

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.607



# 碎屑锆石形态学分类体系及其在物源分析中的应用： 以松辽盆地松科一井为例

宋 鹰<sup>1</sup>, 钱禛钰<sup>1</sup>, 张俊霞<sup>2</sup>, Stepashko Andrei<sup>3</sup>

1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

2. 中国地质大学经管学院, 湖北武汉 430074

3. 俄罗斯科学院大地构造与地球物理研究所, 俄罗斯哈巴罗夫斯克 680000

**摘要:** 碎屑锆石的同位素热年代学提供了物源区的精确年龄和大地构造背景, 是目前物源分析中先进的、使用最为广泛的研究方法之一。在同一沉积区内, 碎屑锆石颗粒通常是多来源的, 经历了复杂的从源到汇的物质输送过程。能否揭示沉积物中的锆石颗粒从源区到沉积区的地表动力作用, 是对碎屑锆石同位素年龄及年龄谱系进行合理地质解释的关键。提出碎屑锆石形态学定量化的实验分类方法, 设计出一种适用于多参数分析的多维蛛网密度图, 试图通过对碎屑锆石的来源、锆石晶体的磨圆度、断裂方式、裂隙和表面撞痕等多种形态学参数的定量分析来揭示碎屑锆石由源区到沉积区搬运过程中经历的地表动力特征, 进而丰富和完善碎屑锆石年代学源—汇系统的内容, 为沉积物源分析提供一种新的实验手段。并以松辽盆地松科一井相关的碎屑锆石样品分析为例, 介绍了这种方法的实际应用及其效果。

**关键词:** 碎屑锆石; 形态学; 物源分析; 多维蛛网密度图; 松辽盆地; 石油地质; 源—汇系统。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2018)06-1997-10

收稿日期: 2017-12-31

## Morphology of Detrital Zircon and Its Application in Provenance Analysis: Example from Cretaceous Continental Scientific Drilling Borehole in Songliao Basin

Song Ying<sup>1</sup>, Qian Zhenyu<sup>1</sup>, Zhang Junxia<sup>2</sup>, Stepashko Andrei<sup>3</sup>

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. School of Economics and Management, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Tectonics and Geophysics, Russian Academy of Sciences, Khabarovsk 680000, Russia

**Abstract:** The geological thermochronology of detrital zircon in sediments is one of the most robust methods for the provenance analysis by providing accurate age constraint and tectonic setting of source terranes. However, the detrital zircon grains are often derived from more than one source terrane and have undergone a rather complicated terrestrial transportation processes from source to sink. The reconstruction of the surface dynamic processes from the source area to the catchment basin is critical to convincing geological interpretation of the detrital zircon U-Pb age patterns. This paper presents a new approach for the quantitative classification of detrital zircon morphologies, by quantifying various morphological parameters, including the mother rock of detrital zircon, the degree of crystal roundness, the way of crystal fracture, the degree of crystal fissure and the collision marks upon the crystal surfaces. In order to illustrate all the morphological parameters and make a reliable geological interpretation, we designed a new kind and teaching-friendly density plot, the multidimensional spider density plot, which could reveal the overall trend of one detrital zircon sample during the whole surface

**基金项目:** 山东省重点研发计划项目(No.2017GXGC1608); 国家自然科学基金项目(Nos.41772102, 41402171)。

**作者简介:** 宋鹰(1982-), 男, 博士, 讲师, 主要从事盆地动力学研究。ORCID: 0000-0002-9647-2541. E-mail: yingsong@upc.edu.cn

**引用格式:** 宋鹰, 钱禛钰, 张俊霞, 等, 2018. 碎屑锆石形态学分类体系及其在物源分析中的应用: 以松辽盆地松科一井为例. 地球科学, 43(6): 1997-2006.

transportation process. Finally, detrital zircon samples, which were collected from the Cretaceous Continental Scientific Drilling borehole (CCSD-SK-1) in the Songliao basin, were analyzed to detect the provenance variation. The practical application proves that the morphological classification proposed in this paper is valid and reliable for provenance study.

**Key words:** detrital zircon; morphology; provenance analysis; multidimensional density spider plot; Songliao basin; petroleum geology; Source-Sink system.

## 0 引言

锆石( $ZrSiO_4$ )是自然界中常见的一类副矿物,具有高度的稳定性,可以持久保持其形成时的物理化学信息,在火成岩、变质岩和沉积岩中广泛存在(Finch and Hanchar, 2003). 锆石中所包含的 U-Pb 同位素系统具有良好的封闭性,因此成分单一、结构稳定的锆石成为 U-Pb 同位素定年的理想矿物(Davis *et al.*, 2003; Košler and Sylvester, 2003; Liu *et al.*, 2010). 沉积物中的碎屑锆石同位素热年代学分析,可以提供物源区的精确年龄和大地构造背景等信息,在解释现代和古代沉积物组分、古地理重建、造山带俯冲—碰撞—折返过程示踪、盆山耦合等方面发挥了重要的作用,已成为当前沉积物源分析,及区域构造研究中先进的、使用最为广泛的方法(Fedo *et al.*, 2003; 宋鹰等, 2016; 陈贺贺等, 2017; 孔令耀等, 2017). 目前,国内外公开发表的与碎屑锆石定年有关的学术论文已有近万篇,并呈现出逐年增多的井喷式发展趋势.

物源区风化剥蚀的颗粒状沉积物和流水侵蚀的溶解物,在流水或风力作用下,通过不同路径搬运到沉积区或汇水盆地中,经历成岩作用,最终沉积下来,被称为源—汇(Source-Sink)系统,这是一个非常复杂、综合的地质过程(Meade, 1982; Allen, 2008; 林畅松等, 2015). 然而目前源—汇系统研究中最常用的碎屑锆石同位素年代学的方法,侧重于 U-Pb 同位素定年和元素地球化学的研究,强调源—汇之间的物质传递及源岩组成和源区构造背景对沉积物的控制作用,未能揭示出由源到汇的物质输送和混合过程中的地表动力学过程的详细信息,因而造成了很多研究中碎屑锆石单颗粒年龄严重偏离和谐曲线,样品总体年龄谱系过于离散,难以进行合理的地质解释. 实际上,在沉积物由源到汇的传输过程中,锆石晶体的外部特征会产生变化,在表面留下丰富的形态学信息(Vavra *et al.*, 1999; Dunkl *et al.*, 2001). 因此,通过碎屑锆石形态学研究,就有可能分析和揭示由源到汇的详细地表动力特征.

