

DOI: 10.20152/j.np.202506300049

丁奕, 蒋顺兴, 汤建荣, 汪筱林. 武夷山国家公园白垩系崇安组红层中遗迹化石的首次发现. 国家公园(中英文), 2025, 3(10): 649-656.

Ding Y, Jiang S X, Tang J R, Wang X L. First discovery of trace fossils in the red beds of the cretaceous Chong'an Formation in Wuyishan National Park. National Park, 2025, 3(10): 649-656.

武夷山国家公园白垩系崇安组红层中遗迹化石的首次发现

丁奕¹, 蒋顺兴^{2,*}, 汤建荣³, 汪筱林^{2,4}

1 渭南师范学院环境与生命科学学院, 渭南 714099

2 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044

3 福建省地质调查研究院, 福州 350013

4 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

摘要: 崇安组红层中化石稀少, 仅少量孢粉化石被发现报道。武夷山国家公园范围内也没有任何古生物化石的报道。首次对福建武夷山国家公园大王峰崇安组内遗迹化石进行了描述报道, 发现遗迹化石 4 属 4 种, 包括: *Arenicolites* isp. (似沙蠋迹未定种)、*Cochlichnus* isp. (螺丝迹未定种)、*Skolithos* isp. (石针迹未定种) 及 *Planolites beverleyensis* (贝弗利漫游迹)。遗迹化石群落以层面发育大量 *Skolithos* 与 *Arenicolites* 为特征, 可归入 *Skolithos-Arenicolites* 遗迹组合, 指示崇安组可能为水动力条件较强的河流沙坝或分流河道环境。同时, 由于遗迹化石丰度较高但分异度较低, 属于机会种分子, 反映在晚白垩世早期, 造迹生物处于高压环境之中。大王峰崇安组遗迹化石的研究不仅为崇安组古环境的重建补充了重要的遗迹学证据, 也为武夷山国家公园增加了更为丰富的古生物学自然遗迹。

关键词: 崇安组; 红层; 武夷山; 遗迹化石

First discovery of trace fossils in the red beds of the cretaceous Chong'an Formation in Wuyishan National Park

DING Yi¹, JIANG Shunxing^{2,*}, TANG Jianrong³, WANG Xiaolin^{2,4}

1 College of Environment and Life Sciences, Weinan Normal University, Weinan 714099, China

2 Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China

3 Fujian Institute of Geological Survey, Fuzhou 350013, China

4 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The Cretaceous red beds serve as the foundational geological structure shaping the spectacular Danxia landforms, which define the impressive landscape of Wuyishan National Park. However, due to the lithological characteristics of these deposits, the fossil records within the Late Cretaceous Chong'an Formation red beds have traditionally been exceptionally sparse and poorly documented. Previous studies have only provided limited information on sporopollen fossils (palynomorphs) and lacked confirmed fossil records specifically within the Wuyishan National Park. This study offers the first comprehensive and systematic description of a significant ichnofauna found within the Chong'an Formation red beds at Dawang Peak, located in Wuyishan National Park, Fujian Province. Through detailed analysis, four distinct ichnospecies were identified within four ichnogenera: *Arenicolites* isp., *Cochlichnus* isp., *Skolithos* isp., and *Planolites beverleyensis*. This

基金项目: 科技部重点研发计划(2022YFF1301403); 福建省地质勘查专项资金项目(GY20240101); 国家自然科学基金(42002004); 陕西省科技厅一般项目(2025JC-YBQN-355)

收稿日期: 2025-06-30; **采用日期:** 2025-09-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiangshunxing@ivpp.ac.cn

assemblage of trace fossils is mainly characterized by two primary types densely appearing on the bedding planes: vertically to subvertically oriented tubular burrows attributed to *Skolithos* and distinctive U-shaped burrows assigned to *Arenicolites*. Based on its composition, the assemblage can be formally classified as part of the *Skolithos-Arenicolites* ichnoassemblage. This ichnoassemblage provides crucial diagnostic evidence, indicating that the Chong'an Formation was deposited in a high-energy hydrodynamic environment, specifically as active fluvial sand bars or dynamic distributary channels in a continental river system. Furthermore, this ichnoassemblage exhibits an ecological pattern of "high abundance and low diversity". The trace makers are interpreted as typical opportunistic (r-selected) species, reflecting that benthic organisms in the study area during the early Late Cretaceous epoch likely existed under sustained high environmental stress. Potential stressors driving this adaptation may include periodic droughts and frequent disruptive flooding events. The significance of this research is multifaceted: 1) filling a critical gap in the previously non-existent fossil records for the Chong'an Formation and Wuyishan National Park; 2) providing essential ichnological evidence that enables a refined reconstruction of the specific sedimentary environments associated with these regional red beds; 3) enriching the recognized paleontological natural heritage value of Wuyishan National Park, a UNESCO World Natural Heritage site. Finally, the findings offer novel scientific insights crucial for understanding the complex paleogeographic configuration of the South China continental margin, the patterns of paleoclimatic changes, and the impacts of these large-scale environmental factors on terrestrial and aquatic biological communities during the early Late Cretaceous period.

