

基于非参数性检验定量分析法对华北板块东南缘寿县组碎屑锆石源区对比分析

赵嘉祺

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2024年12月20日; 录用日期: 2025年1月20日; 发布日期: 2025年1月28日

摘 要

华北板块东南缘淮南地区在淮南、霍邱、凤阳等地在晚前寒武纪形成一套完整的海相碎屑岩和碳酸盐岩沉积盖层。八公山群寿县组主要为一套浅灰色含钙质石英细砂 - 粉砂岩。为探讨寿县组地层沉积物源从而采集寿县组出露区未风化新鲜岩石样品, 本文对其进行岩石学特征分析并制成显微薄片在正交偏光显微镜下对其进行粒度分析, 结合萨胡(Sahu)判别函数结果和概率累计曲线图特征, 认为寿县组碎屑岩分选好, 磨圆一般, 沉积环境为浅海 - 临滨带的陆棚沉积环境。在收集前人碎屑锆石年龄并结合淮南周边地区基性侵入岩的定年结果后, 将八公山群寿县组沉积时限限定在1.0~0.95 Ga之间。基于非参数性检验的定量分析法(K-S检验)验证不同地区的物源区差异性, 并生成年龄累计曲线图, 对比华北克拉通中 - 新元古代时期裂谷岩浆活动及其东部各区域出现的碎屑锆石年龄, 判断淮南地区寿县组沉积物源可能为劳伦古大陆造山带, 是否来自华北克拉通内部仍然需要进一步研究。

关键词

寿县组, 粒度分析, 沉积环境, 沉积物源, 基于非参数性检验的定量分析法(K-S检验)

Comparative Analysis of Detrital Zircon Source Areas of Shouxian Formation at the Southeastern Margin of the North China Plate Based on the Nonparametric Test Quantitative Analysis Method

Jiaqi Zhao

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Dec. 20th, 2024; accepted: Jan. 20th, 2025; published: Jan. 28th, 2025

Abstract

A complete set of Marine clastic rock and carbonate sedimentary cover was formed in Huainan, Huoqiu and Fengyang in the southeast of North China Craton during the late Precambrian period. The Shouxian Formation of Bagongshan Group is mainly a set of light gray calcareous quartz fine sand-siltstone. In order to explore the source of sediments in the Shouxian Formation and collect samples of unweathered fresh rocks from the outcrop area of the Shouxian Formation, this paper analyzes their petrology characteristics and makes microslides, analyzes their particle size under the orthogonal polarization microscope, and combines the results of Sahu discriminant function and the characteristics of probability accumulation curve, which suggests that the clastic rocks of the Shouxian Formation are well sorted and generally rounded. The sedimentary environment is shelf sedimentary environment in shallow sea-coastal zone. Based on the dating of former detrital zircons and the dating of basic intrusive rocks in Huainan area, the deposition time of Shouxian Formation in Bagongshan Group is limited to 1.0~0.95 Ga. The quantitative analysis based on non-parametric test (K-S test) verifies the provenance differences in different regions, and generates a cumulative age curve. By comparing the Mesoproterozoic rifting magmatic activity in the North China Craton and the ages of detrital zircons in various eastern regions, it is concluded that the sediment source of Shouxian Formation in Huainan area may be Laurentian orogenic belt. Whether it comes from within the North China Craton still needs further study.

