丰富纹理特征和三维地理信息的数字露头实景三维模型。这种模型不仅可以满足地质学家对地质表面现象观察的需求，还能支持在三维空间进行计算和信息分析 (万剑华等, 2019)。倾斜摄影测量在地质露头采集、处理和建模 (印森林等, 2022; Wu et al., 2022)，以及智能化岩体结构面识别 (许文涛等, 2022)、岩层识别 (Chen et al., 2021、2022; Luo et al., 2024)、裂缝识别 (Wang et al., 2022; Panara et al., 2023) 及其它地质应用 (印森林等, 2022; Cirillo al., 2022; 董志成等, 2024; Speed et al., 2024; 宋盛渊等, 2025; Du et al., 2025) 等方面取得了较为丰硕的成果。在室内处理古流向资料方面，由于古流向数据量大，传统的球面旋转原理和方法将古流向数据校正到原始沉积状态往往需要耗费大量时间，效率低下。在二十世纪，处理古流向数据的方法已从最初的利用赤平投影原理进行手工校正 (Potter and Pettijohn, 1977) 发展到使用计算机对其校正 (于国芳等, 2008)。常用的校正软件如极射赤平投影软件 StereoNett 软件、开源软件 Innstereo 等都可以完成校正工作。Li 等人利用运动恢复结构技术提取沉积物波痕参数，基于点云模型和数字露头模型在软件中使用虚拟罗盘测量平面结构的方向，通过提取波长和波纹高度，波痕作为古流向指示特征之一，明确波痕的方向有助于确定古流向以及进行古地理的重建 (Li et al., 2019)。Freitas 等人提出用虚拟露头进行交错层古流向分析，利用无人机进行数据采集、处理并分析露头以获取交错层中的古流向数据，能够有效地获取陡峭和险峻的露头剖面数据 (Freitas et al., 2021)。Chiarella 等人提出了一种时间序列图，能够按地层顺序记录和展示古水流数据，可以快速识别异常分布，揭示盆地演化和主要水动力变

化过程 (Chiarella et al., 2021)。结合计算机和地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 技术, 利用 WebGIS 和 Cesium 三维地球引擎 (Di et al., 2016) 构建的数字露头实景三维平台可以在云端进行地质考察并实现三维模型量测功能 (陈建华等, 2024)。然而, 在以往的研究中, 尽管古流向资料的处理已达到较高的数字化水平, 但针对数字露头实景三维模型的一体化沉积古流向分析方法较少。

因此, 本文以无人机倾斜摄影影像构建的实景三维数字露头模型为基础, 研究了基于实景三维露头模型的古流向测量方法和分析方法, 开发了基于露头三维模型的古流向分析平台。基于平台实现了露头三维模型中指示构造的识别, 并在三维露头上标注实现了古流向数据的测量, 进而实现了古流向数据的批量校正和古流向分析结果的可视化。在上述基础上, 本文以鄂尔多斯盆地关家崖露头为例, 开展了基于实景三维数字露头模型的古流向分析应用。

1 基于实景三维露头模型的古流向测量方法

1.1 古流向标志识别方法

古水流的信息通过特定的沉积构造在地层中得以保存, 利用这些构造可以恢复和判断古水流的方向。常见指示古流向的层理构造有板状交错层理、楔状交错层理和槽状交错层理等 (刘宝珺等, 1985; 王成善、李祥辉, 2003; 陈妍等, 2008)。板状交错层理的前积层的倾斜方向表明了古水流方向, 而在垂直方向上看, 层理通常表现为水平状。板状交错层理的形成通常发生在水流相对平稳且持续的环境中, 沉积物在水流作用下沿特定方向移动。楔状交错层理的层系之间的界面为平面, 但相互之间不平行, 呈楔形状, 层系间常彼此切割, 纹层的倾向及倾角变化不定。在槽状交错层理中, 层系的底界面呈槽形冲刷状, 顶部纹层被侵蚀切割 (王成善、李祥辉, 2003)。在确定槽状交错层理时, 需要从三维空间中不同的面对其进行观察, 在横向剖面中, 层系界面显示为槽状, 而在纵向剖面中, 底界面表现为弧形并与纹层成斜交关系, 从顶部观察, 层系呈现重叠的瓣状结构 (马锋等, 2009)。

基于无人机倾斜摄影构建的三维模型提供的高分辨率纹理信息, 为地质学家在三维模型上准确识别出指示古流向的沉积构造提供了可能。倾斜摄影测量技术从多个视角采集影像, 通过无人机搭载倾斜摄影镜头能够采集高分辨率的影像, 并且影像数据的覆盖范围广。倾斜影像构建三维模型的处理流程主要有视影像预处理、多视影像联合平差、多视影像密集匹配、三角网构建、纹理映射等。三

维模型的质量直接决定了是否能在数字露头模型中有效识别古流向指示标志,因此构建高精度且真实感强的实景三维数字露头模型是三维可视化的核心。

1.2 基于露头模型和三点法的沉积构造产状测量方法

基于三维模型的空间信息对三维模型古流向指示构造的产状和厚度进行量测。如测量砂岩中交错层理的古流向需要测定交错层理最大倾角和倾向以及层系组的产状。在传统野外测量中,通常使用罗盘对产状进行量测。而倾斜摄影测量技术构建的数字露头实景三维模型具有丰富的空间坐标信息,使得利用 Cesium 搭建实景三维数字露头平台实现产状量测成为可能。基于 Cesium 实现三点法测量产状的具体思路如图 1 所示。Cesium 引擎加载的模型为 3D Tiles 格式数据,露头模型表面由不规则三角网构成,通过鼠标点击模型上三个不共线点构成辅助面,利用三维空间几何关系和坐标转换,得到结构面的产状信息。首先使用 Cesium 提供的接口获取 3D Tiles 格式模型的点位坐标。在三维模型中,当图形被渲染到屏幕上时,深度缓冲区存储每个像素的 Z 值(即在视线方向上的深度值),根据窗口坐标,从场景的深度缓冲区中拾取相应的位置,通过视图矩阵和投影矩阵将屏幕上的二维坐标转换为三维空间中的点,返回三维笛卡尔坐标。利用向量和坐标求出不共线的三个点构成的面,计算该平面的法向量,并求得其倾向和倾角。倾角是法向量与水平面之间的角度,通过计算法向量与垂直向量(通常是 Z 轴方向的单位向量)之间的夹角来求得。倾向是平面的下倾方向,通常以法向量在 X-Y 平面的投影与正北方向之间的角度来表示。

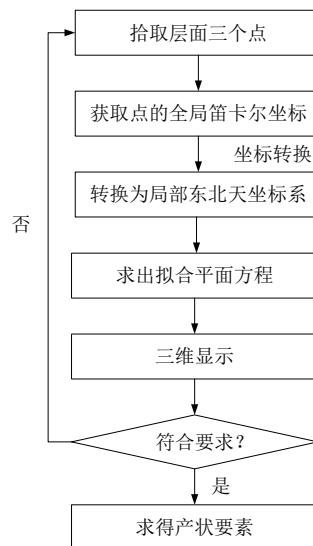


图 1 基于 Cesium 实现产状量测流程

Fig.1 Implementation of geological attitude measurement process based on Cesium

三点法测量产状的原理如图 2 所示,假设点击的三个不共线点的坐标分别为

$P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $P_3(x_3, y_3, z_3)$ ，计算两个向量 $\overrightarrow{P_1P_2}$ 和 $\overrightarrow{P_1P_3}$ ：

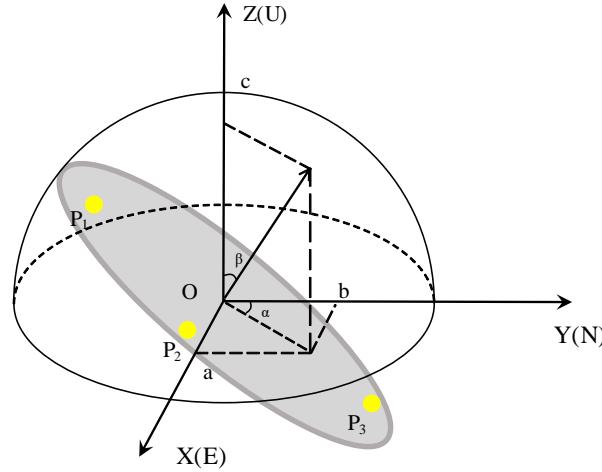


图 2 结构面的几何关系

Fig.2 Geometric relationships of structural planes

$$\begin{aligned}\overrightarrow{P_1P_2} &= (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1) \\ \overrightarrow{P_1P_3} &= (x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1)\end{aligned}\quad (1)$$

平面的法向量 \vec{N} 可以通过计算向量 $\overrightarrow{P_1P_2}$ 和 $\overrightarrow{P_1P_3}$ 的叉积得到：

$$\vec{N} = \overrightarrow{P_1P_2} \times \overrightarrow{P_1P_3} \quad (2)$$

带入点坐标，计算得：

$$\begin{aligned}\vec{N} &= ((y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (z_2 - z_1)(y_3 - y_1), \\ &\quad (z_2 - z_1)(x_3 - x_1) - (x_2 - x_1)(z_3 - z_1), \\ &\quad (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (y_2 - y_1)(x_3 - x_1))\end{aligned}\quad (3)$$

