

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2016.05.011

黄河流域现代沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄物源探讨

岳保静^{1,2,3}, 廖晶^{1,2,4}

(1. 国土资源部油气资源和环境地质重点实验室, 青岛 266071; 2. 青岛海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071;
3. 中国地质调查局滨海湿地生物地质重点实验室, 青岛 266071;
4. 国土资源部天然气水合物重点实验室, 中国地质调查局 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘要:在系统搜集与分析前人发表的现代黄河碎屑锆石 U-Pb 年龄及黄河流域内岩体锆石 U-Pb 年龄的基础上, 对黄河上游到入海口 6 个站位及黄河支流 2 个站位现代沉积物样品碎屑锆石 U-Pb 年龄进行对比, 结果发现 200~350、350~500、700~1 000、1 000~1 800、1 800~2 000 和 2 000~2 600 Ma 这 6 个年龄组是黄河流域沉积物 U-Pb 年龄的主要组成, 其中又以 200~350、350~500、1 800~2 000 和 2 000~2 600 Ma 占主体, 与黄河流域各可能物源区的 U-Pb 年龄对比, 认为黄河上游物质主要来自松潘-甘孜造山带和很多近缘河水侵蚀的黄土, 其可能源区包括华北板块、扬子板块、秦岭造山带、东昆仑造山带、柴达木板块北缘及祁连造山带, 由于松潘-甘孜造山带和黄土高原黄土来源的复杂性其源区判别还需要借助其他指标加以确定, 黄河中下游则有大量华北板块和大别-苏鲁造山带物质的加入。鉴于当前综合运用多种物源分析方法, 对长江三角洲盆地若干钻孔地层研究取得的进展及黄河三角洲钻孔研究现状, 提出对黄河三角洲钻孔沉积物开展精细物源示踪对黄河时空演化研究的重要性。

关键词:物源示踪; 碎屑锆石; U-Pb 定年; 演化; 黄河

中图分类号: P539.6

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2016)05-0109-11

近年来, 大河流域的发育历史和沉积演化越来越引起国际地学界的关注, 对世界主要河流形成演化的研究是深入探索全球变化中一些重要科学问题的基础^[1]。黄河的发育受构造、地貌、气候和水文等自然因素控制, 与青藏高原、黄土高原和华北平原及黄、渤海陆架的演变有着紧密的成因联系, 是综合反映晚新生代东亚构造地貌和自然环境变迁的重大地质事件, 长期备受地质学家重视^[2]。黄河是如何发育的, 又是何时形成的? 黄河入海的时代与位置如何? 这一系列问题是地球科学界长期以来关注的重大问题。众多学者进行了大量的研究探讨, 取得了许多重要研究成果, 也存在颇多争议, 概括起来主要有如下几种观点: (1) 形成于更新世之前^[3]; (2) 形成于早更新世^[4-6]; (3) 形成于晚更新世至晚更新世末期^[7]。不同学者研究问题的角度不同, 所采用的证据相异, 是得出不同结论的重要原因。正确认识黄河的发育历史, 有必要对不同地质构造单元的河段进行多角度多方法综合分析。

近年来随着测试分析技术的发展, 单颗粒碎屑矿物同位素测年、元素地球化学分析已越来越广泛

地应用于物源研究, 锆石广泛存在于各种沉积岩、岩浆岩、变质岩中, 以其 U-Th-Pb 同位素体系封闭温度高、受后期构造热事件影响较小、抗风化能力强、受沉积分选过程和成岩作用影响小等特点, 目前被广泛应用于物源分析^[8]。锆石年龄可以更精确地反映沉积物形成过程中的多期不同地质事件的发生年龄, 碎屑锆石年龄谱系特征可直接反映沉积物源区岩石的年龄组成^[9]。现代河流沉积物是一种典型的碎屑沉积物, 其组成是对其流经区域的岩石成分、岩石来源以及源区岩石所处的构造环境的可靠地质记录。

目前, 已有国内外学者利用现代河流碎屑沉积物中碎屑锆石对长江、黄河、东南亚的湄公河、伊洛瓦底江、怒江、红河、密西西比河等众多河流沙中的碎屑锆石 U-Pb 年龄结合 Hf 同位素分析, 对这些河流的形成演化进行研究, 积累了大量的宝贵数据并取得了一定进展^[10-16]。综合前人对黄河流域的研究不难发现, 这些研究大多只集中在某一河段, 对整个流域的系统分析对比工作刚刚起步^[17], 将黄河上、中、下游的锆石年代学特征进行对比及与黄河流域相关构造单元的对比研究工作还有待于进一步细化。本文选取前人对黄河干流上游到入海口不同河段和部分支流现代河流碎屑沉积物样品中碎屑锆石 U-Pb 年龄进行综合分析, 对比不同样品的年龄组成差别, 并对黄河流域可能物源区不同构造单元锆石 U-Pb 年龄进行汇总, 由锆石 U-Pb 年龄判别其可

基金项目: 国家自然科学基金项目(41106060, 40406080)

作者简介: 岳保静(1981—), 女, 硕士, 海洋地质专业, E-mail: selinayue1022@hotmail.com

收稿日期: 2015-10-11; **改回日期:** 2016-01-30. 文凤英编辑

能的物源区,最后结合前人对长江演化研究的方法和现状对黄河形成演化研究进行展望。

1 地质概况与数据来源

黄河是世界第五大河流,我国第二大河,也是世界上泥沙含量最高的河流,它发源于青海巴颜喀拉山的北麓,流经青藏高原、黄土高原和华北平原,东流入渤海,全长 5 464 km,流域东西长约 1 900 km,南北长约 1 100 km,流域面积约 752 443 km²,以内蒙古自治区的河口镇和河南郑州桃花峪分为上游、中游、下游三段,跨越松潘-甘孜造山带、秦岭造山带、祁连造山带和华北陆块等多个构造单元^[18]。黄河上游流域区主要出露三叠系和石炭系-二叠系及少量白垩系、古生界地层和零星的变质岩、花岗岩;中游流域主要分布厚约 100~200 m 的黄土和少量三叠系、白垩系砂质碎屑岩;下游进入华北平原,黄河三角洲是黄河携带大量泥沙在渤海坳陷处沉积形成的冲积平原^[19](图 1)。由此可见,黄河流域面积广,源岩岩石复杂,且在岩体风化、剥蚀、搬运和沉积过程中经历了复杂的变化。

目前,利用碎屑锆石年龄分布特征对黄河的演化研究已经开展了部分工作^[12-17],表 1 列出了不同学者对黄河上中下游不同位置沉积物取样的地点,沉积物中的碎屑锆石经过分选-制靶-阴极发光照像后选择合适的激光剥蚀束斑进行测定,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb、²⁰⁶Pb/²³⁸U、²⁰⁷Pb/²³⁵U 的测试精度(2σ)均为 2%左右,对锆石标准的定年精度和准确度(2σ)在 1%左右;样品分析过程中,标样的分析结果与年龄推荐值在误差范围内一致,采用 ISOPLOT 程序进

行锆石协和图和相对概率分布图的绘制,用²⁰⁶Pb/²³⁸U 和²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄来分别代表<1 000 Ma 和>1 000 Ma 锆石年龄。本文将前人对黄河上中下游 6 个站位、支流 2 个站位的锆石 U-Pb 年龄分布(图 2)进行对比,并详细汇总了黄河流域相关构造单元的年代学特征,图 3 为黄河流域各构造单元年龄谱,通过综合对比对黄河流域水系演化及物源示踪进行讨论。

