

# 华北克拉通鲁西地区沂水杂岩研究现状、问题及展望

周涛, 陈晨, 朱新彤, 李雨蒙

临沂大学资源环境学院, 山东 临沂

收稿日期: 2023年3月28日; 录用日期: 2023年5月9日; 发布日期: 2023年5月18日

## 摘要

华北克拉通作为全球最老的克拉通之一, 其前寒武纪结晶基底广泛记录了地球早期构造热演化的信息。位于华北克拉通东南缘鲁西地块的沂水杂岩, 是华北克拉通前寒武纪结晶基底的典型代表, 是我们探讨华北克拉通前寒武纪构造热演化的理想窗口。本文通过对前人研究工作总结, 从沂水杂岩的原岩组成、年代学研究、地球化学特征、变质作用及其大地构造意义几个方面全面综述目前研究进展, 浅析存在问题及研究展望, 为进一步深入研究沂水杂岩前寒武纪构造热演化研究提供参考, 进而推动华北克拉通早前寒武纪构造热演化过程以及地球早期板块构造机制的发展。

## 关键词

沂水杂岩, 华北克拉通, 前寒武纪, 构造演化

# Research Status, Problems Analysis and Prospect of the Yishui Complex in the West Shandong Area of the North China Craton

Tao Zhou, Chen Chen, Xintong Zhu, Yumeng Li

School of Resources and Environment, Linyi University, Linyi Shandong

Received: Mar. 28<sup>th</sup>, 2023; accepted: May 9<sup>th</sup>, 2023; published: May 18<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

As one of the oldest cratons in the world, the Precambrian basement of the North China Craton records information on early continental evolution, attracting the attention of many early Precambrian geologists at home and abroad. The Yishui Complex, located in the southeastern margin

of the North China Craton, is a typical representative of the Precambrian crystalline basement of the North China Craton and an important window for us to explore the Precambrian tectonic and thermal evolution of the North China Craton. Therefore, this article will summarize and expand the controversy on the composition, age, and age of the protolith of the Yishui complex, geochemical characteristics, metamorphism, and its tectonic significance, as well as the existing issues in previous research work, and it provides a reference for further research on the Precambrian tectonic thermal evolution of the Yishui complex, and further promotes the development of the early Precambrian tectonic thermal evolution process of the North China Craton and the early plate tectonics mechanism of the Earth.

## Keywords

Yishui Complex, North China Craton, Precambrian, Tectonic Evolution

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

全球板块构造的启动时间和机制，一直是国内外地球科学界关注的前沿热点问题，它涉及的问题不仅是早期地球的构造机制问题，更重要的是它关系到整个地球的演化历史、变化过程和演化规律，以及地球的未来[1]。华北克拉通是我国面积最大、形成演化时代最长、变质最强烈的稳定陆块，也是世界上代表性克拉通之一。其中，华北克拉通早期陆壳的生长规律和稳定化过程、陆块拼合扩展与裂解的构造过程记录完整，同时还有一些不同于世界其他克拉通的特殊性，使之成为国际研究前沿热点[2]。华北克拉通作为欧亚大陆东部规模最大、时代最为古老的克拉通，前人在岩浆作用、沉积作用、变质作用、构造作用等方面都取得了重要进展，揭示出一些太古宙地壳形成演化的重要规律[3] [4] [5]。位于华北克拉通东南缘的鲁西地区广泛发育新太古代陆壳物质，是研究新太古代陆壳形成演化历史的天然实验室[6]。沂水杂岩是华北克拉通太古宙结晶基底的典型代表和华北克拉通东部地块鲁西杂岩的重要组成部分[7]，其中既发育太古宙基性麻粒岩，又发育多种变质沉积岩，是认识华北克拉通早前寒武纪构造热演化过程和构造机制的理想研究对象。近几十年来，沂水杂岩的形成和演化备受国内外学者的关注，部分学者对沂水杂岩的地质研究特别是在原岩组成、岩石地球化学特征以及大地构造背景等方面已经获得了新的进展，有的获得了突破性进展，为沂水杂岩的研究工作奠定了坚实的基础[7]-[17]。随着先进的分析手段、仪器平台、数据库与数值模拟工作紧密结合，特别是变质作用  $P$ - $T$ - $t$  轨迹能够有效反演构造演化历史并逐渐精细化的发展，对于沂水杂岩的形成演化历史逐渐有了新的认识，近几年学者在详细的岩石学、地球化学和年代学等方面的基础上，不仅在岩石地球化学、变质作用等方面有了新的认识，特别是在大地构造背景方面提出地幔柱以及洋壳俯冲等不同观点，进一步推动了对于沂水杂岩形成演化认识[18]-[25]。

本文以出露于华北克拉通东南缘的沂水杂岩为研究对象，对前人研究的原岩组成、年代学研究、地球化学特征、变质作用及其大地构造意义以及其中存在问题争议进行综述和总结，进一步探讨沂水杂岩形成演化历史。文章最后针对“紫苏花岗岩成因”、“变质作用研究”、“区域大地构造背景”等科学问题进一步研究提出了建议，为进一步深入研究沂水杂岩前寒武纪构造热演化研究提供参考，进而推动华北克拉通早前寒武纪构造热演化过程以及地球早期板块构造机制的发展。

