

地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616,CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：川南雷波地区梅树村组凝灰质硅质岩的发现及其地质意义

作者：袁永盛，吴亮，唐烽，张耀堂，李文辉，王万能，张宏辉，张光旭，赵见波

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025106
投稿时间：2025-08-06
录用时间：2025-12-26
预出版时间：2026-11-12

《地质力学学报》预出版

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

川南雷波地区梅树村组凝灰质硅质岩的发现及其地质意义

袁永盛[1,2]，吴 亮[1,2]，唐 烽[3]，张耀堂[1,2]，李文辉[1,2]，王万能[1,2]，张宏辉[1,2]，张光旭[4]，赵见波[1,2]

YUAN Yongsheng[1,2], WU Liang[1,2], TANG Feng[3], ZHANG Yaotang[1,2], LI Wenhui[1,2], WANG Wanneng[1,2], ZHANG Honghui[1,2], ZHANG Guangxu[3], ZHAO Jianbo[1,2]

1.中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心，云南 昆明，650100；

2.中国地质学会热液型金铜多金属矿成矿规律与有效勘查技术创新基地，云南 昆明，650100；

3.中国地质科学院地质研究所， 北京 100037；

4.贵州省古生物与古环境全省重点实验室， 贵州 贵阳， 550025

1. *Kunming General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Kunming* 650100*, Yunnan, China;*

2. *Innovation Base for Metallogenic Regularity and Effective Exploration Technology of Hydrothermal Gold-Copper Polymetallic Deposits, Geological Society of China, Kunming 650100, Yunnan, China*；

3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, *China;*

4. Guizhou Provincial Key Laboratory of Paleontology and Paleoenvironment, Guiyang 550025*, Guizhou, China*

《地质力学学报》预出版

Discovery of tuffaceous siliceous rocks in the Meishucun Formation, Leibo area, southern Sichuan, and its geological significance

Abstract: [Objective] This study aims to determine the rock type, depositional age, and tectonic setting of the volcanic materials, thereby providing an important basis for regional stratigraphic correlation and studies of metallogenic events and changes in sedimentary environments. **[Methods]** Three layers of waxy-yellow tuffaceous siliceous rocks were identified at the base of the Meishucun Formation in the Leibo area of southern Sichuan. Zircon U-Pb dating, trace element analyses, and Hf isotope analyses were conducted on these rocks. **[Results]** The results indicate a concordant zircon U-Pb age of 539.3 ± 2.7 Ma, $\varepsilon_{Hf}(t)$ values ranging from −1.2 to 2.9, and two-stage Hf model ages (T_{DM2}) ranging from 1,312 to 1,567 Ma. **[Conclusions]** Comparison with regional volcanic and sedimentary records across the Ediacaran−Cambrian transition indicates that the zircon U-Pb age provides a chronological constraint on the age of the basal Meishucun Formation and corresponds to the Fortunian Stage of the Terreneuvian Series, consistent with the internationally recommended age for the base of the Cambrian System. Regional stratigraphic correlation suggests that the Ediacaran−Cambrian boundary in the southern Sichuan−eastern Yunnan region is more appropriately placed at the contact between the Daibu Member of the Meishucun Formation and the Dengying Formation. The widespread distribution of coeval tuff layers reflects the temporal correspondence of tectonic events across different regions and

基金项目：中国地质调查研究局项目（DD202601103305, DD20220987）；国家自然科学基金项目(42172035）

This research was financially supported by the Geological Survey Projects of the China Geological Survey (Grant Nos. DD20220987 and DD202308404) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42172035).

第一作者：袁永盛（1989—），男，高级工程师，主要从事区域地质矿产调查研究。Email：879933153@qq.com

通讯作者：吴亮（1985—），男，正高级工程师，主要从事区域地质矿产调查研究。Email：229471514@163.com

收稿日期：2025-08-06；**修回日期**：2025-12-09；**录用日期**：2025-12-26；网络出版日期：2026-11-12；责任编辑：王婧

Received: 2025-08-068; Revised: 2025-12-09; Accepted: 2025-12-26; Available Online: 2026-11-12; Handling Editor: WANG Jing

provides an isochronous marker for comparative studies of basin evolution. In conjunction with basin evolution and metallogenic processes in the Yangtze region during the Ediacaran−Cambrian transition, this age provides a chronological constraint on the onset of phosphorite deposition in the southern Sichuan-eastern Yunnan region. It also constrains the period of most intense activity of the first episode of the Xingkai Movement in southern Sichuan to approximately 539 Ma. Zircon trace element and Hf isotope analyses indicate that the tuffaceous components are rhyolitic in composition and that the source materials were mainly derived from partial melting of juvenile lower crust. The magma was likely generated in a magmatic arc setting. The tuff formation may have been related to the collision and amalgamation of continental blocks with Gondwana, or to the subduction and collision of surrounding microplates toward Gondwana. [**Significance**] This study improves our understanding of the nature, provenance, and tectonic setting of volcanic materials during the Ediacaran−Cambrian transition in the Yangtze Block. It also provides important chronological evidence for determining the Ediacaran−Cambrian boundary, constraining the timing of phosphorite deposition, and reconstructing basin evolution.
Keywords: Yangtze region; Meishucun Formation; tuffaceous; zircon U-Pb age; Hf isotope

摘要：确定火山灰的岩石类型、沉积时代和构造背景，可为区域地层对比、成矿事件和沉积环境转变研究提供重要依据。川南雷波地区梅树村组底部发现了 3 层凝灰质硅质岩，对其开展了锆石 U-Pb 测年、微量元素和 Hf 同位素测试。结果显示，凝灰质硅质岩锆石 U-Pb 谐和年龄为 539.3±2.7 Ma，$\varepsilon_{Hf}(t)$值为−1.2~2.9，二阶段模式年龄 T_{DM2} 为 1312~1567 Ma。根据区域上埃迪卡拉纪—寒武纪之交的火山沉积记录，认为凝灰质硅质岩的锆石 U-Pb 年龄为梅树村组底部的时代厘定提供了年代学约束，对应寒武纪纽芬兰世幸运期，与全球寒武系底界推荐年龄基本一致。区域地层对比表明，将川南−滇东地区埃迪卡拉系—寒武系界线置于梅树村组待补段与灯影组界面处更为合理。同期广泛分布的凝灰岩层反应了这一时期全球构造运动的等时性，为盆地演化研究提供了可对比的等时面。结合扬子地区在埃迪卡拉纪—寒武纪过渡时期的盆地演化和成矿特征，该年龄较好地限定了川南−滇东地区磷块岩开始沉积的时间，并将川南地区兴凯运动Ⅰ幕活动最强烈的时期约束在~539 Ma。锆石微量元素及 Hf 同位素分析表明，凝灰质组分具有流纹质特征，成岩物质主要来自新生下地壳的部分熔融，岩浆可能形成于岩浆弧环境；凝灰岩的形成可能与冈瓦纳大陆碰撞拼合或周缘微板块向冈瓦纳大陆俯冲碰撞有关。通过对凝灰质硅质岩形成时代和地球化学特征的研究，深化了扬子地块埃迪卡拉纪—寒武纪过渡期火山物质属性、来源与构造环境认识，为埃迪卡拉系—寒武系界线厘定、磷块岩沉积时限以及盆地演化过程解析提供重要年代学证据。
关键词：扬子地区；梅树村组；凝灰质；锆石 U-Pb 年龄；Hf 同位素

中图分类号：P53；P54　　**文献标识码：**A　　**文章编号：** 1006-6616（2025）00-0000-00 DOI: 10. 12090 / j. issn. 1006-6616. 2025106

《地质力学学报》预出版

0　引言

埃迪卡拉纪—寒武纪之交是地球上地质、环境和生物演化的重大突变时期之一，发生了一系列影响全球的重要事件，一直是地球科学研究的热点。扬子地区是全球埃迪卡拉系—寒武系过渡地层发育最好的地区之一，保存了连续的地层沉积记录，为研究该时期海洋环境演变、生物演化等科学问题提供了理想场所。近年来，地质学家在埃迪卡拉纪—寒武纪过渡时期的年代学、古生物学、地层学和地球化学等方面取得了一系列重要成果（周明忠等，2013；王新强等，2014；朱茂炎等，2019；陈灿等，2020；唐烽等，2020；王伟等，2020；W u et al.，2021；周传明等，2021；Yang et al.，2022；陈启聪等，2024；徐进鸿等，2025），建立起比较完整的沉积组合、碳同位素记录和古生物演化框架。此外，在寒武纪生物大爆发（朱日祥等，2009；Fu et

al.，2019；周传明等，2019；朱茂炎等，2019；舒德干和韩健，2020；房瑞森等，2021；殷宗军和赵方臣，2021；Zhang and Shu，2021；张志飞等，2021，2023）、海洋−大气化学组成的异常波动（王新强等，2014；Cheng et al.，2017；Yang et al.，2017；Zhang et al.，2018；Tostevin et al.，2019；熊轶伟等，2022）和成矿作用（米云川等，2021，2024；杨万涛等，2021；李佐强等，2024；杨瑞东等，2025；何登发等，2025；庞雨雨等，2026）等方面也取得了重要进展。