2 黄河流域碎屑锆石 U-Pb 年龄特征

2.1 黄河流域现代沉积物

黄河流域上游到入海口共 6 个现代沉积物样品及支流 2 个样品碎屑锆石 U-Pb 年龄谱图如图 2 所示,8 个样品中大多数锆石颗粒 Th/U>0.3,说明这些锆石多是岩浆成因的锆石。结合锆石形态研究也可以看出,大部分锆石都发育有较好的岩浆型韵律环带,也有少量具典型的核边结构,为变质成因锆石^[12-16]。研究表明,黄河源头区沉积物碎屑锆石大小不等,主要呈次棱角状—浑圆状,经过长距离搬运与磨蚀;少部分晶形完好,为近源搬运^[12];而黄河入海口河流沙的碎屑锆石以粒径近 100 μm 为峰,一类锆石颜色为粉黄色—浅黄色,占总量的 80%,自形-半自形双锥柱状及短柱状,少数为次浑圆柱状、粒状,多数粒径 10~160 μm,磨圆度低,搬运距离短;另一类呈玫瑰红色,占总量的 20%,粒径 10~140 μm,中等磨圆,搬运距离较长^[16];可见,黄河流域锆石颗粒长距离搬运贡献大于近源搬运,但不同地域锆石形态、粒径存在区别。

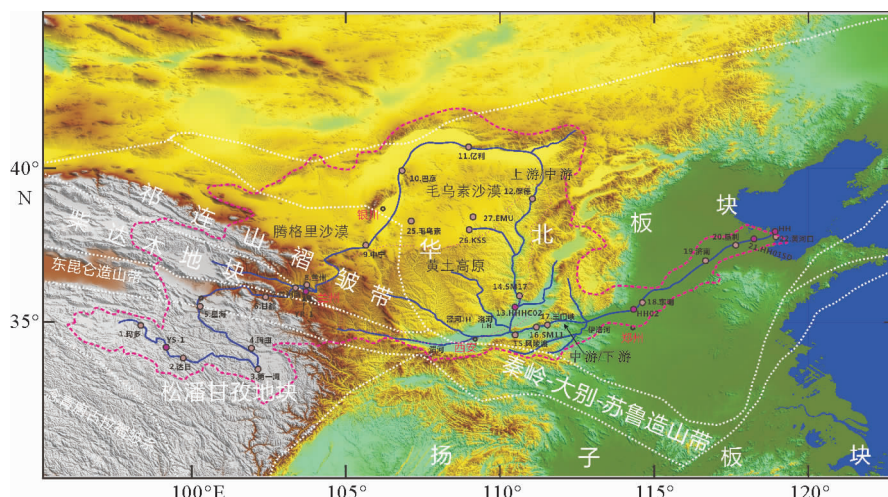


图 1 黄河流域地质图及采样点位置^[17]

Fig. 1 The drainage area of the Yellow River and sample locations^[17]

表 1 黄河流域采样点位置

Table 1 Locations of sampling sites in the Yellow River drainage basin

样品编号	地理位置	经纬度	文献来源
YS-1	上游(黄河源头), 青海省达日县	33°40′00″N, 99°16′48″E	[12]
YR-1	上游, 甘肃省兰州市	36°08′22″N, 103°0′21″E	[13]
HHHC02	中游, 山西省韩城市	35°24′30″N, 110°27′19″E	[14]
LH	黄河支流, 洛河		[15]
JH	黄河支流, 泾河		[15]
HHO2	下游, 河南省郑州市	34°54′23″N, 113°39′49″E	[14]
HH01SD	下游, 山东省东营市	37°36′34″N, 118°23′30″E	[14]
HH	下游(黄河入海口), 山东省东营市	37°51′9″N, 119°5′50″E	[16]

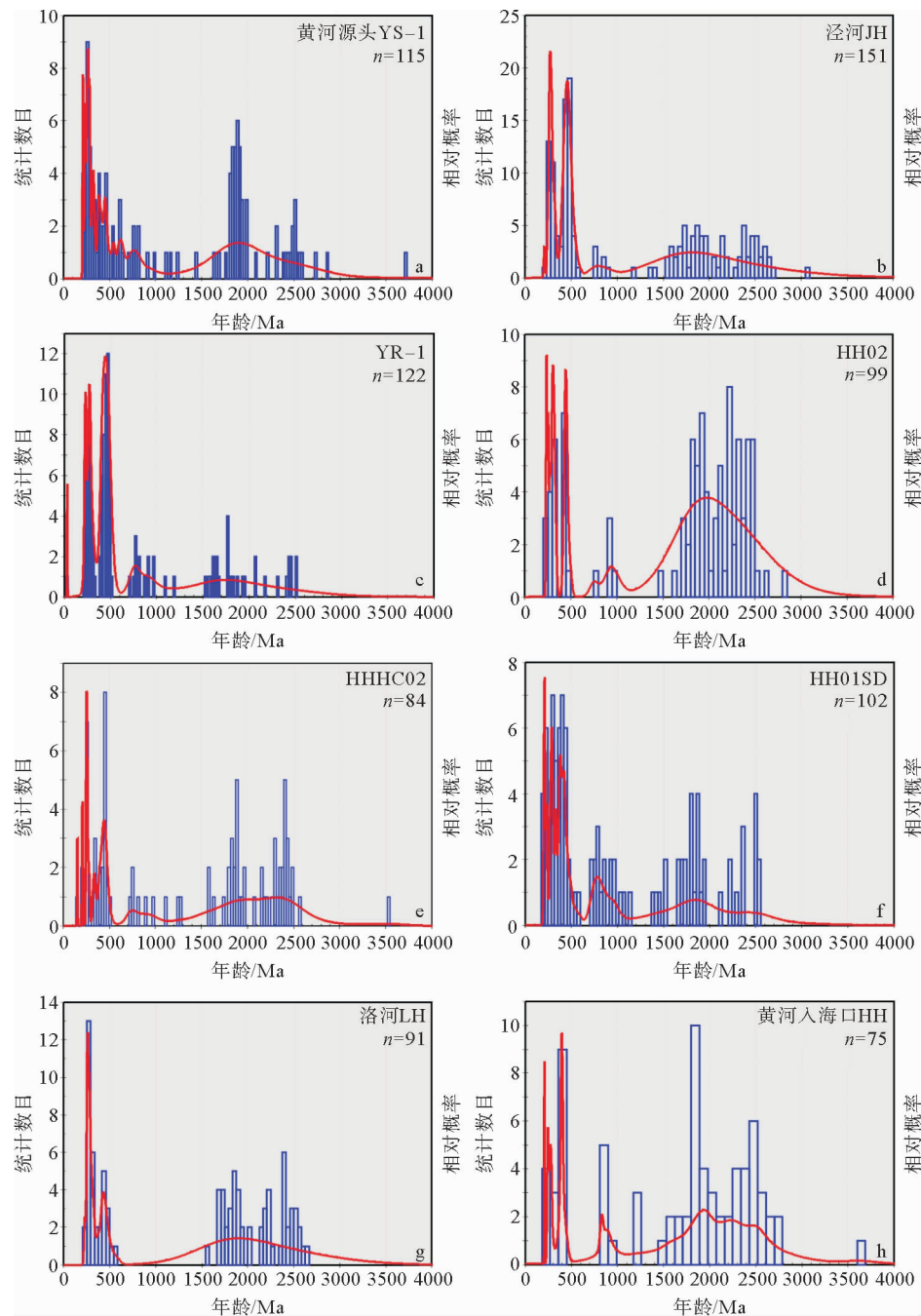


图 2 黄河流域样品碎屑锆石 U-Pb 年龄谱

Fig. 2 The U-Pb age distribution patterns of detrital zircons in the Yellow River drainage basin