现有的锆石形态学分类体系一般针对晶形相对

完整、规律性强的火成岩锆石进行分类(Pupin, 1980; Wang, 1998),或者针对碎屑锆石的某一类特征(如磨圆度等)进行定性分类(Garver and Kamp, 2002; Zoleikhaei *et al.*, 2016),对于碎屑锆石的定量化的分类体系的研究尚处于起步阶段(Gärtner *et al.*, 2013, 2017). 本文提出一种基于碎屑锆石形态学的量化分类体系,试图通过碎屑锆石的来源、晶体磨圆度、晶体断裂方式、晶体裂隙、晶体表面撞痕等多种形态学参数的定量分析,编制多维蛛网密度图,直观地展示碎屑锆石的形态特征,进而分析和揭示源汇系统中的地表动力学信息. 这一研究有助于丰富和完善碎屑锆石年代学源汇系统分析的内容,并为沉积物源分析提供新的实验技术手段. 本文以中国东北松辽盆地松科一井的碎屑锆石样品为例,详细介绍了该方法的实际应用及其效果.

## 1 碎屑锆石的形态学分类体系

由于沉积物中的碎屑锆石经历了从源区到汇水区的长距离搬运及后期成岩作用的过程,因此在搬运过程中锆石本身遭到磨蚀和破坏,并残留下丰富的信息(Gärtner *et al.*, 2013),由碎屑锆石晶体本身的磨圆度、锆石晶体断裂、单晶面上的裂缝以及单晶面上的刮痕、擦痕和凹坑等表现出来,下面对此详细描述和分级,为建立碎屑锆石的形态学分类体系和分析方法提供基础.

### 1.1 磨圆度

矿物晶体颗粒的磨圆度可以定义为由于磨蚀作用而导致矿物晶体边缘的光滑程度(Russell and Taylor, 1937; Alling, 1950). 对于碎屑锆石来说,这种磨圆程度通常用来指示锆石颗粒由物源区到汇水区的整个搬运过程中所遭受的外部能量对锆石颗粒本身影响和改造的程度,可以定性地指示搬运距离的远近(Dietz, 1973).

实际上,并不是所有的磨圆作用都是由颗粒搬运所引起的,少量内生地质作用也会引起锆石矿物的磨圆作用,例如锆石重结晶中的物理化学作用(Deer *et al.*, 1978)、岩浆运移过程中的熔蚀效应

(Hollis and Sutherland, 1985)和 S 型花岗岩本身的磨圆作用(Roger *et al.*, 2004; 马慧英, 2015)等。不过,研究表明上述作用对碎屑锆石的磨圆的贡献通常比较小,在实际研究中基本可以忽略(Gärtner *et al.*, 2013)。

根据碎屑锆石晶体的边缘、棱角和晶面过渡方式等特征,将碎屑锆石的磨圆度分为 1~10 个等级(表 1 和图 1)。

(1)完全无磨圆:显著棱角状,锆石晶体的所有边缘、棱角都很尖锐,非常明显,并且很容易根据边缘区分不同的单晶面。

(2)几乎无磨圆:棱角状,锆石晶体少量边缘有轻微的磨圆现象,但不影响区分不同的单晶面。

(3)磨圆很差:次棱角状,锆石晶体大多数棱角和边缘都出现轻微磨圆,但不影响不同的单晶面的识别。

(4)磨圆差:锆石晶体几乎所有的边缘和棱角都被磨圆。从晶体的整体轮廓上看,仅仅少数棱角的磨圆度相对较轻。尽管晶体边缘和棱角都被磨圆了,但还可以清晰地识别出单晶面。

(5)准磨圆:锆石晶体所有的边缘和棱角都经历磨圆作用。在某些相邻晶面之间,偶尔呈现一种平滑过渡关系,但是锆石的单晶面仍然清晰可见。

(6)磨圆:磨圆程度比准磨圆显著提高,所有的边缘和棱角都被显著地磨圆。锆石颗粒的所有相邻

晶面间都呈现出平滑过渡的关系,大部分晶面都清晰可见,并可以通过可识别的晶面来推断其他模糊的、难以分辨的小晶面。

(7)磨圆好:锆石晶体的磨圆度整体比较好,某些边缘和棱角已经难以识别,因此很难区分不同的单晶面。

(8)磨圆优:锆石晶体的所有边缘和棱角都被磨圆,几乎分辨不出来单晶面。

(9)准完全磨圆:锆石晶体中仅有极少数的边缘和棱角可以被识别出来,偶尔可以分辨出某些残留的单晶面。

(10)完全磨圆:锆石晶体中观察不到任何的棱角或边缘。很难分辨出残留的单晶面。

### 1.2 晶体断裂

锆石晶体的断裂现象是锆石颗粒搬运过程中,受到外部能量作用产生的,是指示外部能量高低的直接标志(Wayne and Sinha, 1988)。可以根据某组碎屑锆石样品中发生断裂作用的锆石颗粒比例来评估搬运过程中外部能量的高低(Gärtner *et al.*, 2013)。

根据锆石的结晶习性和内部结构,断裂现象一般出现在两个方向,即垂直于 *c* 轴的方向和平行于 *c* 轴的方向,由此可将锆石晶体断裂方式分为 *a*~*c* 三类(图 2)。

然而,在锆石搬运和成岩过程中随着磨圆度的

表 1 碎屑锆石晶体磨圆度的 10 个等级

Table 1 The ten grades of the roundness of the detrital zircon crystals

磨圆等级	磨圆度	边缘	棱角	晶体轮廓	单晶面	晶面过渡方式
1	显著棱角状	尖锐	完整	平直	清晰可见	折痕
2	棱角状	少量轻微磨圆	完整	平直	清晰可见	折痕
3	次棱角状	大多轻微磨圆	大多轻微磨圆	平直—弧度	清晰可见	折痕
4	磨圆差	大多磨圆	大多磨圆	平直—弧度	清晰可见	折痕
5	一般磨圆	磨圆	磨圆	弧度—少量平直	清晰可见	少量晶面间呈现平滑过渡
6	磨圆	显著磨圆	显著磨圆	弧度	大多清晰可见,少部分模糊	平滑过渡
7	磨圆好	某些边缘磨圆至难以分辨	某些棱角磨圆至难以分辨	浑圆	某些晶面难以识别	平滑过渡
8	磨圆优	大多数边缘磨圆至无法分辨,仅局部残留	大多数棱角磨圆至无法分辨,仅局部残留	圆	大多晶面难以识别	平滑过渡
9	准完全磨圆	大多数边缘磨圆至无法分辨,极少数残留	大多数棱角磨圆至无法分辨,极少数残留	圆	所有晶面难以识别	平滑过渡
10	完全磨圆	所有边缘磨圆至无法分辨	所有棱角磨圆至无法分辨	圆	无法识别	平滑过渡

