赵佳奇,宋志伟,田志远,等.辽西兴城娘娘顶地区花岗质片麻岩形成时代与变形样式.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(3):890-904. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220350.

Zhao Jiaqi, Song Zhiwei, Tian Zhiyuan, et al. Formation Age and Deformation Characteristics of Granitic Gneiss in the Niangniangding Area, Xingcheng, Western Liaoning. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2024, 54(3):890-904. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220350.

辽西兴城娘娘顶地区花岗质片麻岩形成时代与变形样式

赵佳奇[1],宋志伟[1],田志远[1],王虞舜[1],张 猛[1],杨 宁[1],梁琛岳[1,2]

1.吉林大学地球科学学院,长春 130061

2.自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室(吉林大学),长春 130061

摘要:辽西兴城地区出露的大面积花岗质岩石遭受了强烈的韧性变形改造,其独特的变形样式为研究华北克拉通东北缘中生代以来的构造演化提供了独特的视角。兴城娘娘顶地区出露的花岗质片麻岩塑性变形特征显著,矿物拉伸线理均以低角度向NNE倾伏,整体表现出上盘向SSW的逆冲型韧性剪切变形。最新的花岗质片麻岩中锆石U-Pb年代学结果显示,其原岩形成时代为(169.5±1.6)Ma,为中侏罗世。典型变形岩石的石英EBSD(电子背散射衍射)分析、流变学参数估算,指示变形岩石古差异应力值为13.8~17.7 MPa,应变速率为1.16×10^{-16}~2.20×10^{-14} s^{-1},变形温度介于350~450 ℃之间。综合研究认为该期变形为发育于中浅部地壳层次绿片岩相的缓慢变形,与晚侏罗世末期—早白垩世早期蒙古—鄂霍茨克洋俯冲闭合的远程效应和古太平洋板块俯冲作用的叠加影响有关。

关键词:辽西地区;花岗质片麻岩;锆石U-Pb年代学;EBSD;流变学参数;古太平洋板块

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220350 **中图分类号**:P548;P597 **文献标志码**:A

Formation Age and Deformation Characteristics of Granitic Gneiss in the Niangniangding Area, Xingcheng, Western Liaoning

Zhao Jiaqi[1], Song Zhiwei[1], Tian Zhiyuan[1], Wang Yushun[1], Zhang Meng[1], Yang Ning[1], Liang Chenyue[1,2]

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

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

收稿日期:2022-12-23

作者简介:赵佳奇(1998—),女,硕士研究生,主要从事构造地质学方面的研究,E-mail:jqz21@mails.jlu.edu.cn

通信作者:梁琛岳(1986—),男,教授,博士生导师,主要从事构造地质学方面的研究,E-mail:chenyueliang@jlu.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFF0800401-2);吉林大学"大学生创新创业训练计划"创新训练项目(S202210183406);吉林大学研究生创新研究计划项目(2022210)

Supported by the National Key R&D Program of China (2022YFF0800401-2), the Project of the Jilin University's "Innovation and Entrepreneurship Training Plan for College Students" Innovation Training (S202210183406) and the Graduate Innovation Fund of Jilin University (2022210)

Abstract: A large number of granitic rocks exposed in the Xingcheng area of western Liaoning have undergone strong ductile deformation, and their unique deformation patterns provide a unique perspective for unraveling the tectonic evolution of the northeastern margin of the North China craton during the Mesozoic. The granitic gneiss exposed in the Niangniangding area Xingcheng, displays significant ductile deformation characteristics, with the mineral stretching lineations consistently dipping towards NNE at low angles, indicative of top-to-SSW thrust ductile shear deformation. Zircon U－Pb dating results show that the protolith of granitic gneiss was formed at Middle Jurassic (169.5±1.6 Ma). In addition, the quartz EBSD fabric and rheological analyses indicate that the paleo-stress is 13.8－17.7 MPa, the strain rate is 1.16×10^{-16}－2.20×10^{-14} s^{-1}, and the deformation temperature is 350－450 ℃ for the deformed rocks. Comprehensive studies suggest that the observed deformation was characterized by a slow deformation process under the greenschist facies condition prevalent in the middle to shallow crust, which originated from the superposition of the closure of the Mongol-Okhotsk Ocean and the subduction of the Paleo-Pacific plate during the latest Late Jurassic to earliest Early Cretaceous.

Key words: western Liaoning; granitic gneiss; zircon U－Pb geochronology; EBSD; rheological parameters; Paleo-Pacific plate

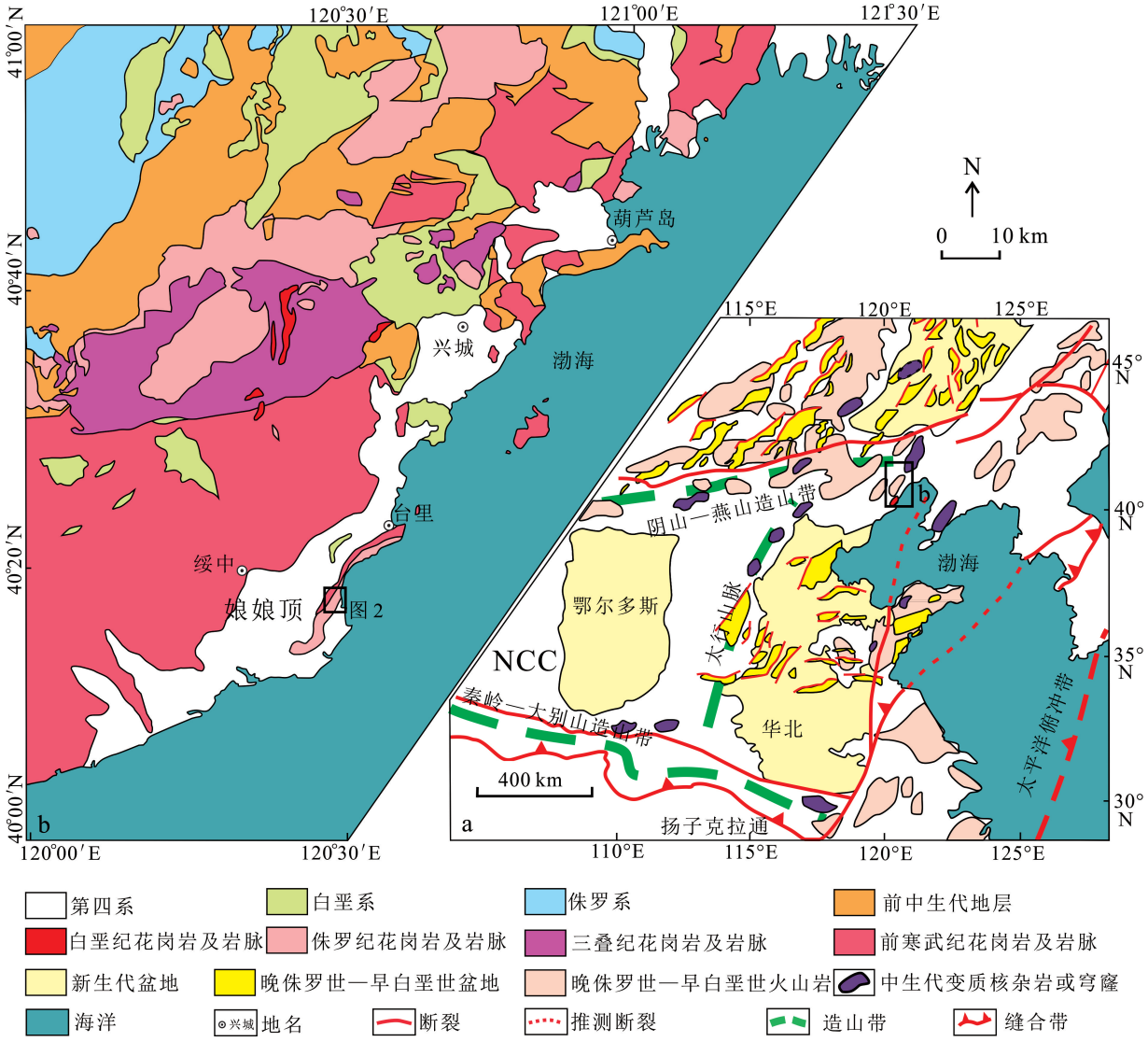
0　引言

华北克拉通具有约 38 亿年的演化历史，是世界上最古老的克拉通之一[1]。自 18.5 亿年地壳增生克拉通化之后，一直保持相对稳定，并发育巨厚的元古宇-古生界盖层[2-4]。自中生代以来，华北克拉通区域构造体制发生转变，岩石圈厚度减薄，并引发了广泛的构造-岩浆-成盆-成矿活动[5-6]。辽西兴城娘娘顶地区位于华北克拉通东北缘，燕山构造带东段，区域内出露大面积的花岗质岩石，并经历了明显的变质变形改造，早期研究将其形成时代限定为新太古代[7]。近年来，随着研究方法的不断提高，通过对该地区花岗质岩石间的接触关系、岩石学、年代学及地球化学等方面深入的研究，逐渐认识到该套花岗质岩石不能简单地归为太古宙的古老变质岩系或古老的混合花岗岩体，其中还包含不同时期的深成侵入岩[8]，以中生代岩体出露最为广泛。因此，对该套岩体的厘定、划分和变形识别，对于理解区域中生代以来的构造演化历史具有重要意义。本文通过详细的宏微观构造解析、锆石 U－Pb 年代学、流变学以及石英 EBSD 组构分析等综合方法，尝试厘定兴城娘娘顶地区花岗质岩石的形成时代和变形特征，以期为建立华北克拉通辽西地区年代学格架及探讨区域中生代以来变形过程和大地构造背景提供更多的地质证据。

