

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.01.021

渭河流域沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄物源示踪

张笑宇¹, 何梦颖^{1,2}, 王斌³, D S RITS⁴, 郑洪波^{5,6}

1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023

2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

3. 陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710119

4. Faculty of Earth and Life Sciences, VU University Amsterdam, Amsterdam, Netherlands

5. 云南大学地球系统科学研究中心, 昆明 650500

6. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101

摘要:渭河盆地是秦岭山前新生代陆内断陷盆地, 接受大量秦岭造山带的沉积。建立渭河盆地沉积物物源示踪体系, 对了解渭河盆地和秦岭的盆山耦合关系及其周缘构造-沉积演化均具有重要的意义。对渭河流域干流及主要支流沉积物进行碎屑锆石 U-Pb 年龄测试。结果表明: 渭河干流沉积物碎屑锆石主要呈现五组年龄区间, 分别为 100~300、300~500、700~1000、1700~2000 和 2100~2500 Ma, 其中以 100~300 Ma 和 300~500 Ma 的锆石为主, 判别渭河干流沉积物主要来自北秦岭造山带。渭河上游与中下游沉积物在 1700~2000 Ma 和 2100~2500 Ma 的年龄组成存在差异, 主要与上游出露的元古代岩体相关。渭河支流沉积物碎屑锆石年龄分布存在显著差异。泾河和洛河流经黄土高原, 沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄与黄土高原相似, 主要表现为 200~300、400~500、800~1100、1800~2000 和 2400~2550 Ma 五组年龄; 灞河沉积物继承了北秦岭造山带的特征。通过对渭河流域沉积物的物源分析可知: 泾河对渭河干流沉积物贡献较大, 灞河对渭河干流沉积物贡献较小, 洛河对渭河干流沉积物有一定贡献。渭河汇入黄河前后, 黄河沉积物碎屑锆石年龄峰分布及各年龄区间锆石含量比例有明显变化, 反映渭河对黄河沉积物有较大影响。

关键词:渭河沉积物; 碎屑锆石 U-Pb 定年; 物源示踪; 渭河盆地

中图分类号: P597

文献标识码: A

Provenance study of the sediments in Wei River using the detrital zircon U-Pb dating

ZHANG Xiaoyu¹, HE Mengying^{1,2}, WANG Bin³, D S RITS⁴, ZHENG Hongbo^{5,6}

1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

3. College of Tourism and Environmental Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

4. Faculty of Earth and Life Sciences, VU University Amsterdam, Amsterdam, Netherlands

5. Research Center for Earth System Science, Yunnan University, Kunming 650500, China

6. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: The Weihe Basin is a Cenozoic intracontinental faulted basin owing its origin to the evolution of the Qinling Orogenic belt. It receives a large amount of clastic deposits from the Qinling mountain. To establish the sediment "source to sink" system for the basin is important to the understanding of the relationship between the basin and the mountain and to the investigation of the tectono-sedimentary evolution of this region. We, in this paper, studied 11 sediment samples collected from both the mainstream and the major tributaries of the Wei River using the detrital zircon U-Pb dating as the mean. Results show that there are five zircon age groups in the mainstream of the Wei River, i.e. 100~300Ma, 300~500Ma, 700~1000Ma, 1700~2000Ma and 2100~2500Ma, dominated by the groups of 100~300Ma and 300~500Ma, suggesting that the sediments mainly come from the northern Qinling Orogenic belt. The content of the zircon age groups of 1700~2000Ma and 2100~2500Ma occur mainly in the upstream sediments indicating the exposure of the Proterozoic rocks in the upper reach.

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目“渭河盆地南缘新生界: 年代厘定与物源分析”(41602182); 国家自然科学基金青年科学基金项目“剑川盆地新生界碎屑锆石物源示踪及其对古金沙江演化的指示”(41602180); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)-青年基金项目“剑川盆地新生代地层划分及年代测定”(BK20150974)

作者简介:张笑宇(1996—), 女, 本科生, 主要从事第四纪地质学研究, E-mail: 765293192@qq.com

通讯作者:何梦颖(1985—), 女, 博士, 讲师, 主要从事地表过程与全球变化研究, E-mail: conniehe@njnu.edu.cn

收稿日期:2016-09-09; **改回日期:**2017-05-14. 周立君编辑

The tributaries of the Wei River show clearly differences in the sediment zircon ages. For examples, the Jing River and the Luo River drained through the Loess Plateau have the similar age groups of 200~300 Ma, 400~500 Ma, 800~1100 Ma, 1800~2000 Ma and 2400~2550 Ma. And the ages of the Ba River sediment obviously inherit the characteristic of the northern Qinling Orogenic belt. According to the provenance analysis, it is concluded that the Jing River is the major contributor of sediment to the mainstream of the Wei River, the Luo River has a certain extent influence on it, whereas the Ba River contributes little to the mainstream. The proportion of zircon age groups from the sediments of the Yellow River before and after its confluence with the Wei River shows a sharp change, indicating the great contribution of the Wei River to the Yellow River.

Key words: Wei River sediments; detrital zircon U-Pb dating; provenance study; Weihe Basin

新生代印度板块与欧亚板块的碰撞事件导致青藏高原的隆升及周缘盆山系统的形成^[1,2]。受源于青藏高原的 NE 方向应力的影响,秦岭山前形成大型左旋走滑断层,华北地块发生 NE—SW 向拉张,最终导致了渭河盆地的形成^[1,3-6]。渭河盆地夹持于鄂尔多斯地块与秦岭造山带之间,自始新世以来经历了强烈断陷并接受了大量来自秦岭造山带、黄土高原和青藏高原东北缘的沉积^[7-10]。对这些沉积物进行物源示踪研究,是了解渭河盆地沉积演化过程的重要手段,对认识秦岭造山带及青藏高原东北缘新生代构造-剥蚀历史具有重要指示意义。

渭河流域发源于青藏高原东北缘,是流经渭河盆地的重要水系(图 1)。对渭河流域沉积物进行物源示踪研究是建立渭河盆地沉积物物源示踪体系的关键。锆石是各类岩石中常见的重矿物,因其性质稳定,富含放射性元素铀,且封闭温度高,是 U-Pb 同位素定年的理想材料^[11-15]。碎屑锆石 U-Pb 年代学方法在河流沉积物源汇关系研究中被广泛应用^[16-18]。

