

地壳变质作用压力-温度-时间轨迹研究

李波涛^{1*}, 郑柏森¹, Hans-Joachim MASSONNE^{1,2}

1. 中国地质大学(武汉)地球与行星科学学院, 地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

2. Fakultät Chemie, Universität Stuttgart, Stuttgart 70569, Germany

* 通讯作者, E-mail: botaoli@cug.edu.cn

2025-10-18收稿, 2026-01-08修回, 2026-02-06接受, 2026-03-12网络版发表

国家自然科学基金项目(42572061、42272062)资助

摘要 变质作用 P - T - t 轨迹揭示了地壳岩石在构造演化过程中压力(P)-温度(T)条件随时间(t)的变化历程, 已成为连接变质作用、造山带演化与地球动力学过程的关键桥梁。本文回顾了变质 P - T - t 轨迹的发展历程, 重点解读了六篇具有里程碑意义的经典文献, 阐述了变质 P - T - t 轨迹从思想启蒙到模型构建, 再到技术实现, 并最终通过与年代学整合实现了时空维度的精确解析。这些研究共同推动了变质岩石学从静态描述向动态演化研究的转变, 改变了人们理解和研究造山带的方式。尽管受限于时代认知与技术条件, 这些经典研究在流体行为、扩散再平衡、矿物非平衡及多维耦合等方面存在一定局限, 但为后续相关研究, 如高温高压实验、原位微区分析和数值模拟的发展指明了方向。展望未来, P - T - t 研究将与多学科交叉融合, 在极端变质过程、早期地球构造演化等领域发挥重要作用。

关键词 变质作用, P - T - t 轨迹, 造山带, 地球动力学, 变质锆石与石榴子石

1 引言

变质岩石学作为固体地球科学的重要分支, 其核心目标之一是揭示地壳岩石在温压条件变化下的演化历史, 进而反演其所经历的构造环境(Brown, 2014; Zheng和Chen, 2021)。20世纪70年代以前, 变质作用研究主要建立在“共生组合”和“相平衡”理论基础上, 侧重于利用矿物组合确定岩石所经历的峰期变质条件(Kretz, 1961; Banno, 1970), 本质上属于一种静态的、平衡态的研究。70年代以来, 随着板块构造理论的成熟与变质反应动力学的深入, 研究者开始将矿物组合与结构与其所处的温压条件及其演化时间相联系, 正式提出了“ P - T 轨迹”概念(England和Richardson, 1977; England和Thompson, 1984)。这一概念的提出, 不仅将变质作用研究从静态相平衡推向了动态演化分析, 也为理解造山带演化、地壳深俯冲与折返等地球动力学过程提供了关键依据。

随着同位素地质年代学研究的兴起, 变质矿物的形成年龄逐渐得以确定, 由此为变质岩的研究增加了第三

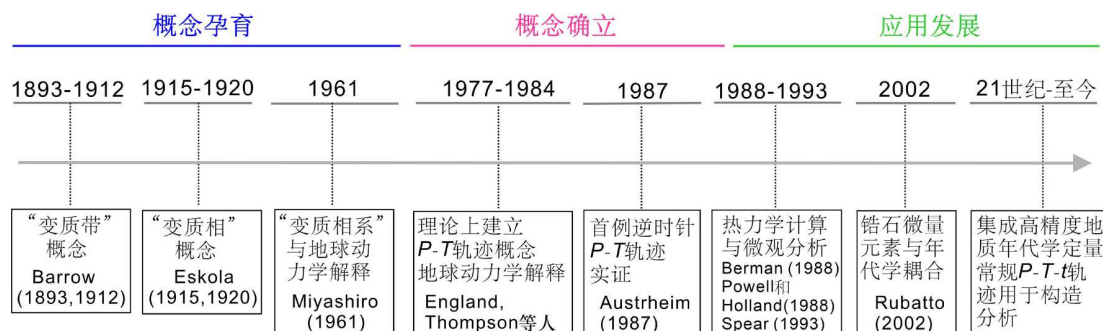
个维度(时间 t)。变质 P - T - t 轨迹研究融合了矿物相平衡理论、热力学模拟、地质年代学与构造地质学, 形成了一套完整的方法体系。正如板块构造理论统一了全球构造框架(郑永飞和李振新, 2025), 地质过程 P - T - t 轨迹绘制则在微观尺度上实现了对地壳演化历史的动态解译(Bohlen, 1987; Thompson和Ridley, 1987; Brown, 1993)。本文选取该领域六篇具有奠基意义的经典论文, 系统回顾其科学背景、核心贡献与历史局限, 以期为当前与未来的变质作用研究提供启示, 延续本刊“经典永流传”栏目的学术传承精神。

2 变质作用与 P - T - t 轨迹的发展历程

对变质作用与变质岩的研究, 是解析地壳演化与造山带动力学的关键。该领域已从对岩石的静态描述, 发展为对地球动力学过程的重建(魏春景和郑永飞, 2020; Zheng和Chen, 2021; 张强强等, 2023; Ji等, 2024), 主要体现在对压力-温度-时间(P - T - t)轨迹的认知与探索上(图1)。

中文引用格式: 李波涛, 郑柏森, Massonne H-J. 2026. 地壳变质作用压力-温度-时间轨迹研究. 中国科学: 地球科学, 56(4): 1604–1614, doi: 10.1360/SSTe-2025-0362

英文引用格式: Li B, Zheng B, Massonne H-J. 2026. On pressure-temperature-time paths of crustal metamorphism. Science China Earth Sciences, 69(4): 1566–1576, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1873-6>

图1 变质作用及“变质 P - T - t ”概念的演化

英国科学家George Barrow于19世纪末在苏格兰高地通过系统变质相带填图，首次建立了以关键指示矿物(如绿泥石、黑云母、石榴石、十字石、蓝晶石和矽线石)为标志的“变质带”，揭示了变质程度的空间分带性，并提出“进变质作用”概念，其建立的“巴罗式变质带”(Barrow, 1893, 1912)至今仍是中高压变质作用的典型代表。随后，Eskola(1915, 1920)提出“变质相”概念，将特定矿物组合与一套平衡的变质 P - T 条件联系起来，指出特定矿物组合(而非单一矿物)才是平衡于特定物理化学条件的产物，从而将变质岩石学与物理化学基础结合起来，为后续热力学定量分析奠定了基础。板块构造理论的兴起，为理解不同变质相的空间分布提供了地球动力学理论框架。Miyashiro(1961)系统识别出高压、中压和低压三类“变质相系”，并将其分别与俯冲带、大陆碰撞带及岩浆弧/伸展环境相联系，标志着研究从岩石学分类迈向地球动力学解释的转变。

变质带与变质相系的提出是变质 P - T - t 轨迹的基础，相关发展也是从静态平衡到动态演化的良好体现。England和Richardson(1977)与England和Thompson(1984)通过热模拟工作首次系统提出“ P - T - t ”轨迹的概念和术语，并揭示了岩石在造山过程中所经历的变质 P - T 轨迹是地壳增厚、侵蚀剥露、岩浆作用及伸展垮塌等多种过程相互作用的综合记录。Thompson和England(1984)系统阐述了从矿物组合反演变质 P - T - t 路径的方法。Austrheim(1987)在挪威榴辉岩中首次实证了清晰的逆时针 P - T - t 轨迹。最终，经Spear和Peacock(1989)的全面整理和阐述以及Brown(1993)的系统综述，变质 P - T - t 轨迹成为岩石学家解译造山带构造-热演化动力学的重要手段。

自20世纪80年代末变质 P - T 轨迹理论被引入中国以来，我国学者通过一系列重要的综述、专著与教材，为该理论在国内的传播、理解与应用奠定了坚实基础。卢良兆(1991)与贺高品(1991)率先系统介绍了变质 P - T 轨迹的基本概念、研究方法及其地球动力学意义。董申保和