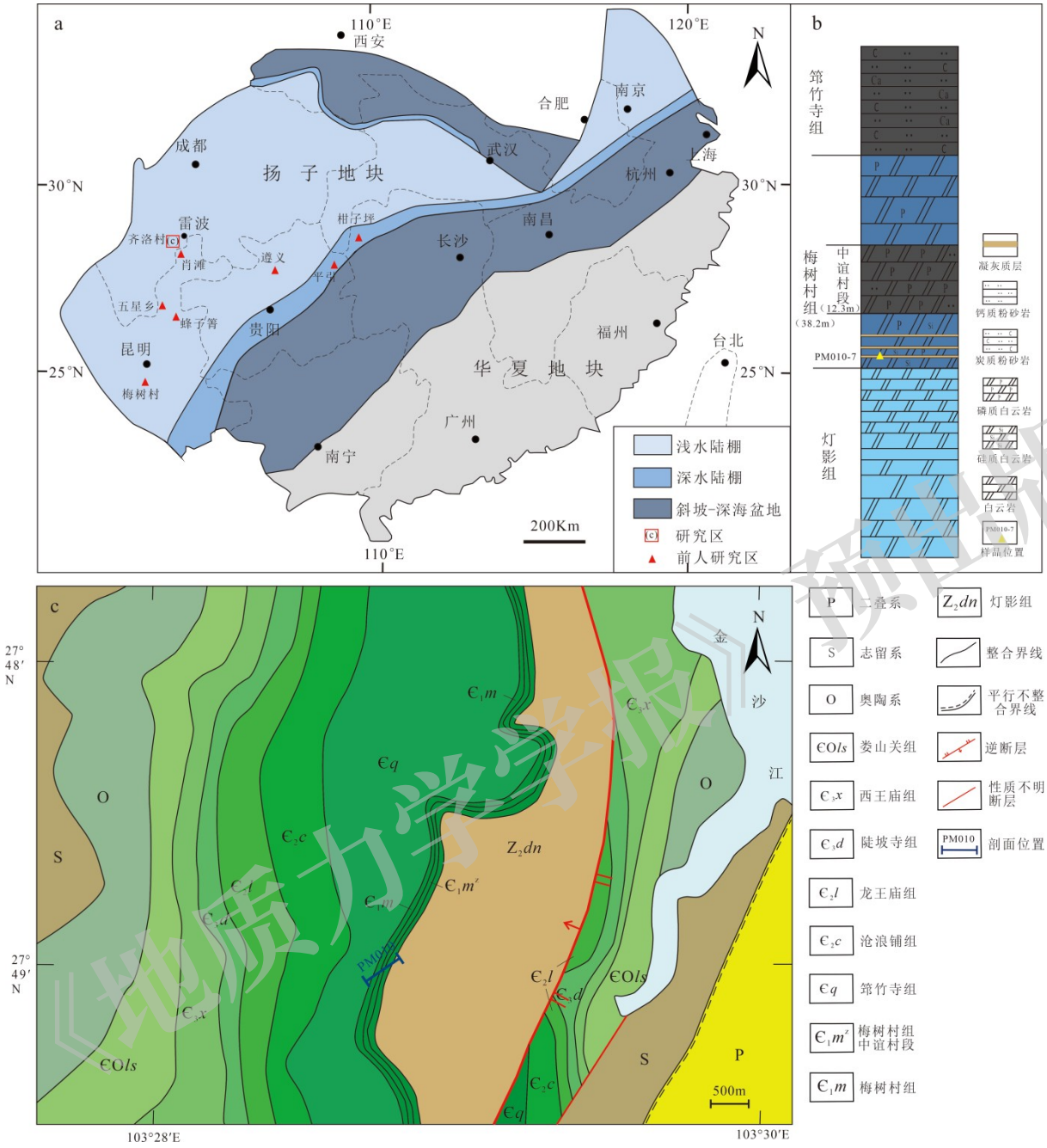
21 世纪以来，国际公认的年代学研究成果主要来自埃迪卡拉纪—寒武纪之交同期火山凝灰岩的锆石 U-Pb 测年数据，已有学者在云南昆明、贵州遵义和铜仁地区开展了相关的年代学研究，为该时期年代学框架的建立提供了重要依据。但是，由于火山灰沉积过程中可能混入非火山物质，干扰了对其地球化学特征、岩石类型以及大地构造背景的研究，制约了对火山灰的准确认识。同时，埃迪卡拉纪—寒武纪之交，上扬子地区构造体制发生了重大变化，由桐湾运动（扬子地区埃迪卡拉系灯影组沉积期的地壳上升运动）转化为兴凯运动（寒武世早期的拉张裂陷运动；刘树根等，2013）。这一伸展拉张过程造成梅树村组下部热液硅质岩的密集发育，并在上扬子区形成梅树村组磷块岩和筇竹寺组黑色页岩等重要矿产资源。李伟等（2015）对该时期构造运动的沉积模式和阶段划分进行了详细研究，但因缺乏有效的火山岩定年数据，构造背景演化的关键节点未得到有效约束。

此次研究以川南雷波地区为研究区，地质调查过程中于梅树村组底部发现了 3 层凝灰质硅质岩。通过开展锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素和微量元素测试，探讨了凝灰岩的原岩性质及其形成的大地构造背景。结合梅树村组硅质岩和磷矿化沉积特征，对兴凯运动Ⅰ幕的活动时限和区域磷矿化的起始时间，提出了有效的年龄约束。

1　地质背景及岩性特征

在埃迪卡拉纪—寒武纪过渡时期，扬子地区的大地构造背景由稳定的碳酸盐岩台地向裂谷盆地演化，古地理格局总体表现为自西北向东南水体逐渐加深。根据沉积组合特征，该区自西北向东南大致可划分为浅水陆棚带、深水陆棚带和斜坡−深水盆地带。其中，浅水陆棚相主要发育碳酸盐岩及磷块岩地层；深水陆棚以碳质沉积为特征；斜坡−深水盆地带的深水相区则以硅质沉积为特征（图 1a）。研究区位于四川省雷波县南部，处于埃迪卡拉纪—寒武纪扬子地区浅水陆棚相沉积区，自下而上连续沉积了埃迪卡拉系灯影组、寒武系梅树村组和筇竹寺组（图 1b、1c）。

《地质月学学报》预出版



a—扬子地块早寒武世岩相古地理图（据周明忠等，2013 修改）；b—川南雷波地区梅树村组剖面图；c—川南雷波地区地质简图

图 1 扬子地区早寒武世岩相古地理及川南雷波地区地质特征

Fig.1 Lithofacies paleogeography of the Yangtze Block during the Early Cambrian and geological characteristics of the Leibo area, southern Sichuan

(a) Lithofacies paleogeographic map of the Yangtze Block during the Early Cambrian (modified after Zhou et al., 2013); (b) Stratigraphic section of the Meishucun Formation in the Leibo area, southern Sichuan; (c) Geological map of the Leibo area, southern Sichuan

灯影组主要由灰白色中—厚层白云岩组成。梅树村组下部为待补段，底部岩性为中—薄层含硅质结核白云岩，向上沉积物中硅质含量增多，为薄层硅质条带与中—薄层硅质白云岩互层（图 2a），可见 3 层厚度分别约 12 cm、5 cm 和 3 cm 的灰黄色凝灰质硅质岩（图 2b）；底部可见星点状胶磷矿，向上胶磷矿增多呈条带状产出（图 2c）。中部为中谊村段，主要由磷质白云岩组成，为滇东－川南地区主要的磷矿开采层位。上部为大海

《地质力学学报》预出版

段，岩性为灰色厚层细晶白云岩，偶见星点状胶磷矿化。筇竹寺组为主要由炭质页岩与钙质粉砂岩组成的黑色岩系。

凝灰质硅质岩呈薄层状构造，具微晶结构，主要由凝灰质和硅质组成（图 2d）。硅质主要为隐晶质—微晶质玉髓，含微量微晶石英，呈他形、粒状，约占岩石总体积的 65%；凝灰质主要为黏土矿物，多发生绢云母化，呈细小鳞片状，约占岩石总体积的 35%（图 2e）。



a—梅树村组下部白云岩中发育硅质条带和凝灰质硅质岩；b—白云岩中发育三层凝灰质硅质岩；c—硅质白云岩中的胶磷矿条带；d—灰黄色凝灰质硅质岩；e—凝灰质硅质岩正交偏光镜下照片(+)

图 2　川南雷波地区梅树村组沉积特征

Fig.2 Sedimentary characteristics of the Meishucun Formation in the Leibo area, southern Sichuan

(a) Siliceous bands and tuffaceous siliceous rocks in dolomite from the lower part of the Meishucun Formation; (b) Three layers of tuffaceous siliceous rocks in dolomite; (c) Collophanite bands in siliceous dolomite; (d) Grayish-yellow tuffaceous siliceous rock; (e) Photomicrograph of tuffaceous siliceous rock under crossed polarized light (+)

2 测试方法及流程

采集测试样品约 3 kg。样品粉碎、单矿物挑选、制靶等前处理工作，以及透反射和阴极发光图像采集，均在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成。样品接收后，切除表面氧化或者污渍的部分，然后清洗、晾干，机械破碎至 250~180 μm，经淘洗、电磁分选后挑出锆石制靶，共获得锆石 380 余颗。透反射拍照测试所用的仪器为 OLYMPUS CX-43 光学显微镜，配备 MSH2-H 显微镜相机，图像处理软件为明美显微数码成像系统。阴极发光（CL）图像采集使用 TESCAN Mira3 LMH 型场发射扫描电镜，配备 1 个 TESCAN 原厂 CL 探头及 2 个金竟科技 CL 探头。测试条件为：加速电压 7 kV，电流 3 nA，工作距离 15 mm，视域宽度 140 μm；图像采集选取 Resolution 高清模式，获取时间为 96 s；亮度和对比度调节至保证矿物环带清晰可见。样品测试前经喷镀导电膜处理，膜厚约 10 nm。CL 图像显示，样品 PM010-7 中约 80%的锆石自形程度较好，约 20%较差，从中挑选自形程度较好的锆石进行测试。

锆石 U-Pb 同位素定年在南京宏创地质勘查技术服务有限公司微区分析实验室使用激光剥蚀−电感耦合等离子体质谱仪（LA-ICPMS）完成。激光剥蚀平台采用美国 Applied Spectra 公司的 Resolution SE 型 193 nm 深紫外激光剥蚀进样系统，配备 S155 型双体积样品池。质谱仪采用美国 Agilent 公司的 Agilent 7900 型电感耦合等离子体质谱仪。以锆石 91500 作为校正标样，GJ-1 作为监测标样，每隔 6~7 个样品点分析 2 个 91500 标样及 1 个 GJ-1 标样。实验测定的 91500 年龄为 1062±6 Ma（2σ，n=10），GJ-1 年龄为 603±5 Ma （2σ，n=5），均与推荐值在误差范围内一致。

锆石 Lu-Hf 同位素测试同样在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成，采用美国 Applied Spectra 公司的 ASI J-100 飞秒激光和 Thermo Finnigan Neptune 型多接收电感耦合等离子体质谱仪（MC-ICP-MS）联用技术。激光剥蚀频率为 8 Hz，剥蚀坑直径为 24 μm，能量密度为 1.5 J/cm^2，剥蚀时间为 31 s。由于锆石中 ^{176}Lu/^{177}Hf 比值非常低 (通常小于 0.002)，^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的同质异位素干扰可以忽略；^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的干扰则根据 Yb 自然丰度及实测 ^{173}Yb/^{172}Yb 值予以矫正。Hf 同位素分析点与 U-Pb 年龄分析点尽量布置于同一环带内，以确保二者分析相对应。测试过程中，Plešovice 作为校正标样，91500 作为监控标样，测得的 ^{176}Hf/^{177}Hf 值分别为 0.282483±0.000006（2σ，n =5）和 0.282293±0.000014（2σ，n=2），与推荐值在误差范围内一致。

3 测试结果

3.1 锆石形态特征

阴极发光（CL）图像显示，测试锆石多为长柱状，长宽比为 3:2~4:1。锆石自形程度好，表面干净，裂纹不发育，韵律环带清晰，无不规则内核，具岩浆锆石特征（图 3）。

