



E-ISSN: 2976-2421
CODEN: JRAOQJ

Journal of Rock Art (JRA)

DOI: <http://doi.org/10.65098/jra.02.2025.62.72>



REVIEW ARTICLE

岩石上的秘密：墩德布拉克岩画遗址的分析与讨论

付毅豪¹, 柴悦², 王珺¹, 刘成^{2*}, 张晓雨¹, 李璐², 卓娅·巴合提³, 彭进业^{1*}

¹西北大学, 信息科学与技术学院, 西安 710127, 中国

²西北大学, 文化遗产学院, 西安 710127, 中国

³阿勒泰地区博物馆, 维吾尔自治区阿勒泰 836899, 中国

This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License CC BY 4.0, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ARTICLE DETAILS

Article History:

Received 17 Aug 2025

Accepted 14 Oct 2025

Available online 28 Nov 2025

Online Article Code



ABSTRACT

中国新疆维吾尔自治区阿勒泰地区拥有丰富的岩画资源, 其中墩德布拉克岩画群对研究该地区古代文化发展的具有重要意义。本研究采用高光谱技术对墩德布拉克 I 号岩画点进行数据采集与分析, 通过信号分解、颜料分类、聚类及光谱曲线分析等方法, 深入挖掘岩画高光谱数据中的信息。此外, 还运用交叉验证法揭示岩画中隐藏的信息。为理解这些隐藏信息, 研究团队通过文献检索、图像分析等手段进行了更为深入的历史溯源, 揭示了 I 号岩画点与切木尔切克文化之间的内在联系, 为阿勒泰地区青铜时代文化的研究提供了新的材料。

关键词

岩画, 墩德布拉克, 切木尔切克文化, 高光谱图像分析

1. 引言

岩画是古代先民表达自我、彼此交流的最重要媒介之一, 暗含了大量关于先民生活环境、生存方式、精神信仰等方面的重要信息 (Garfinkel et al., 2011)。因此, 岩画成为解读和回溯人类文化发展过程的最重要的材料之一。岩画研究始于19世纪。进入20世纪后, 随着法兰克-坎塔布里亚洞穴岩画真实性得到确认, 岩画研究逐渐受到了各领域关注 (Bednarik, 2008; Jones, 2017; Porr, 2019)。

作为古代文明的中心之一和东西方文化交流的十字路口, 阿勒泰地区保存有丰富的古代人类文化遗存。尤其是数量众多的岩画遗迹, 使得这一地区长期以来都是岩画研究的核心区域。从地理上看, 阿勒泰地区主要指阿尔泰山脉及邻近地区, 中国新疆的阿勒泰地区是其重要组成部分。阿勒泰地区位于欧亚大陆腹地, 与今哈萨克斯坦、俄罗斯、蒙古等国边境接壤。这一特殊的地理位置间接造就了阿勒泰地区古代文化的多样性特征。如吉木乃县通天洞遗址旧石器时代文化层中出土的勒瓦娄瓦-莫斯特文化石制品, 具有旧大陆西侧旧石器时代中期文化的鲜明特征 (Yu, 2023); 切木尔切克文化中广泛存在的橄榄形圆底罐和墓葬石人, 则显示出其在形成过程中与欧亚草原文化的紧密交流 (Shao, 2008)。种种发现均表明, 新疆阿勒泰地区古代文化的发展受到了东西方以及南北文化因素的多重影响。作为该地区最为丰富的文化遗存, 岩画也揭示了阿勒泰地区与中亚和西伯利亚地区的广泛联系 (O' Sullivan et al., 2022)。

20世纪60年代, 王炳华对中国新疆阿勒泰地区的岩画遗址进行了首次系统调查, 发现了包括阿勒泰市阿克塔斯、富蕴县唐巴勒塔斯、哈巴河县杜拉特等地点在内的多处彩绘岩画遗迹 (Wang, 2005); 张志尧对位于阿勒泰地区东西两侧的富蕴县和哈巴河县境内的洞穴岩画的内容、年代和族属进行了研究, 并将其与史前先民从事的萨满教活动建立起联系 (Zhang, 2013)。1994年至2001年间, 蒙俄美联合考察团对蒙古阿尔泰山脉地区发白石器时代至早期铁器时代的岩画点进行调查, 判定其中多数岩画点的时代集中在青铜至早期铁器时代 (Kubarev et al., 2005)。范韦泽 (Vanwezer et al., 2021) 等人以蒙古戈壁阿尔泰山脉地区发现的四处岩画点作为研究对象, 通过

图像间的比较和分析, 初步确定了岩画点间的时代序列, 并依据图像及古代气候数据, 对该地区全新世时期的环境和生物资源的变化进行了推断; 奥沙利文 (O' Sullivan, 2019) 利用GIS空间分析研究了阿勒泰地区岩画点的分布特征, 发现大多数岩画遗址都集中分布在主要交通道路沿线, 从而间接证明了岩画在交流和记录社会政治活动方面的作用。迪亚兹-安德鲁 (Díaz-Andreu, 2023) 等人基于声学方法对楚亚河下游地区的3处岩画遗址进行了分析, 认为岩画的分布与声音、言语或音乐仪式有关。在研究工作当中, 岩画数量的丰富性与以传统记录、分析方法的繁琐性形成了鲜明对比, 因此从多学科角度研究岩画已成为一种趋势 (Adinolfi et al., 2019; Shi et al., 2017)。在各种分析方法中, 非侵入性和非接触式光谱分析技术备受关注。

高光谱技术作为一种新兴图像分析技术, 广泛应用于文化遗产领域病害分割分类 (Liggins et al., 2022; Wang et al., 2021)、文化遗产修复 (Gao et al., 2023; Cao et al., 2021) 及隐含信息提取 (Schmitt et al., 2023; Defrasne et al., 2023; Peng et al., 2019; Zhang et al., 2023)。该技术能捕捉目标区域从紫外到红外波长范围内的各类光谱信息, 具备“非接触、非破坏性”的特点 (Picollo et al., 2020), 还常与其他分析方法结合使用, 已被证实是用于鉴定、材料分析和艺术品修复的有效工具 (Castillo et al., 2021; Capobianco et al., 2024; Cucci et al., 2016)。在文化遗产领域, 王珺等人 (Wang et al., 2021) 基于不同类型腐蚀与青铜之间的光谱差异, 提出了一种青铜器腐蚀类型的自动识别与识别方法。彭进业等通过将主成分图像与高光谱图像融合, 对彩绘文物中的隐含信息进行了分析和探究 (Peng et al., 2019)。张群喜等人 (Zhang et al., 2023) 运用高光谱技术对唐代壁画进行分析, 并采用非负矩阵元逼近方法提取壁画底层草图。近年来, 高光谱技术开始被应用于岩画分析研究 (Castillo et al., 2021; Bayarri et al., 2019)。斯科格等人 (Skoog et al., 2016; Jalandoni et al., 2021) 对用于检测澳大利亚瓦尔加岩画的通用无监督分类算法 (K均值算法) 的准确性并不满意, 不过, 他们鼓励尝试其他分类算法。施密特等人 (Schmitt et al., 2023) 比较高光谱技术与RGB图像技术在岩画场景中的应用, 发现与RGB图像技术相比, 高光谱技术不仅能够揭示已消失的绘画, 还能分析图像的重叠关系。德弗拉纳等

人 (Defrasne et al., 2023) 利用高光谱技术在法国圣雷米普罗旺斯的奥赛罗岩石避难所发掘出了更多隐藏的图案。此外, 该团队通过对高光谱数据的颜料分类和分析, 在重叠的绘画中发现了个性化的图案。根据已发表的少量研究可知, 高光谱技术已展现出其在岩画中提取和挖掘额外隐藏信息的能力 (Castillo et al., 2021; Bayarri et al., 2019)。它能够揭示底层颜料层, 展现岩画的原始状态, 并为探究其形成时期提供视觉证据。

本研究团队利用高光谱成像技术对墩德布拉克岩画群中五处岩画点进行了数据采集。通过信号分解、颜料分类与聚类、光谱波段/曲线分析等技术, 对该地区的岩画进行了全面的探讨和分析。首先, 我们引入了一种新方法, 即运用交叉验证来解读图像信息并揭示岩画中隐藏的绘画细节。通过结合颜料分类和聚类方法, 我们发现了此前从未被发现的隐藏绘画。此外, 对这些隐藏绘画细节的研究为该地区岩画中某些图像的断代提供了新的证据。最后, 本研究成功揭示了墩德布拉克岩画群中最重要的 I 号岩画点中隐藏的图像。这一发现提供了宝贵的历史证据, 可供考古学、人类学等学科利用, 以更深入地了解该地区的文化遗产。

后续章节安排如下: “地点描述、数据采集与方法”部分概述数据采集和方法; “结果”中展示了墩德布拉克岩画点中采集到的研究结果, 并在“讨论”中展示了研究结果, 最后进行了“结论”。

2. 地点、数据采集与方法

2.1 地点描述

墩德布拉克岩画群位于中国新疆维吾尔自治区阿勒泰地区汗德尕特蒙古族乡东北约4公里处 (图1)。墩德布拉克岩画群的位置图如图2所示。墩德布拉克 I 号岩画点的开口朝向近乎正南, 整体尺寸为宽3.23米、高1.18米。墩德布拉克 II 号岩画点朝向西南, 宽6.1米、高2.3米、深2.4米。

2.2 设备信息

研究使用SPECIM-IQ相机对遗址进行拍摄, 如图3 (a)、(b)所示。该设备是一套工作在可见—近红外波段的高光谱成像系统, 基于内部线扫描原理捕捉光谱信息。它覆盖40纳米至1000纳米的全波长范围, 光谱分辨率为7纳米。相机参数如表1所示 (Schmitt et al., 2023; Behmann et al., 2018)。该相机还配备了120万像素的RGB图像传感器, 其分辨率略高于高光谱图像。此外, 在相同条件下从同一角度, 它能够 (比高光谱镜头高2.5厘米) 几乎同步捕捉光谱图像和RGB图像。