本文利用碎屑锆石 U-Pb 同位素方法对渭河流域沉积物进行物源示踪研究。通过对河流沉积物锆石年龄分布的差异及其混合模式分析,探讨渭河流域与周缘构造单元的关系及各支流对干流的贡献,判别渭河流域沉积物物源,为研究渭河盆地沉积历史及秦岭造山带的演化奠定基础。

1 地质背景

渭河发源于甘肃省渭源县鸟鼠山,于陕西省潼关县注入黄河,是黄河的一级支流。渭河全长 818km,流域面积达 134766km²,平均年径流量为 67.4 亿 m³,平均年输沙量为 3.03 亿 t^[19]。渭河干流流经甘肃天水及陕西宝鸡、咸阳、西安、渭南等县市,以渭源至宝鸡以上为上游,宝鸡至咸阳为中游,咸阳以下为下游^[20]。渭河干流上游地区出露白垩纪、三叠纪、二叠纪和石炭纪地层,在武山和天水地区出露古元古代地层;中游及下游地区主要被第四系覆盖(图 2)。

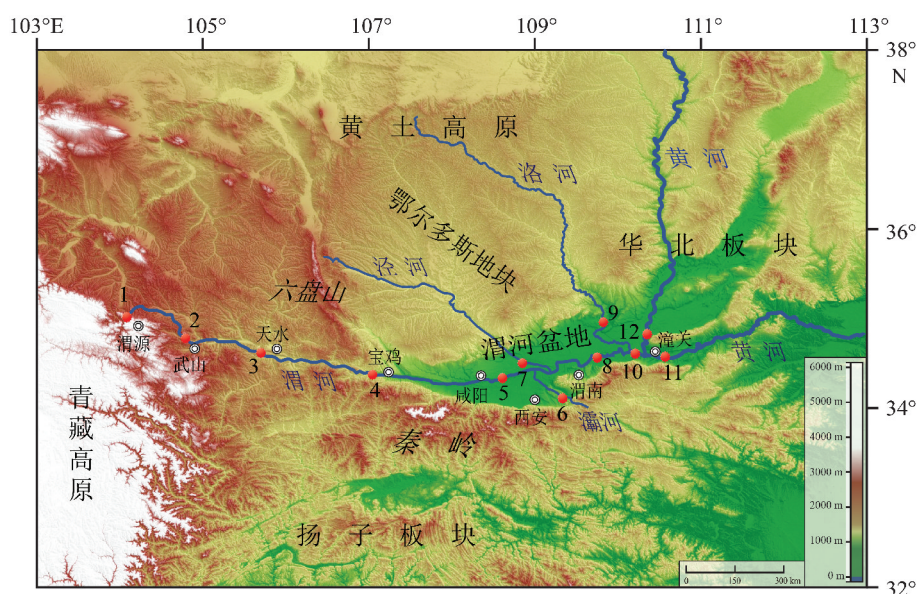


图 1 研究区域地貌图及样品位置分布图

Fig.1 DEM of the study area and the sample locations.

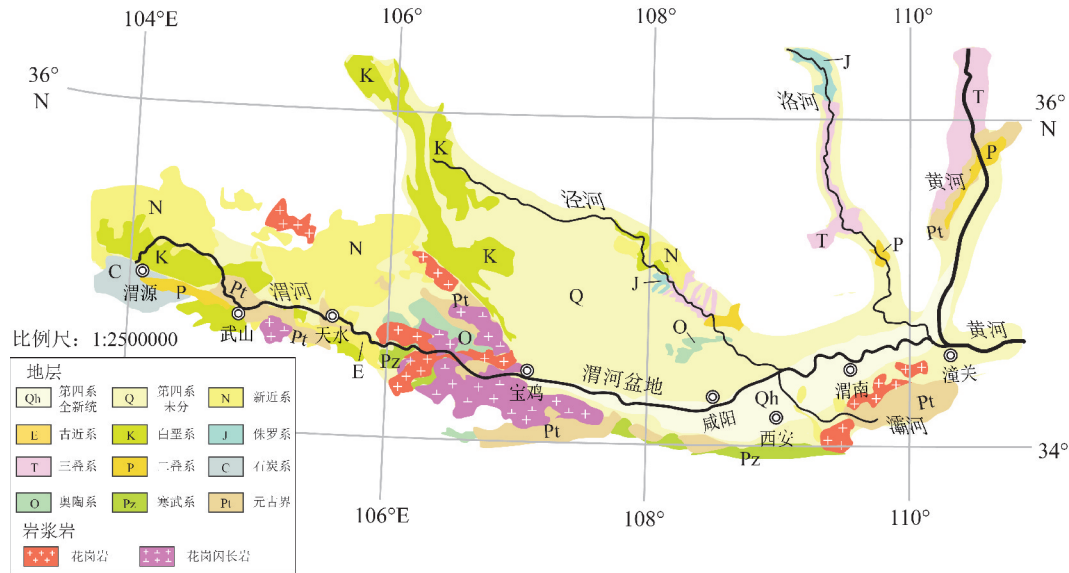


图 2 渭河流域岩性图(改自 250 万中国地质图)

Fig.2 Lithological map of the Wei River drainage, based on the geological map of China (1:2 500 000)

泾河是渭河流域的第一大支流,是黄河流域的二级支流,发源于六盘山东麓,流经黄土高原,于西安北部汇入渭河干流。泾河全长 455km,流域总面积 45421km²,干流年平均径流量为 15.73 亿 m³,平均年输沙量为 2.09 亿 t。泾河径流量受降雨补给影响,年内分配与降水趋势基本一致。泾河流域出露地层以第四系为主,上游出露白垩系。

洛河是渭河的一级支流,黄河的二级支流,发源于陕西省定边县,全长 690km,流域面积 26900km²。洛河属于降水补给型河流,干流年平均径流量为 7.877 亿 m³。流域流经黄土高原丘陵沟壑区,泥沙含量大,平均年输沙量为 0.69 亿 t^[19]。

灞河发源于秦岭北麓,全长 109km,总流域面积 2581km²,为渭河支流。灞河属于季风性河流,流域降水主要集中在夏季,径流量年内分配不均。灞河流域出露地层整体以第四系为主,源头地区出露侏罗系和二叠系。