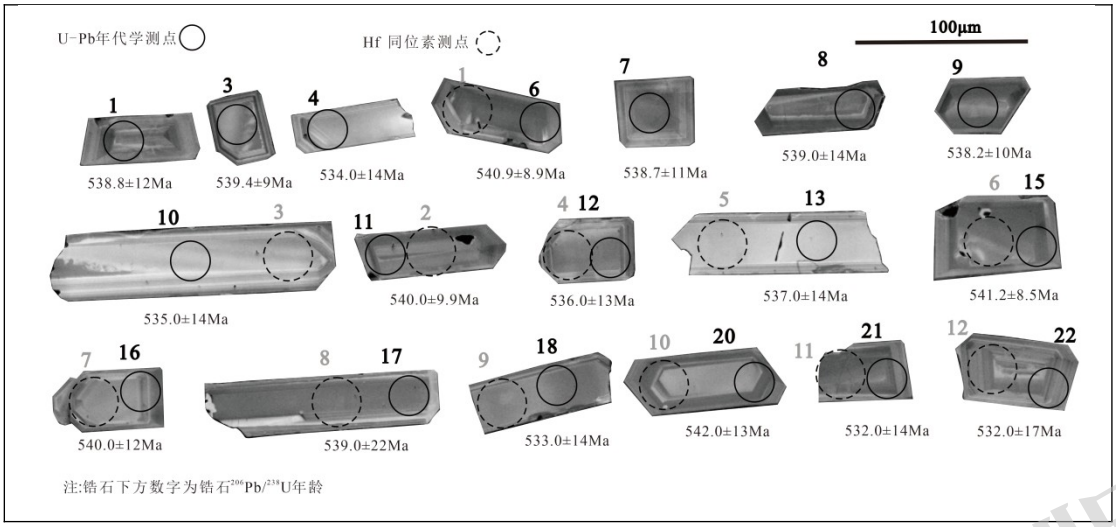


图 3 川南雷波地区梅树村组凝灰质硅质岩锆石阴极发光图像

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from tuffaceous siliceous rocks of the Meishucun Formation in the Leibo area, southern Sichuan

3.2 锆石数据

样品 PM010-7 的锆石 U-Pb 年龄数据和锆石微量元素数据分别见表 1 和表 2。此次研究共对 22 颗锆石进行了 U-Pb 测年，其中 PM010-7-2、PM010-7-5、PM010-7-14 和 PM010-7-19 共 4 个测试点存在 Pb 丢失，予以剔除；其余 18 个测点的年龄具有较好的一致性，获得其谐和年龄为 539.3±2.7 Ma（MSWD=4.0，n=18；图 4）。锆石 Th/U 值为 0.36~0.87（均值 0.61），所有测点的 Th/U 值均大于 0.1。结合锆石的形态学和微量元素特征，表明所测锆石均为岩浆成因（Corfu et al.，2003）。对其中 12 颗锆石进行 Lu-Hf 同位素测试，获得测试数据见表 3，其中 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值为 0.28241~0.28252，$\varepsilon_{Hf}(t)$值为−1.2~2.9，二阶段模式年龄 T_{DM2} 为 1312~1567 Ma。

《地质力学学报》预出版

表 1 样品 PM010-7 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotope analyses of sample PM010-7

测点	含量/（×10^{-6}）			Th/U	同位素比值						年龄/Ma						谐和度
	Pb	Th	U		$^{207}Pb/^{235}U$	2σ	$^{206}Pb/^{238}U$	2σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	2σ	$^{207}Pb/^{235}U$	2σ	$^{206}Pb/^{238}U$	2σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	2σ	
PM010-7-1	69	311	686	0.45	0.7040	0.0260	0.0872	0.0020	0.0600	0.0032	541	15	539	12	590	120	100
PM010-7-3	56	379	492	0.77	0.7090	0.0260	0.0873	0.0015	0.0593	0.0030	543	16	539	9	565	120	99
PM010-7-4	31	190	271	0.70	0.6950	0.0670	0.0864	0.0024	0.0582	0.0054	532	39	534	14	490	200	100
PM010-7-6	115	568	1015	0.56	0.7200	0.0370	0.0875	0.0015	0.0590	0.0036	550	22	541	9	558	140	98
PM010-7-7	67	297	662	0.45	0.6930	0.0280	0.0872	0.0018	0.0588	0.0031	533	17	539	11	555	110	99
PM010-7-8	111	650	973	0.67	0.7130	0.0370	0.0871	0.0024	0.0592	0.0036	546	22	539	14	558	140	99
PM010-7-9	71	328	698	0.47	0.7130	0.0310	0.0871	0.0018	0.0608	0.0034	546	18	538	10	616	120	99
PM010-7-10	33	179	350	0.51	0.6870	0.0360	0.0866	0.0023	0.0578	0.0034	530	22	535	14	504	130	99
PM010-7-11	69	300	671	0.45	0.7140	0.0280	0.0874	0.0017	0.0614	0.0035	551	20	540	10	641	120	98
PM010-7-12	73	463	656	0.71	0.7120	0.0380	0.0868	0.0021	0.0609	0.0039	545	22	536	13	616	130	98
PM010-7-13	33	230	286	0.80	0.7300	0.0680	0.0869	0.0024	0.0596	0.0053	552	39	537	14	590	210	97
PM010-7-15	72	430	657	0.65	0.7080	0.0260	0.0876	0.0014	0.0588	0.0030	542	15	541	9	544	110	100
PM010-7-16	78	433	659	0.66	0.7120	0.0400	0.0874	0.0021	0.0582	0.0038	544	23	540	12	510	140	99
PM010-7-17	72	528	643	0.82	0.7590	0.0730	0.0872	0.0036	0.0645	0.0068	573	42	539	22	750	230	94
PM010-7-	59	423	488	0.87	0.7010	0.0580	0.0863	0.0023	0.0579	0.0049	538	35	533	14	500	200	99

《地质力学学报》预出版

18																	
PM010-7-20	78	499	719	0.69	0.7140	0.0310	0.0877	0.0022	0.0597	0.0032	546	18	542	13	582	110	99
PM010-7-21	93	401	874	0.46	0.7040	0.0410	0.0860	0.0024	0.0591	0.0043	540	25	532	14	550	160	99
PM010-7-22	45	171	472	0.36	0.7300	0.0750	0.0860	0.0029	0.0618	0.0067	554	44	532	17	630	230	96

表 2 样品 PM010-7 锆石微量元素分析结果/（$\times10^{-6}$）

Table 2 Trace element analyses ($\times10^{-6}$) of zircons from sample PM010-7

测点	Sc	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U	Pb
PM010-7-1	284	2.42	2332	4.29	0.05	12.37	0.11	1.89	5.44	0.29	38	14.50	22	24	27	30	625	120	12450	1.45	311	686	69
PM010-7-3	379	8.20	4080	3.45	0.05	12.06	0.44	7.62	17.90	2.25	100	31.22	378	135	613	116	967	182	9080	0.82	379	492	569
PM010-7-4	424	10.80	2580	3.25	0.03	6.16	0.24	3.40	7.60	1.46	48	16.82	213	83	397	78	656	129	8720	0.68	190	271	31
PM010-7-6	270	4.30	2109	5.32	9.19	40.90	3.83	19.30	9.00	0.39	38	12.91	171	67	327	67	570	110	12860	2.15	568	1015	115
PM010-7-7	272	2.47	2471	2.94	0.10	11.04	0.11	1.94	6.00	0.31	42	15.30	202	80	384	77	665	127	12520	1.21	297	662	67
PM010-7-8	338	4.30	3610	5.64	0.23	16.20	0.39	5.46	11.50	0.96	76	24.53	315	118	550	107	900	167	11340	1.66	650	973	111
PM010-7-9	251	2.33	2409	2.00	0.16	10.50	0.11	2.59	6.36	0.35	43	15.61	203	79	373	76	655	125	12420	0.95	328	698	71
PM010-7-10	337	3.15	2219	1.45	0.00	6.25	0.15	3.68	8.13	0.96	50	16.61	206	76	340	67	569	104	10480	0.63	179	350	33
PM010-7-11	258	10.00	2003	3.14	0.08	12.01	0.13	1.74	4.57	0.31	33	12.05	156	65	318	65	561	111	12340	1.43	300	671	69
PM010-7-12	404	4.50	5140	3.62	1.98	22.80	1.37	13.50	23.00	2.50	127	40.90	488	175	764	148	1192	219	10130	0.93	463	656	73
PM010-7-13	526	12.30	4200	2.16	0.71	11.30	0.96	12.80	22.50	4.68	118	35.50	415	144	626	118	998	184	8340	0.46	230	286	33
PM010-7-15	320	4.48	2863	6.16	0.02	18.40	0.20	3.41	7.94	0.86	56	19.74	249	93	435	84	715	132	10990	1.83	430	657	72
PM010-7-16	441	7.20	3113	3.95	0.18	9.05	0.33	4.91	10.45	1.10	64	21.74	273	105	472	92	769	150	10100	1.31	433	659	78
PM010-7-17	400	8.20	5250	3.69	0.67	18.60	0.64	12.60	21.50	2.64	137	39.60	496	172	775	142	1191	214	9900	0.94	528	643	72

《地质力学学报》预出版

PM010-7-18	405	12.40	4350	3.91	0.12	16.50	0.52	9.20	21.10	2.10	109	34.20	411	144	640	119	978	185	9820	0.88	423	488	58
PM010-7-20	398	5.00	2853	4.82	0.01	11.86	0.20	3.76	8.97	0.74	57	20.19	256	96	426	83	688	129	10150	1.34	499	719	78
PM010-7-21	375	5.10	3200	3.51	4.90	23.04	2.15	11.90	10.20	0.55	57	19.45	265	103	498	100	885	169	12560	1.31	401	874	93
PM010-7-22	263	5.00	1499	2.13	33.70	93.00	13.20	65.50	18.40	0.56	38	9.33	122	47	237	50	444	83	11930	0.86	171	472	45

表 3 样品 PM010-7 锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 3 Lu-Hf isotopic analyses of zircons from sample PM010-7

测点	年龄/Ma	$^{176}Yb/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Lu/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$\varepsilon_{Hf}(0)$	$^{176}Hf/^{177}Hf(t)$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	1σ	T_{DM}/Ma	T_{DM2}/Ma	$f_{Lu/Hf}$
PM010-7-1	541	0.059192	0.001415	0.001911	0.000048	0.282487	0.000018	−10.1	0.282467	1.1	0.6	1109	1426	−0.94
PM010-7-2	540	0.066903	0.002918	0.002198	0.000077	0.282503	0.000020	−9.5	0.282481	1.6	0.7	1094	1397	−0.93
PM010-7-3	535	0.071386	0.000749	0.002247	0.000024	0.282518	0.000020	−9.0	0.282496	2.1	0.7	1073	1367	−0.93
PM010-7-4	536	0.077998	0.001026	0.002558	0.000037	0.282546	0.000021	−8.0	0.282520	2.9	0.7	1042	1312	−0.92
PM010-7-5	537	0.124052	0.002088	0.004068	0.000042	0.282530	0.000027	−8.6	0.282489	1.8	0.9	1112	1381	−0.88
PM010-7-6	541	0.047097	0.001719	0.001568	0.000056	0.282426	0.000017	−12.2	0.282410	−0.9	0.6	1185	1554	−0.95
PM010-7-7	540	0.089505	0.001049	0.002825	0.000027	0.282518	0.000020	−9.0	0.282490	1.9	0.7	1091	1377	−0.91
PM010-7-8	539	0.110704	0.000456	0.003506	0.000019	0.282542	0.000020	−8.1	0.282506	2.5	0.7	1077	1341	−0.89
PM010-7-9	533	0.151380	0.002734	0.004795	0.000060	0.282495	0.000036	−9.8	0.282447	0.2	1.3	1191	1478	−0.86
PM010-7-10	542	0.081386	0.000556	0.002590	0.000018	0.282499	0.000024	−9.6	0.282473	1.4	0.8	1111	1413	−0.92
PM010-7-11	532	0.052479	0.000901	0.001786	0.000017	0.282515	0.000019	−9.1	0.282497	2.0	0.7	1065	1366	−0.95