## 2. 原岩组成

沂水杂岩出露于华北克拉通东南缘鲁西地区,以郯庐断裂带为界西邻鲁西花岗-绿岩带[19]。沂水杂岩(图 1)主要是由花岗岩类侵入体和由各类表壳岩组成的沂水岩群组成。其中花岗类侵入体(约占 70%~75%)主要包括马山、大山、雪山、蔡峪、林家官庄、牛心官庄、英灵山岩体;各类表壳岩(约占 25%~30%),由北向南分别为北下庄岩组、石山官庄岩组和林家官庄岩组[7]-[12] [19] [26] [27] [28]。北下庄岩组(图 2(d))以(石榴)斜长角闪岩-(石榴)黑云变粒岩为主,夹少量角闪变粒岩、黑云石榴夕线钾长片麻岩(图 3(d)),其中含夕线石十字石榴二云斜长片麻岩是沂水杂岩中发现的一种少见的变泥砂质岩石,包裹于沂水牛心官庄岩浆杂岩体中,为残留的变质表壳岩透镜体[27];石山官庄岩组(图 2(b))以黑云二辉斜长片麻岩(图 3(b))、暗色和浅色斜长麻粒岩为主,夹有少量二辉石岩、超镁铁质岩、透辉石岩和辉石铁英岩;林家官庄岩组为二辉斜长角闪岩-(石榴)透辉斜长角闪岩-二辉斜长麻粒岩组合,夹有少量黑云二辉斜长片麻岩岩层。马山岩体主要由紫苏花岗闪长岩组成,岩石呈灰黑色,片麻状构造,肉眼能看到暗色斜长石、棕色柱状紫苏辉石和黑云母片;蔡峪岩体主要以石榴二辉花岗闪长岩和黑云石榴奥长花岗岩为主,该岩体主要特点为富含石榴子石,斜长石以奥长石为主,岩性变化比较大;雪山岩体(图 2(a))主体为片麻状紫苏花岗闪长岩(图 3(a)),新鲜岩石呈青灰色至烟灰色,风化后呈白色至灰白色,中细粒至细粒,肉眼可见少量透辉石和紫苏辉石;牛心官庄岩体(图 2(c))为含紫苏辉石花岗岩(图 3(c)),组成矿物以斜长石、微斜长石和石英为主,紫苏辉石次之,有少量角闪石和黑云母;英灵山岩体为英云闪长岩-花岗闪长岩,岩石一般呈带紫的暗灰色,风化后呈暗灰色,中粒至中粗粒;林家官庄岩体为英云闪长岩,岩石呈灰白色,中粒,片麻状,一般暗色矿物以普通角闪石和黑云母居多;大山岩体为黑云母二长-钾长花岗岩为主,岩石呈灰白色-肉红色,中粗粒块状[7]-[12]。因此,沂水杂岩中紫苏花岗岩主要有 3 种类型,分别为紫苏花岗闪长岩、紫苏石榴花岗闪长岩和紫苏奥长花岗岩,紫苏花岗岩与麻粒岩相变质表壳岩在空间上密切伴生,两者多为渐变过渡接触关系[16] [17]。

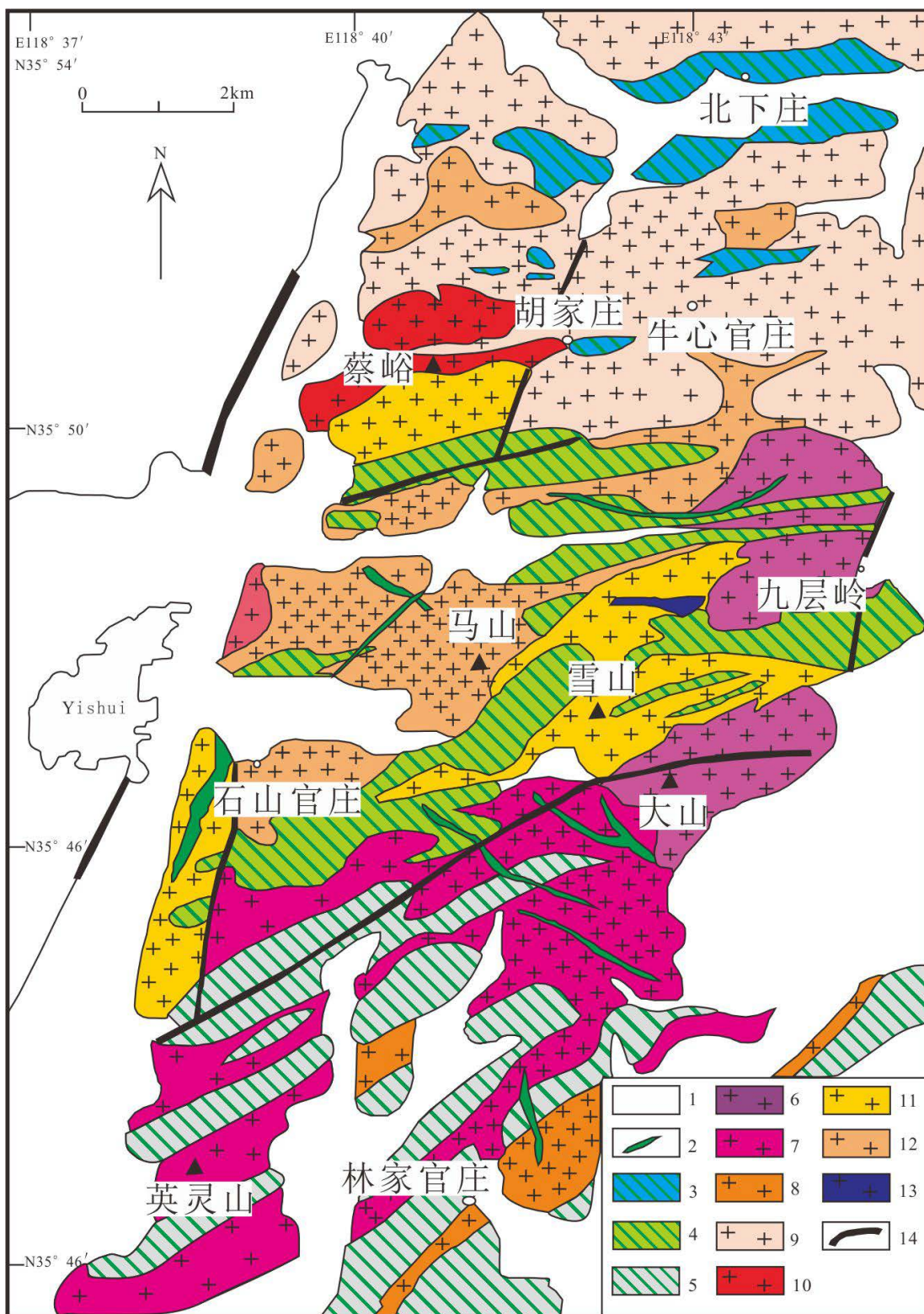
## 3. 年代学研究

沂水杂岩主要是由花岗岩类侵入体和由各类表壳岩组成的沂水岩群组成,已有的岩石的年代学数据显示,其主要形成于 2.56~2.50 Ga,沂水地区区域变质年龄约为 2.50 Ga [7]-[12] [18]-[27] [28]。

表壳岩以捕虏体(包体)或层状产出于花岗类岩体中[7]。Wu *et al.* [19]测定变泥沙质岩的结晶年龄为  $2535 \pm 8.4$  Ma; 赵子然等[29]认为超镁铁质岩石的形成时限为 2585~2702 Ma; Li *et al.* [20]测定火山凝灰岩、变质火山岩、辉石岩和辉绿岩的结晶年龄分别为  $2504 \pm 19$  Ma、 $2501 \pm 19$  Ma、 $2537 \pm 38$  Ma 和  $2506 \pm 13$  Ma; Santosh *et al.* [21]测定角闪岩结晶年龄为  $2538 \pm 30$  Ma,辉长岩为  $2503 \pm 16$  Ma 和  $2495 \pm 10$  Ma; Yang & Santosh *et al.* [22]测定花岗闪长岩、辉长岩和紫苏花岗岩的结晶年龄分别为  $2505 \pm 29$  Ma、 $2566 \pm 46$  Ma 和  $2543 \pm 20$  Ma; Liu *et al.* [23]认为紫苏花岗岩结晶于 2.52~2.56 Ga,并在 2.50~2.53 Ga 处经历了变质作用。Yu *et al.* [25]测定橄榄辉石岩和闪长岩分别形成于  $2508 \pm 16$  Ma 和  $2504 \pm 7$  Ma。