1　地质背景

辽西兴城娘娘顶地区位于辽宁省西南部，辽东湾西岸。大地构造位置处于华北克拉通燕—辽构造带内，东南为渤海湾盆地，向北为内蒙地轴（图 1）[9]。太古宙是区域早期大陆型地壳形成的主要时期，基性火山岩和碎屑岩类经变质作用改造为表壳岩，随后 TTG 系列岩浆侵入深部地壳发生区域变质作用，晚期又形成大规模深成酸性侵入岩，共同组成了华北克拉通的基底岩石[10-11]。古生代期间，研究区处于稳定沉积阶段，以整体升降运动为主，构造、岩浆活动不活跃[6,12]。中生代期间，则先后经历了古亚洲洋、蒙古—鄂霍茨克洋和古太平洋等构造体系的叠加、改造，引发一系列强烈的韧脆性变形和岩浆活动，是研究区的构造活跃期（图 2）[13-14]。

辽西兴城娘娘顶地区中生代岩浆活动与其所处的构造位置和构造应力作用密切相关。华北克拉通、扬子克拉通和西伯利亚克拉通于印支期发生碰撞，区域内发育大量的近东西向褶皱、断裂构造。随后被燕山期构造运动叠加，先后形成了一系列褶皱-逆冲系统及走向为北东－北北东的韧性剪切带[15-18]。兴城娘娘顶地区的基底岩石为新太古代绥中花岗岩，这些岩石被后期大规模的中生代花岗岩侵入，随后部分花岗岩遭受强烈的韧性变形，但变形特征与台里、瓦子峪、医巫闾山等韧性剪切带或变形带存在显著差异（图 2a）[17-18]。为进一步确定兴城娘娘顶地区中生代花岗质片麻岩的变形机制和形成时代，本文选取典型剖面进行详细的变形模式分析和年代学分析。



据文献[9]修编。

图1 辽西兴城娘娘顶地区大地构造位置图(a)及周缘地质简图(b)

Fig.1 Simplified geological map (a) and surrounding area (b) of the Niangniangding area, Xingcheng, western Liaoning

2 宏微观构造特征

2.1 宏观构造特征

辽西兴城娘娘顶变形带位于台里韧性剪切带的西南部,据1∶20万地质图[9],区域主要由新太古代绥中花岗岩(花岗质片麻岩、黑云斜长片麻岩)和中生代(侏罗纪和白垩纪)侵入岩组成(图2a)。多数侏罗纪花岗岩受构造作用影响发生了不同程度的韧性变形,形成了大量花岗质片麻岩和片麻状花岗岩,但在部分晚期侵位(白垩纪)花岗岩中未见明显变形。为了进一步探究本区侏罗纪岩石变形特征,本文选取典型剖面进行详细的构造解析。剖面近东西向,全长约2 km,主要由侏罗纪花岗质片麻岩、片麻状花岗岩和晚期侵位(白垩纪)中粗粒花岗岩组成。剖面整体表现出中心变形弱,两侧变形强的特点,局部变形强度也有差异(图2b)。侏罗纪岩石韧性变形强烈,强变形岩石中由浅色长英质矿物和暗色黑云母构成的糜棱面理或片麻理发育良好,总体延伸稳定,局部有弯曲现象。在片理面上可观察到较为明显的矿物拉伸线理(图3a、b),主要由拉长的石英集合体、长石碎斑和云母矿物组成。在剖面西部,岩石片麻理倾向为NW(297°～320°),倾角介于22°～36°之间。而剖面东部,岩石片麻理产状转变为低角度向NNE倾斜(16°～33°∠19°～22°)。