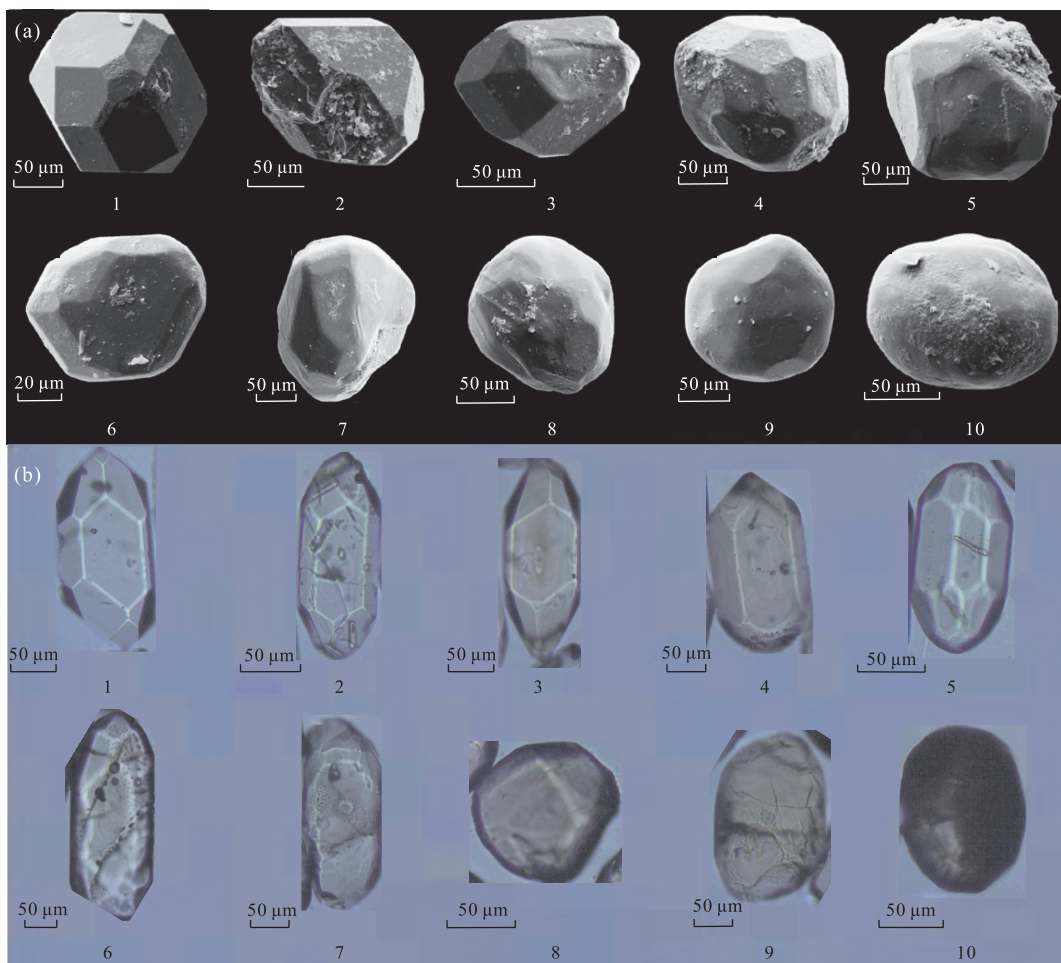


图 1 碎屑锆石磨圆度分级实例

Fig.1 The instance pictures illustrating the grading of the roundness of detrital zircons  
a 为扫描电镜照片,引自 Gärtner *et al.*(2017);b 为透射光照片

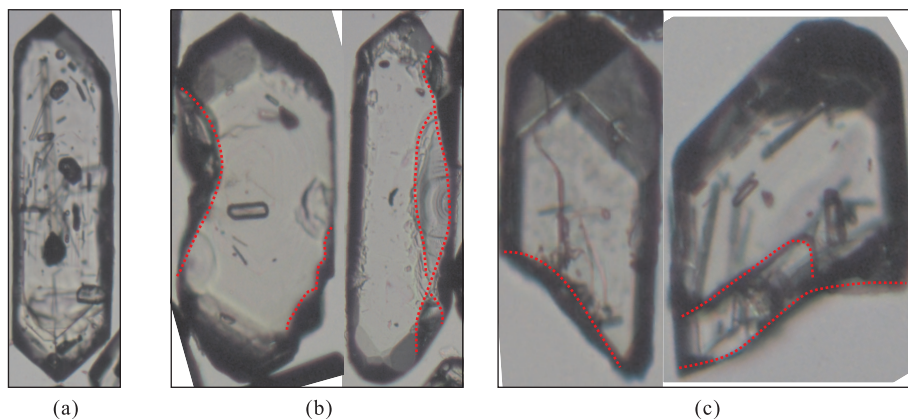


图 2 碎屑锆石晶体的 3 种断裂方式

Fig.2 The three grades of the way of fracturing of detrital zircon crystals  
a.无断裂,即晶体完整;b.平行于 c 轴断裂;c.垂直于 c 轴断裂;红色虚线为锆石断开部位

增加,所有的边缘、棱角均被强烈磨蚀,晶体断裂面在这种情况下会很难识别,尤其是对于一些物源区和沉积区距离较远的锆石,这种现象更加明显,导致可识

别的断裂颗粒数量小于实际发生断裂的颗粒数量.