马山岩体的结晶年龄为  $2538 \pm 6$  Ma [12],而 Wu *et al.* [19]测定其结晶年龄为  $2528 \pm 8$  Ma, Li *et al.* [20]测定为  $2581 \pm 21$  Ma; 蔡峪岩体的结晶年龄为  $2562 \pm 14$  Ma [11],而 Wu *et al.* [19]测定其结晶年龄为  $2559 \pm 16$  Ma; 雪山岩体的结晶年龄为  $2532 \pm 9$  Ma [12],而李洪奎等[30]测定为  $2491 \pm 5$  Ma, Wu *et al.* [19]测定为  $2535 \pm 11$  Ma, Yang & Santosh [22]测定为  $2587 \pm 15$  Ma; 大山岩体的结晶年龄为  $2545 \pm 10$  Ma [12],而 Yu *et al.* [25]测定为  $2509 \pm 20$  Ma 至  $2484 \pm 26$  Ma; 林家官庄岩体的结晶年龄为  $2518$  Ma [7],而 Santosh *et al.* [21]测定为  $2538 \pm 16$  Ma, Gao *et al.* [24]测定为  $2615 \pm 6$  Ma; 英灵山岩体和牛心官庄岩体的结晶年龄分别为  $2530 \pm 7$  Ma 和  $2537 \pm 5$  Ma [7] [31]。

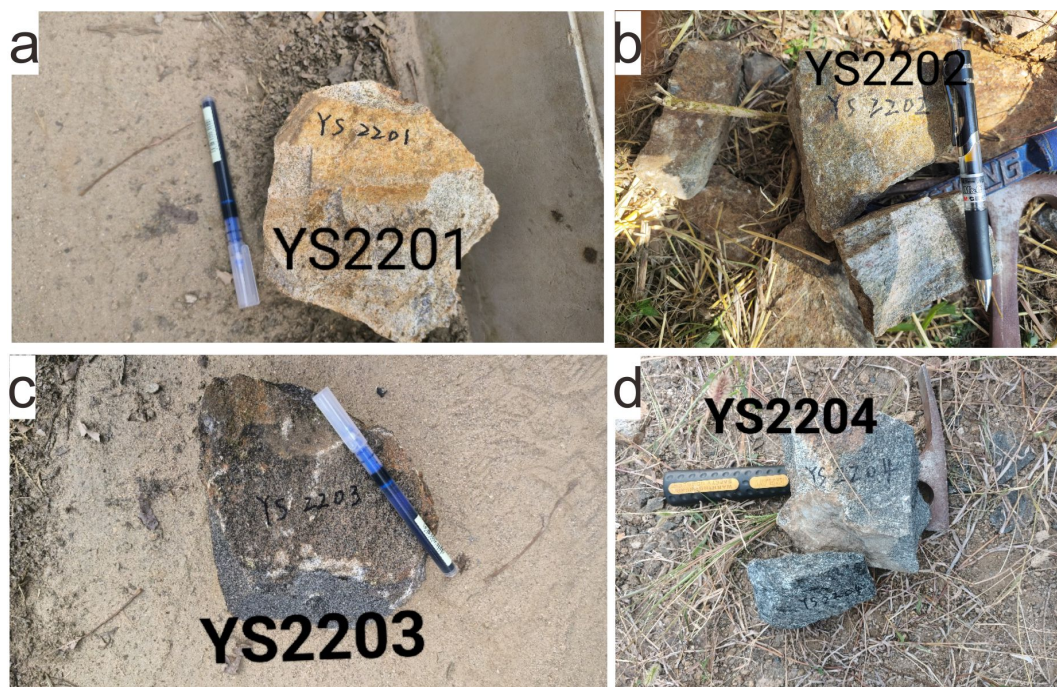
依据前人对沂水杂岩的测年结果,总结如下(表 1, 表 2)。



1-显生宙盖层; 2-岩脉; 3-北下庄岩组; 4-石山官庄岩组; 5-林家官庄岩组 6-大山岩体; 7-英灵山岩体; 8-林家官庄岩体; 9-牛心官庄岩体; 10-蔡峪岩体; 11-雪山岩体; 12-马山岩体; 13-辉长岩; 14-断层

Figure 1. Geological sketch map of the Yishui Terrane (revised after Wu *et al.* [19])

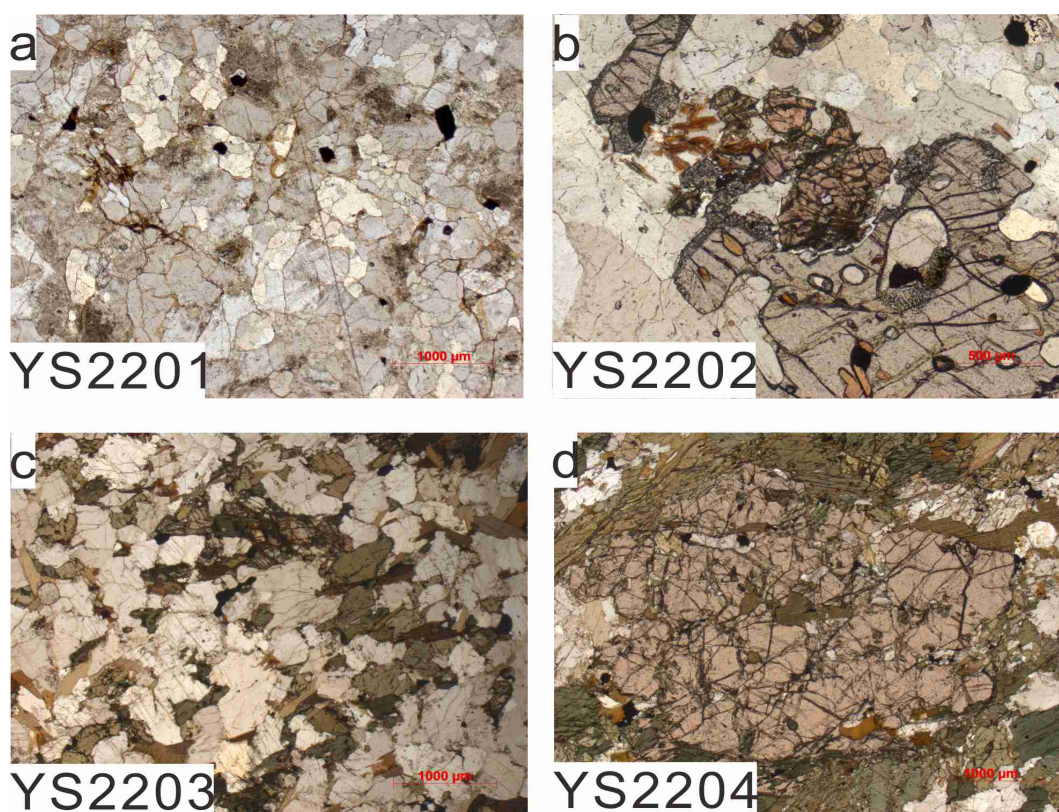
图 1. 沂水杂岩地质示意图(根据 Wu *et al.*, [19]修订)