Keywords

Shouxian Formation, Grain Size Analysis, Sedimentary Environment, Sediment Provenance, Quantitative Analysis Based on Nonparametric Tests (K-S Tests)

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

淮南地区位于华北克拉通东南缘,东临郯庐断裂带,南接秦岭-大别造山带,自然地理位置上是我国华南、华北两大陆块的地质分解区块[1]。淮南地区新元古界的地理和构造位置更是被视为解决我国南北中新元古界衔接对比的关键地区之一[2][3]。自徐嘉炜[4]开展淮南地区前寒武纪地层研究以来,杨志坚[5]、郑文武[6]、汪贵翔等人[7]对该地区地层划分、淮南群古生物化石、沉积学等分别进行了报道和讨论。近几年来, Li 等人[8]、Sun 等人[9]、Zhao 等人[10]、李光金等人[11]在淮南地区包括淮南八公山及周边蚌埠怀远明龙山、滁州曹店凤阳山等地对八公山群寿县组进行野外实地踏勘、锆石 U-Pb 定年、沉积物源分析,已经对寿县组的空间展布、沉积时限有了一定的认识。但前人有关寿县组岩性特征及粒度分析乃至沉积时限和环境的研究内容尚待进一步丰富,对沉积物源还存有疑点。本文在借鉴前人研究方法和已有重要成果的基础上,利用显微镜下观察和柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫物源检测,结合粒度分析和华北克拉通东缘寿县组及其对应层位定年数据,判断寿县组沉积环境,限定沉积时限和讨论沉积物源差异性。

2. 地质背景

淮南地区位于华北克拉通华北陆块东缘裂谷系南部,北接次级构造单元蚌埠隆起,南壤次级构造单

元合肥盆地,东边止于郯庐断裂带(图 1)。淮南地区在早元古界太古宙高级变质基底上沉积了一套厚度较小,岩性较单一的浅海相砂泥质和碳酸盐沉积(凤阳群),其后直到晚元古界再次形成了浅海相陆源碎屑岩(八公山群)与浅海相碳酸盐岩(淮南群) [11] [12]。依据沉积旋回及时间顺序,凤阳群地层自下而上被划分为白云山组、青石山组和宋集组,八公山群分为曹店组、伍山组、刘老碑组和寿县组,淮南群分为九里桥组和四顶山组[13]。

寿县组(又称四十里长山组)由杨志坚[5]创名于四十里长山地区,杨清和等人[3]、汪贵翔等人[7]称寿县组,是分布于霍邱、淮南至凤阳山区一带的整合于刘老碑组之上,九里桥组之下(图 2(a))的一套浅灰色含钙质石英砂岩地层和含钙石英砂岩以及长石石英砂岩组合[13]。

寿县组与刘老碑组、九里桥组的下伏、上覆的地层分界标志为钙质石英砂岩的出现和消失,其主要由偶夹泥岩、页岩的石英砂岩、钙质石英砂岩、石英粉砂岩粉砂质泥岩等韵律层构成,总体为细颗粒、退积型沙滩、沙坝-滨海潮间带沉积[13]。寿县组地层岩性基本稳定,自霍邱向东延伸钙质含量减少。寿县组地层普遍厚度在几十米至几百米不等,如淮南八公山一带厚度在 45 米左右,凤阳雷家湖地区可达 90 米厚,霍邱地区厚度 50 米,江苏泗县地区有 220 米厚,邳州嵎山一带则有 420 米厚[13]。