设三点构成平面方程为 $AX + BY + CZ + D = 0$ ，则解出 A、B、C、D 分别为：

$$\begin{aligned}A &= y_1z_2 - y_1z_3 - y_2z_1 + y_2z_3 + y_3z_1 - y_3z_2 \\ B &= -x_1z_2 + x_1z_3 + x_2z_1 - x_2z_3 - x_3z_1 + x_3z_2 \\ C &= x_1y_2 - x_1y_3 - x_2y_1 + x_2y_3 + x_3y_1 - x_3y_2 \\ D &= -x_1y_2z_3 + x_1y_3z_2 + x_2y_1z_3 - x_2y_3z_1 - x_3y_1z_2 + x_3y_2z_1\end{aligned}\quad (4)$$

法向量 \vec{N} 的分量为 \vec{N}_x 、 \vec{N}_y 、 \vec{N}_z ，倾向 α 和倾角 β 的关系：

$$\begin{cases} \vec{N}_x = \sin \alpha \sin \beta \\ \vec{N}_y = \cos \alpha \sin \beta \\ \vec{N}_z = \cos \beta \end{cases} \quad (5)$$

则该平面的倾角 β 通过法向量与垂直向上的单位向量的夹角关系表示：

$$\cos(\beta) = \frac{\overrightarrow{N}_z}{\sqrt{\overrightarrow{N}_x^2 + \overrightarrow{N}_y^2 + \overrightarrow{N}_z^2}} \quad (6)$$

倾向 α 的范围在 $0^\circ - 360^\circ$ 之间，因此需要考虑不同的情况计算倾向。

① 当 $\overrightarrow{N}_z > 0$ 时，

$$\beta = \cos^{-1} \frac{\overrightarrow{N}_z}{\sqrt{\overrightarrow{N}_x^2 + \overrightarrow{N}_y^2 + \overrightarrow{N}_z^2}} \quad (7)$$

若 $\overrightarrow{N}_x \geq 0$ 时，

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{\overrightarrow{N}_y}{\sqrt{\overrightarrow{N}_x^2 + \overrightarrow{N}_y^2}} \quad (8)$$

$\overrightarrow{N}_x \leq 0$ 时，

$$\alpha = 2\pi - \cos^{-1} \frac{\overrightarrow{N}_y}{\sqrt{\overrightarrow{N}_x^2 + \overrightarrow{N}_y^2}} \quad (9)$$

② 当 $\overrightarrow{N}_z \leq 0$ 时，

$$\beta = \cos^{-1} \frac{-\overrightarrow{N}_z}{\sqrt{\overrightarrow{N}_x^2 + \overrightarrow{N}_y^2 + \overrightarrow{N}_z^2}} \quad (10)$$

若 $-\overrightarrow{N}_x \geq 0$ 时，

$$\alpha = -\cos^{-1} \frac{\overrightarrow{N}_y}{\sqrt{\overrightarrow{N}_x^2 + \overrightarrow{N}_y^2}} \quad (11)$$

当 $-\overrightarrow{N}_x < 0$ 时，

$$\alpha = 2\pi - \cos^{-1} \frac{-\overrightarrow{N}_y}{\sqrt{\overrightarrow{N}_x^2 + \overrightarrow{N}_y^2}} \quad (12)$$

根据上述倾向、倾角与拟合平面法向量的关系，即可求出产状。

1.3 基于露头模型的立面沉积构造产状测量方法

在平台上测量结构面产状时，必须通过鼠标能够点击到模型上的三个点构成辅助面进行量测，但当测量交错层理时，在平面上点击 A、B、C 三点构成的辅助面如图 3(a)，这明显是错误的，其结果并不是想要测量的前积纹层，这是由于其在露头上只出露侧边，无法通过在模型上点击三个点构成的辅助面来表示前积

纹层所在的面，即点击不到延伸到露头内部的位置，在野外通常是放置一个本子作为辅助面，进行产状的量测。因此尝试增加一种在立面上测量交错层理产状的计算方法。首先在平台上沿着前积纹层方向绘制两个点 A、B，选取在立面上非 A、B 所在直线上的任意点 C 点，并要求三个点 A、B、C 构成的面垂直于前积纹层。计算 A、B、C 这三点构成的面的法向量为 N_1 ，为了测量交错层理，构建一个由向量 AB 和法向量 N_1 构成的新平面，即图 3(b)中的面 $ABB'A'$ ，该面与面 ABC 垂直，面 $ABB'A'$ 即为前积纹层，其法向量为 N_2 ，通过法向量 N_2 与该面倾向、倾角的关系求解，具体通过前节产状量测方法来测得此时面 $ABB'A'$ 的产状。

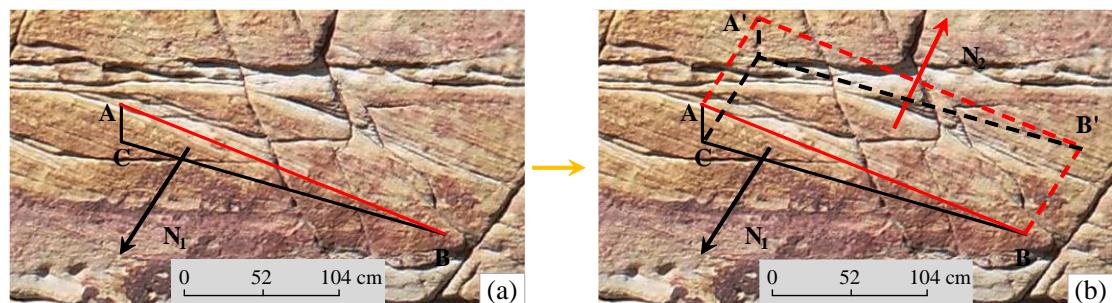


图 3 交错层理产状计算方法 ((a) 模型上点击三点示意; (b) 立面上测量层理产状示意)

Fig.3 A calculation method for cross-bedding attitude ((a) schematic diagram of clicking three points on the model; (b) schematic diagram of measuring bedding attitude on a facade)

1.4 距离测量方法

空间距离测量是测量数字露头实景三维模型上两个点之间的空间距离，监听 Cesium 的 ScreenSpaceEventHandler 方法，捕捉绘制时的点击事件，获取到两个点的三维笛卡尔坐标系下的位置坐标 $A (x_1, y_1, z_1)$ 和 $B (x_2, y_2, z_2)$ 进而计算两点的距离，如图 4(a)所示。

在三维模型分析中，测定两点沿模型表面的路径长度采用线性插值和模型表面求交的方法。通过在模型的两个已知点之间生成一系列等间隔的中间点，并计算这些点与模型表面的交点，进而以两点间距离的和估算实际路径长度，如图 4(b) 所示。

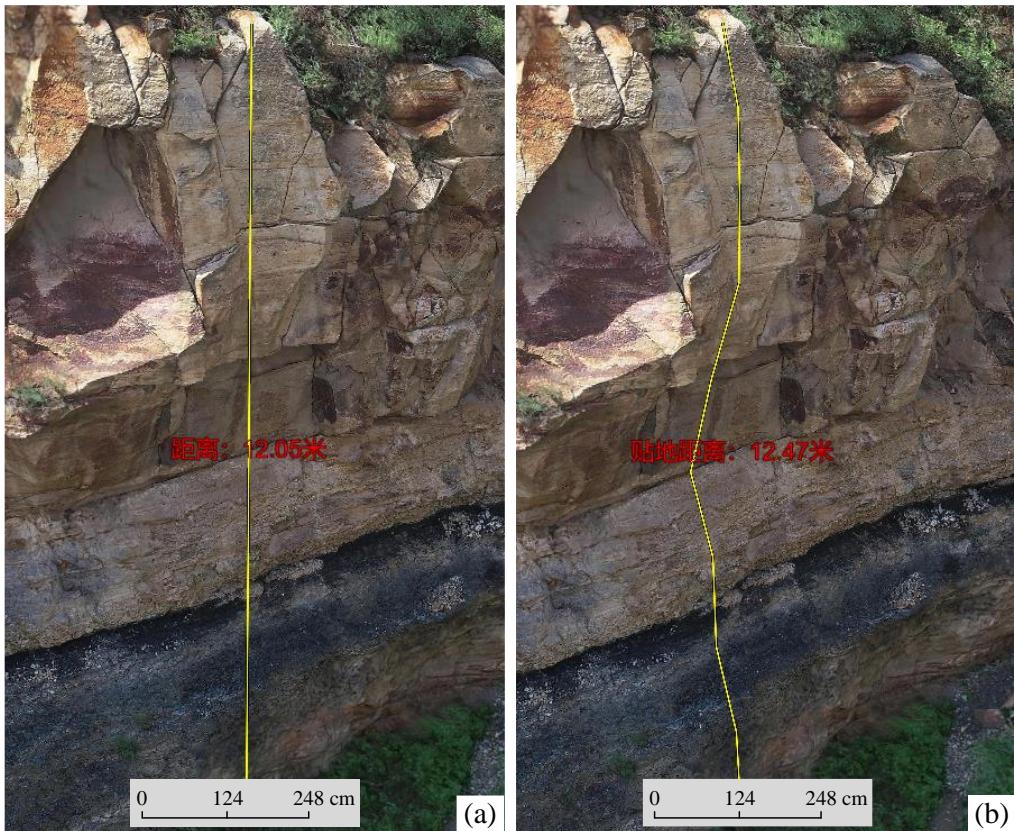


图 4 空间距离量测 (a) 与贴地距离量测 (b) 示意

Fig.4 Schematic diagrams of spatial distance measurement (a) and ground-adjacent distance measurement (b)