《地质力学学报》录用稿件，非最终出版

PM010-7-12	532	0.055168	0.000859	0.001823	0.000031	0.282425	0.000019	−12.3	0.282407	−1.2	0.7	1194	1567	−0.95

《地质力学学报》预出版

4 讨论

4.1 年代学

华南扬子地区埃迪卡拉纪—早寒武世地层中已发现多期火山活动的凝灰岩记录。其中，云南晋宁梅树村剖面梅树村组中谊村段中部（第 5 层）及其相当层位的凝灰岩在云南东部地区广泛分布，是具有代表性和年代学研究程度较高的层位之一。

针对该层凝灰岩，已有学者对其开展了大量锆石 U-Pb 年代学研究。Sawaki et al.（2008）获得的 Nano-SIMS 锆石 U-Pb 年龄为 536.5±2.5 Ma；朱日祥等（2009）通过 SIMS U-Pb 年代学研究，获得该层位年龄为 535.2±1.7 Ma；Yang et al.（2022）最新 SIMS 锆石 U-Pb 测年结果为 533. 2±3.8Ma。上述研究将这一重要层位的同位素年龄较好地约束在（533.2±3.8）~（536.5±2.5） Ma。

随着研究工作的不断深入，扬子板块同时期的沉积地层中也陆续发现相当层位的凝灰岩（图 5）。Chen et al.（2009）对湖南张家界柑子坪剖面留茶坡组顶部的凝灰岩(钾质斑脱岩)进行了 SHRIMP U-Pb 年代学研究，获得年龄为 536.3±5.5 Ma。周明忠等（2013）对贵州江口平引剖面老堡组顶界之下 2 m 处钾质斑脱岩锆石开展了 SHRIMP U-Pb 定年研究，获得年龄值为 536±5 Ma。何天辰（2013）报道，云南昭通永善肖滩剖面梅树村组待补段底部的凝灰岩 SIMS 锆石 U-Pb 年龄为 538.5±1.6 Ma。陈庆松和杨润柏（2019）对滇东北会泽地区对中谊村段下部磷质白云岩与硅质岩之间的凝灰岩夹层进行 SHRIMP U-Pb 定年，获得年龄值为 538±5 Ma。易雨昊等（2019）在滇东北会泽蜂子箐剖面中谊村段下部获得 La-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 532.0±3.5 Ma。王伟等（2020）对贵州江口平引剖面留茶坡组顶部的两层凝灰岩锆石进行 CA-ID-TIMS U-Pb 定年，分别获得年龄值 536.40±0.47 Ma 和 541.48±0.46 Ma。Yang et al.（2022）于云南晋宁梅树村剖面梅树村组顶部凝灰岩层中测得 SIMS 锆石 U-Pb 年龄为 526. 2±4. 1 Ma。徐进鸿等（2025）获得黔北地区多个剖面凝灰岩锆石 U-Pb 年龄，其中牛蹄塘组底部凝灰岩年龄集中于 521 Ma~517 Ma，磷块岩层附近的凝灰岩年龄集中于 536 Ma~532 Ma。

此次研究在川南雷波地区齐洛村剖面梅树村组待补段下部硅质条带白云岩中发现的 3 层凝灰质硅质岩，其底部层位获得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和年龄为 539.3±2.7 Ma。该层凝灰质硅质岩的产出层位与肖滩剖面的发现层位一致，均位于待补段下部，低于区域上云南安宁梅树村、会泽蜂子箐、贵州江口、湖南张家界柑子坪等剖面发现的凝灰岩层位，可能为不同期次火山活动形成。

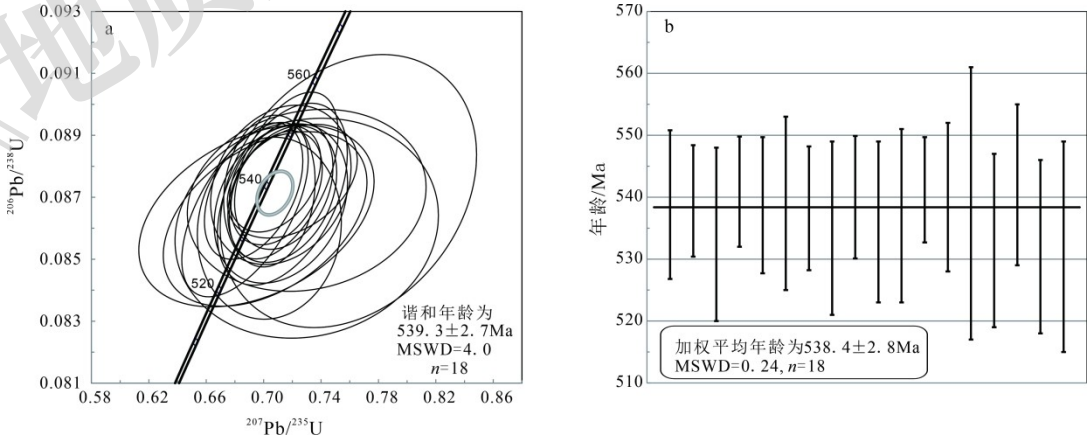


图 4 川南雷波地区梅树村组凝灰质硅质岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.4 U-Pb concordia diagram of zircons from tuffaceous siliceous rocks of the Meishucun Formation in the Leibo area, southern Sichuan

凝灰岩的重要价值之一在于其获得的年代学数据为地层的厘定提供了相对准确客观的数据。关于扬子地区埃迪卡拉系—寒武系的划分，早期生物地层学研究通常将小壳动物化石 *Anabarites trisulcatus* 的首次出现作为华南地区前寒武系—寒武系界线的标志（Zhu et al.，2001）；最近，有学者建议将梅树村经典剖面小歪头山段（可与待补段对比）的原牙形类化石的首现层位作为界线标志（Liu et al.，2020）。随着研究的推进，部分学

者进一步提出，可将云南东部中谊村段下磷矿层发现的极易采集的宏体化石条带虫 *Rugosusivitta* 作为寒武系底界新的界线标志化石（Tang et al.，2021；陈启聪等，2024）。结合区域上大量年代学数据，推测埃迪卡拉系—寒武系界线应该位于此次发现的凝灰岩层之下。相较于安宁地区的凝灰岩，该层凝灰质更接近梅树村组的底部，年代也稍早于安宁地区获得的年龄值，且该年龄与国际地层委员会《国际地质年表》推荐的寒武系底界年龄 538.8±0.2 Ma 更为接近（Cohen et al., 2023）。凝灰岩层的发现和年代学研究，为梅树村组的沉积下限、时代归属和磷块岩的沉积时期提供了更好的限定。据此建议将梅树村组的时代厘定为寒武纪纽芬兰世幸运期，滇东地区埃迪卡拉系—寒武系界线应位于梅树村组待补段与下伏灯影组界面处更为合理。

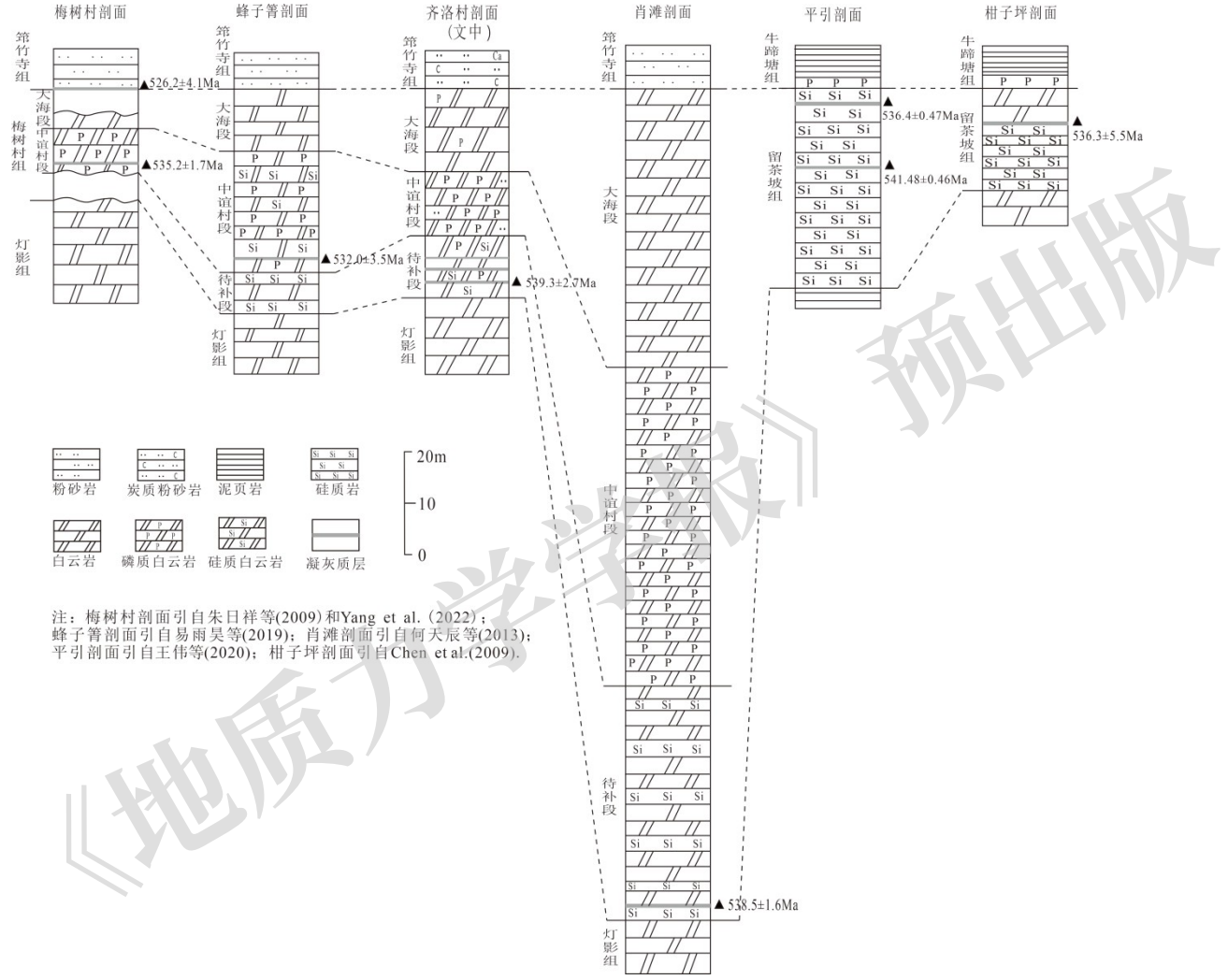


图 5 上扬子地区埃迪卡拉系—寒武系典型剖面对比图

Fig. 5 Correlation of representative Ediacaran−Cambrian stratigraphic sections in the Upper Yangtze region