a-中粗粒花岗片麻岩；b-石榴子石黑云斜长片麻岩；c-中细粒奥长花岗岩；d-石榴子石黑云斜长片麻岩

**Figure 2.** Field occurrence of representative rocks in the Yishui complex

**图 2.** 沂水杂岩代表性岩石的野外产状



**Figure 3.** Representative Rock Microfacies Photos of the Yishui Complex

**图 3.** 沂水杂岩代表性岩石显微岩相照片

**Table 1.** Chronological study of supracrustal rock in Yishui (Revised after Wu *et al.* [19])**表 1.** 沂水壳表岩的年代学研究统计(根据 Wu *et al.* [19]修改)

样品	岩性	地点	方法	结晶年龄	继承锆石年龄	变质年龄	参考文献
TA4-4	橄榄辉石岩	沂水	LA-ICP-MS	2508 ± 16 Ma			Yu Yang 等, 2019
TA5-3	闪长岩	沂水	LA-ICP-MS	2504 ± 7 Ma			Yu Yang 等, 2019
TA10-1	紫苏花岗岩	石山官庄	LA-ICP-MS	2524 ± 7 Ma		2501 ± 3 Ma	Liu Jianhui 等, 2017
TA11-2	紫苏花岗岩	石山官庄	LA-ICP-MS	2529 ± 6 Ma			Liu Jianhui 等, 2017
TA12-1	紫苏花岗岩	沂水	LA-ICP-MS	2553 ± 6 Ma		2532 ± 8 Ma	Liu Jianhui 等, 2017
YS-1	花岗闪长岩	沂水	LA-ICP-MS	2505 ± 29 Ma		2484 ± 24 Ma	Yang & Santosh 2017
YS-3A	辉长岩	沂水	LA-ICP-MS	2566 ± 46 Ma		2511 ± 35 Ma	Yang & Santosh 2017
YS-7A	紫苏花岗岩	沂水	LA-ICP-MS	2543 ± 20 Ma		2509 ± 16 Ma	Yang & Santosh 2017
YS-17B1	角闪岩	沂水	LA-ICP-MS	2538 ± 30 Ma			Santosh 等, 2016
YS-17D1	辉长岩	沂水	LA-ICP-MS	2503 ± 16 Ma			Santosh 等, 2016
YS-17D2	辉长岩	沂水	LA-ICP-MS	2495 ± 10 Ma			Santosh 等, 2016
YS-6B	火山凝灰岩	罗家庄	LA-ICP-MS	2504 ± 19 Ma		2476 ± 17 Ma	Li Shanshan 等, 2016
YS-10A	变质火山岩	沂水	LA-ICP-MS	2501 ± 19 Ma		2457 ± 13 Ma	Li Shanshan 等, 2016
YS-14E	辉石岩	沂水	LA-ICP-MS	2537 ± 38 Ma		2466 ± 23 Ma	Li Shanshan 等, 2016
YS-15B	辉绿岩	沂水	LA-ICP-MS	2506 ± 13 Ma			Li Shanshan 等, 2016
10SD07-2	变泥沙质岩	北下庄	LA-ICP-MS	2535 ± 8.4 Ma	2883 ± 13 Ma	2506 ± 12 Ma	Wu Meiling 等, 2013
					2886 ± 12 Ma	2503 ± 12 Ma	
					2654 ± 11 Ma		
10SD12	黑云母角闪辉石斜长石片麻岩	蔡峪	LA-ICP-MS	2543 ± 6 Ma		2507 ± 9 Ma	Wu Meiling 等, 2013
YS0901-1	二辉斜长麻粒岩	青龙峪	SHRIMP	2550 – 2552 Ma		2498 ± 8 Ma	赵子然等, 2013
YS0901-2	蛇纹石化橄榄辉石岩	青龙峪	SHRIMP	2560 – 2702 Ma		2501 – 2585 Ma	赵子然等, 2013
YS0902-2	含石榴子石角闪二辉麻粒岩	青龙峪	SHRIMP	2561 ± 7 Ma			赵子然等, 2013
YS06-B2	含夕线石十字石榴二云斜长片麻岩	牛心官庄	SHRIMP		2695 ± 32 Ma		赵子然等, 2009b
YS06-19	含紫苏辉石斜长角闪岩	胡家庄	SHRIMP			2522 ± 5 Ma	赵子然等, 2009a
YS06-40	含石榴子石角闪二辉斜长麻粒岩	罗家庄	SHRIMP			2514 ± 5 Ma	赵子然等, 2009a
YS06-41	含紫苏辉石斜长角闪岩	胡家庄	SHRIMP			2497 ± 4 Ma	赵子然等, 2009a
YS06-45	含石榴子石角闪二辉斜长麻粒岩	林家官庄	SHRIMP			2485 ± 10 Ma	赵子然等, 2009a
YS06-49	含石榴子石角闪二辉麻粒岩	九层岭	SHRIMP			2509 ± 5 Ma	赵子然等, 2009a
YS06-31	含尖晶石和石榴子石斜长角闪二辉麻粒岩	冯家庄	SHRIMP			2532 – 2719 Ma	赵子然等, 2009a
YS06-29	斜长角闪岩	英灵山	SHRIMP			2531 ± 6 Ma	赵子然等, 2008

**Table 2.** Chronological study and statistics of granitic rocks in the yishui complex (Revised after Wu *et al.* [19])  
**表 2.** 沂水杂岩花岗岩质石的年代学研究统计(根据 Wu *et al.* [19]修改)