秦岭造山带位于渭河流域南缘,目前认为,其是 3 个板块沿两条缝合带(即由华北板块、扬子板块及其间的秦岭微陆块沿商丹、勉略两个缝合带)经强烈的碰撞和陆内造山构造叠加而形成的复合型大陆造山带^[4,21,22],从地质上可简单地划分为北秦岭构造带和南秦岭构造带。大量研究表明,秦岭造山带的形成和演化可归纳为 3 个主要阶段:(1)晚太古代—早中元古代古老结晶基底和过渡性变质基底形成时期;(2)晚元古代—中三叠世的主造山作用时期,经历板块构造和垂向增生构造复合的演化过程^[23];(3)中生代后造山期,发生陆内断陷、大幅度隆升

和广泛的花岗岩浆活动^[24]。秦岭地区碎屑锆石 U-Pb 年龄分布主要为 200~300、400~505、840~1190、1650~1830 和 2200~2500Ma^[21,23,25-32]。

2 材料与方法

本研究共采集河流沉积物样品 11 个,其中包括 10 个渭河流域沉积物(干流及主要支流)和 1 个黄河流域沉积物。10 个样品点覆盖整条渭河流域,包括干流渭源段、武山段、天水段、宝鸡段、咸阳段和渭南段及支流泾河、洛河和灞河(表 1)。样品均为采集于河流河漫滩或河流一级阶地上的砂级沉积物,

表 1 渭河流域表层沉积物样品位置

Table 1 Geographic locations of samples in the Wei River drainage

序号	河流	经度(E)	纬度(N)
1	渭源段(渭河)	104°10'28"	35°6'3"
2	武山段(渭河)	104°53'16"	34°43'33"
3	天水段(渭河)	105°52'29"	34°35'8"
4	宝鸡段(渭河)	107°2'59"	34°22'47"
5	咸阳段(渭河)	108°42'51"	34°19'32"
6	灞河	109°29'12.4"	34°11'17.7"
7	泾河	108°59'53.7"	34°27'6.7"
8	渭南上段(渭河)	109°47'22.5"	34°36'23.8"
9	洛河	109°52'39.7"	34°46'31.3"
10	渭南下段(渭河)	110°13'9.1"	34°36'59.8"
11	黄河	110°42'32.4"	34°27'31.4"

每个样品取约 2kg。黄河样品采集于渭河与黄河汇合点后的黄河河漫滩。为使所采样品具有代表性,在同一个采样点的多个位置进行采样,充分混合。采样点位置尽量避开城市和可能的污染源,以减小不必要的自然或人为干扰。

将采集的样品送至河北廊坊恒宇股份有限公司进行锆石矿物挑选。在双目镜下随机将 200~300 颗碎屑锆石粘在双面胶上,并利用环氧树脂和凝固剂制靶。锆石靶经打磨、抛光、清洗后在偏光显微镜下进行透射光和反射光拍照。碎屑锆石测试在南京师范大学地理科学学院激光剥蚀等离子质谱实验室(LA-ICPMS)完成。测试仪器为 Photon Machine 193nm 激光剥蚀器和 Agilent 7700x 四极杆等离子体质谱仪。每个样品进行 168 颗锆石原位微区激光剥蚀分析。测试过程中使用国际标样 91500($1062 \pm 4\text{Ma}$)或 GJ-1($608.5 \pm 0.4\text{Ma}$)作为外标,使用“清湖”样品($159.5 \pm 0.2\text{Ma}$)作为监控样品,激光束斑直径为 $35\mu\text{m}$ 。年龄计算及数据处理采用 Igor Pro-Iolite 程序。锆石年龄谱用 Kernel Density Estimation (KDE) 方法绘制^[33]。对于年龄 $<1000\text{Ma}$ 的锆石,采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的年龄;对于年龄 $>1000\text{Ma}$ 的锆石,采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的年龄^[34]。选取谐和度 $>90\%$ 的颗粒来进行碎屑锆石年龄谱的分析。样品碎屑锆石 U-Pb 年龄谱和图见图 3。

3 结果与讨论

3.1 沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄特征

渭河流域干流沉积物碎屑锆石年龄均呈多峰态分布(图 4A)。从上游到下游,主要表现出五组年龄区间,分别是 100~300、300~500、700~1000、1700~2000 和 2100~2500Ma。根据该五组主要年龄区间绘制锆石含量百分比饼图(图 4,表 2)。可见,渭河干流沉积物均以 100~300Ma 和 300~500Ma 的年龄为主,锆石含量可达 20% 以上。元古代锆石(700~1000、1700~2000 和 2100~2500Ma)在渭河上游沉积物中含量较高(图 4a-c),而中下游在该年龄区间内的锆石含量较低(图 4d-g)。

渭河支流沉积物碎屑锆石年龄分布差异较大(图 4h-j)。灞河沉积物锆石年龄呈现两组主要年龄峰,分别是 100~300Ma(21%)和 2100~2500Ma(63%)(图 4h)。泾河和洛河碎屑锆石具有相近的多峰态分布,同样以 200~300Ma 和 400~500Ma 的锆石为主,800~1100、1800~2000 和 2400~

2550Ma 的锆石含量均在 10% 左右(图 4i-j)。

3.2 沉积物物源判别

3.2.1 渭河干流沉积物物源判别

由上可知,渭河干流沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄谱总体呈现出五组年龄区间,分别是 100~300、300~500、700~1000、1700~2000 和 2100~2500Ma。

(1) 100~300Ma 和 300~500Ma

此两组年龄区间为渭河流域干流沉积物主要年龄峰值。扬子板块和华北板块于中—晚三叠世沿秦岭造山带发生碰撞,该碰撞事件导致秦岭地区发生大规模岩浆活动。前人研究表明,北秦岭地区存在大量年龄为 205~240Ma 的花岗岩体,是秦岭造山带 3 叠纪构造岩浆活动的反映^[24,25]。此外,该区在古生代还发生了 3 次大规模岩浆活动,存在 470~505、422~455 和 400~410Ma 三期花岗岩体^[27,28]。北秦岭位于渭河流域南缘,其剥蚀的沉积物大量堆积在秦岭山麓,被流水带入渭河盆地中。在河流的搬运作用下,可认为渭河沉积物中 100~300Ma 和 300~500Ma 的锆石均来自于北秦岭造山带(图 4k)。

