

# 燕山中段常州沟组砂岩岩石学、地球化学特征及地质意义

陈超<sup>1</sup>, 修迪<sup>1</sup>, 王海敏<sup>2</sup>, 专少鹏<sup>2</sup>, 陈宏强<sup>1</sup>, 王金贵<sup>1</sup>, 赵华平<sup>1</sup>, 杨瑞<sup>1</sup>

(1. 河北省区域地质调查院, 河北廊坊 065000; 2. 河北省地矿局第一地质大队, 河北邯郸 056800)

**摘要:** 中元古代常州沟组是华北克拉通北缘燕山地区变质结晶基底上的第一套沉积盖层, 不整合覆盖于新太古代各类片麻岩之上。为了解常州沟组时期的古环境、古气候及其物质来源、构造环境和盆地性质, 在野外地质调查的基础上, 对常州沟组砂岩进行了粒度分析和地球化学分析测试。岩石组合、沉积构造和粒度分析结果指示区内常州沟组沉积环境演化由下至上依次为冲积扇、辫状河和碎屑潮坪。常州沟组砂岩地球化学特征具有高 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 K<sub>2</sub>O, 低 TiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO、MgO 含量的特点, 成熟度较高, 化学蚀变指数(CIA)介于 52.00~73.23 之间, 化学风化作用指数(CIW)范围为 93.04~98.68。由于岩石遭受钾交代作用影响, 结合 A-CN-K 图解、Th/U-Th 图解和古气候判别图综合分析, 认为源区可能经历了较强的风化作用, 古气候温暖、潮湿。Cr/Zr、Th/Sc、Ba/Sr、Rb/Sr 值和 La/Th-Hf 图解指示常州沟组源区属性主要为上地壳环境, 原岩成分以长英质岩石为主。构造背景判别图解显示常州沟组砂岩形成于克拉通盆地, 即燕辽裂陷槽应属于克拉通内部裂解。另外, Tb/Yb、La/Sc、La/Th、Th/Sc 值指示砂岩中无明显的幔源物质加入, 推测燕辽裂陷槽应属于华北克拉通陆壳基底上形成的滨浅海, 未达到大陆地壳裂开、洋壳出现的程度。

**关键词:** 华北克拉通; 中元古代; 常州沟组; 古环境分析; 物源分析; 构造背景

中图分类号: P588.21<sup>1</sup>2.3; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)04-0771-15

## Petrological characteristics, geochemical characteristics, and geological significance of sandstones in Changzhougou Formation, central sector of the Yanshan Mountains

CHEN Chao<sup>1</sup>, XIU Di<sup>1</sup>, WANG Hai-min<sup>2</sup>, ZHUAN Shao-peng<sup>1</sup>, CHEN Hong-qiang<sup>1</sup>, WANG Jin-gui<sup>1</sup>, ZHAO Hua-ping<sup>1</sup> and YANG Rui<sup>1</sup>

(1. Regional Geology Survey Institute of Hebei Province, Langfang 065000, China; 2. The First Geological Team of Hebei Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Handan 056800, China)

**Abstract:** The Mesoproterozoic Changzhougou Formation is the first set of sedimentary cover on the metamorphic crystalline basement of the Yanshan area in the northern margin of North China Craton. It unconformably covers all kinds of Neoproterozoic gneiss. Based on the field geological survey, grain size analysis and geochemical analysis test were carried out on the sandstone of Changzhougou Formation, to disclose the paleoenvironment, paleoclimate, material source, tectonic environment, and basin properties during this period. The results of rock assemblages, sedimentary structure, and grain size analysis indicate that the sedimentary environment evolution of Changzhougou Formation is alluvial fans, braided rivers, and clastic tidal flats, from bottom to top. The geochemical characteristics of

收稿日期: 2021-08-14; 接受日期: 2022-04-16; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 中国地质调查局基础调查项目(DD20160042-4, DD20160060)

作者简介: 陈超(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事区域地质矿产调查与研究工作, E-mail: chchgood@163.com。

sandstones in Changzhougou Formation are characterized by high  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , and low  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ , and  $\text{MgO}$  contents with high maturity. The chemical alteration index (CIA) varies from 52.00 to 73.23, and the chemical weathering index (CIW) ranges from 93.04 to 98.68. Due to the influence of potassium replacement, combined with A-CN-K diagram, Th/U-Th diagram, and paleoclimate discrimination diagram, the provenance may have experienced strong weathering, implying warm and humid paleoclimate. The ratios of Cr/Zr, Th/Sc, Ba/Sr, Rb/Sr, and La/Th-Hf diagrams indicate the provenance of Changzhougou Formation from the upper crustal environment, and the sediments were sourced predominantly from felsic rocks. The discrimination diagram of the tectonic setting shows that the sandstone of Changzhougou Formation was formed in the craton basin, that is, the Yanliao Aulacogen might be produced in the internal rift of the craton. In addition, the ratios of Tb/Yb, La/Sc, La/Th, and Th/Sc indicate a few obvious mantle materials in the sandstones. Therefore, the Yanliao Aulacogen is presumed to be the coastal-epicontinental sea formed on the continental crust basement of the North China Craton, not to the extent of continental crust rupture and oceanic crust occurrence.

**Key words:** North China Craton; Mesoproterozoic; Changzhougou Formation; paleoenvironment analysis; provenance analysis; tectonic setting

**Fund support:** Basic Survey Project of China Geological Survey (DD20160042-4, DD20160060)

燕山地区长城纪常州沟组是华北克拉通北缘燕山地区变质结晶基底上的第一套沉积盖层,不整合覆盖于新太古代各类片麻岩之上,岩性以陆源碎屑岩为主,记录了地壳的初始破裂及裂谷作用的早期过程,对于认识华北克拉通中元古代早期构造演化具有重要意义,一直备受国内外研究学者的关注(李怀坤等, 1995; 柳永清等, 1997; 和政军等, 2000; 高林志等, 2010; 乔秀夫等, 2014; 苏文博, 2016)。和政军等(1994)对包括常州沟组在内的燕山长城纪地层的沉积类型进行了总结,编制出“常州沟期岩相古地理图”,并对长城纪燕山盆地的同沉积断裂系统进行了研究;孙立新等(1999)根据常州沟组底部砾岩特征,认为底部发育河流相、冲积扇相等陆相沉积;肖竣文等(2016)根据对迁安常州沟组底砾岩岩石学特征和剖面沉积特征分析,认为常州沟组底砾岩为干旱氧化环境下山间河流沉积产物,具有多次搬运、近源快速沉积的特点,物源可能来自盆地东南部的山海关古隆起;钟焱等(2011)对蓟县剖面常州沟组底部砂岩的宏观沉积特征和微观特征进行详细研究,认为常州沟组底部含砾粗砂岩属海侵初期的近岸潮汐沙滩沉积,华北克拉通在中元古代早期地壳尚未稳定,不具备形成厚的河流沉积背景;李怀坤等(2011)在北京密云地区常州沟组下伏花岗斑岩脉获得锆石 U-Pb 同位素年龄为  $1\ 673 \pm 10$  Ma,据此认为常州沟组底界年龄应小于  $1\ 670$  Ma;陈贤等(2014)根据蓟县地区常州沟组砂岩碎屑组分特征,对其物质来源和构造背景进行了初步探讨。

上述研究主要集中在年代学、地层学、沉积学等方面,关于常州沟组沉积环境演化仍有不同观点,尤其是底部存在陆相与海相的争论;构造背景还存在克拉通内部裂解、弧后扩张等多种认识;古气候、源区属性等关键性问题的研究仍不够深入。

本文在燕山中段唐山地区进行 1:5 万区域地质野外调查的基础上,以中元古代常州沟组碎屑沉积岩为研究对象,通过岩石学、沉积学、地球化学等方面研究,揭示其古环境、古气候、物质来源和构造背景,进而为探讨华北克拉通大地构造演化提供依据。

## 1 地质背景

研究区位于华北燕山地区东段唐山市迁西地区,属华北克拉通北缘。区内出露太古宙变质岩系及其上的长城系、蓟县系、青白口系、寒武系和奥陶系等地层(图 1)。其中长城系自下而上包括常州沟组、串岭沟组和大红峪组,缺失团山子组。区域上,在滦县青龙山及以东地区大红峪组超覆在下伏不同时代地层之上。常州沟组角度不整合于太古宙变质岩系之上,底部断续发育砾岩透镜体,主要分布于山叶口-王家湾子一带(图 2a),迁西县等地零星出露,厚度在 0~100 m 不等。砾岩中发育叠瓦状构造(图 2b)、粒序层理和冲刷面。砾岩之上主要为浅灰色石英砂岩、长石石英砂岩、岩屑石英砂岩、长石砂岩等,夹少量薄层粉砂岩,下部发育板状交错层理