从图 2 中可以看出,在黄河源头到黄河入海口 6 个站位现代沉积物样品中,一共出现 9 组碎屑锆石 U-Pb 年龄,即 <200 、 $200\sim350$ 、 $350\sim500$ 、 $500\sim700$ 、 $700\sim1\,000$ 、 $1\,000\sim1\,800$ 、 $1\,800\sim2\,000$ 、 $2\,000\sim2\,600$ 、 $>2\,600$ Ma。其中仅有 YR-1 和 HHHC02 两个样品有 <200 Ma 的年龄组分;3 个样品 YS-1、YR-1、HH01SD 中有 $500\sim700$ Ma 的年龄组分;4 个样品 YS-1、HHC02、HH02 和黄河入海口 HH 中含有 $>2\,600$ Ma 的年龄组分; $200\sim350$ 、 $350\sim500$ 、 $700\sim1\,000$ 、 $1\,000\sim1\,800$ 、 $1\,800\sim2\,000$ 、 $2\,000\sim2\,600$ Ma 这 6 个年龄组分在 6 个样品中均有分布,其中 $250\sim500$ 、 $1\,800\sim2\,000$ 、 $2\,000\sim2\,600$ Ma 这 3

组年龄是黄河流域碎屑锆石的峰值年龄组成。6 个样品碎屑锆石 U-Pb 年龄重叠度和相似度较高,在一定程度上说明黄河流域现代沉积物在不同河段,其锆石 U-Pb 年龄相近。由于黄河长度较长,流域地形复杂,锆石颗粒在被河流搬运的过程中很可能丢失,现代河流沉积物对碎屑锆石的搬运距离也有待考证,因此,黄河流域各个河段碎屑锆石 U-Pb 年龄表现出来的相似性,很可能是沿途源区新补充锆石 U-Pb 年龄相近的结果。基于这一推论,有必要对黄河流域各个构造单元年代学特征进行总结,并与黄河流域样品碎屑锆石特征进行对比,才能更好地确定其物质来源和物源变化的原因。

表 2 黄河流域样品碎屑锆石 U-Pb 年龄分布及可能源区

Table 2 Distribution of U-Pb ages from detrital zircons in the Yellow River drainage basin and possible provenances %

U-Pb 年龄/Ma	YS-1	YR-1	HHHC02	HH02	HH01SD	HH	可能源区
<200		0.83	1.19				青藏高原,华北地块
$200\sim350$	6.09	23.14	29.76	13.13	24.51	9.33	秦岭-大别-苏鲁造山带,东昆仑造山带、柴达木板块北缘、华北板块
$350\sim500$	7.83	37.19	26.19	8.08	21.57	12.00	秦岭-大别-苏鲁造山带,东昆仑造山带、柴达木板块北缘、华北板块
$500\sim700$	6.96	0.83			1.96		秦岭-大别-苏鲁造山带,祁连造山带
$700\sim1\,000$	7.83	10.74	7.14	5.05	13.73	8.00	秦岭-大别-苏鲁造山带,扬子板块北缘
$1\,000\sim1\,800$	6.09	14.05	9.52	7.07	15.69	13.33	华北板块,扬子板块
$1\,800\sim2\,000$	26.96	4.03	17.86	22.22	9.80	20.00	华北板块,扬子板块
$2\,000\sim2\,600$	13.91	9.09	30.95	41.41	12.75	30.67	华北板块,扬子板块
$>2\,600$	2.61		1.19	3.03		6.67	华北板块

2.2 黄河流域相关各构造单元年代学

2.2.1 松潘-甘孜造山带

松潘-甘孜造山带属于黄河源头区的构造单元,发育了世界上最大的三叠系复理石沉积盆地,黄河源头区位于松潘-甘孜造山带西部的巴颜喀拉地区。前人对松潘-甘孜造山带地区三叠系沉积盆地物源开展了碎屑锆石 U-Pb 年代学研究,结果表明该区碎屑锆石形成的年龄范围为 $200\sim2\,700$ Ma,主要峰值集中于 $240\sim290$ 、 $400\sim480$ 、 $700\sim800$ 、 $900\sim1\,000$ 、 $1\,800\sim2\,000$ 、 $2\,200\sim2\,500$ Ma,此区出露的花岗岩体主要形成于晚三叠世 $185\sim220$ Ma,岩浆活动可延续到早侏罗世晚期^[20]。研究表明三叠系沉积物具有复杂的源区,Weislogel 等将松潘-甘孜造山带三叠系沉积物分为东北、东和西北 3 个沉积中心,认为东北部沉积中心物质主要来自华北块体、东昆仑造山带、柴达木北缘、祁连造山带和秦岭造山

带,西北部沉积中心物源主要为东昆仑造山带,东部沉积中心物质主要来自扬子板块^[21]。

2.2.2 柴达木北缘

目前,在中国西部柴达木北缘地区所获得的同位素年代学资料普遍认为这些 HP/UHP 变质岩形成于早古生代时期(约 $500\sim400$ Ma),张建新等研究表明,柴北缘深变质基底壳源花岗岩形成于晋宁期($850\sim1\,000$ Ma),与祁连造山带深变质基底的岩石组合和特征十分相似,表明两者属同一基底,具有类似的早期演化历史^[22]。

2.2.3 东昆仑造山带

东昆仑造山带位于青藏高原北缘,是一个经历多期构造活动的复杂造山带。前人研究认为东昆仑造山带的基底物质主要形成于元古代晚期($1.6\sim1.8$ Ga),其古生代构造-岩浆时间序列($508\sim450$ Ma)与北祁连造山带($532\sim443$ Ma)可对比,属祁连-东昆仑加里东造山系统的一部分;到晚古生代-

早中生代时东昆仑卷入古特提斯构造体制, 属于古特提斯造山系统的北缘, 东昆仑自中一晚石炭世开始了板块的俯冲, 中一晚二叠世到早三叠世(240~260 Ma)是主要的俯冲造山期, 此时期花岗岩类分布非常广泛, 规模宏大, 构成东昆仑造山带的主体^[23]。