魏春景(1997)综述了当时变质地质学的若干进展，其中包含了 P - T - t 轨迹研究的重要地位。程裕淇等(1998)则从更广阔的视角回顾与展望了变质作用研究，肯定了 P - T - t 轨迹的研究意义。路凤香和桑隆康(2002)编著的《岩石学》教材，将 P - T - t 轨迹作为变质岩石学核心内容之一进行了系统阐述。魏春景(2011, 2012)进一步总结了该领域的研究方法，与21世纪最初十年的进展。与此前这些以知识传播和体系介绍为主的评述不同，本文更侧重于对少数几篇奠基性经典文献的深入解读，旨在回归文献研究时期所处的科研背景，剖析其核心研究思想和在当时认知框架下的突破性与局限性，对“经典文献”进行“后见之明”式的检验与讨论。

变质 P - T - t 轨迹的精确重建依赖于多学科技术的交叉与创新。精细岩相学观察(如矿物包裹体、反应结构与成分环带)为解析多阶段变质演化提供了重要依据(Spear, 1993; Massonne, 2013); 热力学计算与地球化学温压计的发展使得从矿物化学成分中精确量化变质 P - T 条件成为可能(Berman, 1988; Powell和Holland, 1988); 微区原位同位素年代学(如锆石和独居石U-Pb定年、石榴石Sm-Nd等时线定年)和关联定年矿物微量元素地球化学与特定变质 P - T 阶段的突破(Rubatto, 2002)，将特定变质 P - T 条件与绝对年龄匹配起来，成功地将时间维度与 P - T 路径耦合起来(Engi等, 2017)。这些技术的综合应用，深化了对碰撞造山带俯冲折返机制、高温变质作用多成因性以及大陆地壳深俯冲与超高压变质岩折返等关键过程的理解(Chopin, 2003; Zheng和Chen, 2021; Jiao等, 2023; 张强强等, 2023; Ji等, 2024; Dan等, 2025)。

变质作用 P - T - t 轨迹的研究是变质岩石学领域的一项重要进展，历经近五十年的探索，已发展为一个内涵丰富、体系庞大的学术方向。这几十年的研究中，在变质 P - T - t 轨迹的理论发展和应用上有数以百计的经典文献，但由于只能选取有限的几篇文献进行解读，所以经典文献的选择，也必然带有某种视角上的倾向与取舍，难免

有所疏简和面面俱到。本文的主要目的是呼应“经典永流传”栏目的定位——回到这些早期文献发表时的历史环境中,审视其核心思想与方法路径的突破之处与时代局限,并以此透视整个理论发展的关键转折与思想脉络。在选取文献时,特别关注具有概念原创性和方法奠基性的工作。最终确定的六篇文献——分别对应 P - T - t 轨迹理论从概念雏形(England和Richardson, 1977)、矿物反演 P - T - t 轨迹方法的率先探索(Spear和Selverstone, 1983)、“变质 P - T - t 轨迹”术语被正式提出(England和Thompson, 1984)、最初的 P - T - t 轨迹应用实践(Thompson和England, 1984)、早期构造解析应用(Brown, 1993)到年代学精准匹配的尝试(Rubatto, 2002)这六个关键发展阶段。本文经典文献的选择和解读有助于勾勒出一条清晰的 P - T - t 轨迹研究的理论发展主线,为理解变质岩石学如何从静态平衡走向动态演化这一根本转变,提供一条可供深入思考的路径。

3 经典解读

3.1 变质 P - T 轨迹概念雏形

England和Richardson(1977)首次系统阐述了“变质地温线”概念,为 P - T 轨迹理论奠定基石,标志着从“静态地温梯度”到“动态变质地温线”。通过构建一维热传导模型,模拟大陆地壳构造增厚与剥蚀过程,揭示了变质岩所记录的 P - T 条件并非单一瞬时的地温梯度,而是一条向温度轴凹进、多时代的“变质地温线”(图2)。研究指出,岩石记录的最大压力远小于其实际经历的最大埋藏压力,因最高温度常在剥蚀减压过程中达到,这合理解释了高级变质岩中高压证据稀缺及古老蓝片岩难以保存的现象。该文理论上将构造过程、热演化与地表过程整合于统一框架,推动变质岩石学从静态“相系”研究向动态“轨迹”探索。

3.2 建立矿物环带反演方法

Spear和Selverstone(1983)提出了从矿物环带定量反演 P - T 路径的理论与方法。通过建立矿物成分、化学势与温压变量之间的线性微分方程组(包含Gibbs-Duhem方程、异相平衡条件和固溶体成分微分方程),实现对所有可能连续反应的同时处理,进而重建样品 P - T 演化轨迹。该方法克服了传统地质温压计仅提供“瞬时”条件的局限,使研究者得以追踪矿物生长过程中 P 与 T 的连续变化。通过多个石榴石环带实例,成功揭示了不同构造环境下 P - T 轨迹的多样性(图3)。例如,文中所应用的三个例子的变质岩样品中都包含环带石榴子石(表1),在前人通过传统温压计(矿物Fe-Mg连续反应,石榴石-黑云母温度计

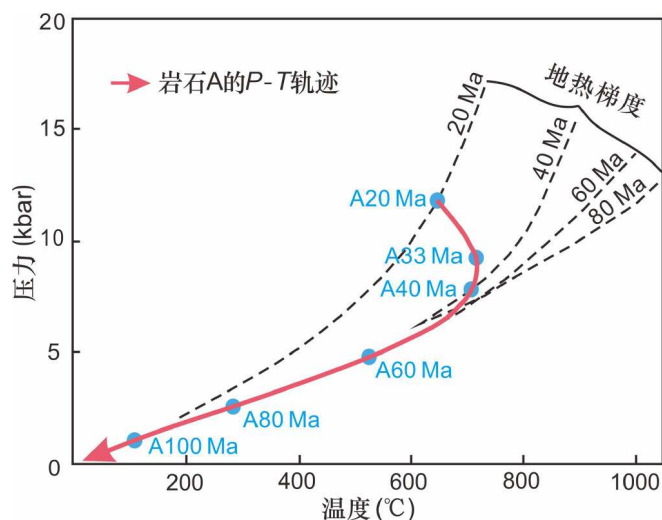


图2 逆冲推覆发生后大陆在20、40、60及80 Ma时的地温梯度(虚线示意)。在岩石A持续受热过程中,上覆岩层的侵蚀作用使其所处压力环境持续降低,在33 Ma达到最高温度(改编自England和Richardson, 1977)

(Thompson, 1976; Ferry和Spear, 1978),石榴石-斜长石压力计(Ghent等, 1979)和斜长石-石榴石-蓝晶石-石英压力计(Ghent等, 1979; Hodges和Spear, 1982))获得的石榴子石边部温压条件的基础上,利用建立的线性微分方程组成功获得从石榴子石从边部到核部的温压变化。

3.3 构建 P - T 轨迹

England和Thompson(1984)首次正式使用“压力-温度轨迹(P - T 轨迹)”术语,通过精细的有限差分数值模型,系统探讨了不同地壳增厚机制与热参数组合的效应,绘制出完整的 P - T 轨迹(图4)。研究揭示了大陆碰撞造山带中 P - T 路径的普遍特征:快速埋藏后经历近等压加热,随后升温与减压同时进行直至温度峰值,最后进入近等温或冷却阶段。研究还指出,岩石在峰温附近50 °C内停留时间较长,显著影响反应速率、矿物环带与同位素体系行为,并证实仅凭地壳生热与正常地幔热流即可引发中高级变质与部分熔融。

3.4 岩相学观察与相图模型相融合

在前期理论上,Thompson和England(1984)建立了从矿物组合中提取 P - T 路径的实用方法。其核心在于识别多阶段矿物学证据,如早期矿物组合以包裹体形式存在于后期变斑晶中,进而借助实验校准的平衡反应曲线勾勒轨迹演化方向。以 Al_2SiO_5 多形变体为例,阐明如何通过矿物序列(如蓝晶石→矽线石→红柱石)反演具有先升温后降温特征的顺时针 P - T 路径(图5)。该方法实现了理