### 1.3 晶体表面裂缝

锆石在结晶过程中,其生长方式一般是同轴式



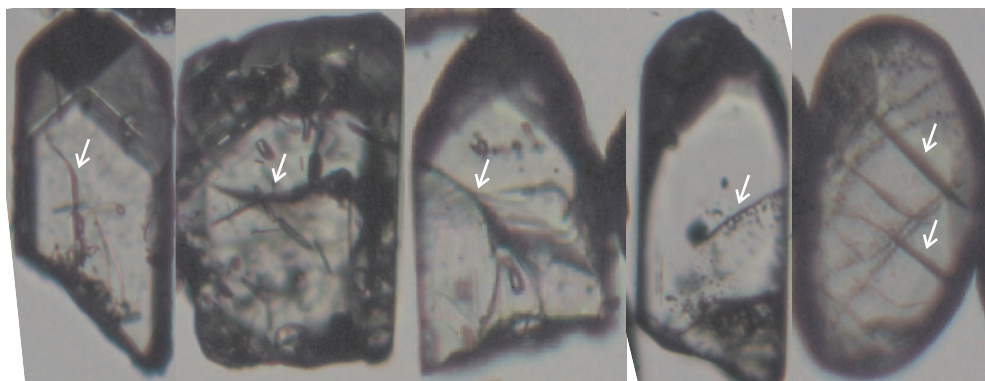


图3 碎屑锆石晶体表面的裂缝

Fig.3 Different cracks on the crystal faces of the detrital zircon crystals

如图白色箭头指示进行分辨

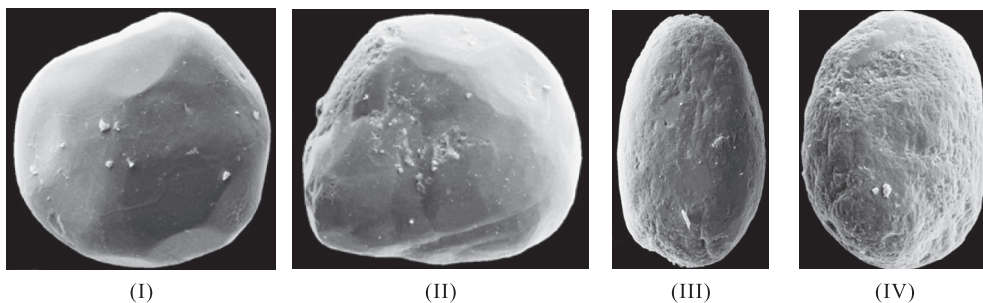


图4 碎屑锆石晶体表面撞击痕迹的4个等级

Fig.4 The four grades of collision marks upon the crystal faces of detrital zircon crystals

I. 晶体表面基本无撞痕或撞痕的数量极少,晶体边缘和晶面平滑;II. 晶体表面出现少量撞痕,晶体的某些边缘和少量晶面有缺陷;III. 晶体表面有相当数量的撞痕,并在晶体内尖锐的边缘和平滑的晶面上留下显著的痕迹;IV. 晶体表面有大量的撞痕,整个晶体看起来坑坑洼洼,粗糙不平;扫描电镜图片引自 Gärtne *et al.* (2017)

或者是同心式的逐层生长(Nasdala *et al.*, 2003).不同层之间的结合力相对比较弱.锆石在搬运过程中受到撞击产生的裂缝也主要出现在层理之间.根据锆石表面是否有裂缝,可以分为锆石表面无裂缝和锆石表面有裂缝两类(图3).

#### 1.4 晶体表面撞击痕迹

锆石在从源区到汇水区的整个搬运过程中发生了显著的碰撞作用.这种碰撞作用的强弱,可以通过锆石晶体表面的撞击凹坑、刮痕和擦痕,以及锆石晶体边缘的缺陷数量来体现(Gärtne *et al.*, 2013).具体可以分为I~IV 4个等级(图4).

## 2 碎屑锆石形态学分析步骤

由于碎屑锆石形态学分类所涉及的多个参数等级都是以文字描述或分级数字形式表达,不够直观.而一般的二维和三维图(如概率密度曲线图、频次直方图、蛛网图等),只能表达1~2个参数的分布特

征,无法表达形态学分析所涉及的多个参数(宋鹰等, 2016).为此,本文设计出一种可以同时表达6种参数信息的平面图——多维蛛网密度图(图5),具体的制图方法如下:

(1)将整圆作为蛛网密度图的底图,并且按间隔 $36^\circ$ 在圆弧上依次划分为10个主要区间,分别代表磨圆度的1~10的10个等级.

(2)每级磨圆度内部再按照间隔 $12^\circ$ ,在圆弧上继续划分为3个次级区间,分别代表该磨圆度区间内锆石晶体的a、b、c三种断裂方式.

(3)每级磨圆度内部依据半径长度等分为4个区间做4个同心圆.每个同心圆代表晶体撞击痕迹的I、II、III、IV的4个等级.

(4)锆石来源,即岩浆锆石和非岩浆锆石用不同的颜色表示.

(5)锆石晶体表面有裂缝和无裂缝用不同的符号表示.

(6)在蛛网密度图的中心,做一同心圆记录样品

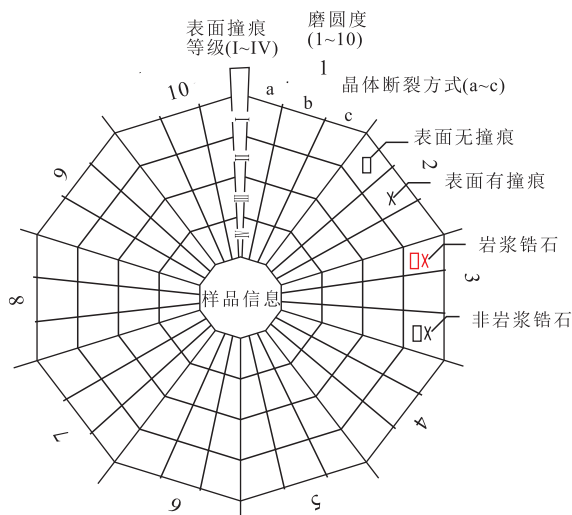


图 5 多维蛛网密度图及其表达的 6 种参数

Fig.5 The multidimensional probability diagram representing the interrelations between six parameters of detrital zircon crystals

根据 Gärtne *et al.* (2017) 修改

信息.

在分析碎屑锆石样品时,按如下步骤进行:

(1) 标示样品信息.将所分析样品的编号、取样的层位、取样深度、锆石颗粒数量等各类信息录入蛛网密度图的中心.