凝灰岩层的识别也为大范围的地层对比提供了重要的参考标志，是开展岩石地层结合年代地层划分的可靠手段。受一定的构造活动影响，在空间区域上扬子地区埃迪卡拉系灯影组白云岩之上和筇竹寺组黑色细碎屑岩之下的沉积地层岩性组合存在较大相变。在云南安宁梅树村，凝灰岩主要赋存在中谊村段的磷质白云岩中，将磷矿层分隔为上、下两层；在云南会泽、昭通永善、四川金阳等地区，发现的凝灰岩赋存于磷质白云岩之下的硅质白云岩之中；在湖南柑子坪，凝灰岩主要发育在硅质岩与上覆的白云岩的界面附近；在贵州平引剖面凝灰岩发育在留茶坡组顶部硅质岩中（图 5）。上述凝灰岩层位的时空分布，为扬子地区埃迪卡拉纪—寒武纪盆地演化和地层对比提供了一层或几层可供对比的等时界面。

埃迪卡拉纪—寒武纪之交，上扬子地区沉积环境变化主要受兴凯运动（期）的影响，该运动主要经历了 2 幕构造运动。Ⅰ幕发生于梅树村组沉积期（李伟等，2015）。由于裂陷作用，梅树村组早期碳酸盐台地沉积期

《地质力学学报》预出版

在上扬子地区产生大量的断裂与裂缝，沉积区海底产生热液喷流，大量发育热液沉积硅质岩；同时，喷流热液导致的上升流将不同深度的含磷物质带至陆棚形成胶磷矿（杨万涛等，2021）。兴凯运动Ⅰ幕构造运动主要造就了1套含硅、含磷的裂陷槽沉积，并为裂陷槽的持续发育、筇竹寺组黑色页岩的形成（兴凯运动Ⅱ幕）奠定了基础（图6）。此次研究发现的凝灰质硅质岩位于梅树村组下部，属于硅质条带最为发育时期的早期（图2a），反映了兴凯运动Ⅰ幕导致的断裂拉张和热液活动的高峰时期。该时期胶磷矿结核刚开始发育，至中谊村段达到最富集阶段。凝灰质硅质岩的年龄较好地将川南地区兴凯运动Ⅰ幕活动最强烈的时期约束在~539 Ma。上扬子地区埃迪卡拉纪—寒武纪之交沉积序列和建造的时空变化表明，尽管该区域当时属于克拉通区，却显示出相当的活动特征，陆块整体稳定程度较差。

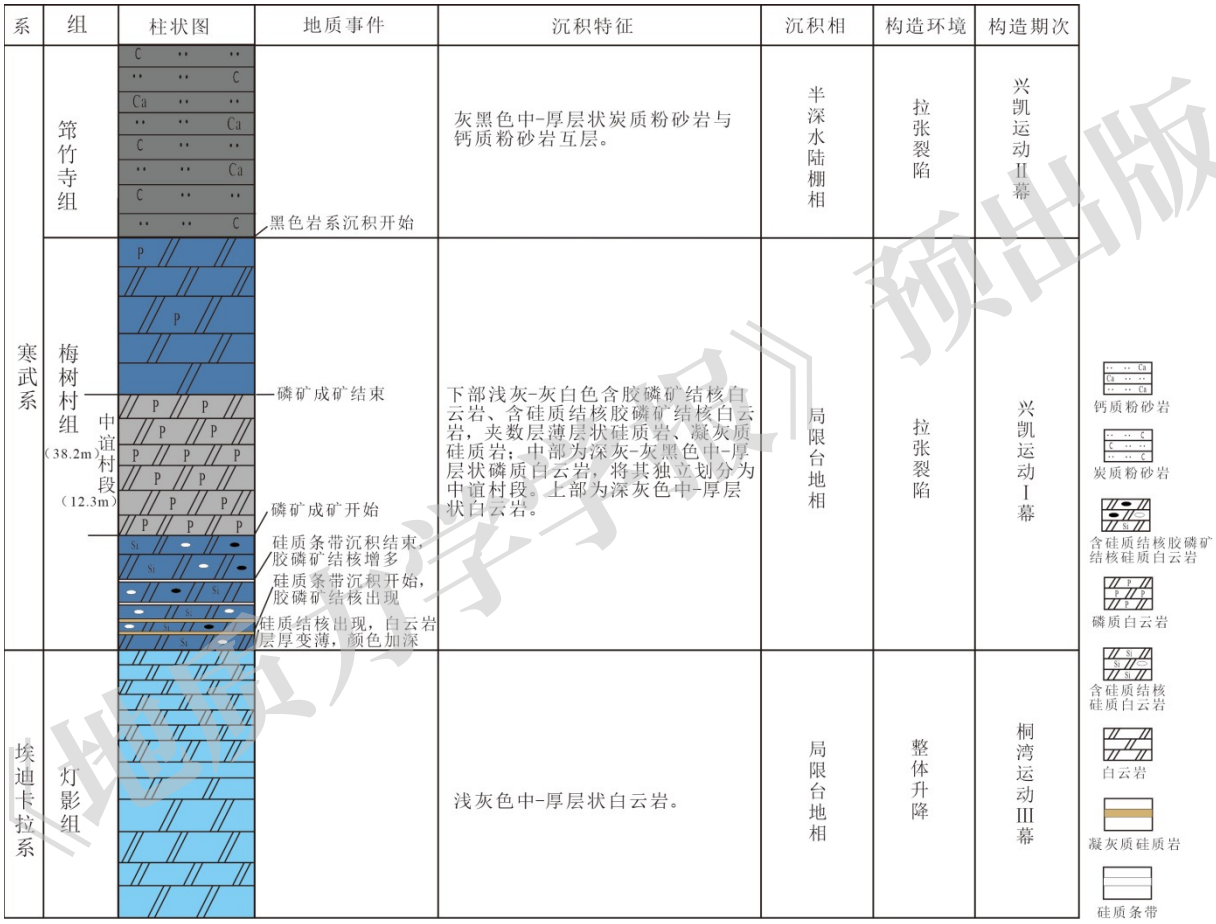


图6　川南雷波地区梅树村组及邻层综合柱状图

Fig.6 Comprehensive stratigraphic column of the Meishucun Formation and adjacent strata in the Leibo area, southern Sichuan

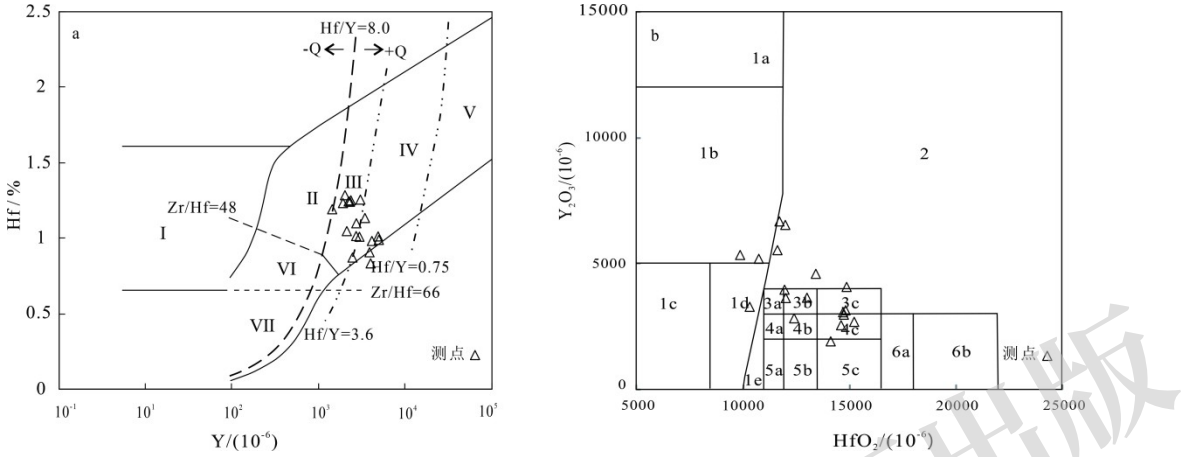
4.2　凝灰岩类型及大地构造背景属性

相较于年代学研究，关于梅树村组凝灰岩的原岩类型及形成背景的研究较少。部分学者对滇东梅树村剖面的凝灰岩进行了元素地球化学研究，认为其原岩为流纹岩类的酸性火山岩，并推测火山喷发事件与板块汇聚有关（Xing et al.，2015；张宗领，2025）；Zhou et al.（2014）对扬子地区早寒武世时期的凝灰岩进行了元素地球化学研究，认为年龄在540~535 Ma和526~518 Ma的凝灰岩具有板内岩浆的特征。Yang et al.（2022）通过对滇东梅树村剖面凝灰岩进行锆石Hf-O同位素与全岩地球化学分析，认为其火山灰岩浆成分来自地壳，形成于拉伸构造环境。

此次研究的凝灰质硅质岩层位低于梅树村剖面已报道的凝灰岩的发育层位，该时期处于构造体制转换的关键阶段，不同演化阶段的岩浆可能导致火山灰的性质存在较大差异。此外，凝灰岩赋存于白云岩、磷块岩和硅

《地质力学学报》预出版

质岩中，沉积过程中可能混入陆源碎屑物质；同时，凝灰岩在沉积过程中存在一系列化学物质交换的过程，即沉积过程基本属于开放体系，而非典型的封闭体系。因此，常规地球化学数据是否能有效客观地反映凝灰岩的特征值得商榷。近年来，随着锆石测年技术的发展，利用锆石微量元素地球化学特征进行原岩判别、形成环境分析及岩浆深部过程研究等也出现了新的思路和进展（Grimes et al.，2015；赵志丹等，2018）。



I—金伯利岩；Ⅱ—超镁铁质、镁铁质和中性岩；Ⅲ—含石英的中酸性岩；Ⅳ—具有高 SiO_2 含量的酸性岩；V—云英岩；VI—碱性杂岩中的碱性岩和碱性交代岩；Ⅶ—碳酸盐岩；−Q—石英不饱和熔体；+Q—石英饱和/过饱和熔体

图 b 中部分子区为多种岩石类型锆石成分的重叠域，单一子区不代表唯一岩石归属：1a—拉斑质斜长花岗岩；1b、1c、1d、1e—固溶线上碱性花岗岩/流纹岩；1c、1d、1e—碱性/过碱性正长岩/粗面岩；1c-夏威夷岩和碱性玄武岩；

