

辽西凌海地区新太古代岩石深熔特征及其成因机制

陈雪¹, 梁琛岳^{1,2,*}, 郑常青^{1,2}, 宋志伟¹

¹ 吉林大学地球科学学院, 吉林长春, 130061

² 吉林大学东北亚矿产资源评价自然资源部重点实验室, 吉林长春, 130061

摘要: 华北克拉通北部辽西凌海地区新太古代花岗质岩石普遍经历深熔作用改造, 为揭示地球早期大陆地壳形成和演化提供了关键窗口。通过宏-微观构造解析、地球化学分析和 EBSD 组构测试, 发现辽西凌海地区 2.53~2.50 Ga 处于大陆弧环境, 发生大规模部分熔融, 其中~2.52 Ga TTG 片麻岩系列具有过铝质钙碱性花岗岩特征, 源于岩浆弧根部加厚地壳的石榴石角闪岩部分熔融, 为下地壳部分熔融产物; ~2.50 Ga 富钾花岗岩属于过铝质钾玄岩系列的 S 型花岗岩, 源自上地壳变泥质岩石的部分熔融, 为新太古代末期地壳改造过程中熔体聚集区, 具有原地型混合花岗岩特点。从 TTG 片麻岩到富钾花岗岩, 深熔岩浆的分异程度和成熟度逐渐增高, 深成熔体不断分异、富集, 地壳成分由富 Na、Ca 向富 K 转变。深熔作用发生于高温(700°C)中压(0.4~1.0GPa)环境, 其中长石变形受位错蠕变主导。综合区域研究成果, ~2.52 Ga 的大陆岩石圈碰撞缩短导致地壳深部物质发生部分熔融, 熔体有效地改变了深部岩石的物理性质, 促使地壳变形从缩短增厚向伸展减薄转换, 诱发伸展作用的启动。~2.50 Ga 以强烈伸展作用为主, 伴随深部地壳物质快速剥露, 导致变泥质岩石发生大规模减压部分熔融作用, 形成了区域大量富钾花岗岩。

关键词: 华北克拉通; 辽西地区; 新太古代; 深熔作用; TTG

中图分类号: P581; P597

收稿日期: 2025-06-28

Anatectic characteristics and genetic mechanisms of Neoarchean rocks in the Linghai area, western Liaoning

CHEN Xue¹, LIANG Chenyue^{1,2,*}, ZHENG Changqing^{1,2}, SONG Zhiwei¹

¹ College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun, Jilin, 130061, China

² Key Laboratory of Mineral Resources Evaluation in Northeast Asia, Ministry of Natural Resources, Jilin University, Changchun, Jilin, 130061, China

①基金项目: 国家自然科学基金项目(42372255、42172213 和 41972215)资助

②作者简介: 陈雪(1997-), 女, 博士研究生, 主要从事前寒武纪大陆动力学研究. ORCID: 0009-0001-8349-8486. E-mail: chenxue22@mails.jlu.edu.cn

③通讯作者: 梁琛岳(1986-), 男, 教授, 主要从事构造地质学教学与科研工作. ORCID: 0000-0002-4269-5010. E-mail: chenyueliang@jlu.edu.cn

Abstract: The Neoarchean granitoid rocks in the Linghai area of western Liaoning, located within northern North China Craton, have undergone significant anatexis, making this region crucial window for deciphering the formation and evolution processes of Earth's early continental crust. Integrated macroscopic and microscopic structural analyses, geochemical investigations, and EBSD fabric measurements have demonstrated that the Linghai area of western Liaoning (2.53-2.50 Ga) experienced extensive crustal anatexis within a continental arc environment. The ~2.52 Ga TTG gneiss displays distinctive peraluminous calc-alkaline granites, petrogenetically linked to partial melting of garnet amphibolite in the thickened crust at the root of a magmatic arc, representing partial melting of the lower crust. In contrast, the ~2.50 Ga K-rich granites belong to the S-type granites of the peraluminous shoshonite series, derived from anatexis of metapelitic rocks in the upper crust levels. These granites represent melt accumulation zones during the late Neoarchean crustal reworking process, exhibiting textural and compositional characteristics of in-situ hybrid granites. From the TTG gneisses to the K-rich granites, the degree of differentiation and maturity of the anatectic magmas gradually increases, with continuous differentiation and enrichment of the plutonic melts, and a transition from Na- and Ca-rich to K-rich crust. The widespread anatexis occurred under high-temperature (700 °C) and medium-pressure (0.4-1.0 GPa) conditions, with feldspar primarily controlled by dislocation creep. Integrating regional research findings, the continental lithospheric collision and shortening at ~2.52 Ga led to partial melting of deep crustal materials. The melts effectively altered the physical properties of the deep rocks, prompting a transition in crustal deformation from shortening and thickening to extension and thinning, thus triggering the onset of extension. At ~2.50 Ga, the region was dominated by intense extension, accompanied by rapid exhumation of deep crustal materials. This led to large-scale decompression partial melting of metapelitic rocks, generating extensive K-rich granites in the region.

Key words: North China Craton; Western Liaoning; Neoarchean; Anatexis; TTG

0 引言

太古宙晚期（距今 30-25 亿年前）是大陆地壳和地球动力学过程发生重大变革的时期。华北克拉通于~2.5 Ga 期间发生了一次重要的构造-岩浆热事件，使早-中太古代地壳发生部分熔融，同时伴有大量幔源基性岩浆侵入，大陆地壳厚度和规模随时间演化不断增大（Zhai, 2004; 耿元生等, 2010; Liu et al., 2011）。作为地壳深熔事件的记录者，新太古代花岗质岩石为理解太古宙深熔作用、大陆地壳形成与演化过程提供了直接证据。在新太古代地体中，TTG 片麻岩占主导地位，为含水变质基性岩在高压环境下部分熔融产生，且残留相中含有大量石榴石（Rapp et al., 2003; Moyen and Martin, 2012），推断其可能形成于大洋板块俯冲或洋底高原（Xiong et al., 2009; Martin et al., 2014），或与地幔柱相关的加厚地壳的构造环境（Smithies and Champion, 2000; Condie, 2005; Campbell and Davies, 2017），由此可知，对于太古代岩浆活动和动力机制的认识仍需进一步验证。在新太古代末期，富钾花岗质岩石的比例显著增加，代表太古宙克拉通形成的最后一次重大岩浆事件，被认为形成于伸展构造环境，预示着克拉通的增厚与稳定，也暗示着地壳演化机制发生了根本性转变（Kumar et al., 2011; Romano et al., 2013）。辽西地区位于华北克拉通东部地块东北缘（图 1），区域内新太古代花岗质岩石主要由西北部的 TTG 片麻岩和东南部的富钾花岗质岩石组成（Wang et al., 2012, 2015, 2016; Fu et al., 2017; 刘树文等, 2018a, 2018b），对于其出露的太古宙深熔岩石的变形样式、岩石流变行为及成因机制等研究仍不明确。位于辽西东南部的凌海地区保留了较完整的新太古代晚期 TTG 片麻岩和富钾花岗岩组合，广泛发育的中-下地壳尺度深熔岩石和丰富的流变构造现象，是研究大陆下地壳流变学特征，深入解释地壳变形、壳-幔物质交换等过程理想的野外实验室。

深熔作用（Anatexis）是特指岩石熔融过程的术语，是岩石圈演化最基本的转化过程，通常在高级变质作用区及其下部地壳广泛发生，形成混合岩，并产生巨量的花岗质岩浆（Whitney et al., 2003; 张媛媛, 2017）。地壳深熔作用是连接地壳深部高级变质作用、构造变形的重要纽带，强烈影响着大陆地壳的热力学结构、流变学性质和地球化学行为（Whitney et al., 2003; Sawyer et al., 2011; Hu et al., 2016; Gao et al., 2017）。塑性流动变形伴随加厚地壳的伸展减薄-隆升过程而逐渐硬化并遭受剥露，这些遭受了强烈的部分熔融、构造变形和变质作用的深熔岩石，记录了丰富的构造流变和深部地壳源区信息，为研究部分熔融下地壳的流变学特征提供了理想对象（Sawyer, 2008, 2020; Vanderhaeghe, 2009; Sawyer et al., 2011; Morfin et al., 2013, 2014; Gao and Zeng, 2014; Gao et al., 2017; 曾令森和高利娥, 2017; 张进江等, 2019）。但如果岩石的部分熔融程度很高，关于部分熔融的信息局限在颗粒尺度上，就需要我们通过观察岩石深熔显微组构及矿物共生组合明确矿物之间的演化关系（Berger and Kalt, 1999; Berger and Roselle, 2001）。因此，深入细致地分析混合岩中矿物之间的微观结构和相互关系，对于我们明确其成因和演化过程至关重要（Fitzsimons, 1996; Greenfield et al., 1996; Hartel and Pattison, 1996; Raith and Harley, 1998; Cesare, 2000; Johnson

et al., 2003; White et al., 2003; Chen et al., 2015)。

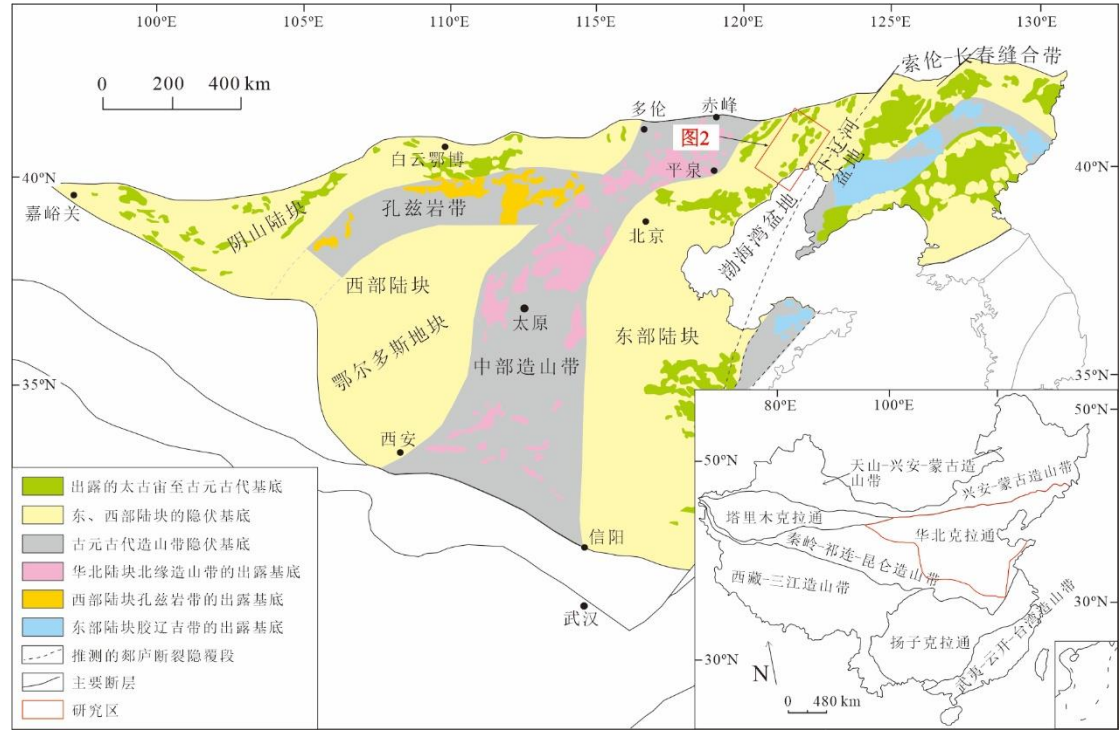


图 1 华北克拉通 (NCC) 地质简图 (根据 Zhao et al. 2005; Gao and Santosh, 2019)

Fig. 1. Geological sketch map of North China Craton (NCC) (modified from Zhao et al., 2005; Gao and Santosh, 2019).

1. 地质背景

辽西地区位于华北克拉通北部，东部陆块西北缘中段，北邻兴蒙造山带，东至下辽河断陷之西缘，西到赤峰-平泉一线 (李伍平和李献华, 2005; 张国仁, 2006; 宋志伟等, 2023; Song et al., 2025)，区域内大致以东北-西南走向出露大量早前寒武纪 (变质) 基底岩石 (Liu et al., 2011; Wang et al., 2011, 2013; 图 1)。凌海地区位于该带东北部 (图 2)，出露的新太古代岩石以花岗岩岩石为主，其中，TTG 岩石分布广泛，形成于 2526–2509 Ma，表现为一套片麻岩组合，如绿帘黑云片麻岩，二长花岗岩等，岩石普遍发生糜棱岩化 (Chen et al., 2025)；富钾花岗岩的形成经历了两个阶段，强片麻状富钾花岗岩形成于 2514–2512 Ma，弱片麻状至块状的富钾花岗岩形成于 2508–2501 Ma，多呈脉状产出，侵位于 TTG 片麻岩中，如二长花岗岩、碱长花岗岩、伟晶岩等，岩石发育弱片麻理 (Chen et al., 2025)。受混合岩化作用影响，该区流动构造明显，可见条带状、迷雾状、析离状构造，定向性较弱 (Wang et al., 2015; Chen et al., 2025)。为了避免晚期中生代剪切作用对于太古代深熔作用的影响，本文选择了受剪切作用影响微弱的 3 个代表性的混合岩单元中 TTG 片麻岩与富钾花岗岩样品，并对其进行了详细的岩石学、全岩地球化学和 EBSD 组构分析，旨在阐明其岩石成因、微观变形机制，为辽西地区地壳生长与演化、深熔作用与流变等关键问题提供新的认识。

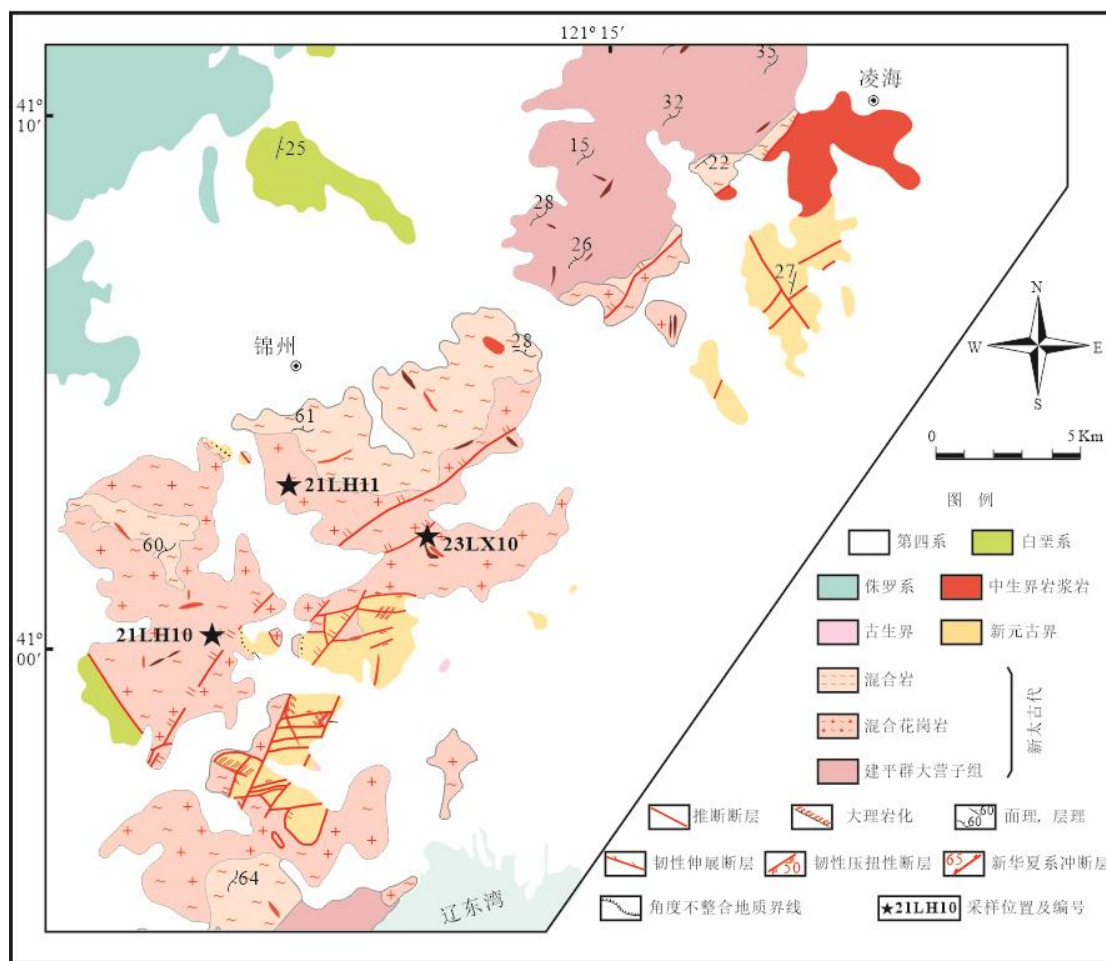


图2 辽西凌海地区地质图 (根据辽宁省地质局, 2003)

Fig. 2. Geological Map of Linghai area of Western Liaoning (modified after GSILP, 2003)

2. 宏微观构造样式

凌海地区新太古代晚期结晶基底经历了多期次、不同环境下的构造作用叠加与改造, 具有十分复杂的变质变形历史, 使其保留的构造样式较为复杂。笔者在详细的野外宏观构造特征识别的基础上, 为进一步研究凌海地区中下地壳典型深熔岩石构造特征, 选择混合岩单元收集的三件 TTG 片麻岩 (21LH11-1, 23LX10-4) 与富钾花岗岩 (21LH10-5) 样品, 开展详细的宏-微观构造解析、全岩地球化学测试和 EBSD 组构分析。

2.1 TTG 片麻岩系列

TTG 片麻岩系列以糜棱岩化二长花岗岩 (21LH11-1, 23LX10-4) 为代表, 样品在野外表现出典型的混染状、条纹状构造特征, 以黑云母为主聚集而成的团块状暗色体及长英质矿物聚集而成的浅色体呈条带状相间发育, 表现出典型深部构造层次的流变学特征 (图 3a-c, 图 4a-c)。样品风化面为浅灰色, 新鲜面为灰白色。矿物成分由石英 (25~30%; 0.1-3.25mm)、斜长石 (~30%; 0.1-6mm)、钾长石 (~20%; 0.225-10mm)、绿帘石 (0~5%; 0.025-0.875mm)、黑云母 (5~10%; 0.1-1.625mm)、绿帘石 (0~5%; 0.025-0.875mm) 等组成, 中-粗粒花岗