(2) 区分锆石来源.沉积岩中的碎屑锆石可能来自于不同源区的岩浆锆石、变质锆石或再循环锆石等组成.其中岩浆锆石形态一般比较完整,在阴极发光下呈现出特征性环带状图像.根据阴极发光图像,将碎屑锆石分为具有明显环带状结构的岩浆锆石和不具有环带状结构的非岩浆锆石两类,并用不同的颜色表示,岩浆锆石用红色,非岩浆锆石用黑色.

(3) 确定磨圆度等级.根据锆石晶体的边缘和棱角的尖锐程度、晶体轮廓形态、晶面之间的过渡方式和区分单晶面的难易程度等,将磨圆度分为 10 个等级,分别投影到多维蛛网图 1~10 的对应区间之内.

(4) 确定断裂方向.根据锆石晶体最主要的断裂方向与锆石 *c* 轴方向的关系,将晶体断裂程度分为 3 个等级,分别投影到多维蛛网图相应磨圆度区间内的 a、b、c 次级区间内.

(5) 识别撞击痕迹.通过锆石晶体表面的撞击凹坑、刮痕和擦痕,晶体边缘的缺陷数量将撞击痕迹分为 4 个等级,分别投影到次级区间的 I、II、III、IV 格子内.

(6) 观测表面裂缝.根据锆石表面是否有裂缝,分为表面有裂缝和无裂缝两类,分别用不同的符号

表示,有裂缝有叉号,无裂缝用方框表示.

(7) 综合分析.对于单个碎屑岩样品,随机选取 200 颗以上的锆石晶体进行观察和分类,将统计结果投影到多维蛛网图内,再根据密度分布情况讨论样品可能的物源特征.对于取自同一钻井内不同地层或者不同钻井间同一地层的样品,可以分组进行观测、分析与对比,反演盆地沉积物源的时间—空间变迁特征.

### 3 松辽盆地松科一井嫩江组末期—四方台组物源分析

松辽盆地位于中国东北,是世界上最大的非海相沉积盆地.它不仅盛产油气资源,而且保存了 7 000~10 000 m 巨厚的近乎完整的白垩纪沉积层序,为详细刻画东亚地区白垩纪沉积、构造、古气候等演化特征提供了最好的地质证据(王成善等, 2009; Feng *et al.*, 2010).松辽盆地构造演化可以分为 3 个主要阶段:早白垩世火石岭组至登娄库组的同裂陷期,盆地由一系列相互孤立的断陷盆地组成;早白垩世晚期泉头组至青山口组的裂后期热沉降阶段,形成大型的拗陷湖盆;晚白垩世早期姚家组至新生代时期,盆地进入了构造隆升反转阶段,晚白垩世地层隆升剥露,形成大庆长垣等褶皱、逆冲断层等反转构造样式(Song *et al.*, 2014).

在松辽盆地的构造反转阶段,发生了多幕构造隆升,并形成了  $T_{11}$ 、 $T_{03}$ 、 $T_{02}$  等构造不整合界面(图 6).其中嫩江运动( $T_{03}$  界面)是发生在嫩江组沉积末期、四方台组沉积前的一次显著的全盆地的构造抬升运动(Song *et al.*, 2014).从  $T_{03}$  界面特征上,这次构造隆升是全盆地范围的整体隆升.近年来,通过白垩纪大陆科学钻松科一井厘米级地层、古生物研究成果表明,嫩江运动的具体时限为 78.6~74.9 Ma (Scott *et al.*, 2012),意味着松辽盆地在嫩江组末期经历了至少 4 Ma 的沉积间断(图 6).然而,嫩江运动前后盆地主要沉积物源体系是否发生改变,改变的程度如何,引起变迁的具体机制等重要的科学问题还不清楚.

松科一井北孔位于松辽盆地中央拗陷区齐家古龙凹陷,连续取心长度 1 541.66 m,主要钻取晚白垩世嫩江组二段以上的地层(王成善等, 2008).本研究所选取的两个样品位于  $T_{03}$  不整合界面上下,即嫩江组五段和四方台组的地层之中.每个样品随机选