(2) 700~1000Ma

700~1000Ma 对应新元古代早期的晋宁运动。该时期北秦岭地区发生强烈的岩浆活动、变质作用及构造运动,广泛分布 700~1000Ma 年龄的岩体。渭河沉积物中该年龄组的锆石在渭河上游及渭南下段含量较高,主要与北秦岭经历中—新元古代的构造事件有关。

(3) 1700~2000Ma 和 2100~2500Ma

张国伟等^[21]研究表明,秦岭造山带古老结晶基底和过渡性浅变质基底在晚太古代—早中元古代形成,古老结晶基底呈大小不一的残存地块或构造岩块出现。张宗清等^[38]对北秦岭变质地层进行研究发现,北秦岭变质碎屑岩中锆石 U-Pb 年龄及 Sm-Nd 同位素模式年龄反映了北秦岭在 2000Ma 左右的地壳增生事件。故渭河流域沉积物含有 1700~2000Ma 和 2100~2500Ma 的锆石年龄。此外,渭河上游出露古元古代地层,而中下游主要被第四纪沉积物覆盖(图 2),因此,渭河流域上游沉积物中含有较高含量该年龄组的锆石。

3.2.2 渭河支流沉积物物源判别

渭河支流中,灞河发源于秦岭北麓,以 100~300Ma 和 2100~2500Ma 的锆石为主,其沉积物的碎屑锆石年龄记录了秦岭造山带三叠纪的岩浆活动

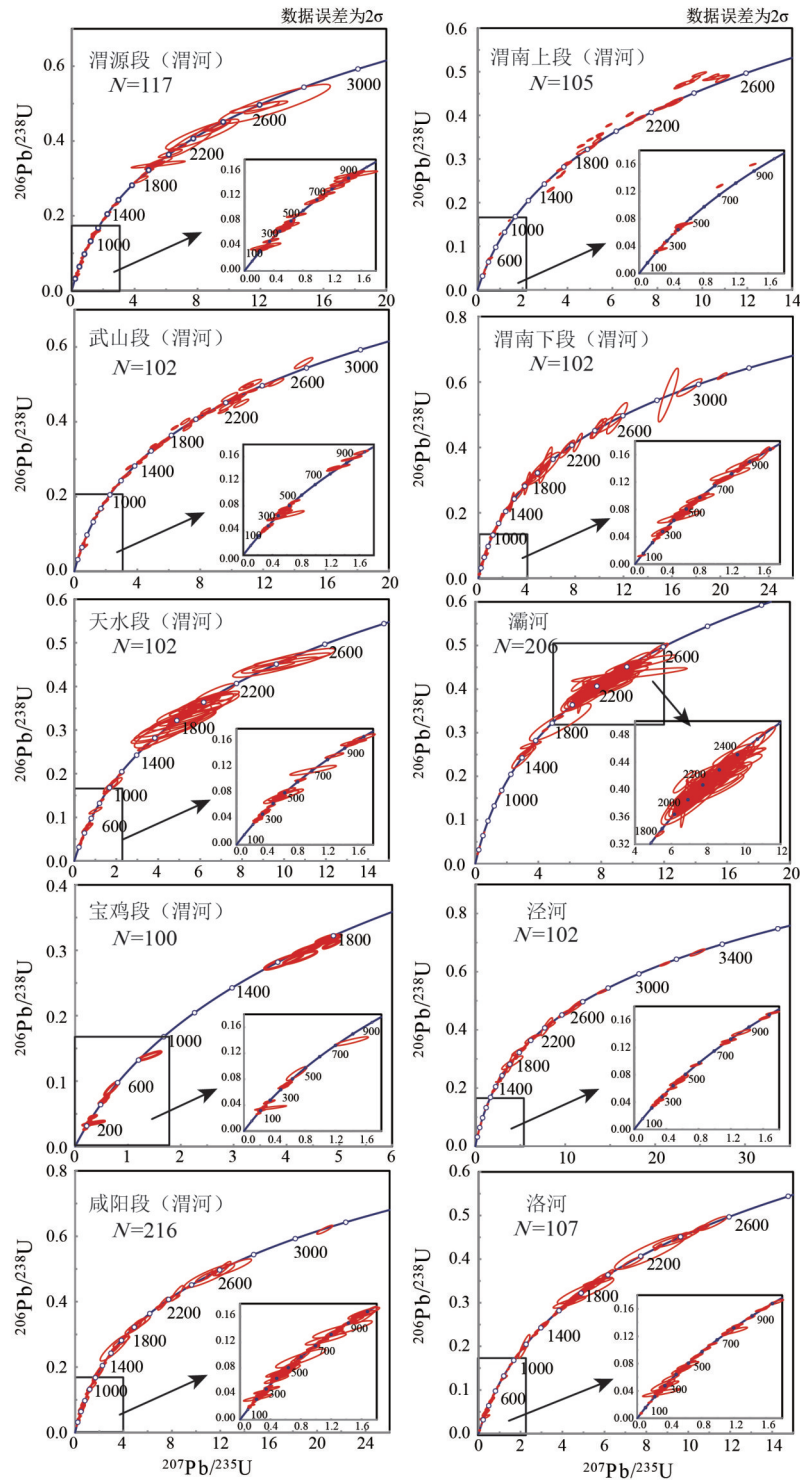


图3 渭河流域沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig.3 Concordia diagram of detrital zircons from the Wei River drainage

及 2100~2500Ma 地壳增生的构造事件,但缺少 700~1000Ma 晋宁运动的记录。

洛河和泾河均为渭河的重要支流,且均流经黄土高原,汇入渭河盆地,两条支流沉积物碎屑锆石表现出相近的多峰态分布,存在 200~300、400~500、

800~1100、1800~2000 和 2400~2550Ma 五组年龄区间。因黄土物质来源复杂,包括北部、西北部沙漠、青藏高原东北缘等,故泾河和洛河沉积物受黄土高原的影响,为多物质源区的混合,其锆石年龄呈多峰态分布,与黄土锆石年龄组成相近^[37,39,40](图 41)。