2 基于实景三维露头模型的古流向分析方法

2.1 古流向数据校正方法

由于古流向数据量大, 传统的手工校正方法已被计算机自动化校正所取代。基于 WebGIS 实现批量古流向校正, 可用于恢复沉积层在形成时的空间方向。该方法的基本原理为: 以地层走向作为旋转轴, 通过旋转和三维空间几何实现将地层从其现有的倾斜状态调整到理论上的水平位置, 求解此时前积纹层理的产状。

当前已知地层的产状和前积纹层的产状, 由 2.2 节可计算得到地层的法向量与前积纹层的法向量, 根据倾向和走向相互垂直的关系, 走向值为倾向值减去 90° , 如果结果为负, 则加上 360° 来使结果在 0° 至 360° 范围内, 确保得到一个非负的角度值。走向的向量表示为 N_0 , 当地层平面绕 N_0 顺时针旋转其倾角 α 角度时, 该平面会变为水平, 而前积纹层的法线 N_1 绕 N_0 顺时针旋转同样的 α 角度后将得到产状水平后的前积纹层的法线, 根据法线与倾向、倾角的关系, 计算出此时前积纹层的倾向和倾角 (钱辉等, 1997), 如图 5 所示。

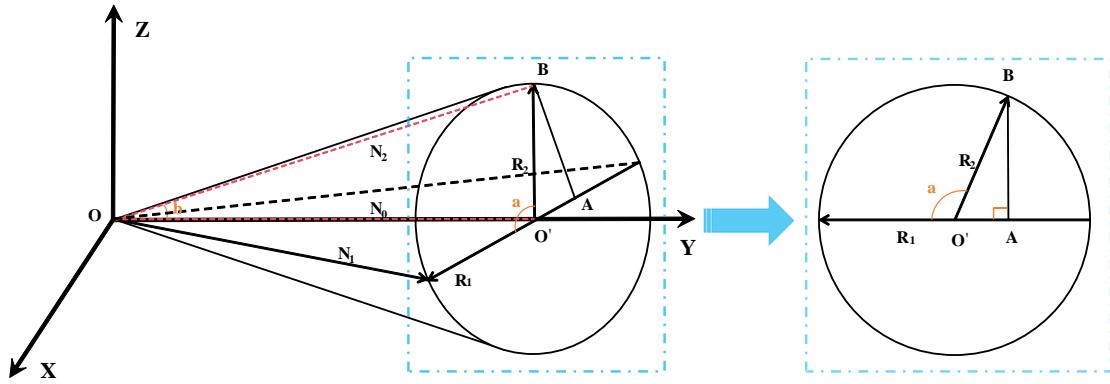


图 5 古流向校正原理几何示意

Fig.5 Geometric schematic diagram of paleocurrent direction correction principle

设向量 N_1 绕轴 N_0 旋转得到一个圆锥, 先求得向量 N_1 绕轴 N_0 旋转的锥顶角 b 的余弦:

$$\cos(b) = \frac{N_0 \square N_1}{\|N_0\| \|N_1\|} \quad (13)$$

设 N_0 和 N_1 为单位向量, 则可简化为:

$$\cos(b) = N_0 \square N_1 \quad (14)$$

原点 O 指向圆锥底面圆心 O' 的向量为 OO' , OO' 为沿着 N_0 的方向, 长度为向量 N_1 在 N_0 上的投影:

$$OO' = N_0 \cos(b) \quad (15)$$

从底面圆心 O' 指向 N_1 的长度为半径的向量 R_1 :

$$R_1 = N_1 - N_0 \cos(b) \quad (16)$$

从底面圆心 O' 指向 N_2 的长度为半径的向量 R_2 :

$$R_2 = N_2 - N_0 \cos(b) \quad (17)$$

向量 R_2 在 R_1 方向上的投影 $O'A$ 和垂直于 R_1 方向上的分量 AB 为:

$$R_{2\parallel} = O'A = \frac{R_1}{\|R_1\|} \|R_2\| \cos(a) = R_1 \cos(a) \quad (18)$$

$$R_{2\perp} = AB = (R_1 \times N_0) \sin(a) \quad (19)$$

所以向量 R_2 为 $O'A$ 加 AB :

$$R_2 = R_{2\parallel} + R_{2\perp} = R_1 \cos(a) + (R_1 \times N_0) \sin(a) \quad (20)$$

此时式 (17) 与式 (20) 相等都表示 R_2 , 整理得向量 N_2 为:

$$N_2 = (N_0 \square N_1) N_0 (1 - \cos(a)) + N_1 \cos(a) + (N_1 \times N_0) \sin(a) \quad (21)$$

在计算机校正地质数据的过程中, 必须确保所有输入值均处于有效的取值范

围之内。倾向和倾角的值应符合其定义范围，并且任何计算过程都应避免产生无效或无意义的结果（如负角度或超出 360° 的角度）。在实现批量校正古流向数据的计算过程中，传入一个地层数据集和相应的一组前积纹层数据集，采用循环结构来迭代处理这些数据集，使系统一次性处理整批数据并输出最终的校正结果，提高校正效率。

2.2 古流向统计方法

古流向数据的统计分析方法众多，在定向分析中最为常见的数据展示方式包括玫瑰花图、直方图和极点图。在定量分析方面，常用的计算方法包括算数平均法、矢量平均法以及矩法（陈建强等，2015）。玫瑰花图是一种用于展示方向数据和角度数据的统计图形，它有三种主要形式：单向、双向和多向玫瑰花图。在古流向玫瑰花图中，不同的玫瑰花图对应于不同的古流向模式。

本文采用玫瑰花图作为古流向统计、展示方法外，还设计了在三维模型上显示古水流方向的功能，当用户使用鼠标点击模型上的特定位置时，将在该位置添加三维古流向箭头。该功能直观地展示了三维露头中古水流的方向，有效地克服了传统二维照片在展示古流向的局限，例如当古水流方向垂直于屏幕时，二维照片中的箭头仅显示为一个点，无法正确展示方向。而在基于 Cesium 的三维环境中，用户可以通过旋转和缩放地球模型自由地调整视角和观察点位置，从多个视角观察露头，以全面获取垂直于观察平面的古流向信息。

2.3 古流向资料解释

古流向资料解释需要通过古流向玫瑰花图和区域展布图进行数据分析，并结合岩相以及相关地质资料。根据玫瑰花图解释古流向模式通常分为四种：单峰水流模式指的是古流向只有一个主要的水流方向存在；双极双峰水流模式涉及两个相反的流向；倾斜双峰水流模式描述的是两个主要水流方向的夹角小于 180° ；而多峰水流模式则表示存在多个主要的水流方向（Tucker, 2011）。

3 实景三维数字露头古流向分析应用

3.1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地东缘横跨陕西和山西两省，其中包括晋西挠褶带。这一区域是在燕山期形成的，分隔了鄂尔多斯块体与山西断隆之间的构造-地貌边界带（廖

昌珍等, 2007)。晋西挠褶带位于吕梁山脉的西侧, 主要为南北向展布, 长度约400km, 宽度在30至60km之间。在中晚元古代, 研究区处于相对隆起状态, 在中晚寒武世、早奥陶世、晚石炭世和二叠纪研究区记录了薄层沉积。到侏罗纪末期, 研究区抬升并从华北地台分离出来, 成为鄂尔多斯盆地东部边缘。燕山运动期间, 受西向挤压和吕梁山隆升, 叠加基底断裂活动, 共同导致了这一南北走向挠褶带的形成(沈玉林, 2009) (图6)。