由于光谱信息易受光照条件影响, 本研究场景采用太阳光作为光源。天气晴朗时, 太阳光经周围环境散射后, 能为岩画提供均匀的照明。在数据采集过程中, 尽管光线强度可能会随时间变化, 但扫描期间 (<3分钟) 的光照变化可忽略不计。然而, 极值和噪声等不利因素可能会对岩画图像的分析产生负面影响。因此, 高光谱数据被限定在400纳米至940纳米的范围内, 包含184个光谱波段 (而非完整的204个

波段)。

为获取全景图像, 研究使用佳能5DS R相机搭配EF 24-105mm f/4 L IS USM镜头进行现场拍摄 (图3 (c) - (e))。随后, 利用PTGui全景制作工具对采集到的照片进行拼接, 生成高质量的全景图像。

2.3 高光谱图像分析方法

本研究使用ENVI高光谱成像软件 (5.3版本), 通过该软件提供的多种标准工具对不同位置采集的高光谱数据进行分析。将分析结果与同步记录的RGB图像以及不同相机拍摄的同场景高分辨率图像进行对比, 并使用 ENVI 软件进行分析。

研究采用两种机器学习算法识别成分信息, 并应用无监督聚类算法对高光谱数据成分进行信号提取分析:

- 独立成分分析 (ICA) 是一种常用于信号处理和数据分析的算法, 旨在从混合信号中恢复出相互独立的成分 (Cerrillo et al., 2021)。

- 光谱角映射 (SAM) 是一种基于光谱相似性原理的监督分类算法, 能够快速、准确地进行土地覆盖分类和目标检测 (Bayarri et al., 2019)。

- K均值聚类 (K-Means) 是一种常见的无监督聚类算法, 旨在从数据中自动识别并聚类成分特征。

独立成分分析的基本原理是假设混合信号可以表示为独立成分的线性组合, 其中每个成分在统计上相互独立。通过对观测到的混合信号进行逆变换, 可以得到独立成分, 从而实现混合信号的分离。独立成分分析广泛应用于语音信号分离、金融数据分析和图像处理等场景。由于其强大的信号分离能力, 近年来独立成分分析已被广泛应用于岩画分析, 用于分析图像中的成分信息和叠加关系 (Schmitt et al., 2023; Defrasne et al., 2023)。

SAM是一种基于N维空间中像素与参考光谱对比的光谱分类算法。该算法通过计算两个光谱之间的夹角来判断它们的相似性, 任何夹角大于指定最大阈值的像素都不会被归入该类别 (Defrasne et al., 2023)。较大的阈值允许更高的光谱相似性容忍度, 但会降低分类精度; 而较小的阈值则能提高分类精度, 但会降低对光谱相似性的容忍度 (Schmitt et al., 2023; Defrasne et al., 2023)。其计算公式为:

$$SAM(x, y) = \cos^{-1} \left(\frac{\langle x, y \rangle}{\|x\| \cdot \|y\|} \right)$$

其中x表示未知像素, y表示已知像素, $\langle x, y \rangle = x \cdot y$ 表示x和y的点积, $\| \cdot \|$ 表示 L_2 范数运算。

K-Means算法通过计算在数据空间中均匀分布的初始类均值, 然后使用最短距离技术, 迭代地将像素分配到最近的类别中。在每次迭代



图1 墩德布拉克I号岩画点周边环境鸟瞰图

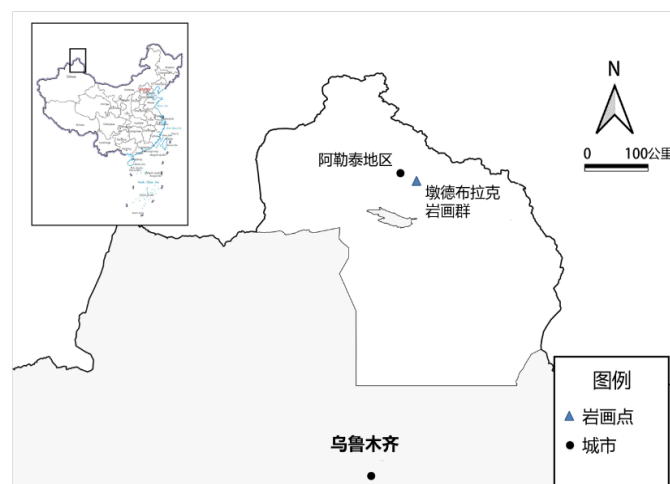


图2 墩德布拉克岩画群遗址位置图

表1 Specim IQ 高光谱成像系统及其 RGB 相机的参数(Behmann et al., 2018)

| | |
|-----------|------------|
| 高光谱设备 | SPECIM IQ |
| 传感器类型 | CMOS |
| 光谱范围 | 400-1000纳米 |
| 光谱分辨率 | 7nm |
| 光谱波段数 | 204 |
| 图像尺寸 | 512×512像素 |
| 焦距 | 21毫米 |
| 视场角(固定镜头) | 31° × 31° |
| 1米处成像范围 | 51×51厘米 |
| 1米处空间分辨率 | 1.07毫米 |
| 对焦范围 | 15cm-∞ |
| 重量 | 1.3公斤 |
| 关联RGB图像 | |
| 图像尺寸 | 1280×960像素 |
| 1米处成像范围 | 110×82厘米 |
| 1米处空间分辨率 | 0.85毫米 |

算法1 K-Means算法

1. 随机初始化K个聚类中心 u_1, u_2, \dots, u_k
2. 重复执行以下步骤:
3. 从 $i=1$ 到 m :
4. c_i 赋值为与 x_i 距离最近的聚类中心的索引 (从1到K)
5. 结束
6. 从 $k=1$ 到 K :
7. u_k 赋值为分配到聚类k的所有点的平均值
8. 结束
9. 直到收敛

中,重新计算类均值,并将均值用于再次对像素进行分类(Shih et al., 2010; Beyerer et al., 2017)。该算法的伪代码如下算法1所示。

本研究不依赖传统的最小噪声分离(MNF)和主成分分析(Bayarri et al., 2019; Jalandoni et al., 2021)作为主要分析工具,而是采用ICA。这一选择源于MNF主要用于高光谱图像的降维和噪声处理(Cerra et al., 2013)(在“简单不可见场景”部分使用),而ICA在信号分离方面表现更优(Hyvärinen et al., 2000)。因此,使用ICA有利于岩画高光谱图像的叠加与分析。在信息识别方面,研究结合无监督和有监督方法进行交叉验证。所有这些方法都可在ENVI高光谱成像软件中重现(图3)。

3. 结果

我们首先呈现墩德布拉克I号岩画点的全景拼接图像(图4),随后展示几个具有代表性的绘画场景,这些场景体现了从“简单可见场



图3 设备信息: (a) SPECIM IQ 相机正面; (b) SPECIM IQ相机背面; (c) EF 24-105 MM F/4L IS USM镜头; (d) Canon 5DS R。

景”到“复杂不可见场景”共计四种情形。通过对比,凸显了高光谱图像相较于RGB图像所能提供的更丰富的图像信息。

研究以ICA变换作为主要分析方法,所使用的184个光谱波段的大部分信息集中在6至15个独立成分中,具体数量取决于岩石材料的复杂性和绘画的多样性。不同的图像通常会被分解为2至4个独立成分,主要用于描述岩画中的各种颜料。其他独立成分则包含不同类型的噪声,有时还夹杂着微量的颜料信息。研究采用K-Means聚类和SAM分类作为提取成分信息的主要方法。

在呈现结果之前,需要先明确一些定义。“简单”场景与“复杂”场景的区别在于绘画中颜料的重叠情况,而与所描绘的内容无关。“可见”与“不可见”的区别则取决于画面是否可直接观察到。“不可见”指画面几乎或完全不可见,这类信息也可以被称为隐藏的信息(Peng et al., 2019; Chen et al., 2022; Hou et al., 2019)。此外,本节中用于描述特定区域的指代名词,如“马”或“人”,是因其形状类似某些常见物体而得名。这种命名方式旨在便于区分和讨论,而非定义这些特定区域内的信息内容。

3.1 简单可见场景

图5呈现了一个简单可见场景。在该岩画中,可能存在一到两种颜料,位于图6的区域1内。高光谱图像中的大部分信息集中在通过ICA变换得到的前14个独立成分中。图5所描绘的信息主要存在于前两个独立成分中(图5(a)、(b)),第三个独立成分中仅存在少量“轮廓”信息。显然,对高光谱数据进行ICA变换所得到的图像信息,能够清晰地分离岩石上的颜料细节,这与RGB图像本身所包含的图像信息不同。对比图5(a)和图5(b)可以发现,图5(a)主要包含“轮廓”信息,而图5(b)则侧重于“脸颊”,且部分包含与“面部”的“额