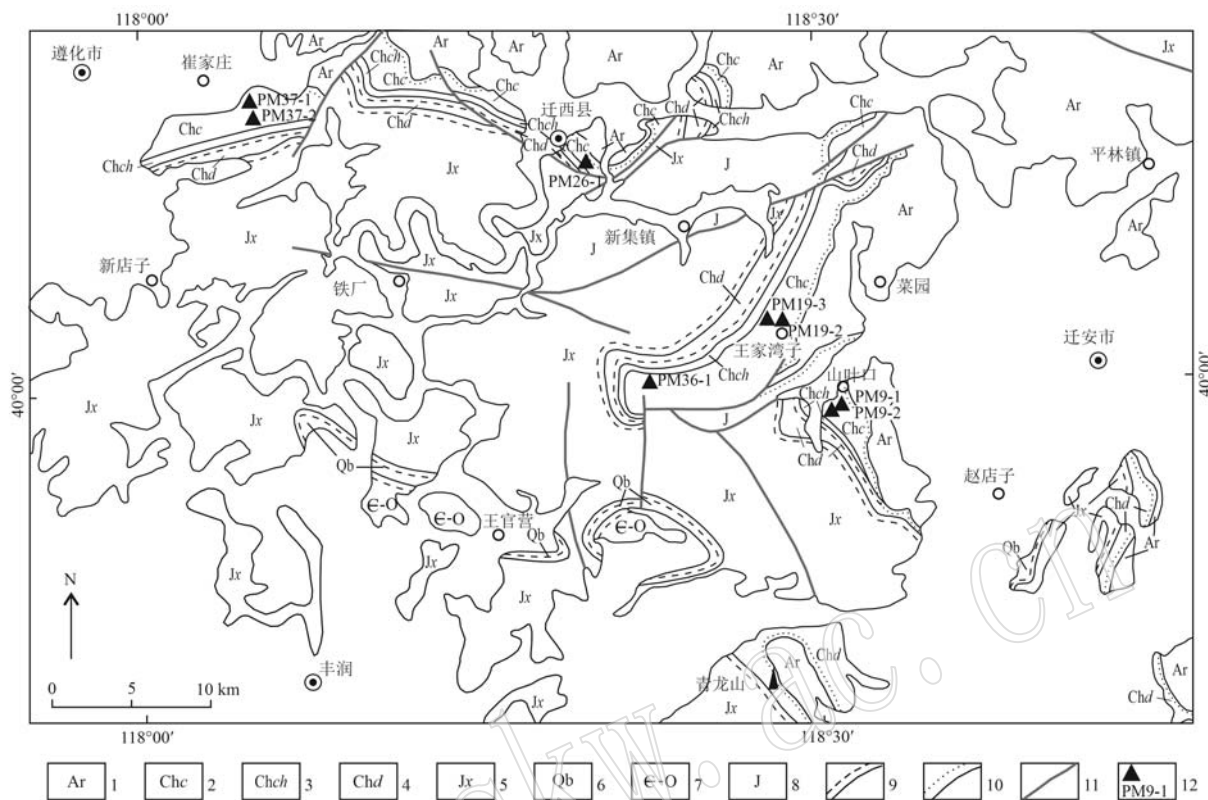


图1 燕山地区迁西县一带地质略图(据赵华平等, 2014<sup>①</sup>; 专少鹏等, 2018<sup>②</sup>)

Fig. 1 Geological sketch map of Qianxi County, Yanshan Mountains area(after Zhao Huaping *et al.*, 2014<sup>①</sup>; Zhuan Shaopeng *et al.*, 2018<sup>②</sup>)

- 1—太古宙变质岩系; 2—常州沟组; 3—串岭沟组; 4—大红峪组; 5—蓟县系; 6—青白口系; 7—寒武系—奥陶系; 8—侏罗系;  
9—平行不整合界线; 10—角度不整合界线; 11—断层; 12—采样位置和编号
- 1—Archean metamorphic rock series; 2—Changzhougou Formation; 3—Chuanlinggou Formation; 4—Dahongyu Formation; 5—Jixian stratum;  
6—Qingbaikou stratum; 7—Cambrian-Ordovician stratum; 8—Jurassic stratum; 9—disconformity boundary; 10—unconformity boundary;  
11—fault; 12—sample locations

(图 2c)、平行层理、槽状交错层理等, 上部发育浪成波纹层理、双向交错层理、脉状层理、波状层理等(图 2d~2g)。串岭沟组整合于常州沟之上, 下部为灰绿色、灰黑色页岩、粉砂岩, 发育水平层理; 上部为浅灰色石英砂岩、长石石英砂岩、灰白色长石砂岩, 发育平行层理、楔状交错层理等。大红峪组平行不整合于串岭沟组之上, 主要岩性为紫灰色长石砂岩、灰白色岩屑长石砂岩、长石石英砂岩、石英砂岩、灰绿色泥质粉砂岩、粉砂质页岩等, 发育楔状交错层理、波状层理、脉状层理、水平层理、干裂、波痕等; 底部发育少量不稳定砾岩; 研究区东南部赵店子东部和青龙山一带夹少量灰绿色蚀变玄武岩、红褐色蚀变辉石粗面岩, 厚度<15 m。蓟县系大面积分布

于研究区中部、西部和南部, 由下至上发育有高于庄组、杨庄组和雾迷山组, 主体岩性均为白云岩, 厚度巨大。青白口系出露于王官营一带, 包括龙山组和景儿峪组, 龙山组为一套滨海碎屑岩组合, 景儿峪组主要由泥晶灰岩、粉晶灰岩等组成。寒武系和奥陶系集中出露在研究区中部南王官营附近向斜核部, 岩性主要为一套浅海—潮坪相碳酸盐岩。侏罗系分布于研究区中北部新集一带, 为一套陆相火山、碎屑沉积建造。

## 2 样品特征和分析方法

本次测试8件地球化学样品采自多条剖面(图

① 赵华平, 刘增校, 魏文通, 等. 2014. 河北 1:5 万铁厂幅、迁西幅、火石营幅、野鸡坨幅地质图.

② 专少鹏, 陈超, 赵华平, 等. 2018. 河北 1:5 万沙流河幅、左家坞幅、鸦鸿桥幅、丰润幅地质图.

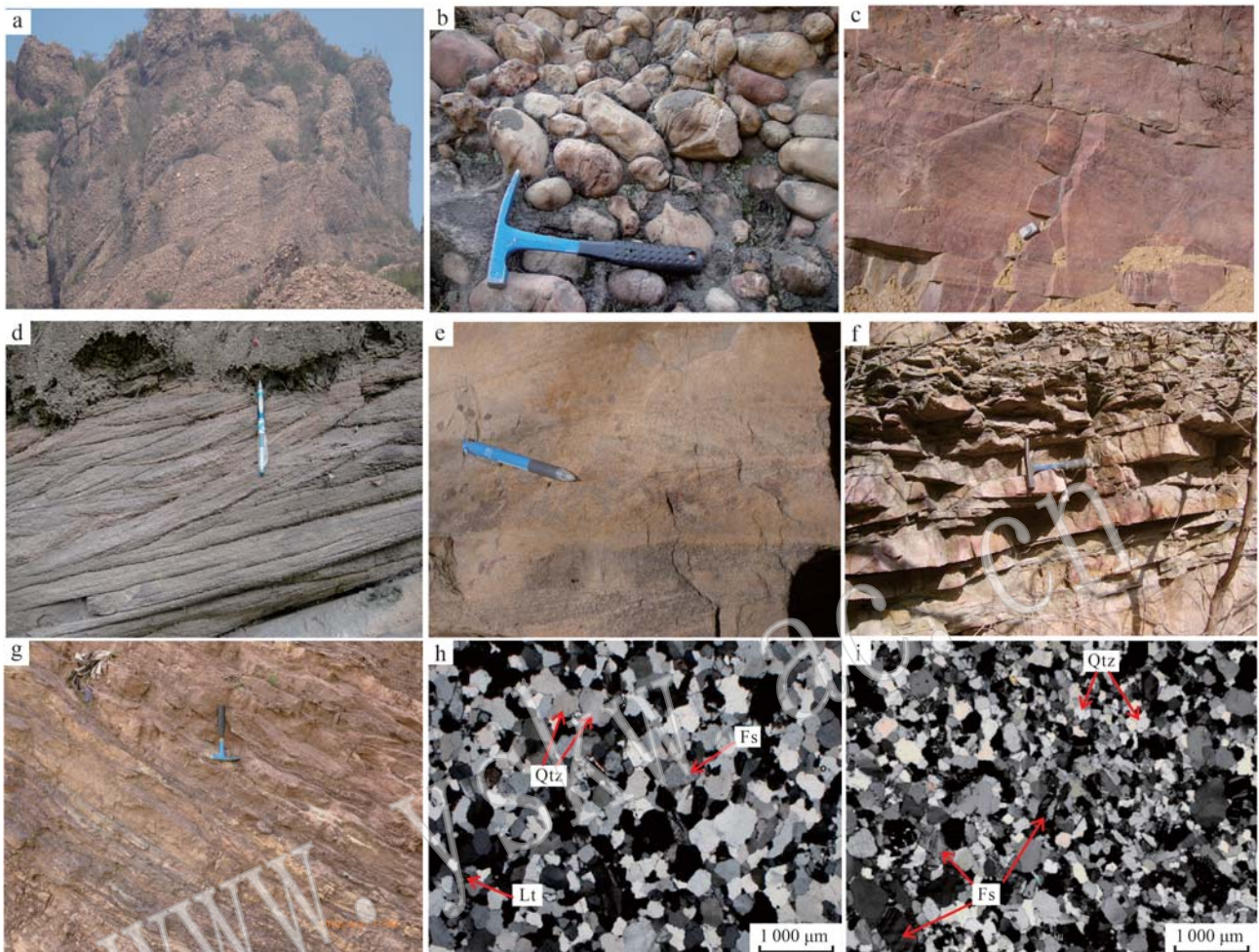


图2 常州沟组碎屑岩沉积构造及显微特征

Fig. 2 The sedimentary structure and microscopic characteristics of clastic sedimentary rocks from Changzhougou Formation

a—常州沟组底部砾岩宏观特征；b—砾岩叠瓦状构造；c—大型板状交错层理砂岩；d—浪成波纹层理砂岩；e—双向交错层理砂岩；f—脉状层理砂岩；g—波状层理细砂岩；h—石英砂岩正交偏光照片；i—长石石英砂岩正交偏光照片；Qtz—石英；Fs—长石；Lt—岩屑  
a—field characteristics of conglomerate；b—imbricate structure of conglomerate；c—large tabular cross bedding sandstone；d—wave ripple bedding sandstone；e—bidirectional cross bedding sandstone；f—flaser bedding sandstone；g—wavy bedding sandstone；h—cross-polarized microscopic photomicrograph of quartz sandstone；i—cross-polarized microscopic photomicrograph of feldspathic quartz sandstone；Qtz—quartz；Fs—feldspar；Lt—lithic

1)，均为常州沟组代表性岩石，新鲜无蚀变，组构清晰，且无脉体穿插。样品 PM9-1、PM9-2 位于山叶口剖面，岩性均为粉黄色长石砂岩，细粒砂状结构，发育交错层理。样品 PM19-2、PM19-3 位于王家湾子剖面，岩性分别为紫红色岩屑长石砂岩和紫红色长石石英砂岩，中粒砂状结构；样品 PM26-1、PM36-1 分别产自迁西县剖面和黄岩剖面，岩性均为浅紫红色长石石英砂岩；样品 PM37-1、PM37-2 位于崔家庄剖面，岩性分别为灰白色岩屑石英砂岩和灰白色石英砂岩。另外，在王家湾子常州沟组剖面砾岩层之上的砂岩层段由下至上依次采集了 8 件砂岩样品