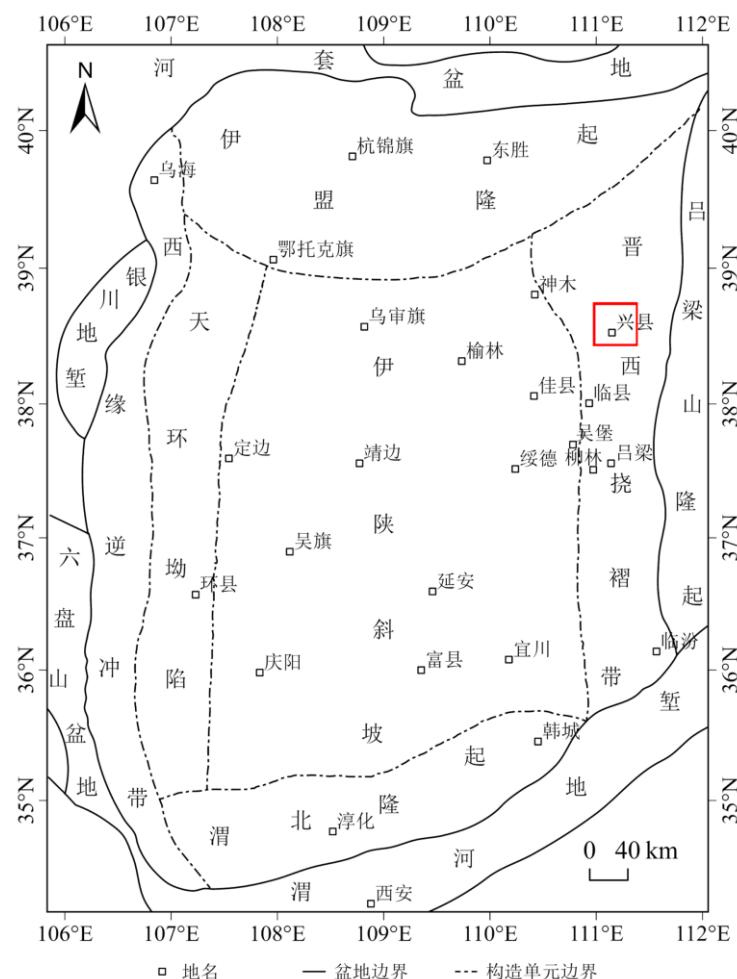


图6 鄂尔多斯盆地构造单元图(据桂宝玲等, 2024) (图中红框所示为本文古流向分析应用中关家崖露头所在位置——陕西省吕梁市兴县蔚汾镇关家崖村)

Fig.6 A structural unit map of the Ordos Basin (Gui et al., 2024)(the location of the Guanjiaya outcrops applied in the paleocurrent analysis of this study, as indicated by the red box in the figure, is Guanjiaya Village, Weifeng Town, Xing County, Lvliang City, Shaanxi Province, China)

3.2 基于三维数字露头的古流向分析

本文搭建了鄂尔多斯盆地数字露头实景三维平台用于可视化三维模型和交互式处理古流向数据, 并上传了鄂尔多斯东缘和西缘的部分数字露头模型。

在平台上实现古流向分析主要分为：露头加载与古流向指示构造识别、露头信息录入、产状量测与相关层厚测量、批量古流向数据校正、玫瑰花图绘制、模型上古流向箭头添加、数据保存。

(1) 露头加载与古流向指示构造识别

在鄂尔多斯盆地东缘关家崖地区使用无人机采集了 4 组露头数据并对其进行了实景三维模型构建（1 个整体和 3 个细节露头模型），其中关家崖整体露头分辨率较低，用于三维环境查看露头的分布，细节露头分辨率高，用于查看和识别沉积构造（表 1）。加载关家崖露头模型，通过模型旋转和缩放，结合相关地质资料，对关家崖露头模型指示古流向的沉积构造进行观察，发现有明显且清晰的大型板状交错层理、槽状交错层理、楔状交错层理（图 7）。

表 1 关家崖露头实景三维模型分辨率与区域面积

Table 1 Resolutions and regional area of the Guanjiaya outcrop real-scene 3D models

关家崖露头 类型	模型分辨率 (mm/px)	区域面积 (m ²)
整体露头	36.20	259000
细节露头 1	1.91	1390
细节露头 2	2.83	2580
细节露头 3	2.56	7350



图7 关家崖露头（模型）发育的各种层理（(a) 板状交错层理；(b) 槽状交错层理；(c) 楔状交错层理）

Fig.7 Various beddings developed in the Guanjiaya outcrops (models) ((a) tabular cross-bedding; (b) trough cross-bedding; (c) wedge-shaped cross-bedding)

(2) 露头信息录入

通过关家崖整体露头模型的观察，通过三维标绘功能，直接在数字露头实景三维模型上进行地层分界标注。

关家崖露头1位于关家崖煤矿与关家崖村委会之间，上覆地层为太原组底部桥头砂岩，粒度较粗，自下而上粒度变细。沉积环境为潮汐三角洲环境。与下伏

地层本溪组呈冲刷接触关系。下伏本溪组以泥岩为主，呈正粒序结构。砂体内部各种层理发育良好，存在板状交错层理、楔状交错层理和槽状交错层理。

关家崖露头 2 地点位于关家崖村委会旁边，地层分界线为太原组和山西组分界。下伏地层为太原组上部地层，砂体与煤互层，砂体厚约 5m，煤层厚约 2m，且煤层中硫磺含量高，含有 6、7 号煤层。砂岩中含有凝灰岩夹层，砂岩往上为碳质泥岩。沉积环境为海陆过渡环境，河流入海区域沉积。上覆地层为山西组底部北岔沟砂岩标准层，砂体厚度约 5m，粒度由下往上变细，呈正粒序结构，砂体内部发育板状交错层理。沉积环境为三角洲环境，河流成因。

(3) 产状量测与相关层厚测量

首先进行地层产状的测量，以确定地层面的空间位置和几何形态。通过在测量面上依次点击三个点，生成一个结构辅助面，设定当前测量面的类型为地层、板状交错层理等，在模型的相应测量位置显示产状结果和测量点图标，如图 8 所示。图中左侧的古流向统计表包括序号、类别、坐标、倾向、倾角，其中序号与三维模型中序号相同，能够直观地将二维数据与三维空间相对应；类别为测量面类型；坐标显示为真实地理空间的经纬度坐标，用度分秒表示。倾向、倾角显示为通过平台计算得到的测量结果。对板状交错层理的前积纹层理进行产状测量，方式与地层测量相同。对前积纹层数据进行多次测量，记录结果如图 9 所示。