Key Words: Chong'an Formation; red bed; Wuyi Mountain; ichnofossil

“红层”是地质历史时期广泛沉积的由偏红色调的砾岩、砂岩、泥岩等碎屑岩构成的沉积物^[1]。我国红层多形成于白垩纪,白垩纪红层出露面积超过 82 万 km²,占红层总面积约 80%^[2-3]。我国东南地区白垩纪红层发育广泛,且地层厚度巨大,形成了极具特色、风光秀美的丹霞地貌。其中武夷山国家公园是世界著名丹霞地貌景区,白垩纪红层发育,具有丰富的景观生态价值。前人虽然对福建地区红层进行了大量研究,但由于红层岩性特殊,往往难以保存化石,红层的古生物学研究整体较少,且大多集中在孢粉与植物化石的研究^[4]。

武夷山国家公园位于福建省与江西省交界处的武夷山脉北段,总面积为 1280km²。其中,福建省域内面积 1001.41km²,占总面积的 78.2%。武夷山国家公园是世界自然和文化双遗产地,也是我国第一批正式成立的国家公园^[5]。武夷山国家公园囊括了国家级自然保护区、风景名胜区、国家森林公园等 5 种保护地类型。武夷山国家公园的自然遗迹以园区东部的丹霞地貌最具代表性,这一丹霞地貌主要由崇安组的碎屑岩沉积形成,属于我国东南地区广泛分布的晚白垩世“红层”。虽然,近年来在武夷山市周边地区发现了福建省的第一件恐龙化石,奇异福建龙(*Fujianvenator prodigiosus*)和最早的鸟类政和八闽鸟(*Baminornis zhenghensis*),在恐龙演化和鸟类起源方面做出了重要的贡献,但是这些发现都来自于上侏罗统的地层^[6-7],目前在景区范围内的晚白垩世地层中还没有确凿的古生物化石报道。

2023—2025 年期间对武夷山国家公园进行自然遗迹调研和关键区快速识别的过程中,在大王峰山腰(海拔约 400m)处崇安组红层中首次发现了数量丰富的遗迹化石。这些遗迹化石虽然丰度较高,但分异度很低,属于明显的机会种(r-Selected)分子。对崇安组红层中的遗迹化石组合进行了首次描记,并根据遗迹学证据探讨了研究区域崇安组沉积环境,不仅为崇安组红层的研究补充了重要的遗迹学证据,也为武夷山国家公园增添了更为丰富的古生物学自然遗迹。

1 地质背景

福建省内红层主要分布于政和—大埔断裂带以西,空间上呈北东向带状展布。依据空间分布、基底及构造特征,可将福建境内红层自西向东,分为三个条带:西带沿武夷山、泰宁、宁化一线分布;中带大致沿连城、上杭一线分布,主要分布于闽西南地区;东带则主要沿松溪、建瓯、沙县、永安一线分布。武夷山地质公园地处闽

赣交界武夷山脉北段,距武夷山市区南约 10km,位于西带(图 1)。遗迹化石点位发现于武夷山国家公园内大王峰半山腰处(图 1),大王峰位于武夷宫西侧,九曲溪口北岸,是进入武夷山的第一峰,海拔约 530m。大王峰主要由赤石群上部的崇安组构成,岩层倾向为近北西向,倾角为 20° — 30° ,岩性以紫红色厚—巨厚层状的砾岩、砂砾岩为主,夹厚—巨厚层状含砾砂岩及薄层状砂岩、粉砂岩,发育平行层理、中到大型的交错层理、冲刷—充填构造,反映了强水动力特征,可能是冲积扇—河流沉积^[8];下伏沙县组地层,岩性以紫红色含砾细砂岩为主,发育粉砂岩或砂砾岩夹层(图 1)。因缺乏可以测年的岩浆岩以及能够进行生物地层对比的古生物化石,所以关于不同盆地的崇安组时代还是存在一些分歧。梁诗经等^[4]通过与其相邻的泰宁龙安盆地发现的植物以及孢粉化石组合对比研究,认为崇安组为晚白垩世晚期,相当于康尼亚克期—马斯特里赫特期(Coniacian-Maastrichtian)。邢光福等^[9]对泰宁盆地风洞一带的崇安组底部火山岩开展 U-Pb 定年,获得了 (98.52 ± 0.96) Ma 的年龄,并推测盆地中崇安组的沉积年龄可能为早白垩世晚期。据 2023 年 9 月的《国际地层年代表》,早-晚白垩世的界线在 100.5Ma,所以泰宁盆地风洞一带的崇安组沉积年龄应该为晚白垩世早期。Li 等^[10]在泰宁金湖地区获得了两个沙县组的年龄,分别为 (101.1 ± 1.2) Ma 和 (97.3 ± 1.0) Ma,认为沙县组是从