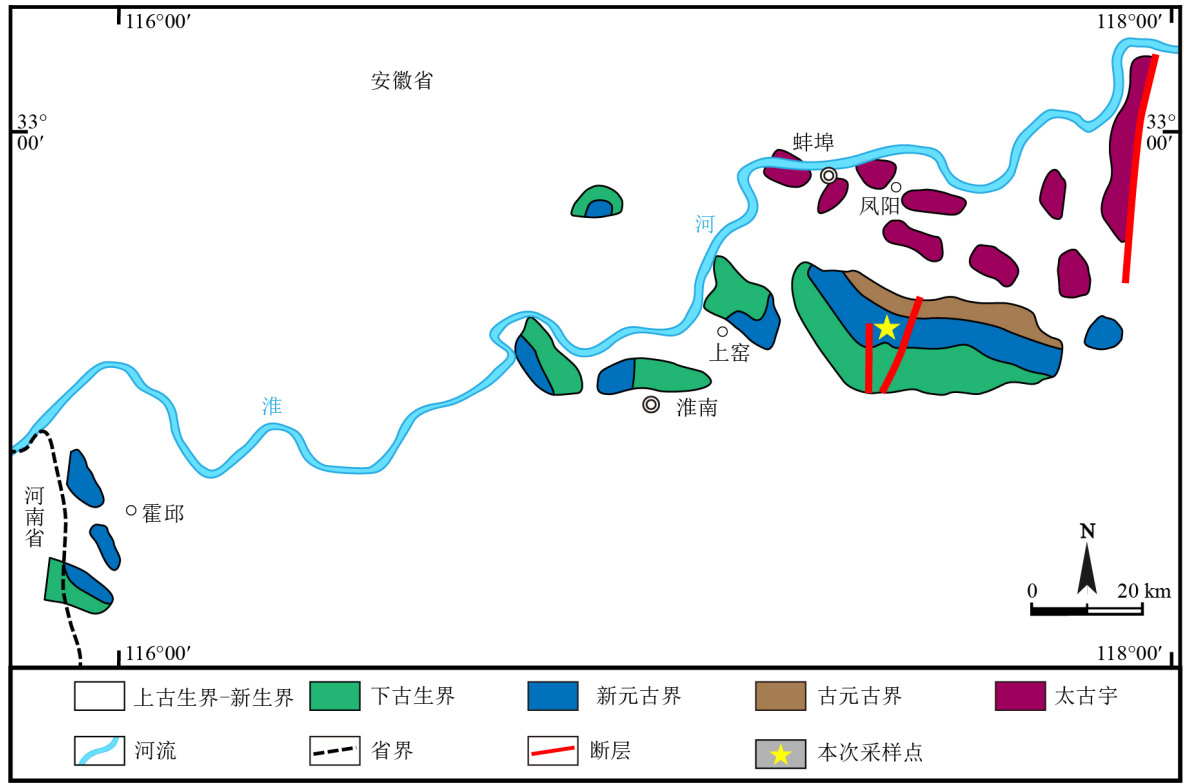


Figure 1. Schematic map of stratigraphic distribution in the southeast margin of the North China landmass
图 1. 华北陆块东南缘地层分布简图

3. 样品采集及岩石学特征

寿县组出露分布广泛,霍邱县四十里长山、淮南八公山-罗山、怀远明龙山、上窑大屋山-百瓜山一线、凤阳县南部山区东西向展布超过 40 公里的大片区域均可见到寿县组出露。本次粒度分析以凤阳县曹店片区出露寿县组岩层为例进行采样并制成显微薄片进行显微镜下分析和粒度特征分析,再结合前人在本区锆石定年结果进行物源分析。

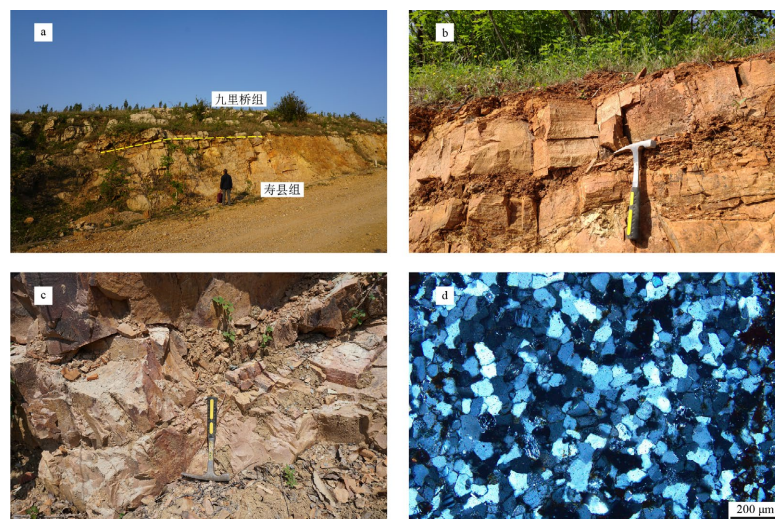


Figure 2. Field survey photos and microscope photos of Shouxian Formation
图 2. 寿县组野外踏勘照片及显微镜下照片

