

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.222>



表面铁膜主导的丹霞红：我国南方典型丹霞地层铁的赋存状态研究

刘振康¹, 倪凤娟¹, 黎广荣^{1,2,4*}, 郭福生¹, 王超³, 朱素雯¹, 秦澳¹, 刘富军¹, 陈留勤¹

1. 东华理工大学地球与行星科学学院, 江西南昌 330013
2. 铀资源探采与核遥感全国重点实验室, 江西南昌 330013
3. 广东省有色矿山地质灾害防治中心, 广东广州 510080
4. 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏南京 210093

摘要: 丹霞地貌在我国南方地区广泛发育, 其红色的特征是主要的地貌判别标志之一。前人的研究成果显示丹霞的红色成因与地层中的铁有关, 但是对于铁的赋存状态并未进行深入研究。通过对采自广东省丹霞山及江西省龙虎山两个典型丹霞地貌区的样品进行矿物组成、地球化学及铁的赋存状态研究, 结果表明: (1) 广东丹霞山及江西龙虎山丹霞地层样品的岩性主要为砾岩与砂岩, 主要的矿物组成是石英与长石, 含有少量的粘土及铁氧化物, 岩体致密坚硬, 固结程度高, 多为铁质胶结。(2) 地球化学分析显示, 二者的 SiO₂ 的含量最高, Al₂O₃ 次之, TFe₂O₃ 与 FeO 的含量较低, 铁氧化物主要是赤铁矿, 它是极高效的显色剂, 通过高效的地球化学过程, 以最显色的矿物形式, 富集在了颗粒表面。(3) 穆斯堡尔谱分析显示二者地层中铁均以氧化物铁及粘土铁的形式赋存, 其中三价铁离子远高于二价铁离子的含量。综合来看, 铁在丹霞地层中的含量较低, 但是以铁氧化物的形式吸附和沉淀在石英、长石等矿物的表面, 以及粘土矿物的表面和层间, 形成极薄的赤铁矿包膜, 致使地层呈现红色。

关键词: 南方丹霞地貌; 矿物组成; 主量元素; 穆斯堡尔谱; 铁的赋存状态。

中图分类号: P59; P54

文章编号: 1000-2383(2026)02-744-12

收稿日期: 2025-06-19

Danxia Red Caused by Surface Iron Coating: Study on the Occurrence State of Iron in Typical Danxia Strata in Southern China

Liu Zhenkang¹, Ni Fengjuan¹, Li Guangrong^{1,2,4*}, Guo Fusheng¹,
Wang Chao³, Zhu Suwen¹, Qin Ao¹, Liu Fujun¹, Chen Liuqin¹

1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China
2. National Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Nuclear Remote Sensing, Nanchang 330013, China
3. Guangdong Nonferrous Mine Geological Disaster Prevention and Control Center, Guangzhou 510080, China
4. State Key Laboratory of Endogenetic Metallic Deposit Metallogenic Mechanism, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: Danxia landform is widely developed in southern China, and its red feature is one of the main distinguishing marks of

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 42442077, 42472130, 42361002); 中国铀业—东华理工核资源与环境国家重点实验室联合创新基金项目(No. 2023NRE-LH-07); 东华理工大学科研发展基金项目“中国典型地貌景观形成机制及旅游开发研究”(No. K20240017)。

作者简介: 刘振康(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事矿物学方面的研究。ORCID: 0009-0004-4379-4987. E-mail: 769366674@qq.com

* **通讯作者:** 黎广荣, ORCID: 0000-0002-7189-1918. E-mail: liguangrong0086@ecut.edu.cn

引用格式: 刘振康, 倪凤娟, 黎广荣, 郭福生, 王超, 朱素雯, 秦澳, 刘富军, 陈留勤, 2026. 表面铁膜主导的丹霞红: 我国南方典型丹霞地层铁的赋存状态研究. 地球科学, 51(2): 744-755.

Citation: Liu Zhenkang, Ni Fengjuan, Li Guangrong, Guo Fusheng, Wang Chao, Zhu Suwen, Qin Ao, Liu Fujun, Chen Liuqin, 2026. Danxia Red Caused by Surface Iron Coating: Study on the Occurrence State of Iron in Typical Danxia Strata in Southern China. *Earth Science*, 51(2): 744-755.

landform. Previous research results have shown that the red color of Danxia landforms is related to iron in the strata, but no in-depth study has been conducted on the state of iron occurrence. In this paper, the mineral composition, geochemistry and iron occurrence of samples from Danxia Mountain in Guangdong Province and Longhu Mountain in Jiangxi Province are studied. The results show that: (1)The Danxia landform stratigraphic samples in Guangdong Province and Longhu Mountain in Jiangxi Province show that the main mineral composition is quartz and feldspar, containing a small amount of clay and iron oxides, with a high degree of consolidation, and some layers contain gravel. (2) Geochemical analysis shows that the content of SiO_2 in both is the highest, followed by Al_2O_3 . The content of TFe_2O_3 (0.81%~1.63%) and FeO (0.08%~0.16%) is lower, indicating that the content of iron minerals is not the main factor causing redness. (3)The iron in the Danxia Formation of Danxia Mountain in Guangdong and Longhu Mountain in Jiangxi mainly exists in the form of clay iron and oxide iron, among which trivalent iron ions (oxides- Fe^{3+} : 41.3% and 44.3%, clay- Fe^{3+} : 49.7% and 47.6%) are much higher than the content of divalent iron ions (clay- Fe^{2+} : 9.0% and 8.1%). All indicate that the content of iron in the Danxia Formation is relatively low, but it may be in the form of an iron oxide coating that exists on the surface of minerals such as quartz and feldspar, causing the formation to appeared.

Key words: Danxia landform in southern China; mineral composition; major element; mössbauer spectroscopy; occurrence state of iron.

0 引言

丹霞地貌是发育于红层盆地中的一种特殊地貌类型,其形成过程始于盆地的隆升,并经断裂切割,在外动力作用(包括流水侵蚀、溶蚀、风蚀、海蚀、风化及重力崩塌等)的共同影响下,最终形成以陡崖坡为特征的地貌景观(姜勇彪等,2024).丹霞地貌的核心内涵可概括为3点:一是其显著的地貌特征,即普遍发育陡崖;二是其地层基础,主要为中生代燕山构造旋回(考虑构造活动的超前与滞后,时代可从中三叠世延续至新近纪)的陆相红层,以红色厚层河湖相碎屑岩为主体;三是其形成所依赖的地质营力,以流水侵蚀、重力崩塌和风化剥落为主(郭福生等,2020).中国丹霞地貌分布广泛,目前的研究多集中于宏观特征描述与定性分析,而在多学科交叉融合及量化研究方面仍较为薄弱,系统性和深度有待加强(傅强等,2025).根据中国自然地理区划方案,以巫山—武陵山—雪峰山为界,将南方丹霞地貌划分东南和西南两区;根据地壳抬升速度、区域降水以及植被覆盖度等指标,按照分布数量与规模尺度,中国丹霞地貌进一步分成西北区、西南区和东南区3个相对集中分布区(黄进等,2015).中国南方丹霞地貌自新生代以来经过多次阶段性抬升,现存地貌形态是多期地质旋回叠加的结果(蔡天赦,2017),其分布集中于皖、粤、浙、桂、湘、赣等地,构成丹霞地貌的地层为白垩纪—新近纪碎屑岩系,新生代以来地质构造运动的发生,使地层整体缓慢抬升,平均上升速率为0.5~1.0 mm/a,地层倾角一般呈水平或小于 $5^\circ\sim 10^\circ$,红层中多发育数组近直立节理(彭华,2000;彭华,2002).南方

丹霞地貌区处于亚热带湿润气候区,降雨量丰富,地表水系发达,溶蚀作用将红层切割成不同体积的岩体,在重力的作用下发生崩塌,形成姿态万千的地貌景观(丁宏伟等,2014).南方丹霞不同地区具有不同的地貌演化景观,分布于福建武夷山的丹霞地貌主体处于幼年期,以发育线谷、峡谷为特色;桂、湘、粤北一带的丹霞地貌主体处于中年期,以发育丹崖、峰林、峰丛及岩洞为特色;赣东北龙虎山世界地质公园内丹霞地貌主体处于老年期,以石柱、天生桥、岩洞群、孤峰和造型石为特色(丁宏伟等,2014;郭福生等,2014;姜勇彪等,2024).近年来,随着旅游业的发展,一些景区将色彩鲜艳、形态奇特的地貌统称为“丹霞地貌”,甚至将缺乏陡崖的彩色丘陵地貌也纳入丹霞地貌范畴,导致概念使用上的泛化(郭福生等,2020).