进行了粒度分析，样品编号依次为 PM19-1~PM19-8，岩性主要为紫红色中粒岩屑长石砂岩、紫红色中粒长石石英砂岩、浅灰色细粒石英砂岩等。

岩矿鉴定、全岩主微量元素分析和粒度分析均在河北地矿局廊坊实验室完成。主量元素采用 XRF 法，使用荷兰帕纳科公司研制的 Axios X 射线荧光光谱仪测定，FeO 应用氢氟酸-硫酸溶样、重铬酸钾滴定的容量法测试，分析精度优于 2%；稀土和微量元素采用 X Series II 型等离子体光谱仪 (ICP-MS) 测定，分析精度优于 1%~5%。因为所取样品均为致密岩石，故将其磨制成薄片，在奥林巴斯 BX53

偏光显微镜下进行粒度分析, 每件样品统计和分析颗粒数量均大于 300 颗, 且碎屑成分统计分析的成分颗粒大于 0.03 mm。

### 3 岩相学特征

常州沟组主体岩性为石英砂岩、长石石英砂岩等。

石英砂岩由陆源砂屑和填隙物组成(图 2h)。陆源碎屑成分为石英(95%)、长石(1%~3%)、岩屑(1%~5%)组成, 次圆状-次棱角状, 粒度以 0.05~0.25 mm 的细粒为主, 部分 0.5~0.85 mm 的粗粒及 0.25~0.5 mm 的中粒相对呈层状分布。石英粒内轻波状消光, 常见具次生加大边; 长石为钾长石, 轻高岭土化, 局部具次生加大边; 岩屑成分为硅质岩、石英岩等, 局部见少量叶片状白云母。填隙物(1%~5%)由硅质胶结物和少量粘土质杂基组成, 填隙状分布于陆源砂屑间, 属于颗粒支撑, 孔隙式胶结, 粘土质重结晶为自生长石, 呈钾长石的次生加大边; 硅质重结晶为石英的次生加大边。

长石石英砂岩由陆源砂屑和填隙物组成(图 2i)。陆源碎屑主要为石英(85%~90%), 其次为长石及少量岩屑, 次棱角-次圆状, 杂乱分布, 粒度一般 0.25~0.5 mm 为中砂, 部分 0.5~0.9 mm 为粗砂, 部分 0.05~0.25 mm 为细砂。长石主为钾长石, 少数为斜长石, 钾长石高岭土化, 部分可见格子双晶, 多见次生加大边; 斜长石高岭土化、绢云母化。石英粒内轻波状消光, 部分可见次生加大边。岩屑成分为硅质岩、石英岩等。填隙物由硅质胶结物及少量粘土质杂基组成, 颗粒支撑, 接触式胶结。硅质胶结物生长在石英砂粒边缘, 成为石英的次生加大边, 使石英砂粒互相接触。粘土质多数受重结晶作用成为钾长石的次生加大边; 少数已变为鳞片状绢云母等, 片径<0.02 mm, 填隙状分布。

### 4 地球化学特征

#### 4.1 主量元素

研究区常州沟组砂岩样品  $\text{SiO}_2$  含量很高(表 1), 范围为 79.13%~96.28%, 平均 91.2%, 非常接近于 Condie(1993)提出的典型石英砂岩(平均值 91.5%)。  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较高, 为 2.17%~9.78%, 平均 4.21%。  $\text{CaO}$  含量较低, 为 0.04%~0.12%, 平

均 0.06%。  $(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}+\text{MgO})$  范围为 0.24%~2.19%, 平均 0.96%。  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  值非常低, 范围为 0.02~0.12, 平均 0.05。砂岩样品  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值较高, 在 21.33~87.50 之间, 平均 35.62。  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$  值总体较低, 除样品 PM9-2 含少量粘土杂基,  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$  值略高外, 其余样品  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$  值为 19.77~34.76, 表明粘土矿物组分含量较少。

#### 4.2 微量元素

8 件砂岩样品稀土元素地球化学分析结果显示, 稀土元素总量变化范围较大, 介于  $55.32\times 10^{-6}$ ~ $220.31\times 10^{-6}$  之间(表 1)。轻重稀土元素比值为 7.90~13.43, 平均 10.12, 轻稀土元素相对富集, 重稀土元素相对亏损。  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  值范围为 7.66~14.68, 平均 9.22;  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$  为 2.51~6.68, 平均 4.87;  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  为 1.26~1.62, 平均 1.48。具有显著的 Eu 负异常,  $\delta\text{Eu}$  值为 0.45~0.72, 平均 0.57。Ce 异常不明显,  $\delta\text{Ce}$  值为 0.94~1.00, 平均 0.98。在球粒陨石标准化稀土配分模式总体呈右倾型, 轻稀土元素陡倾, 重稀土元素平坦。澳大利亚后太古宙平均页岩(PAAS)标准化稀土配分曲线表现出平坦配分模式(图 3), 说明其原始物质主要来源于上地壳。

常州沟组砂岩样品部分大离子亲石元素含量相对较高(表 1), 如:  $\text{Rb}$  ( $10.65\times 10^{-6}$ ~ $101.20\times 10^{-6}$ )、 $\text{Sr}$  ( $11.70\times 10^{-6}$ ~ $45.58\times 10^{-6}$ )、 $\text{Ba}$  ( $19.67\times 10^{-6}$ ~ $431.00\times 10^{-6}$ )。高场强元素 Zr 也具有较高含量, 为  $96.79\times 10^{-6}$ ~ $687.30\times 10^{-6}$ , Th、U 含量分别为  $3.93\times 10^{-6}$ ~ $21.93\times 10^{-6}$ 、 $0.74\times 10^{-6}$ ~ $4.09\times 10^{-6}$ , 平均为  $10.77\times 10^{-6}$  和  $2.15\times 10^{-6}$ , 二者均与中国东部大陆上地壳 Th、U 含量( $9.00\times 10^{-6}$ 、 $1.60\times 10^{-6}$ )相近(高山等, 1999)。在大陆上地壳标准化微量元素蛛网图上(图 3), 各地层样品显示出相似的特征, 除大离子亲石元素 Sr 和高场强元素 Nb、Ta 明显亏损以外, 其它大部分微量元素与大陆上地壳元素丰度相当或略低。

### 5 粒度特征

本次在王家湾子常州沟组剖面采集的 8 件砂岩样品采用薄片图像法进行粒度分析。每件样品在镜下测量大于 300 个颗粒的最大视粒径, 并换算成  $\phi$  值, 然后以 0.25  $\phi$  为间隔分组, 分别统计各组内颗粒

表1 常州沟组砂岩主量元素 ( $w_B/\%$ ) 及微量元素 ( $w_B/10^{-6}$ ) 分析结果Table 1 Major ( $w_B/\%$ ) and trace ( $w_B/10^{-6}$ ) element contents of sandstones from Changzhougou Formation

编号	PM9-1	PM9-2	PM19-2	PM19-3	PM26-1	PM36-1	PM37-1	PM37-2
岩性	长石砂岩	长石砂岩	岩屑长石砂岩	长石石英砂岩	长石石英砂岩	长石石英砂岩	岩屑石英砂岩	石英砂岩
SiO <sub>2</sub>	87.76	79.13	90.09	92.43	93.52	94.53	96.28	95.84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.91	9.78	4.35	3.45	3.11	2.54	2.17	2.38
TiO <sub>2</sub>	0.11	0.36	0.10	0.19	0.06	0.11	0.05	0.09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.05	1.46	0.97	0.61	0.01	0.34	0.08	0.07
FeO	0.14	0.23	0.38	0.22	0.41	0.17	0.05	0.07
CaO	0.07	0.06	0.12	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04
MgO	0.22	0.47	0.10	0.08	0.05	0.08	0.10	0.12
K <sub>2</sub> O	3.77	7.00	3.40	2.54	2.3	1.82	0.64	0.74
Na <sub>2</sub> O	0.10	0.08	0.10	0.09	0.09	0.07	0.03	0.03
MnO	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.001	0.001
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.021	0.046	0.024	0.021	0.019	0.012	0.016	0.014
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	0.07	0.12	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /(CaO+Na <sub>2</sub> O)	34.76	69.86	19.77	26.54	22.21	21.17	27.13	34.00
CIA	57.7	55.86	52.00	54.10	53.63	54.13	73.23	72.75
CIW	96.07	98.68	93.04	95.29	94.14	93.47	95.65	96.41
La	25.70	32.49	31.05	45.38	12.93	11.41	8.86	10.65
Ce	47.22	62.30	57.68	86.88	23.91	21.38	19.48	19.68
Pr	5.14	6.90	6.47	9.84	2.67	2.57	2.80	2.15
Nd	17.08	24.49	22.04	33.87	9.33	9.29	12.97	7.79
Sm	2.42	3.80	3.86	5.66	1.55	1.76	2.22	1.34
Eu	0.49	0.86	0.56	0.81	0.32	0.34	0.27	0.23
Gd	2.23	3.53	3.59	5.23	1.25	1.58	1.49	1.34
Tb	0.29	0.54	0.56	0.82	0.20	0.25	0.21	0.23
Dy	1.68	3.26	3.28	4.75	1.16	1.48	1.22	1.39
Ho	0.36	0.65	0.64	0.90	0.22	0.28	0.22	0.28
Er	1.11	2.00	1.90	2.54	0.63	0.81	0.69	0.84
Tm	0.20	0.31	0.31	0.41	0.11	0.13	0.11	0.14
Yb	1.18	1.94	1.89	2.61	0.72	0.84	0.78	0.86
Lu	0.25	0.46	0.31	0.65	0.15	0.18	0.17	0.23
Y	9.34	17.23	15.00	19.95	4.85	6.74	6.16	8.18
ΣREE	114.68	160.73	149.14	220.31	59.99	59.04	57.64	55.32
LREE/HREE	13.43	10.33	9.75	10.18	11.44	8.43	9.53	7.90
δCe	0.99	1.00	0.98	0.99	0.98	0.95	0.94	0.99
δEu	0.64	0.72	0.46	0.46	0.70	0.62	0.45	0.52
Rb	101.20	96.06	73.18	49.65	35.36	34.78	10.65	17.92
Sr	45.58	39.85	25.72	21.03	43.51	11.70	43.28	25.91
Ba	416.60	431.00	278.40	200.60	233.20	121.60	19.67	38.81
Cr	22.46	46.18	23.80	29.93	19.78	24.41	14.56	12.88
Ni	7.42	13.19	7.45	8.05	8.08	8.36	3.70	3.79
Nb	3.76	6.25	3.64	4.62	1.31	2.82	0.95	1.70
Ta	0.46	0.56	0.03	0.13	0.84	0.65	0.10	0.19
Zr	96.79	297.90	103.30	687.30	131.9	133.90	115.16	170.88
Hf	2.73	8.44	0.15	1.90	8.86	14.12	3.43	5.13
Th	7.57	10.24	11.28	12.78	13.97	21.93	3.93	4.43
U	1.24	1.49	2.77	2.95	2.22	4.09	0.74	1.67
Ga	6.43	8.82	4.12	3.76	2.96	3.13	2.36	2.43
Co	0.68	6.23	0.52	0.59	0.60	0.51	0.43	0.38
V	76.08	96.81	20.91	20.43	17.08	20.55	17.08	22.24
Sc	3.05	5.8	1.74	2.61	1.19	1.37	1.44	1.65
Th/U	6.10	6.87	4.07	4.33	6.29	5.36	5.31	2.65
Rb/Sr	2.22	2.41	2.85	2.36	0.81	2.97	0.25	0.69
Ba/Sr	9.14	10.82	10.82	9.54	5.36	10.39	0.45	1.50
Th/Sc	2.48	1.76	6.49	4.89	11.77	16.01	2.74	2.68