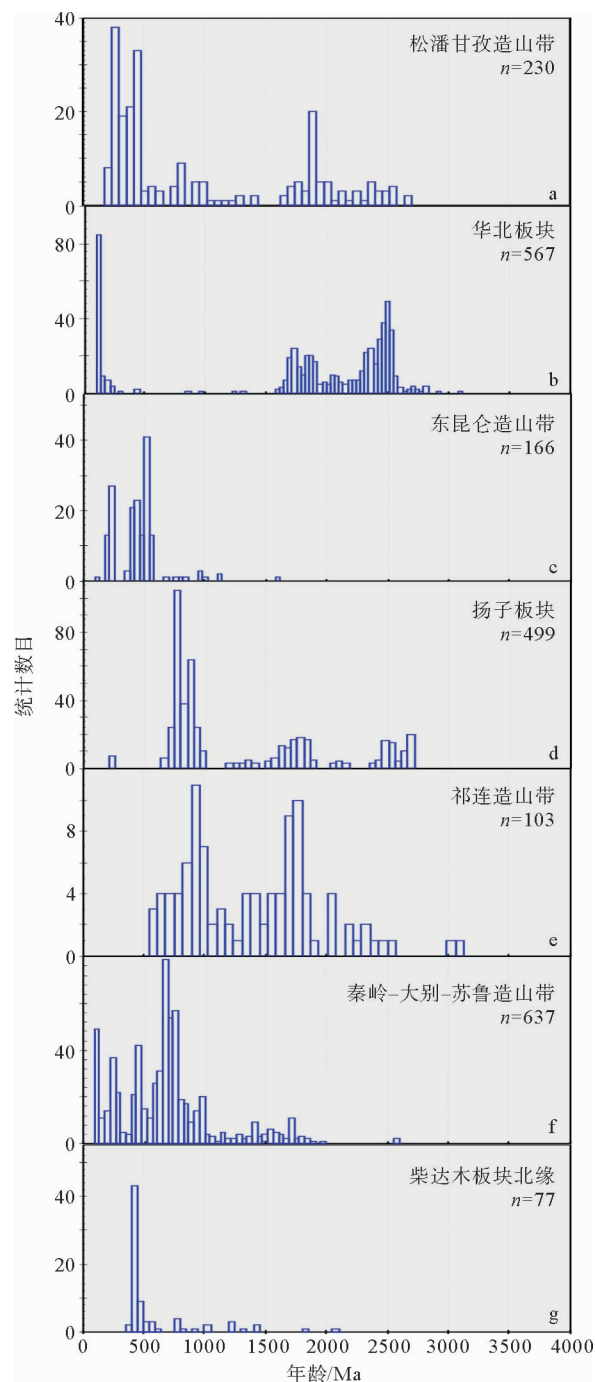
2.2.4 祁连造山带

祁连造山带位于中国大陆西北地区, 呈北西-西南-东走向, 环绕青藏高原的北缘。董国安等对祁连地块前寒武纪基底岩石的锆石年代学研究表明, 其锆石年龄分布于 0.88~3.09 Ga 之间, 主要介于 1.0~1.8 Ga, 约占 70%, 峰值为 1.6~1.8 Ga, 部分在 2.0~2.5 Ga 之间, 约占 20%, 其余零星分布在太古代和新元古代, 对比前人资料表明祁连地块前寒武纪基底岩石与扬子地块前寒武纪基底岩石的年龄谱相似, 结合 Nd 同位素模式年龄、地层学及古生物生态证据推论祁连地块与扬子地块具有较强的亲缘性^[24]。

2.2.5 秦岭-大别-苏鲁造山带

秦岭造山带是华北板块与扬子板块之间的巨型复合造山带, 近年来对其进行的多学科研究取得了很大的进展。秦岭造山带花岗岩包括从新元古代至三叠纪不同时代的产物, 研究表明, 新元古代花岗岩(958~659 Ma)主要出露于北秦岭、陡岭及汉南-勉略地区, 早古生代花岗岩是秦岭花岗岩主体(500~420 Ma), 沿秦岭与华北板块的主缝合带——商丹断裂带分布, 中生代印支期花岗岩(222~188 Ma)十分发育, 集中分布在商丹断裂带两侧及西秦岭地区^[25]。

大别山-苏鲁造山带是印支期华北板块与扬子板块之间的碰撞造山带, 已有大量的同位素年代学证据表明其峰期变质作用发生在 200~240 Ma 之间, 郑永飞等对大别-苏鲁造山带榴辉岩和花岗片麻岩中锆石的激光氧同位素分析、单颗粒 U-Pb 年龄测定结果表明, 大多数锆石具有大的岩浆成因核和窄的变质增生边, 岩浆成因核具有新元古代年龄(700~800 Ma), 大多数具有比地幔锆石低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值^[26]。陈道公等对大别造山带各主要构造地体(南大别、北大别、北淮阳和苏鲁)中的片麻岩和榴辉岩中锆石的 U/Pb 定年, 得到的年龄主要分布在 120~140、190~250、650~850、约 1 900 和 2 500 Ma, 分析认为第一组年龄主要和侏罗纪-白垩纪的岩浆构造活动有关, 第二组年龄和超高压变质作用有关, 第三至第五组年龄则主要反映了变质岩原岩的年龄^[27]。



(a) 松潘-甘孜地块^[20,31-32]; (b) 华北板块^[33-37]; (c) 东昆仑造山带^[24,38-39]; (d) 扬子板块^[40-42]; (e) 祁连造山带^[24,43]; (f) 秦岭-大别-苏鲁造山带^[27,44-47]; (g) 柴达木板块北缘^[22,48-49]

(a) Songpan-Ganzi Block, (b) North China Craton, (c) East-Kunlun Orogenic Belt, (d) Yangtze Craton, (e) Qilian Terrane, (f) Qinling-Dabie-Sulu orogen, (g) northern margin of Qaidam basin

图3 黄河流域各构造单元年龄谱

Fig. 3 U-Pb ages of concordant detrital zircons from different terranes

2.2.6 扬子板块

扬子北缘新元古代时期岩浆作用主要活动时间集中在中新元古代(700~800 Ma), 在约 750 Ma 岩

浆活动最为强烈,在扬子板块东南、西南和西北边缘,中新元古代时期发育与地幔柱和裂谷构造有关的大面积岩浆活动,主体活动时间约为 830~750 Ma;三叠纪时华北板块沿秦岭-大别-苏鲁造山带与扬子板块碰撞拼合,受其影响,沿大别-苏鲁造山带形成含柯石英的超高压变质带(230~218 Ma)。此外,碎屑锆石 U-Pb 年龄及相关研究反映在扬子板块内也存在太古代>3.2、2.5 和 1.8~2.2 Ga 的锆石年龄^[28]。

2.2.7 华北板块

华北板块由东部块体、西部块体和中部造山带组成,前人研究认为,华北板块内部广泛存在着 3.3~3.8 Ga 的古老物质,它们以微陆块的形式于新太古代末期拼合在一起。华北板块基底锆石主要峰期 2.5 Ga,次级峰期 1.85 Ga,2.4~2.5 Ga 的年龄被华北板块前寒武结晶基底大量的花岗岩类和长英质火山岩广泛记录,1.8~1.9 Ga 的年龄纪录代表华北板块在这一时期发生的一次大规模变质事件,近 1.85 Ga 华北块体的西部陆块与东部陆块沿中部造山带发生碰撞拼合形成华北板块统一的基底,从此以后开始了裂谷系的发育与演化^[29]。华北南部的熊耳裂陷槽中发现的熊耳群双峰式火山岩最古老的岩浆年龄约为 1 800~1 780 Ma;华北北部的燕辽裂陷槽分布的火山岩,锆石 U-Pb 年龄为 1 680~1 620 Ma,非造山侵入岩的同位素年龄约 1 720~1 670 Ma;1 300~1 000 Ma 的岩浆锆石记录很少,少量出现在华北板块东缘和北缘的沉积岩碎屑锆石和侵入岩的捕获锆石中。受地台北侧古亚洲洋扩展影响,板块东部发育了含金刚石的金伯利岩(475~462 Ma),在晚古生代华北板块沿中亚造山带与西伯利亚板块碰撞拼合,华北板块北缘地区发育了二叠纪—三叠纪东西向的碱性正长岩带(250~208 Ma),从晚三叠世至早白垩世在华北板块和秦岭-大别造山带发生了广泛的巨量岩浆活动,形成了华北板块中生代花岗岩主体(215~109 Ma)^[30]。

2.3 黄河流域沉积物来源

2.3.1 年龄为<200、500~700、700~1 000、1 000~1 800、>2 600 Ma 的锆石

年龄<200 Ma 的锆石颗粒只在 YR-1 和 HH-HC02 两个样品中零星分布,分别为 30.2 和 153 Ma,表明青藏高原东北部有较多小于 50 Ma 的火山活动^[50],30.2 Ma 可能是此期岩浆作用形成并由风力或河流搬运到黄土高原的;153 Ma 推测为华北板块内中生代岩浆作用的产物。

年龄 500~700 Ma 的锆石颗粒在 YS-1 中少量分布,在 YR-1 和 HH01SD 中零星分布,对照流域构造单元锆石年代特征,认为此年龄段的锆石为秦岭-大别-苏鲁造山带、祁连造山带的贡献。