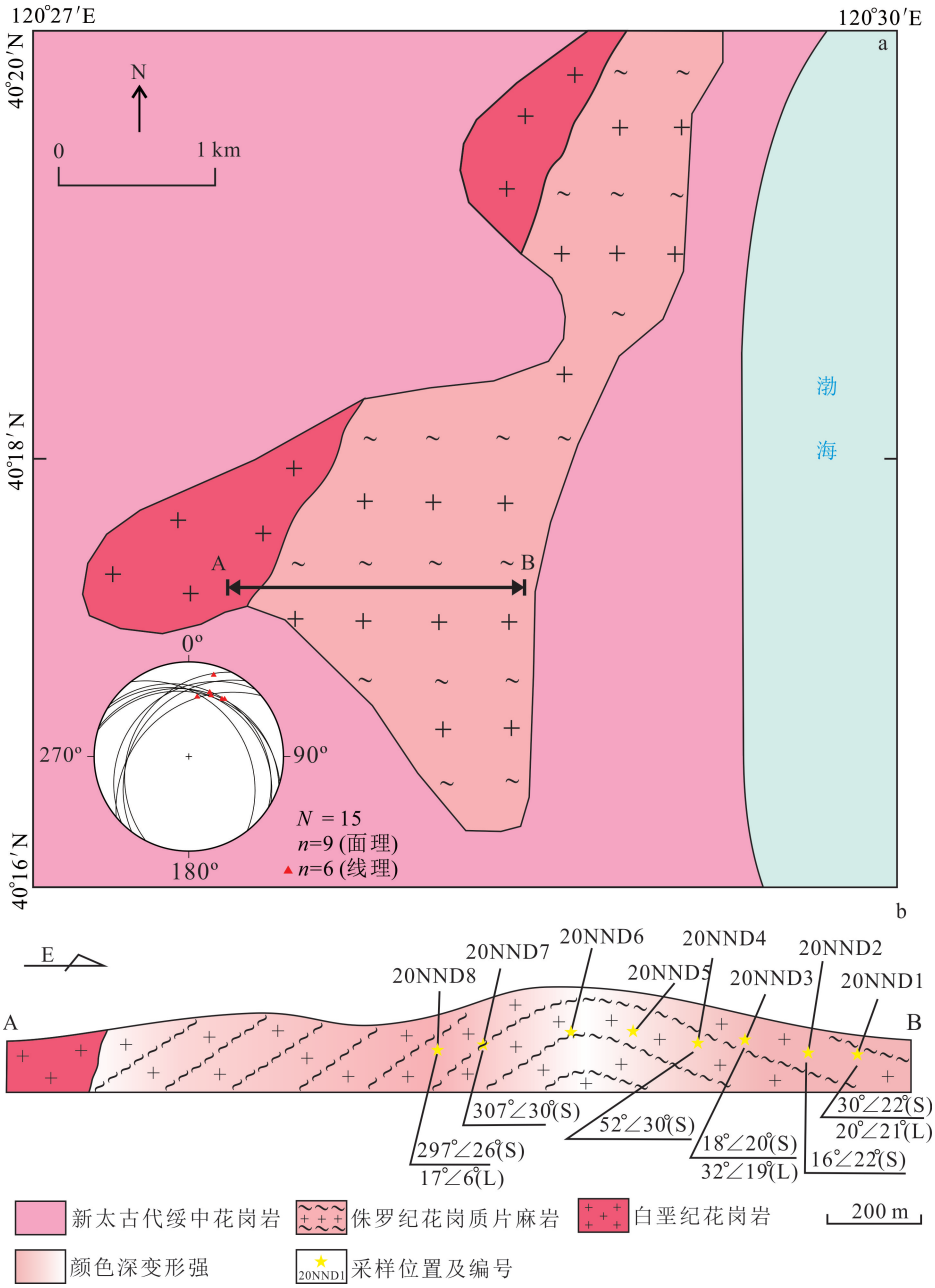


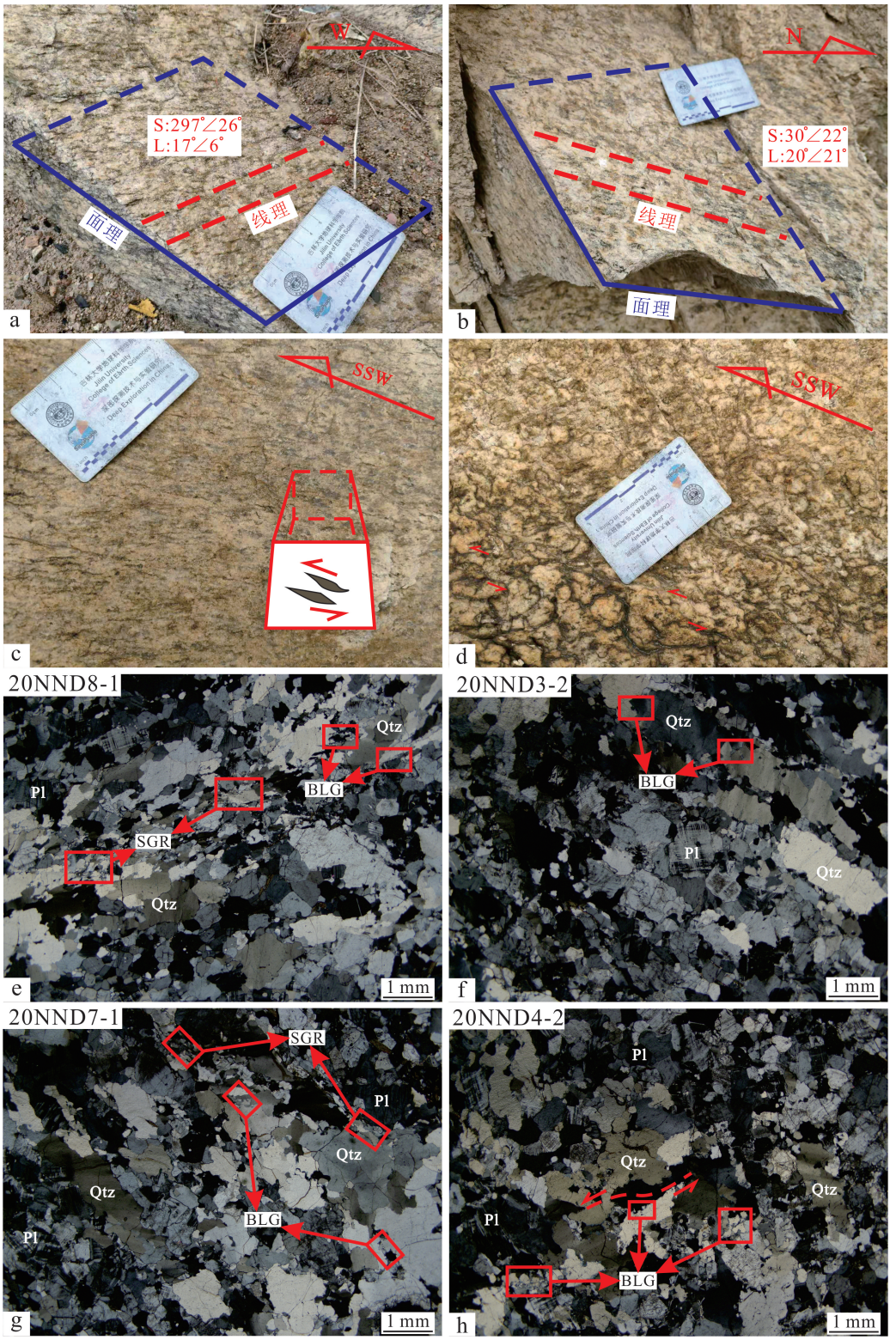
图 2　辽西兴城娘娘顶地区变形带构造图(a)及剖面图(b)

Fig.2　Geological map (a) and cross-section (b) of the deformation zone in the Niangniangding area, Xingcheng, western Liaoning

虽然变形带内片麻理产状存在差异，但侏罗纪花岗质片麻岩发育有一致的矿物拉伸线理，线理均向 NNE 倾伏，倾伏角较缓，6°～25°。沿矿物拉伸线理，可见眼球状构造等运动学标志(图 3c、d)。总体来看，区域内侏罗纪花岗质片麻岩应为一期构造变形的产物，表现为上盘向 SSW 的逆冲型韧性剪切变形。

2.2　显微构造特征

本文选择兴城娘娘顶地区侏罗纪花岗质片麻岩作为研究对象。该岩石为中细粒变晶结构，片麻状或弱片麻状构造，主要由石英(30%～40%)、长石(45%～55%)、云母(5%～10%)、石榴子石(0～5%)组成，受后期构造运动改造，岩石中各矿物组分发生了不同程度的韧脆性变形。石英以中低温韧性变形为主，出现波状消光、不均匀消光、亚颗粒和变形纹(图 3e—h)。部分颗粒发生动态重结晶，形成多晶条带，条带内的单个石英颗粒具有不规则或锯齿状的颗粒边界，并表现出定向特征(图 3f、g)。总体来看，石英的变形机制以膨凸式动态重结晶为主，



a、b. 糜棱面理/片麻理和矿物拉伸线理;c、d. 眼球状构造;e—h. 石英动态重结晶和长石脆性变形。Qtz. 石英;Pl. 斜长石;BLG. 膨凸式重结晶;SGR. 亚颗粒旋转重结晶。

图3 辽西兴城娘娘顶地区花岗质片麻岩宏微观变形特征

Fig.3 Some representativemacro-and-micro deformation structures of granitic gneiss from the Niangniangding area, Xingcheng, western Liaoning

亚颗粒旋转重结晶次之(图 3e、g)。长石主要为斜长石和正长石，均以脆性变形为主，韧性变形特征较弱，少量长石被拉长呈眼球状或透镜状，边部发育少量亚颗粒，压力影指示 SSW 向剪切变形(图 3h)。大部分长石表现出机械双晶和显微破裂，并保留残斑特征；部分长石蚀变成绢云母或白云母。侏罗纪花岗质片麻岩的显微组构指示岩石变形发生于地壳浅部的绿片岩相条件下[19]，属于中低温变形，变形温度为 350～450 ℃。

3　锆石 U－Pb 年代学

本文选取 1 件花岗质片麻岩(20NND1－1)样品进行 LA－ICP－MS 锆石 U－Pb 年代学分析。锆石单矿物分选和样品靶制备由北京锆年领航科技有限公司完成。LA－ICP－MS 锆石 U－Pb 年代学测试在吉林大学自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室完成。激光剥蚀使用德国相干公司(Coherent)COMPExPro 型 ArF 准分子激光器，质谱仪为美国安捷伦公司 7900A 型四极杆等离子质谱。具体操作流程见文献[20]。使用 Glitter 软件对原始数据进行处理。年龄计算及图像绘制采用 ISOPLOT(Version 3.0)程序[21]，数据结果和锆石 U－Pb 谐和图误差为 2σ，置信度为 95%(表 1)。测试结果见表 1，部分锆石颗粒的阴极发光图像如图 4a 所示。

选取的花岗质片麻岩位于剖面东部，所有锆石颗粒均呈自形—半自形长柱状，长宽比介于 1.5∶1～2.0∶1 之间，大小为 150～200 μm，部分锆石颗粒可能受热液作用的影响表面呈溶蚀状，绝大多数锆石发育有典型的岩浆生长环带，结合其较高的 Th/U 值(0.11～1.14)，暗示锆石为岩浆成因。样品 20NND1－1 共有 25 个分析点，位于谐和线上或附近(图 4b)，$^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为(169.5±1.6) Ma(MSWD＝0.44，n＝25)(图 4b、c)，代表了花岗质片麻岩原岩的结晶年龄，即中侏罗世。

4　石英 C 轴 EBSD 组构分析

EBSD 组构分析是根据矿物的电子背散射衍射图像来确定矿物的晶轴方位，从而确定矿物颗粒的排列取向[22]。通常矿物颗粒在不同温度与应力作用下会表现出不同的变形模式。其中，石英变形中的滑移系主要受变形温度的控制，通过对石英组构图的测定可有效估算变形温度和识别滑移系。本次石英 C 轴 EBSD 组构分析在吉林大学自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室完成。具体实验流程及相关参数见文献[18]。

选择 8 件强变形花岗质片麻岩进行石英 C 轴 EBSD 组构分析。采样位置如图 2b 所示。测试样品变形明显，可见膨凸式重结晶和亚颗粒旋转重结晶现象，残斑与基质界限清晰。所选扫描区域变形石英颗粒丰富，测试结果见图 5。

在石英 C 轴 EBSD 组构图中，8 件测试样品表现出相似的特征，均具有一个石英点极密位于 y 轴和 z 轴之间，显示石英主要发生菱面<a>滑移，以中低温菱面组构为主，暗示变形发生于绿片岩相条件，变形温度为 350～450 ℃(图 5 中 $m.u.d.$指示极点的密度)。此外，样品晶格优选区域的分布连线与中心轴呈向 SSW 倾斜的趋势，指示变形以 SSW 向剪切为主。由于石英 C 轴组构对温度变化较为敏锐，样品 20NND3－1、20NND7－1、20NND8－1 除 1 个靠近 y 轴与 z 轴的主极密外，还存在 1 个靠近 Z 轴的次极密，这可能是受到重结晶石英颗粒在边界发生二次重结晶的影响，或者记录的是递进变形过程中晚期变形的温度。