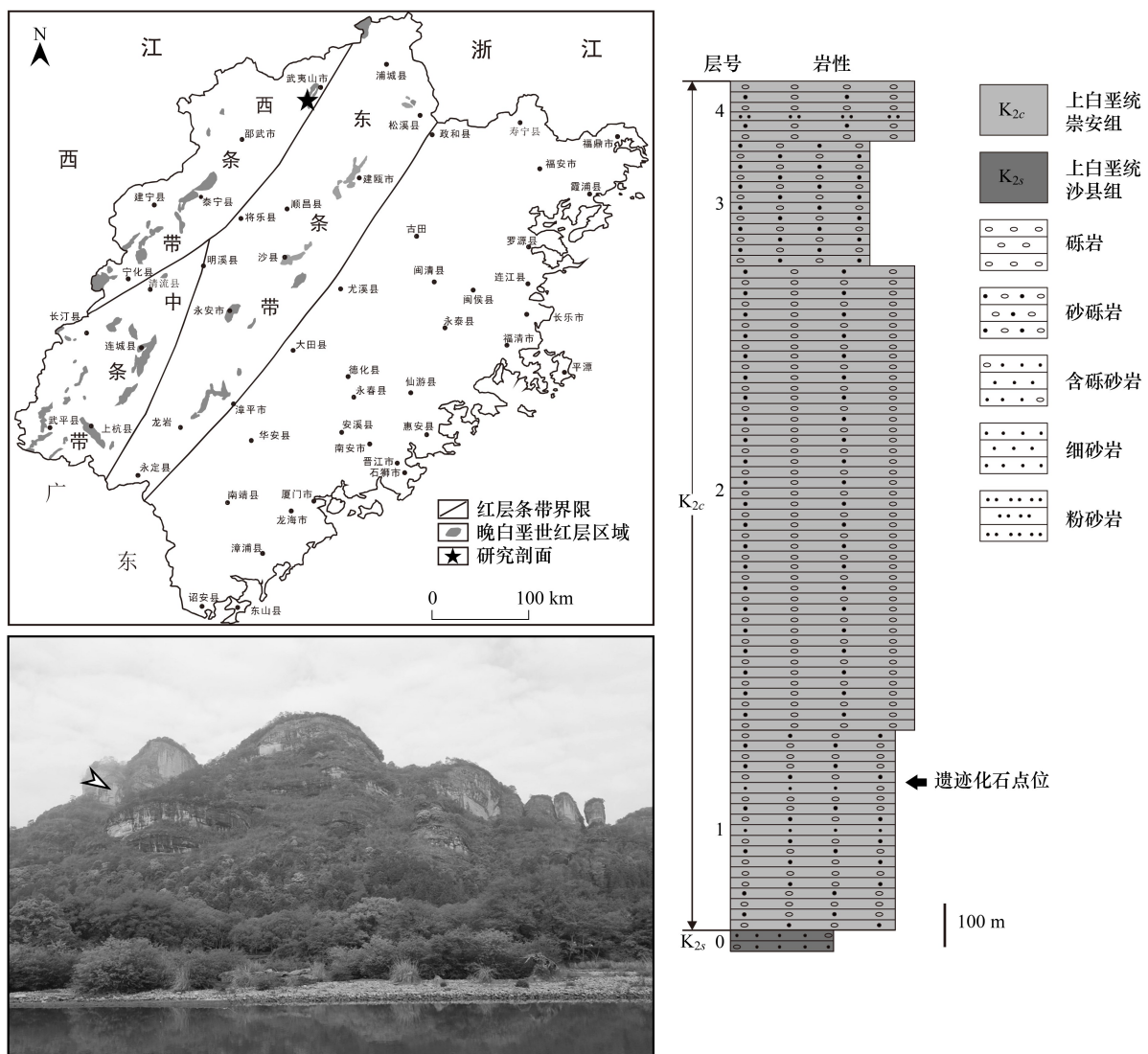


图 1 遗迹化石位置及地层岩性柱状图

Fig.1 Schematic map of the trace fossil location and stratigraphic lithology column chart

K_{2c}: 上白垩统崇安组; K_{2s}: 下白垩统沙县组

早白垩世晚期到晚白垩世早期。综上,崇安组的年龄开始于晚白垩世早期,延续时间可能不长。

2 结果

本文描述遗迹共 4 属 4 种,均为底生迹(hypichnia),产自崇安组厚层含砾砂岩下底面。由于研究剖面位于武夷山国家地质公园景区内,无法进行样品采集,因此所有遗迹化石均只拍照记录(图 2)。