年龄>2 600 Ma 的锆石颗粒在 YS-1、HH-HC02、HH02 和 HH 这 4 个样品中少量分布,在黄河源头 YS-1 中有 3 个,年龄最老的锆石为 3 701 Ma;样品 HH02 中 3 个,年龄最老的锆石为 2 810 Ma;样品 HHHC02 中有 1 个,年龄为 3 525 Ma;黄河入海口 HH 中有 5 个,年龄最老的锆石为 3 647 Ma。目前已有研究认为,华北板块最古老的锆石年龄为 3 800 Ma^[30];扬子板块已知最古老的岩石陆壳物质来自宜昌三峡地区,年龄为 3 500 Ma,扬子板块北缘崆岭群变质沉积岩中最老的锆石 U-Pb 年龄为 3 300 Ma^[28],由此推断黄河源区内最老锆石的源区可能来自华北板块。

对于 700~1 600 Ma 的锆石,其年龄和扬子地块北缘、秦岭造山带西南侧的勉略宁地区的碧口群火山岩(1 611~764 Ma)、大别苏鲁造山带的锆石年龄相吻合;而在华北板块,年龄 700~1 000 Ma 的岩体几乎没有发现,1 000~1 300 Ma 少量出现在华北板块东缘和北缘的沉积岩碎屑锆石和侵入岩的捕获锆石中。因此,推测所有样品中年龄为 700~1 000、1 000~1 800 Ma 的锆石主要来自扬子板块北缘和秦岭-大别-苏鲁造山带。

兰中伍等^[51]对四川松潘-甘孜盆地砂岩的锆石 U-Pb 年龄分析指出,与 1 800~1 600 Ma 期间的锆石年龄相一致的岩体有华北板块豫西地区熊耳群火山岩和扬子陆块北缘的铁船山群岩体,因此,扬子板块和华北板块都可能是流域内样品中年龄为 1 800~1 600 Ma 的源区。

2.3.2 年龄为 200~350 和 350~500 Ma 的锆石

年龄为 200~350 和 250~500 Ma 的锆石颗粒在黄河流域 6 个样品中广泛存在,且所占比例很大,在黄河上中下游均呈现明显的年龄峰值。研究认为秦岭造山带内发育的印支期花岗岩类形成时代主要为 200~230 Ma;大别-苏鲁造山带内高压—超高压变质作用主要集中在 219~245 Ma;东昆仑造山带内岛弧岩浆作用主要发生在 240~260 Ma。此外,早古生代岩浆事件(350~500)在昆仑-秦岭-大别-苏鲁造山带和柴达木板块北缘也广泛存在。Diwu 等^[15]对华北板块西部块体研究发现,华北板块东部地块以 200~350 和 140~200 Ma 岩浆作用为主;西部地块鄂尔多斯盆地发育的泾河和渭河(黄河支流)沉积物中则发现大量早古生代碎屑锆石(400~

520 Ma)。由此推测黄河沉积物中年龄为 200~350 和 350~500 Ma 的锆石主要来自秦岭-大别-苏鲁造山带和东昆仑造山带、柴达木北缘及华北板块。

2.3.3 年龄为 1 800~2 000 和 2 000~2 600 Ma 的锆石

兰中伍等^[51]对四川松潘-甘孜盆地砂岩的锆石 U-Pb 年龄分析认为,与盆地内年龄范围为 2 500~1 800 Ma 的锆石相一致的岩体有南秦岭的陡岭群变玄武质岩体以及扬子陆块北缘的火地垭群。虽然这一期岩浆锆石颗粒的火山岩或侵入岩物源区在川西南、滇中、柴达木盆地南缘、塔里木板块及华北地区的吕梁山都有分布。由华北板块年龄分布图可以看出,1 850 和 2 500 Ma 是华北块体内岩浆活动的两个特征年龄峰。黄河 6 个站位河流沙中锆石 U-Pb 年龄普遍出现 1 800~1 900 和 2 200~2 500 Ma 的两个峰期,但是相对来说,黄河中下游 4 个采样点比起上游 YS-1 和 YR-1 这两个采样点的锆石年龄谱所呈现的峰值特征要明显得多,由此推测黄河中下游年龄为 1 800~2 000 和 2 000~2 600 Ma 的锆石主要来自华北板块,而黄河上游此年龄期间的锆石来源还需要借助其他指标进一步确认。

由图 2 可以看出,甘肃省兰州市附近的黄河沉积物锆石(YR-1)与其他采样点年龄谱特征有显著区别,Stevens 等^[13]分析认为此采样点的锆石年代分布特征与毛乌素沙漠西部、黄土高原洛川第四纪黄土组合、青藏高原东北部和柴达木盆地碎屑锆石年龄谱分布一致,并提出黄土的物源很大一部分可能是通过黄河从青藏高原东北部运输到附近沙漠,然后从沙漠或干涸的河床被风力搬运到黄土高原地区的,但 Zhang 等^[52]证明黄河上游黄土的风化对黄河上游河水化学和沉积物的组成有一定的贡献,同时, Yang 等^[53]基于 Sr-Nd 同位素也认为西宁黄土和玛曲黄河沉积物有较好的一致性,因此,李云等^[54]认为由于近缘侵蚀作用使黄河上游分布的黄土对黄河上游泥沙有一定的贡献,但黄河上游泥沙不可能完全来自松潘-甘孜地块,还包含很多近缘河水侵蚀的黄土,但对于黄土高原中的锆石年龄特征解释存在争议,集中在青藏高原北部戈壁沙漠及附近沙漠、中亚造山带、阿拉善高原及其周边干旱地区等。李云等对黄土高原黄土碎屑锆石分析还指出,其主要锆石粒径是 20~60 μm ,可见黄土高原碎屑锆石形态上具有磨圆度较高、粒径较小的特点,这可以作为黄土高原黄土的一个辅助判别指标。

比起黄河干流 6 个站位,支流泾河、洛河的碎屑锆石 500~1 500 Ma 年龄的锆石数量很少,1 500~

2 500 a 的峰值不明显,其年龄分布区间显著缩小,说明其源区较黄河干流要单一。而由黄河下游 3 个站位看出,其锆石年龄分布区间显著扩大,出现 1 800~1 900、2 400~2 500 Ma 两个明显的峰期,与华北板块两个年龄峰期非常一致;而 800~900 Ma 年龄范围的锆石也呈现增加趋势,表明受苏鲁造山带物质影响也显著增加。

3 讨论与结论

黄河流域碎屑锆石 U-Pb 年龄主要包括 200~350、350~500、700~1 000、1 000~1 800、1 800~2 000 和 2 000~2 600 Ma 组分,尤其以 200~350、350~500、1 800~2 000 和 2 000~2 600 Ma 占主体,与黄河流域各可能物源区的 U-Pb 年龄相比,认为黄河上游物质主要来自松潘-甘孜造山带和很多近缘河水侵蚀的黄土,其可能源区包括华北板块、扬子板块、秦岭造山带、东昆仑造山带、柴达木板块北缘及祁连造山带,由于松潘-甘孜造山带和黄土高原黄土来源的复杂性其源区判别还需要借助其他指标加以判别,黄河中游有大量华北板块物质的加入,而下游则有大量大别-苏鲁造山带物质的加入。Nie 等^[17]对黄河流域上、中、下游 22 个站位沉积物锆石 U-Pb 年龄、重矿物岩石学综合分析表明,黄河上游(1—11)及下游(18—22)的现代黄河沉积物样品显示相似的特征,与毛乌素沙漠西部(25)和第四纪中国黄土高原样品特征类似,都表现出两个明显的年龄峰(450 和 250 Ma),黄河上游、下游尽管物源不同却表现出相似的年龄特征是受到下游伊洛河带来的秦岭沉积物的影响,黄河中游(12—17)现代黄河沉积物与黄河上游、下游不同,与华北板块白垩纪砂岩和毛乌素沙漠东部(26,27)分布类似,只有 250 Ma 的年龄峰。黄河上游携带的从青藏高原东北部侵蚀的大量的沉积物,储存在中国黄土高原和西部毛乌素沙漠,现代黄河中游物质主要沉积在小浪底到桃花峪之间,黄河下游特征与在与伊洛河汇合后与上游类似,总的来看与本文分析的结论是一致的。

