

扬子克拉通庙湾异剥钙榴岩的发现及其石榴子石 U-Pb 定年

吕畅^{1,2}, 王浩^{1,2*}, 杨进辉^{1,2}, 吴石头^{1,2}, 闫垚琪^{1,2}

1.中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029

2.中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

摘要: 庙湾蛇绿混杂岩是扬子克拉通出露的规模最大的超基性-基性混杂岩体之一, 但因缺乏可靠的年代学约束, 其构造演化过程尚不明确。本研究在湖北宜昌庙湾蛇绿岩套中首次识别并厘定了一种异剥钙榴岩(命名为庙湾异剥钙榴岩), 同时对其石榴子石进行了主微量元素分析和高分辨率的 LA-SF-ICP-MS 原位微区 U-Pb 定年。庙湾异剥钙榴岩呈脉状产出于蛇纹石化橄榄岩中, 主要矿物包括石榴子石、透辉石、葡萄石等。对石榴子石进行直接原位 U-Pb 定年, 获得了 $897\pm 24\text{Ma}$ 的精确年龄, 该年龄被解释为异剥钙榴岩的形成时代。庙湾异剥钙榴岩的发现为证明庙湾超基性-基性混杂岩属于洋壳残片提供了关键的岩石学证据。岩石产状、矿物组合及石榴子石主微量元素特征则指示该异剥钙榴岩的形成可能与洋底蛇纹石化富 Ca 流体交代有关。结合前人研究揭示庙湾蛇绿岩形成于 $\geq 900\text{Ma}$, 指示扬子克拉通陆核区在新元古代早期可能还存在一个有限的洋盆。

关键词: 扬子克拉通, 庙湾蛇绿岩, 异剥钙榴岩, 石榴子石 U-Pb 定年。

中图分类号: P597.3

收稿日期: 2025-11-15

Discovery of rodingite in the Miaowan area of the Yangtze craton and its Garnet U-Pb Geochronology

Lü Chang^{1,2}, Wang Hao^{1,2*}, Yang Jinhui^{1,2}, Wu Shitou^{1,2}, Yan Yaoqi^{1,2}

1. State Key Laboratory of Lithospheric and Environmental Coevolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: The Miaowan ophiolitic complex in the Yangtze Craton represents one of the largest exposed ultramafic-mafic complexes, yet its tectonic evolution remains contentious due to lack of robust geochronological constraints. Here, we report the first discovery of rodingite (named the Miaowan rodingite) from the Miaowan ophiolite in Yichang, Hubei Province. We present comprehensive major and trace element data, together with high-resolution in-situ U-Pb dating for garnets from this rock using LA-SF-ICP-MS. The Miaowan rodingite occurs as veins within serpentinized peridotite and is primarily composed of garnet, diopside, and prehnite. In-situ dating of garnet grains yielded a precise lower intercept age of $897\pm 24\text{ Ma}$, which is interpreted as the timing of rodingitization. This discovery offers key petrological evidence for the oceanic crust origin of the Miaowan complex. The field relationships, mineral assemblage, and geochemistry of

基金项目: 国家自然科学基金项目(42322203、42288201)、地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(2024ZD1001306, 2025ZD1005300)、和中国科学院项目(XDB0710000)资助

作者简介: 吕畅(2000-), 男, 硕士研究生, 岩石学专业, 研究方向主要为前寒武纪陆壳演化。

E-mail: lvchang@mail.iggcas.ac.cn

*通讯作者: 王浩, 男, 1986 年生, 博士, 研究员, 主要从事前寒武纪地质学研究. E-mail:

wanghao@mail.iggcas.ac.cn, ORCID: 0000-0002-0021-7563

garnets consistently suggest that the rodingite was formed by metasomatism involving Ca-rich fluids derived from serpentinization in an oceanic setting. Integrated with previous studies, our results reveal that the Miaowan ophiolite formed at $\geq 900\text{Ma}$, implying the possible existence of a limited oceanic basin in the Yangtze cratonic nucleus during early Neoproterozoic.

Key words: Yangtze Craton, Miaowan Ophiolite, rodingite, garnet U-Pb age

引言

异剥钙榴岩最早发现于新西兰 D'Urville 岛, 并以当地河流 Rodin River 命名。目前普遍认为, 异剥钙榴岩是一种主要由钙质石榴子石和其他富钙含水矿物(如绿帘石/黝帘石、角闪石、绿泥石、葡萄石、符山石以及含有结构羟基的钙质辉石等)组成的交代岩(Fettes and Desmons, 2007; Bach and Klein, 2009)。其原岩类型多样, 可为超基性岩、基性岩、酸性岩甚至砂岩等; 形成的矿物组合亦复杂多变, 可划分为葡萄石异剥钙榴岩、石榴子石异剥钙榴岩和符山石异剥钙榴岩等(Li *et al.*, 2007; Zhao *et al.*, 2023)。异剥钙榴岩常以岩墙或岩脉的形式产出蛇绿岩套的超镁铁质单元中, 通常被认为是橄榄岩蛇纹石化过程中释放的富 Ca 流体对基性岩墙或包体进行交代的产物, 是岩石圈从深部就位至浅表并与水圈相互作用的直接产物, 也是蛇绿岩套中超基性单元区别于层状侵入体等板内超基性岩的重要岩石学标志。由于异剥钙榴岩脉相较于其超镁铁质围岩抗风化能力更强, 故被部分学者视为识别古缝合带的重要标志之一(倪志耀等, 2005)。因此, 在古老地块中识别产出蛇纹石化超镁铁质岩中的异剥钙榴岩脉, 对厘定蛇绿岩和查证板块缝合带位置具有重要意义(Zhao *et al.*, 2023)。然而, 准确限定超基性岩形成及其蛇纹石化时代一直是同位素年代学的难点。异剥钙榴岩作为蛇纹石化过程中的“副产品”, 为限定超基性岩形成及其蛇纹石化时代提供了理想的研究对象。钙质石榴子石是异剥钙榴岩化过程中形成的标志性矿物。近年来, 随着高分辨高灵敏度单接收磁式质谱仪(HR-SF-ICP-MS)性能的提升及激光剥蚀系统(LA)的改进, 基于 LA-HR-SF-ICP-MS 分析技术的低 U 含量石榴子石原位微区 U-Pb 定年已成为可能(Millonig *et al.*, 2020; Yan *et al.*, 2025), 为精确测定异剥钙榴岩形成时代提供了最直接可靠的技术支撑(Ran *et al.*, 2024)。