注: CIA =  $[Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100$ , CIW =  $[Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O)] \times 100$ , 其中 CaO\* 为校正后含量 ( $CaO_{\text{剩余}} = CaO - P_2O_5 \times 10/3$ , 若  $CaO_{\text{剩余}} < Na_2O$ , 令  $CaO^* = CaO_{\text{剩余}}$ ; 若  $CaO_{\text{剩余}} > Na_2O$ , 令  $CaO^* = Na_2O$ );  $\delta Eu = 2Eu_N / (Sm_N + Gd_N)$ ,  $\delta Ce = 2Ce_N / (La_N + Pr_N)$ 。

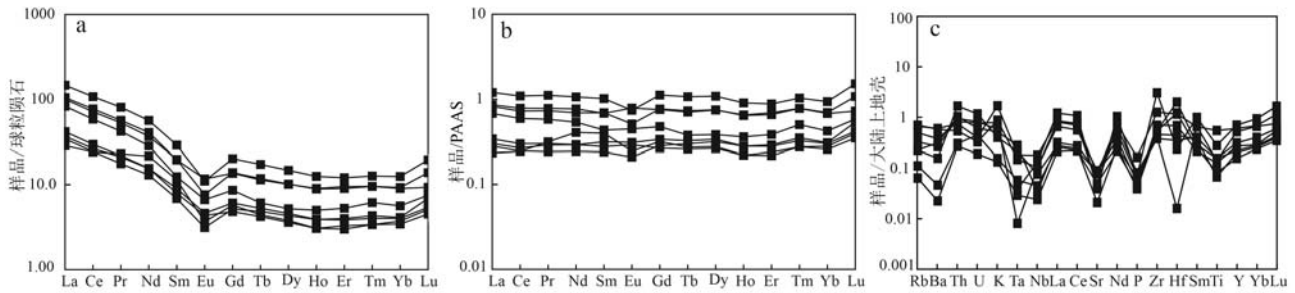


图 3 常州沟组砂岩球粒陨石与 PAAS 标准化稀土元素配分图及大陆地壳标准化微量元素蛛网图 [ 球粒陨石及大陆地壳标准化值据 Taylor and McLennan(1985); PAAS 标准化数据据 McLennan(1989) ]

Fig. 3 Chondrite and PAAS normalized REE patterns and continental crust-normalized trace element pattern of sandstones in Changzhougou Formation (chondrite and continental crust values after Taylor and McLennan, 1985; PAAS normalized values after McLennan, 1989)

百分比及累计百分比，各样品的粒度特征参数见表 2，在此基础上绘制频率曲线、累积曲线和概率累积

表 2 常州沟组剖面砂岩粒度特征参数

Table 2 Grain size character parameters of sandstones in Changzhougou Formation

样品编号	PM19-1	PM19-2	PM19-3	PM19-4	PM19-5	PM19-6	PM19-7	PM19-8
Mz/ $\phi$	1.67	0.56	1.18	1.46	2.86	3.39	2.66	2.38
$\sigma_1/\phi$	0.93	0.94	0.91	0.66	0.55	0.44	0.62	0.47
SK <sub>1</sub>	-0.14	0.14	-0.01	-0.24	-0.19	0.02	-0.08	0.03
K <sub>C</sub>	1.11	0.94	0.81	1.37	1.05	1.45	1.12	1.23

注：Mz—平均粒径， $\sigma_1$ —标准偏差，SK<sub>1</sub>—偏度，K<sub>C</sub>—峰度。

## 6 讨论

### 6.1 沉积环境分析

常州沟组底部发育不稳定砾岩，分布于盆地边缘变质基底古隆起带。野外地质调查发现，砾岩在迁安市王家湾子、山叶口等地最为发育，呈楔状向北西方向散开变薄尖灭，宏观呈扇状展布。砾石成分主要为变质石英砂岩、脉石英和石英岩（约占 80%±），磁铁石英岩、变质花岗岩、片麻岩等（20%±）少量。砾石大小一般 5~20 cm，大者可达 30 cm 以上，砾石圆度和球度均好，以次圆状、圆状为主，砾石支撑为主，杂基支撑次之。砾岩中发育叠瓦状构造、正粒序层理等，垂向沉积序列具向上逐渐变细。以上这些特征指示该套砾岩形成于冲积扇环境。砾岩之上主要为砂岩，其中下部以紫红色中粗粒长石砂岩、岩屑长石砂岩为主，夹砾岩透镜体（图 2c），发育大型板状交错层理、槽状交错层理、平行层理及冲

刷面等，具有辫状河相砂岩特征；中部、上部为棕黄色、黄白色中细粒长石石英砂岩、长石砂岩，夹灰色薄层粉砂岩，发育浪成波纹层理、双向交错层理砂岩、脉状层理、波状层理等（图 2c），指示其形成于具有双向水流的潮坪环境。

粒度分析数据显示，常州沟组下部样品 PM19-1、PM19-2 和 PM19-3 平均粒径为 0.56~1.67  $\phi$ ，以中粗砂为主；粒度偏差较大， $\sigma_1$  介于 0.91~0.94 之间，表明砂岩分选性中等；偏度（SK<sub>1</sub>）为 -0.14~0.14；峰度（K<sub>C</sub>）为 0.81~1.11，尖锐程度中等。这 3 件样品的粒度频率曲线具明显的双峰特征（图 4a），且粒度范围较宽，具有河流砂体的粒度分布特征；累计曲线不够陡直（图 4b），分选中等；概率累积曲线呈两段式，由跳跃总体和悬浮总体组成，跳跃总体（A）和悬浮总体（B）之间细截点（S 截点）为 2.12~3  $\phi$ ，表明水动力条件较强；跳跃总体（A）范围为 -1~3  $\phi$ ，从中砂到粗砂级别均有，斜率在 40°左右（图 4c），其中样品 PM19-1 呈低斜率多段式，显

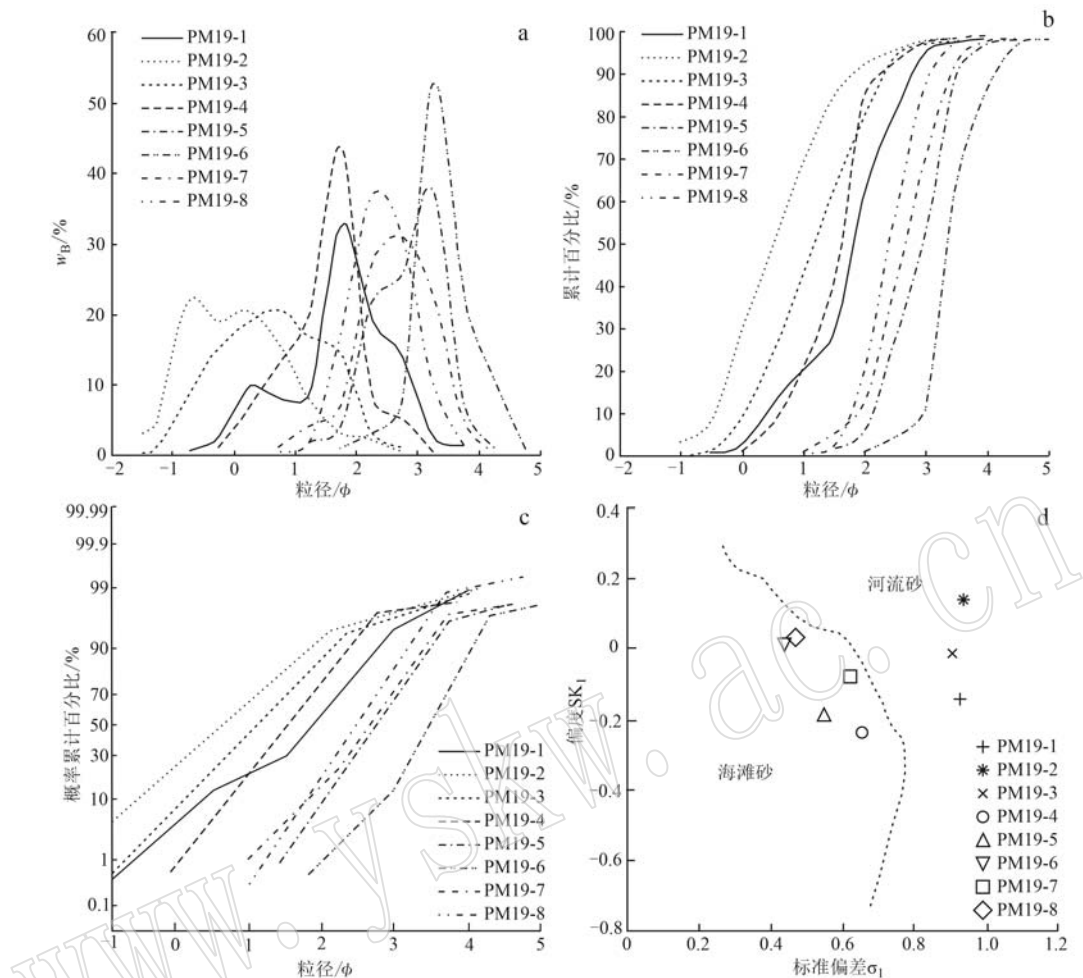


图4 常州沟组砂岩粒度分析图解

Fig. 4 Grain size analysis diagrams of sandstones from Changzhougou Formation

a—频率曲线; b—粒度累积曲线; c—粒度概率累积曲线; d—标准偏差-偏度离散图

a—frequency curve; b—accumulation curve; c—probability accumulation curve; d—standard deviation skewness dispersion diagram