样品	岩性	地理单元	地点	方法	结晶年龄	继承锆石年龄	变质年龄	参考文献
16SD50-1	二长花岗片麻岩	林家官庄岩体	沂水	LA-ICP-MS	2575 ± 8 Ma	2638 – 2617 Ma	2520 ± 7 Ma	Gao Lei 等, 2019
16SD51-1	二长花岗片麻岩	林家官庄岩体	沂水	LA-ICP-MS	2615 ± 6 Ma	2693 ± 18 Ma	2544 ± 12 Ma	Gao Lei 等, 2019
YS-17E1	浅色花岗岩	林家官庄岩体	沂水	LA-ICP-MS	2503 ± 21 Ma			Santosh 等, 2016
YS-17E2	淡色花岗岩	林家官庄岩体	沂水	LA-ICP-MS	2538 ± 16 Ma			Santosh 等, 2016
TA4-1	正长花岗岩	大山岩体	沂水	LA-ICP-MS			2489 ± 20 Ma	Yu Yang 等, 2019
TA4-2	片麻状花岗岩	大山岩体	沂水	LA-ICP-MS	2509 ± 20 Ma			Yu Yang 等, 2019
TA4-3	二长花岗岩	大山岩体	沂水	LA-ICP-MS	2508 ± 16 Ma			Yu Yang 等, 2019
TA6-2	二长花岗岩	大山岩体	沂水	LA-ICP-MS	2484 ± 26 Ma			Yu Yang 等, 2019
TA6-3	二长花岗岩	大山岩体	沂水	LA-ICP-MS	2501 ± 7 Ma			Yu Yang 等, 2019
YS99-16	二长花岗片麻岩	大山岩体	大山	SHRIMP	2545 ± 10 Ma		2508 ± 5 Ma	沈其韩等, 2004
YS-6C	二长花岗岩	马山岩体	罗家庄	LA-ICP-MS	2581 ± 21 Ma		2526 ± 16 Ma	Li Shanshan 等, 2016
10SD07	紫苏花岗闪长岩	马山岩体	马山	LA-ICP-MS	2528 ± 8 Ma		2508 ± 9 Ma	Wu Meiling 等, 2013
10SD09	黑云母斜长石片麻岩	马山岩体	马山	LA-ICP-MS	2556 ± 7 Ma		2508 ± 12 Ma	Wu Meiling 等, 2013
YS9566	紫苏花岗闪长岩	马山岩体	马山	SHRIMP	2538 ± 6 Ma			沈其韩等, 2007
11SD01-2	含石榴子石紫苏花岗岩	蔡峪岩体	蔡峪	LA-ICP-MS	2559 ± 16 Ma		2523 ± 17 Ma	Wu Meiling 等, 2013
10SD06-4	石榴石黑云母斜长石片麻岩	蔡峪岩体	蔡峪	LA-ICP-MS	2570 ± 27 Ma	2840 – 2983 Ma	2499 ± 8 Ma	Wu Meiling 等, 2013
YS95-58	TTG	蔡峪岩体	蔡峪	SHRIMP	2562 ± 14 Ma		2518 ± 13 Ma	沈其韩等, 2004
YS-2A	闪长岩	雪山岩体	沂水	LA-ICP-MS	2587 ± 15 Ma		2545 ± 30 Ma	Yang & Santosh 2017
11SD02-16	紫苏花岗岩	雪山岩体	雪山	LA-ICP-MS	2535 ± 11 Ma	2629 ± 8 Ma	2500 – 2510 Ma	Wu Meiling 等, 2013
11SD02-18	含辉石长英质片麻岩	雪山岩体	雪山	LA-ICP-MS		2559 – 2662 Ma	2505 ± 15 Ma	Wu Meiling 等, 2013

Continued

						2500 ± 12 Ma
NXO-3	花岗闪长岩	雪山岩体	北下庄西南	SHRIMP	2491 ± 5 Ma	李洪奎等, 2011
YS9573	紫苏花岗岩	雪山岩体	雪山	SHRIMP	2532 ± 9 Ma	沈其韩等, 2007
YS06-30	英灵山花岗岩	英灵山岩体	英灵山	SHRIMP	2530 ± 7 Ma	赵子然等, 2008
YS06-48	英灵山花岗岩	英灵山岩体	英灵山	SHRIMP	2531 ± 8 Ma	赵子然等, 2008

#### 4. 岩石地球化学特征

前人对沂水杂岩中各类侵入体进行了详细的地球化学研究, 主要包括花岗岩类、花岗闪长岩类、高钾花岗岩类和角闪岩类。

通过对包含 TTG 片麻岩在内的花岗岩类研究表明, 其具有高  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和低  $\text{MgO}$  特征, 属于碱性岩系列, 在铝饱和指数图解中显示出准铝质至过铝质特征, 球粒陨石标准化 REE 模式配分图具有轻稀土富集重稀土亏损明显的 Eu 正异常特征, 原始地幔标准化微量元素蛛网图显示明显的高场强元素负异常 (Nb、Ta、Ce、Th 等) 特征[22] [23]。

通过对沂水杂岩中花岗闪长岩的研究表明, 其具有高  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  和低  $\text{MgO}$  特征, 属于高钾钙碱性系列, 在铝饱和指数图解中显示出过铝质特征, 多具有相对平坦的球粒陨石标准化 REE 模式配分图, 弱 Eu 异常或无异常, 微量元素蛛网图显示明显的 Nb、Ta 和 Ti 负异常[22] [23] [25]。

通过对沂水杂岩中的高钾花岗类岩石的研究表明, 其具有高  $\text{SiO}_2$  和  $\text{K}_2\text{O}$  特征, 属于高钾钙碱性系列, 在铝饱和指数图解中显示出准铝质至过铝质特征, 具有轻稀土富集重稀土亏损的球粒陨石标准化 REE 模式配分图特征((La/Yb)<sub>N</sub> = 10.48 - 19.30)以及 Nb、Ta 和 Ti 负异常, 认为具有与俯冲环境中的典型高镁安山岩(HMA)相似的特征[22] [23] [25] [32]。通过对沂水杂岩中细粒和中细粒角闪岩研究表明, 其分别具有岛弧玄武岩和弧后拉斑玄武岩地球化学特征, 认为其同样形成于俯冲环境[24]。