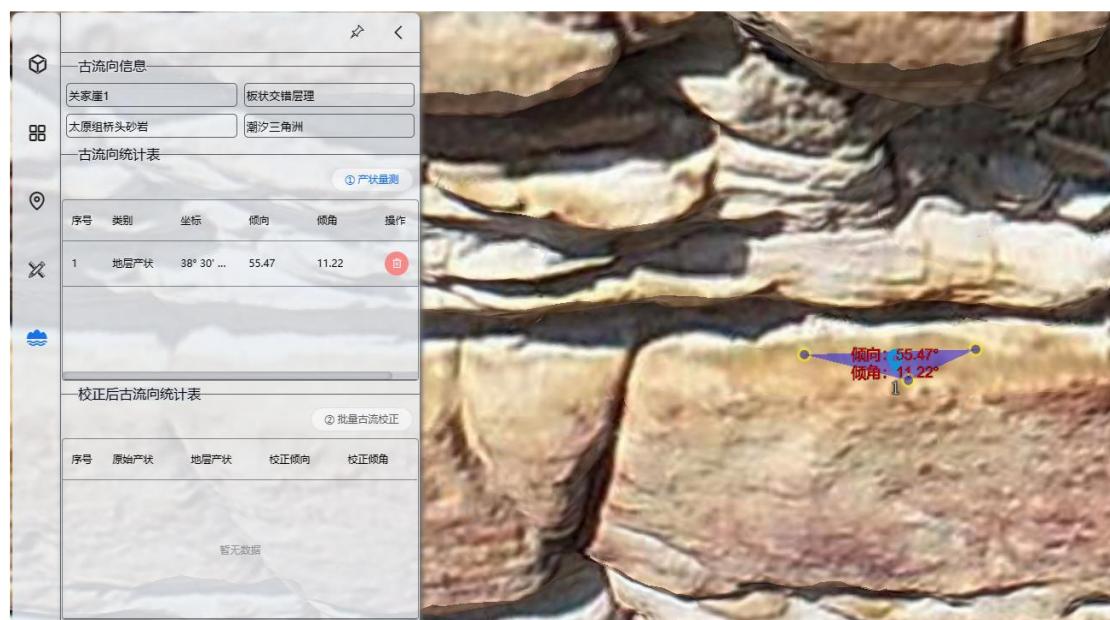


图 8 地层产状测量结果

Fig.8 Measurement results of geological formation attitudes

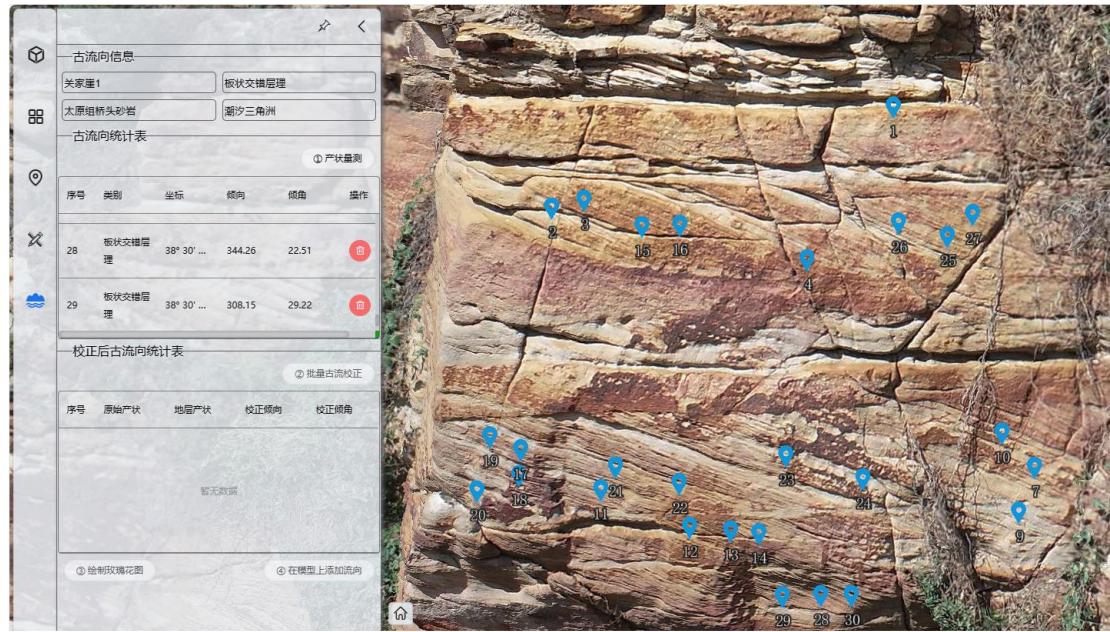


图 9 前积纹层产状测量结果

Fig.9 Measurement results of foreset laminae attitudes

通过空间距离和贴地距离测量功能测量层系厚度。在三维模型中，层位立面的测量，上述两个距离测量结果大致相等。

(4) 批量古流向数据校正

为了提高古流向数据校正效率，采用批量校正方法。校正时有两个数据表，一个是原始古流产状数据，另一个是地层产状数据，通过选择一个或多个原始产状数据，执行校正算法，校正结果显示在校正后古流向统计表中，该列表包含层理原始产状、地层产状、层理校正后倾向和倾角（图 10）。表 2 为关家崖露头 1 校正后的古流向数据。

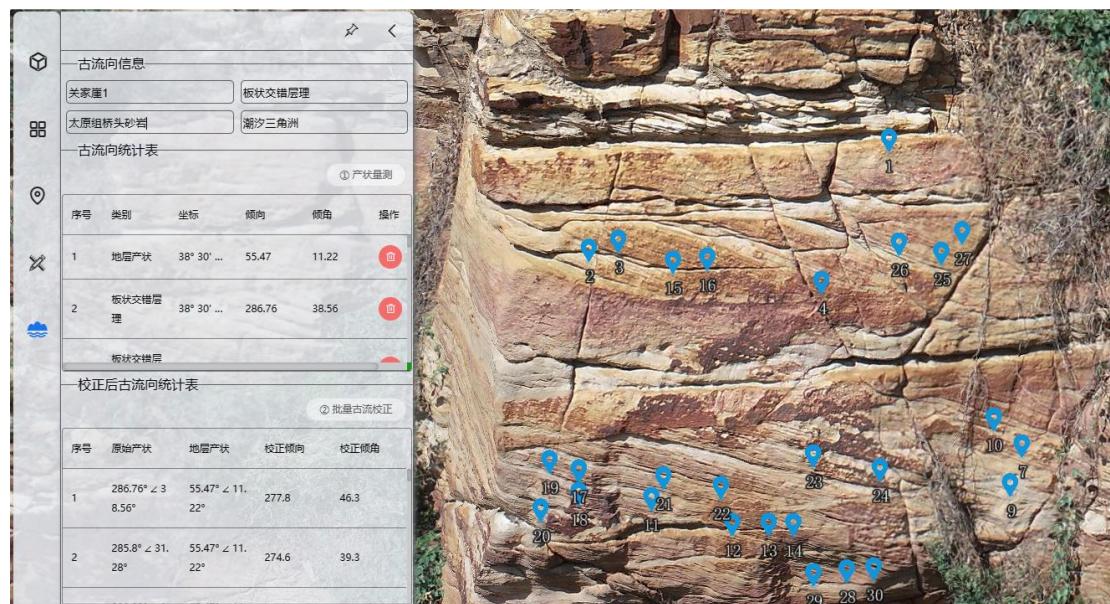


图 10 古流向批量校正结果

Fig.10 Batch correction results of paleocurrent directions

表 2 关家崖露头 1 校正后的古流向产状统计

Table 2 Post-correction paleocurrent direction attitude statistics of Guanjiaya outcrop 1

序号	地层产状	原始数据产状	校正后产状
1	55.47 °∠11.22 °	286.76 °∠38.56 °	277.8 °∠46.3 °
2		285.88 °∠31.28 °	274.6 °∠39.3 °
3		283.23 °∠35.55 °	273.9 °∠43.8 °
4		284.56 °∠33.75 °	274.5 °∠41.9 °
5		285.73 °∠31.37 °	274.6 °∠39.4 °
6		281.31 °∠27.62 °	269.7 °∠36.3 °
7		304.53 °∠35.50 °	291.7 °∠40.7 °
8		292.23 °∠34.00 °	280.8 °∠41.1 °
9		286.19 °∠33.04 °	275.5 °∠41.0 °
10		297.76 °∠31.54 °	284.3 °∠37.9 °
11		343.73 °∠23.32 °	316.8 °∠22.3 °
12		318.98 °∠29.68 °	301.0 °∠32.7 °
13		291.15 °∠28.63 °	277.7 °∠36.1 °
14		294.98 °∠36.40 °	284.0 °∠43.0 °
15		281.71 °∠31.24 °	271.3 °∠39.7 °
16		290.14 °∠26.64 °	276.0 °∠34.3 °
17		316.90 °∠27.79 °	297.9 °∠31.3 °
18		303.59 °∠26.35 °	286.2 °∠32.1 °
19		304.41 °∠33.23 °	290.6 °∠38.5 °
20		284.35 °∠32.40 °	273.8 °∠40.6 °
21		308.09 °∠18.81 °	283.3 °∠24.5 °
22		261.93 °∠31.31 °	255.9 °∠41.6 °
23		271.22 °∠32.96 °	263.5 °∠42.5 °
24		288.46 °∠34.53 °	277.9 °∠42.1 °
25		285.67 °∠37.61 °	276.6 °∠45.5 °
26		276.08 °∠30.59 °	266.7 °∠39.7 °
27		344.26 °∠22.51 °	316.3 °∠21.5 °
28		308.15 °∠29.22 °	291.6 °∠34.1 °
29		339.99 °∠23.48 °	313.7 °∠23.2 °
26		276.08 °∠30.59 °	266.7 °∠39.7 °
27		344.26 °∠22.51 °	316.3 °∠21.5 °
28		308.15 °∠29.22 °	291.6 °∠34.1 °
29		339.99 °∠23.48 °	313.7 °∠23.2 °

对关家崖露头 2 楔状交错层理进行上述同样的测量, 校正后的古流向统计数据如表 3。

表 3 关家崖露头 2 校正后的古流向产状统计

Table 3 Post-correction paleocurrent direction attitude statistics of Guanjiaya outcrop 2

序号	地层产状	原始数据产状	校正后产状
1	$316.29^{\circ} \angle 20.32^{\circ}$	$264.07^{\circ} \angle 22.66^{\circ}$	$208.3^{\circ} \angle 18.7^{\circ}$
2		$239.04^{\circ} \angle 24.88^{\circ}$	$197.2^{\circ} \angle 28.0^{\circ}$
3		$258.05^{\circ} \angle 30.16^{\circ}$	$219.3^{\circ} \angle 25.5^{\circ}$
4		$271.22^{\circ} \angle 29.38^{\circ}$	$230.0^{\circ} \angle 20.4^{\circ}$
5		$269.06^{\circ} \angle 24.24^{\circ}$	$215.9^{\circ} \angle 17.8^{\circ}$
6		$267.94^{\circ} \angle 26.62^{\circ}$	$221.0^{\circ} \angle 19.6^{\circ}$
7		$268.69^{\circ} \angle 25.18^{\circ}$	$218.1^{\circ} \angle 18.5^{\circ}$
8		$246.35^{\circ} \angle 23.95^{\circ}$	$200.2^{\circ} \angle 25.1^{\circ}$
9		$223.33^{\circ} \angle 18.76^{\circ}$	$179.3^{\circ} \angle 28.1^{\circ}$
10		$222.56^{\circ} \angle 25.81^{\circ}$	$188.3^{\circ} \angle 33.4^{\circ}$
11		$296.49^{\circ} \angle 24.52^{\circ}$	$246.0^{\circ} \angle 8.6^{\circ}$
12		$269.14^{\circ} \angle 23.13^{\circ}$	$212.8^{\circ} \angle 17.2^{\circ}$
13		$251.83^{\circ} \angle 23.04^{\circ}$	$201.7^{\circ} \angle 22.8^{\circ}$
14		$272.88^{\circ} \angle 20.30^{\circ}$	$205.7^{\circ} \angle 14.8^{\circ}$
15		$247.64^{\circ} \angle 23.92^{\circ}$	$200.9^{\circ} \angle 24.7^{\circ}$
16		$230.65^{\circ} \angle 28.65^{\circ}$	$196.8^{\circ} \angle 33.3^{\circ}$
17		$269.72^{\circ} \angle 25.81^{\circ}$	$214.7^{\circ} \angle 21.0^{\circ}$
18		$265.79^{\circ} \angle 21.78^{\circ}$	$206.8^{\circ} \angle 17.7^{\circ}$
19		$251.76^{\circ} \angle 21.73^{\circ}$	$198.9^{\circ} \angle 22.1^{\circ}$
20		$233.69^{\circ} \angle 31.39^{\circ}$	$202.0^{\circ} \angle 34.5^{\circ}$
21		$240.39^{\circ} \angle 23.54^{\circ}$	$195.9^{\circ} \angle 26.7^{\circ}$
22		$233.96^{\circ} \angle 18.86^{\circ}$	$184.3^{\circ} \angle 25.5^{\circ}$
23		$286.14^{\circ} \angle 21.55^{\circ}$	$218.5^{\circ} \angle 10.7^{\circ}$
24		$260.42^{\circ} \angle 24.52^{\circ}$	$210.4^{\circ} \angle 20.9^{\circ}$
25		$264.75^{\circ} \angle 27.95^{\circ}$	$221.1^{\circ} \angle 21.6^{\circ}$
26		$259.36^{\circ} \angle 22.21^{\circ}$	$204.3^{\circ} \angle 20.0^{\circ}$
27		$287.93^{\circ} \angle 29.40^{\circ}$	$250.0^{\circ} \angle 14.8^{\circ}$
28		$289.45^{\circ} \angle 29.99^{\circ}$	$253.8^{\circ} \angle 14.7^{\circ}$