示出河流环境下不稳定动荡水流堆积的特点。其余5件样品依次采自常州沟组中部和上部, 粒度特征与下部砂岩明显不同, 平均粒径( $M_z$ )为 $1.46 \sim 3.39 \phi$ , 主要为中细砂; 粒度偏差 $\sigma_1$ 在 $0.44 \sim 0.66$ 之间, 表明砂岩分选性中等至较好; 偏度( $SK_1$ )为 $-0.24 \sim 0.03$ , 近于对称或负偏态; 峰度( $K_c$ )为 $1.05 \sim 1.45$ , 属尖锐型。粒度频率曲线呈明显的单峰形态(图4a), 且粒度分布范围较窄; 累计曲线陡直(图4b), 分选较好; 概率累积曲线呈两段式, 跳跃总体(A)和悬浮总体(B)之间细截点(S截点)为 $2.78 \sim 4.29 \phi$ ; 跳跃总体(A)范围为 $0 \sim 4.29 \phi$ , 斜率为 $50^\circ \sim 55^\circ$ (图4c), 其中样品PM19-6跳跃总体被分成两个直线段, 是由于其中包括了冲流和回流两种沉积作用, 具有滨岸砂体的粒度特点。另外在

标准偏差-偏度离散图(Friedman, 1967), 常州沟组下部3件砂岩样品均分布于右侧河流砂区域; 5件中部、上部砂岩样品落入左侧海滩砂范围(图4d)。通过上述岩相学特征、沉积构造及纵向变化和粒度分析, 研究区常州沟组沉积环境演化由下至上依次划分为冲积扇→辫状河→碎屑潮坪。

## 6.2 风化条件及古气候分析

砂岩成分除受源区岩石性质决定以外, 风化作用、搬运作用、成岩作用等过程对其成分影响较大。为了定量研究碎屑岩的源区岩石的化学风化程度, Nesbitt等(1982)利用地球化学的方法研究加拿大古元古代Huronian超群碎屑岩过程中, 首次提出化学蚀变指数CIA的概念, 并将其作为判断源区风化程度的指标。该指数对沉积源岩形成时的气候具有一



定的指示意义(冯连君等, 2003; 王自强等, 2006; 童勤龙等, 2013; 张英利等, 2020; 王金贵等, 2020)。常州沟组碎屑岩化学蚀变指数 CIA 介于 52.00~73.23 之间, 似乎暗示源区处于中低级风化程度, 然而在 A-CN-K 图解(图 5a)中可以看到, 数据点集中分布于 A-K 连线钾长石、白云母和伊利石附近, 表明样品一定程度遭受钾交代作用, 岩相学特征也能得到证实, 表现为粘土质重结晶为钾长石的次生加大边。钾交代作用会使钾元素增多, 从而导致 CIA 值偏小, 那么实际源区风化程度应更高。在 A-CN-K 图解还可以看出, 斜长石几乎风化完全, 斜长石中 Ca 和 Na 元素亏损, Al 元素强烈富集, 这与砂岩组分中的长石端员主要为钾长石相一致, 反映物源区风化比较强烈。为消除  $K_2O$  的影响, Harnois (1988) 引入了化学风化作用指数 (CIW), CIW 值越高代表的物源区风化程度越强。常州沟组碎屑岩化学风化作用指数较高, CIW 值范

围为 93.04~98.68, 平均 95.34, 指示源区风化程度较强, 反映的物源区古气候温暖、潮湿。

在风化作用和氧化作用中, U 相对于 Th 更容易流失, 沉积岩的 Th/U 值随着风化作用强度的增加而增加 (Taylor and McLennan, 1985)。通常情况下, 当 Th/U 值 >4 时, 沉积岩石的形成与风化历史有关, 而 >5 时反映了母岩曾经历了明显的风化作用过程 (McLennan and Taylor, 1991)。除 1 件样品 Th/U 值较低以外, 其余 7 件常州沟组砂岩样品 Th/U 值在 4.07~6.87 之间, 平均 5.48, 明显高于上地壳平均值 (3.8) (图 5b), 反映了中等-较高的化学风化程度。一般以化学作用为主的风化过程是在相对长期而稳定的构造背景下进行的, 不稳定碎屑组份(岩屑等)可以充分地溶蚀分解而只留下成份稳定的碎屑(石英等)(和政军等, 2005), 这与常州沟组砂岩中含有大量石英及硅质岩、石英岩等稳定组份的岩相学特征相吻合, 再次表明气候环境应为温湿气候。

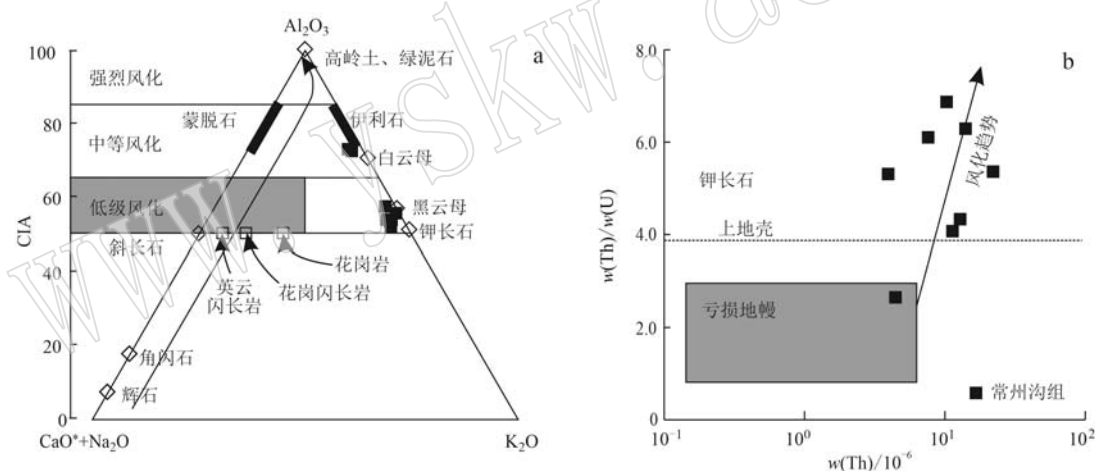


图 5 常州沟组砂岩 A-CN-K 图解(a, 据 Nesbitt and Young, 1982)和 Th/U-Th 图解(b, 据 Gu *et al.*, 2002)

Fig. 5 A-CN-K (a, after Nesbitt and Young, 1982) and Th/U-Th (b, after Gu *et al.*, 2002) diagram of sandstones from Changzhougou Formation

### 6.3 物源分析

碎屑岩中一些微量元素具有非迁移性, 在母岩风化、搬运和成岩过程中相对稳定、难于溶解, 随沉积物沉积成岩后仍能反映源岩的地球化学特征, 成为识别物源性质很好的指示标签, 如大离子亲石元素 Rb、Ga、Ba、Sr 等和高场强元素 Nb、Ti、Hf、Zr 等。Zr 主要存在于锆石中, 代表长英质组分, 而 Cr 主要存在于铬铁矿、橄榄石和辉石中, 可以代表超镁铁-镁铁质组分, 因此 Cr/Zr 值可以反映源区镁铁质与长英质岩石对沉积物的相对贡献 (Wronkiewicz and

Condie, 1989)。Th 是高度不相容元素, 而 Sc 是较相容元素, 它们在沉积过程中的重矿物分异效应小, Th 在长英质岩石中趋于富集, 而 Sc 则在铁镁质岩石中富集, 那么 Th/Sc 值也可以反映源区中镁铁质与长英质物质的相对比例(沈渭洲等, 2009; 魏震洋等, 2009)。常州沟组砂岩 Cr/Zr 值介于 0.04~0.23 之间, 平均 0.15, 明显低于 1; Th/Sc 值为 1.76~16.01, 平均 6.10, 反映它们主要来源于长英质岩石。样品 Ba/Sr 值为 0.45~10.82, 平均值为 7.25, Rb/Sr 值为 0.25~2.97, 平均值为 1.82, 均明

显高于大陆上地壳值(1.57 和 0.32, Taylor and McLennan, 1985) 和中国东部上地壳值(2.55 和 0.31, 高山等, 1999), 说明本区物源来自上地壳, 而该比值较高的原因是本区 Sr 值较低, 可能受其在物源隆起区强烈风化作用的影响。常州沟组砂岩具有轻稀土元素富集、重稀土元素平坦和铕负异常的稀土元素配分曲线(图 3a), 也指示沉积母岩主要为长英质。为了更明确地反映物源区性质, 利用 La/Th-Hf 源岩属性判别图解对研究区常州沟砂岩的源岩属性进行了分析。在 La/Th-Hf 图解上(图 6), 常州沟样品大部分落入长英质物源区和长英质、基性岩混合源区, 并有少量古老沉积岩成分加入, 再次表明源区属性主要为上地壳环境。另外, 根据肖竣文(2014)对迁安、迁西地区常州沟组底部砾岩观察统计, 砾石岩性主要为石英砂岩(45%)、长石石英砂岩(21%)、长石岩屑砂岩(6%)、硅质岩(11%)、含矿石英岩(6%)、岩屑石英砂岩(11%), 进一步指示原岩成分以长英质岩石为主。