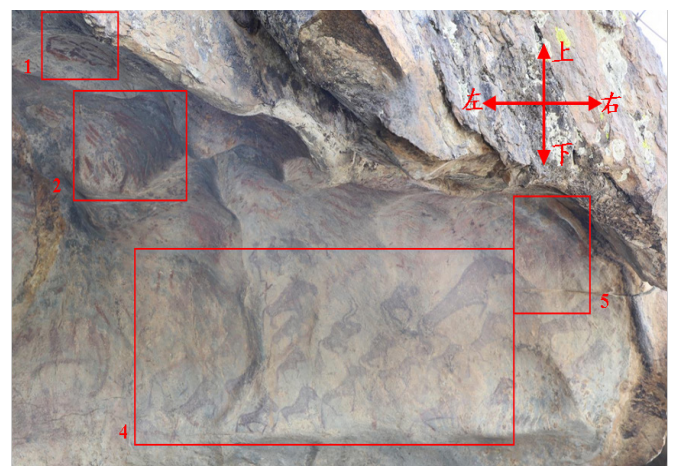


图4 墩德布拉克I号岩画点正面照

头”处，该信息与图5 (a) 中的“面部”信息存在重叠。图5 (d) 也印证了这种重叠情况。这表明“面部”信息的整体描绘可能是两次创作过程的结果。

图6展示了使用独立成分分析变换对“轮廓”和“脸颊”区域进行SAM分类的结果。SAM最大角度阈值参数设为0.5。对ICA成分的曲线分析显示，如图7 (a) 所示，“轮廓”和“脸颊”区域主要分别出现在ICA变换的成分1和成分2中，这进一步证实了这两个区域不属于同一信息。此外，研究团队对“轮廓”和“脸颊”区域的原始184个光谱波段数据进行了平均光谱分析。图7 (b) 所示的结果显示，这两个区域的平均光谱曲线存在显著差异。通过对图6中“面部”信息的184个波段进行逐波分析发现，410纳米之前，“面部”信息的“右眼”部分较为模糊；580纳米至600纳米之间，区域1、2、3逐渐消失；660纳米之后，区域1和3的信息基本消失；730纳米之后，图像中只剩下“轮廓”信息。与图8 (a) 相比，730纳米之后呈现的信息在可见光下也呈现出颜色较深的特点。此外，图8中“轮廓”与区域1、2、3的颜料颜色存

在明显差异。这一观察结果间接支持了这两个区域的形成时间可能存在差异的假设。最后，利用“灰度转换与叠加”技术将提取的成分还原到原始图像中 (图9 (c))，旨在增强岩石表面的视觉内容，从而更好地呈现该面板。

3.2 复杂可见场景

图10被视为一个复杂可见场景，位于图4的区域2内。由于岩石表面整体不平整，在图10 (f) 中无法辨认出绘画内容，但可以观察到整个图像中存在类似人工涂抹的痕迹 (命名为“涂抹”)。尽管图10 (f) 右侧的图像中含有类似的深红色颜料，但很难辨别其代表的事物。然而，通过对高光谱图像进行ICA变换，对图10 (f) 右侧的深红色图像进行了解读。

在ICA变换中，所有信息集中在前12个成分中。与“涂抹”相关的成分主要存在于成分3和成分4中 (图10 (b)、(c))，而成分2 (图

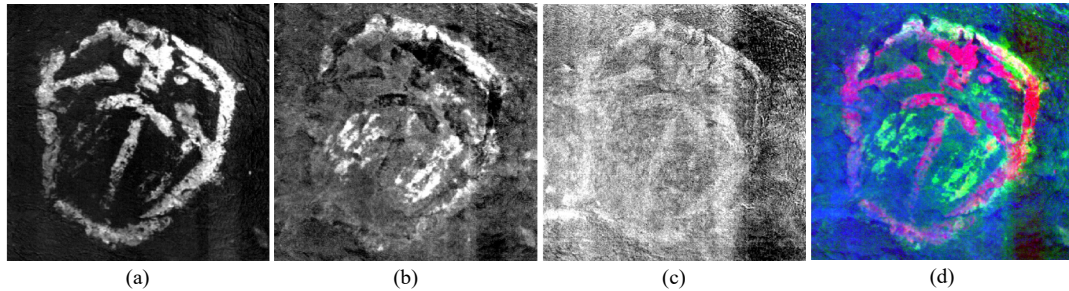


图5 ICA变换后的前三个分量：(a) 分量1；(b) 分量2；(c) 分量3；(d) 由前3个分量组成的假彩色图像。

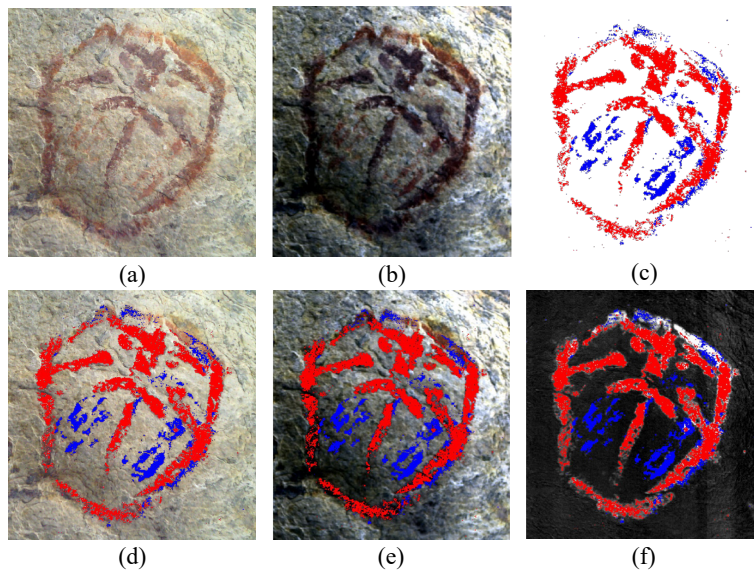


图6 通过SAM分类对ICA变换分量的可视化结果：(a) RGB图像；(b) 高光谱图像组成的假彩色图像 (R: 598.60 纳米, G: 548.55 纳米, B: 449.35 纳米)；(c) SAM分类结果；(d) 将(c)映射到(a)上；(e) 将(c)映射到(b)上；(f) 将(c)映射到ICA的第一分量上；为了区分，红色区域被命名为“轮廓”，蓝色区域被命名为“脸颊”。

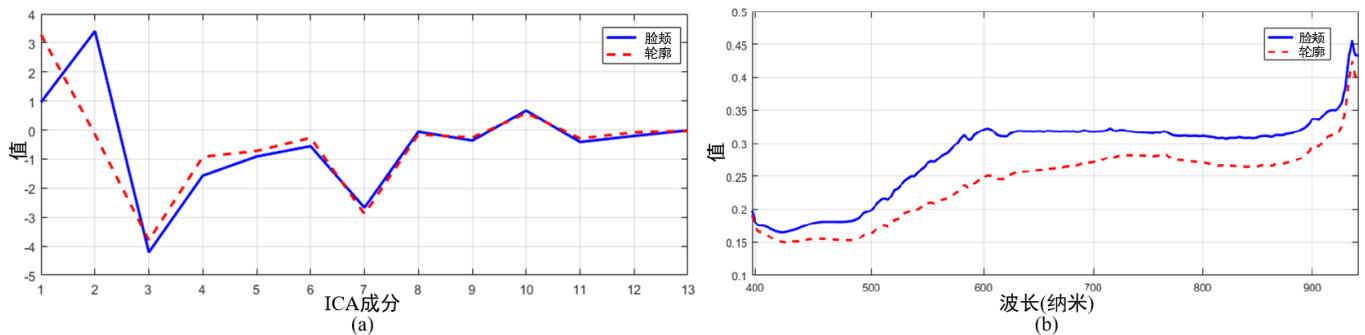


图7 “脸颊”和“轮廓”区域的信息统计结果：(a) ICA分量的统计曲线；(b) 高光谱数据上的平均光谱曲线。

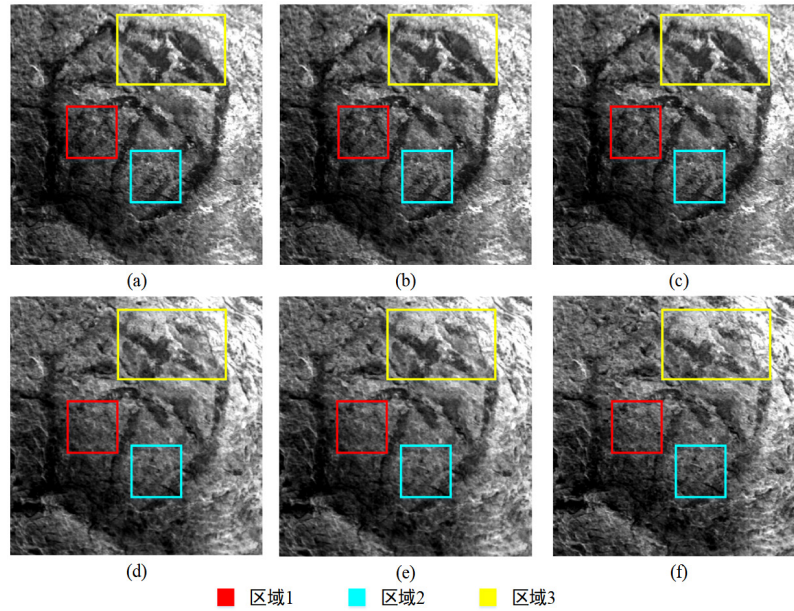


图8 “人面纹”数据在不同波段上的可视化展示：(a) 414纳米；(b) 550纳米；(c) 580纳米；(d) 660纳米；(e) 730纳米；(f) 801纳米。

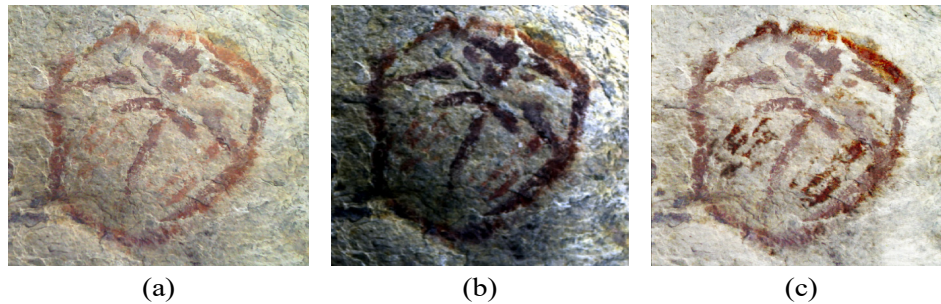


图9 “人面纹”信息的叠加结果：(a) RGB图像；(b) 高光谱数据伪彩色图像 (R: 598.60纳米, G: 548.55纳米, B: 449.35纳米)；(c) 叠加结果。