结构，弱糜棱岩化构造（Chen et al., 2025）。

2.1.1 糜棱岩化二长花岗岩 21LH11-1

镜下可见部分微斜长石颗粒显示出轻微拉长特征，粒间发育有小型熔体膜等残留熔体结晶现象（图 3d）。斜长石呈不规则拉长状，代表熔体成分的石英等充填其中，且几乎全部相互联通，斜长石边界被熔蚀为锯齿状（图 3e, f）。此外，斜长石中还见石英包裹体颗粒（图 3g）。钾长石表现为膨凸重结晶作用（图 3e, f），双晶减少，颗粒边缘出现蠕英结构（图 3h）。黑云母呈定向分布，表现为不规则熔蚀的港湾状（图 3e）。斜长石与微斜长石晶形已经不完整，不能构成晶体堆积格架，晶体悬浮在熔体中，熔体成分可达 35~40%。整体上糜棱岩化二长花岗岩（21LH11-1）与弱片麻状二长花岗岩（21LH10-5）相比，缺少紧密堆积结构，说明熔体成分高，有熔体进一步汇聚的特征。

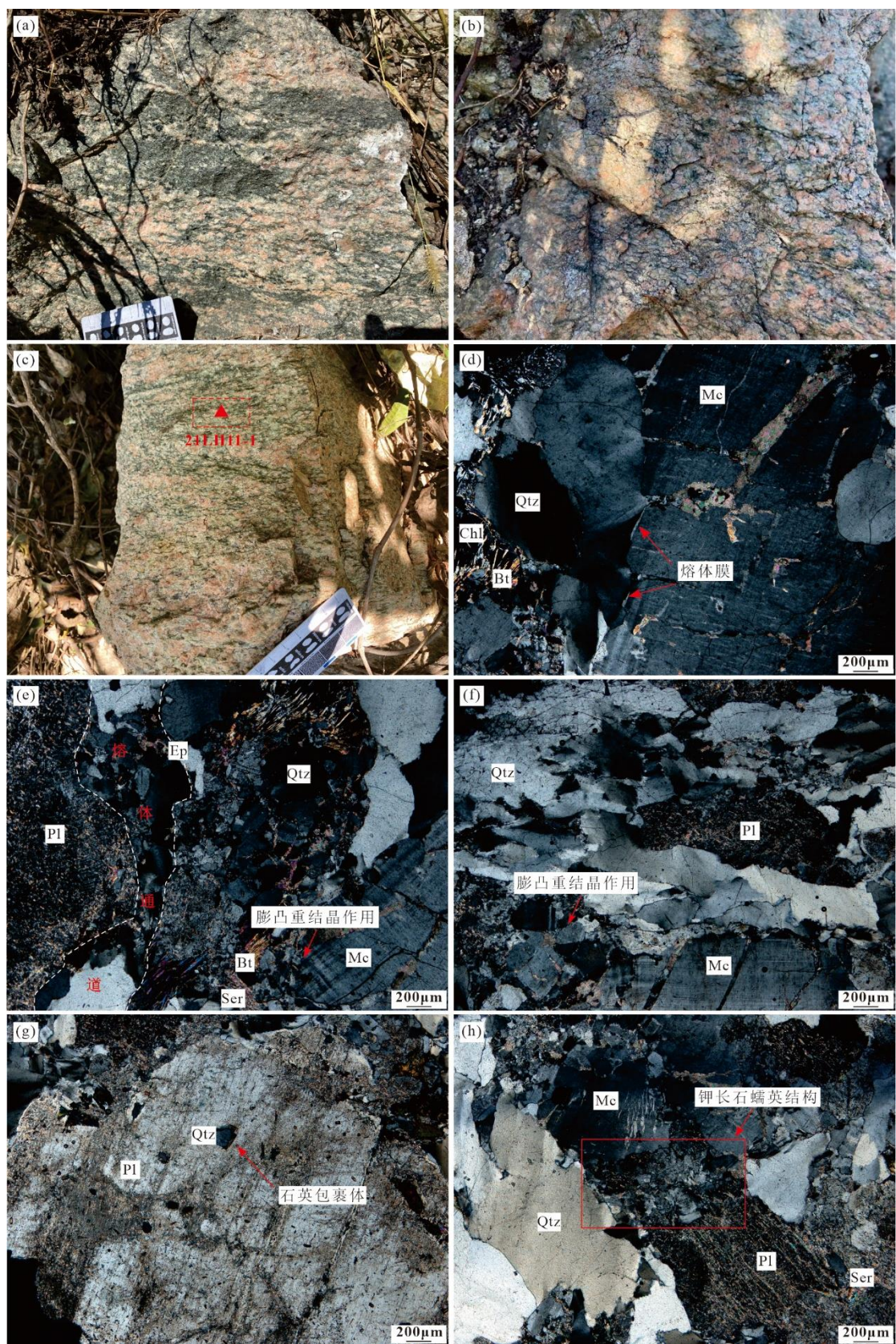


图 3 21LH11-1 糜棱岩化二长花岗岩野外照片与显微照片

Fig. 3. Field photographs and microphotographs of mylonitized monzogranite from sample 21LH11-1
 (a-c) 糜棱岩化二长花岗岩野外照片; (d) 微斜长石与石英颗粒之间的熔体膜与非紧密堆积结构; (e)

黑云母不规则熔蚀港湾状；花岗岩的非紧密堆积结构，其中有熔体通道；钾长石的膨凸重结晶作用；（f）石英呈它形粒状产出，发育波状消光，斜长石呈不规则拉长状；钾长石边缘发育膨凸重结晶作用；（g）斜长石中可见石英包裹体颗粒；（h）钾长石边缘出现蠕英结构。

2.1.2 糜棱岩化二长花岗岩 23LX10-4

镜下可见黑云母呈条带状定向分布，边部呈不规则熔蚀港湾状（图 4d）。斜长石边部膨凸重结晶和亚颗粒旋转重结晶共存（图 4d, e; Yund and Tullis, 1992）。细粒微斜长石间堆积接触，晶粒之间界线平直，可见近 120° 角相交，为三边镶嵌的高温平衡结构（图 4e）。钾长石边部局部显示熔蚀特征，并发育蠕英结构，具有深熔作用阶段富晶体区域中残留熔体结晶的特点（图 4f）。斜长石表现出显著的熔蚀特征，几乎全部被熔蚀呈他形晶，晶体并未形成固态支撑骨架，而是以悬浮状态存在于熔体（钾长石、石英）之中，熔体成分可达 40~45%。各矿物颗粒之间的接触边界呈现不规则形态，可以判断此岩石成分代表进化的熔浆。

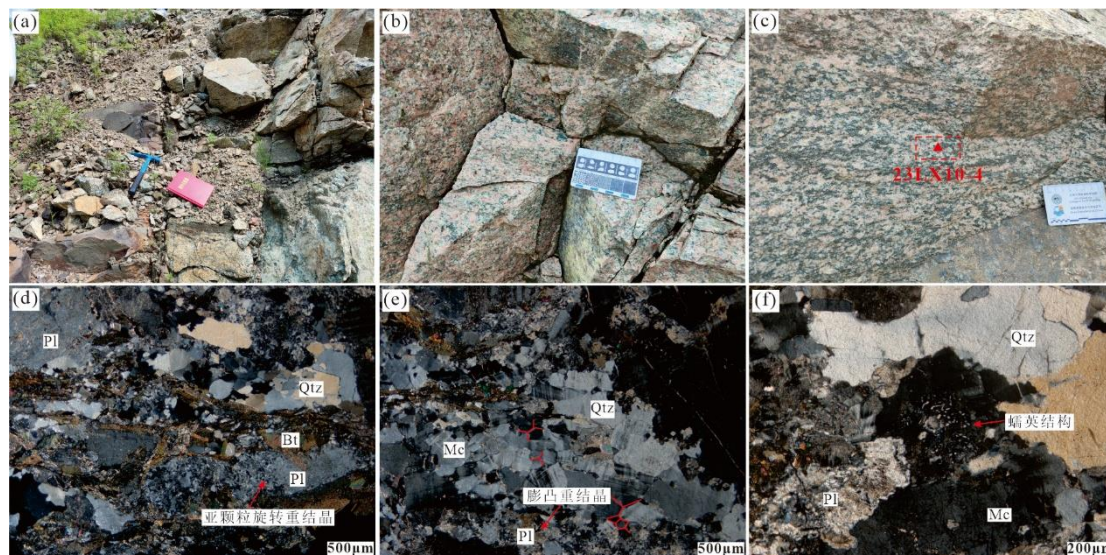


图 4 23LX10-4 糜棱岩化二长花岗岩野外照片与显微照片

Fig. 4. Field photographs and microphotographs of mylonitized monzogranite from sample 23LX10-4

（a-c）糜棱岩化二长花岗岩野外照片；（d）成条带状分布的黑云母定向分布，表现为不规则熔蚀港湾状；斜长石边部发育亚颗粒旋转重结晶；（e）微斜长石具有明显的堆积特征，发育三边平衡结构，以红色线条表示；斜长石发育膨凸重结晶；（f）钾长石的蠕英结构。

2.2 富钾花岗岩系列

富钾花岗岩以弱片麻状二长花岗岩（21LH10-5）为代表，样品发育明显的成分条带，暗色云母定向排列（图 5a），整体具有弱流动构造。样品新鲜面为肉红色，主要矿物成分为斜长石（~25%；0.12-5.2mm）、钾长石（~25%；0.6-3.5mm）、石英（~20%；0.15-1.7mm）、微斜长石（~15%；0.25-6.15mm），次要矿物为黑云母（~5%；0.05-1.1mm）、绿泥石（~5%；0.1-0.9mm）等，中粒花岗结构，弱片麻状、块状构造。

2.2.1 弱片麻状二长花岗岩 21LH10-5

细粒长石与石英颗粒之间以平直边缘紧密堆积，颗粒相交的面角近 120° ，平衡共生，构成三边镶嵌平衡结构，以团块状集合体分布于钾长石颗粒之间，可能为高温条件下发生静态恢复重结晶形成的（Passchier and Trouw, 2005），是熔体结晶的产物（图 5b-d）。黑云母表现为不规则熔蚀港湾状，为熔融后的残余矿物（图 5c）。粗粒斜长石与石英之间发育串珠状的细粒长英质矿物，斜长石边部发育膨凸重结晶（图 5e, f）。熔体含量相对较低（10%~15%），接近静态深熔作用的熔体联通门限（Jamieson and Beaumont, 2011），这种特征表明样品的形成环境是在无差异应力作用环境的静态熔融过程中形成。

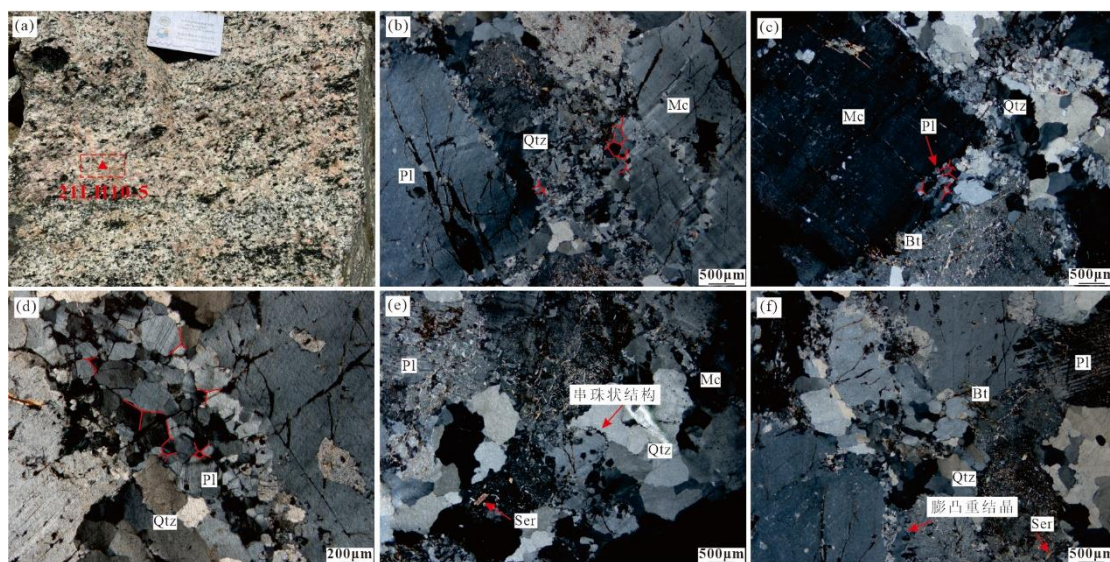


图 5 21LH10-5 弱片麻状二长花岗岩野外照片与显微照片

Fig. 5. Field photographs and microphotographs of weakly gneissic monzogranite from sample 21LH10-5

(a) 弱片麻状二长花岗岩野外照片；(b) 细粒长英质颗粒呈现三边平衡结构；(c) 微斜长石中见石英包裹体以及斜长石三边平衡结构，黑云母边部熔蚀为港湾状；(d) 斜长石三边平衡结构，以红色线条表示；(e) 石英与长石间发育“串珠状”结构；(f) 斜长石边部发育膨凸重结晶。

3. 全岩地球化学特征

3.1 测试样品及方法

本次研究主要对 6 件代表性样品进行全岩地球化学分析，试明确各主微量元素的变化及差异，挑选均匀的岩石样品，切割样品的自然风化面，确保待测样品是均匀且新鲜的。样品 21LH10-5a、21LH10-5b、21LH10-5c、21LH11-1a、21LH11-1b、21LH11-1c 全岩地球化学数据于中国冶金地质总局第一地质勘察院测试中心完成测定，主量元素采用 X 射线荧光光谱分析（XRF）玻璃熔片法进行测定，精度优于 5%，微量元素采用电感耦合等离子质谱法（ICP-MS）进行测定。测试所得主量元素数据以氧化物形式表示，计量单位为 wt. %，微量元素数据以单质形式表示，计量单位为 ppm。具体的实验步骤及测试条件参见靳新娣和朱和平（2000）。岩石样品的主、微量元素分析结果见表 1。

3.2 元素活动性评估

在评估元素的岩石成因之前，应评估蚀变对元素浓度的影响。所有样品的 Ce 异常值可忽略不计 ($Ce^* = Ce_N / \sqrt{La_N * Pr_N}$ ；介于 1.02–1.09 之间)，被认为是未蚀变的 (Polat and Kerrich, 2002; Polat and Hofmann, 2003; Wang et al., 2011)。此外，主要元素和微量元素与不活动元素 Al_2O_3/TiO_2 和 Zr 呈现出良好的线性关系，表明样品具有稳定性并未受到后续变质过程的干扰 (图 6a-r)。(Na₂O+K₂O)–Na₂O/K₂O 图解 (图 6s) 表明，样品的蚀变程度从新鲜到轻微蚀变 (Miyashiro, 1975)。球粒陨石标准化稀土元素 (REE) 配分模式和微量元素蛛网图 (图 8a, b) 显示，每个样品的稀土元素 (REE) 和高场强元素 (HFSE) 模式在很大程度上具有一致性，表明其原始特征总体上得到了很好的保存。因此，本研究样品可以代表初始岩浆成分，并有助于阐明岩石成因和地球动力学过程。

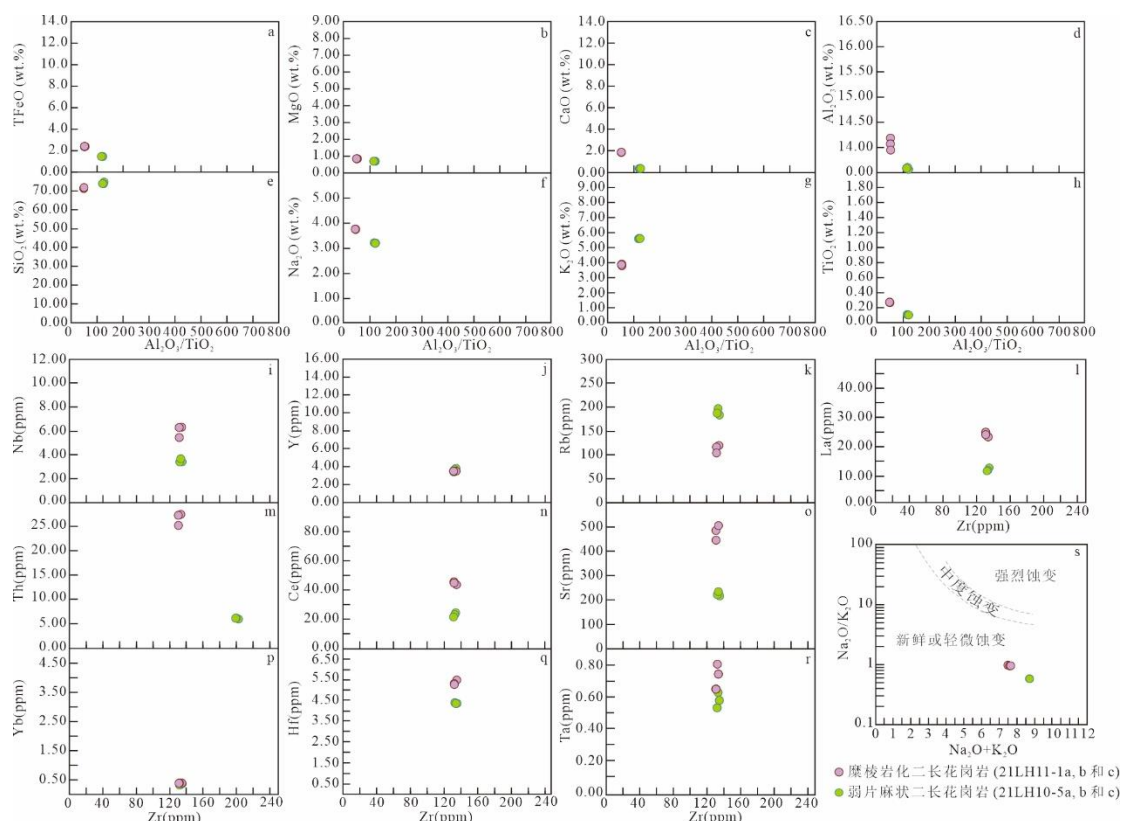


图 6 (a-h) 所有样品的 Al_2O_3/TiO_2 与主量元素；(i-r) Zr 与微量元素的协变图 (据 Polat and Hofmann, 2003)；
(s) Na_2O+K_2O – Na_2O/K_2O 图解 (据 Miyashiro; 1975)

Fig. 6. (a–h) Covariation diagrams of Al_2O_3/TiO_2 vs. major elements (after Polat and Hofmann, 2003); (i–r) Zr vs. trace element (after Polat and Hofmann, 2003); (s) The Na_2O+K_2O – Na_2O/K_2O diagram (after Miyashiro, 1975).