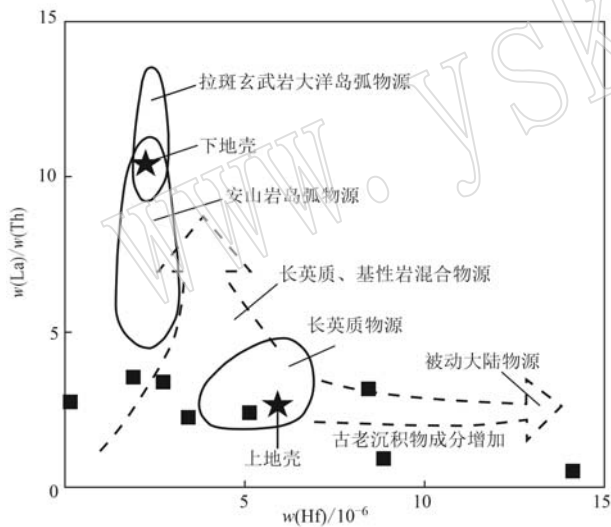


图 6 常州沟组砂岩 La/Th-Hf 源岩判别图解(据 Floyd and Leveridge, 1987)

Fig. 6 Source rock discrimination of sandstones from Changzhougou Formation (after Floyd and Leveridge, 1987)

#### 6.4 构造属性分析

吕梁运动后, 华北克拉通结晶基底形成, 从此拉开了地台演化阶段的序幕(赵宗溥, 1993; 赵太平等, 2015, 2019)。古元古代晚期至中元古代早期, 华北克拉通进入伸展构造体制, 基底抬升, 产生基性岩墙群和非造山岩浆活动, 其内部和边缘发生了一系列裂解事件, 熊耳裂陷槽、燕辽裂陷槽、渣尔泰

-白云鄂博裂陷槽相继打开, 并开始接受巨量的中-新元古代的沉积(翟明国等, 2007, 2014; 耿元生等, 2019)。一直以来地质学家们对燕辽裂陷槽的盆地类型及发展演化史仍存在多种认识。赵太平(2004)、胡良俊等(2007)根据大庙斜长岩杂岩体和大红峪组高钾火山岩的形成时代和成因, 认为燕辽裂陷槽属克拉通内部裂解(即内陆克拉通盆地), 在盆地发展演化过程中虽有火山作用, 但并未达到大陆地壳裂开、洋壳出现的程度, 是一个夭折的板内裂谷。黄学光等(2001)通过对区域地层调查和研究, 认为燕辽裂陷槽是华北原地台北缘东西向大规模破裂时伸进大陆内部的一支废弃裂谷。乔秀夫等(2007)根据中新元古代地层中存在的地震记录和火山活动, 认为燕辽裂陷槽是弧后扩张的产物, 代表沟-弧-盆板块体系下的弧后扩张盆地。曲永强等(2010)和潘建国等(2013)通过对中元古界几个重要不整合面的分析, 认为燕辽裂陷槽的演化经历了裂谷-被动大陆边缘-活动大陆边缘-碰撞抬升-伸展几个阶段, 即经历大陆内裂谷-大陆间裂谷-大洋的完整过程。常州沟组作为燕辽裂陷槽初始沉积盖层, 可以记录地壳的初始破裂及裂谷作用的早期过程。燕山地区中段常州沟组砂岩主量元素具有高  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{K}_2\text{O}$ , 低  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MgO}$  的特点。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  值大致表示石英的富集程度, 可以作为碎屑沉积物成熟度的指标(Roser and Korsch, 1999; 顾雪祥等, 2003)。常州沟组  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  值非常低, 平均 0.05, 说明石英比较富集, 显示砂岩具有较高的成分成熟度; 较低的  $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$  值(平均 0.96%), 表明岩石中相对基性的组分很少;  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$  值分别为 21.33~87.50(平均 35.62) 和 19.77~69.86(平均 31.93), 均远高于被动大陆边缘环境下形成的砂岩(表 3)。在  $\text{TiO}_2 - (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 - (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  构造背景判别图(图 7)中, 样品均非常靠近或落入被动大陆边缘区(包括稳定大陆边缘的板内盆地和克拉通内部盆地)。另外, 沉积岩中的一些微量元素, 如 La、Th、Zr、Ti、Sc 等活动性较弱, 能够很好地反映母岩性质和盆地构造环境(Taylor and McLennan, 1985; Bhatia, 1983)。通过与不同构造环境砂岩地球化学特征参数对比, 可以发现常州沟组砂岩的  $\delta\text{Eu}$ 、 $\text{Th}/\text{U}$ 、 $\text{La}/\text{Sc}$ 、 $\text{Th}/\text{Sc}$ 、 $\text{Rb}/\text{Sr}$ 、 $\text{Ba}/\text{Sr}$  值与被动大陆边缘砂岩相似(表 3)。在  $\text{Ti}/\text{Zr} - \text{La}/\text{Sc}$  构造环境判别图(图 8a)中, 除 2 件样品在

表 3 常州沟组砂岩与不同构造环境砂岩地球化学参数对比表

Table 3 Geochemical parameter comparison between the sandstones from Changzhougou Formation and the sandstone from various tectonic setting

参数	常州沟组	被动大陆边缘	活动大陆边缘	大陆岛弧	大洋岛弧	EC	上地壳
SiO <sub>2</sub>	91.2	81.95	73.86	70.69	58.83	65.46	66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.21	8.41	12.89	14.04	17.11	13.65	15.2
TiO <sub>2</sub>	0.13	0.49	0.46	0.64	1.06	0.65	0.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	0.05	0.1	0.18	0.2	0.29	0.2	7.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup> +MgO	0.96	2.89	4.63	6.79	11.73	7.89	6.7
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	35.62	1.6	0.99	0.61	0.39	0.94	0.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /(CaO+Na <sub>2</sub> O)	31.93	4.15	2.56	2.42	1.72	2.25	0.87
δEu	0.57	0.55	0.6	0.8	1.04	0.73	0.65
Th/U	5.12	5.6	4.8	4.6	2.1	5.77	3.8
La/Sc	10.14	6.25	4.55	1.82	0.55	2.32	2.73
Th/Sc	6.1	3.06	2.59	0.85	0.15	0.6	0.97
Rb/Sr	1.82	1.19	0.89	0.65	0.05	0.31	0.32
Ba/Sr	7.25	4.7	3.8	3.55	0.95	2.55	1.57

注：构造环境特征参数引自 Bhatia (1983)；EC 代表中国东部地壳 (高山等, 1999)；上地壳值据 Taylor and McLennan (1985)；主量元素  $w_B/\%$ ，微量元素  $w_B/10^{-6}$ 。

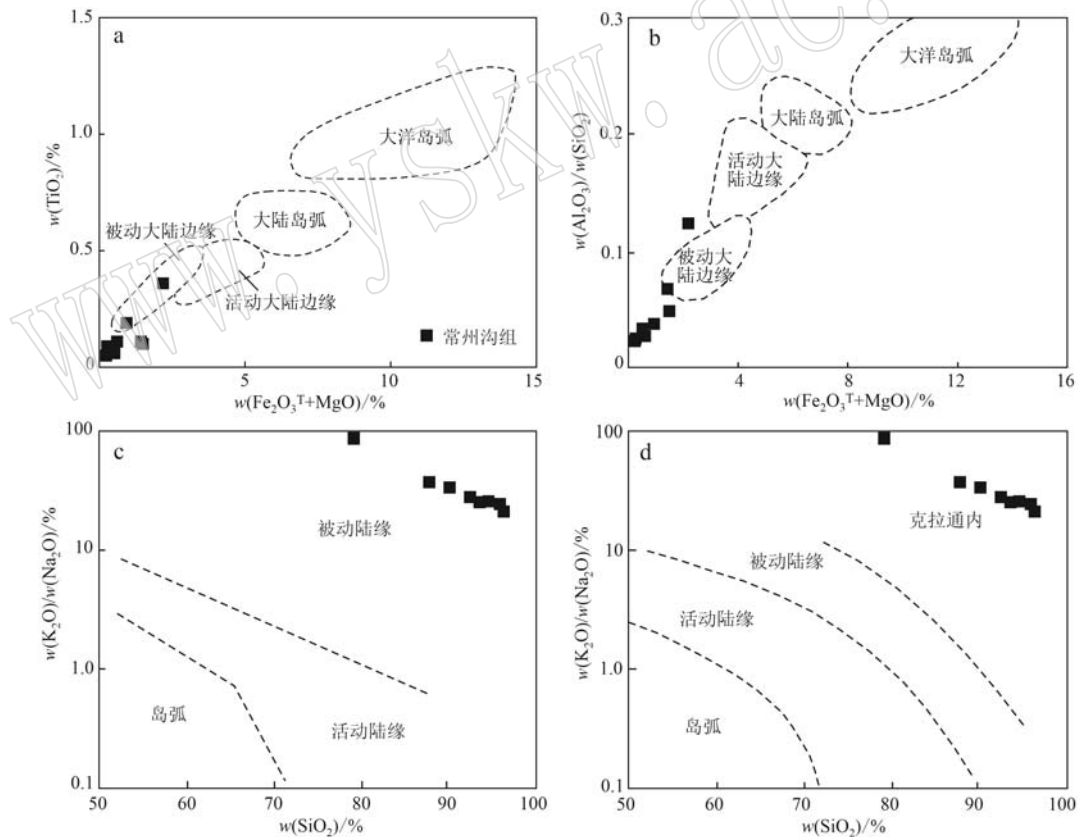


图 7 常州沟组砂岩主量元素构造背景判别图(a, b 据 Bhatia, 1983; c 据 Roser and Korsch, 1986; d 据和政军等, 2003)

Fig. 7 Tectonic setting discrimination diagrams based on the constant elements for sandstones from Changzhougou Formation (a, b after Bhatia, 1983; c after Roser and Korsch, 1986; d after He Zhengjun *et al.*, 2003)