丹霞地貌的红色成因是一个典型的表生地球化学过程,核心机制是岩石中铁元素的氧化作用.该过程可分为两个主要阶段:原生红色的形成与次生红色的维持.原生红色的形成取决于岩石沉积成岩时的环境.在中生代,丹霞地貌所在的沉积盆地周缘物源区多由含铁的古老岩石组成,这些母岩经地表风化作用逐渐破碎,形成的碎屑物经流水搬运至内陆盆地沉积.在搬运过程中,颗粒按粒度和密度分选,最终形成具层理结构的砂岩与砾岩(史月欣,2023).该阶段的关键地球化学过程发生于氧化环境中并伴随赤铁矿化.当时古气候干旱炎热,盆地水体较浅,沉积物经常暴露于大气,促使其中的二价铁离子与氧和水发生反应,生成三价铁氧化物,其中以赤铁矿最为主要(叶泽宇等,2021).岩石形成后能否保持鲜红则取决于以下几方面:一是岩

石的固结与胶结作用——上覆地层压力使沉积物压实,同时地下水中的矿物质析出,将松散沉积物胶结成坚硬的岩石,从而增强抗风化能力;二是地壳抬升与剥露作用——构造运动使原本深埋的红色岩层抬升并出露地表,上覆岩层逐渐被剥蚀,使红色岩层显露;三是持续的氧化环境——多数丹霞地貌区至今仍保持较好的排水条件与相对干燥的气候,使岩石表面及内部处于氧化环境,避免发生还原反应.构成丹霞地貌的地层岩性均为红色或以红色为主的砾岩、砂砾岩、砂岩、粉砂岩、泥质砂岩及泥岩.岩石中颗粒间的胶结物里存在铁氧化物,主要是赤铁矿,其次是针铁矿和磁铁矿.广泛分布的岩石表面常见一层极薄的铁锰氧化物膜.表面的赤铁矿是丹霞红层呈色的关键产物,其主要以胶结物形式赋存于大颗粒矿物之间的缝隙中(Liu *et al.*, 2020).目前普遍认为丹霞地貌的红色与地层中的含铁矿物有关,但由于铁元素在自然界中分布广泛、化学性质活泼,常以多种形态存在(如是否进入矿物晶格、价态差异等),且在氧化-还原环境中 Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 可相互转化并在固液相间迁移,不同赋存状态的铁会呈现不同颜色.那么,究竟是铁的何种赋存状态导致“丹霞红”的形成?此外,若红色确由铁氧化物引起,其含量需达到多少?针对这些问题,穆斯堡尔谱有独特的优势(Zheng *et al.*, 2004;郑国东, 2008),本研究选取中国南方两处典型丹霞分布区,对其地层中铁的赋存状态展开系统研究.

1 地质背景

南方丹霞地貌地层多为铁质、钙质胶结,二者占胶结物的95%以上,岩体致密坚硬,表层风化较弱.南方丹霞地貌呈带状分布,种类多,规模大.在丹霞地貌发育过程中,流水起着主导作用,多形成顶平、身陡、坡缓的丹霞地貌(郭福生等, 2014;郭福生等, 2020).丹霞地貌陡崖的流水面非常光滑,且红色鲜明,多发育垂直溶沟,形成“晒布岩”式奇观.在重力、流水侵蚀及溶蚀等综合作用下,崖壁出现岩槽、穿洞、天桥、扁平洞等带有南方地域特色的丹霞地貌类型,是很好的旅游资源(周学军, 2003).中国南方丹霞地貌的红色成因源于其沉积古环境、岩石学特征与现代气候环境共同控制的铁元素地球化学行为.广东丹霞山与江西龙虎山作为典型代表,虽同属白垩纪陆相红层沉积,却在沉积速率、构造背景与气候条件上存在系统差异.广东丹霞山气

候更湿热,沉积速率较快,抑制了铁的表生迁出,促进了成岩期铁的原地富集和氧化;而江西龙虎山的气候相对较弱,沉积速率较慢,沉积物在埋藏前暴露于地表水或浅部地下水的时间更长.广东丹霞山位于华南板块南岭构造带北缘,其形成主要受太平洋板块俯冲导致的伸展构造体制控制,发育一系列NE向断裂控制,构成盆地的边界并控制盆地的形态和沉积中心(刘富军, 2020).晚白垩世时期,在拉张背景下,盆地持续下沉,周缘山地因强烈隆升提供了丰富的物源,堆积了巨厚的河湖相碎屑沉积(Shu *et al.*, 2019).新生代以来盆地结束沉积后,转为整体性、间歇性隆升.NE向断裂再次活动,但以差异性抬升为主.该沉积地层为晚白垩世丹霞组,岩性以厚层块状紫红色砾岩、砂砾岩为主.岩层铁质胶结,垂直节理密集,坚硬致密.江西龙虎山地处华南板块与扬子板块结合带,其构造演化受太平洋板块俯冲的影响,形成了北东向主干断裂及伴生北西向断裂(姜伏伟等, 2017).早白垩世时期,在区域拉张背景下,信江盆地沉降,沉积了以河湖相为主的红色碎屑岩.中新世以来,新构造运动表现为断块差异升降运动,北东和北西向断裂控制着地块的抬升幅度和裂隙系统,第四纪以来转为缓慢整体隆升(朱志军等, 2012).核心地层为早白垩世塘边组,岩性以中-薄层状紫红色含砾砂岩与粉砂岩为主,岩性相对较软,层理明显,且胶结物含量与抗风化能力变化大.广东丹霞山和江西龙虎山丹霞地层以粗粒碎屑颗粒为主,主要岩性为砾岩、粗砂岩,还发育粉砂岩及泥岩,其固结程度高.广东丹霞山及江西龙虎山二地的丹霞红层均是典型的陆相沉积,虽然其形成气候有争议,但是普遍认为与白垩纪干旱炎热的氧化环境有关(宋春晖等, 2005;陈海霞, 2009;王杰民等, 2012;吉金平, 2017;陈留勤等, 2019).为通过对比系统揭示铁的赋存规律,本研究最终选取广东丹霞山与江西龙虎山为研究对象,二者构成了一个理想的丹霞地貌演化完整序列.