扬子克拉通作为中国三大主要克拉通之一, 其主体被新元古代至新生代巨厚的沉积盖层广泛覆盖, 并出露大面积的新元古代和中生代岩浆岩。该克拉通的太古宙-古元古代变质基底仅见于北部的鱼洞子、后河、陡岭、黄土岭, 西部的大红山、河口、撮科以及中北部的崆岭和钟祥等局部地区(图 1)。其中, 崆岭地区的基底岩石类型最为丰富, 出露规模最大, 被视为扬子克拉通的主要陆核(凌文黎等, 1998)。在南崆岭高级变质地体内, 发育一套强变形、中级变质的基性-超基性岩组合, 主要包括蛇纹石化纯橄岩、方辉橄榄岩、似层状斜长角闪岩(变玄武岩)、变质辉长岩、变质辉绿岩以及夹于其中的变质沉积岩。由于这些岩石变形强烈, 变质程度高, 且多呈构造断层接触, 早期研究将其归为基底崆岭杂岩的一部分, 或将超基性岩解释为阿尔卑斯型残留地幔岩而单独划分(王岳军等, 1995)。近年来, 基于野外地质调查、全岩地球化学与锆石 U-Pb 定年的研究, 认为它们共同构成一套混杂堆积的中-新元古代大洋蛇绿岩残片, 被命名为庙湾蛇绿岩套(彭松柏等, 2010)。然而, 该套岩石中不同基性岩的锆石 U-Pb 年龄跨度达 2 亿年(1100-900Ma), 可能存在不同期次、不类型岩石的混合(Deng *et al.*, 2017), 不符合经典蛇绿岩套应具备的岩石同时性要求; 超基性岩也缺乏可靠的高精度年代学约束, 不同课题组给出的 Sm-Nd 等时线年龄差异显著(彭松柏等, 2010; 邱啸飞等, 2015)。此外, 前人在庙湾蛇绿岩中从未报道过异剥钙榴岩脉——该类岩石是现代蛇绿岩套中反映大洋岩石圈地幔与海水相互作用的典型标志。

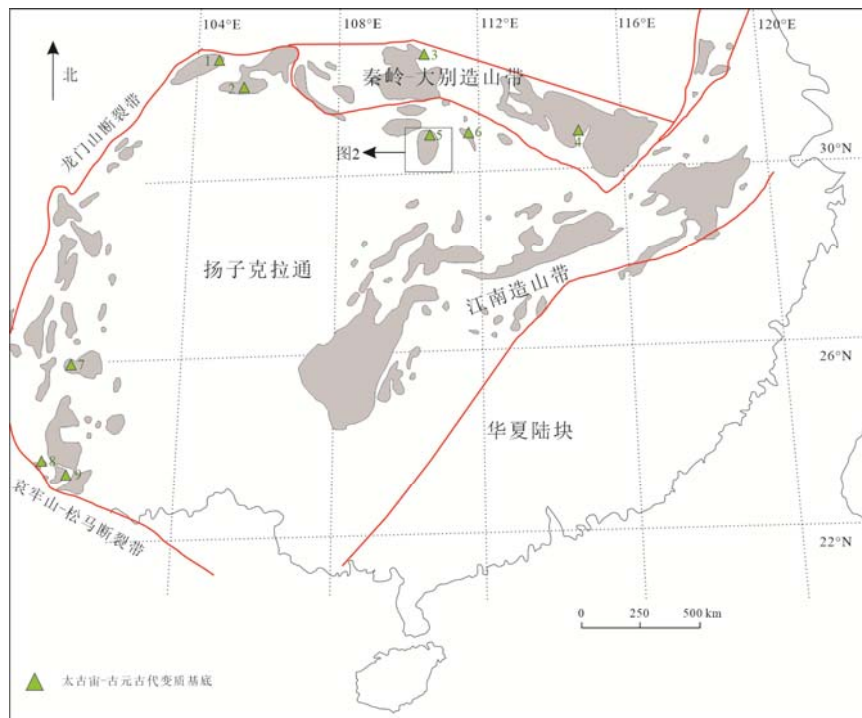


图1 扬子克拉通古老结晶基底分布示意图(据 Wu *et al.* (2024), Li *et al.* (2021)) (1: 鱼洞子; 2: 后河; 3: 陡岭; 4: 黄土岭; 5: 崆岭; 6: 钟祥; 7: 河口; 8: 大红山; 9: 撮科)

Fig.1 Distribution of ancient crystalline basement in the Yangtze Craton (modified after Wu *et al.* (2024), Li *et al.* (2021)) (1: Yudongzi; 2: Houhe; 3: Douling; 4: Huangtuling; 5: Kongling; 6: Zhongxiang; 7: Hekou; 8: Dahongshan; 9: Cuoke)

最近，笔者在鄂西黄陵地区庙湾基性-超基性杂岩体的蛇纹石化橄榄岩中识别出了异剥钙榴岩脉。本文对该样品开展了详细的岩相学观察，并应用最新的石榴子石 U-Pb 定年技术进行年代学分析。该发现不仅填补了庙湾蛇绿岩中异剥钙榴岩的空白，也为认识扬子克拉通新元古代演化提供了重要的岩石学和年代学依据。

1 地质背景

扬子克拉通北界以秦岭-大别-苏鲁造山带与华北克拉通相邻，西北以龙门山断裂带与松潘-甘孜地块相接，西南以哀牢山-松马断裂带和印支地块毗邻，东南以四堡/江南造山带与华夏地块相拼接（Zhao and Cawood, 2012）。位于其中北部的黄陵背斜（又称黄陵穹窿）是扬子克拉通前寒武纪基底出露最为典型的区域，构成了所谓的“黄陵基底”。该基底主要由三部分构成：太古宙崆岭陆核（包括花岗片麻岩和斜长角闪岩）、古元古代高级变质表壳岩系，以及中-新元古代庙湾蛇绿混杂岩、花岗岩类和基性岩脉等。