5　流变学参数估算

5.1　古差异应力

研究表明，在稳态流动条件下，矿物晶体中的显微构造特征，如位错密度、亚晶粒大小、重结晶颗粒大小与古差异应力呈线性关系，而与温度、压力等因素关系不大[19]。因此可以通过测量动态重结晶石英新晶粒粒径估算古差异应力值，两者之间的函数关系为

$$\sigma = (D/b)^{1/R}。\tag{1}$$

式中：σ 为差异应力(MPa)；b 为实验参数(μm·MPa^{-R})；D 为动态重结晶石英新晶粒径(μm)；R 为实验参数。

不同的学者基于不同的实验条件与侧重点，给出了不同的实验参数[23-26]。由于早期的应力计是在低精度的实验数据基础上获得的，它跨越了位错蠕变和扩散蠕变的范围，精度不高。而 Stipp 等[25]系统整理了高精度的石英实验数据，对石英应力计进行了修正，实验参数更加可靠。因此，本次研究采用 Stipp 等[25]的实验参数，估算娘娘顶地区花岗质片麻岩的古差异应力。通过石英 EBSD 组构分析可知，石英动态重结晶新晶粒径为 97.0～116.2 μm，得

表 1 辽西兴城娘娘顶地区中侏罗世花岗质片麻岩(20NND1-1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of the Middle Jurassic granitic gneiss from Niangniangding area, Xingcheng, western Liaoning

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Th	U		$^{207}Pb/^{206}Pb$	2σ	$^{207}Pb/^{235}U$	2σ	$^{206}Pb/^{238}U$	2σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	2σ	$^{207}Pb/^{235}U$	2σ	$^{206}Pb/^{238}U$	2σ
1	3 196	4 728	0.68	0.061 18	0.001 52	0.226 32	0.005 67	0.026 83	0.000 56	646	24	207	5	171	4
2	190	538	0.35	0.049 26	0.002 13	0.179 86	0.007 66	0.026 48	0.000 60	160	58	168	7	168	4
3	1 048	1 066	0.98	0.067 05	0.003 86	0.249 77	0.013 90	0.027 02	0.000 70	421	279	187	20	169	5
4	1 861	5 359	0.35	0.054 05	0.001 25	0.202 10	0.004 76	0.027 12	0.000 56	142	109	169	7	171	4
5	447	3 988	0.11	0.060 05	0.001 75	0.222 21	0.006 43	0.026 84	0.000 58	303	101	178	6	169	4
6	1 893	4 720	0.40	0.057 21	0.001 45	0.213 09	0.005 45	0.027 01	0.000 57	189	124	171	8	170	4
7	2 324	6 188	0.38	0.069 05	0.001 75	0.255 46	0.006 51	0.026 83	0.000 57	474	120	190	8	168	4
8	3 191	2 800	1.14	0.051 81	0.001 37	0.190 80	0.005 05	0.026 71	0.000 56	277	28	177	4	170	4
9	1 130	3 382	0.33	0.070 60	0.001 81	0.259 32	0.006 68	0.026 64	0.000 56	832	94	222	8	169	4
10	1 856	4 105	0.45	0.059 73	0.001 98	0.218 70	0.007 18	0.026 56	0.000 58	594	36	201	6	169	4
11	3 696	7 226	0.51	0.051 35	0.001 50	0.193 97	0.005 64	0.027 40	0.000 58	257	32	180	5	174	4
12	1 364	3 203	0.43	0.057 52	0.002 25	0.212 83	0.008 19	0.026 84	0.000 61	512	46	196	7	171	4
13	1 823	3 536	0.52	0.061 55	0.001 78	0.227 44	0.006 55	0.026 80	0.000 58	659	29	208	5	170	4
14	530	803	0.66	0.061 12	0.002 63	0.224 94	0.009 46	0.026 69	0.000 62	227	196	172	13	168	4
15	3 450	6 311	0.55	0.090 36	0.003 01	0.336 35	0.010 94	0.027 00	0.000 61	607	179	198	14	165	4
16	2 090	5 704	0.37	0.051 48	0.001 27	0.194 29	0.004 84	0.027 37	0.000 57	141	110	171	7	173	4
17	321	1 573	0.20	0.050 43	0.001 61	0.185 30	0.005 90	0.026 65	0.000 58	215	37	173	5	170	4
18	1 120	5 743	0.19	0.055 64	0.002 18	0.208 64	0.008 02	0.027 19	0.000 61	127	127	168	8	171	4
19	1 082	2 673	0.40	0.073 48	0.002 49	0.268 55	0.008 95	0.026 51	0.000 59	556	144	194	11	166	4
20	1 053	3 310	0.32	0.058 88	0.001 77	0.225 41	0.006 75	0.027 77	0.000 60	289	125	183	8	175	4
21	2 816	4 098	0.68	0.065 55	0.001 89	0.241 73	0.006 92	0.026 75	0.000 58	792	28	220	6	170	4
22	1 083	4 917	0.22	0.069 97	0.001 80	0.254 00	0.006 56	0.026 33	0.000 56	713	91	208	7	166	4
23	1 249	5 630	0.22	0.075 49	0.001 84	0.273 46	0.006 72	0.026 27	0.000 55	757	91	210	7	165	3
24	286	573	0.50	0.052 94	0.003 80	0.198 94	0.013 90	0.027 26	0.000 75	326	109	184	12	173	5
25	1 636	4 712	0.35	0.070 68	0.001 95	0.259 68	0.007 15	0.026 65	0.000 57	948	26	234	6	170	4

到古差异应力值介于 13.8～17.7 MPa 之间(表 2)， 异应力值下限。
这至少代表了辽西兴城娘娘顶地区变形岩石的古差

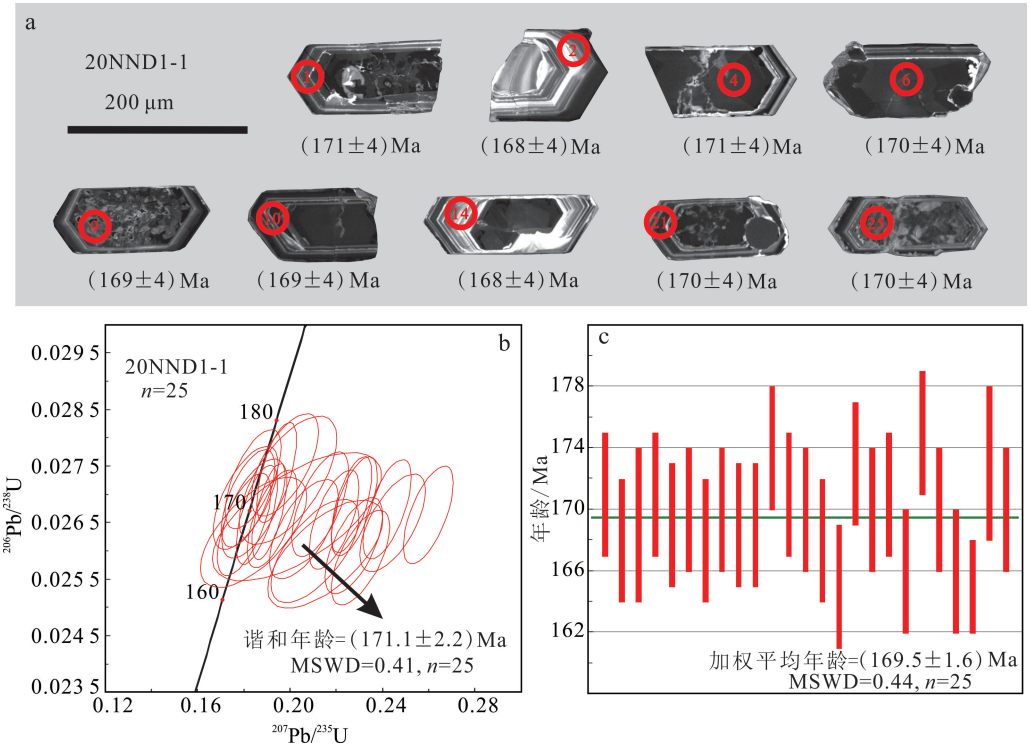


图 4　辽西兴城娘娘顶地区中侏罗世花岗质片麻岩代表性锆石阴极发光图像(a)、谐和年龄图(b)及加权平均年龄图(c)

Fig.4　Typical zircon CL images (a), U－Pb concordia diagrams (b) and weighted average age plot (c) of the Middle Jurassic granitic gneiss from Niangniangding area, Xingcheng, western Liaoning