1e、2、3a、3b、3c、4a、4b、4c—固溶线下碱性花岗岩/流纹岩；4a、4b、4c、5a、5b、5c、6a、6b—中基性钙碱性岩石；

5a、5b、5c—钙碱性花岗岩/流纹岩；4a、4b,、5a、5b—高钾钙碱性或 Mg-K 花岗岩/流纹岩；4c、5a、5b、5c—亚碱性或 Fe-K 花岗岩/流纹岩；3b、3c、4b、4c、5b、5c、6a、6b—过铝质斑状花岗岩/流纹岩；3c、4c、5c、6a—过铝质淡色花岗岩；

3c、4c、5c、6a—原地产生的过铝质淡色花岗岩

a—Y−Hf 图解（底图据 Belousova et al.，2002 修改）；b—HfO_2−Y_2O_3 图解（底图据 Pupin，2000 修改）

图 7　川南雷波地区梅树村组凝灰质硅质岩锆石微量元素图解

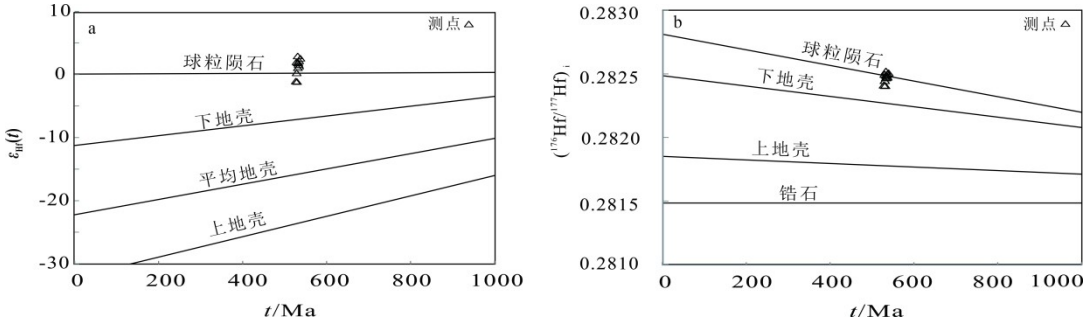
Fig. 7 Zircon trace element discrimination diagrams for tuffaceous siliceous rocks of the Meishucun Formation in the Leibo area, southern Sichuan

(a)Y vs. Hf diagram (modified after Belousova et al., 2002); (b)HfO_2vs. Y_2O_3diagram (modified after Grimes et al., 2015)

I−kimberlite; II−ultramafic, mafic and intermediate rocks; III−quartz-bearing intermediate acid rocks; IV−acid rocks with high SiO_2 content; V−greisen; VI−alkaline rocks and alkaline metasomatic rocks in alkaline complexes; VII−carbonate

Some fields in panel b represent overlapping compositional domains of zircons from different rock types; therefore, no single field corresponds exclusively to one rock type: 1a−tholeiitic plagiogranite; 1b, 1c, 1d, and 1e−alkaline granite/rhyolite on solid solution line; 1c, 1d, and 1e−alkaline/peralkaline syenite/trachyte; 1c−Hawaiites and alkaline basalt; 1e, 2, 3a, 3b, 3c, 4a, 4b, and 4c−alkaline granite/rhyolite below the solid solution line; 4a, 4b, 4c, 5a, 5b, 5c, 6a, and 6b−intermediate to mafic calc-alkaline rocks; 5a, 5b, and 5c−calc-alkaline granite/rhyolite; 4a, 4b, 5a, and 5b−high-K calc-alkaline or Mg-K granites/rhyolite; 4c, 5a, 5b, and 5c−alkaline or Fe-K granite/rhyolite; 3b, 3c, 4b, 4c, 5b, 5c, 6a, and 6b−peraluminous porphyritic granite/rhyolite; 3c, 4c, 5c, and 6a−peraluminous leucogranite; 3c, 4c, 5c, and 6a−in situ produced peraluminous leucogranites

此次研究的锆石微量元素 Y−Hf 图解显示，样品数据点均落入含石英的中酸性岩和具有高 SiO_2 含量的酸性岩区域（图 7a）；在 HfO_2−Y_2O_3 图解中，绝大部分数据点落入固溶线下的碱性花岗岩/流纹岩区域（图 7b）。综合上述特征，推测其凝灰质的成分为流纹质。样品 $\varepsilon_{Hf}(t)$值为−1.2~2.9，除 6 号和 12 号测点为负值外，其余 10 个测点均为正值。在 $\varepsilon_{Hf}(t)$–t 和($^{176}Hf/^{177}Hf)_i$–t 图解（图 8）上，样品测试点主要分布于球粒陨石线上方；其二阶段模式年龄 T_{DM2} 为 1312~1567 Ma，远大于岩浆的形成年龄（539 Ma），说明岩浆物质不可能主要来自亏损地幔（吴福元等，2007）。结合锆石形态特征和流纹质成分判别结果，推测岩浆由新生下地壳部分熔融形成。



t—锆石结晶年龄；$\varepsilon_{Hf}(t)$—t 时刻锆石 Hf 同位素比值；$(^{176}Hf/^{177}Hf)_i$—锆石初始 Hf 同位素比值

a—$\varepsilon_{Hf}(t)$–t 图解（底图据吴福元等，2007 等修改）；b—$(^{176}Hf/^{177}Hf)_i$–t 图解（底图据吴福元等，2007 修改）

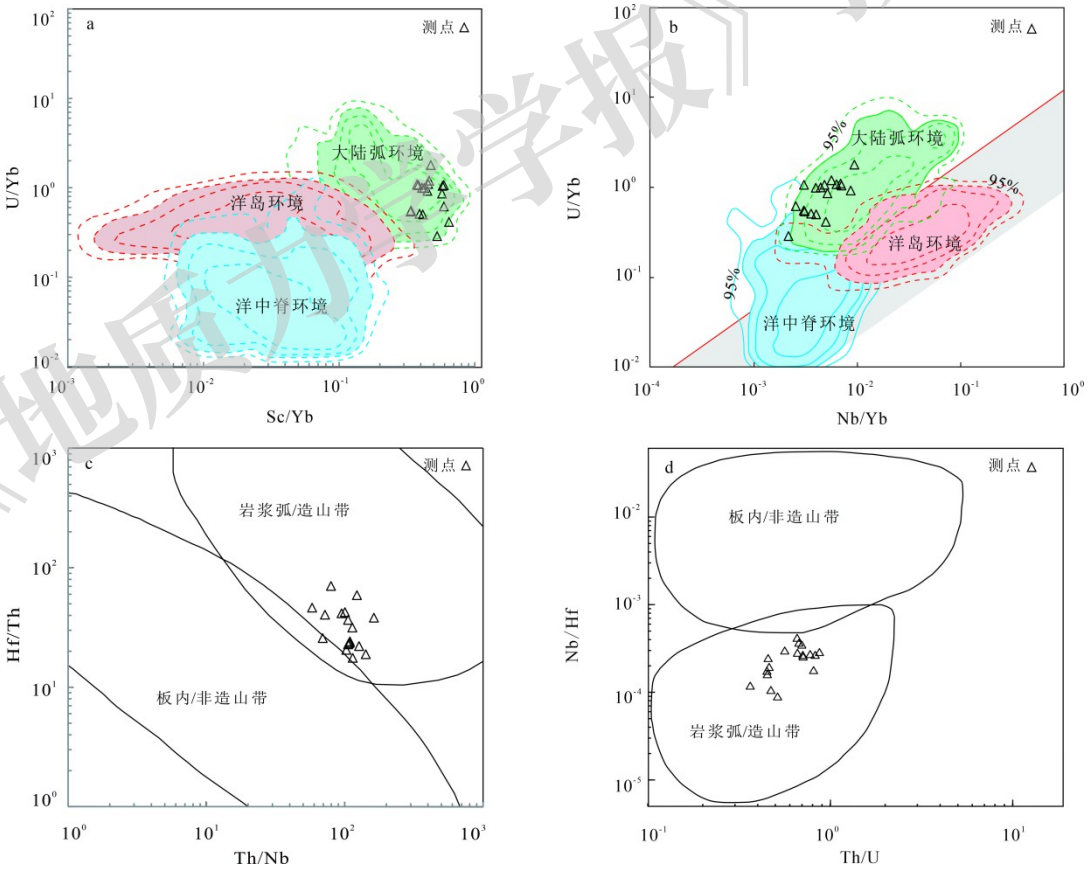
图 8　川南雷波地区梅树村组凝灰质硅质岩锆石 Hf 同位素图解

Fig. 8 Zircon Hf isotope diagrams for tuffaceous siliceous rocks of the Meishucun Formation in the Leibo area, southern Sichuan

(a) $\varepsilon_{Hf}(t)$ vs. t diagram (modified after Wu et al., 2007); (b) $(^{176}Hf/^{177}Hf)_i$ vs. t diagram (modified after Wu et al., 2007)

t–zircon crystallization age; $\varepsilon_{Hf}(t)$–zircon Hf isotopic composition at time t; $(^{176}Hf/^{177}Hf)_i$–initial zircon Hf isotopic ratio

扬子地区在埃迪卡拉纪—早寒武世的大地构造背景总体处于伸展构造背景。但此次研究的锆石微量元素构造环境判别结果显示，在 Sc/Yb–U/Yb 图解和 U/Yb–Nb/Yb 图解中，样品的数据点均落入大陆弧形区域（图 9a、9b）；在 Th/Nb–Hf/Th 图解和 Th/U–Nb/Hf 图解中，数据点均落入岩浆弧/造山带环境区域（图 9c、9d）。



a—Sc/Yb–U/Yb 图解（底图据 Grimes et al.，2015 修改）；b—U/Yb–Nb/Yb 图解（底图据 Grimes et al.，2015 修改）；c—Th/Nb–Hf/Th 图解（底图据 Yang et al.，2012 修改）；d—Th/U–Nb/Hf 图解（底图据 Yang et al.，2012 修改）

图 9　川南雷波地区梅树村组凝灰质硅质岩锆石微量元素图解

Fig. 9 Zircon trace element discrimination diagrams for tuffaceous siliceous rocks of the Meishucun Formation in the Leibo area, southern Sichuan

(a) Sc/Yb vs. U/Yb diagram (modified after Grimes et al., 2015); (b) U/Yb vs. Nb/Yb diagram (modified after Grimes et al., 2015);

《地质力学学报》编辑出版

(c)Th/Nb vs. Hf/Th diagram (modified after Yang et al., 2012); (d) Th/U vs. Nb/Hf diagram (modified after Yang et al., 2012)

扬子克拉通在埃迪卡拉纪晚期—早寒武世处于相对稳定或拉张的构造背景，未见成规模的岩浆活动记录，这一时期广泛分布的凝灰岩很可能来自于扬子板块外部。已有研究表明，冈瓦纳大陆是由东冈瓦纳和西冈瓦纳在 550~500 Ma 期间通过莫桑比克洋碰撞拼合而成，并形成了东非造山带（陈杰等，2022）。在土耳其、伊朗和阿富汗的地区，原特提斯洋于约 570 Ma 或更早向冈瓦纳俯冲，该俯冲作用持续至约 530 Ma，代表一个长时间岩浆弧（Moghadam et al.，2015；Rossetti et al.，2015；Beyarslan et al.，2016）。Xu et al.（2015）认为，寒武世早期华南克拉通与澳大利亚之间存在洋内岛弧岩浆作用，最终导致二者的碰撞，并据此推测 Kuunga 缝合带向北延伸至华南克拉通与澳大利亚之间。扬子地区埃迪卡拉纪—早寒武世过渡期的凝灰岩的形成可能与冈瓦纳大陆碰撞拼合或周缘微板块向冈瓦纳大陆俯冲作用密切相关。