2 分析测试方法及结果

2.1 分析方法

对广东丹霞山及江西龙虎山地区共采集3个样品,编号依次为sg01、sg02和yt01(图1a~1c).广东丹霞山分别采集了暗红色的砂岩和暗红色砾岩,野外观察可以看到发育有大型层理,碎屑颗粒粗大,砾石磨圆程度为中等一差,分选性差,充填物以砾

石到砂为主,发育粒序层理、平行层理,也见叠瓦状构造和砾石平行层理方向线状排列,缺乏古土壤。这些特征指示该沉积体为较强水动力条件下的快速堆积,并进一步推断其形成于相对湿润、多暴雨的气候环境,最终建立了一个以河流作用为主导的冲积扇沉积体系(陈留勤等,2019)。在显微镜下可观察到在石英、长石等矿物的边缘覆盖了一层红色物质(图1d)。江西龙虎山采集的样品为砂岩,在砾岩层中常夹砂岩层,有些泥质岩层含有钙质结核、遗迹化石等。样品表面呈鲜艳的砖红色、褐红色,颗粒相对较细,主要呈棱角一次棱角状,分选性较差,通常构成丹霞地貌的缓坡、洞穴或凹陷带,野外可见大型层理。显微镜下观察(图1e)可见大量红色物质主要集中在石英等矿物的边缘。

所选样品均为暗红色砂岩和暗红色砾岩,能够代表想要研究的原生岩性特征。样品的前期处理过程是:挑选新鲜样品约5g,用玛瑙研钵将所有所选岩石样品在研钵中捣碎,手工无污染地研磨至200目,然后压成饼状上机测试。矿物组成的分析方法是对样品粉末进行XRD分析。XRD的仪器型号为德国布鲁克生产的D8 advance多晶X射线衍射仪,配置的是Cu靶,工作电压30kV,电流35mA,扫描范围: $3^{\circ}\sim 85^{\circ}$,光阑系统为 $DS=SS=1^{\circ}$,扫描速度0.5s/步,测角仪精度: 0.0001° ,准确度 $\leq 0.02^{\circ}$ 。分析单位为东华理工大学核资源与环境国家重点实验室。使用的多相分析解谱软件为X'Pert Highscore Plus,检索数据库为COD2010及PDF2 2004,后期使用Coreldraw X18进行图件处理及输出。

主量元素含量的分析方法是粉末样品中加入助熔剂(含硝酸锂),将其进行充分混合,用高温将化合物熔融,之后将熔出物倒入铂金坩埚,待熔出物融化成扁平玻璃薄片,采用X射线荧光光谱仪进行分析。分析仪器为波长色散X射线荧光光谱仪(ZSXPrimus II),采用波长色散X射线荧光光谱法《硅酸盐岩石化学分析方法第28部分:16个主次成分量测定》(GB/T 14506.28-2010)《岩石矿物分析》硅酸盐岩石分析,分析单位为武汉上谱分析科技有限责任公司。

风化作用使地层外面裸露的表面形成次生色,为获取沉积物原生色,要对该采样点表面进行彻底的开挖清理至新鲜原生色面,在新鲜原生色面进行取样。选取江西龙虎山丹霞地层样品1件以及广东丹霞山丹霞地层样品1件进行穆斯堡尔谱分析。穆

斯堡尔谱的分析仪器为德国Wissel公司生产的Bench MS-500,分析测试工作在武汉大学物理科学与技术学院完成,放射源为 ^{57}Co ,强度25mCi,在室温下,使用 $\alpha\text{-Fe}$ 吸收体进行速度标定,利用Voigt-based拟合(VBF)分析软件对光谱进行了拟合,具体可以参考Rancourt *et al.*(1991)的操作过程。样品的测试均在室温(约293K)下进行。穆斯堡尔谱测试样品的处理:(1)使用玛瑙研钵将所选样品研磨至200目;(2)为获得质量较好的穆斯堡尔谱图,参考张富良等(1997)的方法,计算出需要测试样品的最佳质量为150~170mg,穆谱样品在上机前对样品粉末继续磨细,将样品粉末装入样品盒密封干燥保存,防止其受到氧化或污染。

2.2 分析结果

2.2.1 矿物组成

南方典型丹霞地层(广东丹霞山,江西龙虎山)3个样品的分析结果显示:

XRD谱图(图2)中,南方典型丹霞红色砾岩sg01和粗砂岩sg02、yt01矿物成分相似,sg01和sg02矿物组成有粘土类矿物、石英、长石、铁氧化物,yt01包含硫化物、石英、粘土类矿物、长石、铁氧化物。3个样本均含有粘土类矿物、石英、长石、铁氧化物,样品呈现红色可能与上述矿物有关。石英的峰在各样品中均表现明显,石英的含量最高,2theta在 20.926° 、 26.696° 、 36.650° 、 39.526° 、 50.187° 、 60.133° 等位置点的强度明显;sg01、sg02长石的峰位未发生变化,位置在 27.576° ,yt01稍有变化,长石的峰位在 27.965° ;硫化物主要在 5.804° 等低角度位置出现;铁氧化物在 27.944° 、 28.026° 、 29.459° 、 54.914° 等位置出现,部分位置与长石相近;粘土类矿物种类较多(如高岭石、绿泥石等),谱图特征较为复杂,多出现在低角度的位置。

2.2.2 主量元素含量

南方典型丹霞地层地球化学成分显示(表1):

(1)sg01样品的岩性是砾岩,sg02、yt01的岩性是砂岩,3个样品中都含有 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 MnO 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 、 P_2O_5 、LOI、FeO。 SiO_2 的含量最多, Al_2O_3 的含量其次,其他元素的含量均小于10%。丹霞地层的 SiO_2 和 Al_2O_3 在73.22%~85.61%和7.86%~13.82%之间,变化较大,表明其矿物组成较为复杂;CaO和 K_2O 在0.05%~0.40%和2.21%~5.40%之间,总体来说含量不高,但变化也较大。由于CaO常赋存在易溶碳酸盐中,其含量变化大可能受到当地气候影响。

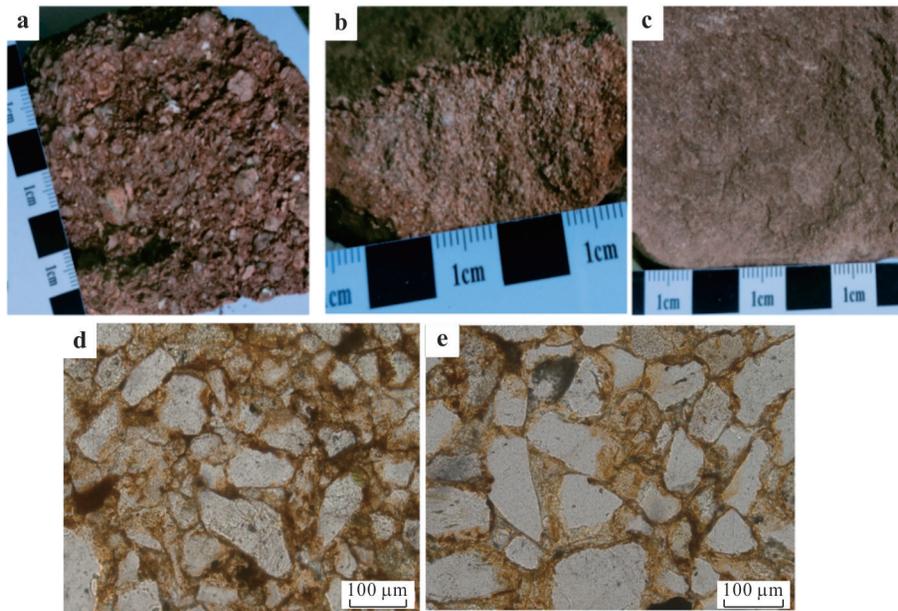


图 1 广东丹霞山及江西龙虎山丹霞地层手标本及岩石样品单偏光镜下照片

Fig 1 Photographs of hand specimens and rock samples of Danxia strata in Danxia Mountain, Guangdong Province and Longhu Mountain, Jiangxi Province under partially polarized light

a. 广东丹霞山丹霞地层暗红色砾岩; b. 广东丹霞山丹霞地层暗红色粗砂岩; c. 江西龙虎山丹霞地层暗红色中粗粒砂岩; d. 广东丹霞山样品单偏光下照片; e. 江西龙虎山样品单偏光下照片

Na_2O 在 0.10%~0.60% 之间, 其变化常与地下水中易溶盐类相关. MnO 的含量在 0.01%~0.03% 之间, 变化较小. P_2O_5 在 3 组样品中的含量均为 0.02%, 未发生变化. 本文主要研究南方典型丹霞地层中铁的赋存状态, TFe_2O_3 和 FeO 在 0.81%~1.63% 和 0.08%~0.16% 之间, 表中 TFe_2O_3 的含量变化大于 FeO .

(2) LOI (loss on ignition) 表示样品加热至一定温度后, 通过水分蒸发、有机质燃烧及碳酸盐分解等过程失去的质量百分比, 主要反映内在水、有机质和可还原性气体 (如 SO_2 、 CO_2) 的含量. 南方典型丹霞地区 3 个样品的烧失量较低. 其中 yt01 的 LOI 含量高于 sg01、sg02, 说明江西龙虎山中矿物成分更加复杂.