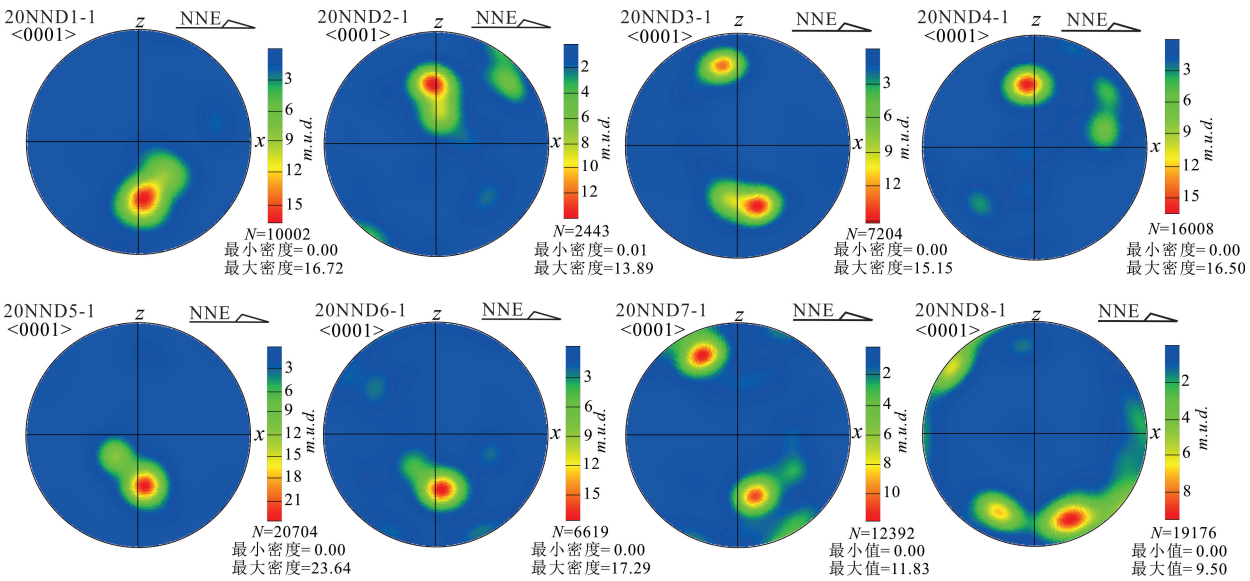


图 5　辽西兴城娘娘顶地区花岗质片麻岩石英 C 轴 EBSD 组构图

Fig.5　C－axis pole figures of recrystallized quartz grains measured by EBSD from the granitic gneiss from Niangniangding area, Xingcheng, western Liaoning

表2 辽西兴城娘娘顶地区中侏罗世花岗质片麻岩中石英动态重结晶颗粒的古差异应力

Table 2 Paleopiezometry data for quartz dynamically recrystallized grains in the Middle Jurassic granitic gneisses from Niangniangding area, Xingcheng, western Liaoning

样品号	颗粒平均粒径/μm	古差异应力/MPa			
		Twiss[24]	Koch[23]	Mercier 等[26]	Stipp 等[25]
		$b=1.45\times10^4$, $R=-1.47$	$b=4.07\times10^3$, $R=-1.4$	$b=4.9\times10^2$, $R=-0.59$	$b=3631$, $R=-1.26$
20NND1-1	112.9	27.2	12.0	12.9	15.7
20NND2-1	116.2	26.7	11.5	12.7	15.4
20NND3-1	101.8	29.2	14.3	13.9	17.1
20NND4-1	97.0	30.1	15.6	14.4	17.7
20NND5-1	122.0	25.8	10.5	12.2	14.8
20NND6-1	132.9	24.3	9.1	11.5	13.8
20NND7-1	103.0	29.0	14.1	13.8	16.9
20NND8-1	116.2	26.7	11.5	12.7	15.4

5.2 应变速率

在韧性剪切带研究中,应变速率估算是解读变形过程的有效手段。通常采用变形岩石中石英的高温流变率推断应变速率,其表达式为

$$\varepsilon=A\sigma^n d^{-m}\exp(-Q/RT)。\quad(2)$$

式中:ε 为应变速率(s^{-1});σ 为差异应力(MPa);Q 为活化能($J\cdot mol^{-1}$);T 为温度(K);R 为理想气体常数;d 为矿物粒径(μm);A、n、m 为实验参数。对于石英而言,当 $n>2.0$ 时,$m=0$;当 $n<1.5$ 时,$m=2$[27-28]。采用不同学者给定的实验参数[29-33],结合显微构造特征以及石英 EBSD 组构图的指示,推算花岗质片麻岩变形温度介于 350~450 ℃之间,计算应变速率结果如表3所示。

采用不同学者的研究方法得到的应变速率表现

表3 不同方法估算的辽西兴城娘娘顶地区中侏罗世花岗质片麻岩的应变速率

Table 3 Estimation of strain rate by different methods in the Middle Jurassic granitic gneisses from Niangniangding area, Xingcheng, western Liaoning

样品号	σ/MPa	T/℃	ε/s^{-1}					
	Stipp 等[25]		Parrish 等[31]	Koch 等[29]	Koch[23]	Kronenberg 等[30]	Paterson 等[32]	Hirth 等[33]
20NND1-1	15.7	350	1.33×10^{-18}	2.38×10^{-16}	5.55×10^{-16}	6.21×10^{-14}	7.32×10^{-16}	6.67×10^{-19}
		450	6.22×10^{-16}	1.13×10^{-14}	1.96×10^{-14}	2.20×10^{-12}	2.66×10^{-14}	2.42×10^{-17}
20NND2-1	15.4	350	1.17×10^{-18}	2.10×10^{-16}	4.87×10^{-16}	5.48×10^{-14}	6.30×10^{-16}	5.49×10^{-19}
		450	5.48×10^{-16}	9.97×10^{-15}	1.72×10^{-14}	1.94×10^{-12}	2.29×10^{-14}	2.00×10^{-17}
20NND3-1	17.1	350	2.10×10^{-18}	3.76×10^{-16}	8.91×10^{-16}	9.81×10^{-14}	1.26×10^{-15}	1.34×10^{-18}
		450	9.81×10^{-16}	1.78×10^{-14}	3.15×10^{-14}	3.47×10^{-12}	4.58×10^{-14}	4.88×10^{-17}
20NND4-1	17.7	350	2.60×10^{-18}	4.65×10^{-16}	1.11×10^{-15}	1.21×10^{-13}	1.62×10^{-15}	1.86×10^{-18}
		450	1.21×10^{-15}	2.20×10^{-14}	3.92×10^{-14}	4.28×10^{-12}	5.89×10^{-14}	6.76×10^{-17}
20NND5-1	14.8	350	9.45×10^{-19}	1.69×10^{-16}	3.88×10^{-16}	4.41×10^{-14}	4.86×10^{-16}	3.93×10^{-19}
		450	4.41×10^{-16}	8.02×10^{-15}	1.37×10^{-14}	1.56×10^{-12}	1.76×10^{-14}	1.43×10^{-17}
20NND6-1	13.8	350	6.48×10^{-19}	1.16×10^{-16}	2.63×10^{-16}	3.02×10^{-14}	3.10×10^{-16}	2.20×10^{-19}
		450	3.03×10^{-16}	5.50×10^{-15}	9.29×10^{-15}	1.07×10^{-12}	1.13×10^{-14}	7.99×10^{-18}
20NND7-1	16.9	350	2.00×10^{-18}	3.58×10^{-16}	8.46×10^{-16}	9.33×10^{-14}	1.19×10^{-15}	1.25×10^{-18}
		450	9.33×10^{-16}	1.70×10^{-14}	2.99×10^{-14}	3.30×10^{-12}	4.31×10^{-14}	4.52×10^{-17}
20NND8-1	15.4	350	1.17×10^{-18}	2.10×10^{-16}	4.87×10^{-16}	5.48×10^{-14}	6.29×10^{-16}	5.49×10^{-19}
		450	5.48×10^{-16}	9.96×10^{-15}	1.72×10^{-14}	1.94×10^{-12}	2.29×10^{-14}	1.99×10^{-17}

出明显差异，应变速率具有不同数级，分别为：$6.48\times10^{-19}\sim1.21\times10^{-15}$ s^{-1}[31]；$1.16\times10^{-16}\sim2.20\times10^{-14}$ s^{-1}[29]；$2.63\times10^{-16}\sim3.92\times10^{-14}$ s^{-1}[23]；$3.02\times10^{-14}\sim4.28\times10^{-12}$ s^{-1}[30]；$3.10\times10^{-16}\sim5.89\times10^{-14}$ s^{-1}[32]；$2.20\times10^{-19}\sim6.76\times10^{-17}$ s^{-1}[33]。考虑到韧性变形过程的缓慢性以及变形过程中可能有流体的参与，对于花岗质片麻岩变形的应变速率，本文采用 Koch 等[29]的实验参数计算的结果。