#### 5. 沂水杂岩变质作用

前人曾对沂水地区的采取样品进行  $P$ - $T$  轨迹研究, 变质作用  $P$ - $T$  轨迹存在多解。沈崑等[14]通过对紫苏花岗岩中流体包裹体的研究, 获得峰期变质作用条件为  $800^\circ\text{C}/7.5$  kbar, 得到一条顺时针变质作用  $P$ - $T$  轨迹, 紫苏花岗岩、二长花岗岩和英云闪长质花岗岩依次经历较低的变质温压条件, 因此得到本区地壳隆起为一条突向温度轴的  $P$ - $T$  轨迹; 苏尚国等[15]利用二辉石温度计和斜长石 - 角闪石温压计估算区内麻粒岩相峰期变质作用温压条件为  $900^\circ\text{C}\sim 950^\circ\text{C}/0.95$  GP,  $P$ - $T$  演化趋势为等压冷却(IBC)的反时针轨迹, 麻粒岩中反时针演化轨迹的形成及地壳热的扰动可能与板底大量幔源岩浆侵入有关, 工作区存在基性岩浆岩, 并且变质相呈热中心分布(麻粒岩相→高角闪岩相→角闪岩相); Wu *et al.* [18]对沂水杂岩中基性麻粒岩进行了较为详细的研究, 获得峰期变质作用条件为  $800^\circ\text{C}\sim 820^\circ\text{C}/8.0\sim 8.5$  kbar, 得到了逆时针 IBC 型  $P$ - $T$  轨迹, 该路径涉及峰值中压麻粒岩相变质作用后的近等压冷却, 表明沂水杂岩的变质作用很可能与地幔源岩浆的侵入和底侵有关。其中相对较冷的地幔柱流头最初加热了地壳, 导致角闪岩相变质作用(M1)。随后, 相对较热的地幔柱尾部加热了地壳, 导致麻粒岩相变质作用(M2)。最后, 当地幔柱停止加热地壳时, 发生了近等压冷却过程(M3)。



## 6. 大地构造背景

关于沂水杂岩的地质背景和演化历史,前人根据其研究成果提出了不同认识。沈其韩等[7]认为本区最老的表壳岩是沂水岩群,其原岩形成时代为 3000 Ma,原岩由泥沙质 + 杂砂质 + 基性中基性火山岩夹少量 BIF 组成,构成一个火山 - 沉积盆地;根据其变质作用研究表明,本区存在高温 - 高中温区域变质作用和区域动力变质作用两种,且以前者为主。高温 - 高中温区域变质作用可以划为两期,第一期为高温麻粒岩相区域变质作用,以沂水表壳岩为代表,变质时间为 2900~2800 Ma;第二期麻粒岩相变质区域主要见于马山岩体、雪山岩体、蔡峪岩体、英灵山岩体和部分牛心官庄岩体,变质时间为 2550~2500 Ma。在第二期麻粒岩相变质之前沂水地区在 2700~2500 Ma 发生区域性拉张,深部的基性岩石经过部分熔融而产生的岩浆,在地壳深部多次沿着沂水岩群的层间裂隙或者断裂上侵,在新太古代末到古元古代之初,大规模的岩浆作用宣布结束。所以基性麻粒岩的原岩形成后经历过一个构造增厚而产生的深埋阶段,达到一定的深度后发生麻粒岩相变质。在变质峰期前后,大量的花岗质岩石增生,且遭受麻粒岩相变质,其后逐渐抬升,降温增压。但受限于当时技术手段,该年龄可能存在较大误差[19],这与沂水杂岩的主要成岩时代也是矛盾的。目前大部分研究认为沂水杂岩仅经历了新太古代末(2.55~2.46 Ga)角闪岩相 - 麻粒岩相变质作用[7]-[25]。沈其韩等[7]提出在 2700~2500 Ma 发生区域性拉张,深部的基性岩石经过了部分熔融而产生的岩浆在地壳深部多次沿着沂水岩群的层间裂隙或断裂上侵,形成沂水岩群中各花岗类侵入岩体。Wu *et al.* [19]。认为结合麻粒岩相变质作用具有逆时针  $P$ - $T$  路径和岩石地球化学特征等方面,在 2.6~2.5 Ga 时,鲁西地区下方出现了地幔柱,羽流头抬升了地幔岩石圈和上覆大陆地壳,并导致岩石圈拉伸,导致超镁铁质 - 镁铁质火山岩(科马提岩和玄武岩)的大规模喷发。其次部分学者通过对各类花岗类岩体的年代学与地球化学研究认为沂水杂岩指示了胶辽微陆块与其它微陆块之间的与现代板块构造体制类似的弧背景下的俯冲 - 碰撞拼合过程,明确的 2500 Ma 年龄峰值与其他微块报告的类似年龄相对应,岩浆来自于新太古代以及有限的改造古 - 中太古代地壳成分[18]-[25]。Liu *et al.* [23]测得沂水杂岩中紫苏花岗岩的锆石 U-Pb 测年表明原岩侵位约为 2.52~2.56 Ga,同步变质作用约为 2.50~2.53 Ga,现代板块构造体制下的地幔柱和洋壳俯冲过程可能同时存在。但部分学者在基性麻粒岩和 BIF 中通过锆石 SHRIMP 和 LA-ICP-MS U-Pb 定年获得了~2.2 Ga 和~1.8 Ga 两期变质事件的年龄[20] [28]。此外,赵子然等[28]在超基性岩中通过锆石 SHRIMP U-Pb 定年获得麻粒岩相变质作用时间为 2551~2585 Ma, Gao *et al.* [24]认为~2.49~2.45 Ga 代表了绿片岩相-角闪岩相退变质年龄,但缺乏岩相学证据。

## 7. 存在问题

1) 紫苏花岗岩成因存在不同认识。苏尚国等[16] [17]认为紫苏花岗岩是麻粒岩相表壳岩深熔作用的产物,沈其韩等[7]和宋会侠等[33]认为紫苏花岗岩是由来自于亏损地幔的基性岩部分熔融产生。产生这种分歧的原因主要是双方对变质表壳岩及其围岩花岗岩的产出关系的认识不同[33]。Liu *et al.* [23]认为紫苏花岗岩为火成岩重熔而成,而不是由表壳岩石的重熔衍生而来,两阶段锆石 Hf 模型年龄( $T_{DM2}$ )主要聚集在 2.7~3.0 Ga 左右,表明其来源于 2.7~3.0 Ga 左右形成的新生地壳的重熔。

2) 变质作用  $P$ - $T$  轨迹存在多解。沈崑等[14]通过对紫苏花岗岩中流体包裹体的研究,获得峰期变质作用条件为 800°C/7.5 kbar,得到一条顺时针变质作用  $P$ - $T$  轨迹;苏尚国等[15]利用二辉石温度计和斜长石 - 角闪石温压计估算区内麻粒岩相峰期变质作用温压条件为 900°C~950°C/0.95 GP; Wu *et al.* [18]对沂水杂岩中基性麻粒岩进行了较为详细的研究,获得峰期变质作用条件为 800°C~820°C/8.0~8.5 kbar,得到了逆时针 IBC 型  $P$ - $T$  轨迹。