样品 BG29 采集自凤阳县曹店乡南骨头山(图 1), 位于寿县组中上部层位, 可见浅肉红色、白色石英砂岩(图 2(c)), 厚层块状长石石英粉砂岩并偶夹薄层泥质粉砂岩(图 2(b))。正交偏光镜下观察到样品中碎屑颗粒约占 85%~90%, 碎屑颗粒中石英占比约 95%左右, 其他可见少量长石、白云母等(图 2(d))。颗粒整体分选较好, 磨圆度一般, 主要呈次圆状, 少数可见次棱角状或圆状, 部分石英具有波状消光现象; 颗粒之间为颗粒支撑, 凹凸-线状接触, 胶结类型为接触式-孔隙式。镜下观察岩屑占比约 7%, 胶结物占比约 6%, 以铁质胶结物为主, 还有杂基占比约 2%等等。对样品粒度统计显示绝大部分粒径在 0.031~0.125 mm 之间, 占统计总数 96%, 其中颗粒直径在 0.063~0.125 mm 区间占比约 81%, 0.031~0.063 mm 约占 15%, 根据沉积岩命名规则[14], 样品 BG29 命名为含粗粉砂质极细砂岩。

4. 样品粒度分析及古沉积环境

碎屑岩粒度分析主要有粒度大小分布、分选特征等, 粒度大小反映出沉积介质能量的度量强弱[14][15], 分选特征可以体现沉积水动力条件大小和沉积环境稳定性[16][17]。

Table 1. Grain-size analysis parameters and depositional environment discrimination value of Shouxian Formation sandstone in Huainan area

表 1. 淮南地区寿县组砂岩粒度分析参数及沉积环境判别值

样品编号	BG29
采样位置	曹店骨头山
中值(M_d)	3.44
平均粒径(M_z)	3.36
分选系数(σ_1)	0.35
偏度(SK_1)	0.13
峰度(K_G)	0.88
Y^*	79.51
$Y^\#$	-0.73

注: $Y^* = 15.6543M_z + 65.7091\sigma_1^2 + 18.1071SK_1 + 18.5043K_G$ (海滩沙丘 $Y^* < 65.3650$; 浅海沙丘 $Y^* > 65.3650$); $Y^\# = 0.2852M_z - 8.7604\sigma_1^2 - 4.8932SK_1 + 0.0482K_G$ (浅海沙丘 $Y^\# > -7.4190$; 河流沙丘 $Y^\# < -7.4190$)。

本次研究对凤阳山寿县组样品 20BG29 使用正交偏光显微镜对样品随机统计 490 个颗粒的最大视直径 D (mm), 经过 $\Phi = -\log_2 D$ 转换成标准 Φ 值, 统计分析粒径, 绘制频率曲线图, 拟合概率累计曲线图(图 3)。后续由福克 - 沃德提出的粒度参数计算方法计算样品的中值(M_d)、平均粒径(M_z)、分选系数(σ_1)、偏度(SK_1)、峰度(K_G)等参数值, 再使用萨胡(Sahu)沉积环境判别函数[18]计算判别值(Y), 根据 Y 值对碎屑岩沉积相和沉积环境进行判别和讨论。粒度参数计算结果如表 1 所示。

粒度主要参数有粒度中值(M_d), 即累计曲线上颗粒含量 50%处所对应的粒径 Φ 值; 平均粒径(M_z), 以平均值表示粒度分布的集中趋势; 分选系数(σ_1), 反映颗粒大小均匀程度的主要参数; 偏度(SK_1), 判断粒度分布的不对称程度; 峰度(K_G), 衡量粒度频率曲线尖锐程度的指标, 度量沉积物粒度分布的中部与尾部的变化。