图外，其余样品均位于被动大陆边缘区域；在 Th-Sc-Zr/10 三角图解(图 8b)，大部分样品分布于被动大陆边缘区或其周围。结合物源分析，常州沟组

物源主要来自克拉通，暗示燕辽裂陷槽应属于克拉通内部裂解。

那么燕辽裂陷槽盆地基底是否裂开出现洋壳，

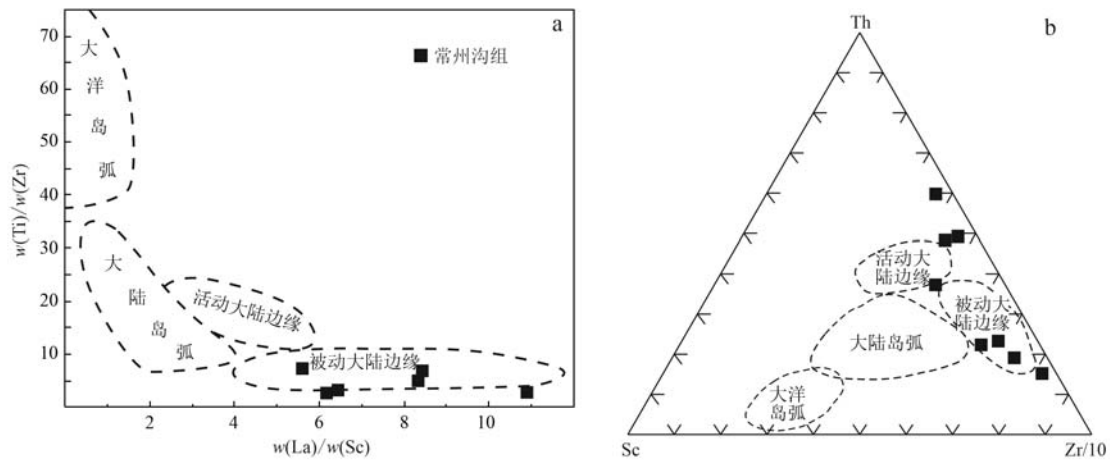


图8 常州沟组砂岩 Ti/Zr-La/Sc 和 Th-Sc-Zr/10 构造判别图解(据 Bhatia *et al.*, 1986)

Fig. 8 Tectonic setting discrimination diagrams of Ti/Zr-La/Sc, Th-Sc-Zr/10 of sandstones from Changzhougou Formation (after Bhatia *et al.*, 1986)

如果出现大洋环境,则意味着裂解深度已达上地幔,沉积物中将会有幔源物质加入。由于幔源物质与上地壳物质在成分上差异十分明显,因而一些抗扰动能力强的稀土元素和相对不活泼元素对的比值变化能敏感反映沉积时期内是否有幔源物质加入 (McLennan *et al.*, 1990; 于炳松等, 1998)。本区常州沟组的 Eu 负异常明显, 它们的  $\delta\text{Eu}$  值为 0.45~0.72, 平均 0.57, 接近上地壳, Tb/Yb 值范围 0.25~0.31, 平均 0.28<1, La/Sc 值为 5.60~17.87, 平均 10.14>2.8, La/Th 值为 0.52~3.55, 平均 2.37 接近 2.8, Th/Sc 值为 1.76~16.01, 平均 6.10>1 (沈渭洲等, 2009)。这些特征参数指示, 常州沟期燕辽裂陷槽属于华北克拉通陆壳基底上形成的滨浅海, 未达到大陆地壳裂开、洋壳出现的程度, 与前人根据岩浆岩等方面研究的结构相一致, 从不同方面印证了燕辽裂陷槽的构造演化特点。

## 7 结论

(1) 根据岩性组合、沉积构造、粒度分析结果, 将燕山中段迁西地区常州沟组沉积环境演化由下至上依次划分为冲积扇→辫状河→碎屑潮坪。

(2) 通过化学蚀变指数 CIA、A-CN-K 图解、Th/U-Th 图解和古气候判别图综合分析, 常州沟组源区经历较强的风化作用, 古气候温暖、潮湿。

(3) 燕山中段迁西地区常州沟组砂岩的源区属性主要为上地壳环境, 原岩成分以长英质岩石为

主, 且源区构造属性非常稳定, 物源主要来自克拉通。

(4) 燕山地区中段常州沟组砂岩成熟度很高, 燕辽裂陷槽应属于华北克拉通陆壳基底上形成的滨浅海, 未达到大陆地壳裂开、洋壳出现的程度。

**致谢** 中国地质调查局天津地质调查中心王惠初、辛后田研究员和中国地质科学院地质力学所胡健民研究员对本项目研究工作给予了长期指导和大力支持, 在此表示衷心感谢!

## References

- Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *Journal of Geology*, 91: 611~627.
- Bhatia M R and Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contribution to Mineralogy Petrology*, 92: 181~193.
- Chen Xian, Zhang Chuanheng, Liu Jiajun, *et al.* 2014. Fluvial facies in the changzhougou formation in the Jixian area of China and geological significance[J]. *Journal of Stratigraphy*, 38(2): 236~244 (in Chinese with English abstract).
- Condie K C. 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales [J]. *Chemical Geology*, 104(1~4): 1~37.
- Feng Lianjun, Chu Xuelei, Zhang Qirui, *et al.* 2003. CIA (chemical index of alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 539~544 (in Chinese)

- with English abstract).
- Floyd P A and Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. *Journal of the Geological Society London*, 44: 531~542.
- Friedman G M. 1967. Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 37(2): 327~354.
- Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Cao Qian, *et al.* 2010. New geological time scale of Late Precambrian in China and geochronology[J]. *Geology in China*, 37(4): 1 014~1 020(in Chinese with English abstract).
- Gao Shan, Luo Tingchuan, Zhang Benren, *et al.* 1999. Structure and composition of the crust in East China[J]. *Science in China (Series D)*, 29(3): 204~213(in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Kuang Hongwei, Du Lilin, *et al.* 2019. On the Paleoproterozoic boundary from the breakup of the Columbia supercontinent[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(8): 2 299~2 324(in Chinese with English abstract).
- Gu Xuexiang, Liu Jianming, Oskar Schulz, *et al.* 2003. Geochemical constraints on the tectonic setting of the Proterozoic turbidites in the Xuefeng Uplift region of the Jiangnan orogenic belt[J]. *Geochimica*, 32(5): 406~426(in Chinese with English abstract).
- Gu X X, Liu J M, Zhang M H, *et al.* 2002. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, south China: Geochemical evidence[J]. *Journal of Sediment Research*, 72(3): 393~407.
- Harnois L. 1988. The CIW index: A new chemical index of weathering [J]. *Sedimentary Geology*, 55(3~4): 319~322.
- He Zhengjun, Li Jinyi, Mo Shenguo, *et al.* 2003. Geochemistry tectonic background and provenance analysis of the sandstones from the Mohe Foreland basin[J]. *Science in China (Series D)*, 33(12): 1 219~1 226(in Chinese with English abstract).
- He Zhengjun, Meng Xianghua and Ge Ming. 1994. Environmental evolutions and structural control of Changchengian of the Mid-Proterozoic in the Yanshan Basin, North China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 12(1): 10~19(in Chinese).
- He Zhengjun, Niu Baogui and Ren Jishun. 2005. Tectonic discriminations of sandstones geochemistry from the middle-late Devonian Liuling group in Shanyang area, Southern Shaanxi[J]. *Chinese Journal of Geology*, 40(4): 594~607(in Chinese with English abstract).
- He Zhengjun, Song Tianrui, Ding Xiaozhong, *et al.* 2000. The early synsedimentary faulting of the Mesoproterozoic yanshan rift and its influence on event sedimentation [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2(3): 83~91(in Chinese with English abstract).
- Hu Liangjun, Zhao Taiping, Xu Yonghang, *et al.* 2007. Volcanic rocks in the Dahongyu formation, North China Craton[J]. *Journal Mineralogy and Petrology*, 27(4): 70~77(in Chinese with English abstract).
- Huang Xueguang, Zhu Shixing and He Yuzhen. 2001. Some basic problems in research on sequence stratigraph of the Mess- and Neoproterozoic strata in Jixian area[J]. *Progress in Precambrian Research*, 24(4): 201~221(in Chinese with English abstract).
- Li Huaikun, Li Huimin and Lu Songnian. 1995. Grain zircon U-Pb ages for volcanic rocks from Tuanshanzi Formation of Changcheng System and their geological implications[J]. *Geochimica*, 24(1): 43~48(in Chinese).
- Li Huaikun, Su Wenbo, Zhou Hongying, *et al.* 2011. The base age of the Changchengian System at the northern North China Craton should be younger than 1 670 Ma: Constraints from zircon U-Pb LA-MC-ICP MS dating of a granite-porphry dike in Miyun County, Beijing[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 108~120(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongqing, Liu Xiaowen and Li Yin. 1997. Tectonic cyclic sequences in the Mesoproterozoic and Neoproterozoic Aulacogen of Yanshan—A concept of aulacogen tectonic cycle and its hierarchy[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(2): 142~149(in Chinese).
- McLennan S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21: 169~200.
- McLennan S M and Taylor S R. 1991. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends[J]. *Journal of Geology*, 99: 1~21.
- McLennan S M, Taylor S R, McCulloch M T, *et al.* 1990. Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(7): 2 015~2 050.
- Nesbitt H W and Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299(5 885): 715~717.
- Qiao Xiaofu, Gao Linzhi and Zhang Chuanheng. 2007. New idea of the Meso- and Neoproterozoic chronostratigraphic chart and tectonic environment in Sino-Korean Plate[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(5): 503~509(in Chinese with English abstract).
- Qiao Xiufu and Wang Yanbin. 2014. Discussions on the lower boundary age of the Mesoproterozoic and basin tectonic evolution of the Mesoproterozoic in North China Craton [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(9): 1 623~1 637(in Chinese with English abstract).
- Qu Yongqiang, Meng Qingren, Ma Shouxian, *et al.* 2010. Geological characteristics of unconformities in Mesoproterozoic successions in the northern margin of North China Block and their tectonic implications