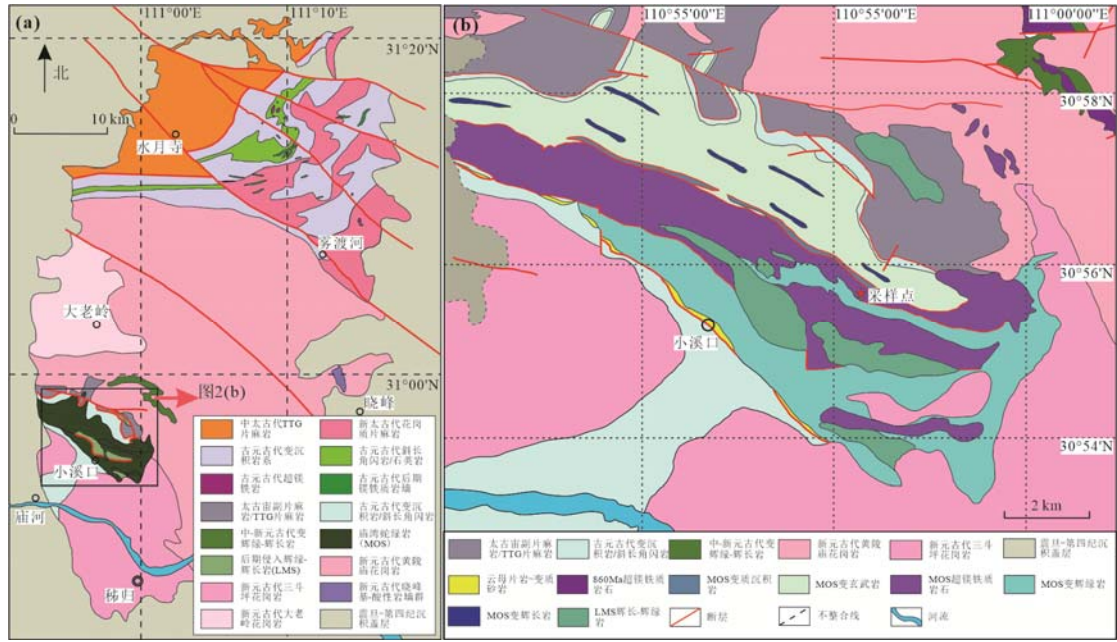


图 2 (a) 黄陵穹隆地质简图(修改自 Peng *et al.* (2012)); (b) 庙湾蛇绿混杂岩地质构造略图(修改自 Deng *et al.* (2017))

Fig.2 Geologic maps of (a) Huangling dome (modified after Peng *et al.* (2012)); (b) Miaowan Ophiolite Complex (modified after Deng *et al.* (2017))

崆岭陆核以北西向的水月寺-雾渡河断裂为界分为南、北两部分（图 2a）。北崆岭可进一步划分为东、西两个太古宙微陆块，以及其间呈北东向展布的古元古代构造蛇绿混杂岩带（Han *et al.*, 2017）。南崆岭则主要由太古宙 TTG（英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩）片麻岩和古元古代成熟度较高的变质沉积岩组成。庙湾蛇绿混杂岩位于南部崆岭陆核区，与太古宙-古元古代岩石呈构造断层接触（图 2b），是我国中南地区出露面积最大的超镁铁质岩体，长期以来受到广泛研究（王岳军等, 1995; 彭松柏等, 2010; Peng *et al.*, 2012; Deng *et al.*, 2017; Han *et al.*, 2017; Lu *et al.*, 2020; 吴鹏等, 2024）。该岩体经历了强变形改造，主要岩性包括蛇纹石化纯橄岩、方辉橄榄岩、变玄武岩、韧性变形辉长岩、变辉绿质席状岩墙，以及条带-条纹状石英岩-黑云母片岩-大理岩等变沉积岩。

地球化学分析表明，混杂岩中部分变质基性岩具有与 N-MORB 相似的平坦稀土元素（REE）配分模式，而另一些变质辉长岩和辉绿岩则具有轻稀土元素（LREE）富集和 Nb-Zr 元素亏损的特征，类似岛弧玄武岩（彭松柏等, 2010; Deng *et al.*, 2017）。尽管如此，所有类型的变质基性岩均具有高正的全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值（+6~+8）（Deng *et al.*, 2017），指示其来源于亏损地幔。具有 N-MORB 特征的岩石锆石 U-Pb 年龄约为 1100-1000Ma，而具有岛弧玄武岩特征的岩石锆石 U-Pb 年龄集中在 1000-970Ma。需要指出的是，亏损型基性岩中锆石 U-Pb 年龄的解释常存在争议，而全岩 Sm-Nd 等时线年龄误差较大（1135±54Ma, 1007±62Ma 等），难以精确厘定（Deng *et al.*, 2017）。此外，对混杂岩中变质沉积岩碎屑锆石的研究识别出 970Ma 和 900Ma 两个主要年龄峰值，结合岩石穿插关系，其沉积时代被限定在 900-860Ma（Lu *et al.*, 2020）。综合这些证据，前人提出庙湾蛇绿混杂岩所代表的大洋地壳形成于 >1100Ma，在 1000-970Ma 期间转化为洋内弧，最终于约 900Ma 增生至扬子陆块之上。

2 岩相学特征

本文研究的异剥钙榴岩呈浅色脉状产于蛇纹石化超镁铁质岩中，宽度大约 20-30cm。

围岩主要包括蛇纹石化的纯橄岩和方辉橄榄岩等（图 3a）。这些蛇纹石化的橄榄岩主要呈岩片、岩块形式出露，与北侧中-新元古代薄层变沉积岩呈高角度逆冲断层接触关系，本身呈现较大程度的面理化和碎裂化变形。异剥钙榴岩脉呈白色到淡绿色，总体产状与 Apennine 异剥钙榴岩很相似，被认为保留有原生热液结构（Haws *et al.*, 2021）。