(5) 玫瑰花图绘制与古水流优势方向确定

针对不同的露头模型, 选择需要绘制玫瑰花图的校正后产状数据, 绘制并显示古流向玫瑰花图, 如图 11 所示。古流向玫瑰花图是通过统计倾向的优势方向计算得出的, 将 360° 分为 36 份, 统计落在其中的倾向的个数, 即每个玫瑰花瓣代表特定方向区间的频率。



图 11 关家崖露头 1 (a) 太原组某一层位、露头 2 (b) 山西组某一层位古流向玫瑰花图

Fig.11 Paleocurrent direction rose diagrams of a certain stratigraphic horizon of the Taiyuan Formation in Guanjiaya outcrop 1 (a) and a certain stratigraphic horizon of the Shanxi Formation in Guanjiaya outcrop 2 (b)

关家崖露头 1 测量的古流向众数组为 $[270^{\circ}, 280^{\circ}]$ 区间, 平均古水流方向为 275° 。关家崖露头 2 测量的古流向众数组为 $[200^{\circ}, 210^{\circ}]$ 区间, 平均古水流方向为 205° 。

(6) 模型上古流向箭头添加

在数字露头实景三维模型中的相应位置可放置指示古水流方向的箭头。这个箭头在三维空间中指示了古水流的方向, 同时可在其上方显示出古水流的优势方向值。如图 12 所示, 关家崖露头 1 太原组某一地层古水流指示方向为 275° , 关家崖露头 2 山西组某一地层古水流指示方向为 205° 。

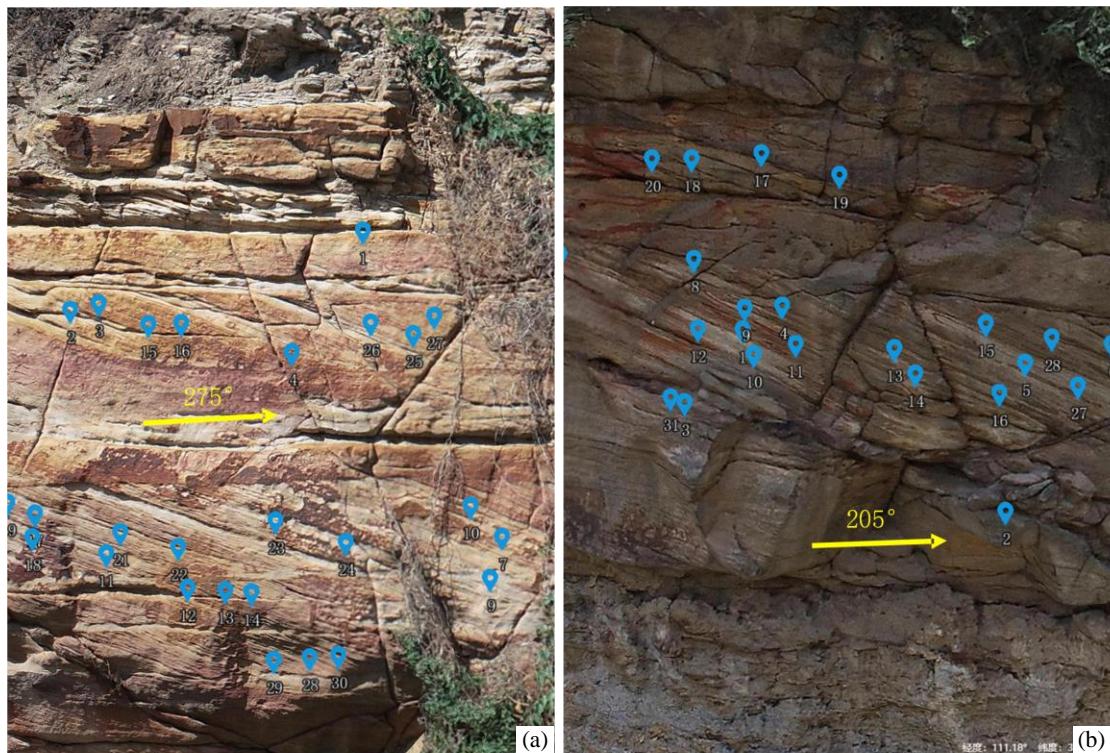


图 12 关家崖露头 1 (a) 太原组某一层位、露头 2 (b) 山西组某一层位古水流方向

Fig.12 Paleocurrent directions of a certain stratigraphic horizon of the Taiyuan Formation in Guanjiaya outcrop 1 (a) and a certain stratigraphic horizon of the Shanxi Formation in Guanjiaya outcrop 2 (b)

(7) 数据保存

古流向信息和测量结果经检查后可进行数据保存, 便于再次查询和添加数据, 增强数据的实用性和可扩展性。

3.3 区域古流向分析

由于区域古流向图需要获取具有统计意义的古水流数据, 本文中的实景三维数字露头模型分布和数量还不够, 因此, 区域古流向分析采用了部分文献中的数据。图 13 中玫瑰花图绘制所用数据部分为陈钟惠 (1989) 和陈全红等 (2009) 收集得到的古水流数据信息, 在区域古流向图中显示呼鲁斯台、海则庙、关家崖剖面山西组的古水流数据, 西部的呼鲁斯台具有北西向南东方向的古流向, 东部的海则庙古水流的优势方向为北东向南西方向, 关家崖的古流向为南西向北东方向 (说明: 图 11、12 中关家崖露头 1 中的地层古流向为北东-南西向及近东西向仅反映的是地层局部古水流方向)。海则庙的古水流方向显示出该地区北高南低的地形特征, 指示其物源位于北东方向。而呼鲁斯台、关家崖的古水流方向与区域地质背景中山西期海退方向相一致。在关家崖露头中存在砂体与煤互层的地层,

砂岩层可能代表河流活动增强时期，河水能够携带大量的砂粒并形成砂岩；而煤层可能形成于河流活动减弱的环境中，植被丰富且水体静止，促使植物残骸在缺氧条件下积累并最终转化为煤炭。

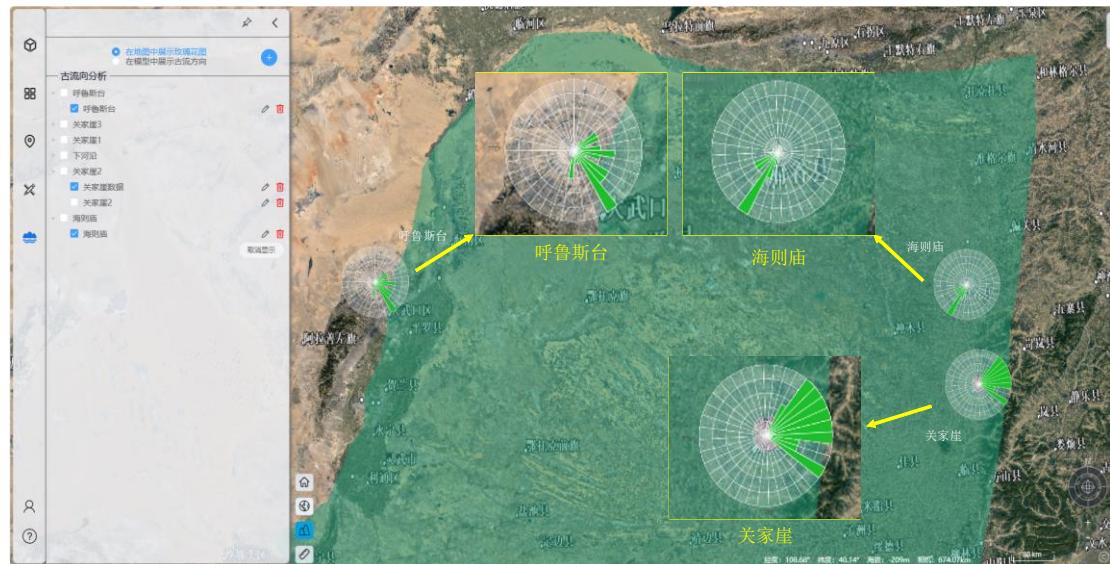


图 13 区域古流向图（部分数据引自陈钟惠（1989）和陈全红等（2009））

Fig.13 Regional paleocurrent direction map (partial data cited from Chen (1989) and Chen et al. (2009))