5 结论

（1）川南雷波地区梅树村组下部发现 3 层凝灰质硅质岩，其底部层位 18 颗锆石的谐和年龄为 539.3±2.7 Ma，为寒武纪纽芬兰世幸运期火山灰沉积形成。结合区域上广泛分布的同期凝灰岩年代学数据，将梅树村组时代厘定为寒武纪纽芬兰世幸运期。川南−滇东地区埃迪卡拉系—寒武系界线应位于梅树村组待补段与下伏灯影组界面处。

（2）凝灰质硅质岩发现于中谊村段磷块岩层之下，其锆石年龄较好地约束了磷块岩沉积下限，同时将川南地区兴凯运动Ⅰ幕活动最强烈的时期约束在~539 Ma。

（3）样品 $\varepsilon_{Hf}(t)$值为−1.2~2.9，二阶段模式年龄 T_{DM2} 为 1312~1567 Ma。锆石微量元素及 Hf 同位素组成表明，凝灰质成分为流纹质，物质主要来自新生下地壳的部分熔融。岩浆可能形成于岩浆弧环境，凝灰质的形成可能与冈瓦纳大陆碰撞拼合或周缘微板块向冈瓦纳大陆俯冲碰撞有关。

致谢：感谢项目组潘江涛、刘红豪同志在剖面测制、样品采集提供的帮助；感谢中国地质科学院地质研究所任留东研究员在论文撰写过程中提供的指导；感谢编辑部老师和匿名审稿专家提供的宝贵意见！

《地质力学学报》预出版

作者贡献声明：袁永盛负责数据分析、研究方法和论文写作；吴亮负责论文构思和参与研究方法修改；张耀堂、李文辉、王万能、张宏辉和赵见波参与数据采集、测试、分析和绘图；唐烽和张光旭参与论文修改；所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: YUAN Yongsheng performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; WU Liang conceived the study and participated in the revision of research methods; ZHANG Yaotang, LI Wenhui, WANG Wanneng, ZHANG Honghui and ZHAO Jianbo participated in data collection, testing, analysis and drawing; TANG Feng and ZHANG Guangxu participated in the revision of the paper. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References：

BELOUSOVA E, GRIFFIN W, O'REILLY S Y, et al., 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143(5): 602-622.

BEYARSLAN M, LIN Y C, BINGÖL A F, et al., 2016. Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the origin and tectonic implication of Cadomian (Ediacaran-Early Cambrian) magmatism in SE Turkey[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 130: 223-238.

CHEN C, FENG Q L, GAN Z Q, 2020. Zircon U-Pb ages and its geological significance of tuffs between Doushantuo and Liuchapo Formations at Yangtou section, Guizhou Province[J]. Earth Science, 45(3): 880-891. (in Chinese with English abstract)

CHEN D Z, WANG J G, QING H R, et al., 2009. Hydrothermal venting activities in the Early Cambrian, South China: petrological, geochronological and stable isotopic constraints[J]. Chemical Geology, 258(3-4): 168-181.

CHEN J, LIANG X, TONG M S, et al., 2022. Tectonic and sedimentary evidences for oil and gas exploration targets and prospects of the Ediacaran-Cambrian petroleum systems in the northern Oman Basin (Block 5)[J]. Geological Journal of China Universities, 28(6): 943-957. (in Chinese with English Abstract)

CHEN Q C, TANG F, ZHANG H, et al., 2024. Chronostratigraphic units and its stratotype sections of the Ediacaran (Sinian) of South China[J]. Acta Geologica Sinica, 98(6): 1649-1666. (in Chinese with English Abstract)

CHEN Q S, YANG R B, 2019. A discussion about the boundary betwwen Sinian and Cambrian in Huize area, Ne Yunnan[J]. Yunnan Geology, 38(2): 155-161. (in Chinese with English Abstract)

CHENG M, LI C, ZHOU L, et al., 2017. Transient deep-water oxygenation in the early Cambrian Nanhua Basin, South China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 210: 42-58.

COHEN K M, FINNEY S C, GIBBARD P L, et al., 2023. The ICS International Chronostratigraphic Chart [EB/OL].

CORFU F, HANCHAR J M, HOSKIN P W O, et al., 2003. Atlas of zircon textures[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 469-500.

FANG R S, LIANG Y, HUA H, et al., 2021. First report of the problematic Ediacaran fossil *Shaanxilithes* from the Jiucheng Member of Zhujiaqing section in Huize, Yunnan Province[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 60(1): 25-41. (in Chinese with English abstract)

FU D J, TONG G H, DAI T, et al., 2019. The Qingjiang biota-a Burgess Shale-type fossil Lagerstätte from the early Cambrian of South China[J]. Science, 363(6433): 1338-1342.

GRIMES C B, WOODEN J L, CHEADLE M J, et al., 2015. "Fingerprinting" tectono-magmatic provenance using trace elements in igneous zircon[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 170(5-6): 46.

HE D F, LUO B, ZHANG B J, et al., 2025. Development timing and genetic mechanism of the Deyang-Anyue rift trough[J]. Chinese Journal of Geology, 60(6): 1531-1548. (in Chinese with English Abstract)

HE T C, 2013. Petrogenesis of Ediacaran Piyuancun chert from southern Anhui Province and geochronology of basal Cambrian from Northeastern Yunnan Province[D]. Nanjing: Nanjing University. (in Chinese with English Abstract)

LI W, LIU J J, DENG S H, et al., 2015. The nature and role of Late Sinian-Early Cambrian tectonic movement in Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. Acta Petrolei Sinica, 36(5): 546-556, 563. (in Chinese with English Abstract)

LI Z Q, ZHANG Q G, LU J Y, et al., 2024. Sedimentary environment analysis of Early Cambrian phosphate in Mabian-Leibo area, southwest Sichuan[J]. Geological Review, 70(S1): 33-35. (in Chinese with English Abstract)

LIU J P, SONG S C, WANG W, et al., 2020. Protoconodont fossils for refining the Cambrian bottom and the contribution to shale gas formation along the southwest margin of Yangtze Block[J]. China Geology, 3(4): 558-566.

LIU S G, SUN W, LUO Z L, et al., 2013. Xingkai Taphrogenesis and petroleum exploration from Upper Sinian to Cambrian Strata in Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 40(5): 511-520. (in Chinese with English Abstract)

MI Y C, HUANG T P, ZHOU Q, et al., 2021. The sedimentary environment and resource potential of the newly discovered Yangchang super-large phosphate Deposit in the Zhenxiong Area, Yunnan[J]. Geology and Exploration, 57(4): 808-824. (in Chinese with English Abstract)

MI Y C, DU B, XIA J F, et al., 2024. Sedimentary environment and enrichment mineralization mechanism of the Lower Cambrian Meishucun Formation in the Yangchang phosphate deposit of Zhenxiong area, Northeastern Yunnan[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 43(5): 1099-1118. (in Chinese with English Abstract)

MOGHADAM H S, KHADEMI M, HU Z C, et al., 2015. Cadomian (Ediacaran-Cambrian) arc magmatism in the ChahJam-Biarjmand metamorphic complex (Iran): magmatism along the northern active margin of Gondwana[J]. Gondwana Research, 27(1): 439-452.

PANG Y Y, YANG R D, LI H J, et al., 2026. Enrichment mechanism and control factors of Cambrian Malu Phosphate Deposit in Huize, Yunnan[J]. Geological Review, 72(2): 527-542. (in Chinese with English Abstract)

《地质力学学报》预出版

Pupin, J P, 2000. Granite genesis related to geodynamics from Hf-Y in zircon. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 91, 245-256.

ROSSETTI F, NOZAEM R, LUCCI F, et al., 2015. Tectonic setting and geochronology of the Cadomian (Ediacaran-Cambrian) magmatism in Central Iran, Kuh-e-Sarhangi region (NW Lut Block)[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 102: 24-44.

SAWAKI Y, NISHIZAWA M, SUO T, et al., 2008. Internal structures and U-Pb ages of zircons from a tuff layer in the Meishucunian Formation, Yunnan Province, South China[J]. Gondwana Research, 14(1-2): 148-158.

SHU D G, HAN J, 2020. Core value of the Chengjiang fauna: formation of the animal kingdom and the birth of basic human organs[J]. Earth Science Frontiers, 27(6): 1-27. (in Chinese with English abstract)

TANG F, ZHANG S S, GAO L Z, et al., 2020. The trailblazer of animals: the fossil documents and comparative study of the first candidate GSSP Meishucun Section in China[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Publishing House. (in Chinese)

TANG F, SONG S C, ZHANG G X, et al., 2021. Enigmatic ribbon-like fossil from Early Cambrian of Yunnan, China[J]. China Geology, 4(2): 205-214.

TOSTEVIN R, CLARKSON M O, GANGL S, et al., 2019. Uranium isotope evidence for an expansion of anoxia in terminal Ediacaran oceans[J]. Earth and Planetary Science Letters, 506: 104-112.

WANG W, ZHOU M Z, CHU Z Y, et al., 2020. Constraints on the Ediacaran-Cambrian boundary in deep-water realm in South China: evidence from zircon CA-ID-TIMS U-Pb ages from the topmost Liuchapo Formation[J]. Science China Earth Sciences, 63(8): 1176-1187.

WANG X Q, SHI X Y, JIANG G Q, et al., 2014. Organic carbon isotope gradient and ocean stratification across the late Ediacaran-Early Cambrian Yangtze Platform[J]. Science China Earth Sciences, 57(5): 919-929.

WU F Y, LI X H, ZHENG Y F, et al., 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185-220. (in Chinese with English Abstract)

WU T, YANG R D, GAO J B, et al., 2021. Age of the lower Cambrian Vanadium deposit, East Guizhou, South China: evidences from age of tuff and carbon isotope analysis along the Bagong section[J]. Open Geosciences, 13(1): 999-1012.

XING L C, ZHOU M Z, QI L, et al, 2015. Discussion on the PGE anomalies and source materials of K-bentonite (Bed 5) in the Lower Cambrian Meishucun section, Yunnan[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 34(3): 346-361.