3.3 TTG 片麻岩主微量元素特征

糜棱岩化二长花岗岩样品 (21LH11-1a, b 和 c) 在 TAS 图解中落在花岗岩区域 (图 7a)，使用 An-Ab-Or 图解进行详细的分类为花岗闪长岩 (图 7b)。A/CNK 为 1.02~1.03，A/NK 值为 1.357~1.359，显示过铝质特征 (图 7c)。在 K_2O – SiO_2 分类图解中，落入高钾钙碱性系列 (图 7d)。因此样品整体属于过铝质的高钾钙碱性系列花岗质岩石。除此之外， $3CaO-Al_2O_3/$

(TFeO+MgO)–5K₂O/Na₂O 三元图解 (图 7e) 表明它们起源于镁铁质岩石的部分熔融。样品所呈现的较低的 MgO (0.86~0.87 wt.%) 和 Mg# (46.13~46.21 wt.%), 与高硅埃达克岩 (HSA) 相似, 并且落入由玄武岩或角闪岩实验确定的部分熔融产物范围内 (图 7f), 暗示其形成可能与俯冲板片的部分熔融有关。

本次研究中 TTG 片麻岩样品的 SiO₂ 含量为均大于 70 wt.%, Al₂O₃ 含量小于 15 wt.%, 属于高铝类型的 TTG 岩石。同时, 本次研究的 TTG 片麻岩样品均为过铝质类型。在全球范围内, 多数具有代表性的太古宙 TTG 岩石属于高铝类型 (Barker and Arth, 1976; Drummond and Defant, 1990; Martin et al., 2005), 并且华北克拉通太古宙 TTG 岩石以过铝质为主, 这与本文样品情况是相符的。

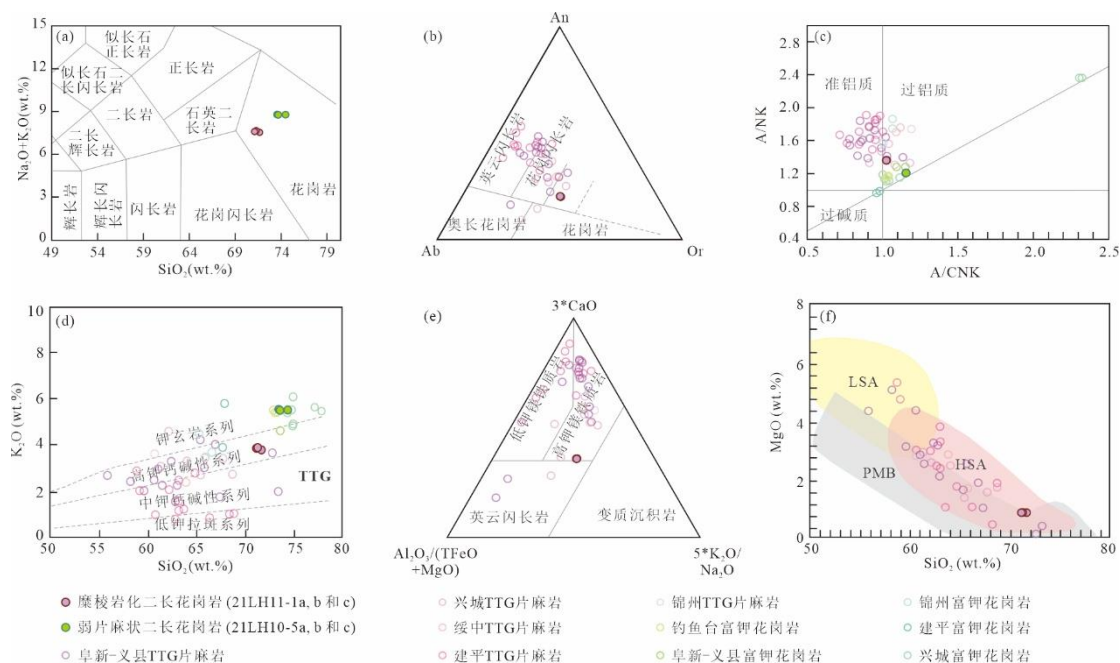


图 7 凌海地区 TTG 片麻岩与富钾花岗岩系列相关地球化学图解

Fig. 7. Geochemical diagrams of TTG gneisses and K-rich granites in the Linghai area

(a) TAS 图解 (Middlemost, 1994); (b) An-Ab-Or 图解 (据 Barker, 1979); (c) A/NK 与 A/CNK 图解 (据 Chappell and White, 2001); (d) K₂O-SiO₂ 分类图解 (据 Rollinson, 1993); (e) 3CaO-Al₂O₃/(TFeO + MgO)-5K₂O/Na₂O 三元图解 (Laurent et al., 2014); (f) MgO-SiO₂ 图解 (PMB: 玄武岩或闪岩的实验部分熔融产物; LSA: 低硅埃达克岩; HSA: 高硅埃达克岩, 据 Martin et al., 2005); TTG 片麻岩系列与富钾花岗岩数据收集于本研究以及 Wang et al., 2012, 2013; Chen et al., 2025; 周晓萍等, 2015; 周帅等, 2017; 刘树文等, 2018a; 郝乐燃等, 2020, 以空心圆表示, 后续文本亦同。主量成分以 wt.% 表示, 微量元素以 ppm 表示。

在微量元素方面, 本文 TTG 片麻岩样品富集 LREEs, 亏损 HREEs 和 HFSEs。具有轻微的 Eu 异常 (Eu* 为 1.10~1.16), 并且表现出低 Cr (14.78~17.53), 低 Ni (7.30~8.54)。除此之外, 本文样品还呈现出较低的 Ce/Sr (0.09~0.10) 和 Nb/Ta (7.78~8.46)。样品具有高 Sr/Y (127.13~143.73), 这与镁铁质源的部分熔融产物一致 (Beard and Lofgren, 1989; Rapp and Watson, 1995; Qian and Hermann, 2013)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图中 (图 8a), 显示出 Zr、Nb、Ta、Ti 和 P 的亏损, 以及 K、Pb 和 Eu 的富集, U 与 La 无异常或微弱异常, 具有与下地壳类似的配分模式, 在球粒陨石标准化稀土元素配分图 (图 8b) 中,

样品配分曲线整体均表现为“右倾”模式，与大陆下地壳配分模式形态基本保持一致。

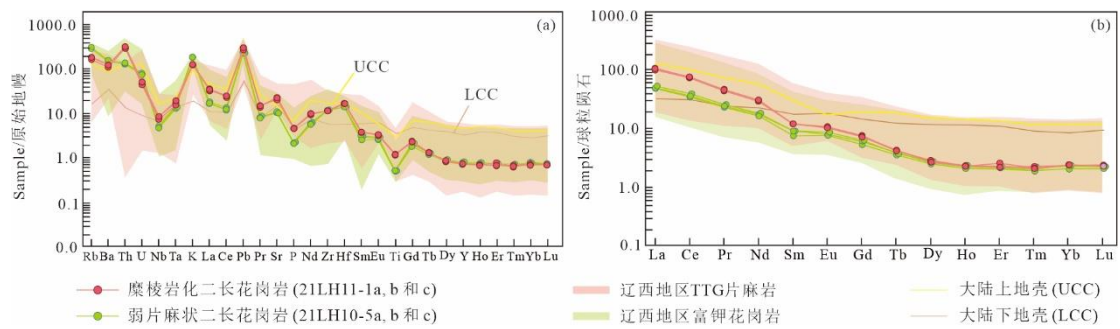


图 8 凌海地区 TTG 片麻岩与富钾花岗岩相关地球化学图解

Fig. 8. Geochemical diagrams of TTG gneisses and K-rich granites in the Linghai area

(a) 凌海地区新太古代 TTG 片麻岩系列与富钾花岗岩微量元素蛛网图（标准化值据 Sun and McDonough, 1989）；(b) 凌海地区新太古代 TTG 片麻岩系列与富钾花岗岩球粒陨石标准化稀土元素模式图（标准化值据 Sun and McDonough, 1989）；TTG 片麻岩系列与富钾花岗岩数据收集于本研究以及 Wang et al., 2012, 2013; Chen et al., 2025; 周晓萍等, 2015; 周帅等, 2017; 刘树文等, 2018a; 郝乐燃等, 2020。

3.4 富钾花岗岩主微量元素特征

弱片麻状二长花岗岩样品（21LH10-5a, b 和 c）在 TAS 图上落在花岗岩区域（图 7a）。A/CNK 为 1.15-1.16，A/NK 值为 1.202~1.205，A/CNK-A/NK 图显示其为过铝质（图 7c）。SiO₂-K₂O 图解显示其为钾玄岩系列（图 7d）。整体属于过铝质的钾玄岩系列花岗质岩石。Mg#指数 51.26~51.36，低于玄武岩熔融实验所得熔体成分的 Mg#值（Rapp and Watson, 1995），说明二长花岗岩样品的形成与地壳物质部分熔融有关。K₂O/Na₂O 值为 1.73-1.75，显示 K₂O 富集（K₂O/Na₂O>1.5），且 Na₂O+K₂O 为 8.76~8.78 wt.%，与典型的 S 型花岗岩特征相似。因此，样品属于高硅、高铝和富钾的 S 型花岗岩，是地壳物质熔融有关的产物。

在微量元素方面，样品ΣREE 较低，富集 LREEs，亏损 HREEs，反映了地壳增厚和岩浆重熔的起源。具有轻微的负 Eu 异常（Eu* 为 1.09~1.21）。在原始地幔标准化微量元素蛛网图中（图 8a），样品富集 K、Pb、Rb、U 和 Eu，亏损 Nb、Ta、Ti、Ce 和 P，U 与 La 具明显异常，Th 异常微弱，显示具有与上地壳类似的配分模式，在球粒陨石标准化稀土元素配分图（图 8b）中，样品配分曲线整体均表现为右倾的“V”型曲线模式，与大陆上地壳配分模式形态基本保持一致。

表 1 辽西凌海地区 TTG 片麻岩与富钾花岗岩主量元素（wt.%）与微量元素（ppm）测试结果
Table 1. Analytical results of major (wt.%) and trace elements (ppm) for TTG gneisses and K-rich granites in the Linghai area, Western Liaoning

岩性	TTG 片麻岩（糜棱岩化二长花岗岩）			富钾花岗岩（弱片麻状二长花岗岩）		
样品号	21LH11-1a	21LH11-1b	21LH11-1c	21LH10-5a	21LH10-5b	21LH10-5c
SiO ₂	71.18	71.32	71.71	73.70	73.56	74.49
Al ₂ O ₃	14.07	14.19	13.95	13.59	13.61	13.57
TFe ₂ O ₃	2.33	2.36	2.32	1.44	1.43	1.44
CaO	1.85	1.87	1.85	0.27	0.27	0.27
MgO	0.86	0.87	0.86	0.65	0.65	0.65

K ₂ O	3.85	3.89	3.79	5.55	5.58	5.57
Na ₂ O	3.77	3.79	3.75	3.21	3.19	3.20
TiO ₂	0.27	0.27	0.27	0.12	0.11	0.11
P ₂ O ₅	0.10	0.11	0.10	0.05	0.05	0.05
MnO	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01
Sc	2.88	2.79	2.83	1.96	1.93	1.79
V	32.61	32.71	31.41	13.29	12.16	14.20
Cr	16.15	14.78	17.53	23.48	18.22	17.80
Co	6.07	5.48	5.95	4.93	4.47	4.74
Ni	8.34	7.30	8.54	9.62	10.32	9.55
Cu	3.11	1.73	1.72	19.20	20.31	21.27
Zn	38.29	35.07	43.55	24.44	24.04	27.15
Ga	16.93	15.20	17.59	13.68	13.05	13.32
Rb	116.87	104.57	120.15	195.75	182.28	186.25
Sr	483.49	443.49	503.31	235.83	218.36	223.31
Y	3.50	3.49	3.50	3.55	3.74	3.31
Zr	131.18	131.27	134.18	133.61	135.18	132.43
Nb	6.25	5.41	6.28	3.69	3.43	3.42
Ba	866.67	770.07	881.99	1102.94	1047.09	1056.11
La	24.35	25.10	23.49	11.86	12.76	11.61
Ce	45.77	44.96	43.80	22.43	24.37	21.48
Pr	4.21	4.28	4.05	2.30	2.46	2.21
Nd	13.85	13.81	13.14	8.27	8.61	7.73
Sm	1.76	1.73	1.75	1.40	1.40	1.15
Eu	0.58	0.59	0.56	0.47	0.51	0.45
Gd	1.48	1.43	1.41	1.23	1.30	1.10
Tb	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.13
Dy	0.68	0.63	0.66	0.66	0.70	0.63
Ho	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.12
Er	0.33	0.39	0.35	0.35	0.37	0.34
Tm	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05
Yb	0.37	0.38	0.38	0.41	0.39	0.35
Lu	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05
Hf	5.29	5.24	5.45	4.38	4.39	4.42
Ta	0.80	0.65	0.74	0.63	0.58	0.53
Pb	21.42	19.26	21.93	16.89	16.34	16.12
Th	27.24	25.15	27.44	11.74	10.91	11.27
U	1.09	0.94	1.02	1.70	1.58	1.64

4. EBSD 组构分析

对野外采集的混合岩样品进行系统的变形特征分析，对于代表性的样品，根据其宏观构

造特征进行定向切片，即 X 轴与矿物流动线理方向平行，Z 轴与流动面理的法线方向保持平行，Y 轴位于流动面理内且与流动线理方向垂直。基于这种标准的定向方法，对采集样品分别磨制 XZ 定向和 YZ 定向薄片探针，用于岩相学观察和岩石组构测量。随后使用 1 微米金刚石研磨膏将厚度约为 30 微米的切片进行抛光。在使用扫描电子显微镜（SEM）和电子背散射衍射（EBSD）技术进行分析之前，用二氧化硅胶体对薄片进行抛光，以去除任何表面损伤。将加速电压设定为 20kV，工作距离设定为 15mm，将样品台倾斜 70°，以有效减小电子束入射角，从而获得最佳的背散射效果。在偏光显微镜下对薄片的微观结构进行了分析，并使用 Matlab MTEX 5.7.0 工具箱绘制了电子背散射衍射（EBSD）相图。原始数据的降噪处理遵循了 Bestmann 和 Prior（2003）、Piazolo 等（2006）以及 Prior 等（2002）测试过的方法。为了研究晶格择优取向（CPO）是否存在（Law, 1990; Menegon et al., 2011），在下半球等面积赤平投影绘制了取向图，选取与所研究矿物主要滑移系相关的晶面、晶带和晶棱进行投影分析，组构图解（XZ 面）的坐标轴设置为 X 轴与拉伸线理方向平行，XY 面与面理方向一致，Z 轴则垂直于面理方向，用于分析矿物结构。GOS（Grain Orientation Spread）指的是测量颗粒中每点的取向差与颗粒平均取向的差，计算这些值的平均值并依次染色，体现的是颗粒整体的取向差。KAM（Kernel Average Misorientation）指的是局部的取向差，计算的是某个测量点与其周围 10 个测量点取向差的平均值，可以显示颗粒中定向的突然变化，比如亚颗粒边界处，在我们的计算中，亚晶界以取向差 2 度定义。此外，在分析矿物变形机制时，仅凭滑移系和相应的 CPO 不能准确判断矿物是否经历位错蠕变（Bons and Brok, 2000; Jiang et al., 2000），因此，取向差角分布数据图的引入能够更加直观地揭示矿物的显微构造特征及变形机制。取向差（Misorientation）指多晶集合体中两个晶体的晶体学方位差，一般采用取向差角分布图（Misorientation Angle Distribution, MAD）来分析优选特征，每个数据的采集可以采取随机选取两个颗粒计算其取向差，或者仅选取相邻颗粒对来计算，图中横坐标表示取向差分布角度，纵坐标表示某一角度范围在数据中的出现频率。通过对比实际曲线与理论随机分布曲线的关系，可以深入分析多晶集合体的微观动力学过程（Wheeler et al., 2001; 刘世然等, 2016; 刘同君, 2020）。取向差角可分为相邻取向差角和随机取向差角两类。研究表明，相邻取向差角在 0~10°区间出现高频分布时指示受位错蠕变影响，而随机取向差角分布接近理论曲线，且相邻取向差角在 0~10°区间频率较低，则指示受扩散蠕变影响（Ishii et al., 2007; Menegon et al., 2013; Mukai et al., 2014; Czaplińska et al., 2015; 王雄, 2020）。电子背散射衍射（EBSD）分析由湖北慧科材料科技有限公司完成。

本研究对深熔作用典型的糜棱岩化二长花岗岩（21LH11-1, 23LX10-4）和弱片麻状二长花岗岩（21LH10-5）三个样品进行 EBSD 组构分析。作为地壳中含量最丰富的矿物（Tullis, 2002），长石的变形行为对地壳的流变学行为具有极大的影响（Fukuda and Okudaira, 2013; Menegon et al., 2013; Miranda et al., 2016），并且本研究中的长石类矿物受晚期剪切作用影响微弱，因此，我们选择长石类矿物进行 EBSD 组构分析。此外，由于部分矿物发生蚀变，导致部分矿物未能够有效识别。

4.1 TTG 片麻岩系列

(1) 糜棱岩化二长花岗岩 21LH11-1

测试区域具体如图 9a 所示。测试区域矿物相主要由斜长石、绿泥石和石英组成。对区域内斜长石进行具体的测试，斜长石 GOS 值可达 7°，晶内塑性变形特征较强，应变主要集中在细粒矿物区域内（图 9b），晶内发育低角度位错壁（图 9c）。斜长石[100]轴发育平行面理方向的极密，（010）面发育平行线理的极密，（001）面发育有多个弱极密，点极密值最大为 4.4（图 9d）。通过对取向差角分布图的分析，样品相邻取向差角在低角度范围内分布频率明显较高，表明斜长石主要受位错蠕变控制（图 9e）。