(3) 南方典型丹霞气候潮湿, 雨水充沛, 化学风化剧烈. 氧化还原指标能够进行物源分析以及沉积环境的判别, 通过 3 个样品的地球化学分析, 可判断为继承碎屑颗粒. 在砂岩和砾岩中使用 CIA 最好的方法是分离出砂岩中的泥质基质, 单独测试这部分 CIA 值. 从氧化还原指标来看 (表 2), 广东韶关丹霞山样本 sg01、sg02 的氧化还原指标大于江西鹰潭龙虎山样本 yt01. 从化学风化指数 CIA 来看, 广东韶关暗红色砂岩样品指数达到了 0.65, 而江西鹰潭

暗红色砂岩样品指数只有 0.53. 指数越高, 风化淋滤程度越高, 指示广东韶关风化淋滤程度高于江西鹰潭, 广东韶关岩石遭受的化学风化作用也比江西鹰潭更强烈.

在丹霞山 (高 CIA 值) 所代表的强风化环境下, 沉积物源区的含铁矿物或硫化物中的 Fe 易于被活化溶解, 以 Fe^{2+} 离子的形式随孔隙水向下迁移. 相反, 在龙虎山 (低 CIA 值) 所代表的相对弱风化环境下, 水岩反应强度较低, 孔隙水介质不够活跃, Fe^{2+} 的活化和迁移能力有限.

2.2.3 铁的赋存状态 穆斯堡尔谱学较早被应用于矿物学领域, 通过穆斯堡尔效应可以观察到原子核和核外电子及配体间的相互作用, 这种相互作用会改变核的能量, 对能级产生轻微扰动, 称为超精细相互作用 (王秋霞等, 2023). 穆斯堡尔谱学不仅在大多数造岩矿物中, 在岩石、土壤、沉积物、泥浆中也含有铁元素, 而且 ^{57}Fe 又正好是最适宜的穆斯堡尔元素. 通过分析样品中铁的电子组态、氧化态、配位数, 确定矿物中阳离子位置分布及阳离子有序-无序程度, 通过测定各种矿物相中 Fe^{2+} 及 Fe^{3+} 的含量比以及它们在各种矿物晶体点阵位置上的占有数比, 得出的结论对许多地质学家及矿物学家的研究都有重要的参考价值. 穆斯堡尔谱技术可

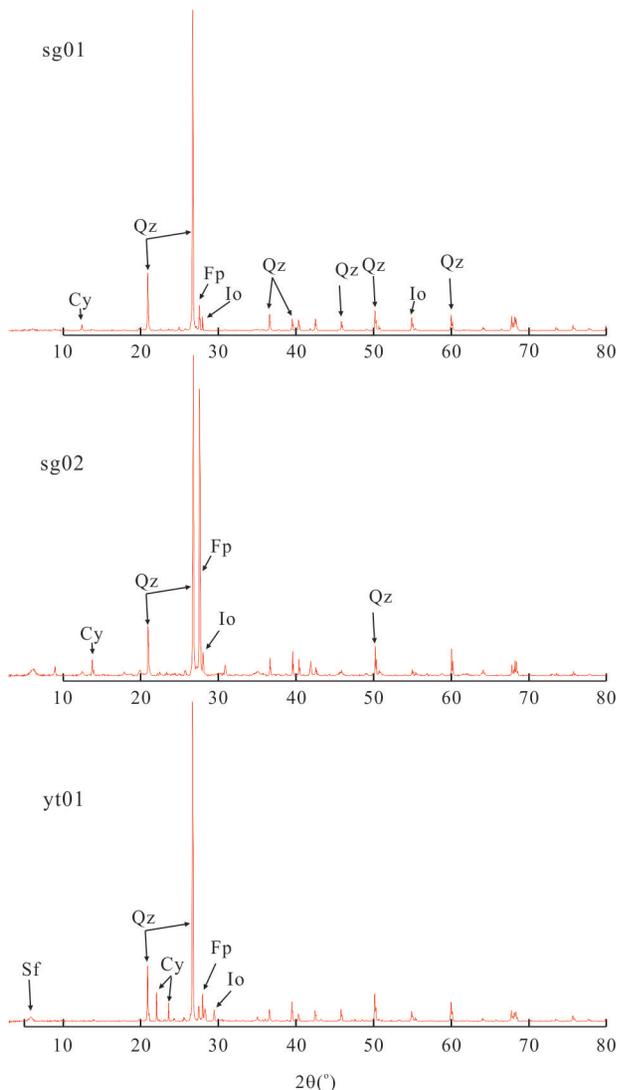


图2 南方典型丹霞地层矿物组合XRD分析结果
 Fig 2 Mineral association of typical Danxia Formation in southern China
 Qz. 石英;Cy. 粘土类矿物;Fp. 长石;Io. 铁氧化物;Sf. 硫化物

以定性和定量分析样品中各种铁元素的化学种类. 穆斯堡尔谱的参数主要包含同质异能移动 (IS, Isomer shift)、四极移动 (漂移) (QS, quadruple splitting)、半宽 (HW, half width)、局部磁场 (Hi). 根据谱图的吸收峰样式、位置和这些参数可以确定样品中铁的赋存状态, 且利用各种谱线的面积计算其相对含量.

通过对广东丹霞山、江西龙虎山丹霞地层样品的穆谱数据进行拟合处理, 拟合曲线较为连续光滑, 样品均表现出双线谱、六线谱的特征 (图 3、表 3), 指示样品中存在粘土铁和氧化物铁.

(1) 南方典型丹霞地区铁的赋存参数如下 (表 3): clay-Fe²⁺ 同质异能位移参数 (IS) 为 1.079 ± 0.005 和 1.337 ± 0.008, 四极分裂参数 (QS) 为 2.217 ± 0.010 和 2.039 ± 0.002; clay-Fe³⁺ 的同质异能位移参数为 0.292 ± 0.003 和 0.296 ± 0.003; 四极分裂参数为 0.754 ± 0.005 和 0.676 ± 0.006; oxides-Fe³⁺ 的同质异能位移参数为 0.361 ± 0.001 和 0.351 ± 0.005; 四极分裂参数为 -0.095 ± 0.001 和 -0.102 ± 0.001.

(2) 根据穆谱参数, 推测样品中的铁氧化物很可能是赤铁矿, 赤铁矿的一般化学式为 Fe₂O₃, 属于刚玉族, 有两种同质多相变体: α-Fe₂O₃ 和 γ-Fe₂O₃, α-Fe₂O₃ 的晶体结构特征为氧作六方最紧密堆积, 铁离子占据了三分之二的八面体空隙 (铁在赤铁矿中只有一种等效晶位), 而 γ-Fe₂O₃ 中不存在 Fe²⁺, Fe³⁺ 分布在由氧作紧密堆积而形成的八面体和四面体空隙中, 但没有全填满, 对应着八面体和四面体晶位的 Fe³⁺ 应该出现两组六线谱, 但实际上只看到一组六线谱. 从谱形上, 无法区分, 但它们不同之处在于内磁场参数不同. 前人在研究赤铁矿时, 发现少量的锰可替代赤铁矿中的铁, 对于室温下弱铁磁相的