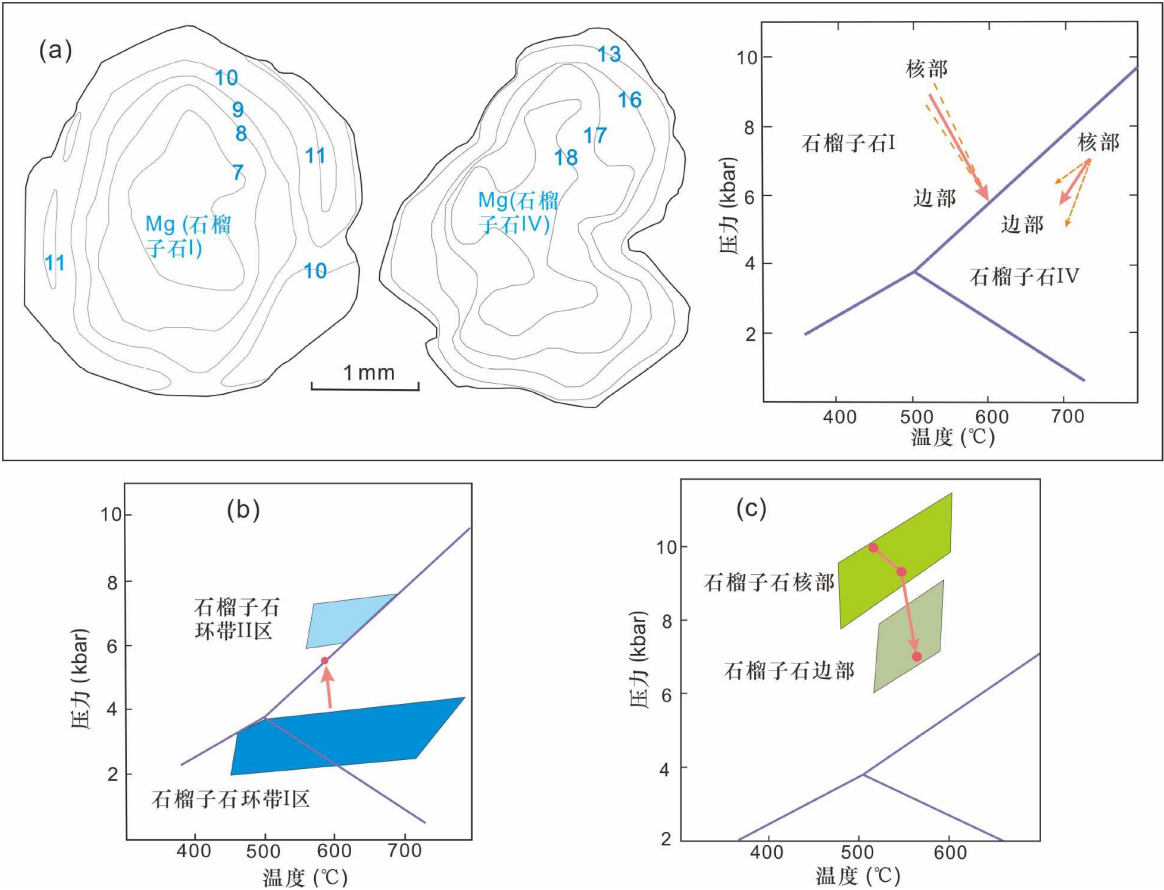


图3 根据石榴石环带所揭示的P-T轨迹的多样性(Spear和Selverstone, 1983)。(a) 美国马萨诸塞州两个变沉积岩样品中的石榴子石具有不同的Mg含量(Mg的原子百分数)(Tracy等, 1976), 以及所对应的P-T轨迹; (b) 奥地利Tauern Window西部板岩(Selverstone等, 1984)的P-T轨迹; (c) 美国宾夕法尼亚州东南部(Crawford和Mark, 1982)片岩的P-T轨迹

表1 Spear和Selverstone(1983)研究中三个实例的样品信息^{a)}

样品来源	矿物组合	Grt环带从核部到边部变化特征	参考P-T点及其温压计	根据联立线性微分方程计算的从Grt边部到核部P-T变化
美国马萨诸塞州变沉积岩 (Tracy等, 1976)	变质带 I : Grt+Bt+St+Pl+Qz+Ms	变质带 I : Ca和Mn降低, Mg和Fe升高	Grt边部P-T: 600 °C, 6 kbar;	变质带 I : $\Delta T \approx \text{ca. } 72 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta P \approx \text{ca. } -3 \text{ kbar}$
	变质带 IV : Grt+Bt+Sil+Pl+Qz+Kf	变质带 IV : Ca和Mg降低, Mn和Fe升高	温压计: 矿物Fe-Mg交换反应	变质带 IV : $\Delta T \approx \text{ca. } -17 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta P \approx \text{ca. } -1 \text{ kbar}$
奥地利Tauern Window板岩 (Selverstone等, 1984)	Grt+Am+St+Ky+Ch+Bt+Pl+Qz	Ca和Mn降低, Mg和Fe升高	Grt边部P-T: 550 °C, 7 kbar; Gt-Bt温度计和Gt-Pl-Ky-Qz压力计	$\Delta T \approx \text{ca. } 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta P \approx \text{ca. } -3 \text{ kbar}$
美国宾夕法尼亚州东南部片岩 (Crawford和Mark, 1982)	Grt+Bt+Sil+Kf+Qz+Pl	Mg降低, Ca、Mn和Fe升高	Grt边部P-T: 580 °C, 5.5 kbar; Gt-Bt温度计和Gt-Pl压力计	$\Delta T \approx \text{ca. } -25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta P \approx \text{ca. } 1.7\text{--}2.6 \text{ kbar}$

a) Bt=黑云, Ch=绿泥石, Grt=石榴子石, Kf=钾长石, Ky=蓝晶石, Ms=白云母, Pl=斜长石, Qz=石英, Sil=矽线石, St=十字石

论相图模型与岩石学观测的有效衔接, 为动态解析造山过程提供了关键技术支撑。

3.5 变质P-T-t轨迹及其在造山带构造解析中的应用

在变质地质学从“静态”迈向“动态”的关键时期,

Brown(1993)系统梳理并总结了P-T-t轨迹理论, 将其从技术方法提升为解析造山带动力学的工具。该文明确将全球造山带划分为以顺时针和逆时针P-T-t轨迹为特征的两大大类型(图6a), 并将其分别与地壳增厚-剥蚀和岩浆底侵-同构造加热等特定构造-热过程模型相联系。强调必须将