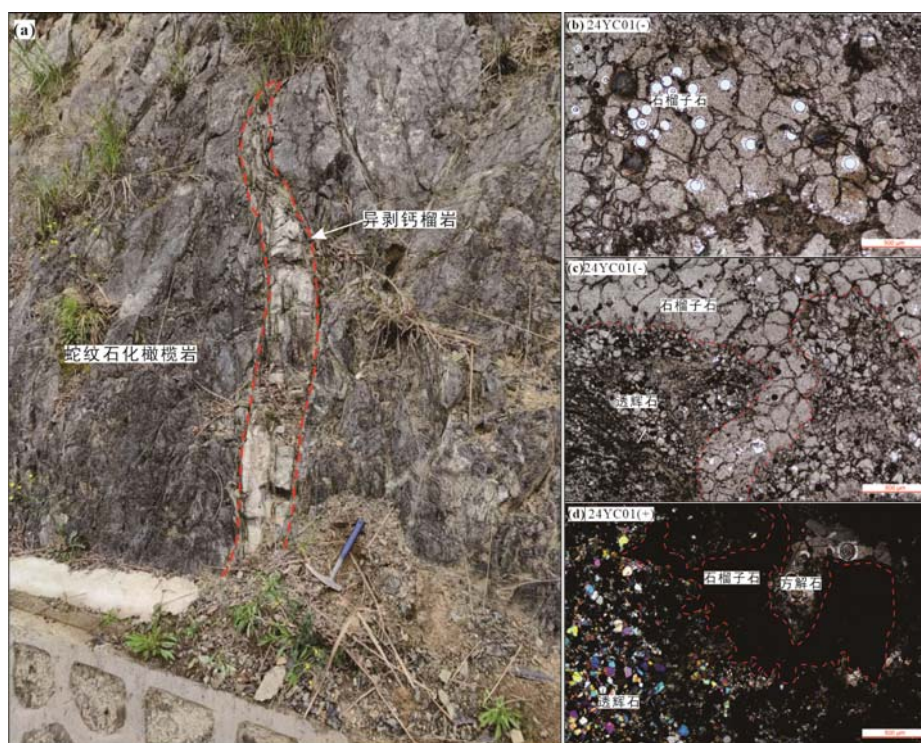


图 3 庙湾异剥钙榴岩野外产状(a)及样品镜下(b-d)照片(图 3b-c, 单偏光; 图 3d 正交偏光)
Fig.3 Photograph (a) and microphotographs (b-d) of the Miaowan rodingite (Figs 3b-c: plane polarized light; Fig. 3d: cross-polarized light)

镜下显微照片揭示庙湾异剥钙榴岩主要由石榴子石、透辉石、葡萄石、斜黧帘石、斜长石、绿泥石和不透明矿物构成，另有少量方解石等次生矿物（图 3b-d）。白色区域的石榴子石含量较高，占比可达 30%-40%，粒径多大于 200 μm ；而淡绿色区域石榴子石含量较低（20%），且粒径较小（20~50 μm ），相较于白色区域具有更高的斜黧帘石和绿泥石含量，部分区域可观察到辉石骸晶。

3 分析方法

本文对庙湾异剥钙榴岩样品 24YC01 中的石榴子石开展了原位微区主微量元素分析和 U-Pb 年代学测试。石榴子石的主量元素测试在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室完成。使用日本 JEOL 公司制造的 JXA-8100 型电子探针，测试条件为：加速电压 15kV，电子束电流约 20nA，电子束直径 3 μm 。石榴子石微量元素分析和 U-Pb 定年在中国科学院地质与地球物理研究所多接收-电感耦合等离子体质谱实验室完成，仪器包括德国 Coherent 公司的型号为 Geolas HD 的 193nm ArF 准分子激光剥蚀系统和美国 Thermo Scientific 公司的型号为 Element XR 的高分辨率高灵敏度单接收磁式质谱仪（HR-SF-ICP-MS）。微量元素分析采用激光能量 5.0J/cm²、激光频率 5Hz、束斑直径 32 μm 。以 ARM-1 玻璃作为外标（Wu *et al.*, 2019），NIST 610 和 BCR 玻璃作为监控标样，数据处理使用 iolite4 软件，监控标样测试值与推荐值在相对误差 10%范围内一致。U-Pb 定年分析采用激光能量 3.0J/cm²、频率为 5Hz、束斑直径 90 μm 。以 Willsboro 石榴子石作为主要校正标样（Seman *et al.*, 2017），

MKWB 和 Stanley 石榴子石作为监控标样 (Yang *et al.*, 2025)。考虑到该实验室进行石榴子石 U-Pb 定年的长期外部重现性为~2.5% (RSD)，因此最终报道的 U-Pb 年龄交点误差中包含了该长期不确定度。实验过程中同步分析了 NIST 612 和 ARM-3 玻璃标样，用于 Pb、Th 和 U 含量的校正和质量监控。具体石榴子石 U-Pb 定年流程参见 Yang *et al.* (2025)。

4 测试结果

4.1 主微量元素

石榴子石主量元素测试结果列于附表 S1。数据显示 24YC01 样品中的石榴子石成分比较均一，均具有明显较高的 CaO (35.0-37.8 wt. %) 含量以及极低的 MgO (0.003-0.172 wt. %)、FeO (0.32-4.22 wt. %) 和 MnO (0.01-0.18 wt. %) 含量。将主量元素数据投到石榴子石成分三角图 (图 4) 上后，可以明显看出这些石榴子石中钙铝榴石组分大于 90%。

对 24YC01 样品薄片不同区域的石榴子石进行了原位微区微量元素分析，实验结果如附表 S2 所示。分析结果显示这些石榴子石的 REE 含量较低，呈现明显的 Eu 正异常 (Eu/Eu* 普遍大于 2) (图 5)，大部分石榴子石 U 含量在 0.10-1.0ppm 之间。为确保后续 U-Pb 定年结果的准确性，本文选取了几处 U 含量较高的点位，在这些点位周边集中进行石榴子石原位微区 U-Pb 定年分析。

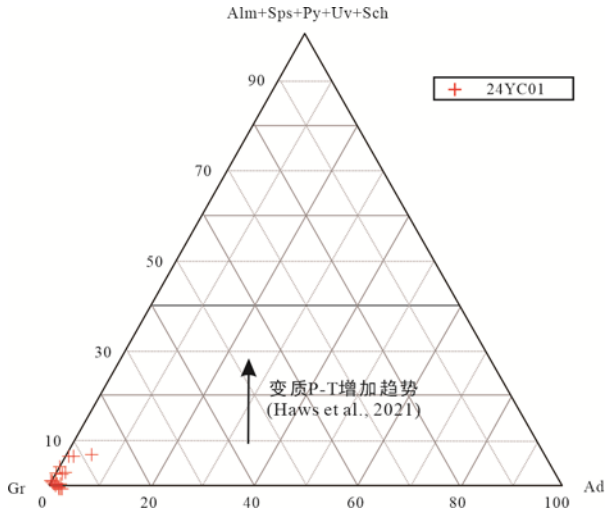


图 4 异剥钙榴岩 24YC01 石榴子石主量元素三角图解. Ad: 钙铁榴石; Alm: 铁铝榴石; Gr: 钙铝榴石; Py: 镁铝榴石; Sch: 钛榴石; Sps: 锰铝榴石; Uv: 钙铬榴石.

Fig.4 Ternary diagram showing major element compositions of garnets from rodingite sample 24YC01. Ad: Andradite; Alm: Almandine; Gr: Grossular; Py: Pyrope; Sch: Schorlomite; Sps: Spessartine; Uv: Uvarovite.