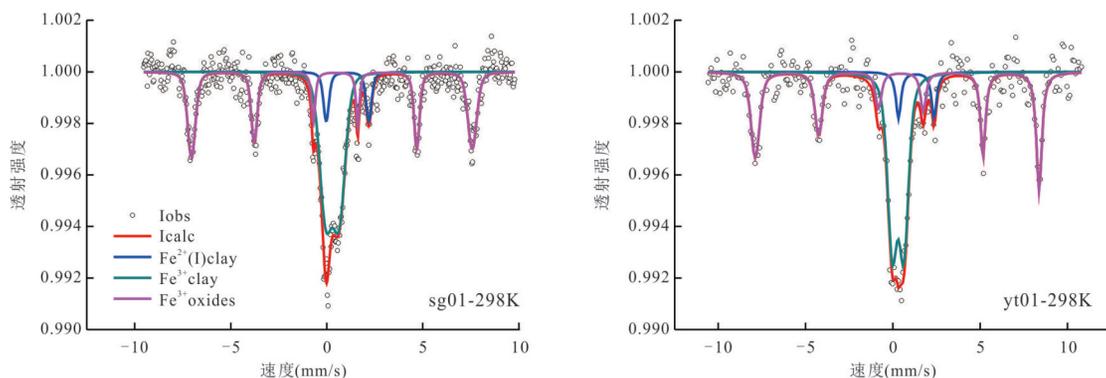


图3 南方典型丹霞地层穆斯堡尔谱图
 Fig 3 Mossbauer spectrum of typical Danxia strata in southern China

表 1 南方典型丹霞地层地球化学成分 (%)

Table 1 The typical Danxia strata chemical composition in southern China (%)

序号	样品名称	样品性质	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	FeO	SUM
1	sg01	砾岩	85.61	0.11	7.86	0.81	0.01	0.70	0.05	0.10	2.21	0.02	2.19	0.08	99.66
2	sg02	砂岩	73.22	0.14	13.82	1.63	0.03	1.45	0.40	0.60	5.40	0.02	2.81	0.16	99.53
3	yt01	砂岩	80.75	0.26	6.72	1.18	0.04	0.40	3.89	1.25	1.61	0.02	3.97	0.12	100.10

注:全铁=FeO+Fe₂O₃;sg01和sg02为广东丹霞山早白垩世丹霞组地层样品;yt01为江西龙虎山晚白垩世赣州群丹霞地层样品;FeO的含量采用化学滴定法测定。

表 2 南方典型丹霞地层样品化学指标

Table 2 The Typical Danxia strata samples chemical indicators in southern China

样品号	样品类型	颜色	氧化还原指标	CIA 风化指数
sg01	粗砾岩	暗红色	10.13	0.75
sg02	粗砂岩	暗红色	10.19	0.65
yt01	粗砂岩	暗红色	9.83	0.53

注:氧化还原指标:TFe₂O₃/FeO;化学风化指标CIA= $\frac{[(Al_2O_3)/(Al_2O_3)+(CaO^*)+(Na_2O)+(K_2O)]}{[(Al_2O_3)+(CaO^*)+(Na_2O)+(K_2O)]} \times 100\%$,表达式中主成分均以摩尔分数表示,CaO*指硅酸盐中的CaO,即全岩中的CaO扣除掉化学沉积的CaO的摩尔分数,CIA实际反映了含铝硅酸盐矿物尤其是长石风化成粘土矿物的程度,CIA值越高,指示硅酸盐矿物中Na、K和Ca矿物从母岩中淋失越多,化学风化越强.由于实验过程中很难精确地分离纯化沉积物样品中的硅酸盐矿物,本文采用McLennan提出的校正方法,即根据自然界硅酸盐矿物中Na和Ca的平均组成,依据沉积物样品中的CaO/Na₂O的摩尔比值来计算CIA:如果比值>1,以Na₂O的摩尔含量代替CaO含量;而若比值<1,则直接以CaO摩尔含量来计算CIA.

内磁场随着Mn替代量的增加而减小;在研究土壤时,还发现Al对 α -Fe₂O₃的替代作用,研究结果显示,随着Al替代Fe的量增加,赤铁矿的内磁场随之减小(郑国东等,2008).另外,赤铁矿结晶颗粒的大小对内磁场也有影响,随着颗粒度减小,磁参数同样减小(Dyar,2006).在南方典型丹霞地层样品中,sg01及yt01样品均表现对称的六线谱特征,指示这两个样品中含有铁氧化物.从南方典型丹霞sg01、yt01的穆谱内磁场参数看,sg01和yt01的磁参数分别为45.3±0.14和50.39±0.24,与常温下标准赤铁矿(51.32)存在小范围偏差,推测赤铁矿中的铁可能被Mn和Al部分替代.该结果与XRF分析显示地层中存在高的Mn和Al含量相一致.

(3)粘土是由层状硅氧四面体和铝氧八面体组成的微晶硅酸盐(也有少数是链状硅酸盐),并夹有少量氢化物,氢氧化物,有机物,微生物等杂质.铁以两种状态存在于粘土之中:一种是粒度为100A数量级的氧化物或羟化物微粒,后者在室温谱中显示超顺磁性Fe³⁺双峰.另一种是结合在硅氧四面

体和铝氧八面体晶格中的结构铁(Fe²⁺,Fe³⁺),它们各自表现为顺磁性双峰.超顺磁性Fe³⁺和顺磁性Fe³⁺双峰在室温中重叠,不能区分,但在低温穆谱中,因超顺磁性颗粒磁矩被冻结,超顺磁性双峰消失,显示为磁性六线峰.因此,低温穆谱中的顺磁峰全部来自结构铁.结构铁及超顺磁性Fe³⁺的相对含量,Fe的氧化状态及配位情况,可从室温谱与低温谱的中央峰相对强度比较中得出.一般来说,对于单线吸收峰,其共有特征是四极分裂值较小而形成单峰型穆斯堡尔谱(郭海棠等,2014).对于双线吸收峰,四极分裂值较大的双峰一般被认为是粘土矿物或与有机质结合的顺磁性低价铁(para-Fe²⁺);四极分裂值较小的一般被认为是粘土矿物或氢氧化物中的顺磁性高价铁(para-Fe³⁺)(马向贤等,2014).对于六线吸收峰,它是由于铁磁性矿物中的Fe³⁺(magnet-Fe³⁺)所引起的,引起这种穆斯堡尔谱的可能是磁赤铁矿或针铁矿.南方典型丹霞地层样品的穆斯堡尔谱中,sg01、yt01既有双线吸收峰,又有六线吸收峰(图3),发生磁超精细分裂,双线吸收峰证明广东丹霞山与江西龙虎山的样品中存在粘土铁,其中存在四极分裂值较大与四极分裂值较小的双峰,表明样品中存在顺磁性低价铁与顺磁性高价铁.六线吸收峰的存在证明样品中含有赤铁矿.存在含铁矿物主要是层状硅酸盐的粘土矿物,其具有六方网层,按网层类型可将粘土矿物划分为1:1层和2:1层两类.

(4)样品中各类Fe化学种的相对含量由各自所占吸收峰的面积比例的参数计算来确定(应用Win-Noroms-for-Igor软件拟合),以百分比表示(表3).暗红色砾岩(sg01)和暗红色粗砂岩(yt01)的铁化学种为粘土铁和氧化物铁.sg01中clay-Fe²⁺含量是9.0%,clay-Fe³⁺含量为49.7%,oxides-Fe³⁺含量是41.3%.yt01中clay-Fe²⁺(I)含量是8.1%,clay-Fe³⁺含量为47.6%,oxides-Fe³⁺含量是44.3%.sg01中clay-Fe²⁺、clay-Fe³⁺的含量皆大于yt01中两种离子

表 3 南方典型丹霞地层样品穆斯堡尔谱拟合参数结果及铁的赋存状态

Table 3 The result of fitting parameters of Mossbauer spectrum and the occurrence state of iron in typical Danxia formation samples in southern China

样品号	化学种	相对含量 (%)	IS(mm/s)	QS(mm/s)	HW(mm/s)	H/T
sg01	clay-Fe ²⁺	9.00±0.21	1.079±0.005	2.217±0.010	0.099±0.003	
	clay-Fe ³⁺	49.70±0.29	0.292±0.003	0.754±0.005	0.099±0.003	
	oxides-Fe ³⁺	41.30±0.32	0.361±0.001	-0.095±0.001	0.099±0.003	45.3±0.14
yt01	clay-Fe ²⁺	8.10±0.38	1.337±0.008	2.039±0.002	0.169±0.006	
	clay-Fe ³⁺	47.60±0.50	0.296±0.003	0.676±0.006	0.169±0.006	
	oxides-Fe ³⁺	44.30±0.54	0.351±0.005	-0.102±0.001	0.169±0.006	50.39±0.24

的含量,sg01中 oxides-Fe³⁺的含量比 yt01 的小.两种样品中 clay-Fe³⁺与 oxides-Fe³⁺的含量较高,都超过了 40%,其中 clay-Fe³⁺的含量大于 oxides-Fe³⁺的含量.