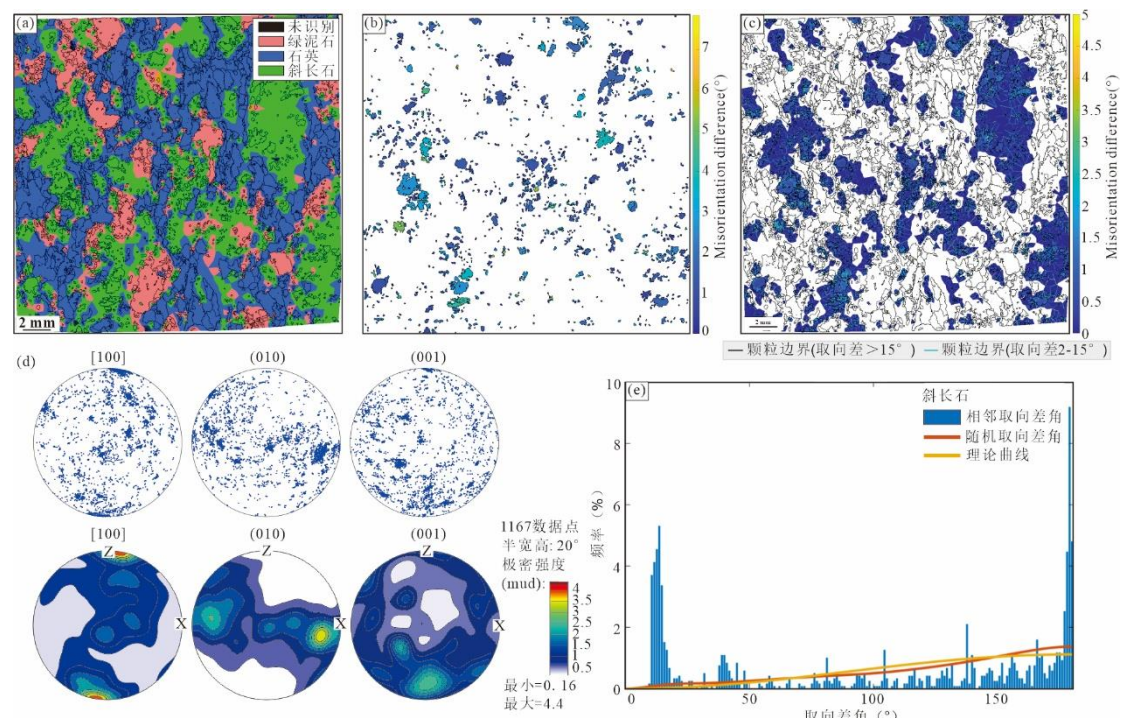


图 9 21LH11-1 区域 EBSD 图

Fig. 9. EBSD mapping of region 21LH11-1

(a) 21LH11-1 测试区域矿物相分布图；(b) 斜长石域晶粒取向散布图 (GOS)；(c) 斜长石域局部区域晶内取向差面图 (KAM)；(d) 斜长石晶格优选方位分布图；(e) 斜长石取向差角分布图。

(2) 糜棱岩化二长花岗岩 23LX10-4

测试区域具体如图 10a 所示。测试区域矿物相主要由石英、斜长石、绿帘石和微斜长石组成。斜长石和微斜长石呈现出不同程度的拉伸特征，粒间含有少量由残留熔体结晶形成的细粒绿帘石和石英（图 10b）。对区域内长石类矿物进行具体的测试，微斜长石呈典型的核-幔构造，整体来说，微斜长石残斑晶内取向差角度明显较高，向两侧逐渐降低，表明核部发生明显的塑性变形如位错壁或亚颗粒边界，尾部发育的细粒化钾长石颗粒取向差角度较低，无明显晶内变形（图 10b, c）。偶见紧密接触的细粒微斜长石区域显示出显著的 GOS 值，超过 5°，具有强晶内塑性变形特征（图 10b）。在晶格优选方位分布图中，微斜长石优选定向较差，无滑移系，发育有多组点极密，区域中点极密值最大为 5.2（图 10d）。在取向差角分布图中，相邻取向差角在低角度范围内呈现出明显的高频分布，且随机取向差角与

理论曲线存在显著差异，显示微斜长石受位错蠕变影响（图 10e）。

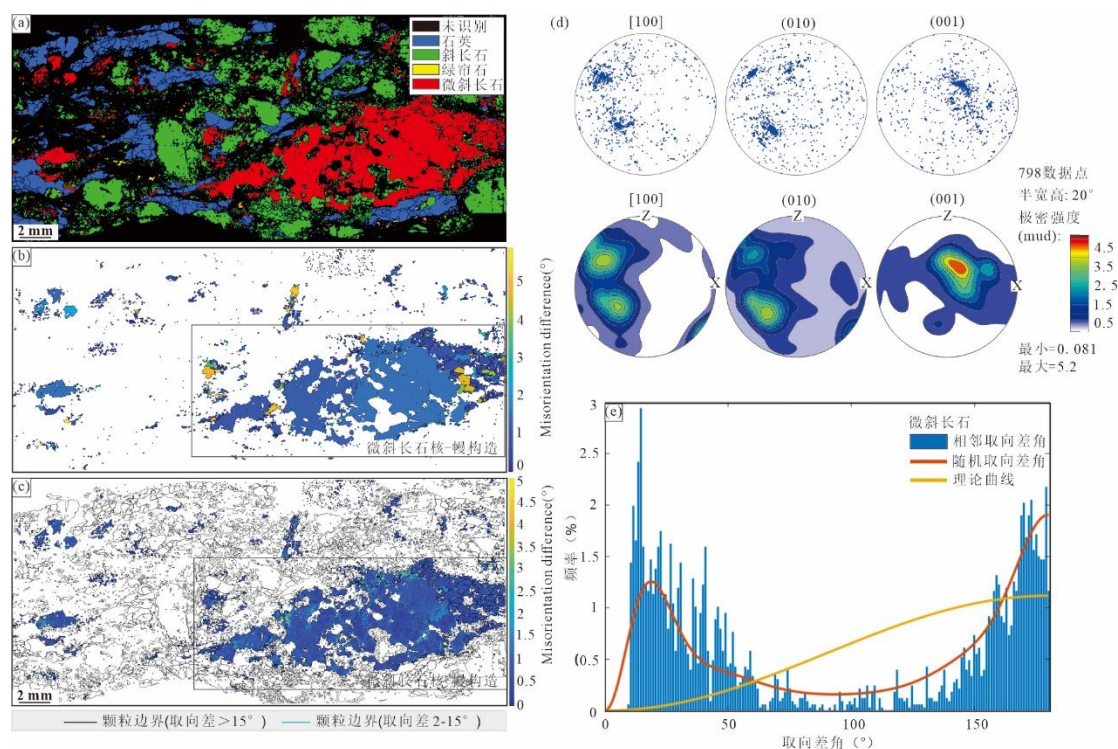


图 10 23LX10-4 微斜长石区域 EBSD 图

Fig. 10. EBSD mapping of microcline in region 23LX10-4

(a) 23LX10-4 测试区域矿物相分布图；(b) 微斜长石域晶粒取向散布图 (GOS)；(c) 微斜长石域局部区域晶内取向差面图 (KAM)；(d) 微斜长石晶格优选方位分布图；(e) 微斜长石取向差角分布图。

斜长石整体 GOS 值在 3° 以内，局部可达到 5°，具有更强的晶内塑性变形特征（图 11a），颗粒内部发育低角度亚颗粒边界，靠近边部稍高，表明动态重结晶作用的发生（图 11b）。在晶格优选方位分布图中，斜长石发育强 CPO，在 (010) 面发育平行面理方向的极密，[100] 轴上发育近平行线理方向的极密，(001) 面在 X 轴与 Z 轴之间发育点极密，区域中点极密值最大为 2.4，滑移系为 (010) [100]（图 11c）。取向差角分布图表明斜长石经历了位错蠕变作用（图 11d）。

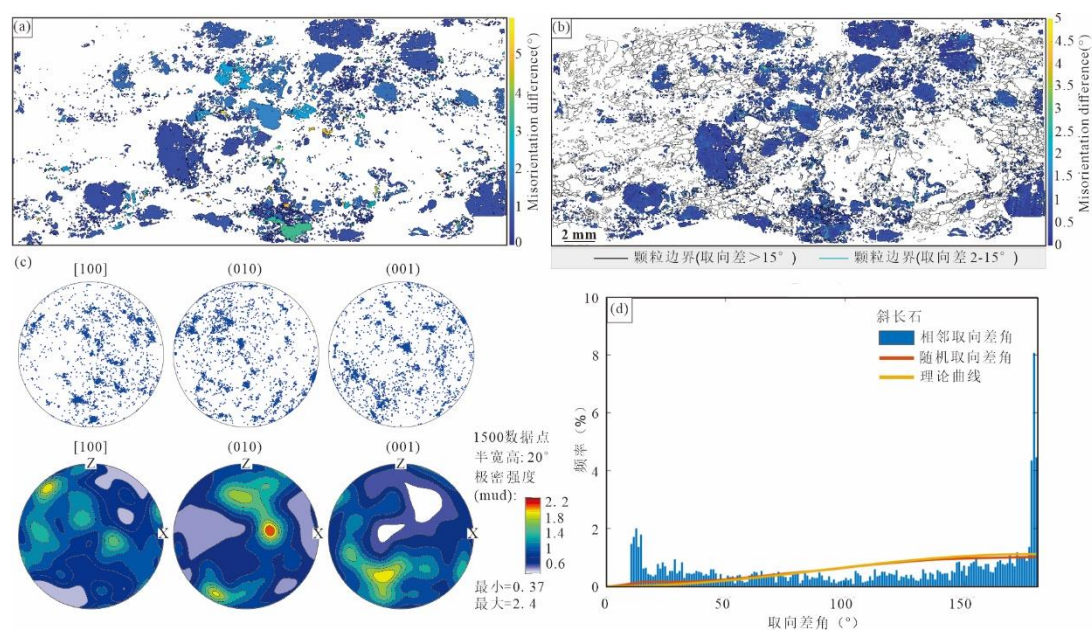


图 11 23LX10-4 斜长石区域 EBSD 图

Fig. 11. EBSD mapping of plagioclase in sample 23LX10-4

(a) 斜长石域晶粒取向散布图 (GOS); (b) 斜长石域局部区域晶内取向差面图 (KAM); (c) 斜长石晶格优选方位分布图; (d) 斜长石取向差角分布图。

4.2 富钾花岗岩系列

(1) 弱片麻状二长花岗岩 21LH10-5

测试区域具体如图 12a 所示。测试区域矿物相主要由石英、斜长石和微斜长石组成。对区域内长石类矿物进行具体的测试，样品颗粒形态呈现出两种主要类型：一类具有笔直的晶面接触，其 GOS 值小于 3°，表明矿物基本保持了原始结晶状态，未经历明显的塑性变形；另一类则呈现不规则形态，颗粒边部显示出较大的 GOS 值，局部可达 7° (图 12b, d)。晶内发育多边形化或亚颗粒化，发育局部位错壁特征 (图 12c, e)。斜长石在 (010) 面中发育多组极密，无明显优选定向，[100]轴上发育垂直线理方向的极密，(001)面极密点非常松散，发育靠近 X 轴和 Z 轴之间的极密，区域中点极密最大值为 2.8 (图 12f)。微斜长石点极密非常集中，发育较强的 CPO，在[100]轴上发育平行线理方向的极密，在 (001)面上发育靠近 X 轴、近平行面理的极密，区域中点极密值最大为 4.4，滑移系为 (001) [100] (图 12g)。

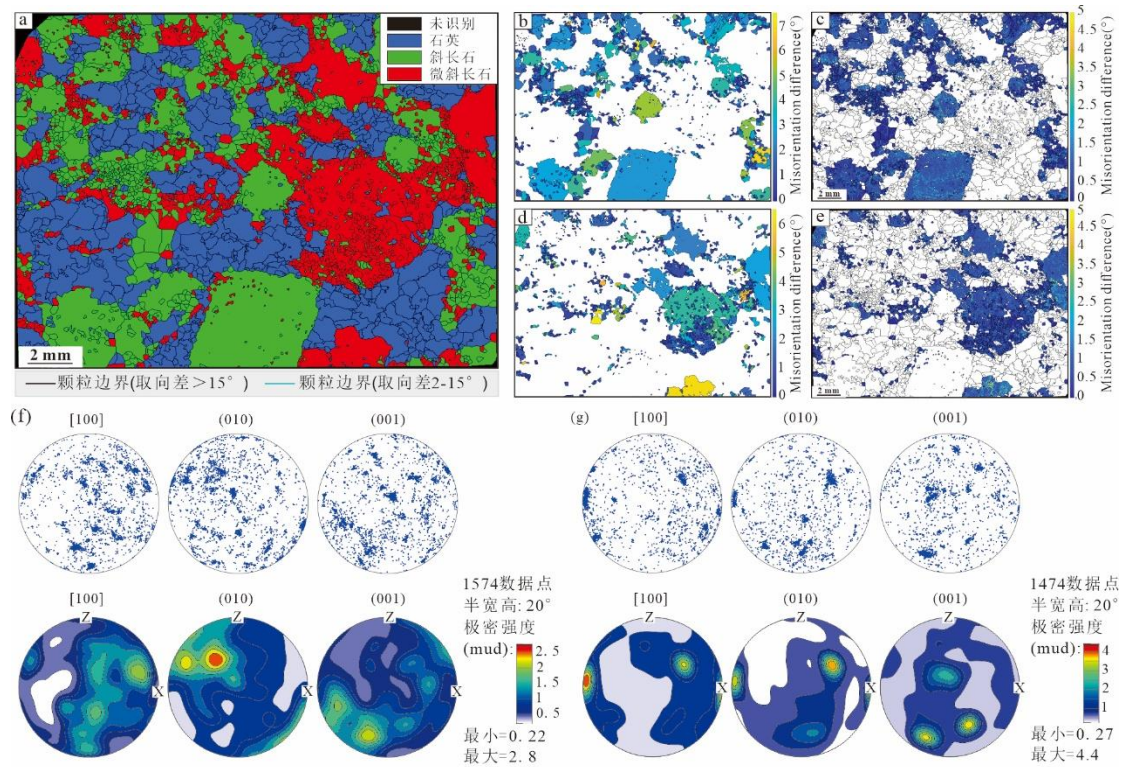


图 12 21LH10-5 区域 EBSD 图

Fig. 12. EBSD mapping of region 21LH10-5

(a) 21LH10-5 测试区域矿物相分布图；(b) 斜长石域晶粒取向散布图 (GOS)；(c) 斜长石域局部区域晶内取向差面图 (KAM)；(d) 微斜长石域晶粒取向散布图 (GOS)；(e) 微斜长石域局部区域晶内取向差面图 (KAM)；(f) 斜长石晶格优选方位分布图；(g) 微斜长石晶格优选方位分布图。

5. 讨论

5.1 岩石属性及成因

5.1.1 TTG 片麻岩系列

TTG 片麻岩系列样品以高 SiO_2 (>70 wt.%) 和极低的 CaO、MgO、Cr、Ni、Co、V 和 Sc 为特征，表明它们并非源自地幔橄榄岩的熔融 (Martin et al., 2005; Moyen and Martin, 2012)。Rb-Rb/Sr 图解、Y-Ce/Sr 图解以及 AFM-CFM 图解表明样品源自高压下变质玄武质岩石的部分熔融 (图 13a-c)，这也与样品的 A/CNK 变化值 (1.02~1.03) 一致。此外，样品表现出与典型的太古宙 TTG 岩石和显生宙高硅埃达克岩 (HSA) 具有相似性 (图 13d)。结合前人对于样品 23LX10-4 在内的 3 个 TTG 片麻岩系列样品的相关研究，其正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t_2)$ 值以及与形成年龄相近的 Hf 模式年龄表明亏损地幔参与了壳内重熔作用 (Chen et al., 2025)。样品低 Nb/Ta，进一步暗示样品可能形成于俯冲洋壳板片，在上升过程中受到地幔楔混染。

除此之外，样品显示出高的 Sr/Y 比值，低的 Yb 和 Y 含量，以及 HREE 亏损、弱的 Eu 异常以及显著的 Nb、Ta 和 Ti 负异常，表明岩浆源中存在大量石榴石 (Foley et al., 2002；

Rapp et al., 2003)。低 Sr 含量的埃达克质岩石通常含有源区残余的斜长石 (Smithies et al., 2009), 样品中 Eu 和 P 负异常支持了此观点。低 Nb/Ta (7.78~8.46) 和高 Zr/Sm (74.71~76.53), 以及凹形球粒陨石标准化稀土元素模式图, 表明源岩为角闪岩 (Hoffmann et al., 2011)。因此, 岩浆可能源自高压条件下斜长石不稳定的石榴石角闪岩的部分熔融。结合高场强元素的亏损是大陆地壳物质的典型特征, 其中 Nb 和 Ta 的强烈亏损归因于俯冲作用 (Foley et al., 2000, 2002; Jahn et al., 2008), 综上所述, TTG 片麻岩系列最有可能源自加厚弧根部的石榴石角闪岩的部分熔融。