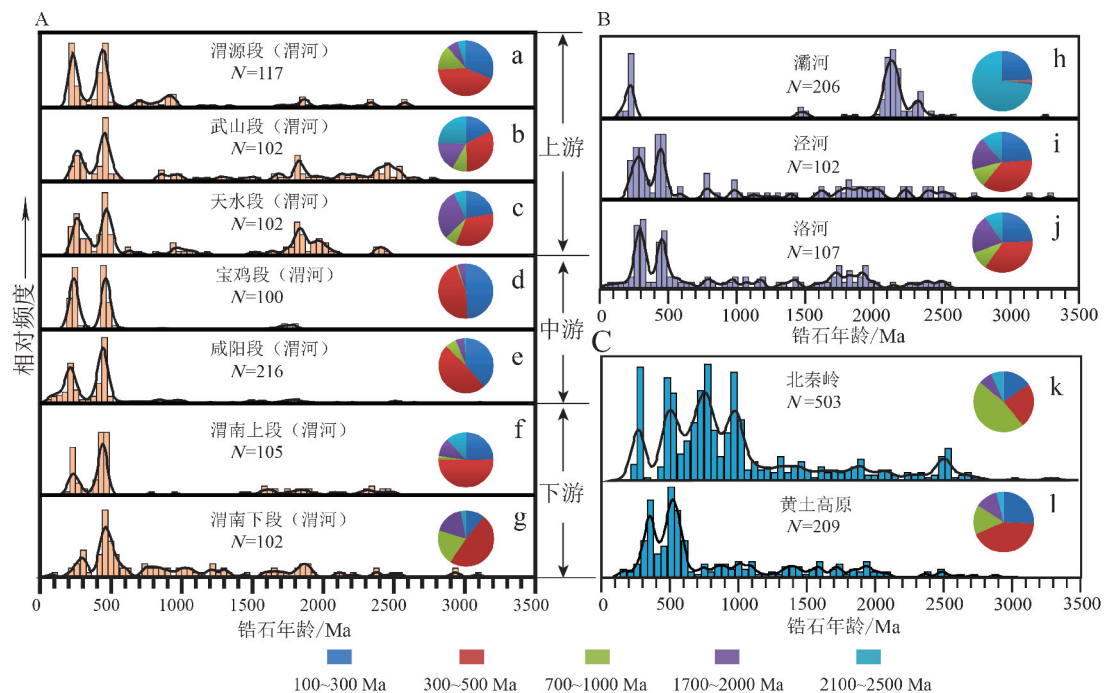


图 4 渭河流域碎屑锆石 U-Pb 年龄谱图及饼状图

A.渭河干流; B.渭河支流; C.秦岭造山带和黄土高原(秦岭造山带数据引自文献[26,30,35,36],黄土高原数据引自文献[37])

Fig.4 Plots of U-Pb age spectra and pie chart of the sediments in the Wei River drainage

A. The mainstream sediments in the Wei River; B. The tributary sediments in the Wei River; C. The sediments from the Qinling and Loess Plateau (data of the Qinling Mountain are from [26,30,35,36], and data of the Loess Plateau are from[37])

表 2 渭河流域沉积物不同年龄组碎屑锆石 U-Pb 年龄百分比

Table 2 The proportion of the zircon content at the different age sections in the Wei River drainage basin

样品点	100~300Ma (%)	300~500Ma (%)	700~1000Ma (%)	1700~2000Ma (%)	2100~2500Ma (%)	锆石总量(n)
渭源段(渭河)	28	39	13	6	4	117
武山段(渭河)	14	26	7	14	20	102
天水段(渭河)	19	28	6	26	6	102
宝鸡段(渭河)	47	44	1	5	0	100
咸阳段(渭河)	33	42	6	4	1	216
灞河	21	1	1	2	63	206
泾河	19	28	8	14	9	102
渭南上段(渭河)	22	45	2	10	11	105
洛河	19	28	8	16	8	107
渭南下段(渭河)	7	30	13	11	2	102
黄河(渭河汇合前)	13	20	7	20	29	84
黄河(渭河汇合后)	18	21	5	21	16	107

3.3 渭河流域碎屑锆石 U-Pb 年龄混合模式

根据五组年龄区间的锆石年龄百分比含量,按从上游到下游的顺序,绘制渭河流域混合模式图(图 5)。折线表示渭河干流沉积物中该年龄组内碎屑锆石含量的变化,点表示支流沉积物在该年龄组内碎

屑锆石的含量,竖线与横坐标的交点表示渭河支流与干流汇合的位置。在某个年龄区间内,如果汇合点前支流沉积物中该年龄组内锆石的含量明显高于干流中的含量,并且汇合后引起干流沉积物中该年龄组内的锆石含量明显增加,则认为该支流对干流贡献大。如果汇合前支流沉积物中该年龄组内锆石

含量明显低于干流中的含量,并且汇合后引起干流沉积物中该年龄组内的锆石含量明显减少,则认为支流对干流贡献较大,起到稀释作用。如果在某个年龄组内支流与干流汇合前后干流沉积物中锆石含量差异不大,则不能确定支流对干流的贡献大小。

如图5所示,渭河干流沉积物中100~300Ma年龄组内锆石含量整体呈现先增大后减少的趋势,宝鸡段(47%)和咸阳段(33%)含量较高。灞河和泾河先后汇入渭河,100~300Ma年龄组内锆石含量相近且均低于渭河干流,分别为21%和19%。灞河与泾河汇入渭河干流后,渭河沉积物中100~300Ma年龄组内锆石含量明显下降,即从咸阳段至渭南段锆石含量从33%减少到22%,说明灞河和泾河对渭河干流影响较大,起到了稀释作用。洛河沉积物中该年龄组的锆石含量高于渭河干流,在汇入渭河后,干流中该年龄组锆石含量明显下降,表明洛河的加入对渭河沉积物没有影响。

渭河干流300~500Ma年龄区间内的锆石含量明显高于其他年龄段,从上游至下游整体呈现上升趋势,尤其是进入宝鸡段后,该年龄组内锆石含量有明显的增加。支流灞河、泾河和洛河在该年龄组的锆石含量均低于干流,在灞河和泾河汇入渭河干流后,锆石含量增加幅度不明显,锆石含量变化不大,表明这两条支流对干流的影响有限。而洛河汇入渭河后,该年龄组内干流沉积物锆石含量明显下降,说明洛河对渭河干流影响较大。