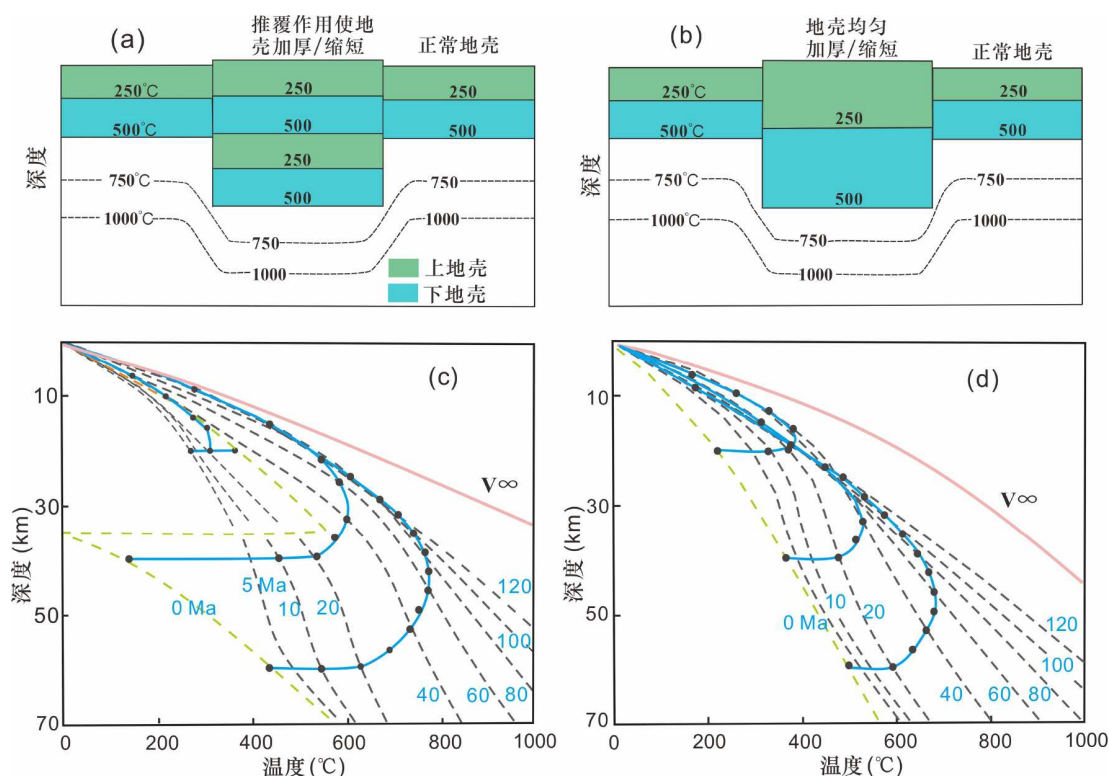


图4 模拟的大陆地壳加厚-缩短过程(England和Thompson, 1984)。(a)大陆地壳因逆冲推覆作用而加厚和缩短,使完整的地壳序列叠加到另一个地壳序列上,厚度增加了一倍。(b)地壳均匀增厚使地壳缩短;假设(a)和(b)过程是瞬间发生的,图示为瞬间发生时的地壳状态。(c)和(d)分别为逆冲推覆作用和地壳均匀增厚后的地热演化(虚线),以及最初埋藏在20、40和60 km处的岩石所遵循的剥露 P - T 路径(蓝色实线)。 V_{∞} :正常情况下的稳态地温

P - T 轨迹与同位素年代学数据结合,才能构建完整 P - T - t 路径,从而精确区分快速构造折返与缓慢剥蚀等不同动力学过程。例如,位于北美Grenville造山带的Adirondack Highlands,通过多矿物联合定年得知其中元古代大陆碰撞后经历的长期缓慢近等压冷却(~ 1.5 °C/Ma)(图6b),即诠释了与地壳增厚-稳定剥蚀过程密切相关的顺时针 P - T - t 轨迹(Mezger等, 1991);而属于华力西造山带的Southern Brittany混合岩带,通过把定年与退变质 P - T 相结合得知峰期变质后的高温降压及快速冷却(可达 ~ 50 °C/Ma)(图6c),表明与晚古生代的造山带平行伸展、重力垮塌等构造背景相关(Dallmeyer和Brown, 1992)。

3.6 变质 P - T 与 t 准确匹配的微量元素约束

Rubatto(2002)首次建立锆石微量元素成分与变质条件之间的直接联系,实现了对变质锆石U-Pb年龄的精确地质解释,开创了“petrochronology”的新时代。通过分析榴辉岩相与麻粒岩相锆石的微量元素特征,揭示其稀土配分模式、Eu异常、Th/U比值等受控于共生矿物组合与变质反应。文中首次计算锆石-石榴石分配系数(图7),使研究者能够将特定锆石生长域与具体 P - T 条件相对应,

突破了传统锆石年代学“年龄地质意义不明确”的瓶颈,实现了对变质过程“时间-温度-压力”的多重约束。

4 经典论文的局限与后续进展

4.1 热传导模型后期拓展

England和Richardson(1977)与England和Thompson(1984)的一维热传导模型,其简化假设(如瞬时均匀增厚、纯热传导和均一岩石物性)虽揭示了 P - T 轨迹的基本形态,但与复杂的地球动力学过程存在差距。后续的二维热-力学耦合模型(如Ruppel和Hodges, 1994; Jamieson和Beaumont, 2011)极大深化了认识。Ruppel和Hodges(1994)的模型表明,逆冲断层相关的剪切加热和侧向热平流能显著改变近断层区域的 P - T 轨迹形态,甚至产生局部倒转的变质带,这是一维模型无法预测的。Jamieson和Beaumont(2011)的模拟进一步揭示,下地壳的隧道流与上地壳逆冲-伸展的耦合,可以更合理地解释高压-超高压变质岩的快速折返与近等温降压(ITD)路径的形成机制,其预测的折返速率(数mm/yr)和 P - T 路径形态与喜马拉雅等造山带的观测更为吻合。这些进展凸显了多维模拟在

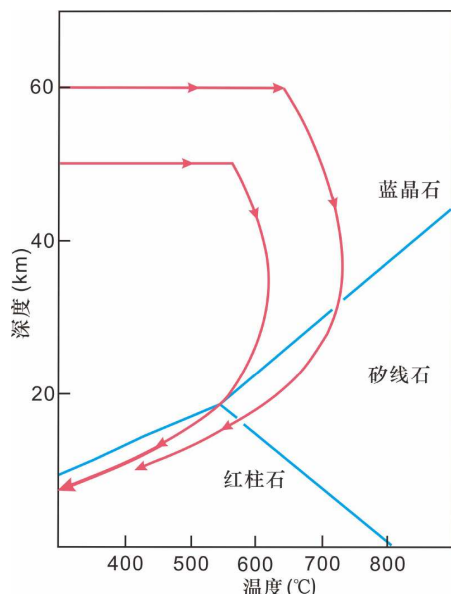


图5 以 Al_2SiO_5 多形变体为例阐明如何从矿物组合中推断 P - T - t 路径(Thompson和England, 1984)。若同一岩石中同时保存蓝晶石、矽线石与红柱石,反映早期处于相对高压的蓝晶石稳定域,随后进入矽线石稳定域,后期穿越红柱石稳定域。因反应动力学滞后,先成矿物未能完全转化,致使三种多形变体共存,揭示了先升温后降温特征的顺时针 P - T - t 路径。反之,若仅见蓝晶石与红柱石共存,则可能指示一条穿过三相点附近的抬升路径,反映从高压至低压的演化过程

纳入构造过程的空间非均一性、机械耦合与热平流效应方面的重要性。

近年来的研究揭示,变质温压(T/P)比值与地温梯度具有对应关系(Brown和Johnson, 2019a, 2019b; Zheng和Chen, 2021)。将其与变质 P - T - t 轨迹相结合,对于认识汇聚板块边缘区域变质作用发生的构造背景和地球动力学机制可以起到有效限定作用(张强强等, 2023; Ji等, 2024; Dan等, 2025),由此可以深化板块汇聚过程(俯冲/碰撞)以及碰撞后造山带垮塌等深部过程对 P - T - t 路径形态控制机制的理解。

4.2 矿物环带反演中的扩散与变质过程中的非平衡问题

Spear和Selverstone(1983)不仅定量揭示了常见的升压过程中的石榴子石生长(图3b),并且揭示了不常见的降压过程中石榴子石生长(图3a, 3c)。虽然后续根据相平衡模拟的方法对同一地区变质石榴子石的研究较少,所应用例子区域的降压石榴子石生长并未被完全证实,但其他地区的研究说明石榴子石在降压过程中是可以生长的或成分可以随降压过程而变化(如Spear等, 1990; Wei等, 2009; Dong等, 2024),揭示了石榴子石的生长受控于热力学条件、全岩与微区成分、扩散与反应动力学以及流体活动等复杂因素(如Caddick等, 2010; Lanari和Engi, 2017)。这些研究共同将石榴石环带提升为解读造山带构造热历史的普适性岩石学标志。