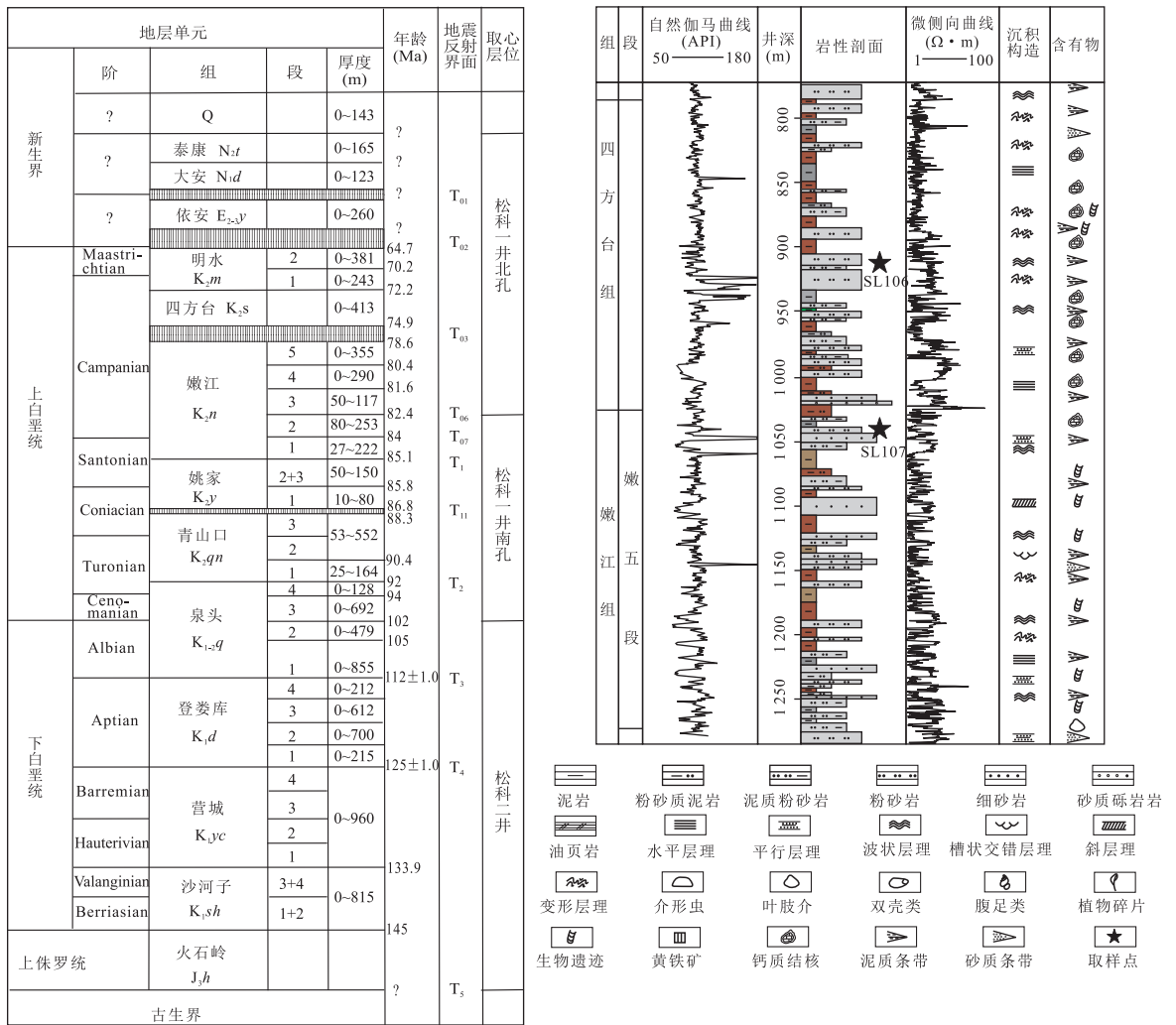


图 6 松辽盆地综合地层柱状图及松科一井嫩江五段至四方台组综合地层剖面

Fig.6 The integrated stratigraphic framework of the Songliao basin and the stratigraphic profile from the 5th member of the Nenjiang Formation to the Sifangtai Formation of the CCSJ-SK-1

取 >250 颗碎屑锆石晶体,根据本文所提出的分类体系,对碎屑锆石逐颗进行详细的形态学分析和分类,并将分析结果投影于蛛网密度图中(图 7),以揭示嫩江运动前后盆地物源体系的变迁规律。

### 3.1 嫩江组五段(SL107)的碎屑锆石形态学特征

该样品取样深度为 1 049 m,取样位置位于晚白垩世嫩江组五段地层的顶部,分析了 252 颗锆石。根据锆石阴极发光测试结果,该样品中碎屑锆石来源主要为非岩浆锆石(63%),此类锆石的磨圆度介于 2~8 等级,在 6~8 等级区间相对比较集中。而该样品中的岩浆锆石磨圆度则介于 1~6 等级,在 2~3 等级区间相对比较集中(图 7a)。

表面特征方面,该样品的锆石晶形大多较为完整,仅有少部分(22.6%)的锆石晶体发生了断裂作用,断裂方式以垂直于 *c* 轴的断裂为主。表面裂缝也

仅在少量(7%)的锆石晶体表面出现。非岩浆锆石的表面撞痕等级从 I 级至 IV 级皆有分布;而岩浆锆石的表面撞痕等级主要为 I 至 II 级(图 7a)。

### 3.2 四方台组(SL106)的碎屑锆石形态学特征

该样品取样深度为 914.66 m,位于晚白垩世四方台组地层中下部,分析 264 颗锆石。根据锆石阴极发光测试结果,该样品中的碎屑锆石来源主要为岩浆锆石(75%),此类锆石磨圆度集中介于 2~6 等级,在 3~4 等级区间相对比较集中。而该样品中的非岩浆锆石磨圆度则集中介于 4~10 等级,在 9~10 等级区间相对比较集中(图 7b)。

表面特征方面,该样品中至少三分之一(35%)的锆石晶体发生了断裂作用,断裂方式以垂直于 *c* 轴的断裂为主。表面裂缝普遍不发育。但是表面撞痕非常发育,岩浆锆石的撞痕等级主要为 II 至 III;非岩



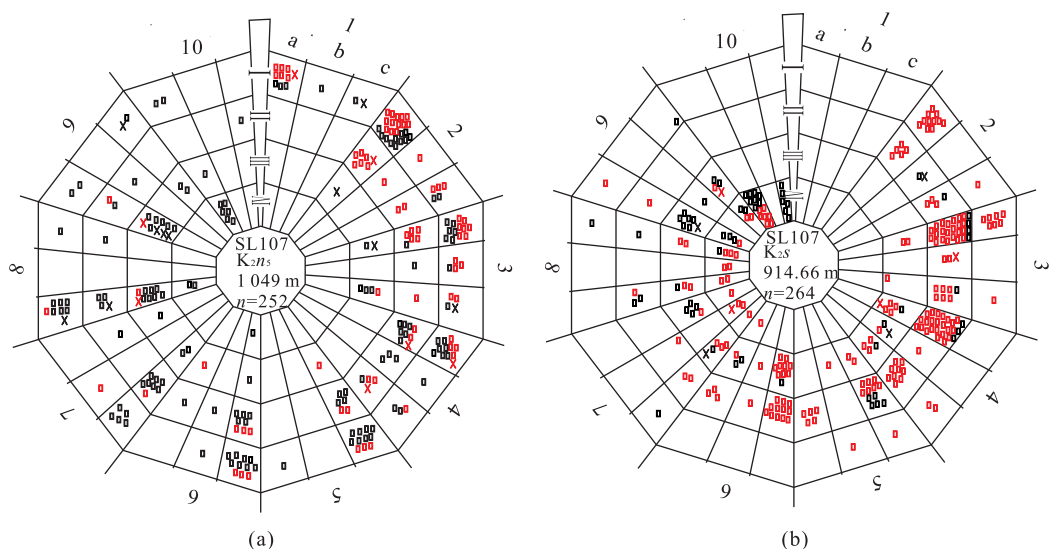


图 7 松科一井北孔嫩江组(a)和四方台组(b)碎屑锆石样品的多维蛛网密度图

Fig.7 The multidimensional probability diagrams representing the differences of detrital zircon crystals between the 5th member of the Nenjiang Formation (a) and the Sifangtai Formation (b) of the CCSD-SK-1

浆锆石的撞痕等级随磨圆度增加而增加,磨圆度3~5等级的非岩浆锆石的撞痕等级主要为II至III,磨圆度9~10等级的非岩浆锆石的撞痕等级则为III级至IV级(图7b)。