- [J]. *Earth Science Frontiers*, 17(4): 112~127 (in Chinese with English abstract).
- Rorer B P and Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio [J]. *Journal of Geology*, 94: 635~650.
- Roser B P and Korsch R J. 1999. Geochemical characterization, evolution and source of a Mesozoic accretionary wedge: The Torlesse terrane, New Zealand[J]. *Geological Magazine*, 136(5): 493~512.
- Shen Weizhou, Shu Liangshu, Xiang Lei, *et al.* 2009. Geochemical characteristics of Early Paleozoic sedimentary rocks in the Jinggangshan area, Jiangxi province and the constraining to the sedimentary environment[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2 442~2 458 (in Chinese with English abstract).
- Su Wenbo. 2016. Revision of the Mesoproterozoic chronostratigraphic subdivision both of North China and Yangtze Cratons and the relevant issues[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 156~185 (in Chinese with English abstract).
- Sun Lixin, Zhu Gengxin, Huang Xueguang, *et al.* 1999. Genetic types of basal conglomerate of the Changzhougou Formation in the central sector of the Yanshan Mountains [J]. *Regional Geology of China*, 18(3): 254~288 (in Chinese).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford Blackwell, 1~312.
- Tong Qinlong, Wei Wei and Xu Bei. 2013. Neoproterozoic sedimentary facies and glacial periods in the southwest of Tarim block[J]. *Science China: Earth Sciences*, 43: 703~715 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jingui, Zhang Xinquan, Wei Wentong, *et al.* 2020. Paleontology, geochemistry and provenance of sedimentary rocks from the Triassic Langjiexue Group in the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet and their tectonic setting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(4): 1 208~1 226 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ziqiang, Yin Chongyu, Gao Linzhi, *et al.* 2006. The character of the chemical index of alteration and discussion of subdivision and correlation of the Nanhua system in Yichang area[J]. *Geological Review*, 52(5): 577~585 (in Chinese with English abstract).
- Wei Zhenyang, Yu Jinhai, Wang Lijuan, *et al.* 2009. Geochemical features and tectonic significances of Neoproterozoic metasedimentary rocks from Nanling Range[J]. *Geochimica*, 38(1): 1~19 (in Chinese with English abstract).
- Wronkiewicz D J and Condie K C. 1989. Geochemistry and provenance of sediments from the Pongola Supergroup, South Africa: Evidence for a 3.0 Ga old continental craton[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53: 1 537~1 549.
- Xiao Junwen. 2014. The Characteristics and Cause Analysis of Basal Conglomerate of Changzhougou Formation in Qianan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1~39 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Junwen, Wu Fadong and Chen Yongjin. 2016. Characteristics of basal conglomerate of the Changzhougou formation and its genesis analysis in Qianan, Hebei Province[J]. *China Mining Magazine*, 5(s2): 217~221 (in Chinese with English abstract).
- Yu Bingsong and Yue Changshuo. 1998. Some information about the inner earth contained in composition of sedimentary rocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 5(3): 105~112 (in Chinese).
- Zhai Mingguo, Hu Bo, Peng Peng, *et al.* 2014. Meso-Neoproterozoic magmatic events and multi-stage rifting in the NCC[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(1): 100~119 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo and Peng Peng. 2007. Paleoproterozoic events in the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2 665~2 682 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yingli, Wang Zongqi, Wang Kunming, *et al.* 2020. Sandstone geochemical constraints on the provenance and tectonic setting of the Banjiuguan Formation in the North Daba Mountain[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(4): 1 192~1 207 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Chen Fukun, Zhai Mingguo, *et al.* 2004. Single zircon U-Pb ages and their geological significance of the Damiao anorthosite complex, Hebei Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 685~690 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Deng Xiaoqin, Hu Gguohui, *et al.* 2015. The Paleoproterozoic-Mesoproterozoic boundary of the North China Craton and the related geological issues: A review[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(6): 1 495~1 508 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Taiping, Pang Lanyin, Qiu Yifan, *et al.* 2019. The Paleo-Mesoproterozoic boundary: 1.8 Ga[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(8): 2 281~2 298 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zongpu. 1993. *Precambrian Crustal Evolution of the Sino-Korean Paraplatform*[M]. Beijing: Science Press, 1~390 (in Chinese).
- Zhong Yan, Zhao Liangdong, Chen Liuqin, *et al.* 2011. New understanding of "fluvial facies" deposition of the early transgression period of Mesoproterozoic: An example from Jixian section in Tianjin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 13(1): 21~29 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 陈 贤, 张传恒, 刘家军, 等. 2014. 蓟县常州沟组沉积特征及其地质意义[J]. *地层学杂志*, 38(2): 236~244.

- 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等. 2003. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. 地学前缘, 10(4): 539~544.
- 高林志, 丁孝忠, 曹茜, 等. 2010. 中国晚前寒武纪年表和年代地层序列[J]. 中国地质, 37(4): 1 014~1 020.
- 高山, 骆庭川, 张本仁, 等. 1999. 中国东部地壳的结构与组成[J]. 中国科学(D辑), 29(3): 204~213.
- 耿元生, 旷红伟, 杜利林, 等. 2019. 从哥伦比亚超大陆裂解事件论古/中元古代界限[J]. 岩石学报, 35(8): 2 299~2 324.
- 顾雪祥, 刘建明, Oskar Schulz, 等. 2003. 江南造山带雪峰隆起区元古宙浊积岩沉积构造背景的地球化学制约[J]. 地球化学, 32(5): 406~426.
- 和政军, 李锦轶, 莫中国, 等. 2003. 漠河前陆盆地砂岩岩石地球化学的构造背景和物源区分析[J]. 中国科学(D辑), 33(12): 1 219~1 226.
- 和政军, 孟祥化, 葛铭. 1994. 燕山地区长城纪沉积演化及构造背景[J]. 沉积学报, 12(1): 10~19.
- 和政军, 牛宝贵, 任纪舜. 2005. 陕南山阳地区刘岭群砂岩岩石地球化学特征及其构造背景分析[J]. 地质科学, 40(4): 594~607.
- 和政军, 宋天锐, 丁孝忠, 等. 2000. 燕山中元古代裂谷早期同沉积断裂活动及其对事件沉积的影响[J]. 古地理学报, 2(3): 83~91.
- 胡良俊, 赵太平, 徐勇航, 等. 2007. 华北克拉通大红峪组高钾火山岩的地球化学特征及其岩石成因[J]. 矿物岩石, 27(4): 70~77.
- 黄学光, 朱士兴, 贺玉贞. 2001. 蓟县中-新元古界剖面层序地层学研究的几个基本问题[J]. 前寒武纪研究进展, 24(4): 201~221.
- 李怀坤, 李惠民, 陆松年. 1995. 长城系团山子组火山岩颗粒锆石年龄及其地质意义[J]. 地球化学, 24(1): 43~48.
- 李怀坤, 苏文博, 周红英, 等. 2011. 华北克拉通北部长城系底界年龄小于1 670 Ma: 来自北京密云花岗斑岩脉锆石 LA-MC-ICP MS U-Pb 年龄的约束[J]. 地学前缘, 18(3): 108~120.
- 柳永清, 刘晓文, 李寅. 1997. 燕山中-新元古代裂陷槽构造旋回层序研究兼论裂陷槽构造旋回概念及级序的划分[J]. 地球学报, 18(2): 142~149.
- 潘建国, 曲永强, 马瑞, 等. 2013. 华北地块北缘中新元古界沉积构造演化[J]. 高校地质学报, 19(1): 109~122.
- 乔秀夫, 高林志, 张传恒. 2007. 中朝板块中-新元古界年代地层柱与构造环境新思考[J]. 地质通报, 26(5): 503~509.
- 乔秀夫, 王彦斌. 2014. 华北克拉通中元古界底界年龄与盆地性质讨论[J]. 地质学报, 88(9): 1 623~1 637.
- 曲永强, 孟庆任, 马收先, 等. 2010. 华北地块北缘中元古界几个重要不整合面的地质特征及构造意义[J]. 地学前缘, 17(4): 112~127.
- 沈渭洲, 舒良树, 向磊, 等. 2009. 江西井冈山地区早古生代沉积岩的地球化学特征及其对沉积环境的制约[J]. 岩石学报, 25(10): 2 442~2 458.
- 苏文博. 2016. 华北及扬子克拉通中元古代年代地层格架厘定及相关问题探讨[J]. 地学前缘, 23(6): 156~185.
- 孙立新, 朱更新, 黄学光, 等. 1999. 燕山中段常州沟组底砾岩的成因类型[J]. 中国区域地质, 18(3): 254~288.
- 童勤龙, 卫魏, 徐备. 2013. 塔里木板块西南缘新元古代沉积相和冰期划分[J]. 中国科学: 地球科学, 43: 703~715.
- 王金贵, 张鑫全, 魏文通, 等. 2020. 西藏雅鲁藏布缝合带三叠系朗杰学群沉积岩古生物、地球化学特征及其物源区和构造背景分析[J]. 地质学报, 94(4): 1 208~1 226.
- 王自强, 尹崇玉, 高林志, 等. 2006. 宜昌三斗坪地区南华系化学蚀变指数特征及南华系划分、对比的讨论[J]. 地质论评, 52(5): 577~585.
- 魏震洋, 于津海, 王丽娟, 等. 2009. 南岭地区新元古代变质沉积岩的地球化学特征及构造意义[J]. 地球化学, 38(1): 1~19.
- 肖峻文. 2014. 迁安常州沟组底砾岩特征及成因分析[D]. 北京: 中国地质大学, 1~39.
- 肖峻文, 武法东, 陈永进. 2016. 河北迁安常州沟组底砾岩特征及成因分析[J]. 中国矿业, 5(s2): 217~221.
- 于炳松, 乐昌硕. 1998. 沉积岩物质成分所蕴含的地球深部信息[J]. 地学前缘, 5(3): 105~112.
- 翟明国, 彭澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件[J]. 岩石学报, 23(11): 2 665~2 682.
- 翟明国, 胡波, 彭澎, 等. 2014. 华北中-新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件[J]. 地学前缘, 21(1): 100~119.
- 张英利, 王宗起, 王坤明, 等. 2020. 北大巴山地区斑岩组砂岩地球化学特征对物源和构造环境的限定[J]. 地质学报, 94(4): 1 192~1 207.
- 赵太平, 陈福坤, 翟明国, 等. 2004. 河北大庙斜长岩杂岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 20(3): 685~690.
- 赵太平, 邓小芹, 胡国辉, 等. 2015. 华北克拉通古/中元古代界线和相关地质问题讨论[J]. 岩石学报, 31(6): 1 495~1 508.
- 赵太平, 庞岚尹, 仇一凡, 等. 2019. 古/中元古代界线: 1.8 Ga[J]. 岩石学报, 35(8): 2 281~2 298.
- 赵宗溥. 1993. 中朝准地台前寒武纪地壳演化[M]. 北京: 科学出版社, 1~390.
- 钟焱, 赵亮东, 陈留勤, 等. 2011. 对华北中元古代海侵初期“河流相”沉积的重新认识: 以天津蓟县剖面为例[J]. 岩相古地理, 13(1): 21~29.