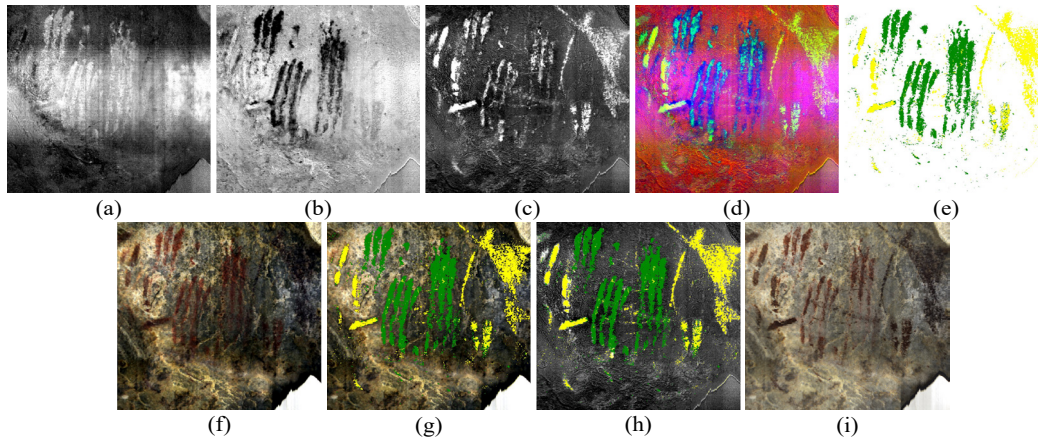


图10 复杂可见场景的分析结果：(a) ICA第一成分；(b) ICA第二成分；(c) ICA第三成分；(d) ICA伪彩色图像 (R: (b), G: (c), B: (a))；(e) SAM分类结果；(f) 高光谱假彩色图像 (R: 598.60纳米, G: 548.55纳米, B: 449.35纳米)；(g) (e) 应用于 (f) 上；(h) (e) 应用于 (c) 上；(i) 信息叠加结果，在 (d) 中图像以两种颜色明显的呈现；为了区分，我们将绿色区域命名为“涂抹”，将黄色区域命名为“鹿”。

10 (a) 仅包含模糊的轮廓信息。在图10 (c) 中，原始的深红色颜料信息被分离出来，形成了一个整体类似“鹿”的图像。奇怪的是，在该遗址中，大多数动物都是从左向右朝向，如图4的区域4所示，而这只“鹿”却是从下向上朝向。因此，通过将该区域顺时针旋转90度，我们推测“涂抹”部分可能代表天空或云彩。

在对图10 (b) 和图10 (c) 的对比中，图10 (c) 左侧还分离出两条明显的线条。在图10 (f) 中，这两条粗线此前被认为与“涂抹”相关。因此，在对ICA变换的成分进行简单标注（共10类）时，我们特意

将“鹿”和“涂抹”分为两类。SAM中最大角度阈值参数设为0.65。分类结果仅保留岩画信息，去除了背景和噪声等无关信息，如图10 (h) 所示。在图10 (h) 中，黄色区域被归类为“鹿”，且与“涂抹”相对独立。图11展示了SAM分类区域在ICA成分和高光谱图像上的平均曲线。从图11 (a) 中可以观察到，“鹿”和“涂抹”信息在成分2和成分4之间的差异最为显著。在图11 (b) 中，光谱信息在580纳米之前差异较为明显，580纳米之后差异则相对稳定。因此，可以推断这幅绘画是使用不同颜料创作而成。

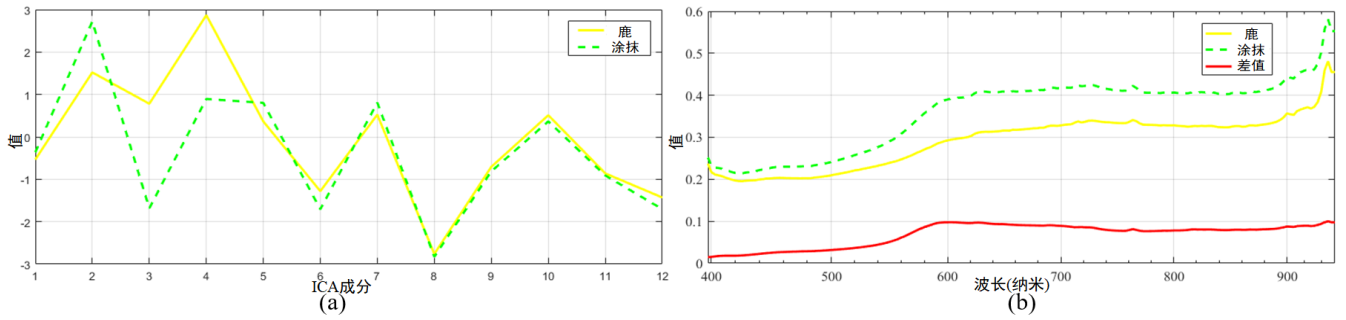


图11 SAM分类结果的统计信息：(a) ICA分量的统计曲线；(b) 高光谱图像的平均光谱曲线；(b)的“差值”为“涂抹”-“鹿”。

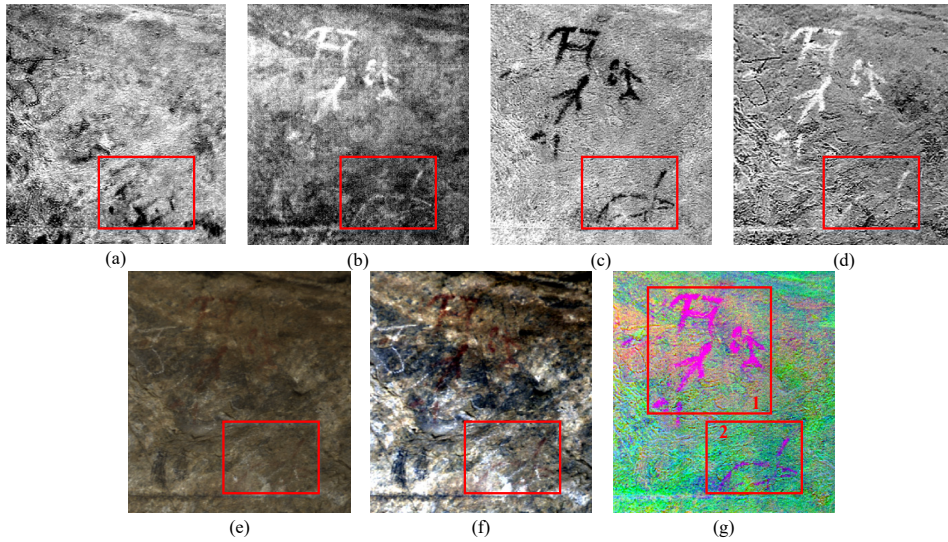


图12 简单不可见场景的ICA变换结果：(a) ICA第1成分；(b) ICA第2成分；(c) ICA第5成分；(d) ICA第7成分；(e) RGB图像；(f) 高光谱图像合成的假彩色图像（R：598.60纳米，G：548.55纳米，B：449.35纳米）；(g) 通过ICA合成的假彩色图像（R：(b)，G：(c)，B：(d)）。

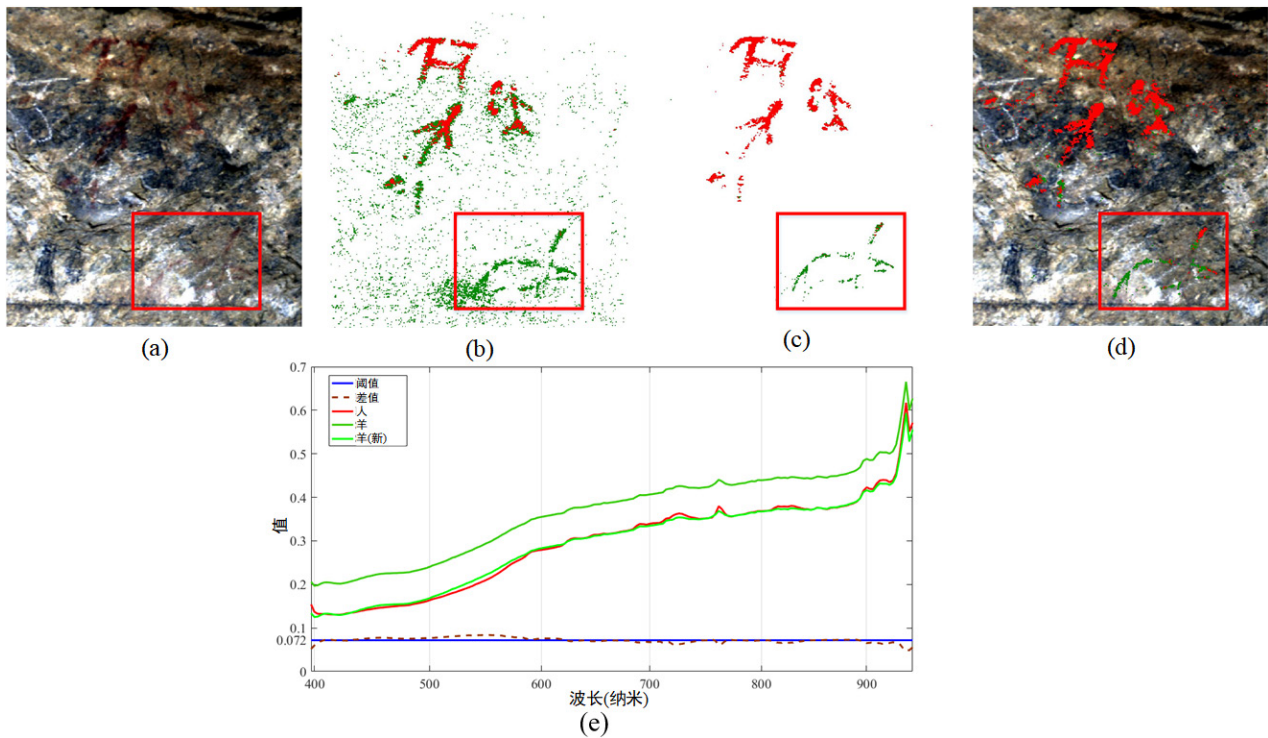


图13 简单不可见场景的区域分析：(a) 高光谱图像合成的假彩色图像（R：598.60纳米，G：548.55纳米，B：449.35纳米）；(b) SAM分类结果；(c)将(b)进行去噪处理；(d)将(c)应用到(a)；(e)区域光谱分析：“羊(新)”曲线是“羊”-“阈值”的结果，在(b)和(c)中，图像以两种颜色清晰呈现；为了区分，将绿色区域命名为“羊”，将红色区域命名为“人”。