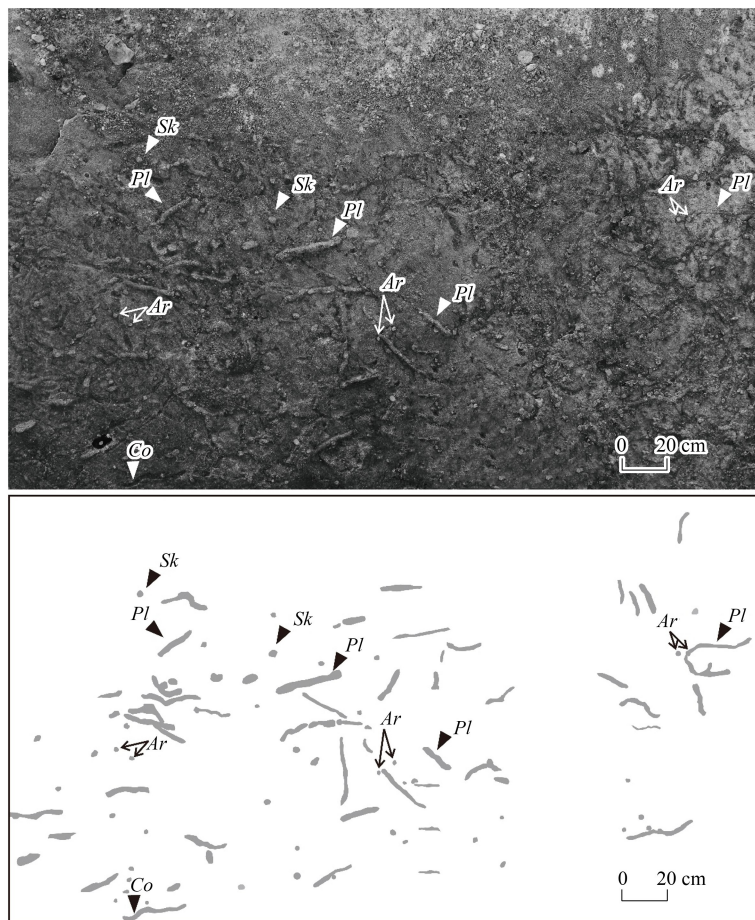


图 2 大王峰崇安组典型遗迹化石

Fig.2 Typical trace fossils of the Chong'an Formation at Dawang Peak

Ar: 似沙蠋迹未定种; Co: 螺丝迹未定种; Pl: 贝弗利漫游迹; Sk: 石针迹未定种

Arenicolites isp. (似沙蠋迹未定种) 为简单的无分枝“U”型潜穴, 未见蹼状及衬里构造, 垂直或略斜交于层面分布。在岩层表面, 潜穴横切面常形成成对出现的近圆形开口, 两开口间距 1.5—6.0cm, 潜穴直径 1.0—1.5cm。

Arenicolites Salter, 1857, 与 *Rhizocorallium* Zenker, 1836 形态特征相似, 均为“U”形潜穴。区别是 *Rhizocorallium* 与层面平行, 且发育蹼状构造。 *Diplocraterion* Torell, 1870 虽然同样是垂直层面的“U”形潜穴, 但也具有蹼状构造。 *Bifungites* Desio, 1940 有时也可形成成对出现的地层凸起^[11], 但其开口通常具有哑铃形或箭头形膨胀的顶端。本文所描述标本两开口均为近圆形, 且之间未见蹼状构造, 所以归入 *Arenicolites*, 但由于本文描述遗迹仅可观察到层面开口形态, 纵切面形态特征难以观察, 因此鉴定为 *Arenicolites* isp.。*Arenicolites* 最初由 Salter^[12] 根据英格兰地区石炭纪砂岩中的标本建立, 通常认为是蠕虫类环节动物或小型甲壳动物建造的居住潜穴^[13], 常见于潮坪环境, 在非海相地层中也广泛发育^[14—15]。

Cochlichnus isp. (螺丝迹未定种) 表面光滑, 左右摆动呈较规则的波状或蛇曲线状, 不分枝, 平行层面分

布,保存为下底面凹陷,在层面上形成近“S”型的正弦状曲线。遗迹宽度基本保持一致,弯曲轻微,直径约 1.2cm,长度超过 13.0cm。

Cochlichnus Hitchcock, 1858 与 *Belorhaphe* Fuchs, 1895 及 *Helminthopsis* Heer, 1877 均为蛇曲状遗迹,形态相似。但 *Cochlichnus* 多呈正弦“S”型;*Belorhaphe* 可见锯齿状二级蛇曲;*Helminthopsis* 多为不规则蛇曲状^[16-17]。本文标本形态呈近“S”型,可归为 *Cochlichnus*。但由于该属标本仅发现一处,且并不完整,因此鉴定为 *Cochlichnus* isp.。*Cochlichnu* 常被当作是蠕虫类或昆虫幼虫的觅食构造,在各类海相(如:浅海、深海)与非海相环境(如洪积平原、河湖沉积)中均有分布^[18-19]。Chamberlain^[20]在现代湖泊边缘与洪积平原环境中发现线虫类造迹生物亦可形成类似波状遗迹。

Planolites beverleyensis(贝弗利漫游迹)为直或略微弯曲的水平管状潜穴,未见分枝,但偶见潜穴之间相互交叉,平行层面密集分布,宽约 1.2—2.0cm,长度可达 20.0cm 以上。潜穴表面光滑,充填物颜色与围岩相似,均呈紫红色,无衬里构造。