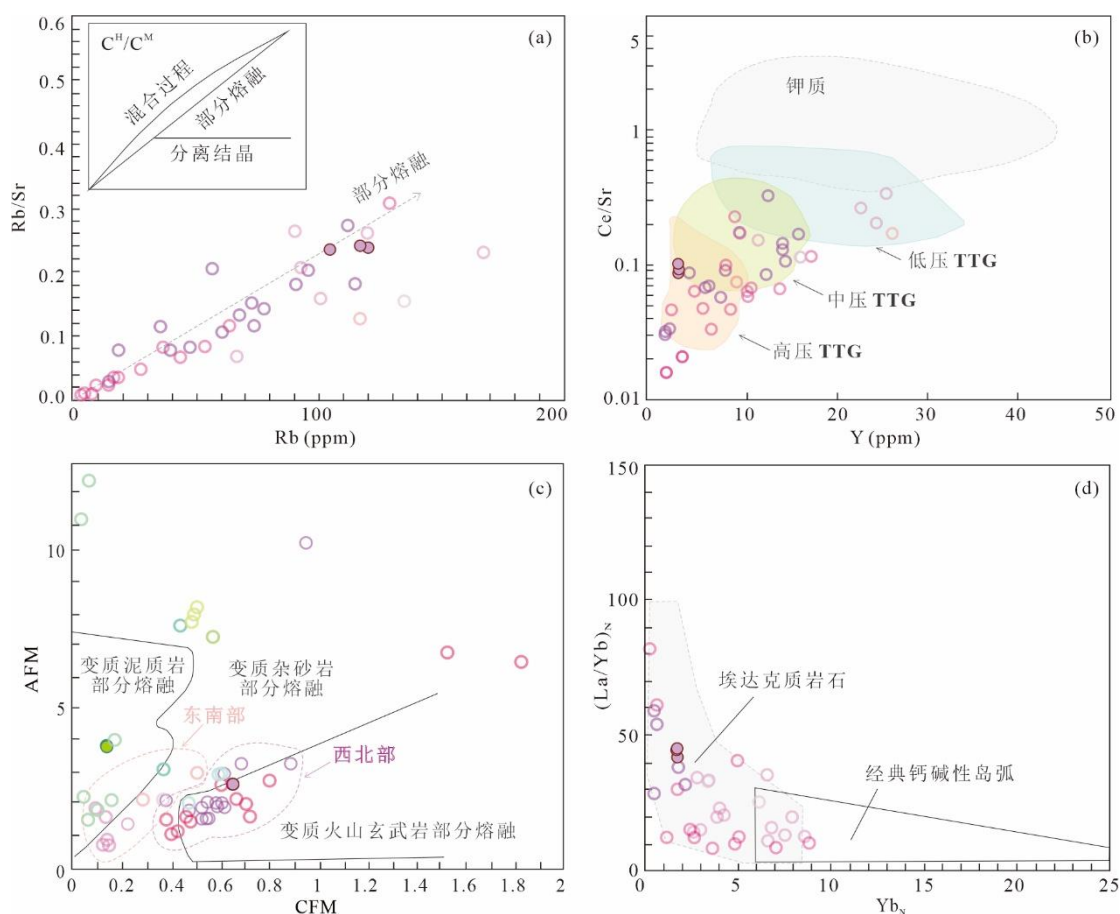


图 13 凌海地区 TTG 片麻岩与富钾花岗岩系列相关地球化学图解

Fig. 13. Geochemical diagrams of TTG gneisses and K-rich granites in the Linghai area

(a) Rb-Rb/Sr 图解; (b) Y-Ce/Sr 图解 (据 Moyen, 2011); (c) AFM-CFM 图解 (据 Drummond and Defant, 1990); (d) $(La/Yb)_N$ - Yb_N 图解 (据 Drummond and Defant, 1990 与 Martin et al., 2005)。TTG 片麻岩系列数据来自 Wang et al., 2012, 2013; Chen et al., 2025; 周晓萍等, 2015; 刘树文等, 2018a 及本研究。富钾花岗岩数据来自 Wang et al., 2012, 2013; Chen et al., 2025; 周晓萍等, 2015; 周帅等, 2017; 刘树文等, 2018a; 郝乐燃等, 2020 及本研究。所引用的数据用空心圆表示。

结合前人样品数据, 在 AFM-CFM 图解中揭示了两个样品组 (图 13c): 1) 东南部样品组 (锦州-兴城-绥中地区), 落入变质杂砂岩的部分熔融区域内。其中, 兴城地区的斑状黑云母二长花岗岩 Nb/Ta 值与新太古代地壳相匹配, 指向壳源成因 (周晓萍等, 2015)。兴城地区的细粒石英闪长岩 Nb/Ta 比值则与原始地幔相似, 显示出典型的幔源岩浆特征, 但样品高场强元素 (Ta、Nb、HREE) 的普遍亏损表明岩浆源中存在显著的地壳混染, 指示了壳源岩浆与幔源岩浆的混合。锦州地区 TTG 片麻岩的 Mg# 和 MgO 含量与埃达克岩相似 (刘

树文等, 2018a)。绥中地区样品的高 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值暗示年轻地壳物质及其未成熟沉积物对岩浆形成具有明显影响(刘树文等, 2018a)。综上所述, 我们推断锦州-兴城-绥中地区新太古代晚期的 TTG 片麻岩系是通过俯冲板块底部年轻地壳物质的部分熔融, 并结合岛弧过程而形成的。2) 西北部样品(阜新-义县-建平地区) 指示变质玄武岩的部分熔融。实验研究表明, 玄武岩在高压下的部分熔融可以产生富含铝的 TTG 类岩石(Rapp et al., 1999), 这表明该地区的 TTG 片麻岩系可能源自分布于阜新北部、年龄为 2640-2603 Ma 的 N-MORB 或 E-MORB 玄武岩的部分熔融。此外, 阜新-义县地区的样品显示出较高的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值、微弱的 Eu 异常、大离子亲石元素(Ba、Rb、K) 富集以及 Th、Nb、Ta、Ti 等高场强元素亏损, 共同指示岩浆源自俯冲洋壳的部分熔融, 并在上升过程中受到地幔橄榄岩的混染(Martin et al., 2005)。一些低镁样品具有高 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 、高 Sr/Y、Eu 不明显负异常至强烈正异常, 显示出埃达克质的地球化学特征, 表明它们形成于活动大陆边缘(Moyen, 2009)。建平地区的英云闪长质片麻岩显示出富 K 和 Na 的赞岐岩特征, 具有高 Na_2O 、 K_2O 、Sr 和 Ba 含量, 其中 Sr 与 Ba 指示样品源自交代地幔源(Shirey and Hanson, 1984; Smithies and Champion, 2000; Martin et al., 2005)。此外, 轻稀土元素富集, 低 Yb、Y 和 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$, Eu 表现微弱的负至正异常。高 $(\text{Hf}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 和低 $(\text{Ta}/\text{La})_{\text{N}}$ 表明样品是在俯冲流体交代后的富集地幔源部分熔融而形成的(Laflèche et al., 1998)。因此, 阜新-义县-建平地区的 TTG 片麻岩系是俯冲洋壳部分熔融的产物, 在通过地幔楔上升过程中受到橄榄岩的混染(Martin et al., 2005; Chen et al., 2025)。

5.1.2 富钾花岗岩系列

富钾花岗岩系列样品具有高的 K_2O 含量和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值, 超过了实验岩石学中变质玄武岩和安山岩熔体的典型值(Beard and Lofgren, 1989; Rapp and Watson, 1995), 这排除了含水镁铁质岩石的部分熔融, 特别是由于同期的角闪岩 K_2O 含量不足(0.51~1.31 wt.%), 无法产生大量的富钾花岗岩。此外, 样品中含量较高的 SiO_2 、 K_2O 、大离子亲石元素(LILEs) 和轻稀土元素(LREEs), 以及极低含量的 TFeO、MgO、CaO、Cr 和 Ni, 表明它们源自地壳物质而非地幔。

实验岩石学研究表明, 泥砂质沉积岩类部分熔融可能形成富铝和富钾质的花岗岩, 这与研究区样品具有铝过饱和($\text{A}/\text{CNK}=1.15\sim1.16$) 且富钾($\text{K}_2\text{O}=5.55\sim5.58$ wt.%) 的特点一致, 同时与 S 型花岗岩相似($\text{A}/\text{CNK}>1.1$; Sylvester, 1998; Barbarin, 1999)。岩石学和地球化学研究表明, S 型花岗岩通常是由变质泥岩和杂砂岩等地壳物质部分熔融所形成的(Sylvester, 1998; Barbarin, 1999; Chappell, 1999; Clemens, 2003)。对于这类花岗岩, $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值能够示踪其源岩的性质。当 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 大于 0.3 时, 源岩为杂砂岩; 当 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 小于 0.3 时, 源岩为泥质岩(Sylvester, 1998)。本研究区样品 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.083~0.085, 暗示其源区为变泥质岩(<0.3)。在微量元素方面, 样品显示出极高的 Th 含量, 以及 Th/La (0.85~0.99) 和低 Nb/Ta (5.87~6.43) 比值, 与现代海洋沉积物以及上地壳样品所展现的特征相似(Wang et al., 2011)。结合 AFM-CFM 判别图, 数据点主要集中于变质泥质岩部分熔融区域之内(图 13c), 因此, 样品源自上地壳变质泥质岩系部分熔融作用。样品所显示

出的大离子亲石元素（LILEs）和轻稀土元素（如 Nd）富集，以及高场强元素（如 Nb、Ta 和 Ti）亏损，与碰撞花岗岩相似，此外，样品在野外显示出弱变形或块状特征，表明其形成于新太古代岩浆-构造演化的最后阶段，指示华北克拉通向伸展构造体制的过渡。

综上所述，辽西地区的富钾花岗岩在同碰撞和造山后期环境之间表现出过渡性质，反映了构造环境从挤压环境到伸展环境的转变。

5.2 矿物变形机制

大陆地壳的部分熔融过程与构造变形作用密切相关，混合岩内的熔体记录了不同程度的熔体分离、流动和迁移证据（Brown, 2001; Sawyer, 2008; Vanderhaeghe, 2009; Yu et al., 2019; Wang et al., 2022）。本研究的样品显示长石普遍发育 CPO 极密，这一特征主要归因于位错滑移。值得注意的是，在变形系统中有水参与时，流体能显著增强长石中扩散和位错蠕变调节的颗粒边界滑移的能力（Tullis and Yund, 1991），使岩石变形过程中形成的 CPO 被弱化（巴合达尔，2020），这也就解释了本文花岗质岩石在大陆弧环境下并非的所有长石都具有强 CPO（巴合达尔，2020；刘同君，2023），如弱片麻状二长花岗岩样品（21LH10-5）与糜棱岩化二长花岗岩（21LH11-1）中，斜长石具有强烈形态优选方位（SPO），颗粒内部具有较强的变形特征，但是具有很弱至随机分布的晶格优选方位（CPO）（图 9 与图 12），糜棱岩化二长花岗岩样品（23LX10-4）中微斜长石同样具备此特点（图 10）。除此之外，在中下地壳韧性变形过程中，有观测发现长石粒径显著减小，形成细粒化颗粒集合体，这一过程被解释为长石的粒径敏感蠕变，细粒化长石集合体的流变强度显著降低，成为承载变形的的主要矿物（Tullis, 2002; Kilian et al., 2011; Platt, 2015; 张磊等，2022），这与本文样品中长石的强应变区在细粒化长石内一致，粒径敏感蠕变机制占据主导作用，因此导致组构弱化或无序化（图 9d, 10d, 12f; Kilian et al., 2011; Fukuda et al., 2018; Papa et al., 2020; 韩宁等，2021）。除此之外，关于长石细粒化的成因，膨凸重结晶作用也做出了贡献，如膨凸重结晶形成的亚颗粒（图 3e-f, 4e, 5f），指示了相对较高的变形温度，这些细粒长石普遍产生晶内塑性变形，位错滑移正是使它们启动滑移系形成极密，并表现出晶内变形的要因（巴合达尔，2020）。

由显微构造与 EBSD 实验结果可知，微斜长石表现为核-幔构造，相比较低温下形成的核-幔构造，此时的核-幔边界不太明显，蠕变结构普遍沿解理面发育（Passchier and Trouw, 2005）。微斜长石与斜长石晶内变形均存在差异性，发育亚颗粒化与位错壁，其取向差角表明位错蠕变、膨凸重结晶作用和亚颗粒旋转重结晶作用同时存在，形成真正的亚颗粒构造（Küster and Stöckhert, 1999; Altenberger and Wilhelm, 2000; Passchier and Trouw, 2005; Stipp and Kunze, 2008; Miranda et al., 2016; Hentschel et al., 2019; 巴合达尔等，2019; 董彦龙等，2019; 张磊等，2022），结合锯齿状、片状颗粒边界，以及波状消光和 CPO 现象等，指示变形温度大于 650°C（Mancktelow and Pennacchioni, 2005; Lund et al., 2006; Liu et al., 2024b; Ma et al., 2024）。EBSD 测试结果表明斜长石发育滑移系为 (010) [100]，钾长石发育 (001) [100] 滑移系，表明发生于高温（700°C）中压（0.4~1.0 GPa）环境下（表 2）。

表 2 钾长石常见滑移系（Menegon et al., 2008）

Table 2. Common slip systems in K-feldspar (Menegon et al., 2008)

参考文献	条件	滑移面	滑移方向	观察方法			
实验变形:							
Tullis and Yund (1977)	900-1000℃ , 10-15 kb,						
	10 ⁻⁶ /s	(010)	未确定	透射电子显微镜			
Willaime et al., (1979) and Scandale et al., (1983)	700℃ , 15 kb, 10 ⁻⁶ /s	(010)	[101]	透射电子显微镜			
		(001)	1/2[110]				
		(1-2-1)	[101]				
		(010)	[001]				
		(110)	1/2[1-12]				
		(1-11)	1/2[110]				
	900℃ , 15 kb, 10 ⁻⁶ /s	(010)	[101]				
		(001)	1/2[110]				
		(1-2-1)	[101]				
		(010)	[110]				
		天然变形:					
		Debat et al., (1978)	500℃ , 2 kb		(010)	未确定	光学显微镜
	(110)		未确定				
Sacerdoti et al., (1980)	500℃ , 2 kb	(12-1)	[101]	透射电子显微镜			
		(010)	[101]				
		(010)	[100]				
		(010)	[010]				
		(010)	1/2[1-12]				
Schulmann et al., (1996)	550-600℃ , 4-8 kb	(010)	[001]	费氏台			
		(010)	[100]				
Martelat et al., (1999)	700-800℃ , 4-10 kb	(010)	[100]	费氏台			
		(001)	[100]				
Franek et al., (2006)	700-800℃ , 5-8 kb	(010)	[001]	电子背散射衍射			
Ishii et al., (2007)	高绿片岩相	(100)	[010]	电子背散射衍射			
		(101)	[010]				

5.3 凌海地区深熔岩石构造背景

太古宙时期板块构造的存在是一个重要的科学争议话题（Jiang et al., 2010；Wang et al., 2018；Liu et al., 2024a）。对于东部陆块太古宙结晶基底，基于大量花岗质片麻岩以及镁铁质麻粒岩的逆时针变质 P-T-t 轨迹，有学者提出了地幔柱构造体制假说（Zhao et al., 1998,

2005; Geng et al., 2006; Yang et al., 2008; Grant et al., 2009; Wu et al., 2012, 2014)。然而，在东部陆块北部，基底岩石由西北向东南存在时间和成分的变化：（1）辽西北部阜新地区存在类洋中脊玄武岩的变质玄武岩（2.64-2.60 Ga）；（2）辽西南部、冀东遵化-青龙地块以及冀北地区存在 2.55-2.50 Ga 的闪长质-TTG 片麻岩以及岛弧拉斑-钙碱性变质火山岩；（3）沿渤海北岸，即辽西-冀东的锦州-秦皇岛地区，广泛分布着 2.52-2.48 Ga 的富钾石英二长闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和钾长花岗岩。这种变化与俯冲相关地球动力学更为吻合，而非地幔柱模型（Liu et al., 2015）。

以上研究表明，凌海地区 TTG 片麻岩-富钾花岗岩组合是高度部分熔融的产物。TTG 片麻岩熔体含量较高，斜长石板柱状晶形依稀可见，边部熔蚀严重，熔体成分已经相互连通形成熔体通道（图 3，图 4），属演化的岩浆，具有异地岩浆花岗岩特点，位于地壳较深的层次。富钾花岗岩结晶固相含量较高，其中斜长石构成了固态骨架结构，普遍不可见斜长石典型的板柱状晶形（图 5），位于地壳改造过程中的熔体聚集区，形成位置相对较浅（图 14），具有原地型混合花岗岩特征。随着深熔作用的进程，由 TTG 片麻岩到富钾花岗岩，深成熔体不断分异、富集，使得岩石成分上 Sr 的富集程度变弱，P 亏损程度逐渐增大（图 8）。此外，蠕英结构的发育往往被认为是深熔作用过程的重要证据，在流体及应力作用下，钾长石发生分解形成细粒斜长石以及蠕虫状的石英颗粒，促进矿物相混合（Simpson and Wintsch, 1989; Menegon et al., 2006; Ceccato et al., 2018; 董彦龙等, 2019; 张磊等, 2022）。钾长石与流体的成分差异会产生化学自由能的不平衡进而导致矿物的分解，形成斜长石与石英，这一过程可表示为： $\text{钾长石} + \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} = \text{斜长石} + \text{石英} + \text{K}^+$ （Ree et al., 2005; Spruzeniece and Piazzolo, 2015; 张磊等, 2022）。富钾花岗岩的 K_2O 及 A/CNK 量远高于 TTG 片麻岩，成熟度最高（图 7），地壳成分由富 Na、Ca 向富 K 转变，这是高分异岩浆在岩石强度相对薄弱处的汇聚的结果。由此可知，TTG 片麻岩到富钾花岗岩构成了一个连续的熔融序列，其中，TTG 片麻岩代表下地壳的部分熔融，熔体汇聚阶段；富钾花岗岩代表中上地壳部分熔融，熔体聚集形成岩浆房，随后岩浆上升侵位并冷却结晶（图 14）。

表 3 辽西地区新太古代花岗质岩石锆石 U-Pb 同位素年龄统计表

Table 3. Statistical Table of Zircon U-Pb Isotopic Ages for Neoproterozoic Granitic Rocks in the Western Liaoning Region

样品号	岩石名称	结晶年龄 (Ma)	继承锆石年龄 (Ma)	变质年龄 (Ma)	来自
TTG 片麻岩系列					
兴城					
STP1-005	中细粒石英闪长岩	2490±19			周晓萍等, 2015
16L25	片麻状石英闪长岩	2505±10			郝乐燃等, 2020
17L01	花岗质片麻岩	2519±11			郝乐燃等, 2020
阜新-义县					
OCY10-1	英云闪长质片麻岩	2511±7	2570±17	2401±12~2475±15/2269±15	Wang et al. (2012)
OYX01-4	花岗闪长质片麻岩	2521±9		2278±46	Wang et al. (2012)