最后，在图10(i)中，利用“灰度转换与叠加”方法将这些成分重新构建到原始图像中，突出了“鹿”的图像。

3.3 简单不可见场景

作为简单隐藏信息场景的一个例子，图12呈现了墩德布拉克II号岩画点的研究结果。从图12(e)中可以观察到，岩石表面的整体信息几乎不存在，仅能辨认出“人”的形象。此外，岩石表面还有粉笔痕迹，且存在明显的图层剥落现象。对其184个光谱波段进行ICA变换后，该岩画点的主要信息被分解为9个成分。其中，隐藏信息“羊”被清晰地提取出来。岩画的整体信息(“人”和“羊”)仅存在于ICA的成分2、成分5和成分7中(图12(b) — (d))，而粉笔痕迹仅存在于成分1中(图12(a))。

为了确定“羊”和“人”是否使用相同颜料绘制，对ICA成分进行了SAM分类。SAM分类的最大角度阈值参数设为0.3，分类结果如图13(b)所示。由于存在大量噪声，对结果进行去噪处理，得到图13(c)。图13(c)“羊”和“人”的分类区域均出现像素混合现象。这些区域的平均光谱曲线(图13(e))显示，“人”和“羊”之间存在约0.069-0.075的稳定偏移(平均偏移“阈值”为0.072)。减去

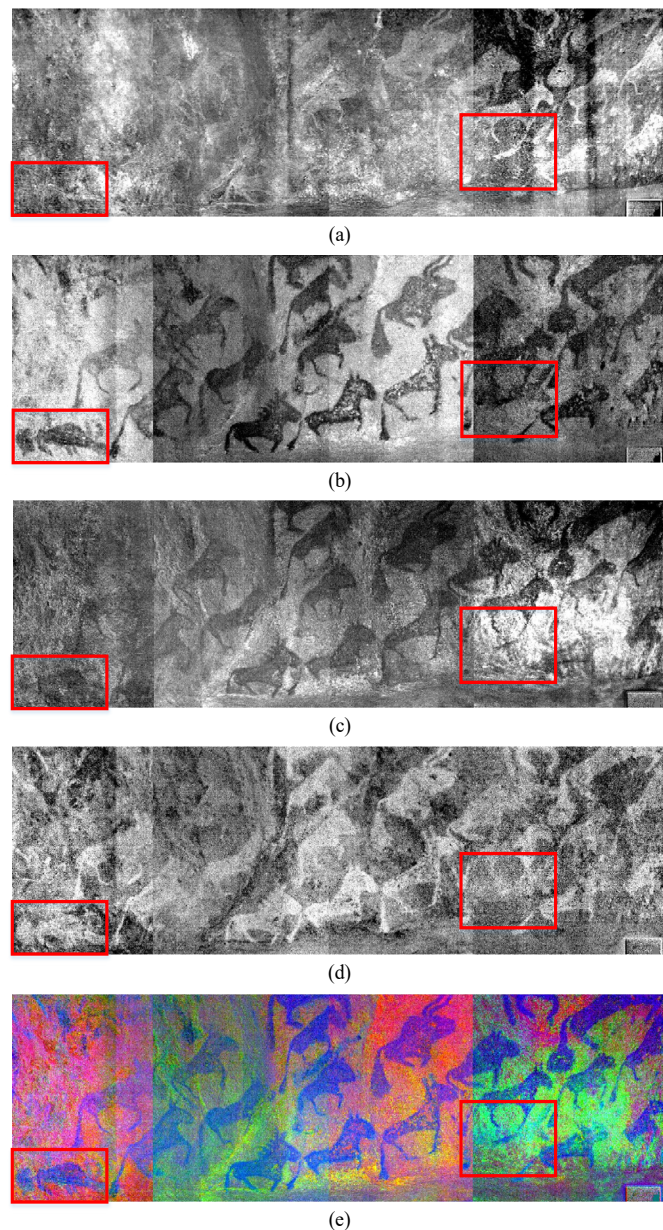


图14 动物群的ICA变换结果：(a) ICA第9成分；(b) ICA第10成分；(c) ICA第11成分；(d) ICA第16成分；(e) 通过ICA合成的假彩色图像(R: (b), G: (c), B: (d))；该图像是在相同条件下拍摄的高光谱数据的拼接，从左到右为区域1-4。

0.072的偏移后，两者的光谱曲线几乎完全重叠，可以推断“羊”和“人”是使用相同颜料绘制的。其间差异可能是由于“羊”的表面风化和剥落导致的光谱偏移。

图12(e)、(f)表明，尽管存在风化和人为破坏，但只要颜料信息完好(未发生岩石脱落、地衣侵蚀等破坏性事件)，就有可能提取颜料信息，进而揭示岩画所蕴含的历史意义。

3.4 复杂不可见场景

本小节将呈现几个具有代表性的场景。第一个场景是图4中的区域4。由于无法一次捕获整个区域的高光谱图像，因此采用“分区采集与拼接”的方法进行数据收集(图14)。通过ICA变换，高光谱图像不仅将肉眼几乎无法辨认的动物形状(“马”)完全分离出来，还在场景底部分离出一个独特的形状(看似“野猪”)，这一形状在其他成分中并未出现，如图14(b)、(c)所示。在图15(a)中，右侧区域在可见光下没有可观察到的动物形状。然而，在图14(b)、(d)中，“马”的身体和头部被提取出来，而其四条腿的颜料可能因水蚀和风化已完全消失。

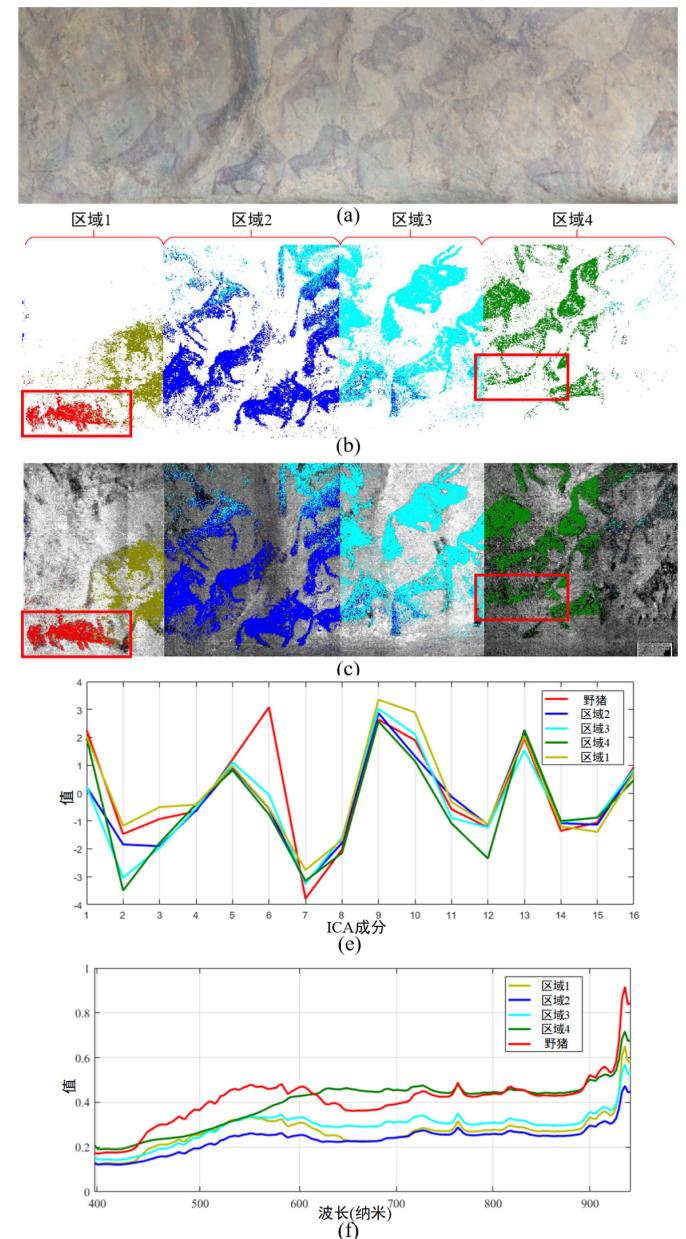


图15 SAM分类结果：(a) 真彩色图像；(b) SAM分类结果；(c) 将(b)应用于ICA第10成分上；(d) ICA的分量曲线；(e) 高光谱图像的平均光谱曲线。