Planolites Nicholson, 1873 与 *Palaeophycus* Hall, 1847 均为水平管状潜穴,外形相似,但 *Planolites* 被认为是蠕形动物的觅食构造,潜穴为主动充填;而 *Palaeophycus* 一般认为是造迹生物建造的开放性居住潜穴,潜穴受重力作用形成被动充填^[21-22]。因此,*Planolites* 以不具衬里,及充填物颜色与围岩不同,而与 *Palaeophycus* 相区别^[23-24]。*Scoyenia* White, 1929 也是直或略微弯曲的不分枝细长潜穴,是陆相红层中常见的典型遗迹化石,但 *Scoyenia* 潜穴表面通常具有不规则的绳索状纹饰,内部发育蹼状回填构造^[17, 25]。本文描述标本虽然充填物颜色与围岩相似,但不具衬里结构与回填构造,且潜穴表面光滑,因此归入 *Planolites*。目前 *Planolites* 遗迹属共有 3 个常见遗迹种:*P. montanus*, *P. beverleyensis* 和 *P. annularius*(表 1)。本文描述遗迹以较大的体型(长度可达 20cm),与 *P. montanu* 相区分;以表面光滑,不具环状装饰与 *P. annularius* 相区分;因此鉴定为 *P. beverleyensis*。该遗迹种从寒武纪至第四纪均有记录^[26, 28],并广泛分布于海相及陆相的各类环境^[19, 29],在陆相环境中,其造迹生物可能为节肢动物^[30]。

表 1 常见 *Planolites* 遗迹种及特征(修改自杨式溥等^[16])

Table 1 Common ichnospecies and characteristics of *Planolites*

遗迹种 Ichnospecies	主要特征 Main Characteristics	参考文献 References
<i>Planolites montanus</i>	潜穴较小(直径通常小于 5mm),表面光滑,不分枝	[26]
<i>Planolites beverleyensis</i>	潜穴较大(直径通常 5—30mm,长度 2—24cm),直或略微弯曲,不分枝	[19]
<i>Planolites annularius</i>	潜穴表面具有环状装饰	[27]

Skolithos isp.(石针迹未定种)为垂直于层面的简单管状、针状潜穴,不分枝,表面光滑无饰。在沉积物中密集分布,且相互平行。在岩层表面可见圆形或卵圆形开口,开口凸出层面约 0.2cm,潜穴直径约 1.0—1.5cm,充填物颜色与围岩相似。

Skolithos Haldemann, 1840 是最早被定义的有效遗迹属种之一,研究历史悠久,该属目前共有 6 个常见遗迹种(表 2),分别是:*S. linearis*, *S. verticalis*, *S. magnus*, *S. ingens*, *S. annulatus* 以及 *S. bulbosus*^[32, 36]。本文所描述标本仅可见层面潜穴开口形态,故鉴定为 *Skolithos* isp.。*Skolithos* 是 *Skolithos* 遗迹相典型分子,主要分布于浅海高能环境^[37-38],但从陆相至深海的其他环境也广泛分布^[39-40]。*Skolithos* 一般被认为是食悬浮生物(如环节动物)建造的居住潜穴^[41],但随着 *Skolithos* 在各种环境中被相继发现,最新研究发现一些陆生甲壳动物或昆虫幼虫也可建造类似的垂直居住潜穴,可能是 *Skolithos* 的潜在造迹生物^[42]。

3 讨论

由于受到太平洋板块俯冲的影响,中生代晚期华南陆缘岩浆作用与构造活动强烈,整个地貌格局发生突变,古气候也随之发生巨大改变。早白垩世早期,华南板块沿海地区虽受到板块俯冲作用影响而渐隆升,但速率较低,岩性及地化数据显示此时气候以暖湿为主^[43]。早白垩世晚期,华南沿海地区受挤压作用快速隆升,

表 2 常见 *Skolithos* 遗迹种及特征(修改自杨式溥等^[16])

Table 2 Common ichnospecies and characteristics of *Skolithos*

遗迹种 Ichnospecies	主要特征 Main characteristics	参考文献 References
<i>Skolithos linearis</i>	垂直直立管状潜穴,表面光滑,常密集成群出现	[31]
<i>Skolithos verticalis</i>	锥形或柱形潜穴,直或略倾斜,较短小,常弯曲	[32]
<i>Skolithos magnus</i>	潜穴可稍微弯曲,长度较大,可达 20 cm	[17]
<i>Skolithos ingens</i>	潜穴呈垂直锥状,具潜穴壁及不规则膨胀	[33]
<i>Skolithos annulatus</i>	潜穴表面光滑,具横纹	[34]
<i>Skolithos bulbosus</i>	潜穴常有圆球或半球型膨胀结构	[35]