4 展望

近年来,在长江三角洲地区利用钻孔沉积物重矿物组合、元素地球化学、同位素地球化学和碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系特征等研究,结合磁性地层定年,为研究长江流域演化和东西贯通时限提供了新的思路^[55-58]。Jia 等^[55]对长江三角洲 DY03 孔 9 个层位

样品共 880 个碎屑锆石年龄数据分析认为长江贯通的时限应不晚于 3.2 Ma;王节涛等^[56]对江汉平原周老孔两个层位样品共 251 颗碎屑锆石年龄数据分析认为长江贯通时间约在 0.8 Ma 之前;向芳等^[57]通过对江汉盆地西缘扇三角洲、阶地沉积物 240 个碎屑锆石年龄分析认为长江贯通时间略晚于 0.75 Ma。上述分析的共同点是均认为年龄分布的峰态值增加是源区面积扩展的反映,一些具特定源区指示意义的特征锆石年龄的出现是流域演化的最直接证据,但由于不同地区和层位样品锆石年龄谱峰态值差异较大,对同一年龄段锆石的物源区推断也会因为对区域源岩信息的掌握程度不同出现迥异的解释等原因,最终导致对长江贯通时限的不同认识。尽管碎屑锆石示踪十分有效,但自然过程的复杂性及锆石统计方法的差异都会影响其对源区的解释,由于 Nd 同位素在地壳物质的表生循环过程中基本不受粒度分异、化学风化、搬运、沉积和成岩过程影响,河水携带的风化碎屑物质具有与源区相同的 Nd 模式年龄^[59];锆石极强的稳定性使其 Hf 同位素组成较少受到后期地质事件的影响^[60],这都为源区的判别提供了依据,因此如果将锆石 Sr-Nd 同位素、Hf 同位素作为判别物源的辅助指标可以极大地提高源区判别的准确性。

长江和黄河都发源于青藏高原东北侧,且都具有流域面积广、流域地质构造和源岩类型复杂的特点,因此,上述研究对黄河流域的贯通演化研究具有很好的参考和借鉴。杨守业等^[4]将黄河三角洲石化 2 井钻孔沉积物样品与现代黄河表层沉积物样品的元素地球化学分析进行比较,推测大致在早更新世末时黄河贯通并流进华北平原的现代黄河三角洲地区。目前,利用钻孔沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系结合其同位素特征研究黄河演化贯通尚未开展工作,鉴于这一方法在长江演化方面取得的成果,笔者认为在黄河流域开展相关研究能够深化对黄河演化历史的认识。

参考文献 (References)

- [1] Zheng H B, Clift P D, Wang P, et al. Pre-Miocene birth of the Yangtze River[J]. PNAS, 2013, 110(19):7556-7561.
- [2] Kong D X, Miao C Y, Alistair G L, et al. Evolution of the Yellow River Delta and its relationship with runoff and sediment load from 1983—2011[J]. Journal of Hydrology, 2015, 520: 157-167.
- [3] Lin A M, Yang Z Y, Sun Z M, et al. How and when did the Yellow River develop its square bend [J]. Geology, 2001, 29(10):951-954.
- [4] 杨守业,蔡进功,李从先,等. 黄河贯通时间的新探索[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(2): 15-20. [YANG Shouye, CAI Jingong, LI Congxian, et al. New discussion about the run-through time of the Yellow River [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2001, 21(2): 15-20.]
- [5] Li J J, Fang X M, Song CH, et al. Late Miocene-Quaternary rapid stepwise uplift of the NE Tibetan Plateau and its effects on climatic and environmental changes [J]. Quaternary Research, 2014, 81: 400-423.
- [6] 潘保田,王均平,高红山,等. 河南扣马黄河最高阶地古地磁年代及其对黄河贯通时代的指示[J]. 科学通报, 2005, 50(3): 255-261. [PAN Baotian, WANG Junping, GAO Hongshan, et al. Paleomagnetic dating of the topmost terrace in Kouma, Henan and its indication to the Yellow River running through the Sanmen Gorges [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(3): 255-261.]
- [7] 王苏民,吴锡浩,张振克,等. 三门古湖沉积记录的环境变迁与黄河贯通东流研究[J]. 中国科学 D 辑, 2001, 31(9): 760-768. [WANG Sumin, WU Xihao, ZHANG Zhenke, et al. Environmental changes recorded by ancient Sanmen lake sediments and studies on the Yellow River run-through the Sanmenxia Gorge[J]. Science in China: Series D, 2001, 31(9): 760-768.]
- [8] Moller A, O'Brien P J, Kennedy A, et al. Polyphase zircon in ultrahigh-temperature granulites (Rogaland, SW Norway): Constraints for Pb diffusion in zircon[J]. J Metamorph Geol., 2002, 20: 727-740.
- [9] Geslin J K, Link P K, Fanning C M. High-precision provenance determination using detrital-zircon ages and petrography of Quaternary sands on the eastern Snake River Plain, Idaho [J]. Geology, 1999, 27: 295-298.
- [10] Iizuka T, Hirata T, Komiya T, et al. U-Pb and Lu-Hf isotope systematics of zircons from the Mississippi River sand: Implications for reworking and growth of continental crust [J]. Geology, 2005, 33(6): 485-488.
- [11] Bodet F, Schärer U. Evolution of the SE-Asian continent from U-Pb and Hf isotopes in single grains of zircon and baddeleyite from large rivers [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(12): 2067-2091.
- [12] 郭亮,张宏飞,徐望春,等. 黄河源头区碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 自然科学进展, 2008, 18(12): 1398-1408. [GUO Liang, ZHANG Hongfei, XU Wangchun, et al. U-Pb ages of detrital zircons from source region of Yellow River and their geological significance[J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(12): 1398-1408.]
- [13] Stevens T, Carter A, Watson T P, et al. Genetic linkage between the Yellow River, the Mu Us desert, and the Chinese Loess Plateau[J]. Quaternary Science Reviews, 2013, 78: 355-368.
- [14] Yang J, Gao S, Chen C, et al. Episodic crustal growth of north China as revealed by U-Pb age and Hf isotopes of detrital zircons from modern rivers[J]. Geochimica et Cosmo-