### 3.3 物源体系分析

通过 T03 不整合面上下地层的碎屑锆石形态学分类对比分析,可以看出盆地物源发生了显著的变迁。

首先,碎屑锆石来源发生了重大改变。嫩江组五段时期的非岩浆锆石(63%)为主要组分,岩浆锆石(37%)为次要组分。嫩江运动之后,四方台组样品中75%的锆石为岩浆锆石,相比嫩江组五段增加了一倍。其次,嫩江运动之后碎屑锆石的磨圆效应也显著增强。嫩江组的岩浆锆石磨圆度主要集中在棱角状至次棱角状(2~3等级)之间,非岩浆锆石集中在磨圆至准完全磨圆(6~9等级)之间;四方台组的岩浆锆石磨圆度增大到次棱角状至磨圆差(3~4等级)之间,非岩浆锆石普遍经历了强烈的磨圆,磨圆度集中在准完全磨圆至完全磨圆(9~10等级)之间。再次,四方台组碎屑锆石的断裂现象也更加严重,并且伴随着更高的撞痕等级(图7)。

由此可见,四方台组的碎屑锆石来源发生了剧烈改变,而且在搬运过程中遭受到了非常复杂和剧烈的改造作用,表现出与嫩江组五段碎屑锆石截然不同的形态学特征。结合盆地构造地层演化和周缘物源区位置和演化特征,嫩江组初期是古松辽湖盆最大、最深的时期,碎屑锆石主要来自盆地的佳

木斯地块和华北克拉通北缘古老的非岩浆锆石组分,这些前寒武变质和热液成因的锆石经历了嫩江组时期发育的大型河流体系长距离的搬运汇入古松辽湖盆,磨圆度普遍比较好。嫩江组末期,由于古太平洋板块的幕式西向俯冲作用,东北地块发生整体抬升,物源区隆升,湖盆水体变浅,地形高程落差增大,盆地周缘中小型河流发育,紧邻盆地的小兴安岭、张广才岭、大兴安岭的显生宙火山岩发生强烈的剥露作用成为盆地的主要物源,表现为岩浆锆石的输入的突然增加、锆石晶体显著的断裂和更高磨圆度。综上所述,嫩江运动造成松辽地体隆升,古松辽湖盆萎缩,盆地中央凹陷区的沉积物源体系发生了明显的变迁,主要物源由来自佳木斯地块和华北克拉通北缘的前寒武纪非岩浆锆石为主突然转变为以紧邻盆地造山带内的显生宙岩浆锆石为主。

## 4 结论

本文基于对沉积物中碎屑锆石形态学参数的分析,确定了锆石来源、磨圆度、断裂方式、裂隙和表面撞痕等多个参数的分级体系,并设计出多维蛛网密度图来定量、直观地表达碎屑锆石的总体形态学特征,为沉积盆地物源体系分析提供了依据。本方法在对松辽盆地松科一井嫩江运动控制的物源体系研究中得到成功的应用。同时,该方法表达直观、操作简单,且可以定量和半定量的表征源汇系统的地表动



力学特征,有望成为碎屑锆石热年代学研究的重要补充和沉积物源分析新方法。

致谢:本文研究所用松科一井样品的采集得到白垩纪大陆科学钻首席科学家王成善院士以及王璞珺教授的帮助,在此表示诚挚感谢!袁万明教授、沈传波教授、任建业教授、董春梅教授、刘可禹教授等专家在本文撰写过程中提供了诸多建设性意见,两位匿名审稿人提出的问题和建议为本文质量的提升起到至关重要的作用,在此深表感谢!

谨以此文纪念我的恩师、石油大学的老朋友,俄罗斯科学院柯西金大地构造与地球物理研究所首席科学家安德烈教授(Andrei Stepashko, 1955. 12. 11—2017. 9. 2)。

## References

- Allen, P. A., 2008. From Landscapes into Geological History. *Nature*, 451 (7176): 274 — 276. <https://doi.org/10.1038/nature06586>
- Alling, H. L., 1950. Initial Shape and Roundness of Sedimentary Rock Mineral Particles of Sand Size. *Journal of Sedimentary Research*, 20: 133 — 147. <https://doi.org/10.1306/d42693cd-2b26-11d7-8648000102c1865d>
- Chen, H. H., Zhu, X. M., Huang, H. D., et al., 2017. Sediment Provenance of Shahejie Formation in Lixian Slope of Raoyang Depression Based on the Detrital Zircon Dating Analysis. *Earth Science*, 42 (11): 1955 — 1971 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.124>
- Davis, D. W., Williams, I. S., Krogh, T. E., 2003. Historical Development of Zircon Geochronology. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 145 — 181. <https://doi.org/10.2113/0530145>
- Deer, W. A., Howie, R. A., Zussman, J., 1978. Rock-Forming Minerals, 2A. Single-Chain Silicates. Longman, London.
- Dietz, V., 1973. Experiments on the Influence of Transport on Shape and Roundness of Heavy Minerals. *Contributions to Sedimentology*, 1: 69 — 102.
- Dunkl, I., Di Giulio, A., Kuhlemann, J., 2001. Combination of Single-Grain Fission-Track Chronology and Morphological Analysis of Detrital Zircon Crystals in Provenance Studies: Sources of the Macigno Formation (Apennines, Italy). *Journal of Sedimentary Research*, 71(4): 516 — 525. <https://doi.org/10.1306/102900710516>
- Fedo, C. M., Sircombe, K. N., Rainbird, R. H., 2003. Detrital Zircon Analysis of the Sedimentary Record. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53 (1): 277 — 303. <https://doi.org/10.2113/0530277>
- Feng, Z. Q., Jia, C. Z., Xie, X. N., et al., 2010. Tectonostratigraphic Units and Stratigraphic Sequences of the Non-marine Songliao Basin, Northeast China. *Basin Research*, 22(1): 79 — 95. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2009.00445.x>
- Finch, R. J., Hanchar, J. M., 2003. Structure and Chemistry of Zircon and Zircon-Group Minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 1 — 25. <https://doi.org/10.2113/0530001>
- Gärtne, A., Linnemann, U., Sagawe, A., et al., 2013. Morphology of Zircon Crystal Grains in Sediments—Characteristics, Classifications, Definitions Morphologie Von Zirkonen in Sedimenten—Merkmale, Klassifikationen, Definitionen. *Journal of Central European Geology*, 59: 65 — 73.
- Gärtne, A., Youbi, N., Villeneuve, M., et al., 2017. The Zircon Evidence of Temporally Changing Sediment Transport—The NW Gondwana Margin during Cambrian to Devonian Time (Aoucert and Smara Areas, Moroccan Sahara). *International Journal of Earth Sciences*, 106 (8): 2747 — 2769. <https://doi.org/10.1007/s00531-017-1457-x>
- Garver, J. I., Kamp, P. J. J., 2002. Integration of Zircon Color and Zircon Fission-Track Zonation Patterns in Orogenic Belts: Application to the Southern Alps, New Zealand. *Tectonophysics*, 349(1—4): 203 — 219. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(02\)00054-9](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(02)00054-9)
- Hollis, J. D., Sutherland, F. L., 1985. Occurrences and Origins of Gem Zircons in Eastern Australia. *Records of the Australian Museum*, 36(6): 299 — 311. <https://doi.org/10.3853/j.0067-1975.36.1985.349>
- Kong, L. Y., Mao, X. W., Chen, C., et al., 2017. Chronological Study on Detrital Zircons and Its Geological Significance from Mesoproterozoic Dagushi Group in the Dahongshan Area, North Margin of the Yangtze Block. *Earth Science*, 42(4): 485 — 501 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.039>
- Košler, J., Sylvester, P. J., 2003. Present Trends and the Future of Zircon in Geochronology: Laser Ablation ICPMS. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53 (1): 243 — 275. <https://doi.org/10.2113/0530243>
- Lin, C. S., Xia, Q. L., Shi, H. S., et al., 2015. Geomorphological Evolution, Source to Sink System and Basin Analysis. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 9 — 20 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Zong, K. Q., et al., 2010. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*