3) 区域大地构造背景存在争议。部分学者依据新太古代末变质作用特征提出地幔柱构造体制[15] [18] [19];部分学者通过对各类花岗类岩体的年代学与地球化学研究认为沂水杂岩指示了胶辽微陆块与其它微陆块之间的与现代板块构造体制类似的弧背景下的俯冲 - 碰撞拼合过程[18]-[25]; Liu *et al.* [23]认为现代

板块构造体制下的地幔柱和洋壳俯冲过程可能同时存在。

## 8. 展望与建议

可以预期在较长的时间内, 华北克拉通早前寒武纪构造热演化过程和构造机制与东部地块太古宙地壳演化历史仍将是地球科学的学科前沿与热点, 其中对于沂水杂岩的研究将进一步为华北克拉通早前寒武纪构造热演化过程以及地球早期板块构造机制提供新的科学资料。沂水杂岩紫苏花岗岩成因存在不同认识、变质作用  $P$ - $T$  轨迹特征和反映的构造演化过程需进一步研究

1) 在今后研究中建议强调基础地质工作与先进的分析手段和仪器平台、数据库与数值模拟工作紧密结合, 已有的大量基础地质资料的系统性整理(数字化程度不够高)与国内外新的数据的收集并重。学科的交叉在早前寒武纪的地质研究中至关重要[1]。

2) 沂水杂岩研究应更加紧密加强综合开展野外地质调查、显微岩相学、地球化学、热力学和年代学研究, 并结合最新的技术手段。紫苏花岗岩成因研究在主-微量元素和 Hf 同位素分析基础上, 可结合 Sr、Nd、Pb 等同位素研究, 并注重不同岩石类型的对比研究。变质作用研究过程中注重 TIMA、扫描电镜和激光拉曼等技术的利用, 精细划分变质作用期次和阶段, 尤其是薄片尺度下锆石、独居石和榍石等副矿物原位 SIMS 高精度定年技术的开发和利用, 综合反演该变质杂岩区变质作用  $P$ - $T$ - $t$  轨迹, 探讨其变质作用的大地构造背景, 为华北克拉通早前寒武纪构造热演化过程以及地球早期板块构造机制提供新的科学资料。

3) 作者建议在研究中不仅要积极发现问题和差别, 还要对其相同点进行归纳总结, 承接精华, 去其糟粕, 为区域地质研究的发展打下坚实基础。

## 9. 结论

综上所述, 结合野外地质产状、锆石的结构特征和前人对于沂水杂岩的研究资料, 从而获得如下结论:

1) 在原岩组成方面, 花岗类侵入体由马山、蔡峪、雪山、大山、英灵山、牛心官庄和林家官庄七个岩体组成, 主要组成岩石为 TTG 片麻岩和紫苏花岗岩; 沂水岩群可划分为石山官庄岩组、林家官庄岩组和北下庄岩组, 主要组成岩石为基性麻粒岩、角闪岩、斜长角闪岩片麻岩、石榴(夕线)黑云斜长片麻岩、黑云变粒岩和少量超基性岩等, 这些表壳岩以捕虏体(包体)或层状产出于花岗类岩体中[7]。

2) 在年代学研究方面, 沂水杂岩主要是由花岗岩类侵入体和由各类表壳岩组成的沂水岩群组成, 已有的岩石的年代学数据显示, 其主要形成于 2.56~2.50 Ga, 沂水地区区域变质年龄约为 2.50 Ga [7]-[12][18]-[27][28]。

3) 在岩石地球化学特征方面, 对包含 TTG 片麻岩在内的花岗岩类研究表明, 其具有高  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和低  $\text{MgO}$  特征, 属于碱性岩系列; 对沂水杂岩中花岗闪长岩和高钾花岗类岩石的研究表明, 属于高钾钙碱性系列[22][23][24][25][32]。对沂水杂岩中细粒和中细粒角闪岩研究表明, 其分别具有岛弧玄武岩和弧后拉斑玄武岩地球化学特征, 认为其形成于俯冲环境[24]。

4) 在变质作用方面, 沈崑等[14]通过对紫苏花岗岩中流体包裹体的研究得到一条顺时针变质作用  $P$ - $T$  轨迹; 苏尚国等[15]利用二辉石温度计和斜长石 $\text{^\circ}$ 角闪石温压计得到  $P$ - $T$  演化趋势为等压冷却(IBC) 的反时针轨迹; Wu *et al.* [18]对沂水杂岩中基性麻粒岩进行了较为详细的研究得到了逆时针 IBC 型  $P$ - $T$  轨迹。

5) 在大地构造背景方面, 经过前人不断探索研究, Wu *et al.* [19]认为在 2.6~2.5 Ga 时, 鲁西地区下方出现了地幔柱, 导致岩石圈拉伸。部分学者通过对各类花岗类岩体的年代学与地球化学研究认为沂水杂岩指示了胶辽微陆块与其它微陆块之间的与现代板块构造体制类似的弧背景下的俯冲 $\text{^\circ}$ 碰撞拼合过程[18]-[25]。Liu *et al.* [23]认为现代板块构造体制下的地幔柱和洋壳俯冲过程可能同时存在。