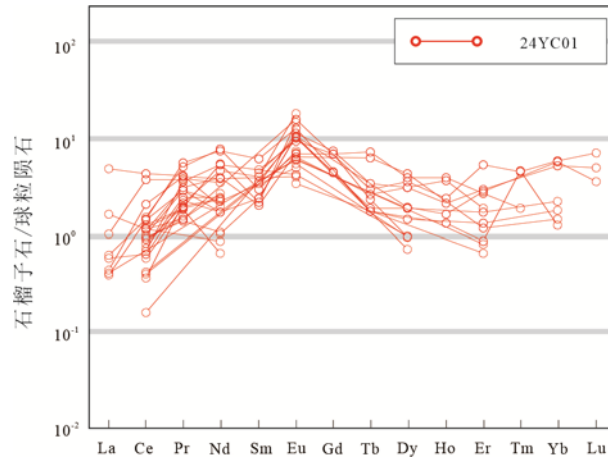


图5 异剥钙榴岩 24YC01 石榴子石 REE 球粒陨石标准化配分图 (球粒陨石归一化值来自 Sun and McDonough (1989))

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns for the garnets in the rodingite 24YC01 (Chondrite normalization values are from Sun and McDonough (1989))

4.2 U-Pb 年代学

本次研究对异剥钙榴岩样品 24YC01 中的石榴子石共进行了 73 个测点的 LA-HR-SF-ICP-MS U-Pb 定年分析，数据结果详见附表 S3。由于石榴子石中 U (0.003-1.52ppm) 和 Pb (0.003-4.29 ppm) 含量极低，任何小于 1 μ m 的富 U 或富 Pb 包裹体都可能显著干扰其 U-Pb 年龄结果。因此，数据分析过程中，我们剔除了所有可能存在 U 或 Pb 信号异常的分析点，最终共获得 55 个有效分析数据，其在 Tera-Wasserburg 图解上构成的不一致线下交点年龄为 897 ± 24 Ma (MSWD=2.6)。与样品同时进行分析的监控标样 MKWB 和 Stanley 的定年结果分别为 257.9 ± 6.6 Ma 和 21.74 ± 0.85 Ma，与推荐值 264.9 ± 5.8 Ma 和 23.28 ± 0.38 Ma 在误差范围内基本一致 (图 7) (Yang *et al.*, 2025)。

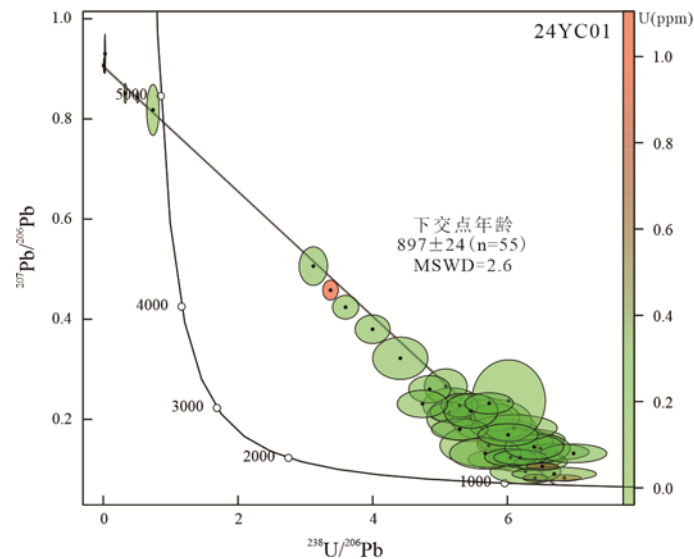


图6 异剥钙榴岩 24YC01 LA-HR-SF-ICP-MS 石榴子石 U-Pb 测年 Tera-Wasserburg 图解
Fig.6 Tera-Wasserburg LA-HR-SF-ICP-MS garnet U-Pb concordia diagram of rodingite sample 24YC01

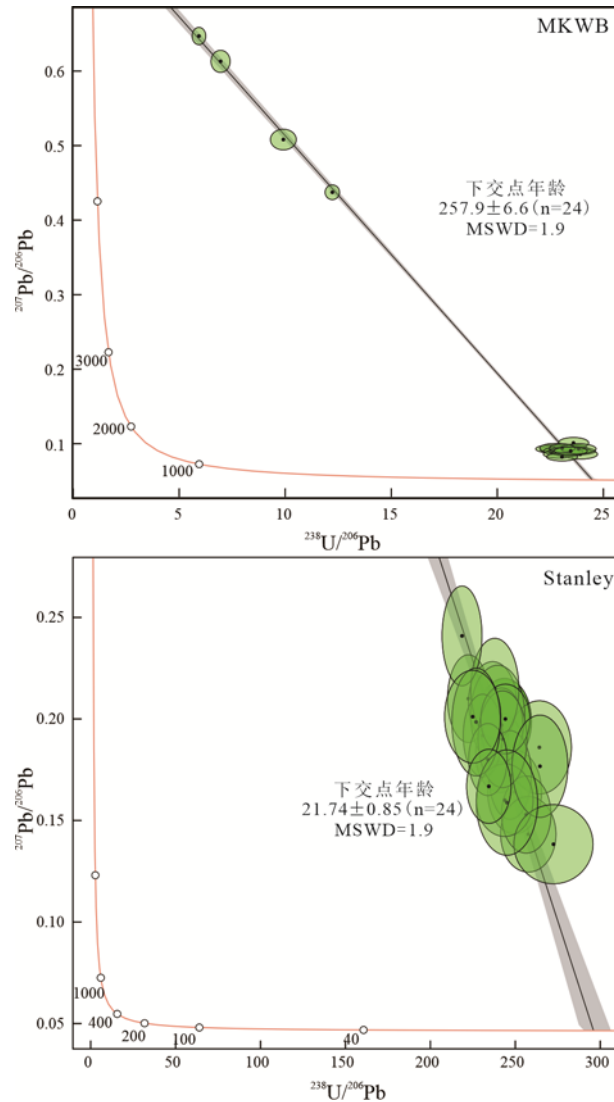


图 7 石榴子石标样 MKWB 和 Stanley LA-HR-SF-ICP-MS U-Pb 测年 Tera-Wasserburg 图解
Fig.7 Tera-Wasserburg LA-HR-SF-ICP-MS garnet U-Pb concordia diagram of reference sample
MKWB and Stanley