根据计算结果, 可得出 BG29 粒度中值(M_d)约为 3.44Φ , 平均粒径(M_z)的 Φ 值为 3.36, 由此可见样品粒度整体细小, 属于极细砂结构; 分选系数(σ_1)值为 0.35, 根据数值对应的分选程度, 认为样品分选性好, 可能为海(湖)滨砂; 偏度(SK_1)值为 0.13, 为正偏, 表明样品较粗组分稍多; 峰度(K_G)值为 0.88, 根据福克对峰度的分级, 认为粒度频率曲线整体平坦。

由于研究区内寿县组钙质石英砂岩中常见海绿石矿物, 且下部刘老碑组上段海量大型藻类化石, 上部九里桥组也见有带状褐藻类和叠层石化石[13], 因此指示寿县组为典型的海相沉积环境。结合样品粒度参数计算结果, 本文认为研究区内寿县组碎屑岩为浅海 - 滨岸相细粒砂岩沉积。

根据寿县组浅海 - 滨岸相沉积的判断, 将样品 BG29 粒度参数计算值分别代入海滩与浅海环境和浅海与河流(三角洲)环境的萨胡判别函数, 依次得到沉积环境判别值 Y^* 为 79.51 和 $Y^\#$ 为 -0.73, 前者介于 79.99~99.49 之间(表 1), 后者介于 -2.24~0.32 之间(表 1), 均指示沉积环境为浅海沉积环境[14]。

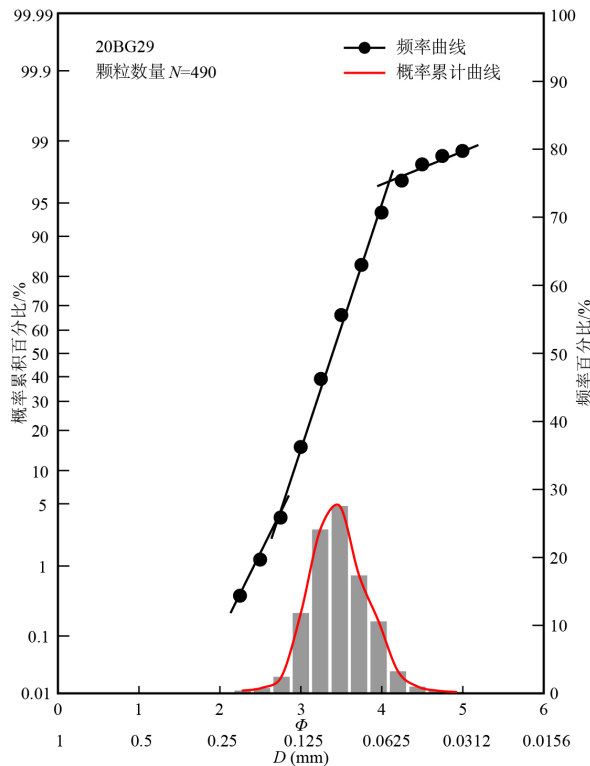


Figure 3. Frequency curve and probability accumulation curve of grain size components of sandstone samples in Shouxian Formation
图 3. 寿县组样品砂岩粒度组分频率曲线和概率累计曲线图

在概率累计曲线图中可见该样品为多段式分布总体, 具有多跳一悬的特征, 即概率累计曲线图具有

两段跳跃次总体和一段悬浮次总体。概率累积曲线以跳跃次总体为主, 占比约 97%, 两段跳跃次总体线段的倾斜角度约为 63° 和 72° , 两段跳跃次总体之间明显的冲刷 - 回流分界点; 跳跃次总体和悬浮次总体交切点在 $4.1\phi \sim 4.3\phi$ 之间, 仅有一段悬浮次总体, 倾斜角度约为 22° 。结合概率累计曲线图, 可看出样品 BG29 的 ϕ 值大多数在 $2.25\phi \sim 5\phi$ 之间, 概率累计曲线整体偏陡, 说明样品分选性好, 且在 $2.75\phi \sim 4.25\phi$ 之间概率累积速度慢, $2.75\phi \sim 4.25\phi$ 之间概率迅速累积, $4.25\phi \sim 5\phi$ 之间累积速度明显减慢并趋于停止, 反映出寿县组在沉积过程中水动力条件总体稳定, 先强后弱的变化过程[14]。