OFX11-2	奥长花岗片麻岩	2517±13	2668±12~2630±11/2580±8	2362±16~2442±11	Wang et al. (2012)
YX05-1	花岗闪长岩片麻岩	2494±8			Wang et al. (2012)
建平					
CY37-2	TTG 片麻岩	2538±29	2615±55 Ma	1074±9	Liu et al. (2011)
CY46-1	英云闪长质片麻岩	2506±12	2561±13 Ma	2458±12/2396±30/1862±24	Liu et al. (2011)
CY31-2	英云闪长片麻岩	2513±10		2476±13/2449±5/2410±5	Liu et al. (2011)
CY054-1	长英质麻粒岩	2510±2	2614±15/2531±10	2469±6/2403±11	Liu et al. (2011)
CY026-1	闪长片麻岩	2512±15	2572±20	2478±9/2428±10	Liu et al. (2011)
OCY31-2	英云闪长岩	2516±6	2549±16~2614±13	2409±12~2465±13/2487±9	Wang et al. (2013)
OCY33-1	花岗闪长质片麻岩	2519±11	2585±15	2423±20~2497±15/2224±16~2396±13	Wang et al. (2013)
OCY37-1	花岗闪长岩	2527±7	2591±21	2394±27~2478±23	Wang et al. (2013)
OCY46-1	英云闪长岩	2532±7		2468±19	Wang et al. (2013)
锦州-绥中					
15JD66-1	花岗闪长质片麻岩	2543±6	2576±17	2514±20	刘树文等, 2018a
凌海					
21LH4-1	糜棱岩化绿帘黑云片麻岩	2509.5±8.7	2527~2570	2490.9±5.5	Chen et al. (2025)
23LX10-4	糜棱岩化二长花岗岩	2513.1±13	2532~2549	2466±28	Chen et al. (2025)
21LH11-1	糜棱岩化二长花岗岩	2517.2±8.7			Chen et al. (2025)
23LX9-4	糜棱岩化二长花岗岩	2526.8±6.4		2474	Chen et al. (2025)
富钾花岗岩系列					
兴城					
CP-2	伟晶岩	2486±8	2529~2674		周帅等, 2017
STWH1001	花岗细晶岩	2479±29			周晓萍等, 2015
STP1-004	似斑状黑云母二长花岗岩	2496±18			周晓萍等, 2015
16LDY01	二长花岗岩	2519±9			郝乐燃等, 2020
阜新-义县					
CY12-2	二长花岗片麻岩	2496±7			Wang et al. (2012)
建平					
CY36-1	二长花岗岩	2496±12	2550±12~2644±13	2352±22~2457±22	Wang et al. (2013)
锦州					
15LX38-1	二长花岗质片麻岩	2546±6	2585±27	2512±24	刘树文等, 2018a

凌海					
21LH8-1	片麻状角闪花岗岩	2512.1±4.2	2534~2661	2471±20	Chen et al. (2025)
21LH9	二长花岗岩	2506±28			Chen et al. (2025)
21LH10-5	弱片麻状二长花岗岩	2501±19			Chen et al. (2025)
23LX3-1	钾长花岗岩	2508±70			Chen et al. (2025)
21LH10-4	伟晶岩	2509±21			Chen et al. (2025)
23LX13-1	条带状片麻岩	2514.1±4.8	2533±12/2545±12	2491±14	Chen et al. (2025)

在大陆地壳深部，岩石孔隙度较小，因此，当含水流体从外部引入时，不仅降低了花岗质岩体的熔融温度（Watkins et al., 2007; Collins et al., 2021），还极大地提高了熔融反应的速率（Acosta-Vigil et al., 2006; Jamtveit et al., 2016），这种流体-岩石相互作用使得部分熔融能够在较低的温度条件下发生，并产生大量熔体（Sawyer, 2010; Weinberg and Hasa-lov á 2015; Gao et al., 2017）。结合锆石 U-Pb 年代学结果（Liu et al., 2011; Wang et al., 2012, Wang et al., 2013; 周晓萍等, 2015; 周帅等, 2017; 刘树文等, 2018a; 郝乐燃等, 2020; Chen et al., 2025; 表 3），2.53~2.50 Ga 辽西地区已经处于大陆弧背景下大规模的部分熔融阶段（Chen et al., 2025）。其中，在 2.53~2.52 Ga 期间，该地处于碰撞缩短阶段，地壳深部物质发生部分熔融，这些熔体的产生显著改变了深部岩石的物理性质，促使地壳变形机制从缩短增厚向伸展减薄的转变，诱发伸展作用的启动。~2.50 Ga 以伸展构造背景为主，伴随着伸展作用的进一步发展，深部地壳物质快速剥露，导致变泥质岩发生大规模减压部分熔融，形成了大量富钾花岗岩（Schärer et al., 1986; Harrison et al., 1999; Zhang et al., 2004, 2012; Aoya et al., 2005; Lee and Whitehouse, 2007; King et al., 2011; 于俊杰等, 2011; Wang et al., 2012; Gao et al., 2013; Gao and Zeng, 2014），此时上地壳的深熔作用与造山后伸展作用存在密切联系。所以，凌海地区的深熔作用与构造演化是密切耦合的，新太古代晚期混合花岗质岩石记录了深熔作用下宏微观构造样式与演化过程（图 14）。

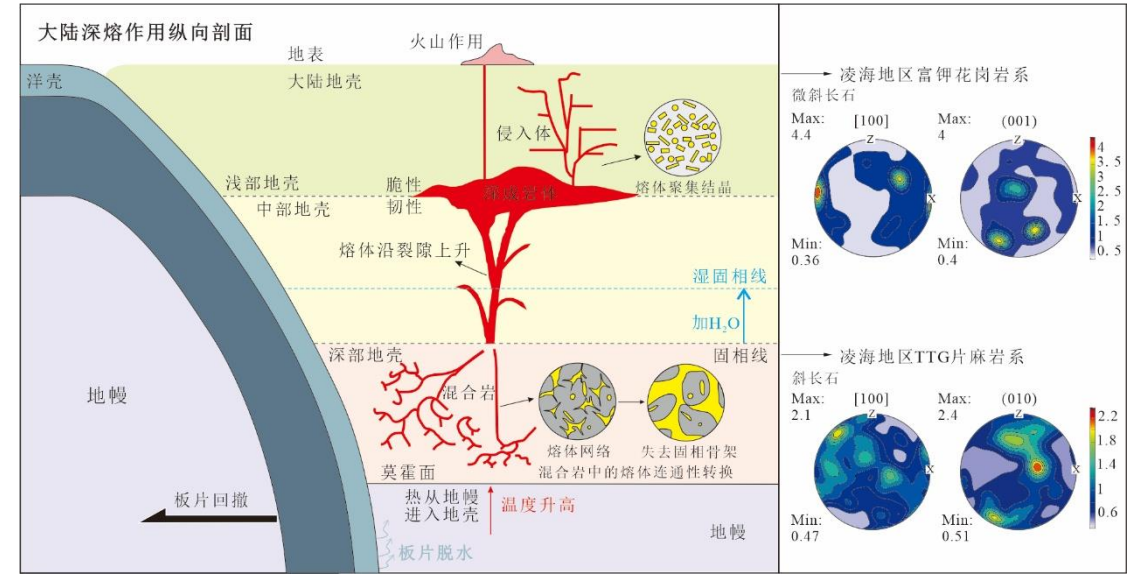


图 14 大陆弧环境下大陆地壳的深熔作用（修改自 Sawyer et al., 2011）

Fig. 14. Anatexis of continental crust in a continental arc setting (modified from Sawyer et al., 2011)

6. 结论

1. 在新太古代晚期, 辽西地区经历了与俯冲相关的壳幔相互作用。TTG 片麻岩系列为过铝质钙碱性花岗岩, 可能由岩浆弧根部加厚地壳的石榴石角闪岩部分熔融产生。富钾花岗岩为过铝质 S 型钾玄岩系列花岗岩, 源自上地壳变质泥质岩石的部分熔融, 预示着华北克拉通向伸展构造体制的过渡。

2. 凌海地区的深熔作用与构造演化密切耦合, 2.53~2.50 Ga 处于大陆弧背景下大规模的部分熔融阶段, EBSD 测试结果表明此阶段为高温 (700°C) 中压 (0.4~1.0 GPa) 环境, 长石普遍发育 CPO 极密, 主要受位错蠕变机制控制。TTG 片麻岩位于地壳较深的层次, 分异的熔体由构造薄弱带上升, 属进化的岩浆, 具有异地岩浆花岗岩特点, 代表下地壳的部分熔融, 此阶段斜长石发育 (010) [100] 滑移系; 富钾花岗岩形成位置相对较浅, 为新太古代末期地壳改造过程中熔体聚集区, 具有原地型混合花岗岩特点, 代表中上地壳部分熔融, 此阶段钾长石发育 (001) [100] 滑移系。由 TTG 片麻岩到富钾花岗岩, 深熔岩浆的分异程度和成熟度逐渐增高。

致谢 对中国冶金地质总局第一地质勘察院测试中心与湖北慧科材料科技有限公司在全岩地球化学与 EBSD 测试分析方面给予的支持表示感谢。同时感谢张波副教授、王勇生教授、陈家富教授对论文提出的细致且宝贵的修改意见。

作者贡献度说明: 陈雪: 初稿撰写; 梁琛岳: 初稿审阅及修改; 郑常青: 初稿审阅及修改; 宋志伟: 图件处理与实验结果可视化

References

- Acosta-Vigil, A., London, D., Morgan, G. B., 2006. Experiments on the Kinetics of Partial Melting of a Leucogranite at 200 MPa H₂O and 690-800°C: Compositional Variability of Melts during the Onset of H₂O-Saturated Crustal Anatexis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(5): 539-557. <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0081-8>
- Altenberger, U., Wilhelm, S., 2000. Ductile Deformation of K-Feldspar in Dry Eclogite Facies Shear Zones in the Bergen Arcs, Norway. *Tectonophysics*, 320(2): 107-121. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00048-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00048-2)
- Aoya, M., Wallis, S. R., Terada, K., et al., 2005. North-South Extension in the Tibetan Crust Triggered by Granite Emplacement. *Geology*, 33(11): 853-856. <https://doi.org/10.1130/G21806.1>
- Bahedaer Baletabieke, 2020. Study on Micro-Deformation Characteristics of Feldspar—An Example of Shangdan Ductile Shear Zone in North Qinling Tectonic Belt. *Master's thesis*. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).

- Baletabieke Bahedaer., Zhao, Z. B., Wang, G. H., et al., 2019. Research Advances of Microstructural Deformation Mechanism of Feldspar. *Acta Geologica Sinica*, 93(10): 2678-2697 (in Chinese with English abstract).
- Barbarin, B., 1999. A Review of the Relationships Between Granitoid Types, Their Origins and Their Geodynamic Environments. *Lithos*, 46(3): 605-626. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00085-1](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00085-1)
- Barker, F., 1979. Trondhjemite: Definition, Environment and Hypotheses of Origin. *Developments in Petrology*, 6: 1-12. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-41765-7.50006-X>
- Barker, F., Arth, J. G., 1976. Generation of Trondhjemitic-Tonalitic Liquids and Archean Bimodal Trondhjemite-Basalt Suites. *Geology*, 4(10): 596-600. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1976\)4<596:GOTLAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1976)4<596:GOTLAA>2.0.CO;2)
- Beard, J. S., Lofgren, G. E., 1989. Effect of Water on the Composition of Partial Melts of Greenstone and Amphibolite. *Science*, 244(4901): 195-197. <https://doi.org/10.1126/science.244.4901.195>
- Berger, A., Kalt, A., 1999. Structures and Melt Fractions as Indicators of Rheology in Cordierite-Bearing Migmatites of the Bayerische Wald (Variscan Belt, Germany). *Journal of Petrology*, 40 (11):1699-1719. <https://doi.org/10.1093/petroj/40.11.1699>
- Berger, A., Roselle, G., 2001. Crystallization Processes in Migmatites. *American Mineralogist*, 86(3): 215-224. <https://doi.org/10.2138/am-2001-2-302>
- Bestmann, M., Prior, D. J., 2003. Intragranular Dynamic Recrystallization in Naturally Deformed Calcite Marble: Diffusion Accommodated Grain Boundary Sliding as a Result of Subgrain Rotation Recrystallization. *Journal of Structural Geology*, 25(10): 1597-1613. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(03\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(03)00006-3)
- Bons, P. D., Brok, B., 2000. Crystallographic Preferred Orientation Development by Dissolution-Precipitation Creep. *Journal of Structural Geology*, 22(11): 1713-1722. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00075-4](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00075-4)
- Brown, M., 2001. Orogeny, Migmatites and Leucogranites: A Review. *Journal of Earth System Science*, 110(4): 313-336. <https://doi.org/10.1007/BF02702898>
- Campbell, I. H., Davies, D. R., 2017. Raising the Continental Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 460: 112-122. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.12.011>
- Ceccato, A., Menegon, L., Pennacchioni, G., et al., 2018. Myrmekite and Strain Weakening in Granitoid Mylonites. *Solid Earth*, (9): 1399-1419. <https://doi.org/10.5194/se-9-1399-2018>
- Cesare, B., 2000. Incongruent Melting of Biotite to Spinel in a Quartz-Free Restite at El Joyazo (SE Spain): Textures and Reaction Characterization. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139(3): 273-284. <https://doi.org/10.1007/s004100000137>
- Chappell, B. W., 1999. Aluminium Saturation in I- and S-Type Granites and the Characterization of Fractionated Haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535-551. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00086-3](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00086-3)
- Chappell, B. W., White, A. J. R., 2001. Two Contrasting Granite Types: 25 Years Later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 489-499. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2001.00882>

- Chen, X., Liang, C. Y., Neubauer, F., et al., 2025. Petrogenesis and Tectonic Implications of Neoproterozoic Mafic and Felsic Rocks in Western Liaoning: Constraints on the Crustal Evolution of the Northeastern North China Craton. *Precambrian Research*, 418: 107700. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2025.107700>
- Chen, Y. P., Wei, C. J., Zhang, J. R., et al., 2015. Metamorphism and Zircon U-Pb Dating of Garnet Amphibolite in the Baoyintu Group, Inner Mongolia. *Science Bulletin*, 60(19): 1698-1707. <https://doi.org/10.1007/s11434-015-0890-0>
- Clemens, J. D., 2003. S-Type Granitic Magmas-Petrogenetic Issues, Models and Evidence. *Earth-Science Reviews*, 61(1/2): 1-18. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00107-1](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00107-1)
- Collins, W. J., Murphy, J. B., Blereau, E., et al., 2021. Water Availability Controls Crustal Melting Temperatures. *Lithos*, 402-403: 106351. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106351>
- Condie, K. C., 2005. High Field Strength Element Ratios in Archean Basalts: A Window to Evolving Sources of Mantle Plumes? *Lithos*, 79: 491-504. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.09.014>
- Czaplińska, D., Piazzolo, S., Zibra, I., 2015. The Influence of Phase and Grain Size Distribution on the Dynamics of Strain Localization in Polymineralic Rocks. *Journal of Structural Geology*, 72: 15-32. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.01.001>
- Debat, P., Soula, J. C., Kubin, L., et al., 1978. Optical Studies of Natural Deformation Microstructures in Feldspars (Gneiss and Pegmatites from Occitania, Southern France). *Lithos*, 11(2): 133-145. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(78\)90004-X](https://doi.org/10.1016/0024-4937(78)90004-X)
- Dong, Y. L., Cao, S. Y., Cheng, X. M., et al., 2019. Grain-Size Reduction of Feldspar and Flow of Deformed Granites within the Gaoligong Shear Zone, Southwestern Yunnan, China. *Science China Earth Sciences*, 62: 1379-1398 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.1007/s11430-018-9351-8>
- Drummond, M. S., Defant, M. J., 1990. A Model for Trondhjemite-Tonalite-Dacite Genesis and Crustal Growth via Slab Melting: Archean to Modern Comparisons. *Journal of Geophysical Research*, 95: 21503-21521. <https://doi.org/10.1029/JB095iB13p21503>
- Fitzsimons, I. C. W., 1996. Metapelitic Migmatites from Brattstrand Bluffs, East Antarctica-Metamorphism, Melting and Exhumation of the Mid Crust. *Journal of Petrology*, 37(2): 395-414. <https://doi.org/10.1093/petrology/37.2.395>
- Foley, S. F., Barth, M. G., Jenner, G. A., 2000. Rutile/Melt Partition Coefficients for Trace Elements and an Assessment of the Influence of Rutile on the Trace Element Characteristics of Subduction Zone Magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(5): 933-938. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00355-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00355-5)
- Foley, S. F., Tiepolo, M., Vannucci, R., 2002. Growth of Early Continental Crust Controlled by Melting of Amphibolite in Subduction Zones. *Nature*, 417(6891): 837. <https://doi.org/10.1038/nature00799>
- Franek, J., Schulmann, K., Lexa, O., 2006. Kinematic and Rheological Model of Exhumation of High Pressure Granulites in the Variscan Orogenic Root: Example of the Blansky Les Granulite, Bohemian Massif, Czech Republic. *Mineralogy and Petrology*, 86(3): 253-276.