700~1000Ma的锆石在渭河干流中整体含量较低,变化较大(图5C)。灞河该年龄组的锆石含量仅为1%,泾河含量为8%。灞河和泾河汇入渭河后,渭河该年龄组沉积物含量降低,表明灞河对渭河影响较大,主要表现为沉积物的稀释作用,而泾河贡献较小。洛河该年龄组锆石含量明显高于汇合前的渭河干流,在洛河汇入后,渭河干流该年龄组沉积物含量明显上升,由2%增加至13%,反映了洛河对渭河干流具有较大的贡献。

渭河干流沉积物在1700~2000Ma区间内锆石含量在水天段最高,从上游到下游呈现先增加后减小再轻微增加的趋势(图5D)。灞河该年龄组锆石含量低于渭河,而泾河高于渭河,在灞河和泾河汇入后,渭河该年龄组沉积物量略有增加,表明泾河贡献较多该年龄组的锆石而灞河贡献较小;洛河该年龄组锆石含量略高于渭河,在洛河加入后,渭河该年龄组沉积物量有少量增加,表明洛河对干流有一定贡献。

2100~2500Ma区间内锆石在武山段含量最

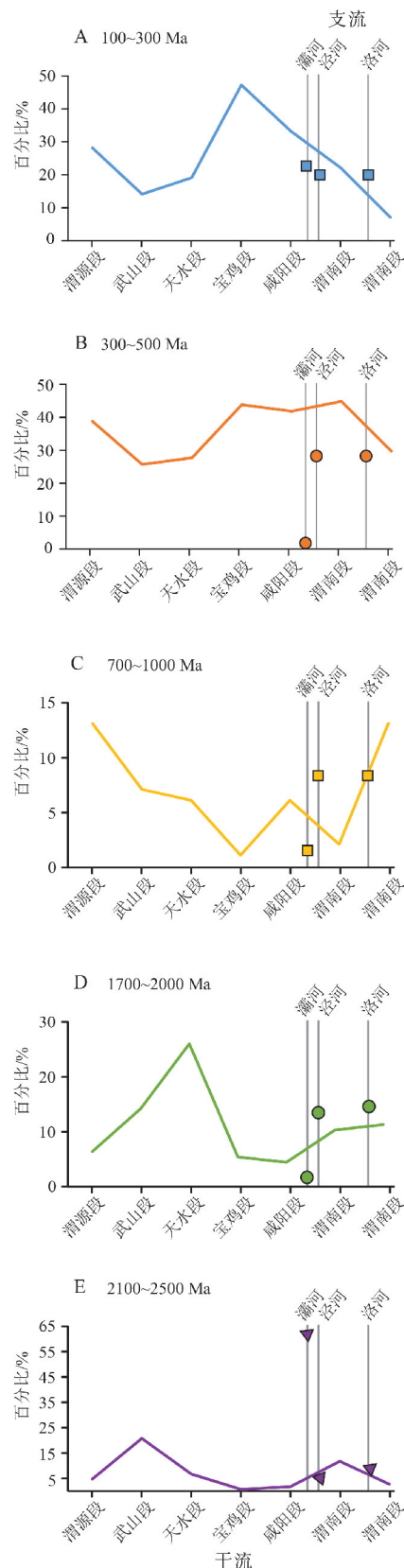


图5 碎屑锆石 U-Pb 年龄混合模式图
Fig.5 Hybrid model of age sections from the Wei River drainage basin

高,继而减少,下游有小幅增加(图5E)。灞河沉积物富集该年龄组锆石,且其含量明显高于渭河干

流,泾河含量略低于渭河,灞河和泾河汇入后,渭河干流在该年龄组内锆石含量显著增加,表明灞河对渭河产生影响,而泾河影响较小。洛河该年龄组沉积物含量略高于渭河,在洛河加入后,渭河该年龄组沉积物含量有所下降,表明洛河对渭河该年龄组沉积物没有贡献。

综上,渭河流域支流对干流有不同程度的稀释及贡献,泾河对渭河干流贡献较大,灞河对渭河干流贡献较小,洛河对渭河干流有一定贡献。由前文可知,泾河和洛河流经疏松易蚀的黄土高原,搬运携带大量沉积物,而灞河水流相对清澈,携带泥沙量较少。结合《中国河流泥沙公报,2016》最新数据,泾河对渭河的贡献为 69%,洛河对渭河贡献量为 23%。灞河贡献量小。此结论与本文研究结果一致。

3.4 渭河对黄河的沉积物贡献

渭河是黄河的一级支流,本研究在渭河与黄河汇合后取一个黄河沉积物样品,并结合前人已经发表的在渭河汇入前的黄河沉积物的数据^[37],探究渭河流域沉积物对黄河的贡献。

黄河流经众多构造单元,沉积物来源广泛,其碎屑锆石 U-Pb 年龄呈多峰态分布特征。汇合点前,黄河干流主要呈现四组年龄峰,分别是 100~300、300~500、1700~2000 和 2400~2600Ma(图 6A)。物源示踪研究表明,秦岭-大别-苏鲁造山带、东昆仑造山带、柴达木板块北缘和华北板块是 200~300Ma 和 350~500Ma 的锆石的可能物源,而 1800~2000Ma 和 2400~2600Ma 的锆石可能来自扬子板块和华北板块^[13,36]。

根据汇合点前后碎屑锆石年龄百分比变化可知,渭河加入黄河后,黄河在 100~300Ma 区间内的锆石含量从 13% 增加到 18%,说明渭河对黄河干流贡献了较多该年龄组的锆石。渭河在 300~500Ma 区间内锆石较高,但在渭河加入黄河后,并没有引起黄河在 300~500Ma 区间内的锆石含量的明显变化,故认为渭河对黄河干流贡献不大。对于 700~1000Ma 和 1700~2000Ma 区间内的锆石,由于其含量较低,并且在渭河加入后,黄河在这两个区间内的锆石含量基本没有变化。因此认为渭河对黄河干流的该年龄组锆石影响不大。2100~2500Ma 区间内的锆石含量明显减小,减小量为 13%,这是因为渭河在该年龄组的锆石含量较少,渭河的加入对黄河干流起到了明显的稀释作用。

可见,通过沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄分布分析,渭河对黄河有较大贡献。根据《中国河流泥沙公