6　讨论

6.1　变形特征与变形温度

辽西兴城娘娘顶地区出露的岩石类型主要有新太古代绥中花岗岩、中侏罗世花岗质片麻岩和白垩纪未变形花岗岩。中生代花岗质岩石和新太古代绥中花岗岩呈侵入接触关系。中侏罗世花岗质片麻岩韧性变形十分强烈，糜棱面理、片麻理、矿物拉伸线理以及眼球状构造等构造形迹发育良好，指示岩石主要遭受一期变形事件，以上盘向 SSW 的逆冲型韧性剪切变形为主。显微镜下，石英颗粒广泛发生动态重结晶，颗粒边界不规则或呈锯齿状，变形机制以膨凸式重结晶为主，亚颗粒旋转重结晶次之。长石颗粒以脆性变形为主，部分长石颗粒被拉长呈透镜状，保留有残斑特征，压力影指示 SSW 向韧性剪切变形，这与宏观构造形迹指示一致。总体来看，石英和长石显微变形行为主要为发生于绿片岩相条件下的中低温变形。在石英 C 轴 EBSD 组构分析中可得到相似的结论，EBSD 组构图中普遍具有一个石英点极密，暗示中侏罗世花岗质片麻岩主要受一次变形事件的影响。点极密位于组构图 y 轴和 z 轴之间，显示菱面＜a＞滑移被激活，变形温度为 350～450 ℃。此外，样品晶格优选区域的分布连线与中心轴呈向 SSW 倾斜的趋势，指示变形以 SSW 向剪切为主，这与宏微观构造特征指示的结果相一致。

在流变学方面，利用动态重结晶石英粒径估算兴城娘娘顶地区中侏罗世花岗质片麻岩古差异应力值介于 13.8～17.7 MPa 之间。通过石英的高温流变率得到花岗质片麻岩的应变速率为 $1.16\times10^{-16}\sim2.20\times10^{-14}$ s^{-1}，与世界上大多数韧性剪切带的应变速率（$10^{-14}\sim10^{-13}$ s^{-1}）基本一致，总体反映出低应变速率的缓慢变形。本次研究构建了辽西兴城娘娘顶变形带不同位置花岗质片麻岩应变速率和古差异应力值的变化趋势图（图 6）。不论是应变速率，还是古差异应力，变形带均表现出两侧岩石相对强于中心岩石的特点（图 6），这为野外实际观察中变形带出现两侧岩石变形强、中心岩石变形弱提供了证据。

综上所述，辽西兴城娘娘顶地区主要遭受一期变形事件的影响，以上盘向 SSW 的逆冲型韧性剪切变形为主，变形发生于地壳中浅层次的绿片岩相条件，为中低温缓慢变形，变形温度介于 350～450 ℃之间。

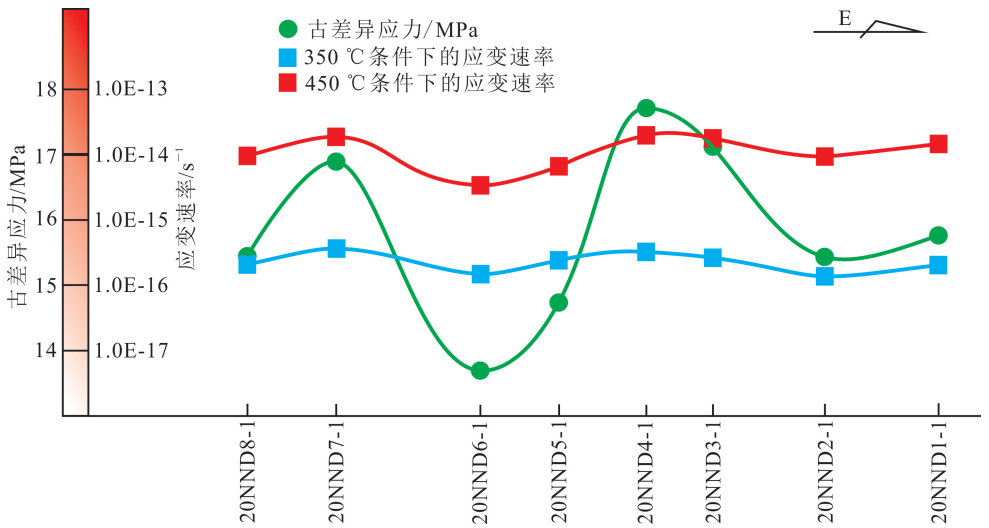


图 6　辽西兴城娘娘顶地区中侏罗世花岗质片麻岩的古差异应力值和应变速率变化趋势图

Fig. 6　Trend graph of paleopiezometry and strain rate in the Middle Jurassic granitic gneisses from Niangniangding area, Xingcheng, western Liaoning

6.2 形成时代与地质意义

自显生宙以来,华北克拉通先后受到了古亚洲洋、蒙古—鄂霍茨克洋及古太平洋等构造体系相互作用的影响,在华北北缘燕山—辽西地区形成了大规模的岩浆岩及褶皱、断裂构造,并具有多期构造-岩浆活动叠加的特点[34]。本次通过详细的野外地质考察和锆石U-Pb年代学分析发现:辽西兴城娘娘顶地区发育两套不同时期的花岗质片麻岩,大部分片麻岩形成于新太古代,为区域内基底岩石,其余花岗质片麻岩形成于中生代,与新太古代花岗质片麻岩呈侵入接触关系;其中对1件中生代花岗质片麻岩样品进行了锆石U-Pb年代学分析,样品中锆石颗粒发育有明显的岩浆振荡环带,Th/U值较高,暗示锆石为岩浆成因锆石。因此,经原位U-Pb同位素测试分析得到的加权平均年龄即为花岗质片麻岩的原岩结晶年龄,其结果显示兴城娘娘顶变形带中生代花岗质片麻岩原岩形成于(169.5±1.6)Ma,即中侏罗世。

侏罗纪是华北克拉通构造转换的关键时期[35-36],岩浆活动频繁。零星分布的北京西山南大岭组中基性火山岩(174 Ma)、辽西北票地区发育的海房沟组中性火山岩(183~173 Ma)、冀东地区发育的花岗质岩体(173~167 Ma)[37]以及辽东地区出露的黑云二长花岗岩(182~163 Ma)[38]均为这一时代岩浆活动的产物,可能与古太平洋板块的俯冲作用相关。

兴城娘娘顶地区中侏罗世花岗质片麻岩形成之后遭受一期明显的变形事件,岩石变形样式不同于邻区台里韧性剪切带,同时,兴城娘娘顶变形带花岗质片麻岩中发育的片麻理也存在一定差异,这可能与二者所处大地构造位置有关(图7)。兴城娘娘顶变形带整体表现为上盘向SSW的逆冲型韧性剪切变形,该期变形在晚侏罗世医巫闾山岩体(163~153 Ma)中亦有响应[13, 39]。医巫闾山岩体和石山岩体北侧发育有走向近NW、倾向NE且上盘向SW逆冲的叶理[39]。区域上,阴山褶皱带及燕山—辽西地区发育有数条褶皱-逆冲系统,例如承德褶皱-逆冲构造[15]、四合堂逆冲型韧性剪切带(140~137 Ma)[40]以及辽西朝阳晚侏罗世逆冲断裂[41],均记录了晚侏罗世—早白垩世早期的NNE—SSW向挤压事件。同时,北京西山、冀北、辽西等地的上侏罗统与下白垩统之间的角度不整合亦为该期挤压逆冲事件的沉积构造响应[42]。依据1∶20万地质图[9],兴城娘娘顶地区存在后期侵位的白垩纪花岗岩,并且花岗岩未发生明显的韧性变形。此外,邻区台里韧性剪切带和瓦子峪变质核杂岩等伸展构造主要发育于早白垩世中晚期(136~100 Ma)[17,43]。综合研究认为兴城娘娘顶地区中侏罗世花岗质岩石的变形时代为晚侏罗世末期—早白垩世早期。

晚侏罗世末期—早白垩世早期,华北克拉通东部燕山运动B幕爆发[42,44],引发了区域上晚中生代以来最强烈的一期近N—S向或NNE—SSW向挤压变形[45]。大量研究[46]表明古太平洋板片以低角度向NNW高速斜向俯冲是区域内挤压构造的主要动力源。此外,众多学者[47-48]揭示中亚造山带内蒙古—鄂霍茨克洋在晚侏罗世仍未闭合[49-50],最终闭合时间可追溯至早白垩世早期。蒙古—鄂霍茨克洋南向俯冲闭合产生的挤压作用可能是华北克拉通北缘挤压构造变形的另一诱因。因此,本文认为辽西兴城娘娘顶地区复杂的变形样式是晚侏罗世末期—早白垩世早期蒙古—鄂霍茨克洋俯冲闭合的远程效应及古太平洋板块俯冲作用共同导致的结果(图7)。