5 讨论

5.1 庙湾异剥钙榴岩的发现

异剥钙榴岩是一种以富钙矿物为主要组成的特殊交代岩类，虽可产于多种构造背景，但其典型产状为超基性岩中的脉状体。根据国际地质科学联合会（IUGS）变质岩分类学委员会的定义，异剥钙榴岩以钙质石榴子石（主要为钙铝榴石-钙铁榴石系列）和富钙辉石（如透辉石）为主要矿物，常伴有葡萄石、绿帘石等富钙矿物。本次在庙湾超基性岩中发现的白色脉体，其矿物组合以石榴子石和透辉石为主，并含有葡萄石和斜黧帘石等典型富钙副矿物（图 3）。电子探针成分分析结果表明，这些石榴子石端元成分以钙铝榴石占绝对优势(>90%)，属于标准的钙质石榴子石系列，符合蛇纹石化流体交代辉长岩形成的异剥钙榴岩中石榴子石的典型成分特征（Palandri & Reed, 2004）。综合其野外产状（呈脉状侵入超基性岩）、矿物共生组合及详细的矿物化学数据，我们确认该白色脉体为异剥钙榴岩。这是在庙湾蛇绿岩套中的首次明确报道，填补了该地区蛇绿岩序列中水岩相互作用产物的重要空白，为论证庙湾是否存在完整的蛇绿岩套组合提供了关键岩石学证据（彭松柏等, 2010; Deng

et al., 2017)。

5.2 庙湾异剥钙榴岩成因

异剥钙榴岩的成因通常涉及原岩性质、交代流体来源以及形成的构造环境等核心问题 (Haws *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2023; Ran *et al.*, 2024)。尽管前人提出酸性岩或者砂岩经交代也可形成此类岩石,但产于超基性岩中的脉状异剥钙榴岩,其原岩普遍被认为是侵入其中的辉长质岩墙或岩脉。本次研究中,庙湾异剥钙榴岩内石榴子石的 REE 总量极低,多数接近激光剥蚀分析的检出限(图 5)。值得注意的是,部分分析点显示出清晰的正 Eu 异常。这一地球化学特征与基性岩中斜长石所具有的 REE 配分模式高度相似,从而为“其原岩为辉长质岩墙”的推论提供了有力的成分证据。

关于交代流体的来源,主要存在三种可能:(1)洋底橄榄岩蛇纹石化释放的富 Ca 流体 (Frost *et al.*, 2013);(2)俯冲板片脱水形成的富 Ca 流体 (Dai *et al.*, 2016);(3)碱性岩浆演化晚期分异的流体 (Ran *et al.*, 2025)。碱性流体交代形成的异剥钙榴岩,其石榴子石通常富含钙铁榴石组分且 REE 含量显著偏高 (Ran *et al.*, 2024)。庙湾样品中石榴子石以钙铝榴石为主、REE 含量极低的特征与此不符,且区域上缺乏同期碱性岩浆活动的证据,故可排除此成因。俯冲板片流体通常形成于相对高压环境,导致其形成的石榴子石往往含有较高的钙铁榴石和铁铝榴石组分。更重要的是,俯冲成因的异剥钙榴岩常与高压-低温 (HP-LT)变质岩共生。无论从石榴子石的化学成分,还是从野外缺乏 HP-LT 共生组合来看,庙湾样品均不支持俯冲交代模型。庙湾异剥钙榴岩的矿物组合(石榴子石+透辉石+葡萄石+斜黝帘石+斜长石+绿泥石,且缺失符山石)指示其为低程度交代产物,这与典型的洋底交代特征一致 (Bach and Klein, 2009)。其石榴子石以钙铝榴石(>90%)为主,极低的 REE 总量以及显著的正 Eu 异常(图 5),共同指示了在低温(200-300°C)条件下,原岩中的火成斜长石与富钙交代流体反应的过程 (Cannaò, 2025)。这种流体最可能的来源就是洋底橄榄岩在蛇纹石化过程中所释放的富钙热液。综上所述,本文认为庙湾异剥钙榴岩是洋底环境下,由蛇纹石化衍生富钙流体对辉长质岩墙进行交代的产物。

5.3 石榴子石 U-Pb 年代学意义

本研究采用 LA-HR-SF-ICP-MS 对庙湾异剥钙榴岩中石榴子石进行了 73 个微区 U-Pb 定年分析,获得了 55 个有效数据点,其给出了 897 ± 24 Ma 的下交点年龄。将钙质石榴子石的 U-Pb 年龄直接解释为异剥钙榴岩化事件的时代,必须审慎评估其 U-Pb 同位素体系是否在蚀变温度下保持封闭。Pb 在石榴子石中为不相容元素,其扩散速率是控制 U-Pb 体系封闭温度的关键。理论计算表明,在合理的冷却速率(>20°C/Ma)和矿物粒径(>200 μ m)的条件下,钙铝榴石的 U-Pb 体系封闭温度可高达 900°C (Yan *et al.*, 2025)这与利用石榴子石 U-Pb 定年成功获得超高温麻粒岩(>1000°C)峰期变质时代的研究实例相符 (Shu *et al.*, 2024)。然而,异剥钙榴岩化作用普遍发生于低温环境(<500°C) (Bach and Klein, 2009; Li *et al.*, 2007)。本研究样品中普遍存在葡萄石、斜黝帘石等矿物,明确限定了其形成温度不高于 350°C,且未见后期热事件叠加的痕迹。该温度远低于钙铝榴石 U-Pb 体系的理论封闭温度。因此,我们有理由认为,石榴子石在形成后其 U-Pb 体系始终保持封闭,所获得的 897 ± 24 Ma 年龄可靠地记录了异剥钙榴岩化事件发生的时间。

洋底交代成因异剥钙榴岩通常形成于大洋岩石圈抬升并接近海底的过程中,是海水沿断裂下渗、与地幔橄榄岩发生蛇纹石化并产生富钙热液、进而交代基性岩墙的产物。因此,其形成时代应略晚于原岩(辉长质岩墙)的结晶年龄。已有的研究实例表明,多数情况下异剥钙榴岩的形成时代与原岩的形成年龄相近 (e.g., Ran *et al.*, 2025)。据此推断,庙湾蛇绿岩中洋壳组分的形成时代也应接近~900 Ma。有学者基于庙湾蛇绿岩套内变质沉积岩的碎屑锆

石年龄谱以及岩石间的穿插关系，曾限定该蛇绿岩套的仰冲就位的时间为~900Ma (Lu *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2024)。若我们的年代学解释正确，则表明庙湾所代表的古洋壳在形成后短期内即发生了仰冲就位，这可能暗示该洋盆规模有限，生命周期较短。当然，这一推论尚需未来对蛇绿岩中其他组分（如辉长岩、玄武岩）进行直接定年加以验证。目前的研究多认为庙湾蛇绿岩形成于 1100-950Ma (Peng *et al.*, 2012; Jiang *et al.*, 2016; Deng *et al.*, 2017)，而本文洋底交代型异剥钙榴岩的发现则表明庙湾洋存在的时间可能持续至 900Ma。