- tin, 55 (15): 1535 — 1546. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-3052-4>
- Ma, H. Y., 2015. Zircon Separation and the Significance of Morphological Study—A Case Study of Zircon from Granite in Hunan. *Mineral Resources and Geology*, 29 (5): 602—607, 639 (in Chinese with English abstract).
- Meade, R. H., 1982. Sources, Sinks, and Storage of River Sediment in the Atlantic Drainage of the United States. *The Journal of Geology*, 90(3): 235—252. <https://doi.org/10.1086/628677>
- Nasdala, L., Zhang, M., Kempe, U., et al., 2003. Spectroscopic Methods Applied to Zircon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 427—467.
- Pupin, J. P., 1980. Zircon and Granite Petrology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 73 (3): 207—220. <https://doi.org/10.1007/bf00381441>
- Roger, F., Malavielle, J., Leloup, P. H., et al., 2004. Timing of Granite Emplacement and Cooling in the Songpan-Garzê Fold Belt (Eastern Tibetan Plateau) with Tectonic Implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(5): 465—481. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(03\)00089-0](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(03)00089-0)
- Russell, R. D., Taylor, R. E., 1937. Roundness and Shape of Mississippi River Sands. *The Journal of Geology*, 45 (3): 225—267. <https://doi.org/10.1086/624526>.
- Scott, R. W., Wan, X. Q., Wang, C. S., et al., 2012. Late Cretaceous Chronostratigraphy (Turonian-Maastrichtian): SK1 Core Songliao Basin, China. *Geoscience Frontiers*, 3 (4): 357—367. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Song, Y., Ren, J. Y., Stepashko, A., et al., 2014. Post-Rift Geodynamics of the Songliao Basin, NE China: Origin and Significance of T11 (Coniacian) Unconformity. *Tectonophysics*, 634: 1—18. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Song, Y., Zhang, J. X., Stepashko, A., et al., 2016. Decomposition the Detrital Grain Ages by Kernel Density Estimation and Its Applications: Determining the Major Tectonic Events in the Songliao Basin, NE China. *Earth Science Frontiers*, 23 (4): 265—276 (in Chinese with English abstract).
- Vavra, G., Schmid, R., Gebauer, D., 1999. Internal Morphology, Habit and U-Th-Pb Microanalysis of Amphibolite-to-Granulite Facies Zircons: Geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(4): 380—404.
- Wang, C. S., Cao, K., Huang, Y. J., 2009. Sedimentary Record and Cretaceous Earth Surface System Changes. *Earth Science Frontiers*, 16(5): 1—14 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. S., Feng, Z. Q., Wu, H. Y., et al., 2008. Preliminary Achievement of the Chinese Cretaceous Continental Scientific Drilling Project-SK-I. *Acta Geologica Sinica*, 82 (1): 9—20 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X., 1998. Quantitative Description of Zircon Morphology and Its Dynamics Analysis. *Science in China (Series D)*, 41(4): 422—428.
- Wayne, D. M., Sinha, A. K., 1988. Physical and Chemical Response of Zircons to Deformation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98(1): 109—121. <https://doi.org/10.1007/bf00371915>
- Zoleikhaei, Y., Frei, D., Morton, A., et al., 2016. Roundness of Heavy Minerals (Zircon and Apatite) as a Provenance Tool for Unraveling Recycling: A Case Study from the Sefidrud and Sarbaz Rivers in N and SE Iran. *Sedimentary Geology*, 342: 106—117. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.06.016>

#### 附中文参考文献

- 陈贺贺, 朱筱敏, 黄捍东, 等, 2017. 基于碎屑锆石定年的饶阳凹陷蠡县斜坡沙河街组物源分析. *地球科学*, 42(11): 1955—1971. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.124>
- 孔令耀, 毛新武, 陈超, 等, 2017. 扬子北缘大洪山地区中元古代打鼓石群碎屑锆石年代学及其地质意义. *地球科学*, 42(4): 485—501. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.039>
- 林畅松, 夏庆龙, 施和生, 等, 2015. 地貌演化、源—汇过程与盆地分析. *地学前缘*, 22(1): 9—20.
- 马慧英, 2015. 锆石分离与形态学研究的意义——以湖南省花岗岩锆石为例. *矿产与地质*, 29(5): 602—607, 639.
- 宋鹰, 张俊霞, Stepashko, A., 等, 2016. 基于核密度估计的碎屑颗粒年龄分析及应用: 松辽盆地构造事件定年. *地学前缘*, 23(4): 265—276.
- 王成善, 曹珂, 黄永建, 2009. 沉积记录与白垩纪地球表层系统变化. *地学前缘*, 16(5): 1—14.
- 王成善, 冯志强, 吴河勇, 等, 2008. 中国白垩纪大陆科学钻探工程: 松科一井科学钻探工程的实施与初步进展. *地质学报*, 82(1): 9—20.