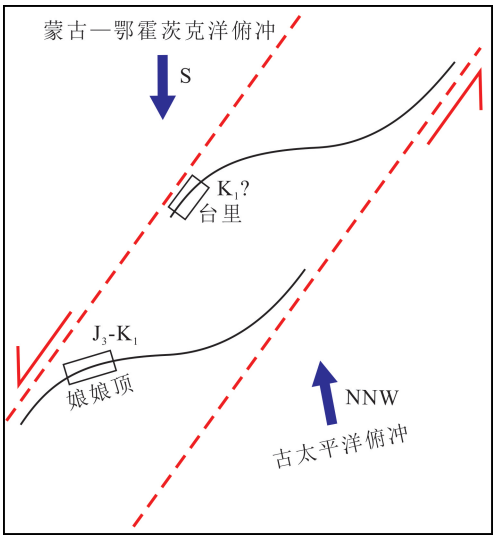


图7 辽西兴城娘娘顶地区片麻理可能的成因示意图

Fig.7 Schematic diagram of possible causes of gneissosity developed in the Niangniangding area, Xingcheng, western Liaoning

7 结论

基于对辽西兴城娘娘顶地区中侏罗世花岗质片麻岩宏微观构造特征、锆石U-Pb年代学、石英

EBSD 组构及流变学的研究，得出如下主要结论：

1）最新花岗质片麻岩中锆石 U－Pb 年代学结果表明，辽西兴城娘娘顶地区除新太古代绥中花岗岩外，还发育大规模后期侵位的花岗质片麻岩，其原岩结晶年龄为(169.5 ± 1.6)Ma。

2）中侏罗世花岗质岩石主要遭受一期变形事件，表现为上盘向 SSW 的逆冲型韧性剪切变形。该期变形属于中低温缓慢变形，温度介于 350～450 ℃之间。

3）中侏罗世花岗质片麻岩原岩的形成可能与古太平洋板块的俯冲作用有关。晚侏罗世末期—早白垩世早期受蒙古—茨克洋俯冲闭合的远程效应及古太平洋板块俯冲作用的叠加影响，区域内中侏罗世花岗岩被改造，形成了现今的构造变形样式。

致谢：吉林大学自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室老师在锆石 U－Pb 测试方面给予了支持，李伟民教授和李刚副教授对本文提出了宝贵的意见，在此表示感谢！

参考文献(References)：

[1] Zhao G C，Cawood P A，Li S，et al. Amalgamation of the North China Craton：Key Issues and Discussion [J]. Precambrian Research，2012，222：55－76.

[2] 耿元生，沈其韩，任留东. 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[J]. 岩石学报，2010，26(7)：1945－1966.
Geng Yuansheng，Shen Qihan，Ren Liudong. Late Neoarchean to Early Paleoproterozoic Magmatic Events and Tectonothermal Systems in the North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica，2010，26(7)：1945－1966.

[3] 翟明国.华北克拉通的形成以及早期板块构造[J]. 地质学报，2012，86(9)：1335－1349.
Zhai Mingguo. Evolution of the North China Craton and Early Plate Tectonics[J]. Acta Geologica Sinica，2012，86(9)：1335－1349.

[4] 石强，李晨，周煜欣，等. 华北克拉通北缘孔兹岩带两期深熔石榴花岗岩地球化学特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2023，53(4)：1090－1116.
Shi Qiang，Li Chen，Zhou Yuxin，et al. Geochemistry and Geological Significance of the Two Episodes of Anatectic Garnet Granites in the Khondalite Belt，Northern Margin of the North China Craton [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition)，2023，53(4)：1090－1116.

[5] Yang J H，Wu F Y，Wilde S A. A Review of the Geodynamic Setting of Large-Scale Late Mesozoic Gold Mineralization in the North China Craton：An Association with Lithospheric Thinning [J]. Ore Geology Reviews，2003，23(3/4)：125－152.

[6] Song Z W，Zheng C Q，Liang C Y，et al. Identification and Geological Significance of Early Jurassic Adakitic Volcanic Rocks in Xintaimen Area，Western Liaoning [J]. Minerals，2021，11(3)：331.

[7] 李健. 辽西台里地区花岗质岩石特征及其地质意义[D]. 长春：吉林大学，2009.
Li Jian. Characteristics of Granitic Rocks and Its Geological Significance in Taili Area of Western Liaoning Province[D]. Changchun：Jilin University，2009.

[8] 刘庆，刘永江，李伟民，等. 辽西兴城-台里韧性剪切带北段变形特征[J]. 世界地质，2018，37(2)：478－490.
Liu Qing，Liu Yongjiang，Li Weimin，et al. Deformation Characteristics of Northern Part of Xingcheng-Taili Ductile Shear Zone，Western Liaoning [J]. Global Geology，2018，37(2)：478－490.

[9] 辽宁省地质矿产局. 辽宁省区域地质志[M]. 北京：地质出版社，1989：438－460.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Liaoning Province. Regional Geology of Liaoning Province[M]. Beijing：Geological Publishing House，1989：438－460.

[10] 尹志刚，李萌萌，吴子杰，等. 辽宁本溪地区新太古代晚期钾质花岗岩的发现及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2024，54(1)：125－139.
Yin Zhigang，Li Mengmeng，Wu Zijie，et al. The Discovery and Geological Implications of Late Neoarchean Kaligranites in Benxi Area，Liaoning Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition)，2024，54(1)：125－139.

[11] 吴福元，杨进辉，张艳斌，等. 辽西东南部中生代花岗岩时代[J].岩石学报，2006，22(2)：315－325.
Wu Fuyuan，Yang Jinhui，Zhang Yanbin，et al. Emplacement Ages of the Mesozoic Granites in Southeastern Part of the Western Liaoning Province [J]. Acta Petrologica Sinica，2006，22(2)：315－325.

[12] 崔芳华，徐学纯，郑常青，等. 华北克拉通东部古太平洋板块俯冲与回撤作用：来自辽西兴城地区晚中生代花岗质岩石的记录与启示[J]. 岩石学报，2020，36(8)：2463－2492.
Cui Fanghua，Xu Xuechun，Zheng Changqing，et al.

The Paleo-Pacific Plate Subduction and Slab Roll-Back Beneath Eastern North China Craton: Insights from the Late Mesozoic Granitoids in Xingcheng Area, Western Liaoning Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(8): 2463-2492.

[13] Meng Q R. What Drove Late Mesozoic Extension of the Northern China-Mongolia Tract? [J]. Tectonophysics, 2003, 369(3/4): 155-174.

[14] Dai L M, Li S Z, Li Z H, et al. Dynamics of Exhumation and Deformation of HP-UHP Orogens in Double Subduction-Collision Systems: Numerical Modeling and Implications for the Western Dabie Orogen[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 182: 68-84.

[15] 张长厚,吴淦国,王根厚,等. 冀东地区燕山中段北西向构造带:构造属性及其年代学[J]. 中国科学:D辑:地球科学, 2004,34 (7): 600-612.
Zhang Changhou, Wu Ganguo, Wang Genhou, et al. Northwesterly Tectonic Zone in the Middle Yanshan Region of East Hebei: Tectonic Properties and Their Chronology[J]. Science in China: Series D: Earth Sciences, 2004,34(7): 600-612.

[16] 张长厚,邓洪菱,李程明,等.燕山板内造山带中部"承德逆冲构造"的褶皱相关断裂构造模型[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 27-40.
Zhang Changhou, Deng Hongling, Li Chengming, et al. An out-of-Syncline Thrust Model for the "Chengde Thrust Sheet" in Central Intraplate Yanshan Orogenic Belt, Northern North China Craton[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 27-40.

[17] Liang C Y, Liu Y J, Neubauer F, et al. Structural Characteristics and LA-ICP-MS U-Pb Zircon Geochronology of the Deformed Granitic Rocks from the Mesozoic Xingcheng-Taili Ductile Shear Zone in the North China Craton[J]. Tectonophysics, 2015, 650: 80-103.

[18] 梁琛岳, 刘永江, 李伟民, 等. 医巫闾山变质核杂岩南段韧性变形与流变特征[J]. 岩石学报, 2016, 32(9): 2656-2676.
Liang Chenyue, Liu Yongjiang, Li Weimin, et al. Ductile Deformation and Rock Rheological Characteristics from Southern Yiwulüshan Metamorphic Core Complex[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(9): 2656-2676.

[19] 胡玲, 刘俊来, 纪沫, 等. 变形显微构造识别手册[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 41-47.
Hu Ling, Liu Junlai, Ji Mo, et al. Recognizing Manual of Deformation Microstructure[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 41-47.

[20] 梁琛岳, 刘永江, 宋志伟, 等. 黑龙江虎林杂岩变形样式与时代:对中国东北东部早白垩世古太平洋板块俯冲的启示[J]. 岩石学报, 2020, 36(3): 685-702.
Liang Chenyue, Liu Yongjiang, Song Zhiwei, et al. Deformation Pattern and Age of Hulin Complex in Heilongjiang Province: Implications for Subduction of the Palaeo-Pacific Plate During the Early Cretaceous, Eastern NE China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(3): 685-702.