但是Spear和Selverstone(1983)的方法假设矿物环带

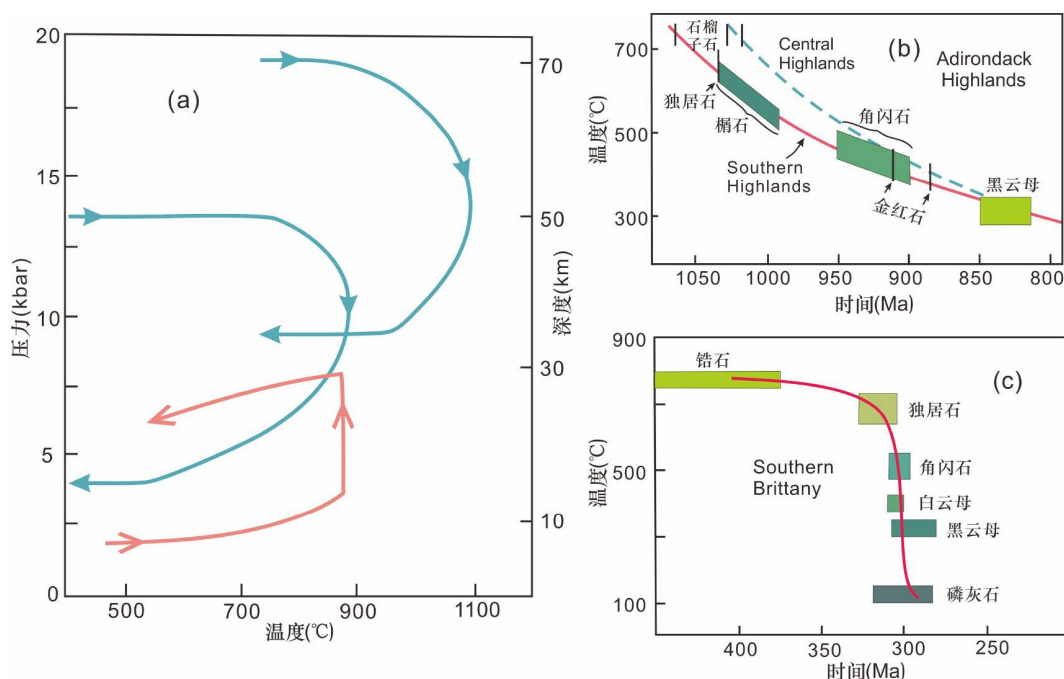


图6 (a)Brown(1993)将全球造山带划分为以顺时针和逆时针 P - T 轨迹为特征的两大类型,及通过实例展示同位素年代学数据与 P - T 轨迹相结合所获得返缓慢剥蚀(b)与快速构造折返(c)的动力学过程

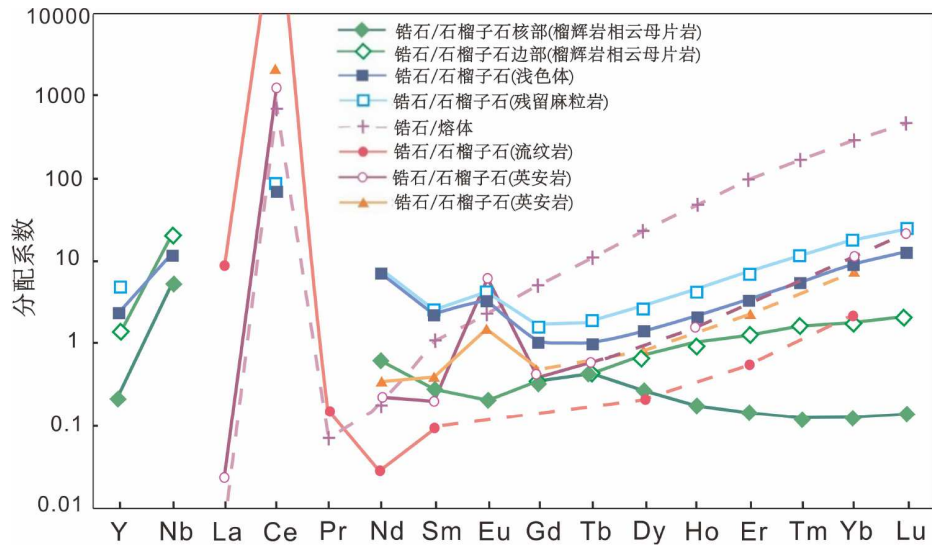


图7 锆石与共存石榴石或熔体之间微量元素分配系数(改自Rubatto, 2002)

完全由连续反应控制,未充分考虑扩散作用和其他因素对环带结构的改造,尤其在高温条件下易导致 P - T 轨迹重建偏差。后续在热力学模拟中开始注重考虑扩散作用对矿物成分的改造(Kohn, 1989)、强调多相平衡与反应序列(Evans, 2004)、发展生长-扩散耦合数值模拟(Gaidies等, 2008),并与同位素年代学有机结合(Zou等, 2025),显著提升了石榴石在解析 P - T - t 轨迹的精度和准确度。另外,已有大量的研究果表明,变质过程中存在非平衡问题,部分构造背景下矿物存在着不同程度的非平衡成核和生长过程(如Pattison和Tinkham, 2009; Xia等, 2023; Wang等, 2025),这会造成部分情况下基于热力学平衡温压计而建立的变质 P - T 轨迹失真。这些研究已证实矿物包裹体弹性温压计、单矿物微量元素温度计与相平衡模拟的联合使用对于揭示石榴石等矿物的生长平衡性以及变质岩真实的变质 P - T 轨迹具有重要的意义。

4.3 矿物组合方法的动力学拓展

England和Thompson(1984)提出的通过 Al_2SiO_5 多形变体序列反演 P - T 路径的方法,已在全球多个造山带的实际岩石中得到精准验证。在实际岩石中, Al_2SiO_5 的三个多形变体(蓝晶石、矽线石和红柱石)可以共存(图8a, 8b),如日本南部Abukuma Mountains的泥质片岩(Yoneguchi等, 2021)和挪威Lesjaverk地区变沉积岩(Whitney和Samuelson, 2019);也可以两相共存(图8c, 8d),如瑞典Seve Nappe Complex的片麻岩(Li等, 2020)和阿根廷Cushman Complex的片岩(Serra-Varela等, 2024)。这些不同区域三相或两相共存的多形变体均指示了穿越不同稳定域的复杂热力学历史,多形变体的共生与转化结构(如蓝晶石作

为早期包裹体被矽线石或红柱石包裹或替代)(图8b, 8c)直接验证了Thompson和England(1984)提出的矿物序列反演方法(图5)。

但是,Thompson和England(1984)的方法在矿物相变动力学处理上较为简化,未能充分考虑不同变质条件下矿物转变速率的差异对 P - T 轨迹形态的影响。对高压-超高压环境下矿物稳定性及多相平衡的计算精度受限于当时的热力学数据。后续研究结合多个造山带的地质实例(Harley, 1989; Lapen等, 2003),验证并完善了“近等温降压”和“近等压降温”等类型。THERMOCALC等计算程序的持续发展也为复杂矿物组合的平衡计算提供了更可靠的基础(Holland和Powell, 1998)。

4.4 复杂多期变质作用与定年精度的提高

Brown(1993)所归纳的顺时针与逆时针 P - T - t 轨迹类型,后续研究中在多个经典造山带中得到了广泛支持。例如,喜马拉雅等碰撞型造山带普遍显示顺时针轨迹,与地壳增厚-剥蚀模型一致(Wang等, 2022)。而一些与岩浆活动密切相关的造山带,例如华北克拉通东部的新太古代高级变质岩区,则呈现包含逆时针的各种 P - T 轨迹样式,支持岩浆底侵或地幔柱活动的加热机制(Yu等, 2022)。然而全球造山带变质岩可被划分为逆时针和顺时针的 P - T - t 轨迹样式虽具启发性,但过于简单化。后续多个全球造山带研究揭示了远比想象的复杂的变质 P - T 演化,如大陆碰撞带中多阶段“俯冲-折返-再俯冲-再折返”的周期性 P - T 循环,形成了类似Yo-Yo球运动的复杂 P - T 轨迹(Li等, 2016)。其次,尽管文章强调了“ t ”的重要性,但受限于90年代初同位素定年技术(如传统ID-TIMS)的精