总体来看,广东丹霞山及江西龙虎山丹霞地层的铁赋存状态主要为粘土铁及氧化物铁,但是它们表现出很高的 Fe³⁺/Fe_{total} (91%)和较高的 oxides-Fe³⁺ (41.3%和 44.3%).样品中高价铁的大量存在,指示了沉积环境为氧化条件,与 XRF 主量元素分析结果一致.

3 讨论

颜色是岩石简单而直接可见的标志之一.地质学家喜欢用颜色来描述岩石,甚至在他们的研究和实地调查中区分矿物成分.岩石的红色是丹霞地貌命名的主要原则之一,因此,岩石颜色的特征及其成因机制具有重要的科学意义.

3.1 丹霞地层的化学成分

从 XRD 谱图中可以分析出,广东丹霞山及江西龙虎山丹霞地层的样品,显示主要的矿物组成是石英(SiO₂)与长石(如 KAISi₃O₈),含有少量的粘土(如高岭石)及铁氧化物,固结程度高,部分层位中含有砾石.铁氧化物的特征衍射峰在 27.94°、28.03°、29.46°、54.91°位置出现,两个样品中都存在铁氧化物、粘土类矿物,虽然 XRD 难以检测到极细粒的包裹体,但这些衍射峰证实了晶质赤铁矿的存在(Jiang *et al.*, 2019).XRF 数据显示 T_{Fe203}含量仅 0.81%~1.63%,但穆斯堡尔谱揭示 91%的铁以 Fe³⁺形式存在,其中 41.3%~44.3%为赤铁矿(oxides-Fe³⁺).这种“高铁高红”现象源于纳米级赤铁矿包膜在颗粒表面的选择性富集.Zheng *et al.*(2004)认为“赤铁矿即使微量(如 T_{Fe203}<2%)仍可通过表面覆盖效应引发强烈红色”,本研究通过穆谱内磁

场参数(45.3~50.4 T)进一步证实赤铁矿包膜的存在,其显色效率比均匀分散的铁氧化物高 1~2 个数量级(Liu *et al.*, 2020).高 Fe³⁺/Fe_{total}比值(91%)与低 FeO 含量(0.08%~0.16%)指示强氧化环境,与 Zheng *et al.*(2004)提出的“干旱—浅水沉积模式”相符.吐鲁番盆地红色岩层中赤铁矿与顺磁 Fe³⁺的共生关系在本研究样品中同样显著(clay-Fe³⁺占比 47.6%~49.7%),反映两者均形成于类似的高氧分压条件.值得注意的是,Zheng *et al.*(2004)发现的“有机质或绿泥石会抑制赤铁矿显色”现象在本研究未出现,可能与南方丹霞地层更低的有机质含量(LOI 仅 2.19%~3.97%)有关.南方丹霞地层的这种 Fe³⁺富集的现象可能源于以下过程:

(1)原生氧化膜形成:沉积期铁质碎屑(如磁铁矿或硅酸铁)在富氧水体中表面生成非晶态 Fe(OH)₃氧化膜,后期脱水转化为赤铁矿.

(2)次生氧化胶结:成岩过程中,Fe²⁺通过孔隙水迁移至氧化界面,形成次生铁氧化物胶膜胶结砂粒(Zhou *et al.*, 2022).

低 FeO 含量(<0.2%)表明地层经历长期氧化环境,这与丹霞红层典型的干旱—半干旱沉积背景相符.此外,Al₂O₃与 SiO₂的高含量(分别达 XRF 数据的次要峰值)可能促进铁氧化膜的稳定性:Al³⁺通过类质同象替代进入赤铁矿晶格(如 Al-赤铁矿固溶体),抑制其向磁铁矿还原(Dang *et al.*, 2018).

将 XRD 和 XRF 以及穆斯堡尔谱数据相结合,可构建一个完整的成因模型来解释“高铁高红”的现象.物源区提供了富含石英、长石和少量含铁矿物的沉积物,在埋藏成岩的过程中,含铁硅酸盐矿物和氧化物在孔隙水的作用下变得不稳定,铁被活化溶解,以 Fe²⁺的形式在岩石孔隙中短距离迁移.随着地壳抬升,岩石进入氧化环境.含 Fe²⁺的孔隙水遇到富氧水,Fe²⁺被氧化为不溶的 Fe³⁺.Fe³⁺首先

形成铁氧化物的纳米颗粒,这些纳米颗粒具有极高的表面能,优先吸附和沉淀在碎屑颗粒的表面,以及粘土矿物的表面和层间,形成极薄的赤铁矿包膜。

3.2 地层中铁的赋存状态

前人关于丹霞地层铁赋存状态的研究较少。穆斯堡尔谱凭借其高分辨率和抗干扰能力,在含铁矿物精细结构解析中具有独特优势,可定量测定铁价态($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$)、占位(四面体/八面体)及替代效应(如 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 替代 Fe^{3+}) (Gütlich *et al.*, 2011)。通过对南方典型丹霞地层样品的穆斯堡尔谱图及拟合参数进行分析,发现样品 sg01 和 yt01 同时存在双线吸收峰和六线吸收峰。六线吸收峰对应于磁有序相的赤铁矿($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)中的 Fe^{3+} ,是丹霞红层颜色的直接贡献者;而双线吸收峰则来源于粘土矿物结构中的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} (顺磁性相)。谱图显示这两个样品均具有对称的六线谱,证实了赤铁矿的存在。值得注意的是,样品中赤铁矿的超精细场参数($B_{\text{hf}}=45.3\sim 50.4\text{ T}$)略低于标准赤铁矿(51.3 T),这种现象可能由以下原因导致:(1)赤铁矿中 Fe^{3+} 被 Al^{3+} 或 Mn^{2+} 以类质同象形式替代(Dang *et al.*, 2018);(2)赤铁矿处于纳米尺度,颗粒尺寸效应导致磁有序度降低(Jiang *et al.*, 2019);(3)表面羟基化或非晶化趋势进一步影响其磁结构(Michel *et al.*, 2010)。双线吸收峰证实样品中存在粘土矿物中的铁,其中四极分裂值较大的双峰归属于顺磁性 Fe^{2+} ($\delta\approx 1.1\text{ mm/s}$, $\Delta\text{EQ}\approx 2.5\text{ mm/s}$),而值较小的双峰则对应顺磁性 Fe^{3+} ($\delta\approx 0.4\text{ mm/s}$, $\Delta\text{EQ}\approx 0.7\text{ mm/s}$),反映局部可能存在还原微环境(Liu *et al.*, 2020)。尽管如此, $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$ 比值高达 91%,且氧化物相 Fe^{3+} 占比超过 40%,明确指示地层整体处于强氧化环境, Fe^{2+} 已充分氧化。高铁价态铁的特征与铁氧化膜在中性-碱性环境下 $\gamma\text{-FeOOH}$ 向 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 转化的稳定性高度吻合。广东丹霞山与江西龙虎山的丹霞地层中铁的赋存状态以粘土铁和氧化物铁为主,且表现出极高的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$ (91%) 和较高比例的 oxides- Fe^{3+} (41.3% 和 44.3%),表明绝大部分铁最终富集并形成显色的赤铁矿膜。尽管 XRF 结果显示全铁含量(TFe_2O_3)仅为 0.81%~1.63%,地层却呈现异常鲜艳的赤红色调,其原因在于约 90% 的铁以纳米赤铁矿膜形式直接包裹石英和长石颗粒。这种空间分布显著增强了铁的显色效率。铁的赋存形态与分布方式是显色机制的关键:穆斯堡尔谱分析证实 91% 的铁以 Fe^{3+} 形式存在,其中 41%~44% 富集为纳米赤