阻碍太平洋的暖湿气流^[44],并且,坂头组顶部岩性粒度出现明显增大,粗砂岩发育,同时沙县组底部岩性粒度也逐渐增大,整体体现出湖泊相向河流相的转变。沉积学证据及地化证据均指示在研究区域气候逐渐向干热转换^[1]。晚白垩世早期,华南沿海区域海岸山脉持续隆升,高度可达近 4000m^[45],持续阻挡太平洋的暖湿气流,使得华南东南缘长期处于干热气候,但季节性降水带来的极端天气可能会造成局部地区温湿气候的出现^[46]。同时,海岸山内部的山间盆地由于海拔较高,局部出现干冷气候,这一现象也得到了碳酸盐古温度计算及古生物学证据的支持^[47]。综上,华南沿海地区在白垩纪经历了湿润-干热-干热/干冷(极端天气)的转变过程,这一系列气候变化与白垩纪以来的全球温室气候,及白垩纪末生物多样性降低背景相一致。

本文所描述遗迹化石发育于晚白垩世早期崇安组内,崇安组内化石稀少,下伏沙县组中丰富的化石类型基本消失,仅一些裸子植物花粉(如:*Pinuspollenites*)及蕨类植物孢子(如:*Gleichenioidites*)被发现报道^[4]。因此,大王峰遗迹化石的发现为研究崇安组古环境补充了至关重要的遗迹学证据。胡斌和吴贤涛^[48]在研究川西峨眉山白垩纪夹关组陆相遗迹化石时,将遗迹群落划分出 *Scoyenia-Steinichnus-Rusophycus* 组合与 *Skolithos-Arenicolites* 组合,认为 *Skolithos-Arenicolites* 组合可能代表了高能量水道沙堤或近滨环境,并反映造迹生物当时处于一种经常干旱,周期性泛滥的河流环境。大王峰遗迹化石以层面发育大量 *Skolithos* 与 *Arenicolites* 为特征,因此可归入 *Skolithos-Arenicolites* 组合,反映崇安组可能形成于水动力条件较强的河流沙坝或分流河道环境,并指示出研究区域晚白垩世早期气候干燥。同时,崇安组内遗迹化石群落仅发育 4 属 4 种,以垂直潜穴为主,分异度较低;但丰度较高,属于机会种(r-Selected)分子^[49],表明在晚白垩世早期,由于研究区域气候干旱,且伴随极端气候发生,生物处于高压环境之中,只有少数造迹生物能够适应如此恶劣的生存环境,在沉积物内部或表面居住、觅食,形成数量众多的 *Skolithos*、*Arenicolites* 及 *Planolites*。综上,大王峰崇安组遗迹化石组合显示在晚白垩世早期,研究区域生物已处于高压环境中,这一结果也与地球化学、沉积学研究得出的结论相一致^[1,50]。

4 结论

福建地区崇安组红层中化石稀少,本文首次对武夷山大王峰山腰处崇安组中的遗迹化石进行了系统研究,识别出遗迹化石:*Arenicolite* isp.、*Planolites beverleyensis*、*Skolithos* isp.及 *Cochlichnus* isp.。遗迹化石群落以层面发育大量垂直潜穴 *Skolithos* 与 *Arenicolites* 为特征,属于 *Skolithos-Arenicolites* 组合,反映崇安组沉积环境可能为水动力条件较强的河流沙坝或分流河道环境。同时,崇安组遗迹化石呈高丰度、低分异度,属于机会种(r-Selected)分子,指示研究区域造迹生物当时可能处于干旱的高压生存环境中。值得注意的是,晚白垩世早期陆相生态环境便已出现持续恶化,这一现象是否也对白垩纪末期生物灭绝事件产生了积极的影响,依然有待进一步研究加以证实。本文不仅为研究崇安组古环境补充了至关重要的遗迹学证据,也为武夷山国家公园增添了更为丰富的古生物学自然遗迹。

致谢:中国科学院古脊椎与古人类研究所向龙、周红娇、毛锦坤、宋俊逸合作野外考察,武夷山国家公园福建管理局配合支持野外工作,西北大学燕莉协助绘制论文图件。

参考文献 (References):