[21] Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 2003, 4: 1-71.

[22] 许志琴, 王勤, 梁凤华, 等. 电子背散射衍射(EBSD)技术在大陆动力学研究中的应用[J]. 岩石学报, 2009, 25(7): 1721-1736.
Xu Zhiqin, Wang Qin, Liang Fenghua, et al. Electron Backscatter Diffraction (EBSD) Technique and Its Application to Study of Continental Dynamics [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(7): 1721-1736.

[23] Koch P. Rheology and Microstructures of Experimentally Deformed Quartz Aggregates [D]. California: University of California, 1983.

[24] Twiss R J. Theory and Applicability of a Recrystallized Grain Size Paleopiezometer [J]. Pure and Applied Geophysics, 1977, 115(1/2): 227-244.

[25] Stipp M, Tullis J. The Recrystallized Grain Size Piezometer for Quartz [J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(21): 2088.

[26] Mercier J C C, Anderson D A, Carter N L. Stress in the Lithosphere: Inferences from Steady State Flow of Rocks[J]. Pure and Applied Geophysics, 1977, 115(1/2): 199-226.

[27] Rutter E H, Brodie K H. Experimental Grain-Size Sensitive Flow of Hot-Pressed Brazilian Quartz Aggregates[J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26: 2011-2023.

[28] Rutter E H, Brodie K H. Experimental Intracrystalline Plastic Flow in Hot-Pressed Synthetic Quartzite Prepared from Brazilan Quartz Crystals[J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26: 259-270.

[29] Koch P S, Christie J M, Ord A, et al. Effect of Water on the Rheology Ofex-Perimentally Deformed Quartzite[J]. Journal of Geophysical Research, 1989,

94 (B10)：13975－13996.

[30] Kronenberg A K，Tullis J. Flow Strengths of Quartz Aggregates：Grains Size and Pressure Effects Due to Hydrolytic Weakening[J]. Journal of Geophysical Research，1984，89：4281－4297.

[31] Parrish D K，Krivz A L，Carter N L. Finite-Element Folds of Similar Geometry[J]. Tectonophysics，1976，32(3/4)：183－207.

[32] Paterson M S，Luan F C. Quartzite Rheology Under Geological Conditions[J]. Geol Soc Lond Spec Publ，1990，54：299－307.

[33] Hirth G，Teyssier C，Dunlap W J.An Evaluation of Quarzite Flow Laws Based on Comparisons Between Experimentally and Naturally Deformed Rocks[J]. Int J Earth Sci，2001，90：77－87.

[34] 马强. 辽西三叠纪—侏罗纪火山岩：华北北缘东段下地壳再造与克拉通破坏[D]. 武汉：中国地质大学，2013.
Ma Qiang. Triassic-Jurassic Volcanic Rocks in Western Liaoning：Implications for Lower Crustal Reworking and Lithospheric Destruction in the North Part of Eastern North China Craton[D]. Wuhan：China University of Geosciences，2013.

[35] 赵越，徐刚，张拴宏，等. 燕山运动与东亚构造体制的转变[J]. 地学前缘，2004，11(3)：319－328.
Zhao Yue，Xu Gang，Zhang Shuanhong，et al. Yanshanian Movement and Conversion of Tectonic Regimes in East Asia[J]. Earth Science Frontiers，2004，11(3)：319－328.

[36] 张宇婷，孙丰月，李予晋，等.吉南中侏罗世花岗闪长岩的锆石 U－Pb 年龄、地球化学及 Hf 同位素组成[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2022，52(5)：1675－1687.
Zhang Yuting，Sun Fengyue，Li Yujin，et al. Zircon U－Pb Geochronology，Geochemistry and Hf Isotopic Composition of the Middle Jurassic Granodiorite in South Jilin Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition)，2022，52(5)：1675－1687.

[37] Fan W B，Jiang N，Xu X Y，et al. Petrogenesis of the Middle Jurassic Appinite and Coeval Granitoids in the Eastern Hebei Area of North China Craton[J]. Lithos，2017，278/279/280/281：331－346.

[38] Sun J F，Zhang J H，Yang J H，et al. Multi-Stage Jurassic Magmatism in the Liaodong Peninsula：Constraints on Crustal Evolution Beneath the Eastern North China Craton[J]. Lithos，2021，402/403：105897.

[39] 李刚，蒋职权，邵学峰，等. 医巫闾山中—晚侏罗世构造变形与同构造花岗岩的耦合关系[J]. 地学前缘，2019，26(2)：72－91.
Li Gang，Jiang Zhiquan，Shao Xuefeng，et al. Relationship Between Middle-Late Jurassic Deformation and Syn-Tectonic Granitoid Emplacement in the Yiwulüshan Area，North China[J]. Earth Science Frontiers，2019，26(2)：72－91.

[40] Zhu G，Chen Y，Jiang D Z，et al. Rapid Change from Compression to Extension in the North China Craton During the Early Cretaceous：Evidence from the Yunmengshan Metamorphic Core Complex[J]. Tectonophysics，2015，656：91－110.

[41] 和政军，牛宝贵，张新元，等. 辽西朝阳地区晚侏罗世逆冲断裂及同构造沉积盆地系统[J]. 地质论评，2007，53(2)：152－163，295－296.
He Zhengjun，Niu Baogui，Zhang Xinyuan，et al.Late Jurassic Retrograde Faulting and Synclinal Sedimentary Basin System in Chaoyang Area，West Liaoning Syn-Tectonic Sedimentary Basin System[J]. Geological Review，2007，53 (2)：152－163，295－296.

[42] 赵越，高海龙，张拴宏，等. 回眸燕山运动：致敬“燕山运动”的创建者和中国地质学会的奠基人翁文灏[J]. 地质学报，2022，96(5)：1510－1523.
Zhao Yue，Gao Hailong，Zhang Shuanhong，et al.A Brief Century Review of the “Yanshan Movement” and Its Founder[J]. Acta Geologica Sinica，2022，96(5)：1510－1523.

[43] Liang C Y，Liu Y J，Neubauerb F，et al. Structural and Rheological Features of the Western Liaoning Metamorphic Cross Mark Core Complex Corridor：Indications for Late Mesozoic Extension of the Eastern North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences，2017，139：142－164.

[44] 陈印，朱光，姜大志，等.四合堂剪切带活动时代及其对燕山运动 B 幕时间的限定[J].地质学报，2013，87(3)：295－310.
Chen Yin，Zhu Guang，Jiang Dazhi，et al. Timing Determination of Phase B of the Yanshanian Movement in the Eastern North China Craton：Evidence from Dating of Ductile Shear Zone in Sihetang，Northeastern Beijing[J]. Acta Geologica Sinica，2013，87(3)：295－310.

[45] 朱光，刘程，顾承串，等.郯庐断裂带晚中生代演化对西太平洋俯冲历史的指示[J].中国科学：地球科学，2018，48(4)：415－435.

Zhu Guang, Liu Cheng, Gu Chengchuan, et al. Oceanic Plate Subduction History in the Western Pacific Ocean: Constraint from Late Mesozoic Evolution of the Tan-Lu Fault Zone[J]. Science in China:Earth Sciences, 2018, 48(4): 415-435.

[46] Zhang Z K, Ling M X, Lin W, et al. Yanshanian Movement Induced by the Westward Subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. Solid Earth Sciences, 2020, 5: 103-114.

[47] Tang Z Y, Sun D Y, Mao A Q, et al. Timing and Evolution of Mesozoic Volcanism in the Central Great Xing'an Range, Northeastern China[J]. Geological Journal, 2018, 54: 3737-3754.

[48] Song Z W, Liang C Y, Neubauer F, et al.Multistage Evolution of the Keluo Complex in the Northern Da Hinggan Mountains: Implications for the Mesozoic Tectonic History of the Eastern Central Asian Orogenic Belt[J]. Gondwana Research, 2022, 107: 339-369.

[49] Chen L, Liang C Y, Neubauer F, et al. Sedimentary Processes and Deformation Styles of the Mesozoic Sedimentary Succession in the Northern Margin of the Mohe Basin, NE China: Constraints on the Final Closure of the Mongol-Okhotsk Ocean[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2022, 232:105052.

[50] 陈龙,梁琛岳,刘永江,等. 漠河盆地绣峰组形成时代及物源分析:对蒙古—鄂霍茨克洋东段演化的启示[J].地球科学,2022, 47(9): 3334-3353.
Chen Long, Liang Chenyue, Liu Yongjiang, et al. Geochronology and Provenance Analysis of the Xiufeng Formation in Mohe Basin: Implications for the Evolution of the Eastern Mongol-Okhotsk Ocean[J]. Earth Science,2022, 47(9): 3334-3353.