铁矿膜,凭借其超高比表面积实现“微量广覆”的显色效果。本研究选用穆斯堡尔谱技术对粉末样品进行快速、统计性较强的铁价态与整体分布评估,虽未采用透射电镜等技术进行表面微区分析,但为该方向的后续微观研究奠定了坚实基础并指明了方向。通过透射电镜可进一步观察氧化膜的厚度、结构、分布及元素组成,尤其是 Fe 和 O 的富集与其他元素的流失,从而为“氧化成因”提供更直接的化学证据。

4 结论

本研究通过对广东丹霞山与江西龙虎山典型丹霞地层的系统分析,得出以下结论:

(1)丹霞地层岩性以砾岩和砂岩为主,矿物组成以石英、长石为核心,含少量粘土及铁氧化物(主要为赤铁矿)。地层中 TFe_2O_3 含量仅 0.81%~1.63%,但通过高效的表面富集机制,纳米级赤铁矿包膜覆盖石英与长石颗粒,形成显著红色调,支撑“高铁高红”的表生地球化学模型。此外,高铁价态($\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$)及低 FeO 含量(0.08%~0.16%)反映强氧化沉积环境,与丹霞红层干旱一半干旱成因背景一致。

(2)穆斯堡尔谱揭示铁以粘土铁和氧化物铁为主, Fe^{3+} 占比高达 91%。结合光学显微镜下观察结果,丹霞地貌的红色主要源于沉积物胶结物中赤铁矿膜对石英、长石等矿物颗粒的包裹作用,形成典型的“红眼圈”结构,而与沉积物颗粒本身的矿物组成及元素含量无直接因果关系。沉积环境及后期风化作用也对丹霞地貌的外观颜色产生一定影响。总体来看,赤铁矿膜包裹作用是导致丹霞地层呈现红色的主导机制。

本研究首次通过多技术联用(XRD-XRF-穆斯堡尔谱)定量解析丹霞红的铁赋存状态,为地貌色彩成因研究提供新范式。未来可结合透射电镜技术深化纳米氧化膜微观结构分析,进一步验证表面铁膜的主导作用。

References

- An, L. H., Y. L., H. D., et al., 2019. Photoelectric Conversion on Earth's Surface via Widespread Fe- and Mn-Mineral Coatings. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(20): 9741–9746. <https://doi.org/10.1073/pnas.1902473116>

- Cai, T. S., 2017. Research of the Particularity of Danxia Landform's Development Stage in Southern China(Dissertation). Nanjing University, Nanjing(in Chinese with English abstract).
- Chen, H. X., 2009. Research of Paleoenvironment and Paleoclimate of Cretaceous in Ya'an Area of Western Sichuan Basin(Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Chen, L. Q., Li, P. C., Guo, F. S., et al., 2019. Facies Analysis and Paleoclimate Implications of the Late Cretaceous Danxia Formation in the Danxia Basin, Northern Guangdong Province, South China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37(1): 17–29(in Chinese with English abstract).
- Dang, M.Z., et al., 2018. Substitution of Al for Fe in Hematite: A Mössbauer Study. *American Mineralogist*, 103(5): 799–806.
- Ding, H. W., Wang, S. Y., Yin, Z., et al., 2014. Geologic Origins of Danxia and Colorful Hills of Zhangye and Comparison with Danxia Landform in Southern China. *Arid Land Geography*, 37(3): 419–428(in Chinese with English abstract).
- Dyar, M. D., Agresti, D. G., Schaefer, M. W., et al., 2006. Mössbauer Spectroscopy of Earth and Planetary Materials. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34: 83–125. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125049>
- Fu, Q., Zhang, G. F., Zhang, K., et al., 2025. Quantitative Representation and Influencing Factors to Landscape Maturity of Danxia Landscape: a Case Study in Mount Danxiashan, Guangdong Province. *Earth Science*, 50(2): 782–797(in Chinese with English abstract).
- Guo, F. S., Chen, L. Q., Yan, Z. B., et al., 2020. Definition, Classification, and Danxianization of Danxia Landscapes. *Acta Geologica Sinica*, 94(2): 361–374(in Chinese with English abstract).
- Guo, F. S., Jiang, Y. B., Hu, Z. H., et al., 2011. Evolution and Genesis System Features of Danxia Landform in Longhushan World Geopark. *Journal of Mountain Science*, 29(2): 195–201(in Chinese with English abstract).
- Guo, H. T., Xu, Y. X., Qin, K. Z., 2014. Mossbauer Spectra Characteristics of Eight Sulfate Minerals in Oxidation Zone of Hongshan Hs-Epithermal Cu-Au Deposit, Eastern Tianshan, NW China, and Their Geological Significance. *Geology and Exploration*, 50(3): 486–493(in Chinese with English abstract).
- Gütlich, P., et al., 2011. Mössbauer Spectroscopy: Applications in Chemistry, Biology, and Nanotechnology. Wiley, Hoboken.
- Huang, J., Chen, Z. J., Qi, D. L., 2015. Study on Distribution of Danxia Landform in China(First). *Mountain Research*, 33(4): 385–396(in Chinese with English abstract).
- Ji, J. P., 2017. Controlling Factors of Color Change in Zhangye Colored Hills and Its Paleoclimatic Significance(Dissertation). Fujian Normal University, Fuzhou(in Chinese with English abstract).
- Jiang, F. W., Liu, F. J., Huang, B. H., 2017. Characteristics of Geological Disasters of Danxia Landform in Longhushan World Geopark. *Journal of East China University of Technology (Social Science)*, 36(2): 121–125(in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y. B., Guo, F. S., Li, G. R., et al., 2024. Study on the Evolution of Danxia Landform in Jiangxi Province and Its Structural Factors. *Geological Review*, 70(1): 44–58(in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z., et al., 2019. Surface Modification-Induced Bhf Reduction in Nanoscale Hematite. *Geochemical Transactions*, 20(1):1–10.
- Liu, F. J., 2020. Sedimentary Environment and Geomorphologic Evolution of Danxia Landscape Layer from Danxiashan, Guangdong Province(Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Liu, Q., et al., 2020. Iron Speciation in Clay Minerals by Mössbauer Spectroscopy. *Clays and Clay Minerals*, 68(2), 102–115.
- Ma, X. X., Wang, H. L., Zhang, Z. W., et al., 2014. Distribution Characteristics of Iron Species in Three Faults along the Eastern Margin of the Tibetan Plateau, China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(3): 348–354(in Chinese with English abstract).
- Michel, F. M., Ehm, L., Antao, S. M., et al., 2010. The Structure of Ferrihydrite, a Nanocrystalline Material. *ChemInform*, 38(40): 200740005. <https://doi.org/10.1002/chin.200740005>
- Peng, H., 2000. A Survey of the Danxia Landform Research in China. *Scientia Geographica Sinica*, 20(3): 203–211(in Chinese with English abstract).
- Peng, H., 2020. The Basic Questions on Danxia Landform. *China Danxia*. Springer, Singapore, 3–21. https://doi.org/10.1007/978-981-13-5959-0_1
- Peng, H., 2002. Research on the Formation Mechanism of Danxia Landform. *Journal of Sun Yat sen University (Natural Science Edition)*, 41(3): 87–91.
- Rancourt, D. G., Ping, J. Y., 1991. Voigt-Based Methods for Arbitrary-Shape Static Hyperfine Parameter Distributions in Mössbauer Spectroscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions*