4 讨论

本文深入研究了传统古流向测量方法与基于实景三维露头模型的古流向分析方法，基于 Cesium 开源三维地球引擎搭建的鄂尔多斯盆地数字露头实景三维平台能够实现高分辨率的三维露头的可视化效果，以进行古流向指示构造的判别，结合三维模型产状量测算法与距离测量算法的研究，设计并实现了基于实景三维露头模型在线古流向数据测量、古流向批量校正与交互式统计分析的一体化平台。同时，本文基于鄂尔多斯关家崖实景三维数字露头模型进行了古流向分析应用。利用该方法进行数字露头研究具有以下优势：

(1) 相较于传统野外古流向指示标志识别过程，以数字露头实景三维模型为基础构建的三维可视化平台，地质学家能够直接在模型上进行交互操作，如旋转、缩放和平移，以便于从不同角度和维度准确识别古流向指示构造。通过此方式，地质工作者能够更加全面、直观地了解露头地质现象的时空分布和特征，并且可以随时查看露头，不受空间和时间的约束。

(2) 基于实景三维露头模型实现古流向的测量，地质学家可以轻松地通过数字测量的方法获取高处立面和陡峭露头的古流向数据，这些数据的获取往往超越了传统野外测量的可达范围，不仅提高了数据采集的安全性和效率，还扩展了可

测数据的空间范围。此外，相比传统表格和拍摄照片的方式，在三维模型上直接标注测量数据的位置，能够在解释地质现象时直观地体现出数据与实际地质结构之间的空间关联，增强了数据的可解释性。

(3) 基于实景三维露头模型实现的古流向批量校正与展示方法，能够高效地处理大量的古流向数据，通过在模型上添加三维箭头的方式展示古水流方向，避免了视角限制。构建的一体化古流向分析平台实现以遥感影像作为底图的区域玫瑰花图展示功能，制图数据易更改，操作流程更简单。

但是，本文仍然存在以下几点不足需要在后续研究中进行改进。

(1) 实景三维露头模型分辨率不足影响了露头古流向的分析。无人机倾斜摄影采集过程对三维建模的分辨率影响较大，使用无人机以较高航高拍摄时，建模后无法准确的识别出纹理特征，例如对于波痕、槽模等古流向指示标志，通常要求较高的图像分辨率才能准确识别和测量。后续在数据采集时可结合近景摄影和实时仿地倾斜摄影测量以便构建高精度的三维露头模型。

(2) 目前采用的古流向分析方法主要针对野外常见的交错层理进行数据处理和分析，并未对其它指示标志进行处理和参数计算，后续需要完善和拓宽古流向分析方法。

(3) 在平台上测量古流向产状时，需要先绘制结构面进行拟合，该面的选取对于测量的结果影响较大，目前平台采用的是三点法产状测量，后续应增加多点拟合法测量。

5 结论

本文研究并实现了基于数字露头实景三维模型的古流向测量和分析，得出以下结论：

(1) 基于无人机倾斜摄影构建的三维露头模型提供了高分辨率的纹理信息，为准确识别古流向指示构造提供了有效数据。利用三维模型的空间信息，对指示构造进行定量的测量并利用三维空间校正算法可实现古流向数据的批量校正。

(2) 构建的数字露头平台采用交互式方法，能够在三维模型上展示古水流方向，同时能够以玫瑰花图直观展示古流向数据在区域范围内的分布情况和优势方向。

(3) 本文提出的方法为野外测量古流向数据提供了全新而有效的补充，也为地质研究者提供了一种测定古流向的新颖研究方式，有助于古地理环境重建等研究工作的开展。

致谢

本文由“深时数字地球”（Deep-time Digital Earth, DDE）国际大科学计划、国家科技重大专项项目课题“苏里格低渗透致密砂岩储层结构重建技术”（编号：2016ZX05050005）和成都理工大学研究生教育教学改革重点项目“实景三维数字露头实践教学平台研究、实现与示范”（编号：2022YJG112）联合资助。

References

- Chen, J. H., Zhong, H. T., Hou, M. C., et al., 2024. Online Field Trip Applications of the Web Platform for Real-scene 3D Digital Outcrops. *Acta Geoscientica Sinica*, 45(2): 232-242 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. Q., Zhou, H. R., Wang, X. L., 2015. Sedimentology and Paleogeography: A Textbook. Geological Publishing House, Beijing, China (in Chinese).
- Chen, J., Lu, J., Wang, B., et al., 2022. Differentiating Outcropping Strata from Oblique Photogrammetric Data Using an Octree-based Convolutional Neural Network with Spatial Parameters. *Computers & Geosciences*, 169: 105245. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105245>
- Chen, J., Wang, B., Wang, F., et al., 2021. Identification of Outcropping Strata from UAV Oblique Photogrammetric Data Using a Spatial Case-Based Reasoning Model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 103: 102450. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102450>
- Chen, Q. H., Li, W. H., Liu, H. W., et al., 2009. Provenance Analysis of Sandstone of the Upper Carboniferous to Middle Permian in Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography*, 11(6): 629-640 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y., Chen, S. Y., Zhang, P. F., et al., 2008. Discussion on Research Methods of Paleocurrent Direction. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 15(1): 37-40 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. H., 1989. Sedimentary Environments and Coal Accumulation Laws of the Late Paleozoic Coal-Bearing Strata in the Eastern Margin of the Ordos Basin. China University of Geosciences Press, Wuhan, China (in Chinese).
- Chiarella, D., Gioia, D., 2021. A Graphic Method for Depicting Basin Evolution and Changes in the Dominant Hydrodynamic Process from Paleocurrent Data. *Geosphere*, 17(6): 1861-1868. <https://doi.org/10.1130/GES02403.1>
- Cirillo, D., Cerritelli, F., Agostini, S., et al., 2022. Integrating Post-Processing Kinematic (PPK)-Structure-from-Motion (SfM) with Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry and Digital

- Field Mapping for Structural Geological Analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(8): 437. <https://doi.org/10.3390/ijgi11080437>
- Di Staso, U., Soave, M., Giori, A., et al., 2016. Heterogeneous-Resolution and Multi-Source Terrain Builder for CesiumJS WebGL Virtual Globe. *International Journal of Civil and Architectural Engineering*, 10(1): 129-135. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1338666>
- Dong, Z. C., Chen, G. Y., Yin, S. L., et al., 2024. Digital Outcrop Visualization Characterization and Application System Based on WebGL: A Case Study of UAV-based Tilt Photography in Yiqikelike Section. *Science Technology and Engineering*, 24(11): 4633-4642 (in Chinese with English abstract).
- Du, W., Sheng, Q., Fu, X., et al., 2025. Application of Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing on Dangerous Rock Mass Identification and Deformation Analysis: Case Study of a High-Steep Slope in an Open Pit Mine. *Journal of Earth Science*, 36(2): 750-763. <https://doi.org/10.1007/s12583-023-1813-7>
- Freitas, B. T., Silva, L. H., Almeida, R. P., et al., 2021. Cross-strata Palaeocurrent Analysis Using Virtual Outcrops. *Sedimentology*, 68(6): 2397-2421. <https://doi.org/10.1111/sed.12855>
- Li, L., Wang, R., Lin, J., et al., 2019. A Novel Approach for Extraction of Ripple Mark Parameters Based on SfM. *Sedimentary geology*, 392: 105523. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.105523>
- Li, Y. J., Dai, S., Ma, X. J., et al., 2022. Magnetic Minerals and Paleocurrent of the Neogene Sediments on the Erdaoquan Section in the Danghe River Basin of Qilian Mountains, and Implications to the Basin Drainage Evolution. *Quaternary Sciences*, 42(3): 899-910 (in Chinese with English abstract).
- Liao, C. Z., Zhang, Y. Q., Wen, C. S., 2007. Structural Styles of the Eastern Boundary Zone of the Ordos Basin and Its Regional Tectonic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 81(4): 466-474 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B. J., Zeng, Y. F., 1985. Fundamentals and Working Methods of Lithofacies Paleogeography. Geological Publishing House, Beijing, China (in Chinese).
- Lu, L. J., Wang, F. Y., Wang, M. C., et al., 2016. Evaluation on Precision of Occurrence Measurement Based on Theory of Errors. *Global Geology*, 35(2): 567-574 (in Chinese with English abstract).
- Luo, S., Yin, S., Chen, J., et al., 2024. Lithology Identification of UAV Oblique Photography Images Based on Semantic Segmentation Neural Network Algorithm. *Mathematical Geosciences*, 56(5): 1053-1072. <https://doi.org/10.1007/s11004-023-10108-3>
- Ma, F., Zhong, J. H., Gu, J. Y., et al., 2009. Geometric Characters and Paleocurrent Implications of the Trough Cross Stratification - An Example of the Altyn Mountain in the Western Qaidam Basin. *Acta Geologica Sinica*, 83(1): 115-122 (in Chinese with English abstract).
- Panara, Y., Chandra, V., Finkbeiner, T., et al., 2023. Fracture Intensity and Associated Variability: A