- chimica Acta, 2009, 73: 2660-2673.
- [15] Diwu C R, Sun Y, Zhang H, et al. Episodic tectonothermal events of the western North China Craton and North Qinling Orogenic Belt in central China: Constraints from detrital zircon U-Pb ages [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 47: 107-122.
- [16] 郑萍, 李大鹏, 陈岳龙, 等. 黄河口河流沙碎屑沉积物锆石 U-Pb 年龄及地质意义 [J]. *现代地质*, 2013, 27(1): 79-90. [ZHENG Ping, LI Dapeng, CHEN Yuelong, et al. Zircon U-Pb ages of clastic sediment from the outfall of the Yellow River and their geological significance [J]. *Geoscience*, 2013, 27(1): 79-90.]
- [17] Nie J S, Stevens T, Rittner M, et al. Loess Plateau storage of Northeastern Tibetan Plateau-derived Yellow River sediment [J]. *Nature*, 2015, 9511: 1-7.
- [18] 许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 等. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程 [M]. 北京: 地质出版社, 1992. [XU Zhiqin, HOU Liwei, WANG Zongxiu, et al. *Orogenic Processes of the Songpan Ganze Orogenic Belt of China* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.]
- [19] 林晓彤, 李巍然, 时振波. 黄河物源碎屑沉积物的重矿物特征 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(3): 17-21. [LIN Xiaotong, LI Weiran, SHI Zhenbo. Characteristics of mineralogy in the clastic sediments from the Yellow River provenance, China [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2003, 23(3): 17-21.]
- [20] 王伟, 李方林, 鲍征宇. 松潘-甘孜盆地中、晚三叠世沉积物来源及演化的锆石 U-Pb 年代学制约 [J]. *地质科技情报*, 2007, 26(5): 35-44. [WANG Wei, LI Fanglin, BAO Zhengyu. U-Pb constraints on Provenance and evolution of Middle to late Triassic sediment in Songpan-Ganze Basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(5): 35-44.]
- [21] Weislogel A L. Tectonostratigraphic and geochronologic constraints on evolution of the northeast Paleotethys from the Songpan-Ganzi Complex, central China [J]. *Tectonophysics*, 2008, 451: 331-345.
- [22] 张建新, 孟繁聪, 于胜尧, 等. 柴北缘绿梁山高压基性麻粒岩的变质演化历史: 岩石学及锆石 SHRIMP 年代学证据 [J]. *地学前缘*, 2007, 14(1): 85-97. [ZHANG Jianxin, MENG Fancong, YU Shengyao, et al. Metamorphic history recorded in high pressure mafic granulites in the Luliangshan Mountains to the north of Qaidam Basin, northwest China: evidence from petrology and zircon SHRIMP geochronology [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(1): 85-97.]
- [23] 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长 [J]. *高校地质学报*, 2007, 13(3): 403-414. [MO Xuanxue, LUO Zhaozhua, DENG Jinfu, et al. Granitoids and crustal growth in the East-kunlun Orogenic belt [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(3): 403-414.]
- [24] 董国安, 杨怀仁, 杨宏仪, 等. 祁连地块前寒武纪基底锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义 [J]. *科学通报*, 2007, 52(13): 1572-1585. [DONG Guoan, YANG Huairan, YANG Hongyi, et al. SHRIMP U-Pb dating of zircon from the Precambrian basement of the Qilian Terrane and its geological significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(13): 1572-1585.]
- [25] 洪大卫, 王涛, 童英, 等. 华北地台和秦岭-大别-苏鲁造山带的中生代花岗岩和深部地球动力学过程 [J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 231-255. [HONG Dawei, WANG Tao, TONG Ying. Mesozoic granitoids from north China block and Qinling-Dabie-Sulu orogenic belt and their deep dynamic process [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 231-255.]
- [26] 陈道公, 李彬贤, 夏群科, 等. 大别超高压碰撞造山带岩石锆石 U/Pb 同位素框架年代学 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(4): 253-255. [CHEN Daogong, LI Binxian, XIA Qunke, et al. Zircon U-Pb frame geochronology of ultra-high pressure zone rocks for Dabie Orogen [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, 20(4): 253-255.]
- [27] 郑永飞, 陈福坤, 龚冰, 等. 大别-苏鲁造山带超高压变质岩原岩性质: 锆石氧同位素和 U-Pb 年龄证据 [J]. *科学通报*, 2003, 48(2): 110-119. [ZHENG Yongfei, CHEN Fukun, GONG bing, et al. The nature of the protolith of the ultra-metamorphic rocks in Dabie-sulu orogenic belt: from the evidences of oxygen isotope analysis and U-Pb dating of zircons [J]. *China Science Bulletin*, 2003, 48(2): 110-119.]
- [28] 李献华, 李正祥, 周汉文, 等. 川西新元古代玄武质岩浆岩的锆石 U-Pb 年代学、元素和 Nd 同位素研究: 岩石成因与地球动力学意义 [J]. *地学前缘*, 2002, 9(4): 329-338. [LI Xianhua, LI Zhengxiang, ZHOU Hanwen, et al. U-Pb zircon geochronological, geochemical and Nd isotopic study of neoproterozoic basaltic magmatism in western Sichuan: Petrogenesis and geodynamic implications [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(4): 329-338.]
- [29] 耿显雷, 高山, 陈晨. 华北克拉通东部及苏鲁造山带的地壳生长: 来自现代河流碎屑锆石的 U-Pb 定年和 Hf 同位素证据 [J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2011, 36(3): 483-499. [GENG Xianlei, GAO Shan, CHEN Chen. Crustal growth of the eastern north China Craton and Sulu Orogen as revealed by U-Pb dating and Hf isotopes of detrital zircons from modern rivers [J]. *Earth Science -Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36(3): 483-499.]
- [30] 翟明国, 胡波, 彭澎, 等. 华北中-新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件 [J]. *地学前缘*, 2014, 21(1): 100-119. [Zhai Mingguo, Hu Bo, Peng Peng, et al. Meso-Neoproterozoic magmatic events and multi-stage rifting in the NCC [J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(1): 100-119.]
- [31] Enkelmann Eva, Weislogel Amy, Ratschbacher Lothar, et al. How was the Triassic Songpan-Ganzi basin filled? A provenance study [J]. *Tectonics*, 2007, 26: 1-24.
- [32] Chen Y L, Li D P, Zhou J, et al. U-Pb dating, geochemistry, and tectonic implications of the Songpan-Ganzi block and the Longmen Shan, China [J]. *Geochemical Journal*, 2009, 43: 77-99.
- [33] 李俊建, 罗镇宽, 刘晓阳, 等. 玲珑金矿区成矿后花岗岩斑岩脉的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄对胶北地体演化的制约 [J]. *地学前缘*, 2005, 12(2): 317-323. [LI Junjian, LUO Zhenkuan, LIU