- with Materials and Atoms*, 58(1): 85–97. [https://doi.org/10.1016/0168-583x\(91\)95681-3](https://doi.org/10.1016/0168-583x(91)95681-3)
- Shi, Y. X., 2023. Sedimentary Characteristics and Geochemistry of Late Cretaceous Red Beds in Danxia Basin(Dissertation). East China Institute of Technology, Fuzhou(in Chinese with English abstract).
- Shu, L., Faure, M., Wang, B., Zhou, X., et al., 2019. Cretaceous Tectonic Evolution of South China: A Preliminary Synthesis. *Earth-Science Reviews*, 196:102872.
- Song, C. H., Bai, J. F., Zhao, Y. D., et al., 2005. The Color of Lacustrine Sediments Recorded Climatic Changes from 13 to 4.5 Myr in Linxia Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(3): 507–513(in Chinese with English abstract).
- Wang, J. M., Yan, B. H., Wu, S., et al., 2012. Climate Changes Recorded by Colors of the Miocene Sediments in Northeast Qaidam Basin. *Gansu Geology*, 21(1): 6–11(in Chinese with English abstract).
- Wang, Q. X., Ping, X. Q., Zheng, J. P., et al., 2023. Mineral Ferric Iron Contents of Peridotite Xenoliths by M² ssbauer Spectroscopy: Oxygen Fugacity Applications. *Earth Science*, 48(3): 1217–1231(in Chinese with English abstract).
- Wang, S. J., Zeng, F. G., Huang, X. Z., et al., 1998. The Mossbauer Effect of Clay Minerals in Oil Basin and Its Application: Taking Tertiary System of Qaidam Basin as an Example. *Acta Sedimentologica Sinica*, 16(2): 109–112 (in Chinese with English abstract).
- Ye, Z. Y., Lu, J. B., Li, S. N., et al., 2021. Preliminary Discussion on Red Bed Hematite Genetic Mode in Danxia Basin, Northern Guangdong. *Coal Geology of China*, 33 (S1): 61–64(in Chinese with English abstract).
- Zhang, F. L., Yi, F., Chen, Y. L., et al., 1997. Determination of the Optimum Thickness of an Absorber in Mossbauer Spectroscopy. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, (3): 348–352(in Chinese with English abstract).
- Zheng, G. D., 2008. Iron Speciation by Mossbauer Spectroscopy and Its Implications in Various Studies on the Earth Surface Processes. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(2): 161–168(in Chinese with English abstract).
- Zheng, G. D., Fu, B. H., Duan, Y., et al., 2004. Iron Speciation Related to Color of Jurassic Sedimentary Rocks in Turpan Basin, Northwest China. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 261(2): 421–427. <https://doi.org/10.1023/B:JRNC.0000034880.20577.fb>
- Zhou, X. J., 2003. A Study on North-South Differences of the Danxia Landform Pattern and Its Tourism Values in China. *Journal of Mountain Research*, 21(2): 180–186(in Chinese with English abstract).
- Zhou, H., et al., 2022. Diagenetic Iron Oxide Cements in Red Beds. *Sedimentary Geology*, 428:106075.
- Zhu, Z. J., Huang, B. H., Guo, F. S., et al., 2012. Cretaceous Braided River Facies Sediments and Danxia Landform Development Characteristics in Longhushan World Geopark, Jiangxi. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(3): 379–387(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 蔡天赦, 2017. 中国南方丹霞地貌发育阶段特殊性研究(硕士学位论文). 南京: 南京大学.
- 陈海霞, 2009. 川西雅安地区白垩纪古环境古气候研究. 成都: 成都理工大学.
- 陈留勤, 李鹏程, 郭福生, 等, 2019. 粤北丹霞盆地晚白垩世丹霞组沉积相及古气候意义. 沉积学报, 37(1): 17–29.
- 丁宏伟, 王世宇, 尹政, 等, 2014. 张掖丹霞暨彩色丘陵地质成因及与南方丹霞地貌之对比. 干旱区地理, 37(3): 419–428.
- 傅强, 章桂芳, 张珂, 等, 2025. 丹霞地貌发育程度的定量指示及影响因素: 以广东丹霞山为例. 地球科学, 50(2): 782–797.
- 郭福生, 陈留勤, 严兆彬, 等, 2020. 丹霞地貌定义、分类及丹霞作用研究. 地质学报, 94(2): 361–374.
- 郭福生, 姜勇彪, 胡中华, 等, 2014. 龙虎山世界地质公园丹霞地貌成景系统特征及其演化. 山地学报, 29(2): 195–201.
- 郭海棠, 许英霞, 秦克章, 2014. 东疆红山 Cu-Au 矿床氧化带硫酸盐矿物穆斯堡尔谱特征及其意义. 地质与勘探, 50(3): 486–493.
- 黄进, 陈致均, 齐德利, 2015. 中国丹霞地貌分布(上). 山地学报, 33(4): 385–396.
- 吉金平, 2017. 张掖彩色丘陵颜色变化的控制因素及其古气候意义(硕士学位论文). 福州: 福建师范大学.
- 姜伏伟, 刘富军, 黄宝华, 2017. 龙虎山世界地质公园丹霞地貌地质灾害特征研究. 东华理工大学学报(社会科学版), 36(2): 121–125.
- 姜勇彪, 郭福生, 黎广荣, 等, 2024. 江西丹霞地貌演化阶段与分布及其构造控制探讨. 地质论评, 70(1): 44–58.
- 刘富军, 2020. 广东丹霞山丹霞地貌成景地层沉积环境与地貌演化(博士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 马向贤, 王华林, 张志武, 等, 2014. 青藏高原东缘 3 条断裂带断层泥铁元素化学种的分布特征. 矿物岩石地球化学通报, 33(3): 348–354.
- 彭华, 2000. 中国丹霞地貌研究进展. 地理科学, 20(3): 203–211.
- 彭华, 2002. 丹霞地貌形成机制研究. 中山大学学报(自然科学版), 41(3): 87–91.
- 史月欣, 2023. 丹霞盆地晚白垩世红层沉积特征及地球化学研究(硕士学位论文). 东华理工大学, 抚州.
- 宋春晖, 白晋锋, 赵彦德, 等, 2005. 临夏盆地 13~4.4Ma 湖相

沉积物颜色记录的气候变化探讨. 沉积学报, 23(3): 507—513.

王杰民, 闫宝华, 吴松, 等, 2012. 柴达木盆地东北部中新世沉积物色度记录的气候变化. 甘肃地质, 21(1): 6—11.

王秋霞, 平先权, 郑建平, 等, 2023. 穆斯堡尔光谱仪在揭示地幔氧逸度研究中的应用. 地球科学, 48(3): 1217—1231.

王随继, 曾凡刚, 黄杏珍, 等, 1998. 含油气盆地中粘土矿物的穆斯堡尔效应及应用: 以柴达木盆地第三系为例. 沉积学报, 16(2): 109—112.

叶泽宇, 陆金波, 李世念, 等, 2021. 粤北丹霞盆地红层赤铁矿成因模式初步探讨. 中国煤炭地质, 33(S1): 61—64.

张富良, 易凡, 陈义龙, 等, 1997. 穆斯堡尔谱学中样品最佳厚度的确定. 武汉大学学报(自然科学版), (3): 348—352.

郑国东, 2008. 基于穆斯堡尔谱技术的铁化学种及其在相关表生地球科学研究中的应用. 矿物岩石地球化学通报, 27(2): 161—168.

周学军, 2003. 中国丹霞地貌的南北差异及其旅游价值. 山地学报, 21(2): 180—186.

朱志军, 黄宝华, 郭福生, 等, 2012. 江西龙虎山世界地质公园白垩系辫状河相沉积及其丹霞地貌发育特征. 地球学报, 33(3): 379—387.

《地球科学》

2026年3月 第51卷 第3期 要目预告

深部矿产三维智能预测理论、方法与挑战	毛先成等
矿产预测大模型师	路 易等
岩浆热液矿床成矿过程数值模拟与成矿预测	袁 峰等
基于地学大数据和人工智能的多层次矿产预测数据构建	张振杰等
基于多尺度特征融合和深度可分离卷积的生成对抗网络地质建模方法	刘小波等
融合多点地质统计与Transformer的分层自回归储层表征框架	陈麒玉等
基于简单几何模型的斑岩成矿多场耦合数值模拟	胡训宇等
大语言模型赋能的地质找矿知识图谱与问答模型构建	张宝一等
基于 Vision Transformer 的深部隐伏矿体三维成矿预测方法研究	吴以婕等