本次研究对淮南地区东部凤阳山前寒武系出露地层寿县组采集样品并依次进行粒度分析和概率累积曲线图的拟合, 可以看出寿县组碎屑石英砂岩整体粒度偏细, 为极细砂岩与粉砂岩过渡类型。样品中以石英砂岩为主, 兼有少量长石、白云母、锆石、海绿石等矿物, 岩屑、胶结物和杂基合计仅占约 15%。颗粒支撑结构, 颗粒间凹凸 - 线状接触, 接触式 - 孔隙式胶结类型, 整体分选好, 沉积水动力条件偏弱, 结合寿县组出露处的水平层理发育和局部斜层理和碎屑岩内常见的海绿石矿物以及上下整合接触地层刘老碑组 and 九里桥组均有藻类化石或叠层石[19], 对照萨胡判别函数计算结果, 认为八公山群寿县组为浅海 - 临滨带的陆棚沉积环境。

5. 寿县组沉积时限及物源讨论

5.1. 寿县组锆石定年和沉积时限

早期研究文献根据寿县组砂岩中的海绿石 K-Ar 定年结果(739~750 Ma)将沉积时代置于早震旦世[13][19]。近五年来前人已对淮南地区寿县组包括淮南八公山、怀远平阿山、滁州凤阳山、霍邱四十里长山等地进行样品采集和碎屑锆石 U-Pb 年代学实验并获得了显著成果。Li 等人[8][20]对霍邱地区寿县组锆石定年后获得了 992 ± 23 和 932 ± 19 Ma 的最年轻单颗粒锆石年龄, 从怀远明龙山地区的寿县组碎屑锆石中获得了 974 ± 24 Ma 的最年轻单颗粒锆石年龄, 八公山地区则出现了 974 ± 24 和 986 ± 12 Ma 的年龄; 八公山地区还有 Zhao 等人[10]和李光金等人[11]获得的 942 ± 8 、 948 ± 19 和 1014 ± 17 Ma 的年龄; Sun 等人[9]和 Li 等人[8]在凤阳山地区依次获得 961 ± 16 、 974 ± 21 和 1024 ± 22 Ma 年龄的锆石。徐州 - 淮北地区岨山组(寿县组对应层位)则由 Li 等人[21]定年得到 1065 ± 22 和 1064 ± 22 Ma 的最年轻单颗粒锆石年龄。原文整理 U-Pb 锆石定年数据归纳于表 2 中。

Table 2. U-Pb age statistics of detrital zircons from the southeast margin of North China Plate