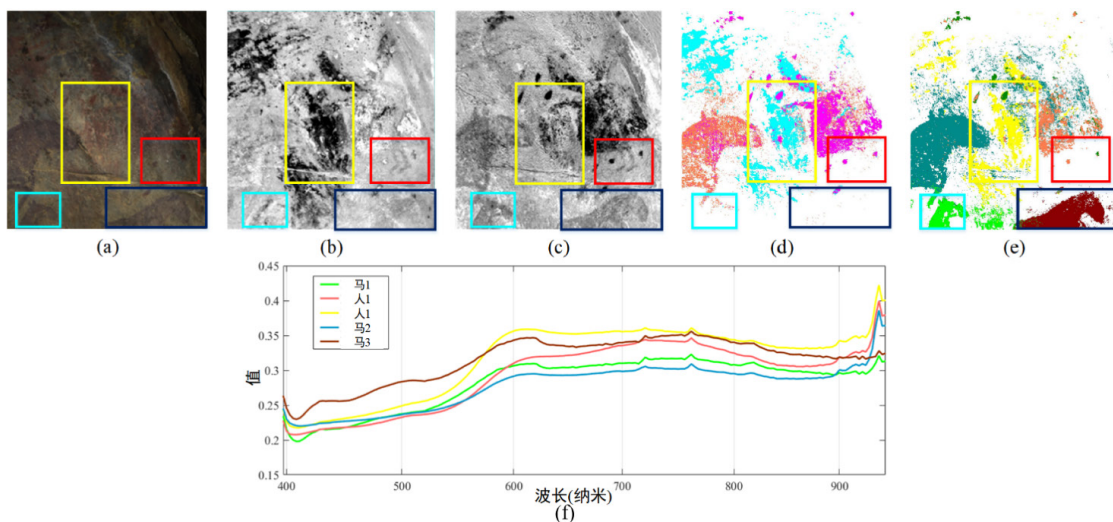


图16 拟人形象的结果：(a) 真彩色图像；(b) ICA第2成分；(c) ICA第5成分；(d) 应用于ICA变换的K-Means聚类；(e) 应用在ICA变换的SAM分类；(f) SAM分类区域的平均光谱曲线。

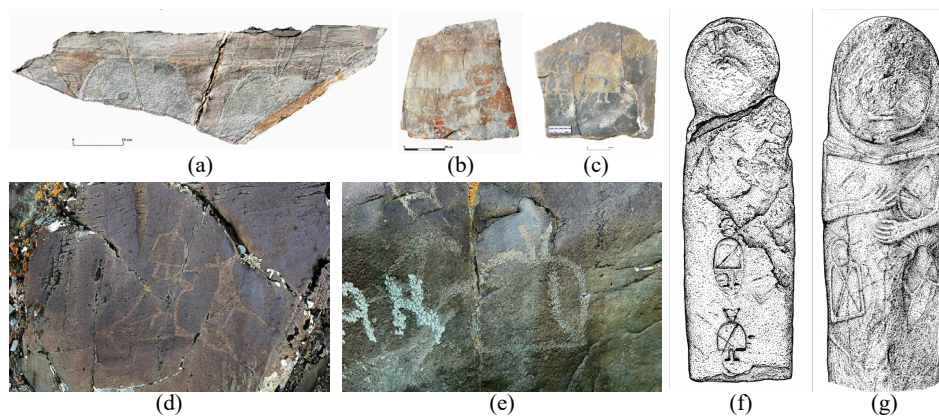


图17 在阿尔泰地区发现的类拟人化图案：(a) — (c) Khar Chuluut1 遗址石板表面雕刻的拟人化图案 (Kovalev et al., 2022)；(d)、(e) 是蒙古西北部查干萨拉河和巴加奥伊戈尔河流域岩画中的拟人化图案；(f)、(g) 是布尔津·阿尔帕布拉克墓地中石雕像表面的拟人化图案（插图来自 (Kovalev et al., 2019)）。

为了确保提取出的“马”和“野猪”不是由地衣、岩石脱落或人工挖掘等其他因素形成的，首先对它们的ICA成分进行了分析。由于高光谱图像由四个 512×512 像素的高光谱图像组成，为确保分类的合理性，对每个区域的动物分别进行标记，并将“野猪”和“马”分开标记。SAM分类的最大角度阈值参数设为0.4，得到的分类结果如图15所示。对所有分类区域的ICA成分曲线进行比较后发现，“马”的分类标签与区域4的信息重叠度极高，因此将这两个类别合并。对所选区域计算平均光谱曲线后，图15(e)显示所有区域的特征峰基本一致。区域4的光谱曲线在440纳米~680纳米之间与其他曲线存在差异，这可能是由于数据采集时光照不均匀所致。但680纳米之后，区域4的特征峰与其他区域一致，表明提取出的“野猪”和“马”是使用相同颜料在同一时期绘制的。

此外，在图4中区域4的右侧，有一个涂抹了红色颜料的区域，在可见光下如图16(a)所示（图4中的区域5）。对该场景进行ICA变换后，其信息主要由13个成分表示。“马2”的图像从ICA的成分3至成分8中分离出来。在图16(b)、(c)中，除“马2”外，还分离出一个拟人形象（“人1”），其“脚部”在图16(c)中尤为明显。此外，图16(b)中还分离出一个复杂图案（“人2”）。为分析ICA成分，同时使用了K-Means聚类和SAM分类，将类别数设为15。对于K-Means聚类，阈值设为5，最大迭代次数为1000次。在SAM分类中，前六个成分各选择2-3个类别，最大角度参数为0.5弧度。排除背景、岩石表面和裂缝等无关区域后，所有结果中仅保留主要分类区域。其中，K-Means聚类保留3个区域，SAM分类保留5个区域，如图16(d)、(e)所示。尽管图16(d)的分类结果中缺少两个“马”的结果，但与图16(e)相比，仍能识别出“人1”和“人2”的图案。两种方法均未成功识别出“脚部”。对图16(e)的光谱分析显示，“人1”和“人2”的光谱曲线相似度较高，而代表“马”的三个区域具有更接近的光谱特征。

这表明图16(e)包含“人1”和“人2”的相关信息。“脚部”图案未被聚分类，可能是由于岩石表面的颜料含量有限，导致其被单独提取为两个不同的成分（图18）。

4. 讨论

4.1 拟人形象讨论

本研究的关键发现之一是在图16(c)中发现了拟人化形象（“人1”）。与图16(d)相似的图像主要发现于阿尔泰地区。这类图像的主要特征包括呈“钟罩形”或“斗篷状”的躯干，头部装饰有可能代表装饰物的“长角”，腿部和脚部呈“L”形相连。类似的图像也曾发现于哈尔·楚鲁特-1 (Khar Chuluut-1) 遗址 (Kovalev et al., 2022) (图17(a) — (c)) 中用以构筑石围的石板上。发掘者认为该处遗址为一处祭祀性遗址，属切木尔切克文化时期遗存。由临近遗址中类似石围建筑遗存的碳14测年结果可知，这些石质遗存的营建时间至迟不晚于公元前3千纪中期。这一结论也得到了与之类似而规模略小的石构建筑遗存的加速器质谱测年结果的支持 (Wang et al., 2020)。在新疆阿勒泰地区，类似的拟人化图像也主要与切木尔切克文化早期的遗存相伴出现 (Jia et al., 2010)。因此，研究团队推测，墩德布拉克 I 号岩画点的某些图像创作于切木尔切克文化早期。这一新发现为估算墩德布拉克岩画群的年代提供了关键的年代学证据。

此外，在图16(f)中，“人1”和“马2”的光谱曲线呈现出相似的峰谷特征，表明它们使用了同一类型的颜料。结合甘图加等人 (Gantulga et al., 2010) 对墩德布拉克 I 号岩画点图像特征的研究，团队倾向于认为图4中的动物图像和拟人化图像均创作于切木尔切

克文化时期。根据现有发现，上述拟人化图像在构图中常作为中心元素，周围多有动物等其他图像环绕 (Kovalev et al., 2022)。该现象在墩德布拉克 I 号岩画点也有体现。在图 16 (c) 中，拟人图像的脚趾似乎刻意指向左侧描绘“马 3”的位置。尽管过往研究表明，切木尔切克文化时期已存在乳制品消费行为 (Wilkin et al., 2020)，但董惟妙等人 (Dong et al., 2022) 对阿勒泰地区青铜至早期铁器时代人骨碳氮同位素分析的表明，这一时期狩猎仍是人们饮食的重要补充来源。放眼阿尔泰地区乃至全球范围内，狩猎题材都是狩猎采集人群创作岩画的重要主题。因此，我们推测切木尔切克文化中的拟人图像是与人类狩猎活动相关的象征性表现。

4.2 人面纹“脸颊”处短线符号分析

根据现场观察，由三道斜线构成的符号 (图 6) 主要见于墩德布拉克 I 号岩画岩棚的顶部，与岩画中其他图案间几乎不存在叠加的情况。与之相近的符号常见于阿尔泰地区鹿石的“头部” (图 18)。鹿石是欧亚草原晚青铜时代最具标志性的纪念性遗存之一，与石堆墓共同构成被称为“鹿石—赫列克苏尔文化” (Deer Stone-Khirsuor culture) 的特殊文化现象 (Tsagaan et al., 2022)。阿勒泰地区是中国鹿石数量最多的地区，尤其是与蒙古国接壤的青河县 (Guo et al., 2017)。1600 余通鹿石中，有 333 通带有 1 至 5 道不等的斜线，其中又有超过 70% 的鹿石都带有三道斜线 (Tsagaan et al., 2022)。创作者可能意在用三道凹槽象征“人脸” (Fitzhugh et al., 2017)，但这在多种解读中仍属于推测 (Tishkin et al., 2020; Dimaadjav et al., 2021)。截至目前，鹿石上斜线的具体含义尚不明确。

以彩绘装饰鹿石并非一种罕见的现象。部分鹿石“头部”的三道凹槽内至今仍可见红色颜料痕迹 (Tishkin et al., 2020)。叶欣等人 (Esin et al., 2017) 的研究表明，鹿石上的彩绘并非总是作为雕刻技艺的附庸，它也可作为一种独立的手法用以创作视觉符号。同时，这种常见于鹿石上的特殊符号偶尔也会以岩石作为绘制的媒介。值得注意的是，与尼斯塔法洛夫卡 (Nistafarovka) 岩画遗址类似 (Esin et al., 2017)，存在这类符号的墩德布拉克 I 号岩画点同样位于鹿石分布的核心区域之外 (图 19)。基于这一观察，我们倾向于认为，该符号是一种可以独立使用的特殊符号。