<https://doi.org/10.1007/s00710-005-0114-4>

- Fu, J. H., Liu, S. W., Wang, M. J., et al., 2017. Late Neoproterozoic Monzogranitic-Syenogranitic Gneisses in the Eastern Hebei-Western Liaoning Province, North China Craton: Petrogenesis and Implications for Tectonic Setting. *Precambrian Research*, 303: 392-413. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.05.002>
- Fukuda, J. I., Holyoke, III. C. W., Kronenberg, A. K., 2018. Deformation of Fine-Grained Quartz Aggregates by Mixed Diffusion and Dislocation Creep. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 123(6): 4676-4696. <https://doi.org/10.1029/2017JB015133>
- Fukuda, J., Okudaira, T., 2013. Grain-Size-Sensitive Creep of Plagioclase Accompanied by Solution–Precipitation and Mass Transfer Under Mid-Crustal Conditions. *Journal of Structural Geology*, 51: 61-73. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2013.03.006>
- Gao, L. E., Zeng, L. S., 2014. Fluxed Melting of Metapelite and the Formation of Miocene High-CaO Two-Mica Granites in the Malashan Gneiss Dome, Southern Tibet. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 130(1): 136-155. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.01.003>
- Gao, L. E., Zeng, L. S., Asimow, P. D., 2017. Contrasting Geochemical Signatures of Fluid-Absent Versus Fluid-Fluxed Melting of Muscovite in Metasedimentary Sources: the Himalayan Leucogranites. *Geology*, 45: 39-42. <https://doi.org/10.1130/G38336.1>
- Gao, L. E., Zeng, L. S., Hou, K. J., et al., 2013. Episodic Crustal Anatexis and the Formation of Paiku Composite Leucogranitic Pluton in the Malashan Gneiss Dome, Southern Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 58: 3546-3563. <https://doi.org/10.1007/s11434-013-5792-4>
- Gao, P., Santosh, M., 2019. Building the Wutai Arc: Insights into the Archean-Paleoproterozoic Crustal Evolution of the North China Craton. *Precambrian Research*, 333: 105429. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105429>
- Geng, Y. S., Liu, F. L., Yang, C. H., 2006. Magmatic Event at the End of the Archean in Eastern Hebei Province and Its Geological Implication. *Acta Geologica Sinica*, 80: 819-833. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2006.tb00305.x>
- Geng, Y. S., Shen, Q. H., Ren, L. D., 2010. Late Neoproterozoic-Early Paleoproterozoic Magmatism Events and Tectonothermal System in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 26: 1945-1966 (in Chinese with English abstract).
- Geological Survey Institute of Liaoning Province., 2003. 1:250 000 Geological Map of Jinzhou City. *Shenyang: Liaoning Geology Printing House* (in Chinese).
- Grant, M. L., Wilde, S. A., Wu, F. Y., et al., 2009. The Application of Zircon Cathodoluminescence Imaging, Th-U-Pb Chemistry and U-Pb Ages in Interpreting Discrete Magmatic and High-Grade Metamorphic Events in the North China Craton at the Archean/Proterozoic Boundary. *Chemical Geology*, 261: 155-171. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.11.002>
- Greenfield, J. E., Clarke, G. L., Bland, M., et al., 1996. In-Situ Migmatite and Hybrid Diatexite at Mt. Stafford, Central Australia. *Journal of Metamorphic Geology*, 14(4): 413-426. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.1996.06002.x>
- Han, N., Zhao, Z. B., Wang, G. H., et al., 2021. Effect of the Second Phase on the Strain Localization in Multiphase Mylonite: A Case Study on the Felsic Mylonite in the Qinling Group. *Acta Geologica Sinica*, 95(5): 1614-1629 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021112>

- Hao, L. R., Yang, D. B., Xu, W. L., et al., 2020. Late Neoproterozoic Magmatism and Crustal Growth in Northeastern North China Craton: Constraints from Zircon U-Pb-Hf Isotope, Trace Elements and Whole Rock Geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 36: 1076-1090 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2020.04.07>.
- Harrison, T. M., Grove, M., Lovera, O. M., et al., 1999. The Origin of Himalayan Anatexis and Inverted Metamorphism: Models and Constraints. *Journal of Asian Earth Sciences*, 17(5): 755-772. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(99\)00018-8](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(99)00018-8)
- Hartel, T. H. D., Pattison, D. R. M., 1996. Genesis of the Kapuskasing (Ontario) Migmatitic Mafic Granulites by Dehydration Melting of Amphibolite: The Importance of Quartz to Reaction Progress. *Journal of Metamorphic Geology*, 14(5): 591-611. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.1996.00404.x>
- Hentschel, F., Trepmann, C., Janots, E., 2019. Deformation of Feldspar at Greenschist Facies Conditions-the Record of Mylonitic Pegmatites from the Pfunderer Mountains, Eastern Alps. *Solid Earth*, 10: 95-116. <https://doi.org/10.5194/se-10-95-2019>
- Hoffmann, J. E., Münker, C., Næraa, T., et al., 2011. Mechanisms of Archean Crust Formation by High-Precision HFSE Systematics on TTGs. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(15): 4157-4178. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.04.027>
- Hu, Z.P., Zhang, Y.S., Hu, R., et al., 2016. Amphibole-Bearing Migmatite in North Dabie, Eastern China: Water-Fluxed Melting of the Orogenic Crust. *Journal of Asian Earth Sciences*, 125: 100-116. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.05.018>
- Ishii, K., Kanagawa, K., Shigematsu, N., et al., 2007. High Ductility of K-Feldspar and Development of Granitic Banded Ultramylonite in the Ryoke Metamorphic Belt, SW Japan. *Journal of Structural Geology*, 29(6): 1083-1098. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2007.02.008>
- Jahn, B. M., Liu, D. Y., Wan, Y. S., et al., 2008. Archean Crustal Evolution of the Jiaodong Peninsula, China, as Revealed by Zircon SHRIMP Geochronology, Elemental and Nd-Isotope Geochemistry. *The American Journal of Science*, 308(3): 232-269. <https://doi.org/10.2475/03.2008.03>
- Jamieson, R. A., Beaumont, C., 2011. Coeval Thrusting and Extension during Lower Crustal Ductile Flow-Implications for Exhumation of High-Grade Metamorphic Rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(1): 33-51. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2010.00908.x>
- Jamtveit, B., Austrheim, H., Putnis, A., 2016. Disequilibrium Metamorphism of Stressed Lithosphere. *Earth-Science Reviews*, 154: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.12.002>
- Jiang, N., Guo, J. H., Zhai, M. G., et al., 2010. ~2.7 Ga Crust Growth in the North China Craton. *Precambrian Research*, 179: 37-49. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.02.010>
- Jiang, Z. T., Prior, D. J., Wheeler, J., 2000. Albite Crystallographic Preferred Orientation and Grain Misorientation Distribution in a Low-Grade Mylonite Implications for Granular Flow. *Journal of Structural Geology*, 22(11): 1663-1674. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00079-1](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00079-1)
- Jin, X. S., Zhu, H. P., 2000. Determination of 43 Trace Elements in Rock Samples By Double Focusing High Resolution Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Chinese Journal*

of Analytical Chemistry, 28(5): 563-567 (in Chinese with English abstract).

- Johnson, T. E., Gibson, R. L., Brown, M., et al., 2003. Partial Melting of Metapelitic Rocks beneath the Bushveld Complex, South Africa. *Journal of Petrology*, 44(5): 789-813. <https://doi.org/10.1093/petrology/44.5.789>
- Kilian, R., Heilbronner, R., Stunitz, H., 2011. Quartz Grain Size Reduction in a Granitoid Rock and the Transition from Dislocation to Diffusion Creep. *Journal of Structural Geology*, 33: 1265-1284. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2011.05.004>
- King, J., Harris, N., Argles, T., et al., 2011. Contribution of Crustal Anatexis to the Tectonic Evolution of Indian Crust beneath Southern Tibet. *Geological Society of America Bulletin*, 123: 218-239. <https://doi.org/10.1130/B30085.1>
- Kumar, K. V., Ernst, W. G., Leelanandam, C., et al., 2011. Origin of ~2.5 Ga Potassic Granite from the Nellore Schist Belt, SE India: Textural, Cathodoluminescence, and SHRIMP U-Pb Data. *Contributions To Mineralogy And Petrology*, 162: 867-888. <https://doi.org/10.1007/s00410-011-0629-0>
- Küster, M., Stöckhert, B., 1999. High Differential Stress and Sublithostatic Pore Fluid Pressure in the Ductile Regime—Microstructural Evidence for Short-Term Post-Seismic Creep in the Sesia Zone, Western Alps. *Tectonophysics*, 303(1): 263-277. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00256-X](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00256-X)
- LaFlèche, M. R., Camire, G., Jenner, G. A., 1998. Geochemistry of Post-acadian, Carboniferous Continental Intraplate Basalts from the Maritimes Basin, Magdalen Islands, Quebec, Canada. *Chemical Geology*, 148(3): 115-136. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.001>
- Laurent, O., Martin, H., Moyen, J. F., et al., 2014. The Diversity and Evolution of Late-Archean Granitoids: Evidence for the Onset of "Modern-Style" Plate Tectonics Between 3.0 and 2.5 Ga. *Lithos*, 205: 208-235. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.06.012>
- Law, R. D., 1990. Crystallographic Fabrics: a Selective Review of Their Applications to Research in Structural Geology. *The Geological Society of London Special Publications*, 54(1): 335-352. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1990.054.01.30>
- Lee, J., Whitehouse, M. J., 2007. Onset of Mid-Crustal Extensional Flow in Southern Tibet: Evidence from U/Pb Zircon Ages. *Geology*, 35(1): 45-48. <https://doi.org/10.1130/G22842A.1>
- Li, W. P., Li, X. H., 2005. Geochemical Characteristics of the Late Paleozoic Diabase Dyke Swarms of Changmaohezi from Western Liaoning, Northeast China. *Earth Science*, 30(6): 761-770 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Palin, R. M., Mitchell, R. N., et al., 2024a. Archean Multi-Stage Magmatic Underplating Drove Formation of Continental Nuclei in the North China Craton. *Nature Communications*, 15: 6231. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50435-5>.
- Liu, S. J., Jahn, B., Wan, Y. S., et al., 2015. Neoproterozoic to Paleoproterozoic High-Pressure Mafic Granulite from the Jiaodong Terrain, North China Craton: Petrology, Zircon Age Determination and Geological Implications. *Gondwana Research*, 28: 493-508. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.07.006>.
- Liu, S. Q., Zhang, B., Zhang J. J., et al., 2024b. Microstructures, Fabrics, and Seismic Properties

- of Mylonitic Amphibolites: Implications for Strain Localization in a Thickening Anisotropic Middle Crust of the North China Craton. *Journal of Earth Science*, 35(3): 769-785. <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1480-5>
- Liu, S. R., Zhang, J. J., Qi, G. W., et al., 2016. Ductile Deformation and Its Geological Implications for Retrograded Eclogites from the Hongqiyangzi Complex in Chicheng, Northern Hebei, China. *Science China Earth Sciences*, 59: 1610-1621 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.1007/11430-016-5316-6>.
- Liu, S. W., Fu, J. H., Sun, Z. G., et al., 2018a. Petrogenesis and Geodynamics of Archean Sanukitoid Gneisses in the Jinzhou-Qian'an Area. *Acta Petrologica Sinica*, 34: 1083-1098 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. W., Santosh, M., Wang, W., et al., 2011. Zircon U-Pb Chronology of the Jianping Complex: Implications for the Precambrian Crustal Evolution History of the Northern Margin of North China Craton. *Gondwana Research*, 20(1): 48-63. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.01.003>
- Liu, S. W., Wang, W., Bai X., et al., 2018b. Lithological Assemblages of Archean Meta-Igneous Rocks in Eastern Hebei-Western Liaoning Provinces of North China Craton, and Their Geodynamic Implications. *Earth Science*, 43(1): 44-56 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.003>
- Liu, T. J., 2020. Study on the Rheological Behaviors of Anatectic Rocks from the Deep Crustal Level in the Daqingshan Area, Inner Mongolia—Structural Anatomy from the Hujigou-Damiao-Xuehaigou Section. *Master's thesis*. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Liu, T. J., 2023. Study on the Anatexis and Rheological Behavior of the Deep Crustal Level in the Paleoproterozoic Orogenic Belt, Northern North China Craton: Structural Anatomy from the Zhuozi-Liangcheng Section. *Ph.D. Thesis*. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Lund, M. D., Piazzolo, S., Harley, S. L., 2006. Ultrahigh Temperature Deformation Microstructures in Felsic Granulites of the Napier Complex, Antarctica. *Tectonophysics*, 427(1-4): 0-151. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.05.022>
- Ma, W. W., Zhang, B., Cai, F. L., et al., 2024. Microstructures, Deformation Mechanisms and Seismic Properties of Synkinematic Migmatite from Southeastern Tibet: Insights from the Migmatitic Core of the Ailao Shan-Red River Shear Zone, Western Yunnan, China. *Journal of Earth Science*, 35(4): 1149-1169. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1678-1>
- Mancktelow, N. S., Pennacchioni, G., 2005. The Control of Precursor Brittle Fracture and Fluid-Rock Interaction on the Development of Single and Paired Ductile Shear Zones. *Journal of Structural Geology*, 27(4): 645-661. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2004.12.001>
- Martelat, J. E., Schulmann, K., Lardeaux, J. M., et al., 1999. Granulite Microfabrics and Deformation Mechanisms in Southern Madagascar. *Journal of Structural Geology*, 21(6): 671-687. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(99\)00052-8](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(99)00052-8)
- Martin, H., Moyen, J. F., Guitreau, M., et al., 2014. Why Archean TTG Cannot Be Generated by MORB Melting in Subduction Zones. *Lithos*, 198-199: 1-13.

<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.02.017>

- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., et al., 2005. An Overview of Adakite, Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite (TTG), and Sanukitoid: Relationship and Some Implications for Crustal Evolution. *Lithos*, 79(1): 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.048>
- Menegon, L., Pennacchioni, G., Spiess, R., 2008. Dissolution-Precipitation Creep of K-Feldspar in Mid-Crustal Granite Mylonites. *Journal of Structural Geology*, 30(5): 565-579. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2008.02.001>
- Menegon, L., Pennacchioni, G., Stünitz, H., 2006. Nucleation and Growth of Myrmekite during Ductile Shear Deformation in Metagranites. *Journal of Metamorphic Geology*, 24(7): 17. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2006.00654.x>
- Menegon, L., Piazzolo, S., Pennacchioni, G., 2011. The Effect of Dauphiné Twinning on Plastic Strain in Quartz. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 161(4): 635-652. <https://doi.org/10.1007/s00410-010-0554-7>
- Menegon, L., Stünitz, H., Nasipuri, P., et al., 2013. Transition from Fracturing to Viscous Flow in Granulite Facies Perthitic Feldspar (Lofoten, Norway). *Journal of Structural Geology*, 48: 95-112. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.12.004>
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37(3): 215-224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Miranda, E. A., Hirth, G., John, B. E., 2016. Microstructural Evidence for the Transition from Dislocation Creep to Dislocation-Accommodated Grain Boundary Sliding in Naturally Deformed Plagioclase. *Journal of Structural Geology*, 92: 30-45. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.09.002>
- Miyashiro, A., 1975. Classification, Characteristics, and Origin of Ophiolites. *The Journal of Geology*, 83(2): 249-281. <https://doi.org/10.1086/628085>
- Morfin, S., Sawyer, E. W., Bandyayera, D., 2013. Large Volumes of Anatectic Melt Retained in Granulite Facies Migmatites: An Injection Complex in Northern Quebec. *Lithos*, 168-169: 200-218. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.02.007>
- Morfin, S., Sawyer, E.W., Bandyayera, D., 2014. The Geochemical Signature of a Felsic Injection Complex in the Continental Crust: Opinaca Subprovince, Quebec. *Lithos*, 196-197: 339-355. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.03.004>
- Moyen, J. F., 2009. High Sr/Y and La/Ya Ratios: the Meaning of the “Adakitic Signature”. *Lithos*, 112(3): 556-574. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.001>
- Moyen, J. F., 2011. The Composite Archaean Grey Gneisses: Petrological Significance, and Evidence for a Non-Unique Tectonic Setting for Archaean Crustal Growth. *Lithos*, 123: 21-36. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.09.015>
- Moyen, J. F., Martin, H., 2012. Forty Years of TTG Research. *Lithos*, 148: 211-223. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.06.010>
- Mukai, H., Austrheim, H., Putnis, C. V., et al., 2014. Textural Evolution of Plagioclase Feldspar across a Shear Zone: Implications for Deformation Mechanism and Rock Strength. *Journal*

- of Petrology*, 55(8): 1457-1477. <https://doi.org/10.1093/petrology/egu030>
- Papa, S., Pennacchionia, G., Menegon, L., et al., 2020. High Stress Creep Preceding Co-Seismic Rupturing in Amphibolite-Facies Ultramylonites. *Earth and Planetary Science Letters*, 541: 116260. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116260>
- Passchier, C. W., Trouw, R. A. J., 2005. *Microtectonics*. 2nd Ed. Berlin: Springer.
- Piazolo, S., Bestmann, M., Prior, D. J., et al., 2006. Temperature Dependent Grain Boundary Migration in Deformed-Then-Annealed Material: Observations from Experimentally Deformed Synthetic Rocksalt. *Tectonophysics*, 427(1-4): 55-71. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.06.007>
- Platt, J., 2015. Rheology of Two-Phase Systems: a Microphysical and Observational Approach. *Journal of Structural Geology*, 77: 213-227. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.05.003>
- Polat, A., Hofmann, A. W., 2003. Alteration and Geochemical Patterns in the 3.7–3.8 Ga Isua Greenstone Belt, West Greenland. *Precambrian Research*, 126(3): 197-218. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(03\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(03)00095-0).
- Polat, A., Kerrich, R., 2002. Nd-Isotope Systematics of ~2.7 Ga Adakites, Magnesian Andesites, and Arc Basalts, Superior Province: Evidence for Shallow Crustal Recycling at Archean Subduction Zones. *Earth and Planetary Science Letters*, 202(2): 345-360. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00806-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00806-3)
- Prior, D. J., Wheeler, J., Peruzzo, L., et al., 2002. Some Garnet Microstructures: an Illustration of the Potential of Orientation Maps and Misorientation Analysis in Microstructural Studies. *Journal of Structural Geology*, 24(6-7): 999-1011. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(01\)00087-6](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(01)00087-6)
- Qian, Q., Hermann, J., 2013. Partial Melting of Lower Crust at 10–15 kbar: Constraints on Adakite and TTG Formation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165(6): 1195-1224. <https://doi.org/10.1007/s00410-013-0854-9>
- Raith, J. G., Harley, S. L., 1998. Low-P/High-T Metamorphism in the Okiep Copper District, Western Namaqualand, South Africa. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(2): 281-305. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1998.00131.x>
- Rapp, R. P., Shimizu, N., Norman, M. D., 1999. Reaction between Slab-derived Melts and Peridotite in the Mantle Wedge: Experimental Constraints at 3.8 Gpa. *Chemical Geology*, 160(4): 335-356. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00106-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00106-0)
- Rapp, R. P., Shimizu, N., Norman, M. D., 2003. Growth of Early Continental Crust by Partial Melting of Eclogite. *Nature*, 425(6958): 605-609. <https://doi.org/10.1038/nature02031>
- Rapp, R. P., Watson, E. B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8–32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891-931. <https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.891>
- Ree, H., Kim, S., Han, R., et al., 2005. Grain-Size Reduction of Feldspars by Fracturing and Neocrystallization in a Low-Grade Granitic Mylonite and Its Rheological Effect. *Tectonophysics*, 407: 227-237. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.07.010>