从更广阔的视角看，全球主要克拉通多经历了微陆块拼合的过程，扬子克拉通基底也被证明是由多个微陆核拼合而成 (邱啸飞等, 2024; 卢山松等, 2025)。近年来，在扬子克拉通内部及周缘陆续发现的中-新元古代蛇绿岩残片，逐渐揭示其可能曾存在一个古老的洋盆。地球物理资料与基底岩石年龄差异共同暗示，扬子克拉通可能由“南扬子”和“北扬子”两个具有不同演化历史的陆块拼合而成，其缝合带可能穿越四川盆地 (Xiong *et al.*, 2016; Lu *et al.*, 2020)。庙湾蛇绿岩作为该古大洋的岩石学记录，其~897 Ma 的异剥钙榴岩化年龄，为约束南北扬子陆块拼合这一关键构造事件的时代提供了新的、重要的年代学制约。这一拼合事件对于统一的扬子克拉通的形成具有里程碑式的意义，而庙湾蛇绿岩正是解读该时期陆壳演化动力学过程的一个珍贵窗口。

6 结论

1. 本文首次在庙湾蛇绿混杂岩中发现异剥钙榴岩脉，这为证实庙湾超基性-基性混杂岩属于大洋岩石圈残片提供了关键岩石学证据。
2. 初步的矿物学特征分析显示庙湾异剥钙榴岩应为洋底橄榄岩蛇纹石化过程中形成的富 Ca 流体交代基性岩墙/脉的产物，并非俯冲流体交代地幔楔的产物。
3. 利用 LA-HR-SF-ICP-MS 对石榴子石进行直接原位微区 U-Pb 定年给出了 897 ± 24 Ma 的年龄，这对应于异剥钙榴岩形成的时代，指示庙湾蛇绿岩形成 >900Ma，表明扬子克拉通陆核区在新元古代早期时仍有大洋的存在。

致谢：感谢秭归实习团队各位老师 在采样过程中给予的帮助；谷立新高级工程师和贾丽辉高级工程师在石榴子石主量元素测试中提供了重要指导，在此一并感谢。感谢期刊编委和审稿人提出的建设性意见。

吕畅：负责实验分析，论文撰写；王浩：负责统筹整个项目，把握研究思路和实验方案，野外采样，论文撰写与修改；杨进辉：负责项目指导，基金资助；吴石头：负责部分实验数据处理；闫垚琪：负责样品采集以及前期处理。

References

- Bach, W., Klein, F., 2009. The Petrology of Seafloor Rodingites: Insights from Geochemical Reaction Path Modelling. *Lithos*, 112: 103-117. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.10.022>
- Cannaò, E., 2025. Unveiling Rodingite Metasomatism Using B and Sr Isotopes: Insights from the Voltri Massif, Western Ligurian Alps, Italy. *Chemical Geology*, 697: 123125. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2025.123125>
- Dai, J. G., Wang, C. S., Liu, S. A., et al., 2016. Deep Carbon Cycle Recorded by Calcium-Silicate Rocks (Rodingites) in a Subduction-Related Ophiolite. *Geophysical Research Letters*, 43: 11635-11643. <https://doi.org/10.1002/2016GL070474>
- Deng, H., Peng, S. B., Polat, A., et al., 2017. Neoproterozoic IAT Intrusion into Mesoproterozoic MOR Miaowan Ophiolite, Yangtze Craton: Evidence for Evolving Tectonic Settings. *Precambrian Research*, 289: 75-94. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.12.003>
- Fettes, D., Desmons, J., 2007. Metamorphic Rocks-A Classification and Glossary of Terms. Cambridge University Press, Cambridge, 244.
- Frost, B. R., Evans, K. A., Swapp, S. M., et al., 2013. The Process of Serpentinization in Dunite from New Caledonia. *Lithos*, 178: 24-39. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.02.002>
- Han, Q. S., Peng, S. B., Kusky, T. M., 2017. A Paleoproterozoic Ophiolitic Mélange, Yangtze craton, South China: Evidence for Paleoproterozoic Suturing and Microcontinent Amalgamation. *Precambrian Research*, 293: 13-38. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.03.004>
- Haws, A. A., Starr, P. G., Dragovic, B., et al., 2021. Meta-Rodingite Dikes as Recorders of Subduction Zone Metamorphism and Serpentine Dehydration: Voltri Ophiolite, Italy. *Chemical Geology*, 565: 120077. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120077>
- Jiang, X. F., Peng, S. B., Polat, A., et al., 2016. Geochemistry and Geochronology of Mylonitic Metasedimentary Rocks Associated with the Proterozoic Miaowan Ophiolite Complex, Yangtze Craton, China: Implications for Geodynamic Events. *Precambrian Research*, 279: 37-56. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.04.004>
- Li, X. P., Zhang, L., Wei, C., et al., 2007. Petrology of Rodingite Derived from Eclogite in Western Tianshan, China. *Journal of Metamorphic Geology*, 25: 363-382. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00700.x>
- Li, X. P., Duan, W. Y., Zhao, L. Q., et al., 2017. Rodingites from the Xigaze Ophiolite, Southern Tibet - New Insights into the Processes of Rodingitization. *European Journal of Mineralogy*, 29(5): 821-837. <https://doi.org/10.1127/ejm/2017/0029-2633>
- Li, J. Y., Wang, X. L., Wang, D., et al., 2021. Pre-Neoproterozoic Continental Growth of the Yangtze Block: From Continental Rifting to Subduction–Accretion. *Precambrian Research*, 355: 106081. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.106081>
- Ling, W. L., Gao, S., Zheng, H. F., et al., 1998. Sm-Nd Geochronology of Kongling Complex in Huangling Area of the Yangtze Craton. *Chinese Science Bulletin*, 43(01): 86-89 (in Chinese).
- Lu, K., Li, X. H., Zhou, J. L., et al., 2020. Early Neoproterozoic Assembly of the Yangtze Block Decoded from Metasedimentary Rocks of the Miaowan Complex. *Precambrian Research*, 346: 105787. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105787>
- Lu, S. S., Tong, X. R., Wu, N. W., et al., 2025. Mesoproterozoic Tectonic Characteristics of Shennongjia Group in Northern Margin of Yangtze Craton: Constraints from Detrital Zircon U-Pb Geochronology. *Earth Science*, 50(7): 2613-2627 (in Chinese with English abstract).