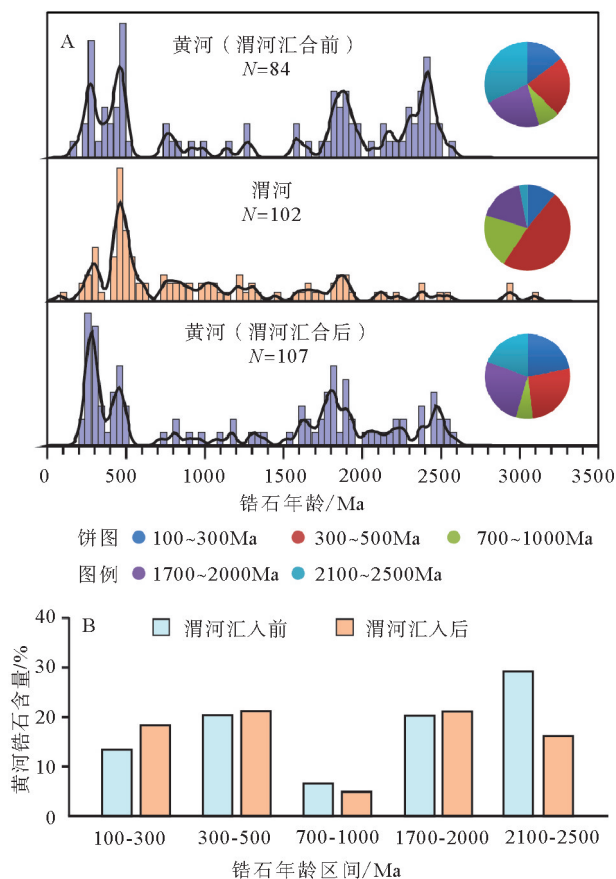


图 6 黄河及渭河(渭南段)碎屑锆石 U-Pb 年龄谱图(A)以及渭河汇入前后黄河各年龄组锆石含量变化(B)
(数据来源于文献^[37])

Fig.6 A. Plots of U-Pb age spectra and sectors for concordant zircons of the tectonic units; B. Changes in zircon proportions from the Yellow River sediments before and after confluence of the Wei River (Data from ^[37])

报》最新数据显示,自 1952 年至 2015 年,潼关水文控制站(渭河与黄河汇合位置)多年平均输沙量为 9.78 亿 t,渭河华县水文控制站多年平均年输沙量为 3.03 亿 t,渭河干流对黄河的泥沙贡献量达 30%,与本文研究相符。

4 结论

(1) 渭河干流沉积物主要呈现 5 组年龄区间,分别为 100~300、300~500、700~1000、1700~2000 和 2100~2500Ma,其中以 100~300Ma 和 300~500Ma 的锆石为主,判别渭河干流沉积物主要来自北秦岭造山带。上游沉积物中 1700~2000Ma 和 2100~2500Ma 的锆石含量较中下游高,主要与上游出露古元古代地层相关。

(2) 渭河支流沉积物碎屑锆石年龄分布存在显

著差异。灞河沉积物主要反映了北秦岭造山带的特征,泾河和洛河流经黄土高原,沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄主要表现为 200~300、400~500、800~1100、1800~2000 和 2400~2550Ma 五组年龄,与黄土高原锆石年龄组成相近。

(3) 沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄混合模式分析表明,支流泾河向渭河干流贡献较大;灞河携带泥沙量较小,对渭河干流沉积物贡献不大,洛河对渭河干流存在部分贡献。

(4) 渭河干流汇入黄河前后,黄河沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄组成变化明显,反映出渭河对黄河贡献较大,此结论与水文站相关数据结果一致。

参考文献(References)

- [1] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia—effects of a continental collision: features of recent continental tectonics in asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision[J]. *Science*, 1975, 189(4201): 419-426.
- [2] Yin A. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis[J]. *Tectonophysics*, 2010, 488(1-4): 293-325.
- [3] Allègre C J, Courtillot V, Tapponnier P, et al. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt [J]. *Nature*, 1984, 307(5946): 17-22.
- [4] Peltzer G, Tapponnier P, Zhang Z T, et al. Neogene and quaternary faulting in and along the Qinling Shan [J]. *Nature*, 1985, 317(6037): 500-505.
- [5] Searle M P, Windley B F, Coward M P, et al. The closing of Tethys and the tectonics of the Himalaya [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1987, 98(6): 678.
- [6] Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Raising tibet [J]. *Science*, 1992, 255(5052): 1663-1670.
- [7] 胡孟春. 渭河盆地的地质构造与构造地貌类型[J]. *地理研究*, 1989, 8(4): 56-64. [HU Mengchun. The relationship between the tectonic landforms and structures in the Weihe river basin [J]. *Geographical Research*, 1989, 8(4): 56-64.]
- [8] 张宏卫, 邓起东. 不对称盆地形成机制探讨——以渭河盆地为例[J]. *中国地震*, 1992, 8(1): 26-35. [ZHANG Hongwei, DENG Qidong. A study on the mechanism of the asymmetry basin—a case of the Weihe basin [J]. *Earthquake Research in China*, 1992, 8(1): 26-35.]
- [9] 王建强. 鄂尔多斯盆地南部中新代演化—改造及盆山耦合关系[D]. 西北大学博士学位论文, 2010. [WANG Jianqiang. Mesozoic-cenozoic basin evolution-reforming and basin-mountain coupling in southern Ordos basin [D]. *Doctoral Dissertation of Northwest University*, 2010.]
- [10] 王斌. 渭河盆地新生代沉积演化: 盆山耦合与风尘沉积[D]. 南京大学博士学位论文, 2014. [WANG Bin. Cenozoic sedimentary evolution of the Weihe basin: Basin-orogen coupling and eolian sediments [D]. *Doctoral Dissertation of Nanjing University*, 2014.]
- [11] Lee J K W, Williams I S, Ellis D J. Pb, U and Th diffusion in natural zircon [J]. *Nature*, 1997, 390(6656): 159-162.
- [12] Cherniak D J, Watson E B. Pb diffusion in zircon [J]. *Chemical Geology*, 2001, 172(1-2): 5-24.
- [13] 闫义, 林舸, 李自安. 利用锆石形态、成分组成及年龄分析进行沉积物源区示踪的综合研究 [J]. *大地构造与成矿学*, 2003, 27(2): 184-190. [YAN Yi, LIN Ge, LI Zi'an. Provenance tracing of sediments by means of synthetic study of shape, composition and chronology of zircon [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2003, 27(2): 184-190.]
- [14] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术 [J]. *矿床地质*, 2009, 28(4): 481-492. [HOU Kejun, LI Yanhe, TIAN Yourong. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS [J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(4): 481-492.]
- [15] Huang S G, Zhou W J, Han X, et al. Progress on zircon U-Pb Dating technique [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88 (S2): 984.
- [16] Milliman J D, Syvitski J P M. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers [J]. *The Journal of Geology*, 1992, 100 (5): 525-544.
- [17] 何梦颖, 郑洪波, 贾军涛. 长江现代沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成与物源示踪研究 [J]. *第四纪研究*, 2013, 33(4): 656-670. [HE Mengying, ZHENG Hongbo, JIA Juntao. Detrital zircon U-Pb dating and Hf isotope of morden sediments in the Yangtze river: implications for the sediment provenance [J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(4): 656-670.]
- [18] 岳保静, 廖晶. 黄河流域现代沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄物源探讨 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(5): 109-119. [YUE Baojing, LIAO Jing. Provenance study of Yellow river sediments by U-Pb dating of the detrital zircons [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(5): 109-119.]
- [19] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报-2015 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016. [The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *Zhongguo Heliu Nisha Gongbao*, 2015 [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2016.]
- [20] 郭岭, 贾超超, 朱毓, 等. 现代渭河西安段沉积体沉积相与岩相特征 [J]. *沉积学报*, 2015, 33(3): 543-550. [GUO Ling, JIA Chaochao, ZHU Yu, et al. Characteristics of sedimentary facies and lithofacies of modern Weihe river in Xi'an [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(3): 543-550.]
- [21] 张国伟, 张宗清, 董云鹏. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义 [J]. *岩石学报*, 1995, 11 (2): 101-114. [ZHANG Guowei, ZHANG Zongqing, DONG Yunpeng. Nature of main tectonic-lithostratigraphic units of the Qinling Orogen: implications for the tectonic evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1995, 11(2): 101-114.]
- [22] 张国伟, 孟庆任, 于在平, 等. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征 [J]. *中国科学 D 辑*, 1996, 26(3): 193-200. [ZHANG Guowei, MENG Qingren, YU Zaiping, et al. Oro-