- Rollinson, H. R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation: The AusIMM Bulletin. *Journal of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, 4: 28. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(95\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0098-3004(95)90001-2)
- Romano, R., Lana, C., Alkmim, F. F., et al., 2013. Stabilization of the Southern Portion of the São Francisco Craton, SE Brazil, through a Long-Lived Period of Potassic Magmatism. *Precambrian Research*, 224: 143-159. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.09.002>
- Sacerdoti, M., Labernardiere, H., Gandais, M., 1980. Transmission Electron Microscope (TEM) Study of Geologically Deformed Potassic Feldspars. *Bulletin de Mine ralogie*, 103(1): 148-155. <https://doi.org/10.3406/bulmi.1980.7388>
- Sawyer, E. W., 2008. Atlas of Migmatites. *The Canadian Mineralogist*, 9: 1-371. <https://doi.org/10.1139/9780660197876>
- Sawyer, E. W., 2010. Migmatites Formed by Water-Fluxed Partial Melting of a Leucogranodiorite Protolith: Microstructures in the Residual Rocks and Source of the Fluid. *Lithos*, 116(3-4): 273-286. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.07.003>
- Sawyer, E. W., 2020. Petrogenesis of Secondary Diatexites and the Melt Budget for Crustal Reworking. *Journal Of Petroleum Science And Engineering*, 61(3). <https://doi.org/10.1093/petrology/egaa039>
- Sawyer, E. W., Cesare, B., Brown, M., 2011. When the Continental Crust Melts. *Elements*, 7: 229-234. <https://doi.org/10.2113/gselements.7.4.229>
- Scandale, E., Gandais, M., Willaime, C., 1983. Transmission Electron Microscopic Study of Experimentally Deformed K-Feldspar Single Crystal: The (010) [001], (001) $\frac{1}{2}$ [110], (110) $\frac{1}{2}$ [112] and (111) $\frac{1}{2}$ [110] Slip Systems. *Physics and Chemistry of Minerals*, 9: 182-187. <https://doi.org/10.1007/BF00308376>
- Schärer, U., Xu, R. H., Allègre, C., 1986. Uranium-(Thorium)-Lead Systematics and Ages of Himalayan Leucogranites, South Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 77(1): 35-48. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(86\)90130-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(86)90130-5)
- Schulmann, K., Mlcoch, B., Melka, R., 1996. High-Temperature Microstructures and Rheology of Deformed Granite, Erzgebirge, Bohemian Massif. *Journal of Structural Geology*, 18(6): 719-733. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(96\)80007-1](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(96)80007-1)
- Shirey, S. B., Hanson, G. N., 1984. Mantle-derived Archaean Monzodiorites and Trachyandesites. *Nature*, 310: 222-224. <https://doi.org/10.1038/310222a0>
- Simpson, C., Wintsch, R. P., 1989. Evidence for Deformation-Induced K-Feldspar Replacement by Myrmekite. *Journal of Metamorphic Geology*, 7: 261-275. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1989.tb00588.x>
- Smithies, R. H., Champion, D. C., 2000. The Archaean High-Mg Diorite Suite: Links to Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite Magmatism and Implications for Early Archaean Crustal Growth. *Journal of Petrology*, 41(12): 1653-1671. <https://doi.org/10.1093/petrology/41.12.1653>
- Smithies, R., Champion, D., Van Kranendonk, M., 2009. Formation of Paleoarchean Continental Crust through Infracrustal Melting of Enriched Basalt. *Earth and Planetary Science Letters*, 281(3): 298-306. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.03.003>

- Song, Z. W., Liang, C. Y., Franz, N., et al., 2025. The Yanshanian Movement in Western Liaoning, Northeastern North China Craton. *Earth-Science Reviews*, 260: 104989. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104989>.
- Song, Z. W., Zheng, C. Q., Lin, B., et al., 2023. Geological Characteristics of Late Jurassic Volcanic Rocks in Sierbao-Baita Basin, West Liaoning Province and Its Response to Yanshan Movement. *Earth Science*, 48(10): 3689-3706 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.185>.
- Spruzeniece, L., Piazzolo, S., 2015. Strain Localization in Brittle–Ductile Shear Zones: Fluid-Abundant vs. Fluid-Limited Conditions (an Example from Wyangala Area, Australia). *Solid Earth*, 6: 881-901. <https://doi.org/10.5194/se-6-881-2015>
- Stipp, M., Kunze, K., 2008. Dynamic Recrystallization near the Brittle Plastic Transition in Naturally and Experimentally Deformed Quartz Aggregates. *Tectonophysics*, 448: 77-97. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.041>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society*, 42(1): 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Sylvester, P. J., 1998. Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, 45(1): 29-44. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00024-3](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00024-3)
- Tullis, J., 2002. Deformation of Granitic Rocks: Experimental Studies and Natural Examples. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 51(1): 51-95. <https://doi.org/10.2138/gsrmg.51.1.51>
- Tullis, J., Yund, R. A., 1977. Experimental Deformation of Dry Westerly Granite. *Journal of Geophysical Research*, 82(36): 5705-5718. <https://doi.org/10.1029/JB082i036p05705>
- Tullis, J., Yund, R. A., 1991. Diffusion Creep in Feldspar Aggregates: Experimental Evidence. *Journal of Structural Geology*, 13(9): 987-1000. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(91\)90051-J](https://doi.org/10.1016/0191-8141(91)90051-J)
- Vanderhaeghe, O., 2009. Migmatites, Granites and Orogeny: Flow Modes of Partially-Molten Rocks and Magmas Associated with Melt/Solid Segregation in Orogenic Belts. *Tectonophysics*, 477(3-4): 119-134. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.06.021>
- Wang, C., Song, S. G., Su, L., et al., 2022. Crustal Maturation and Cratonization in Response to Neoproterozoic Continental Collision: The Suizhong Granitic Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 377: 106732. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2022.106732>.
- Wang, H. C., Kang, J. L., Xiao, Z. B., et al., 2018. Neoproterozoic Subduction in the North China Craton: New Evidence from the Metamorphic High-Mg Igneous Assemblage in the Yunzhongshan Area, Shanxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 34: 1099-1118.
- Wang, W., Liu, S. W., Bai, X., et al., 2011. Geochemistry and Zircon U-Pb-Hf Isotopic Systematics of the Neoproterozoic Yixian-Fuxin Greenstone Belt, Northern Margin of the North China Craton: Implications for Petrogenesis and Tectonic Setting. *Gondwana Research*, 20(1): 64-81. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.02.012>
- Wang, W., Liu, S. W., Cawood, P. A., et al., 2016. Late Neoproterozoic Subduction-Related Crustal

- Growth in the Northern Liaoning Region of the North China Craton: Evidence from 2.55 to 2.50 Ga Granitoid Gneisses. *Precambrian Research*, 281: 200-223. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.05.018>
- Wang, W., Liu, S. W., Santosh, M., et al., 2013. Zircon U-Pb-Hf Isotopes and Whole-Rock Geochemistry of Granitoid Gneisses in the Jianping Gneissic Terrane, Western Liaoning Province: Constraints on the Neoarchean Crustal Evolution of the North China Craton. *Precambrian Research*, 224: 184-22. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.09.019>
- Wang, W., Liu, S. W., Santosh, M., et al., 2015. Neoarchean Intra-Oceanic Arc System in the Western Liaoning Province: Implications for the Early Precambrian Crust-Mantle Geodynamic Evolution of the Eastern Block of the North China Craton. *Earth-Science Reviews*, 150: 329-364. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.08.002>
- Wang, W., Liu, S. W., Wilde, S. A., et al., 2012. Petrogenesis and Geochronology of Precambrian Granitoid Gneisses in Western Liaoning Province: Constraints on Neoarchean to Early Paleoproterozoic Crustal Evolution of North China Craton. *Precambrian Research*, 222-223: 290-311. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.10.023>
- Wang, X., 2020. Investigation on the Rheology and Partial Melting of Garnet Amphibolites of the Lower Crust of the Tibetan Plateau. *Ph.D. Thesis*. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.27492/d.cnki.gzdzu.2020.000082>
- Watkins, J. M., Clemens, J. D., Treloar, P. J., 2007. Archaean TTGs as Sources of Younger Granitic Magmas: Melting of Sodic Metatonalites at 0.6-1.2 GPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(1): 91-110. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0181-0>
- Weinberg, R. F., Hasalová P., 2015. Water-Fluxed Melting of the Continental Crust: A Review. *Lithos*, 212-215: 158-188. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.08.021>
- Wheeler, J., Prior, D., Jiang, Z., et al., 2001. The Petrological Significance of Misorientations between Grains. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(1): 109-124. <https://doi.org/10.1007/s004100000225>
- White, R. W., Powell, R., Clarke, G. L., 2003. Prograde Metamorphic Assemblage Evolution during Partial Melting of Metasedimentary Rocks at Low Pressures: Migmatites from Mt Stafford, Central Australia. *Journal of Petrology*, 44(11): 1937-1960. <https://doi.org/10.1093/petrology/egg065>
- Whitney, D. L., Teyssier, C., Fayon, A. K., et al., 2003. Tectonic Controls on Metamorphism, Partial Melting, and Intrusion: Timing and Duration of Regional Metamorphism and Magmatism in the Niğde Massif, Turkey. *Tectonophysics*, 376(1-2): 37-60. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.08.009>
- Willaime, C., Christie, J. M., Kovacs, M. P., 1979. Experimental Deformation of K-Feldspar Single Crystals. *Bulletin de Minéralogie*, 102(2): 168-177. <https://doi.org/10.3406/bulmi.1979.7272>
- Wu, M. L., Zhao, G. C., Sun, M., et al., 2012. Petrology and P-T Path of the Yishui Mafic Granulites: Implications for Tectonothermal Evolution of the Western Shandong Complex in the Eastern Block of the North China Craton. *Precambrian Research*, 222-223: 312-324. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.08.008>

- Wu, M. L., Zhao, G. C., Sun, M., et al., 2014. Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopes of Major Lithologies from the Jiaodong Terrane: Implications for the Crustal Evolution of the Eastern Block of the North China Craton. *Lithos*, 190-191: 71-84. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.12.004>.
- Xiong, X. L., Keppler, H., Audéat, A., et al., 2009. Experimental Constraints on Rutile Saturation during Partial Melting of Metabasalt at the Amphibolite to Eclogite Transition, with Applications to TTG Genesis. *American Mineral*, 94: 1175-1186. <https://doi.org/10.2138/am.2009.3158>
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Wilde, S. A., et al., 2008. Petrogenesis and Geodynamics of Late Archean Magmatism in Eastern Hebei, Eastern North China Craton: Geochronological, Geochemical and Nd-Hf Isotopic Evidence. *Precambrian Research*, 167: 125-149. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.07.004>.
- Yu, J. J., Zeng, L. S., Liu, J., et al., 2011. Early Miocene Leucogranites in Dinggye Area, Southern Tibet: Formation Mechanism and Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 1961-1972 (in Chinese with English abstract).
- Yu, S. Y., Li, S. Z., Zhang, J. X., et al., 2019. Linking High Pressure Mafic Granulite, TTG-Like (Tonalitic-Trondhjemitic) Leucosome and Pluton, and Crustal Growth during Continental Collision. *Geological Society of America Bulletin*, 131(3-4): 572-586. <https://doi.org/10.1130/B31822.1>
- Yund, R. A., Tullis, J., 1992. Effect of Water on Grain Boundary Diffusion Rates. *Eos Trans AM Geophys Union* 1992, 73: 373-374.
- Zeng, L. S., Gao, L. E., 2017. Cenozoic Crustal Anatexis and the Leucogranites in the Himalayan Collisional Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1420-1444 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., 2004. Precambrian Geological Events in the North China Craton. *Geological Aspects of the Tectonic Evolution of China*, 226: 57-72. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.2004.226.01.04>
- Zhang, G. R., 2006. Mesozoic Intraplate Orogenesis In Westren Liaoning Province. *PhD thesis*. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Harris, N., Parrish, R., et al., 2004. Causes and Consequences of Protracted Melting of the Mid-Crust Exposed in the North Himalayan Antiform. *Earth and Planetary Science Letters*, 228(1): 195-212. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.09.031>
- Zhang, J. J., Santosh, M., Wang, X. X., et al., 2012. Tectonics of the Northern Himalaya since the India-Asia Collision. *Gondwana Research*, 21(4): 939-960. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.11.004>
- Zhang, J. J., Shang, S., Wei C. J., et al., 2019. Present Status and Development Prospect of Studies of Rheology of Continental Lithosphere. *Acta Geoscientica Sinica*, 40(1): 9-16 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Zhang, B., Zhang, J. J., 2022. Microstructural Characteristics and Deformation Mechanisms of Granitic Ultramylonite During Ductile Rheology. *Acta Geologica Sinica*, 96(10): 3639-3657 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022174>.

- Zhang, Y. Y., 2017. The Petrogenesis and Evolution of Neoarchean Diaoyutai Granitoid in Western Liaoning Province. *Master's Thesis*. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Key Issues Revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177-202. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.10.002>
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 1998. Thermal Evolution of Archean Basement Rocks from the Eastern Part of the North China Craton and Its Bearing on Tectonic Setting. *International Geology Review*, 40: 706-721. <https://doi.org/10.1080/00206819809465233>.
- Zhou, S., Zhang, M. S., Li, X. B., et al., 2017. Geological Characteristics of Granitic Pegmatite at South of Shoushan, Xingcheng Area in Western Liaoning and Its Geological Significance. *Global Geology*, 36: 66-81 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-5589.2017.01.006>.
- Zhou, X. P., Zheng, C. Q., Xu, X. C., et al., 2015. Petrology, Emplacement Sequence and Geological Significance of Magmatic Complex in Xinlun of Xingcheng, Liaoning. *Global Geology*, 34: 571-589 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-5589.2015.03.001>.

附中文参考文献

- 巴合达尔·巴勒塔别克, 赵中宝, 王根厚, 等, 2019. 长石显微变形机制研究进展. *地质学报*, 93(10): 2678-2697. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019250>.
- 巴合达尔·巴勒塔别克, 2020. 长石显微变形特征研究——以北秦岭构造带商丹韧性剪切带为例(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京).
- 曾令森, 高利娥, 2017. 喜马拉雅碰撞造山带新生代地壳深熔作用与淡色花岗岩. *岩石学报*, 33(5): 1420-1444.
- 董彦龙, 曹淑云, 程雪梅, 等, 2019. 高黎贡剪切带变形花岗质岩石中的长石细粒化和岩石流动特性. *中国科学: 地球科学*, 49: 1372-1393. <https://doi.org/10.1007/s11430-018-9351-8>.
- 耿元生, 沈其韩, 任留东, 2010. 华北克拉通晚太古代末-古元古代初的岩浆事件及构造热体制. *岩石学报*, 26(7): 1945-966.
- 郝乐燃, 杨德彬, 许文良, 等, 2020. 华北克拉通东北部新太古代晚期岩浆作用和地壳增生: 锆石U-Pb-Hf同位素、微量元素和地球化学制约. *岩石学报*, 36(4): 1076-1090.
- 韩宁, 赵中宝, 王根厚, 等, 2021. 多相糜棱岩内第二相对应变局部化的影响——以秦岭群花岗质糜棱岩为例. *地质学报*, 95(5): 1614-1629. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021112>.
- 靳新娣, 朱和平, 2000. 岩石样品中43种元素的高分辨等离子质谱测定. *分析化学*, 28(5): 563-567.
- 辽宁省地质局, 2003. 锦州市地质图(1:25万). 沈阳: 辽宁地质局.
- 李伍平, 李献华, 2005. 辽西晚古生代长茂河子辉绿岩墙群的地球化学特征. *地球科学*, 30(6): 761-770.

- 刘世然, 张进江, 戚国伟, 等, 2016. 冀北赤城红旗营子杂岩中退变榴辉岩的韧性变形及构造意义. 中国科学(地球科学), 46(9): 1252-1264.
- 刘树文, 付敬浩, 孙国正, 等, 2018a. 锦州-迁安太古宙赞岐岩类片麻岩成因及其动力学意义. 岩石学报, (4): 1083-1098.
- 刘树文, 王伟, 白翔, 等, 2018b. 冀东-辽西太古宙火成岩岩石组合和动力学意义. 地球科学, 43(1): 44-56. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.003>
- 刘同君, 2020. 内蒙古大青山地区深熔岩石流变行为研究——忽鸡沟-大庙-雪海沟典型剖面解剖(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 刘同君, 2023. 华北克拉通北部古元古代造山带下地壳深熔—流变研究—卓资-凉城剖面解剖(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 宋志伟, 郑常青, 林波, 等, 2023. 辽西寺儿堡-白塔盆地晚侏罗世火山岩地质特征及其对燕山运动的响应. 地球科学, 48(10): 3689-3706. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.185>.
- 王雄, 2020. 青藏高原下地壳石榴角闪岩的部分熔融和变形实验研究(博士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京). <https://doi.org/10.27492/d.cnki.gzdz.2020.000082>.
- 于俊杰, 曾令森, 刘静, 等, 2011. 藏南定结地区早中新世淡色花岗岩的形成机制及其构造动力学意义. 岩石学报, 27(7): 1961-1972.
- 张国仁, 2006. 辽西地区中生代板内造山作用(博士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京).
- 张进江, 商姗, 魏春景, 等, 2019. 大陆岩石圈流变学研究的发展现状与前景. 地球学报, 40(1): 9-16.
- 张磊, 张波, 张进江, 2022. 花岗质超糜棱岩的微观构造与变形机制. 地质学报, 96(10): 3639-3657. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022174>.
- 张媛媛, 2017. 辽西新太古代钓鱼台花岗岩成因及演化过程(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 周帅, 张梅生, 李晓波, 等, 2017. 辽西兴城地区首山南花岗伟晶岩地质特征及其地质意义. 世界地质, 36(1): 66-81.
- 周晓萍, 郑常青, 徐学纯, 等, 2015. 辽宁兴城新立屯地区岩浆杂岩岩石学特征、侵位顺序及地质意义. 世界地质, (3): 571-589.