XIONG Y W, PAN B, LYU M, et al., 2022. A restudy of carbon isotope chemostratigraphy of the Ediacaran-Cambrian transition in southern Sichuan Province[J]. Journal of Stratigraphy, 46(3): 230-244. (in Chinese with English Abstract)

XU J H, WU C Q, ZHANG Z W, et al., 2025. Zircon U-Pb ages and its geological significance of Ediacara-Cambrian tuff from Guizhou, South China[J]. Acta Geologica Sinica, 99(7): 2240-2250. (in Chinese with English Abstract)

XU X, SONG S G, SU L, et al., 2015. The 600-580 Ma continental rift basalts in North Qilian Shan, northwest China: links between the Qilian-Qaidam block and SE Australia, and the reconstruction of East Gondwana[J]. Precambrian Research, 257: 47-64.

YANG C, ZHU M Y, CONDON D J, et al., 2017. Geochronological constraints on stratigraphic correlation and oceanic oxygenation in Ediacaran-Cambrian transition in South China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 140: 75-81.

YANG C, LI X H, ZHU M Y., 2022. Tectonic regime transition of the western South China Block in early Cambrian: evidence from the Meishucun volcanic ash beds[J]. Palaeoworld, 31(4): 591-599.

YANG J H, CAWOOD P A, DU Y S, et al., 2012. Large Igneous Province and magmatic arc sourced Permian-Triassic volcanogenic sediments in China[J]. Sedimentary Geology, 261-262: 120-131.

YANG R D, LI H J, ZHANG Z X, et al., 2025. Metallogenic characteristics of the Meishucunian phosphorus deposits and relevant prospecting prediction of phosphorus resources in the Weining-Bijie area, Guizhou, China[J/OL]. Acta Mineralogica Sinica, 1-11[10-15]. https://link.cnki.net/urlid/52.1045.P.20250930.1747.002. (in Chinese with English Abstract)

YANG W T, YANG R B, WANG F H, et al., 2021. Geochemistry and genesis of phosphate rocks in the Yuhucun Formation of the Xiaomiga Deposit, Zhanyi District, Yunnan Province[J]. Geology and Exploration, 57(5): 1028-1039. (in Chinese with English Abstract)

YI Y H, LI X Y, FENG Q L, 2019. Biostratigraphy and chronostratigraphy of the Cambrian terreneuvian from the Fengziqing Section in Huize Area, northeast Yunnan[J]. Geological Science and Technology Information, 38(5): 115-125. (in Chinese with English Abstract)

YIN Z J, ZHAO F C, 2021. Origin of metazoans and the Cambrian explosion: preface[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 60(1): 1-9. (in Chinese with English abstract)

《地质力学学报》预出版

ZHANG F F, XIAO S H, KENDALL B, et al., 2018. Extensive marine anoxia during the terminal Ediacaran Period[J]. Science Advances, 4(6): eaan8983.

ZHANG X L, SHU D G, 2021. Current understanding on the Cambrian Explosion: questions and answers[J]. PalZ, 95(4): 641-660.

ZHANG Z F, LIU F, LIANG Y, et al., 2021. The Cambrian Explosion of animals and the evolution of ecosystems on Earth[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 51(6): 1065-1106. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Z F, LIANG Y, LIU F, et al., 2023. New perspectives on Cambrian Explosion: construction of the first animal consumer-driven marine ecosystem on Earth[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 62(4): 463-515. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Z L, 2025. Origin of K-bentonites near the Ediacaran-Cambrian boundary in South China and its paleoenvironmental significance[D]. Guiyang: Guizhou Normal University. (in Chinese with English Abstract)

ZHAO Z D, LIU D, WANG Q, et al., 2018. Zircon trace elements and their use in probing deep processes[J]. Earth Science Frontiers, 25(6): 124-135. (in Chinese with English Abstract)

ZHOU C M, YUAN X L, XIAO S H, et al., 2019. Ediacaran integrative stratigraphy and timescale of China[J]. Science China Earth Sciences, 62(1): 7-24.

ZHOU C M, OUYANG Q, WANG W, et al., 2021. Lithostratigraphic subdivision and correlation of the Ediacaran in China[J]. Journal of Stratigraphy, 45(3): 211-222. (in Chinese with English abstract)

ZHOU M Z, LUO T Y, LIU S R, et al., 2013. SHRIMP zircon age for a K-bentonite in the top of the Laobao Formation at the Pingyin section, Guizhou, South China[J]. Science China Earth Sciences, 56(10): 1677-1687.

ZHOU M Z, LUO T Y, HUFF W D, et al., 2014. Prominent Lower Cambrian K-bentonites in South China: distribution, mineralogy, and geochemistry[J]. Journal of Sedimentary Research, 84(10): 842-853.

ZHU M Y, LI G X, ZHANG J M, et al., 2001. Early Cambrian stratigraphy of east Yunnan, Southwestern China: a synthesis[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 40(S1): 4-39.

ZHU M Y, YANG A H, YUAN J L, et al., 2019. Cambrian integrative stratigraphy and timescale of China[J]. Science China Earth Sciences, 62(1): 25-60.

ZHU R X, LI X H, HOU X G, et al., 2009. SIMS U-Pb zircon age of a tuff layer in the Meishucun section, Yunnan, southwest China: constraint on the age of the Precambrian-Cambrian boundary[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 52(9): 1385-1392.

附中文参考文献：

陈灿，冯庆来，甘正勤，2020. 贵州遵头陡山沱组与留茶坡组界线凝灰岩的锆石 U－Pb 年龄及其地质意义[J]. 地球科学，45（3）：880-891.

陈杰，梁霄，童明胜，等，2022. 阿曼盆地北部埃迪卡拉系—寒武系油气勘探目标及前景：基于 E-C 转换期的构造与沉积证据[J]. 高校地质学报，28（6）：943-957.

陈启聪，唐烽，张恒，等，2024. 华南埃迪卡拉（震旦）系年代地层划分方案及其层型剖面[J]. 地质学报，98（6）：1649-1666.

陈庆松，杨润柏，2019. 滇东北会泽地区震旦系与寒武系界线讨论[J]. 云南地质，38（2）：155-161.

房瑞森，梁悦，华洪，等，2021. 埃迪卡拉纪晚期疑难化石 *Shaanxilithes* 在云南会泽朱家箐剖面的首现及其意义[J]. 古生物学报，60（1）：25-41.

何登发，罗冰，张本健，等，2025. 德阳—安岳裂陷槽的发育时限与成因机制[J]. 地质科学，60（6）：1531-1548.

何天辰，2013. 皖南埃迪卡拉系皮园村组硅质岩成因与滇东北寒武系底界年代学研究[D]. 南京：南京大学.

李伟，刘静江，邓胜徽，等，2015. 四川盆地及邻区震旦纪末—寒武纪早期构造运动性质与作用[J]. 石油学报，36（5）：546-556，563.

李佐强，张芹贵，卢君勇，等，2024. 川西南马边—雷波地区早寒武世磷块岩沉积环境分析[J]. 地质论评，70（S1）：33-35.

刘树根，孙玮，罗志立，等，2013. 兴凯地裂运动与四川盆地下组合油气勘探[J]. 成都理工大学学报（自然科学版），40（5）：511-520.

米云川，黄太平，周骞，等，2021. 云南镇雄地区新发现羊场超大型磷矿沉积环境及资源潜力分析[J]. 地质与勘探，57（4）：808-824.

米云川，杜斌，夏建峰，等，2024. 滇东北镇雄羊场磷矿区下寒武统梅树村组沉积环境及富集成矿机制[J]. 岩石矿物学杂志，43（5）：1099-1118.

庞雨雨，杨瑞东，李洪建，等，2026. 云南会泽寒武系马路磷矿床富集机理与控制因素[J]. 地质论评，72（2）：527-542.

舒德干，韩健，2020. 澄江动物群的核心价值：动物界成型和人类基础器官诞生[J]. 地学前缘，27（6）：1-27.

唐烽，张世山，高林志，等，2020. 动物世界的先驱—中国第一个候选“金钉子”梅树村剖面实证记录及对比[M]. 昆明：云南科技出版社.

王伟，周明忠，储著银，等，2020. 华南深水区埃迪卡拉系-寒武系界线制约：来自留茶坡组顶部锆石 CA-ID-TIMS U-Pb 年龄证据[J]. 中国科学：地球科学，50（6）：819-831.

《地质力学学报》预出版

王新强，史晓颖，JIANG G Q，等，2014. 华南埃迪卡拉纪-寒武纪过渡期的有机碳同位素梯度和海洋分层[J]. 中国科学：地球科学，44（6）：1142-1454.

吴福元，李献华，郑永飞，等，2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报，23（2）：185-220.

熊轶伟，潘兵，吕苗，等，2022. 四川南部埃迪卡拉纪-寒武纪过渡时期碳同位素地层学再研究[J]. 地层学杂志，46（3）：230-244.

徐进鸿，吴承泉，张正伟，等，2025. 贵州埃迪卡拉系—寒武系凝灰岩中锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质学报，99（7）：2240-2250.

杨瑞东，李洪建，张宗祥，等，2025. 贵州威宁-毕节一带梅树村期磷矿成矿特征及找矿预测[J/OL]. 矿物学报，1-11[10-15]. https://link.cnki.net/urlid/52.1045.P.20250930.1747.002.

杨万涛，杨润柏，王福华，等，2021. 云南沾益小米戛磷矿渔户村组磷块岩地球化学特征及成因分析[J]. 地质与勘探，57（5）：1028-1039.

易雨昊，李先昀，冯庆来，2019. 滇东北会泽蜂子箐剖面寒武系纽芬兰统生物地层学和年代地层学[J]. 地质科技情报，38（5）：115-125.

殷宗军，赵方臣，2021. 动物起源和寒武纪大爆发：序言[J]. 古生物学报，60（1）：1-9.

张志飞，刘璠，梁悦，等，2021. 寒武纪生命大爆发与地球生态系统起源演化[J]. 西北大学学报（自然科学版），51（6）：1065-1106.

张志飞，梁悦，刘璠，等，2023. 寒武纪生命大爆发新解与地球海洋动物生态系统建立[J]. 古生物学报，62（4）：463-515.

张宗领，2025. 华南埃迪卡拉系-寒武系界线附近钾质斑脱岩的成因及其古环境意义[D]. 贵阳：贵州师范大学.

赵志丹，刘栋，王青，等，2018. 锆石微量元素及其揭示的深部过程[J]. 地学前缘，25（6）：124-135.

周传明，袁训来，肖书海，等，2019. 中国埃迪卡拉纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学：地球科学，49（1）：7-25.

周传明，欧阳晴，王伟，等，2021. 中国埃迪卡拉纪岩石地层划分和对比[J]. 地层学杂志，45（3）：211-222.

周明忠，罗泰义，刘世荣，等，2013. 贵州江口平引老堡组顶部的锆石 SHRIMP 年龄与对比意义[J]. 中国科学：地球科学，43（7）：1195-1206.

朱茂炎，杨爱华，袁金良，等，2019. 中国寒武纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学：地球科学，49（1）：26-65.

朱日祥，李献华，侯先光，等，2009. 梅树村剖面离子探针锆石 U-Pb 年代学：对前寒武纪-寒武纪界线的年代制约[J]. 中国科学 D 辑：地球科学，39（8）：1105-1111.

《地质力学学报》预出版