- genesis and dynamics of the Qinling Orogen[J]. Science in China (Series D), 1996, 39(3):225-234.]
- [23] Bao Z W, Wang C Y, Zeng L J, et al. Slab break-off model for the Triassic syn-collisional granites in the Qinling orogenic belt, Central China: Zircon U-Pb age and Hf isotope constraints[J]. International Geology Review, 2015, 57(4): 492-507.
- [24] 孟庆任. 秦岭的由来[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(4): 412-420. [MENG Qingren. Origin of the Qinling Mountains [J]. Scientia Sinica Terrae, 2017, 47(4): 412-420.]
- [25] Wu Y B, Zheng Y F. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu orogenic belt in central China[J]. Gondwana Research, 2013, 23(4):1402-1428.
- [26] Qin J F, Lai S C, Grapes R, et al. Geochemical evidence for origin of magma mixing for the Triassic monzonitic granite and its enclaves at Mishuling in the Qinling orogen (central China)[J]. Lithos, 2009, 112(3-4): 259-276.
- [27] Tao W, Wang X X, Wei T, et al. North Qinling Paleozoic granite associations and their variation in space and time: Implications for orogenic processes in the orogens of central China[J]. Science in China (Series D), 2009, 52(9): 1359-1384.
- [28] Diwu C, 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.
- [29] Liu B X, Qi Y, Wang W, et al. Zircon U-Pb ages and O-Nd isotopic composition of basement rocks in the North Qinling Terrain, central China: evidence for provenance and evolution[J]. International Journal of Earth Sciences, 2013, 102(8): 2153-2173.
- [30] Li Y, Zhou H W, Li Q L, et al. Palaeozoic polymetamorphism in the North Qinling orogenic belt, Central China: Insights from petrology and *in situ* titanite and zircon U-Pb geochronology[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 92(5): 77-91.
- [31] Cao H H, Li S Z, Zhao S J, et al. Detrital zircon geochronology of Neoproterozoic to early Paleozoic sedimentary rocks in the North Qinling Orogenic Belt: Implications for the tectonic evolution of the Kuanping Ocean[J]. Precambrian Research, 2016, 279: 1-16.
- [32] Vermeesch P. On the visualisation of detrital age distributions[J]. Chemical Geology, 2012, 312-313: 190-194.
- [33] 陈岳龙, 李大鹏, 周建, 等. 中国西秦岭碎屑锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 88-107. [CHEN Yuelong, LI Dapeng, ZHOU Jian, et al. U-Pb ages of zircons in western Qinling Mountain, China, and their tectonic implications[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 88-107.]
- [34] Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, et al. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons[J]. Precambrian Research, 2004, 131(3-4): 231-282.
- [35] Zhu X Y, Chen F, Li S Q, et al. Crustal evolution of the North Qinling terrain of the Qinling Orogen, China: Evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition[J]. Gondwana Research, 2011, 20(1): 194-204.
- [36] Shi Y, Yu J H, Santosh M. Tectonic evolution of the Qinling orogenic belt, Central China: New evidence from geochemical, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes[J]. Precambrian Research, 2013, 231: 19-60.
- [37] Nie J, Stevens T, Rittner M, et al. Loess plateau storage of northeastern tibetan plateau-derived Yellow River sediment [J]. Nature Communications, 2016, 6(1): 49-55.
- [38] 张宗清. 北秦岭变质地层同位素年代研究[M]. 北京: 地质出版社, 1994. [ZHANG Zongqing. Isotopes Study on the Metamorphic Stratum in the North Qinling Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.]
- [39] Nie J S, Peng W B, Möller A, et al. Provenance of the upper Miocene-Pliocene Red Clay deposits of the Chinese loess plateau[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 407: 35-47.
- [40] Xie J, Yang S L, Ding Z L. Methods and application of using detrital zircons to trace the provenance of loess[J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(11): 1837-1846.