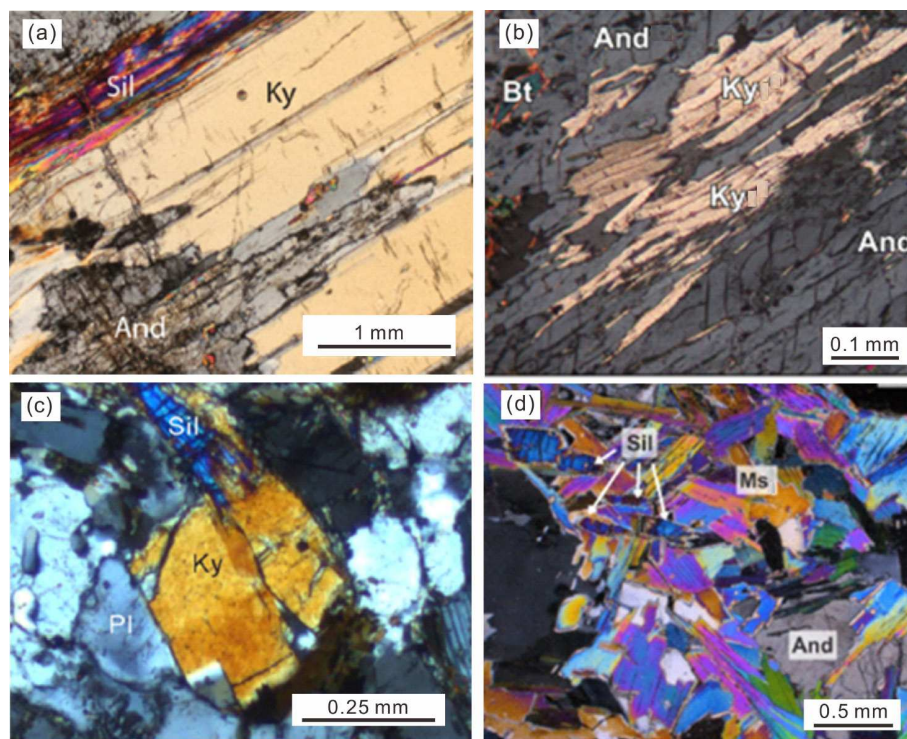


图8 岩石中的 Al_2SiO_5 多形变体共存。(a) 日本南部Abukuma Mountains的泥质片岩 Al_2SiO_5 的三个多形变体共存(Yoneguchi等, 2021); (b) 挪威Lesjaverk地区变沉积岩中蓝晶石包裹于红柱石中(Whitney和Samuelson, 2019); (c) 瑞典Seve Nappe Complex的片麻岩中蓝晶石被矽线石取代(Li等, 2020); (d) 阿根廷Cushamen Complex片岩中红柱石和矽线石共存(Serra-Varela等, 2024)。And=红柱石, Bt=黑云母, Ky=蓝晶石, Ms=白云母, Pl=斜长石, Sil=矽线石

度与分辨率影响, 其对时间的约束相对模糊, 构想的“ t ”更多是事件点序列而非连续过程。21世纪以来, 微区定年技术(如SIMS、LA-ICP-MS)的快速发展, 使研究者能够从单一样品甚至单矿物内部解析出多期高精度、连续/不连续的 P - T - t 演化信息(Cheng等, 2018)。

4.5 多手段交叉与定量化发展

Rubatto(2002)建立的锆石成分与变质条件的对应关系, 在很大程度上依赖于对共生矿物平衡的假设。然而, 锆石的生长可能跨越多个变质阶段, 其内部复杂的成分环带可能记录了非平衡或继承性组分, 这使得将单一微量元素信号简单归因于某一特定变质 P - T 条件存在风险。其次, 文中计算的锆石-石榴石分配系数虽具开创性, 但其数值主要基于麻粒岩相的高级变质环境, 在其他温度、压力及全岩成分完全不同的地质背景(如中-低级变质岩)中的普适性, 仍需大量后续工作予以检验。这些局限为后续研究指明了突破的方向, 如将锆石微量元素与原位微区定年和矿物包裹体信息相结合(Zhou等, 2011; Wang等, 2025), 能显著增强对年龄地质意义的解译精度; 高温高压实验与天然样品的大数据统计, 也能大大促进锆石-石榴石分配系数的经验关系建立, 使其向更定

量、可靠的地球化学温压计发展(如Taylor等, 2016)。

5 近二十年变质 P - T - t 轨迹研究新进展新挑战

正如前文所述, 自20世纪70年代奠基性工作以来, 变质 P - T - t 轨迹研究历经了从概念萌芽、方法建立到应用拓展的完整发展周期(图1)。进入21世纪, 该领域在延续经典研究的基础上, 在技术与理论上均取得了突破性进展, 特别是在数值模拟正演与岩石学反演的结合方面取得了系统性成果(Beaumont等, 2004; Massonne, 2013; Brown, 2014)。一方面, 针对俯冲带、碰撞造山带及克拉通等不同构造环境的热-力学模拟日益精细化, 能够定量预测不同动力学过程(如地壳加厚、剥蚀、岩浆底侵、俯冲不同阶段等)对 P - T - t 轨迹形态的控制(Gerya等, 2008; Jamieson和Beaumont, 2011; 陈意, 2019; 张立飞和王杨, 2020); 另一方面, 对蓝片岩、榴辉岩、麻粒岩等变质岩的研究和系统总结, 通过矿物环带分析、相平衡模拟与微区定年技术, 实现了从变质记录中反演多阶段 P - T - t 演化(魏春景等, 2013, 2021; 李继磊, 2020; Dan等, 2025)。研究范畴也从经典造山带拓展至超高压、超高温等极端变质作用, 为理解大陆深俯冲和早期地壳演化提供了关键依据(Chopin, 2003; Zheng和Chen,

2021; 张贵宾等, 2021; Jiao等, 2023)。

尽管进展显著, 该领域仍面临诸多挑战。首先, 矿物环带受扩散作用改造以及变质反应的非平衡过程, 给 P - T 路径的精确反演带来不确定性 (Caddick等, 2010)。其次, 流体/熔体活动难以量化, 制约了从 P - T - t 轨迹向包含成分演化的 P - T - t - X 轨迹的拓展 (Yakymchuk和Brown, 2019)。再次, 复杂多期变质事件的叠加导致矿物记录解耦困难, 对岩石学反演和年代学解释提出了更高要求 (Yu等, 2022)。此外, 峰期变质时间尺度与整个变质过程时间尺度的解耦问题。地质速率计的发展使得极短时间尺度地质过程的识别成为可能, 这对于量化 T - t 轨迹以及示踪变质热源非常重要 (Viete和Lister, 2017)。许多工作基于扩散模拟已经识别出变质热峰期仅仅是长期变质过程的一个短暂瞬间 (如Ague和Baxter, 2007; Chu等, 2018)。这些研究结果证明了部分情况下变质岩记录的峰期温度对应的地温梯度很可能与所在构造背景下的相对稳态地温梯度不一致, 即峰期变质条件是否始终具有构造指示意义需要谨慎对待。

6 结语与展望

变质 P - T - t 轨迹自20世纪70年代提出以来, 已发展成为理解地壳演化与揭示造山带动力学的重要手段。从England和Richardson (1977) 的“变质地温线”概念, 到Spear和Selverstone (1983) 的矿物环带反演方法, 再到England和Thompson (1984) 正式提出“变质 P - T 轨迹”术语和England和Thompson (1984) 的 P - T 轨迹应用实践, 这一系列经典研究共同奠定了变质作用从静态平衡走向动态演化的理论基础。Brown (1993) 的综述确立了 P - T - t 轨迹在构造解译中的重要地位, 而Rubatto (2002) 的把锆石U-Pb年龄与变质阶段的 P - T 条件精确匹配则标志着 P - T - t 研究进入微区原位同位素年代学和地球化学时代。尽管这些经典研究在流体行为、扩散再平衡、变质过程中的矿物非平衡及多维耦合等方面存在局限性, 但它们所提出的关键问题与方法, 有力推动了后续数十年的方法革新与技术突破。高温高压实验、微区原位分析、热力学模拟与数值模型的融合发展, 使变质 P - T - t 轨迹重建从单一岩石样品扩展至区域构造系统, 从定性识别发展为定量过程模拟。

展望未来, 变质 P - T - t 研究将在以下方向持续深化: (1) 极端变质过程与早期地球构造: 对超高压、超高温变质作用的深入研究, 将进一步揭示大陆深俯冲、板块起始与早期地球构造样式等前沿科学问题。(2) 智能岩石学与大数据驱动: 机器学习、人工智能与岩石大数据的融合, 有可能实现 P - T - t 路径的自动反演与区域对比, 推动

变质地质学进入“数字地球”时代。(3) 流体-熔体-岩石相互作用深化: 随着对俯冲带流体地球化学认识的深化, 流体在 P - T - t 轨迹中的角色将从“被动响应者”转变为“主动参与者”, 其在元素迁移、相变触发与构造反馈中的关键作用将被进一步揭示, 构建动态的 P - T - t - X 轨迹。