- Millonig, L. J., Albert, R., Gerdes, A., et al., 2020. Exploring Laser Ablation U-Pb Dating of Regional Metamorphic Garnet - the Straits Schist, Connecticut, USA. *Earth and Planetary Science Letters*, 552: 116589. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116589>.
- Ni, Z. Y., Zhai, M. G., Zhao, T. P., et al., 2005. Petrology of Rodingites and Their Petrogenetical Significance. *Advances in Earth Science*, 04: 407-413 (in Chinese with English abstract).
- Palandri, J. L., Reed, M. H., 2004. Geochemical Models of Metasomatism in Ultramafic Systems: Serpentinization, Rodingitization, and Sea Floor Carbonate Chimney Precipitation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 1115-1133. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2003.08.006>
- Peng, S. B., Li, C. N., Kusky, T. M., et al., 2010. Discovery and Its Tectonic Significance of the Proterozoic Miaowan Ophiolites in the Southern Huangling Anticline, Western Hubei, China. *Geological Bulletin of China*, 29(1): 8-20 (in Chinese with English abstract).
- Peng, S. B., Kusky, T. M., Zhou, H. W., et al., 2012. New Research Progress on the Pre-Sinian Tectonic Evolution and Neotectonics of the Huangling Anticline Region, South China. *Journal of Earth Science*, 23(5): 639-647. <https://doi.org/10.1007/s12583-012-0285-y>
- Qiu, X. F., Yang, H. M., Zhang, L. G., et al., 2015. Geochronology of Serpentinized Harzburgite in Miaowan Ophiolite, Yangtze Block and Its Tectonic Implications. *Earth Science*, 40(07): 1121-1128 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, X. F., Peng, L. H., Kong, L. Y., et al., 2024. Discovery of Eoarchean Gneisses in Northern Dabie Belt. *Earth Science*, 49(11): 3960-3970 (in Chinese with English abstract).
- Ran, J., Wang, H., Yang, J. H., et al., 2024. Direct Dating Rodingitization in the Northern North China Craton Using Garnet U-Pb Geochronometry. *Terra Nova*, 36(4): 275-283. <https://doi.org/10.1111/ter.12708>
- Ran, J., Wang, H., Yang, J. H., et al., 2025. Petrogenesis of Rodingites along the Northern Margin of the North China Craton: Constraints from Zirconology and Whole-Rock Geochemistry. *Science China Earth Sciences*, 68(3): 750-767. <https://doi.org/10.1007/s11430-024-1486-0>
- Seman, S., Stockli, D. F., McLean, N. M. 2017. U-Pb Geochronology of Grossular-Andradite Garnet. *Chemical Geology*, 460: 106-116. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.04.020>
- Shu, Q., Beranoaguirre, A., Albert, R., et al., 2024. Multi-Stage Ultrahigh Temperature Metamorphism in the Lower Crust of the Kaapvaal Craton Recorded by U-Pb Ages of Garnet. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 179(49). <https://doi.org/10.1007/s00410-024-02121-4>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Wang, Y. J., Zhang, Q. H., Li, Z. A., et al., 1995. Geochemical Research on the Taipingxi Ultramafite, Hubei Province. *Hubei Geology*, 9(2): 90-97 (in Chinese with English abstract).
- Wu, P., Zhang, S. B., Zheng, Y. F., et al., 2024. Magmatic Record of Early Neoproterozoic Subduction-Accretion in the Northwestern Margin of the Yangtze Block, South China. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 44(1): 216-230 (in Chinese with English abstract).
- Wu, P., Wu, Y. B., Zhang, S. B., et al., 2024. Revisiting Neoproterozoic Tectono-Magmatic Evolution of the Northern Margin of the Yangtze Block, South China. *Earth-Science Reviews*, 255: 104825. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104825>
- Wu, S. T., Wörner, G., Jochum, K. P., et al., 2019. The Preparation and Preliminary Characterisation of Three Synthetic Andesite Reference Glass Materials (ARM-1, ARM-2,

- ARM-3) for In Situ Microanalysis. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 43(4): 567-584. <https://doi.org/10.1111/ggr.12301>
- Xiong, X. S., Gao, R., Wang, H. Y., et al., 2016. Frozen Subduction in the Yangtze Block: Insights from the Deep Seismic Profiling and Gravity Anomaly in East Sichuan Fold Belt. *Earthquake Science*, 29(2): 61-70. <https://doi.org/10.1007/s11589-016-0140-9>
- Yan, Y. Q., Wang, H., Yang, J. H., et al., 2025. Carboniferous, not Paleoproterozoic, Eclogite-Facies Metamorphism in the Northern North China Craton as Revealed by In Situ Garnet Lu-Hf and U-Pb Geochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 653: 119207. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2025.119207>
- Yang, Y. H., Wu, S. T., Wang, H., et al., 2025. Three New Natural Secondary Reference Materials for In Situ Andradite U-Pb Geochronology. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 40(2): 326-337. <https://doi.org/10.1039/D4JA00290C>
- Zhao, G. C., Cawood, P. A., 2012. Precambrian Geology of China. *Precambrian Research*, 222-223: 13-54. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.09.017>
- Zhao, M. S., Chen, Y. X., Xiong, J. W., et al., 2023. Magnesium-Oxygen Isotope Constraints on the Origin of Rodingites in Oceanic Lithosphere. *Chemical Geology*, 635: 121612. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121612>

附中文参考文献

- 凌文黎, 高山, 郑海飞, 等, 1998. 扬子克拉通黄陵地区崆岭杂岩 Sm-Nd 同位素地质年代学研究. *科学通报*, 43(01): 86-89.
- 卢山松, 童喜润, 吴年文, 等, 2025. 扬子克拉通北缘中元古代神农架群构造属性: 来自碎屑锆石 U-Pb 年代学的约束. *地球科学*, 50(7): 2613-2627.
- 倪志耀, 翟明国, 赵太平, 等, 2005. 异剥钙榴岩及其岩石成因意义. *地球科学进展*, 04: 407-413.
- 彭松柏, 李昌年, Kusky T. M., 等, 2010. 鄂西黄陵背斜南部元古宙庙湾蛇绿岩的发现及其构造意义. *地质通报*, 29(01): 8-20.
- 邱啸飞, 杨红梅, 张利国, 等, 2015. 扬子陆块庙湾蛇绿岩中橄榄岩的同位素年代学及其构造意义. *地球科学*, 40(07): 1121-1128.
- 邱啸飞, 彭练红, 孔令耀, 等, 2024. 北大别构造带始太古代片麻岩的发现. *地球科学*, 49(11): 3960-3970.
- 王岳军, 张琴华, 李志安, 等, 1995. 湖北太平溪超镁铁岩的地球化学初步研究. *湖北地质*, 9(2): 90-97.
- 吴鹏, 张少兵, 郑永飞, 等, 2024. 扬子陆块西北缘早新元古代俯冲增生过程的岩浆记录. *沉积与特提斯地质*, 44(1): 216-230.