## 参考文献

- [1] 翟明国, 赵磊, 祝禧艳, 焦淑娟, 周艳艳, 周李岗. 早期大陆与板块构造启动——前沿热点介绍与展望[J]. 岩石学报, 2020, 36(8): 2249-2275.
- [2] 翟明国, M Santosh. 早期大陆的形成和演化——固体地球科学的前沿科学[J]. 科学观察, 2014, 9(6): 1673-5668.
- [3] Zhai, M.G. and Santosh, M. (2011) The Early Precambrian Odyssey of the North China Craton: A Synoptic Overview. *Gondwana Research*, **20**, 6-25. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.02.005>
- [4] Zhao, G.C. and Zhai, M.G. (2013) Lithotectonic Elements of Precambrian Basement in the North China Craton: Review and Tectonic Implications. *Gondwana Research*, **23**, 1207-1240. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.08.016>
- [5] Wan, Y.S., Liu, D.Y., Dong, C.Y., *et al.* (2015) Formation and Evolution of Archean Continental Crust of the North China Craton. In: Zhai, M.G., Ed., *Precambrian Geology of China*, Springer, Berlin, 59-136. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-47885-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-47885-1_2)
- [6] 万渝生, 颀颀强, 董春艳, 刘敦一. 华北克拉通太古宙构造热事件时代及演化[J]. 地球科学, 2020, 45(9): 3119-3160.
- [7] 沈其韩, 沈昆, 耿元生, 徐惠芬. 山东沂水杂岩的组成与地质演化[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- [8] 沈其韩, 张宗清, 徐惠芬. 山东沂水杂岩中变基性岩类的 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 1993(4): 289-296.
- [9] 沈其韩, 张宗清, 徐惠芬. 山东沂水太古宙麻粒岩区年代学研究成果简介[J]. 地球学报, 1994, 15(Z1): 17-19.
- [10] 沈其韩, 徐惠芬, 沈昆, 杨淳, 宋彪. 山东沂水雪山岩体和林家官庄岩体的同位素年代学[J]. 地质科学, 1997(3): 291-298.
- [11] 沈其韩, 宋彪, 徐惠芬, 耿元生, 沈昆. 山东沂水太古宙麻岭和大山岩体 SHRIMP 锆石年代学[J]. 地质论评, 2004, 50(3): 275-284.
- [12] 沈其韩, 赵子然, 宋彪, 宋会侠. 山东沂水新太古代马山和雪山岩体的地质、岩石化学特征和 SHRIMP 锆石年代研究[J]. 地质论评, 2007, 53(2): 180-186.
- [13] 金隆裕, 阎守民, 周志胜, 牛良柱. 山东沂水汞丹山凸起麻粒岩相岩石特征及其地质意义[J]. 山东地质, 1988(2): 13-28.
- [14] 沈昆, 徐惠芬, 沈其韩. 山东沂水麻粒岩杂岩中的变质流体及地质意义[J]. 华北地质矿产杂志, 1995(2): 154-166.
- [15] 苏尚国, 顾德林, 朱更新. 山东省沂水地区麻粒岩相变质作用演化及大地构造意义[J]. 岩石学报, 1997, 13(3): 60-63+65-66+68-74.
- [16] 苏尚国, 顾德林, 朱更新. 山东沂水紫苏花岗岩特征、形成时代及成因探讨[J]. 地球科学, 1999(1): 59-64.
- [17] 苏尚国, 邓晋福, 梁风华, 周珣若, 顾德林. 山东沂水紫苏花岗岩中残晶相矿物的发现及紫苏花岗岩的形成过程[J]. 地学前缘, 2003(3): 257-267.
- [18] Wu, M.L., Zhao, G.C., Sun, M., Yin, C.Q., Li, S.Z. and Tam, P.Y. (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>
- [19] Wu, M.L., Zhao, G.C., Sun, M., Li, S.Z., He, Y.H. and Bao, Z.A. (2013) Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopes of Major Lithologies from the Yishui Terrane: Implications for the Crustal Evolution of the Eastern Block, North China Craton. *Lithos*, **170-171**, 164-178. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.03.005>
- [20] Li, S.S., Santosh, M., Cen, K., Teng, X.M. and He, X.F. (2016) Neoproterozoic Convergent Margin Tectonics Associated with Microblock Amalgamation in the North China Craton: Evidence from the Yishui Complex. *Gondwana Research*, **38**, 113-131. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.11.004>
- [21] Santosh, M., Teng, X.M., He, X.F., Tang, L. and Yang, Q.Y. (2016) Discovery of Neoproterozoic Suprasubduction Zone Ophiolite Suite from Yishui Complex in the North China Craton. *Gondwana Research*, **38**, 1-27. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.10.017>
- [22] Yang, Q.Y. and Santosh, M. (2017) The Building of an Archean Microcontinent: Evidence from the North China Craton. *Gondwana Research*, **50**, 3-37. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.01.003>
- [23] Liu, J.H., Liu, F.L., Ding, Z.J., Liu, P.H., Wang, F., Yang, H., Cai, J. and Shi, J.R. (2017) Petrogenesis and Tectonic Implications of the Charnockites in the Yishui Terrane, North China Craton. *Precambrian Research*, **303**, 315-331. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.04.013>
- [24] Gao, L., Liu, S.W., Sun, G.Z., Guo, R.R., Hu, Y.L., Fu, J.H., Wang, M.J., Ma, C.C. and Hu, F.Y. (2019) Neoproterozoic Crust-Mantle Interactions in the Yishui Terrane, South-Eastern Margin of the North China Craton: Constraints from

- Geochemistry and Zircon U-Pb-Hf Isotopes of Metavolcanic Rocks and High-K Granitoids. *Gondwana Research*, **65**, 97-124. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.10.002>
- [25] Yu, Y., Li, D.P., Chen, Y.L., *et al.* (2019) Late Neoproterozoic Slab Rollback in the Jiaoliao Microblock, North China Craton: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of the Yishui Complex, Western Shandong Province. *Lithos*, **342-343**, 315-332. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.05.036>
- [26] 赵子然, 宋会侠, 沈其韩, 宋彪. 山东沂水杂岩中变基性岩的岩石地球化学特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 地质论评, 2009, 55(2): 286-299.
- [27] 赵子然, 宋会侠, 沈其韩, 宋彪. 沂水杂岩中变泥砂质岩石的岩石化学特征及年代[J]. 岩石学报, 2009, 25(8): 1863-1871.
- [28] 赵子然, 宋会侠, 沈其韩, 宋彪. 沂水青龙峪超镁铁质岩石和基性麻粒岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 岩石学报, 2013, 29(2): 551-563.
- [29] 赵子然, 宋会侠, 沈其韩, 宋彪. 沂水杂岩中超镁铁质岩的岩石地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(5): 853-864.
- [30] 李洪奎, 杨永波, 耿科. 山东省沂水县雪山岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质调查与研究, 2011, 34(4): 253-257.
- [31] 赵子然, 宋会侠, 沈其韩, 宋彪. 山东沂水地区英灵山花岗岩及其捕虏体的地质、岩石地球化学特征和锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 地质通报, 2008(9): 1551-1558.
- [32] Gao, L., Liu, S.W., Sun, G.Z., Guo, R.R., Hu, Y.L., Fu, J.H., Wang, M.J., Ma, C.C. and Hu, F.Y. (2018) Petrogenesis of Late Neoproterozoic High-K Granitoids in the Western Shandong Terrane, North China Craton, and Their Implications for Crust-Mantle Interactions. *Precambrian Research*, **315**, 138-161. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.07.006>
- [33] 宋会侠, 赵子然, 沈其韩, 宋彪. 山东沂水杂岩岩石化学及锆石 Hf 同位素研究[J]. 岩石学报, 2009, 25(8): 1872-1882.