随着科学技术的发展和研究手段的丰富, 正如板块构造理论在21世纪从运动学向动力学演变 (郑永飞和李振新, 2025), 变质 P - T - t 研究也有望经历从“轨迹重建”走向“过程模拟”、从“三维溯源”迈向“多维预测”的重要转变。经典论文所奠定的思想基石与技术路径, 将继续激励新一代变质地质学家在“变质 P - T - t 轨迹”道路上开拓进取。

致谢 非常感谢主编郑永飞院士的约稿, 也感谢三位匿名审稿人的宝贵意见。

参考文献

- 陈意. 2019. 板块俯冲起始与成熟阶段的差异变质响应. 矿物岩石地球化学通报, 38: 490–498
- 程裕淇, 庄育勋, 沈其韩. 1998. 变质作用的回顾与展望. 地学前缘, 5: 257–265
- 董申保, 魏春景. 1997. 变质地质学的某些进展. 岩石学报, 13: 274–288
- 贺高品. 1991. 变质作用 P - T - t 轨迹的岩石学研究方法. 国外前寒武纪地质, 3: 20–30
- 李继磊. 2020. 蓝片岩——俯冲带高压低温变质作用和地球动力学过程的记录. 中国科学: 地球科学, 50: 1692–1708
- 卢良兆. 1991. 变质作用 P - T - t 轨迹及地球动力学意义. 国外前寒武纪地质, 3: 4–19
- 路凤香, 桑隆康. 2002. 岩石学. 北京: 地质出版社. 399
- 魏春景. 2011. 变质作用 P - T - t 轨迹的研究方法与进展. 地学前缘, 18: 1–16
- 魏春景. 2012. 21世纪最初十年变质岩石学研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 31: 415–427
- 魏春景, 郑永飞. 2020. 大洋俯冲带变质作用、流体行为与岩浆作用. 中国科学: 地球科学, 50: 1–27
- 魏春景, 田作林, 张立飞. 2013. 高压-超高压榴辉岩的峰期矿物组合与 P - T 条件模拟. 科学通报, 58: 2159–2164
- 魏春景, 张媛媛, 董杰. 2021. 麻粒岩的研究进展与方法. 岩石学报, 37: 52–64
- 张贵宾, 刘良, 魏春景, 等. 2021. 中国变质岩研究近十年新进展. 矿物岩石地球化学通报, 40: 1230–1249
- 张立飞, 王杨. 2020. 俯冲带高压-超高压变质地体的抬升折返机制: 问题和探讨. 中国科学: 地球科学, 50: 1727–1747
- 张强强, 高晓英, 陈仁旭, 等. 2023. 东特提斯构造域变质演化及其构造启示. 中国科学: 地球科学, 53: 2723–2749
- 郑永飞, 李振新. 2025. 板块构造理论的诞生. 中国科学: 地球科学, 55: 2104–2110
- Ague J J, Baxter E F. 2007. Brief thermal pulses during mountain building recorded by Sr diffusion in apatite and multicomponent diffusion in garnet. *Earth Planet Sci Lett*, 261: 500–516
- Austrheim H. 1987. Eclogitization of lower crustal granulites by fluid migration through shear zones. *Earth Planet Sci Lett*, 81: 221–232
- Banno S. 1970. Classification of eclogites in terms of physical conditions of their origin. *Phys Earth Planet Inter*, 3: 405–421
- Barrow G. 1893. On an intrusion of muscovite-biotite gneiss in the south-eastern Highlands of Scotland, and its accompanying metamorphism. *Quart J Geol Soc*, 49: 330–358

- Barrow G. 1912. On the geology of Lower Dee-side and the southern Highland Border. *Proc Geologists Assoc*, 23: 274–IN1
- Beaumont C, Jamieson R A, Nguyen M H, et al. 2004. Crustal channel flows: 1. Numerical models with applications to the tectonics of the Himalayan-Tibetan orogen. *J Geophys Res*, 109: 2003JB002809
- Berman R G. 1988. Internally-Consistent Thermodynamic Data for Minerals in the System $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$. *J Petrol*, 29: 445–522
- Bohlen S R. 1987. Pressure-temperature-time paths and a tectonic model for the evolution of granulites. *J Geol*, 95: 617–632
- Brown M. 1993. *P-T-t* evolution of orogenic belts and the causes of regional metamorphism. *J Geol Soc*, 150: 227–241
- Brown M. 2014. The contribution of metamorphic petrology to understanding lithosphere evolution and geodynamics. *Geosci Front*, 5: 553–569
- Brown M, Johnson T E. 2019a. Metamorphism and the evolution of subduction on Earth. *Am Mineral*, 104: 1065–1082
- Brown M, Johnson T E. 2019b. Time's arrow, time's cycle: Granulite metamorphism and geodynamics. *MinMag*, 83: 323–338
- Caddick M J, Konopásek J, Thompson A B. 2010. Preservation of garnet growth zoning and the duration of prograde metamorphism. *J Petrol*, 51: 2327–2347
- Cheng H, Vervoort J D, Dragovic B, et al. 2018. Coupled Lu-Hf and Sm-Nd geochronology on a single eclogitic garnet from the Huwan shear zone, China. *Chem Geol*, 476: 208–222
- Chopin C. 2003. Ultrahigh-pressure metamorphism: Tracing continental crust into the mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 212: 1–14
- Chu X, Ague J J, Tian M, et al. 2018. Testing for rapid thermal pulses in the crust by modeling garnet growth-diffusion-resorption profiles in a UHT metamorphic 'hot spot', New Hampshire, USA. *J Petrol*, 59: 1939–1964
- Crawford M L, Mark L E. 1982. Evidence from metamorphic rocks for overthrusting, Pennsylvania Piedmont, USA. *Can Mineral*, 20: 330–347
- Dallmeyer R D, Brown M. 1992. Rapid variscan (c. 300 Ma) exhumation of eo-variscan (c. 400 Ma) metamorphic rocks from South Brittany, France: New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age data and tectonic implications. *Geol Soc Am Abstr Programs*, 24: A236
- Dan W, Zhang X Z, Chen Y X, et al. 2025. Metamorphic evolution of Mesozoic microcontinent suture zones in the Tibet region. *Earth-Sci Rev*, 268: 105174
- Dong J, Wei C, Yin A, et al. 2024. Tectonic transition from continental subduction to orogenic collapse recorded by ultrahigh-pressure to ultrahigh-temperature metamorphism. *Earth Planet Sci Lett*, 638: 118743
- Engi M, Lanari P, Kohn M J. 2017. Significant ages—An introduction to petrochronology. *Rev Mineral Geochem*, 83: 1–12
- England P C, Richardson S W. 1977. The influence of erosion upon the mineral fades of rocks from different metamorphic environments. *J Geol Soc*, 134: 201–213
- England P C, Thompson A B. 1984. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism I. Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust. *J Petrol*, 25: 894–928
- Eskola P. 1915. On the relations between the chemical and mineralogical composition in the metamorphic rocks of the Orijarvi region. *Geol Surv Finl Bull*, 44: 109–145
- Eskola P. 1920. The mineral facies of rocks. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 6: 143–194
- Evans T P. 2004. A method for calculating effective bulk composition modification due to crystal fractionation in garnet-bearing schist: Implications for isopleth thermobarometry. *J Metamorph Geol*, 22: 547–557
- Ferry J M, Spear F S. 1978. Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet. *Contrib Mineral Petrol*, 66: 113–117
- Gaidies F, de Capitani C, Abart R. 2008. THERIA_G: A software program to numerically model prograde garnet growth. *Contrib Mineral Petrol*, 155: 657–671
- Gerya T V, Perchuk L L, Burg J P. 2008. Transient hot channels: Perpetrating and regurgitating ultrahigh-pressure, high-temperature crust–mantle associations in collision belts. *Lithos*, 103: 236–256
- Ghent E D, Robbins D B, Stout M Z. 1979. Geothermometry, geobarometry, and fluid compositions of metamorphosed calc-silicates and pelites, Mica Creek, British Columbia. *Am Mineral*, 64: 874–885
- Harley S L. 1989. The origins of granulites: A metamorphic perspective. *Geol Mag*, 126: 215–247
- Hodges K V, Spear F S. 1982. Geothermometry, geobarometry and the Al_2SiO_5 triple point at Mt. Moosilauke, New Hampshire. *Am Mineral*, 67: 1118–1134
- Holland T J B, Powell R T J B. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *J Metamorph Geol*, 16: 309–343
- Jamieson R A, Beaumont C. 2011. Coeval thrusting and extension during lower crustal ductile flow—Implications for exhumation of high-grade metamorphic rocks. *J Metamorph Geol*, 29: 33–51
- Ji M, Gao X Y, Xia Q X, et al. 2024. Secular change of metamorphic features in the Himalayan orogen during the Cenozoic and its tectonic implications. *Earth-Sci Rev*, 248: 104640
- Jiao S J, Brown M, Mitchell R N, et al. 2023. Mechanisms to generate ultrahigh-temperature metamorphism. *Nat Rev Earth Environ*, 4: 298–318
- Kohn M J. 1989. Empirical calibration of geobarometers for the assemblage garnet+hornblende+plagioclase+quartz. *Am Mineral*, 75: 89–96
- Kretz R. 1961. Some applications of thermodynamics to coexisting minerals of variable composition. Examples: Orthopyroxene-clinopyroxene and orthopyroxene-garnet. *J Geol*, 69: 361–387
- Lanari P, Engi M. 2017. Local bulk composition effects on metamorphic mineral assemblages. *Rev Mineral Geochem*, 83: 55–102
- Lapen T J, Johnson C M, Baumgartner L P, et al. 2003. Burial rates during prograde metamorphism of an ultra-high-pressure terrane: An example from Lago di Cignana, western Alps, Italy. *Earth Planet Sci Lett*, 215: 57–72
- Li B T, Massonne H J, Zhang J F. 2020. Evolution of a gneiss in the Seve nappe complex of central Sweden—Hints at an early Caledonian, medium-pressure metamorphism. *Lithos*, 376–377: 105746
- Li J L, Klemd R, Gao J, et al. 2016. Poly-cyclic metamorphic evolution of eclogite: Evidence for multistage burial-exhumation cycling in a subduction channel. *J Petrol*, 57: 119–146
- Massonne H J. 2013. Constructing the pressure-temperature path of ultrahigh-pressure rocks. *Elements*, 9: 267–272
- Mezger K, Rawnsley C M, Bohlen S R, et al. 1991. U-Pb garnet, sphene, monazite and rutile ages: Implications for the duration of high-grade metamorphism and cooling histories, Adirondack Mountains, New York. *J Geol*, 99: 415–428
- Miyashiro A. 1961. Evolution of metamorphic belts. *J Petrol*, 2: 277–311
- Pattison D R M, Tinkham D K. 2009. Interplay between equilibrium and kinetics in prograde metamorphism of pelites: An example from the Nelson aureole, British Columbia. *J Metamorph Geol*, 27: 249–279
- Powell R, Holland T J B. 1988. An internally consistent dataset with uncertainties and correlations: 3. Applications to geobarometry, worked examples and a computer program. *J Metamorph Geol*, 6: 173–204
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chem Geol*, 184: 123–138
- Ruppel C, Hodges K V. 1994. Pressure-temperature-time paths from two-dimensional thermal models: Prograde, retrograde, and inverted metamorphism. *Tectonics*, 13: 17–44