- Xiaoyang, et al. Constraints to the evolution of Jiaobei terrane from SHRIMP U-Pb zircon data of post-metallogenic granite porphyry vein in Linglong gold deposit, Shandong Province, East China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(2): 317-323.]
- [34] 王伟, 王世进, 董春艳, 等. 山东鲁山地区新太古代壳源花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. *地质通报*, 2010, 29(7): 993-1000. [WANG Wei, WANG Shijin, DONG Chunyan, et al. SHRIMP U-Pb dating of zircons from Neoproterozoic crustal derived granites in the Lushan area, Shandong, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(7): 993-1000.]
- [35] Zhang Shuanhong, Liu Shuwen, Zhao Yue, et al. The 1.75-1.68 Ga anorthosite-mangerite-alkali granitoid-rapakivi granite suite from the northern North China Craton: Magmatism related to a Paleoproterozoic orogeny [J]. *Precambrian Research*, 2007, 155: 287-312.
- [36] Zhao Guochun, Wilde Simon A, Gawwood Peter A, et al. Shrimp U-Pb zircon ages of the Fuping complex: implications for late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton [J]. *American Journal of Science*, 2002, 302: 191-226.
- [37] Zhou Jianbo, Wilde Simon A, Zhao Guochun, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Neoproterozoic Penglai Group and Archean gneisses from the Jiaobei Terrane, North China, and their tectonic implications[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160: 323-340.
- [38] Chen N S, Sun M, He L, et al. Precise timing of the Early Paleozoic metamorphism and thrust deformation in the Eastern Kunlun Orogen[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47: 1130-1133.
- [39] Ding Qingfeng, Jiang Shaoyong, Sun Fengyue. Zircon U-Pb geochronology, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of the Triassic granite and diorite dikes from the Wulonggou mining area in the Eastern Kunlun Orogen, NW China: Petrogenesis and tectonic implications [J]. *Lithos*, 2014, 205: 266-283.
- [40] Wang Lijuan, Griffin W L, Yu Jinhai. Precambrian crustal evolution of the Yangtze Block tracked by detrital zircons from Neoproterozoic sedimentary rocks [J]. *Precambrian Research*, 2010, 177: 131-144.
- [41] Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia [J]. *Precambrian Research*, 2003, 122: 85-109.
- [42] Wang Xiaolei, Zhou Jincheng, Griffin W L, et al. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks [J]. *Precambrian Research*, 2007, 159: 117-131.
- [43] Xu W C, Zhang H F, Liu X M. U-Pb zircon dating constraints on formation time of Qilian high-grade metamorphic rock and its tectonic implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52: 531-538.
- [44] 崔建堂, 韩芳林, 张拴厚, 等. 北秦岭罗汉寺岩群锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造地质意义[J]. *西北地质*, 2011, 44(4): 8-14. [CUI Jiantang, HAN Fanglin, ZHANG Shuanhou, et al. North Qinling Luohansi rock group SHRIMP U-Pb zircon age and its tectonic significance [J]. *Northwestern Geology*, 2011, 44(4): 8-14.]
- [45] 唐俊, 郑永飞, 吴元保, 等. 胶东地块东部变质岩锆石 U-Pb 定年和氧同位素研究[J]. *岩石学报*, 2004, 20(5): 1039-1062. [TANG Jun, ZHENG Yongfei, WU Yuanbao, et al. Zircon U-Pb ages and oxygen isotopes of high grade metamorphic rocks in the eastern part of the Shandong Peninsula[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(5): 1039-1062.]
- [46] 杨力, 陈福坤, 杨一增, 等. 丹凤地区秦岭岩群片麻岩锆石 U-Pb 年龄: 北秦岭地体中新元古代岩浆作用和早古生代变质作用的记录[J]. *岩石学报*, 2010, 26(5): 1589-1603. [YANG Li, CHEN Fukun, YANG Yizeng, et al. Zircon U-Pb ages of the Qinling Group in Danfeng area: Recording Mesoproterozoic and Neoproterozoic magmatism and Early Paleozoic metamorphism in the North Qinling terrain [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(5): 1589-1603.]
- [47] Xiang Hua, Zhang Li, Zhong Zengqiu, et al. Ultrahigh-temperature metamorphism and anticlockwise P-T-t path of Paleozoic granulites from north Qinling-Tongbai orogen, Central China[J]. *Gondwana Research*, 2012, 21: 559-576.
- [48] Chen Danling, Sun Yong, Liu Liang. The metamorphic ages of the country rocks of the Yukahe Eclogites in the Northern margin of Qaidam basin and its geological significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(1): 108-116.
- [49] Song S G, Zhang L F, Niu Y L, et al. Geochronology of diamond bearing zircons from garnet peridotite in the north Qaidam UHPM belt, northern Tibetan Plateau: A record of complex histories from oceanic lithosphere subduction to continental collision [J]. *Earth and Planetary*, 2005, 234: 99-118.
- [50] Gehrels G E, Yin A, Wang X F. Detrital-zircon geochronology of the northeastern Tibetan plateau [J]. *GSA Bull*, 2003, 115(7): 881-896.
- [51] 兰中伍, 陈岳龙, 苏本勋, 等. 四川松潘-甘孜盆地砂岩的物质来源: 来自锆石 U-Pb (SHRIMP) 年龄证据[J]. *沉积学报*, 2006, 24(3): 321-332. [LAN Zhongwu, CHEN Yuelong, SU Bensun, et al. The origin of sandstones from the Songpan-Ganzi basin, Sichuan, China: evidence from SHRIMP U-Pb dating of clastic zircons [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(3): 321-332.]
- [52] Zhang Fei, Jin Zhangdong, Li Fuchun, et al. The dominance of loess weathering on water and sediment chemistry within the Daihai Lake catchment, northeastern Chinese Loess Plateau [J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 35: 51-63.
- [53] Yang Jiedong, Li Gaojun, Rao Wenbo, Ji Junfeng. Isotopic evidences for provenance of East Asian Dust [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(29): 4481-4490.
- [54] 李云, 宋友贵, 聂军胜, 等. 基于 U-Pb 定年和单颗粒锆石粒径

- 分析示踪中国黄土高原黄土和红粘土物源[J]. 地质论评, 2014, 60(2): 380-388 [LI Yun, SONG Yougui, NIE Junsheng, et al. Tracing the provenance of loess and red clay on the Chinese loess plateau using the U-Pb dating and single-size zircon size[J]. Geological Review, 2014, 60(2): 380-388.]
- [55] Jia J T, Zheng H B, Huang X T, et al. Detrital zircon U-Pb ages of Late Cenozoic sediments from the Yangtze Delta: implication for the evolution of the Yangtze River[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(15): 1520-1528.
- [56] 王节涛, 李长安, 杨勇, 等. 江汉平原周老孔中碎屑锆石 LA-ICPMS 定年及物源示踪[J]. 第四纪研究, 2009, 29(2): 343-351. [WANG Jietao, LI Changan, YANG Yong, et al. The LA-ICPMS U-Pb detrital zircon geochronology and provenance study of sedimentary core in the Zhoulaotown, the Jiangnan Plain [J]. Quaternary Sciences, 2009, 29(2): 343-351.]
- [57] 向芳, 杨栋, 田馨, 等. 湖北宜昌地区第四纪沉积物中锆石的 U-Pb 年龄特征及其物源意义[J]. 矿物岩石, 2011, 31(2): 106-114. [XIANG Fang, YANG Dong, TIAN Xin, et al. LA-ICPMS U-Pb geochronology of zircons in the Quaternary sediments from the Yichang area Hubei Province and its provenance significance[J]. Journal of Mineral Petrology, 2011, 31(2): 106-114.]
- [58] 范代读, 王扬扬, 吴伊婧. 长江沉积物源示踪研究进展[J]. 地球科学进展, 2012, 27(5): 515-528. [FAN daidu, WANG Yangyang, WU Yijing. Advances in provenance studied of Changjiang Riverine sediments [J]. Advance in Earth Science, 2012, 27(5): 515-528.]
- [59] McLennan S M, Talar S R. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends[J]. J. Geol., 1991, 99: 1-21.
- [60] Pettke T, Lee D, Halliday A N, et al. Radiogenic Hf isotopic composition of continental eolian dust from Asia, its variability and its implications for seawater Hf[J]. Earth Planet Sci. Lett., 2002, 202: 453-464.

PROVENANCE STUDY OF YELLOW RIVER SEDIMENTS BY U-Pb DATING OF THE DETRITAL ZIRCONS

YUE Baojing^{1,2,3}, LIAO Jing^{1,2,4}

(1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China;

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;

3. Key Laboratory of Coastal Wetland Biogeosciences, China Geological Survey, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China;

4. The Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China)

Abstract: Six major U-Pb age groups of detrital zircons are recognized in the modern Yellow River sediments. They are 200~350 Ma, 350~500 Ma, 700~1 000 Ma, 1 000~1 800 Ma, 1 800~2 000 Ma and 2 000~2 600 Ma respectively with 200~350 Ma, 350~500 Ma, 1 800~2 000 Ma and 2 000~2 600 Ma dominating. By comparison of the U-Pb age patterns with the potential source areas of the Yellow River drainage basin, it is deduced that the upper reach sediments of the Yellow River are mainly derived from the Songpan-Ganzi block and the loess nearby transported by rivers. These clastic sediments might come from the North China Craton, the Yangtze Craton, the Qinling orogen, the East-Kunlun Orogenic Belt, the Qilian Terrane and the northern margin of the Qaidam basin. The deposits from the middle and lower Yellow River, however, show significant contribution from the North China Craton and the Sulu orogen. Learnt from the great progress achieved based on integrated provenance study of the Changjiang River delta by deep holes, we suggest similar approach being taken for high-resolution provenance analysis of the Yellow River Delta so as to reveal the spatio-temporal evolution of the river.

Key words: sediment provenance; detrital zircon; U-Pb age; evolution; Yellow River