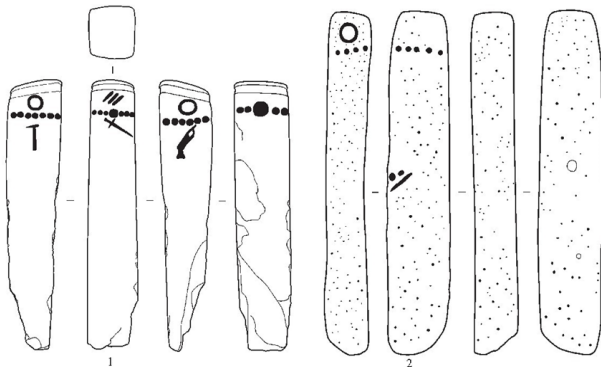


图 18 新疆阿尔泰地区青河县花海子 3 号遗址发现两块完整的鹿石 (插图来自 (Guo et al., 2017))。

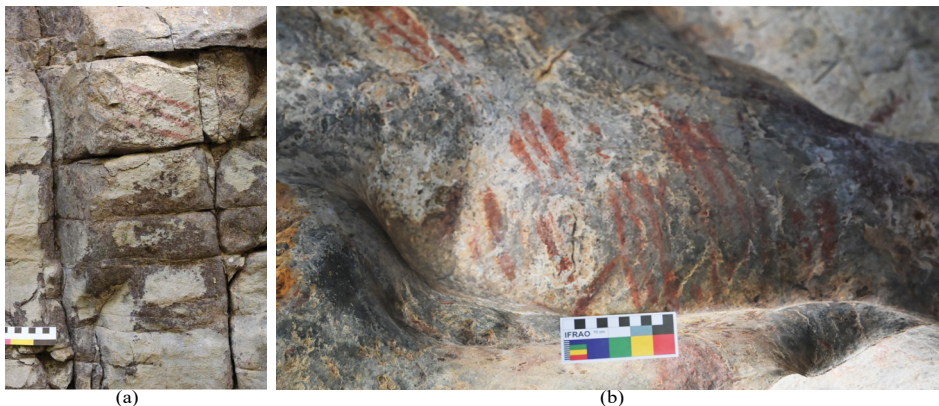


图 19 (a) 类似于在尼斯塔法洛夫卡发现的鹿石表面上的凹槽的符号 (插图来自 (Esin et al., 2017))；(b) 集中在墩德布拉克 I 号岩画墙壁上部的短线符号。

在“简单可见场景”部分的分析中，我们注意到“脸颊”代表的蓝色区域被“轮廓”代表的红色区域叠加，但这种叠加并未完全破坏任一元素的完整性，反而呈现出对原始图像的有意识再加工。奥沙利文将岩画中存在的复写行为分为三类，即对图像的复制、地点的复制和行为的复制 (O' Sullivan, 2021)。“轮廓”与“脸颊”的关系更接近第二种复制行为，即晚期创作者将新创作的图像融入进早期图像，且不破坏早期图像。这种对早期图像的处理方式不仅强调了早晚两期创作者之间的联系，也间接表明墩德布拉克 I 号岩画点可能存在多个创作阶段这一事实。

4.3 动物群图像

动物是墩德布拉克岩画群中最常见的题材，且风格差异明显。具体而言，墩德布拉克 IV 号岩画点的动物绘制风格呈高度写实化，II 号岩画点中相对简化 (图 20)，墩德布拉克 I 号岩画点的动物图像 (图 14 和图 15) 则介于写实与简化之间。根据图像风格发展的一般规律，墩德布拉克 IV 号岩画点的描绘可能创作于其他之前的较早阶段。

墩德布拉克 IV 号岩画点以狩猎活动为表现主题，画面中的两只动物头向相反，彼此间存在明显的叠压。类似的构图也见于蒙古国的阿拉尔·陶勒盖 (Aral Tolgoi) 岩画遗址中。库巴列夫等人 (Kubarev et al., 2007) 通过将该岩画点与俄罗斯阿尔泰地区的卡尔巴克·塔什 (Kalbak-Tash) 岩画点进行对比，认为阿拉尔·陶勒盖岩画点中的多数图像的年代或可追溯至新石器时代晚期或青铜时代早期。考虑到狩猎人群的高流动性，研究团队认为墩德布拉克 IV 号岩画点中图像的绘制年代应与阿拉尔·陶勒盖等遗址中的类似图像相近，即不晚于青铜时代早期。

相比之下，墩德布拉克 I 号岩画点的动物群主要包括三种：野马、野驴和野牛 (图 15 (a))。然而，在图 15 (b) 中，可以识别出“野猪”形象，其躯干从前至后逐渐变窄，吻部约占体长的三分之一，且长有獠牙。不过，该图像左侧呈现“蘑菇状”形态，类似阿尔泰地区青铜时代岩画中常见的众多蘑菇头、曲腿拟人形象，这些形象被广泛认为是萨满信仰的表达。因此，尽管本研究将该图称为“野猪”，但其所描绘形象的含义仍需进一步研究。

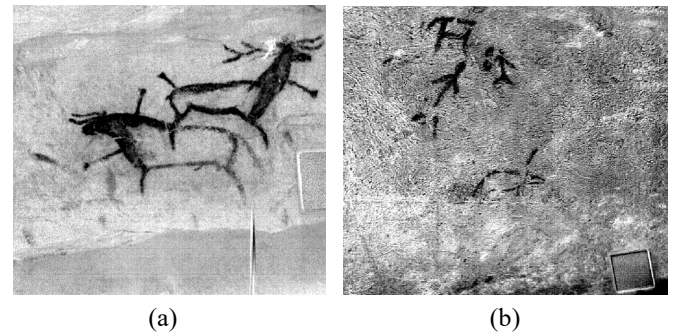


图 20 不同风格的动物：(a) 墩德布拉克 IV 号岩画遗址的动物图案；(b) 墩德布拉克 II 号岩画遗址的动物图案。

5. 结论

本研究旨在通过对中国新疆维吾尔自治区阿勒泰地区墩德布拉克岩画点高光谱数据的采集与分析,探究其隐藏信息并确定年代。与以往研究相比,高光谱成像及分析工具不仅能更有效地从岩画表面提取图像信息,还能揭示岩石上更多的隐藏信息。这为岩画的断代和图像解读提供了全面且准确的依据。对墩德布拉克岩画点的分析表明,其存在多次创作过程,为该岩画群后续的分期研究奠定了基础。此外,通过对复杂图像的分类与聚类交叉实验,分离出了具有代表性的图案,这些图案与青铜时代早期的文化元素高度相似。而且,岩画所描绘的内容与切木尔切克文化密切相关,这为该地区切木尔切克文化的研究提供了支持,也为阿尔泰地区各类青铜时代文化的比较研究提供了新的数据。高光谱数据内部的分类差异表明,墩德布拉克 I 号岩画点可能包含多个创作时期。有必要对该岩画点的景观进行进一步研究,以探究其独特性。

致谢

作者特别感谢西北大学文化遗产学院提供的专业支持,以及西北大学信息科学与技术学院提供的必要设备。同时,向中国新疆维吾尔自治区阿勒泰地区博物馆工作人员的通力合作表示衷心感谢,他们的积极配合对本研究的成功起到了重要作用。

基金项目

本研究得到国家重点研发计划(No. 2022YFE0203800)、国家自然科学基金(No. 62101446)、陕西省国际科技合作研究计划(No. 2022KW-08)资助。

数据和材料的可用性

由于本研究未生成或分析任何数据集,因此不适用于数据共享。

利益冲突

作者声明不存在任何利益冲突。

文章来源

本文译自: Yihao, F., Yue, C., Jun, W., Cheng, L., Xiaoyu, Z., Lu, L., Baheti, Zhuoya., & Jinye, P. (2024). Secrets on the rock: analysis and discussion of the Dunde Bulaq rock art site. *Heritage Science*, 12(1), 38. <https://www.nature.com/articles/s40494-024-01146-z>

参考文献

- Adinolfi, G., Carmagnola, R., Cataldi, M., Marras, L., & Palleschi, V. (2019). Recovery of a lost wall painting at the Etruscan Tomb of the Blue Demons in Tarquinia (Viterbo, Italy) by multispectral reflectometry and UV fluorescence imaging. *Archaeometry*, 61(2), 450-458.
- Bayarri, V., Sebastián, M. A., & Ripoll, S. (2019). Hyperspectral imaging techniques for the study, conservation, and management of rock art. *Applied Sciences*, 9(23), 5011.
- Bednarik, R. G. (2008). *Rock Art 12*. Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123739629002739.3>
- Behmann, J., Acebron, K., Emin, D., Bennertz, S., Matsubara, S., Thomas, S., & Bohnenkamp, D. (2018). Specim IQ: Evaluation of a new, miniaturized handheld hyperspectral camera and its application for plant phenotyping and disease detection. *Sensors*, 18(2), 441. <https://doi.org/10.3390/s18020441>
- Beyerer, J., Richter, M., & Nagel, M. (2017). *Pattern recognition: Introduction, features, classifiers and principles*. Berlin: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG.
- Capobianco, G., Pronti, L., Gorga, E., Romani, M., Cestelli-Guidi, M., Seranti, S., & Bonifazi, G. (2024). Methodological approach for the automatic discrimination of pictorial materials using fused hyperspectral imaging data from the visible to mid-infrared range coupled with machine learning methods. *Spectrochimica Acta Part A: Molecu-*

lar and Biomolecular Spectroscopy, 304(1), 123412.