- [1] 陈金牛, 毛学刚, 师永辉, 刘秀铭. 闽西晚白垩世红层的古环境探究. 地球物理学报, 2020, 63(4): 1553-1568.
- [2] 王成善, 胡修棉. 白垩纪世界与大洋红层. 地学前缘, 2005, 12(2): 11-21.
- [3] 张显球, 张喜满, 侯明才, 李罡, 黎汉明. 南雄盆地红层岩石地层划分. 地层学杂志, 2013, 37(4): 441-451.
- [4] 梁诗经, 文斐成, 陈润生, 陈斯盾, 林亨才, 陈泽霖, 冯宗帜. 福建泰宁白垩纪红层植物及孢粉化石组合特征. 福建地质, 2006, 25(1): 1-9.
- [5] 张静娴, 曹辉. 国家公园生态旅游项目特许经营权价值评估——以武夷山为例. 国家公园(中英文), 2023, 1(2): 87-98.
- [6] Xu L M, Wang M, Chen R S, Dong L P, Lin M, Xu X, Tang J R, You H L, Zhou G W, Wang L C, He W X, Li Y J, Zhang C, Zhou Z H. A new avialan theropod from an emerging Jurassic terrestrial fauna. Nature, 2023, 621(7978): 336-343.
- [7] Chen R S, Wang M, Dong L P, Zhou G W, Xu X, Deng K, Xu L M, Zhang C, Wang L C, Du H G, Lin G M, Lin M, Zhou Z H. Earliest short-tailed bird from the Late Jurassic of China. Nature, 2025, 638(8050): 441-448.
- [8] Yan Y, He A B, Dilek Y, Zhu Z F, Zhao Q. Landscape inversion episodes in SE China during the Mesozoic — early Cenozoic: constrained by trace-element contents, Nd isotope geochemistry, and detrital zircon U-Pb geochronology of sedimentary basins. 2023, 136(7/8): 2978-2998.
- [9] 邢光福, 郑剑波, 沈加林, 江茂求, 钱迈平, 姜杨, 靳国栋, 段政. 福建泰宁世界地质公园丹霞红层研究. 地层学杂志, 2013, 37(1): 18-24.
- [10] Li X H, Zhang C K, Li Y X, Wang Y, Liu L. Refined chronostratigraphy of the late Mesozoic terrestrial strata in South China and its tectono-stratigraphic evolution. Gondwana Research, 2019, 66: 143-167.
- [11] Gutschick R C, Lamborn R. *Bifungites*, trace fossils from Devonian-Mississippian rocks of Pennsylvania and Montana, U.S.A. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1975, 18(3): 193-212.
- [12] Salter J W. On Annelide-burrows and surface-markings from the Cambrian rocks of the Longmynd. No. 2. Quarterly Journal of the Geological Society of London, 1857, 13(1/2): 199-206.
- [13] Sabhaya M B, Patel R A, Solanki P M. Palaeoichnology of Jurassic sequence of Jara Dome, Kachchh, western India. Science, Technology and Development, 2021, 10: 41-50.
- [14] Zouheir T, Hminna A, Saber H, Klein H, Lagnaoui A, Voigt S, Rmich A, Schneider J W, Lucas S G. Ichnodiversity and facies of Triassic red beds in the Irohalene area (Argana Basin, Western High Atlas, Morocco): implications for palaeoenvironment. Historical Biology, 2023, 35(6): 875-908.
- [15] Singh A P, Pandey S, Sehgal R K, Singh N P. Fluvial ichnofossil assemblage from the Miocene Siwalik succession of Pathankot District, Punjab, India: Palaeoenvironmental interpretation. Journal of Earth System Science, 2024, 133(1): 19.
- [16] 杨式溥, 张建平, 杨美芳. 中国遗迹化石. 北京: 科学出版社, 2004.
- [17] 吴灏, 丁奕, 金幸生, 杜天明, 郑文杰, 李越. 浙江义乌上白垩统金华组滨湖相红层中的遗迹化石. 地层学杂志, 2020, 44(4): 428-438.
- [18] Metz R. Sinusoidal trail formed by a Recent biting midge (Family Ceratopogonidae): trace fossil implications. Journal of Paleontology, 1987, 61(2): 312-314.
- [19] Metz R. Trace fossils in fluvial deposits of the uppermost Stockton Formation (Late Triassic), Newark Basin, New Jersey. Ichnos, 2020, 27(2): 142-151.
- [20] Chamberlain C K. Recent lebensspuren in nonmarine aquatic environments//The Study of Trace Fossils. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1975: 431-458.
- [21] Pemberton S G, Frey R W. Trace fossil nomenclature and the *Planolites-Palaeophycus* dilemma. Journal of Paleontology, 1982, 56(4): 843-881.
- [22] Fillion D, Pickerill R K. Ichnology of the Upper Cambrian to Lower Ordovician Bell Island and Wabana groups of eastern Newfoundland, Canada. Palaeontographica Canadiana, 1990, 7: 1-83.
- [23] Fillion D, Pickerill R K. Systematic ichnology of the Middle Ordovician Trenton Group, St Lawrence Lowland, eastern Canada. Atlantic Geology, 1984, 20(1): 1-41.
- [24] 张小乐, 季兴开, 唐鹏, 王怿. 塔里木盆地西北缘志留系兰多维列统塔塔格组塔格组的遗迹化石. 地层学杂志, 2023, 47(4): 478-492.
- [25] 王长征, 王海邻, 胡斌, 张利伟, 卢旭辉, 陈传浩. 河南西峡盆地上白垩统寺沟组遗迹化石及其沉积环境. 古生物学报, 2016, 55(3): 367-384.
- [26] Ding Y, Liu J N, Chen F F. Ichnology, Palaeoenvironment, and ecosystem dynamics of the Early Cambrian (Stage 4, Series 2) Guanshan Biota, South China. Geological Journal, 2020, 55(1): 77-94.
- [27] Desai B G. Ichnofabric analysis of bathyal chalks: the Miocene Inglis Formation of the Andaman and Nicobar Islands, India. Journal of