- New Methodology for 3D Digital Outcrop Model Analysis of Carbonate Reservoirs. *Marine and Petroleum Geology*, 158: 106532. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106532>
- Potter, P. E., Pettijohn, F. J., 1977. Paleocurrents and Basin Analysis (2nd Edition). Springer Berlin, Heidelberg, Germany. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61887-1>
- Qian, H., Dong, H. G., Chen, C. M., 1997. Arithmetic Method in Polar Stereographic Projection. *Geological Journal of China Universities*, 3(3): 89-98 (in Chinese with English abstract).
- Roisenberg, H. B., Bállico, M. B., Guadagnin, F., et al., 2022. Digital Outcrop Models Applied to High-resolution Stratigraphy in Braided Fluvial Systems: A Study Case at Jaicós Formation in Parnaíba Basin, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 119: 104006. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104006>
- Shen, Y. L., 2009. Study on Palaeogeography and Control Factor Analysis of Efficient Reservoir Development in Late Paleozoic in Middle-eastern Ordos (Dissertation). China University of Mining and Technology, Xuzhou (in Chinese with English abstract).
- Song, S. Y., Liu, D. Z., Li, B. T., et al., 2025. Structural Surface Roughness Based on UAV High Density Point Cloud Fractal Characteristics and Anisotropy. *Earth Science*, 50(4): 1599-1611 (in Chinese with English abstract).
- Speed, C. M., Sylvester, Z., Durkin, P. R., et al., 2024. Three-dimensional Anatomy of a Cretaceous River Avulsion. *Geology*, 52(12): 885-890. <https://doi.org/10.1130/G52254.1>
- Tucker, M. E., 2011. Sedimentary Rocks in the Field: A Practical Guide (4th Edition). Wiley-Blackwell, Chichester, UK. <https://doi.org/10.1002/gj.1341>
- Wan, J. H., Wang, C., Liu, S. W., et al., 2019. Reconstituting Geological Digital Outcrops with Oblique Photogrammetry. *Geological Science and Technology Information*, 38(1): 258-264 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. S., Li, X. H., 2003. Principles and Methods of Sedimentary Basin Analysis. Higher Education Press, Beijing, China (in Chinese).
- Wang, M., Wang, C., Wang, E., et al., 2024. HVPS-DFN-DL: Intelligent Capture and Characterization of Geological Fracture Outcrops Based on a Hybrid Vision-photogrammetric System and Discrete Fracture Network. *Journal of Industrial Information Integration*, 42: 100685. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100685>
- Wu, S., Wang, Q., Zeng, Q., et al., 2022. Automatic Extraction of Outcrop Cavity Based on a Multiscale Regional Convolution Neural Network. *Computers & Geosciences*, 160: 105038. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105038>
- Xu, W. T., Li, X. Z., Zhang, Y. S., et al., 2022. Fine Identification and Characterization of Rock Mass Discontinuities and Its Application Using a Digital Photogrammetry System. *Acta Sedimentologica Sinica*, 51(10): 2093 (in Chinese with English abstract).

- Yin, S. L., Chen, Q. L., Yuan, K., et al., 2022. Characterization of Multi-scale Heterogeneity of Carbonate Reef Outcrop by UAV Oblique Photography: Case Study of Jiantian Village, Lichuan, western Hubei. *Natural Gas Geoscience*, 33(9): 1518-1531 (in Chinese with English abstract).
- Yin, S. L., Gao, Y., Hu, Z. M., et al., 2021. Multiple-point Geostatistical Simulation of Outcrop Based on UAV oblique photographic data: A Case Study of Shihezi Formation in Pingtou Township, Lvliang City, Shanxi. *Acta Petrolei Sinica*, 42(2): 198-216 (in Chinese with English abstract).
- Yu, G. F., Yan, B. Z., Ben, X. D., et al., 2005. Drawing of Paleocurrent Rose Diagrams Based on VB. *West-China Exploration Engineering*, 17(9): 71-72 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, F. Y., Hu, C. L., Han, C. C., et al., 2023. Paleocurrent and Paleowind Direction Reconstruction Research Progress and Perspectives: A Review. *Australian Journal of Earth Sciences*, 70(5): 603-626. <https://doi.org/10.1080/08120099.2023.2194960>
- Zhao, L. M., Wu, H. Y., Huang, L., et al., 2023. Material Source Analysis of Daning-Jixian Exploration Area and Its Adjacent Shan-2 Member in the Eastern Margin of Ordos Basin. *Northwestern Geology*, 56(5): 322-331 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 陈建华, 钟瀚霆, 侯明才, 等, 2024. 数字露头实景三维 Web 平台研究与云端地质考察应用. *地球学报*, 45 (2): 232-242.
- 陈建强, 周洪瑞, 王训练, 2015. 沉积学及古地理学教程. 北京: 地质出版社.
- 陈全红, 李文厚, 刘昊伟, 等, 2009. 鄂尔多斯盆地上石炭统—中二叠统砂岩物源分析. *古地理学报*, 11 (6): 629-640.
- 陈妍, 陈世悦, 张鹏飞, 等, 2008. 古流向的研究方法探讨. *断块油气田*, 15 (1): 37-40.
- 陈钟惠, 1989. 鄂尔多斯盆地东缘晚古生代含煤岩系的沉积环境和聚煤规律. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 董志成, 陈恭洋, 印森林, 等, 2024. 基于 WebGL 的数字露头可视化表征与识别系统: 以无人机倾斜摄影依奇克里克剖面为例. *科学技术与工程*, 24 (11): 4633-4642.
- 李彦杰, 戴霜, 马晓军, 等, 2022. 祁连山党河盆地二道泉剖面新近纪沉积物磁性矿物与古水流及其对盆地水系演化的启示. *第四纪研究*, 42 (3): 899-910.
- 廖昌珍, 张岳桥, 温长顺, 2007. 鄂尔多斯盆地东缘边界带构造样式及其区域构造意义. *地质学报*, 81 (4): 466-474.
- 刘宝珺, 曾允孚, 1985. 岩相古地理基础和工作方法. 北京: 地质出版社.
- 卢立吉, 王凤艳, 王明常, 等, 2016. 基于误差理论的产状测量精度评定. *世界地质*, 35 (2): 567-574.
- 马锋, 钟建华, 顾家裕, 等, 2009. 槽状交错层理几何学特征及其古流指示意义——以柴达木盆地西部阿尔金山前侏罗系为例. *地质学报*, 83 (1): 115-122.

- 钱辉, 董火根, 陈楚铭, 1997. 极射赤平投影中的数学方法. 高校地质学报, 3 (3): 89-98.
- 沈玉林, 2009. 鄂尔多斯中东部晚古生代古地理及高效储层控制因素研究 (博士学位论文). 徐州: 中国矿业大学.
- 宋盛渊, 刘殿泽, 李保天, 等, 2025. 基于 UAV 高密度点云的结构面粗糙度分形特征与各向异性. 地球科学, 50 (4): 1599-1611.
- 万剑华, 王朝, 刘善伟, 等, 2019. 倾斜摄影测量构建地质数字露头. 地质科技情报, 38 (1): 258-264.
- 王成善, 李祥辉, 2003. 沉积盆地分析原理与方法. 北京: 高等教育出版社.
- 许文涛, 李晓昭, 章杨松, 等, 2022. 基于摄影测量系统的岩体结构面精细识别表征及应用. 沉积学报, 51 (10): 2093.
- 印森林, 陈强路, 袁坤, 等, 2022. 基于无人机倾斜摄影的碳酸盐岩生物礁露头多尺度非均质性表征——以鄂西利川见天村露头为例. 天然气地球科学, 33 (9): 1518-1531.
- 印森林, 高阳, 胡张明, 等, 2021. 基于无人机倾斜摄影的露头多点地质统计模拟——以山西吕梁坪头乡石盒子组为例. 石油学报, 42 (2): 198-216.
- 于国芳, 闫宝珍, 贾旭东, 等, 2005. 基于 VB 的古流向玫瑰花图的绘制. 西部探矿工程, 17 (9): 71-72.
- 赵龙梅, 吴和源, 黄力, 等, 2023. 鄂尔多斯盆地东缘大宁-吉县区块及邻区山西组山 2 段物源分析. 西北地质, 56 (5): 322-331.

第一作者: 陈建华 (1976-), 男, 教授, 博士, 主要从事数字露头建模研究与平台研发. ORCID : 0000-0003-3880-2394. E-mail: chjh3@163.com

***通信作者:** 吴玉清, ORCID: 0009-0009-1757-0230. E-mail: 1045768042@qq.com