- Cao, N., Lyu, S., Hou, M., Wang, W., Gao, Z., Shaker, A., & Dong, Y. (2021). Restoration method of sootiness mural images based on dark channel prior and Retinex by bilateral filter. *Heritage Science*, 9(1), 30. <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00504-5>
- Castillo, E., Bayarri, V., & Ripoll, S. (2021). Improved application of hyperspectral analysis to rock art. *Applied Sciences*, 11(1), 1292.
- Cerra, D., Müller, R., & Reinartz, P. (2013). Noise reduction in hyperspectral images through spectral unmixing. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(1), 109-113.
- Cerrillo-Cuenca, E., Sepúlveda, M., & Guerrero-Bueno, Z. (2021). Independent component analysis (ICA): A statistical approach to the analysis of superimposed rock paintings. *Journal of Archaeological Science*, 125(1), 105269.
- Chen, Y., Liu, X., Lyu, S., Wu, W., & Wang, R. (2022). Method of hidden strip information extraction from hyperspectral images of ancient paintings. *Sensors and Materials*, 34(12), 4463-4477.
- Cucci, C., Delaney, J. K., & Picollo, M. (2016). Reflectance hyperspectral imaging for investigation of works of art: Old master paintings and illuminated manuscripts. *Accounts of Chemical Research*, 49(10), 2070-2079.
- Defrasne, C., Massé, M., Giraud, M., Schmitt, B., Fligel, D., Le Mouélic, S., & Chalmin, E. (2023). The contribution of VNIR and SWIR hyperspectral imaging to rock art studies: Example of the Otello schematic rock art site (Saint-Rémy-de-Provence, Bouches-du-Rhône, France). *Archaeological and Anthropological Sciences*, 15(1), 116.
- Díaz-Andreu, M., Jiménez Pasalodos, R., Rozwadowski, A., Álvarez Morales, L., Miklashevich, E., & Santos da Rosa, N. (2023). The soundscapes of the Lower Chuya River area, Russian Altai: Ethnographic sources, indigenous ontologies, and the archaeoacoustics of rock art sites. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 30(2), 335-362.
- Dimaadjav, E. (2021). About the new classification of deer stones. *News of the Laboratory of Ancient Technologies*, 17(2), 90-109.
- Dong, W., An, C., Yu, J., & Chen, X. (2022). A study on the ecological niche of residents during the Bronze and Early Iron Age in Altai region, Xinjiang-Based on skeletal isotopes. *Western Regions Studies*, 2022(1). <https://doi.org/10.1636/j.cnki.xyvj.2022.01.005>
- Esin, Y., Magail, J., Yeruul-Erdene, C., & Gantulga, J. (2017). Paint on deer stones of Mongolia. *Archaeology, Ethnology & Anthropology of Eurasia*, 45(2), 79-89.
- Fitzhugh, W. W. (2017). Mongolian deer stones, European menhirs, and Canadian Arctic inuksuit: Collective memory and the function of northern monument traditions. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 24(1), 149-187.
- Gantulga, J.-O., & Turbat, T. (2021). *Rock Art Studies in Mongolia*. Oxford: Archaeopress Publishing Ltd.
- Gao, Z., Du, M., Cao, N., Hou, M., Wang, W., & Lyu, S. (2023). Application of hyperspectral imaging technology to digitally protect murals in the Qutan Temple. *Heritage Science*, 11(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00847-7>
- Garfinkel, A. P., & Austin, D. R. (2011). Reproductive symbolism in Great Basin rock art: Bighorn sheep hunting, fertility, and forager ideology. *Cambridge Archaeological Journal*, 21(3), 453-471.
- Hou, M., Cao, N., Tan, L., Lyu, S., Zhou, P., & Xu, C. (2019). Extraction of hidden information under sootiness on murals based on hyperspectral image enhancement. *Applied Sciences*, 9(17), 3591.

- Hyvärinen, A., & Oja, E. (2000). Independent component analysis: Algorithms and applications. *Neural Networks*, 13(4-5), 411-430.
- Jalandoni, A. (2021). An overview of remote sensing deliverables for rock art research. *Quaternary International*, 572(1), 131-138.
- Jia, P. W. M., & Betts, A. V. (2010). A re-analysis of the Qiemu'erqieke (Shamirshak) cemeteries, Xinjiang, China. *Journal of Indo-European Studies*, 38(3-4), 275-295.
- Jones, A. M. (2017). Rock art and ontology. *Annual Review of Anthropology*, 46(1), 167-181.
- Kovalev, A. (2022). Megalithic traditions in the Early Bronze Age of the Mongolian Altai: The Chemurchek (Qie'muerqieke) cultural phenomenon. In *Megaliths of the World*, 2, 767-816. Oxford: Archaeopress.
- Kovalev, A. A. (2019). Ancient statue-menhirs in Chemurchek and surrounding territories. Mumbai: SPBGUC.
- Kubarev, V. (2007). Biluut-Tolgoi: A new rock art site in Mongolia. *Archaeology, Ethnology & Anthropology of Eurasia*, 31(2), 63-68.
- Kubarev, V., Cevdeendoj, D., & Yacobson, E. (2005). *Petroglyphs of Sul-faraigann-Salaa and Bagga-Oiguide*. Institute of Archaeology and Ethnography of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.
- Liggins, F., Vichi, A., Liu, W., Hogg, A., Kogou, S., Chen, J., & Liang, H. (2022). Hyperspectral imaging solutions for the non-invasive detection and automated mapping of copper trihydroxychlorides in ancient bronze. *Heritage Science*, 10(1), 142.
- O'Sullivan, R. (2019). Movement across a 'mountain barrier': Mapping accessibility with rock art and GIS in the Altai Mountains, Eastern Eurasia. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 27(1), 101979.
- O'Sullivan, R. (2021). Replication in rock art past and present: A case study of Bronze and Iron Age rock art in the Altai, Eastern Eurasia. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 28(2), 387-412.
- O'Sullivan, R., & Shao, H. (2022). The Bronze and Iron Age rock art of Altay Prefecture, Xinjiang: A synthesis. *Rock Art Research*, 39(1), 83-96.
- Peng, J., Yu, K., Wang, J., Zhang, Q., Wang, L., & Fan, P. (2019). Mining painted cultural relic patterns based on principal component images selection and image fusion of hyperspectral images. *Journal of Cultural Heritage*, 36(1), 32-39.
- Piccollo, M., Cucci, C., Casini, A., & Stefani, L. (2020). Hyper-spectral imaging technique in the cultural heritage field: New possible scenarios. *Sensors*, 20(10), 2843.
- Porr, M. (2019). Rock art as art. *Time and Mind*, 12(2), 153-164.
- Shao, H. (2008). Discussion on two types of bronze culture in Altay region of Xinjiang. *Western Regions Studies*, 2008(4). <https://doi.org/10.1636/j.cnki.xxyj.2008.04.011>
- Schmitt, B., Souidi, Z., Duquesnoy, F., & Donzé, F.-V. (2023). From RGB camera to hyperspectral imaging: A breakthrough in Neolithic rock painting analysis. *Heritage Science*, 11(1), 91.
- Shi, N., Wang, X., & Zhang, C. (2017). The application of infrared thermal wave imaging technology in conservation. *Journal of the National Museum of China*, 5(2), 149-157.
- Shih, F. Y. (2010). Image processing and pattern recognition: Fundamentals and techniques. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Skoog, B., Helmholz, P., & Belton, D. (2016). Multispectral analysis of Indigenous rock art using terrestrial laser scanning. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41(B5), 405-412.
- Tsagaan, T., Jamiyan-Ombo, G., Noost, B., Dunburee, B., Turbayar, N., & Erdene-Ochir, N.-O. (2022). *Deer Stone Culture of Mongolia and Meigh*. Ulaanbaatar: Munkhiin Useg LLC.
- Vanwezer, N., Taylor, W. T. T., Bayarsaikhan, J., Breitenbach, S. F., Amano, N., Louys, J., del Val, M., Boivin, N., & Petraglia, M. (2021). Hunting, herding, and people in the rock art of Mongolia: New discoveries in the Gobi-Altai Mountains. *Archaeological Research in Asia*, 26(1), 100267.
- Wang, B. (2005). The polychrome rock paintings in the Altay Mountains. *Silk Road*, 3(1), 16-23.
- Wang, C.-C., Yeh, H.-Y., Popov, A. N., Zhang, H.-Q., Matsumura, H., Sirak, K., ... & Reich, D. (2020). The genomic formation of human populations in East Asia. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2020.03.25.004606v1.abstract>
- Wang, J., Sun, J., Yu, K., Liu, C., Wu, C., Chen, Y., & Hu, Q. (2021). An intelligent identification method of bronze rust category based on grouping LSTM and CNN. *Journal of Northwest University*, 51(5), 778-786. <https://doi.org/10.1615/j.cnki.xdxbr.2021-05-008>
- Wilkin, S., Ventresca Miller, A., Taylor, W. T., Miller, B. K., Hagan, R. W., Bleasdale, M., Scott, A., Gankhuyg, S., Ramsøe, A., Ulziibayar, S., Trachsel, C., Nanni, P., Grossmann, J., Orlando, L., Horton, Mark., Stockhammer, P. W., Myagmar, E., Boivin, N., & Jeong, C. (2020). Dairy pastoralism sustained Eastern Eurasian steppe populations for 5000 years. *Nature Ecology & Evolution*, 4(3), 346-355. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1120-y>
- Wu, G., Zhang, H., Lü, E., Wu, D., Zheng, J., Yao, R., Man, J., & Wang, L. (2017). The excavation of the Huahaizi No. 3 site in Jinghe County, Xinjiang. *Chinese Archaeology*, 17(1), 82-94. <https://doi.org/10.1515/char-2017-0012>
- Yu, J. (2023). Cultural lineage passed down for tens of thousands of years: Archaeological excavations at the site of Tongtian Cave in Jimunai County, Xinjiang. Springer Nature Singapore.
- Zhang, Q., Wang, J., & Sun, Z. (2019). A method for the analysis of spectral imaging data from Tang tomb murals. In *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology VII*, 11058, 252-259. SPIE.
- Zhang, Z. (2013). Shaman rock paintings in the prehistoric period of Altay. *Collections*, 2013(1).