- Selverstone J, Spear F S, Franz G, et al. 1984. High-pressure metamorphism in the SW Tauern Window, Austria: *P-T* paths from hornblende-kyanite-staurolite schists. *J Petrol*, 25: 501–531
- Serra-Varela S, Verdecchia S O, Lembo Wuest C I, et al. 2024. Polymetamorphic *P-T* evolution of the andalusite-garnet-staurolite-sillimanite-bearing schist from the Cushamen Complex (Argentina). *Int J Earth Sci-Geol Rund*, 113: 1385–1406
- Spear F S. 1993. Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-temperature-time Paths. Washington, D C: Mineralogical Society of America. 799
- Spear F S, Selverstone J. 1983. Quantitative *P-T* paths from zoned minerals: Theory and tectonic applications. *Contrib Mineral Petrol*, 83: 348–357
- Spear F S, Peacock S M. 1989. Spear F S, Peacock S M. 1989. Metamorphic Pressure-Temperature-Time Paths. Short course in Geology. Washington, D C: American Geophysical Union, 7
- Spear F S, Kohn M J, Florence F P, et al. 1990. A model for garnet and plagioclase growth in pelitic schists: Implications for thermobarometry and *P-T* path determinations. *J Metamorph Geol*, 8: 683–696
- Taylor R J M, Kirkland C L, Clark C. 2016. Accessories after the facts: Constraining the timing, duration and conditions of high-temperature metamorphic processes. *Lithos*, 264: 239–257
- Thompson A B. 1976. Mineral reactions in pelitic rocks. II. Calculation of some *P-T-X*(Fe-Mg) phase relations. *J Petrol*, 276: 425–454
- Thompson A B, England P C. 1984. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism II. Their inference and interpretation using mineral assemblages in metamorphic rocks. *Am J Sci*, 25: 929–955
- Thompson A B, Ridley J R. 1987. Pressure-temperature-time (*P-T-t*) histories of orogenic belts. *Philos Trans R Soc*, A321: 27–45
- Tracy R J, Robinson P, Thompson A B. 1976. Garnet composition and zoning in the determination of temperature and pressure of metamorphism, central Massachusetts. *Am Mineral*, 61: 762–775
- Viete D R, Lister G S. 2017. On the significance of short-duration regional metamorphism. *J Geol Soc*, 174: 377–392
- Wang J M, Wu F Y, Zhang J J, et al. 2022. The Himalayan collisional orogeny: A metamorphic perspective. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 96: 1842–1866
- Wang Y C, Zhang Q Q, Gao X Y. 2025. A re-evaluation of prograde pressure-temperature paths of eclogites from the Tongbai orogen by quartz-in-garnet and Ti-in-calcic amphibole thermobarometry. *Contrib Miner Petrol*, 180: 1–2
- Wei C J, Wang W, Clarke G L, et al. 2009. Metamorphism of high/ultrahigh-pressure pelitic-felsic schist in the South Tianshan Orogen, NW China: Phase equilibria and *P-T* path. *J Petrol*, 50: 1973–1991
- Whitney D L, Samuelson W J. 2019. Crystallization sequences of coexisting andalusite, kyanite, and sillimanite, and a report on a new locality: Lesjaverk, Norway. *Eur J Mineral*, 31: 731–737
- Xia M, Zhang Q Q, Gao X Y. 2023. Thermal structure of the paleo-continental subduction zone: Insights from quantitatively constrained prograde *P-T* paths of exhumed LT/UHP eclogites in the Dabie Orogen. *Geochem Geophys Geosyst*, 24: e2022GC010852
- Yakymchuk C, Brown M. 2019. Divergent behaviour of Th and U during anatexis: Implications for the thermal evolution of orogenic crust. *J Metamorph Geol*, 37: 899–916
- Yoneguchi Y, Tsunogae T, Takahashi K, et al. 2021. Pressure-temperature evolution of andalusite-kyanite-sillimanite-bearing pelitic schists from Nishidohira, southern Abukuma Mountains, Northeast Japan: Implications for Cretaceous rapid burial and exhumation in the Northeast Asian continental margin. *Lithos*, 406-407: 106522
- Yu C Y, Yang T, Zhang J, et al. 2022. Coexisting diverse *P-T-t* paths during Neoproterozoic Sagduction: Insights from numerical modeling and applications to the eastern North China Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 586: 117529
- Zheng Y F, Chen R X. 2021. Extreme metamorphism and metamorphic facies series at convergent plate boundaries: Implications for supercontinent dynamics. *Geosphere*, 17: 1647–1685
- Zhou L G, Xia Q X, Zheng Y F, et al. 2011. Multistage growth of garnet in ultrahigh-pressure eclogite during continental collision in the Dabie Orogen: Constrained by trace elements and U-Pb ages. *Lithos*, 127: 101–127
- Zou Y, Chen J, Chu X, et al. 2025. Unraveling Orosirian geodynamics: High-resolution exhumation and cooling rates in a Paleoproterozoic orogen using Monte Carlo garnet diffusion chronometry. *Contrib Mineral Petrol*, 180: 371

(责任编辑: 郑永飞)