- Palaeogeography, 2021, 10(4): 494-508.
- [28] Ding Y, Duan Y L, Wu Y Q, Cao C Q. Trace fossils from the Permian Lopingian Talung Formation at the northern Penglitan section of Laibin area, South China: Ichnology, palaeoenvironment, and palaeoecology. Geological Journal, 2021, 56(12): 6117-6134.
- [29] Pickerill R K, Fyffe L R. The stratigraphic significance of trace fossils from the Lower Paleozoic Baskahagan Lake Formation near Woodstock, west-central New Brunswick. Atlantic Geology, 1999, 35(3): 215-224.
- [30] Buatois L A, Mángano M G. Trace fossils from a Carboniferous turbiditic lake: Implications for the recognition of additional nonmarine ichnofacies. Ichnos, 1993, 2(3): 237-258.
- [31] Knaust D, Thomas R D K, Curran H A. *Skolithos linearis* Haldeman, 1840 at its early Cambrian type locality, Chickies Rock, Pennsylvania: Analysis and designation of a neotype. Earth-Science Reviews, 2018, 185: 15-31.
- [32] Korovnikov I V, Marusin V V, Tokarev D A, Obut O T. Trace fossils from the Vendian-Cambrian transitional strata of the Igarka Uplift (northwestern Siberian Platform). Paleontological Journal, 2019, 53(6): 566-574.
- [33] Howell B F. *Skolithos*, *Diplocraterion*, and *Sabellidites* in the Cambrian Antietam Sandstone of Maryland. Wagner Free Institute of Sciences Bulletin, 1945, 20: 33-40.
- [34] Howell B F. *Stipsellus annulatus*, a *Skolithos*-like Cambrian fossil from Arizona. Wagner Free Institute of Science, 1957, 32: 17-19.
- [35] Alpert S P. *Planolites* and *Skolithos* from the Upper Precambrian-Lower Cambrian, White-Inyo Mountains, California. 1975, 49(3): 508-521.
- [36] Alpert S P. Systematic review of the genus *Skolithos*. Journal of Paleontology, 1974, 48: 661-669.
- [37] Seilacher A. Bathymetry of trace fossils. Marine Geology, 1967, 5(5/6): 413-428.
- [38] Droser M L. Ichnofabric of the Paleozoic *Skolithos* ichnofacies and the nature and distribution of *Skolithos* piperrock. 1991, 6(3): 316-325.
- [39] Buatois L A, Mángano M G, Brussa E D, Benedetto J L, Pompei J F. The changing face of the deep: colonization of the Early Ordovician deep-sea floor, Puna, northwest Argentina. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2009, 280(3/4): 291-299.
- [40] Xing Z F, Lin J, Fu Y X, Zheng W, Liu Y L, Qi Y A. Trace fossils from the Lower Triassic of North China—a potential signature of the gradual recovery of a terrestrial ecosystem. Palaeoworld, 2021, 30(1): 95-105.
- [41] Baucon A, Enrichetti F, Cabella R, Bavestrello G, Bo M, Toma M, Neto de Carvalho C, Carbone C, Briguglio A. Sabellid tubes from the deep shelf off Liguria (Italy): A modern analogue for distal *Skolithos* ichnofacies. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2023, 612: 111333.
- [42] Zonneveld J P. Applications of experimental neoichnology to paleobiological and evolutionary problems palaios, 2016, 31(6): 275-279.
- [43] Li J H, Cawood P A, Ratschbacher L, Zhang Y Q, Dong S W, Xin Y J, Yang H, Zhang P X. Building Southeast China in the late Mesozoic: Insights from alternating episodes of shortening and extension along the Lianhuashan fault zone. Earth Science Reviews, 2020, 201: 103056.
- [44] 刘静, 张金玉, 葛玉魁, 王伟, 曾令森, 李根, 林旭. 构造地貌学: 构造-气候-地表过程相互作用的交叉研究. 科学通报, 2018, 63: 3070-3088.
- [45] Ding R X, Min K, Zou H P. Inversion of topographic evolution using low-T thermal history: A case study from coastal mountain system in Southeastern China. Gondwana Research, 2019, 67: 21-32.
- [46] 何岸北. 东南沿海古海岸山脉演化: 永安盆地晚中生代沉积及古气候响应[D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2022.
- [47] 李余亮. 广东省韶关市丹霞盆地长坝组沉积特征与古气候研究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2018.
- [48] 胡斌, 吴贤涛. 川西峨眉晚白垩世夹关期河流沉积中的痕迹化石群落. 古生物学报, 1993, 32(4): 478-489, 532-534.
- [49] Pemberton S G, 周志澄, MacEachern J. 机会(r-选择)和均衡(K-选择)遗迹化石的现代生态学解释. 古生物学报, 2001, 40: 134-142.
- [50] 尹春, 李志忠. 福建永安白垩纪丹霞地层沉积环境探讨. 山东师范大学学报(自然科学报), 2014, 29(4): 78-84.