表 2. 华北板块东南缘各地区碎屑锆石 U-Pb 年龄统计情况

区域	样品号	各年龄分段	>2400 Ma	2400~1800 Ma	1800~1600 Ma	1600~1200 Ma	1200~1000 Ma	<1000 Ma
淮南地区	17SX04	年龄最小值(Ma)	2706 ± 24	2117 ± 17	11789 ± 20	1591 ± 26	1199 ± 18	997 ± 12
		年龄最大值(Ma)	2529 ± 15	1873 ± 21	1609 ± 24	1202 ± 13	1009 ± 12	942 ± 8
		区间内个数	2 颗	4 颗	14 颗	45 颗	40 颗	3 颗
	19SX-1	年龄最小值(Ma)	2969 ± 52	2049 ± 60	1798 ± 63	1579 ± 69	1192 ± 18	948 ± 19 1 颗
		年龄最大值(Ma)	2540 ± 53	1805 ± 61	1613 ± 64	1200 ± 18	1022 ± 22	
		区间内个数	3 颗	7 颗	17 颗	53 颗	25 颗	
	19SX-SX-1	年龄最小值(Ma)	2655 ± 17	2289 ± 20	1799 ± 29	1593 ± 34	1196 ± 25	无
		年龄最大值(Ma)	2464 ± 18	1803 ± 30	1603 ± 43	1202 ± 20	1014 ± 17	
		区间内个数	2 颗	4 颗	19 颗	60 颗	22 颗	
	M29	年龄最小值(Ma)	无	1998 ± 54	1746 ± 51	1584 ± 44	1193 ± 27	986 ± 12 1 颗
		年龄最大值(Ma)		1812 ± 62	1620 ± 65	1204 ± 13	1005 ± 22	
		区间内个数		5 颗	4 颗	26 颗	18 颗	

续表

怀远地区	HN13	年龄最小值(Ma)	2599 ± 51	2346 ± 57	1773 ± 57	1532 ± 67	1197 ± 27	981 ± 24
		年龄最大值(Ma)	1 颗	1933 ± 59	1643 ± 59	1213 ± 26	1037 ± 29	974 ± 24
		区间内个数		3 颗	3 颗	24 颗	22 颗	2 颗
	XZZ-1	年龄最小值(Ma)	2739 ± 30	2102 ± 92	1800 ± 45	1583 ± 70	1189 ± 19	961 ± 16
		年龄最大值(Ma)	2657 ± 28	1805 ± 44	1620 ±	1201 ± 20	1071 ± 18	
		区间内个数	2 颗	11 颗	14 颗	40 颗	15 颗	
凤阳地区	JS09	年龄最小值(Ma)	3086 ± 36	1963 ± 52	1700 ± 50	1594 ± 56	1198 ± 25	无
		年龄最大值(Ma)	1 颗	1872 ± 50	1620 ± 58	1202 ± 24	1024 ± 22	
		区间内个数		3 颗	6 颗	43 颗	31 颗	
	JS13	年龄最小值(Ma)	2516 ± 52	1950 ± 53	1766 ± 48	1591 ± 54	1193 ± 24	994 ± 22
		年龄最大值(Ma)	1 颗	1817 ± 50	1617 ± 56	1216 ± 24	1060 ± 22	974 ± 21
		区间内个数		4 颗	3 颗	29 颗	12 颗	2 颗
霍邱地区	M19	年龄最小值(Ma)	2660 ± 61	1989 ± 74	1759 ± 70	1589 ± 69	1173 ± 28	996 ± 23
		年龄最大值(Ma)	1 颗	1818 ± 70	1665 ± 69	1203 ± 27	1053 ± 22	992 ± 23
		区间内个数		3 颗	6 颗	24 颗	8 颗	2 颗
	M28	年龄最小值(Ma)	2709 ± 36	2332 ± 41	1750 ± 50	1584 ± 44	1180 ± 29	932 ± 19
		年龄最大值(Ma)	2629 ± 42	1840 ± 46	1613 ± 46	1202 ± 25	1018 ± 20	
		区间内个数	2 颗	2 颗	8 颗	39 颗	16 颗	
徐州-淮北地区	XS01	年龄最小值(Ma)	2772 ± 48	1950 ± 59	1769 ± 60	1581 ± 65	1198 ± 26	无
		年龄最大值(Ma)	2751 ± 52	1809 ± 58	1613 ± 58	1209 ± 25	1065 ± 22	
		区间内个数	2 颗	8 颗	14 颗	32 颗	17 颗	
	XS02	年龄最小值(Ma)		2065 ± 59	1800 ± 53	1589 ± 61	1188 ± 24	无
		年龄最大值(Ma)	无	1828 ± 57	1603 ± 51	1208 ± 26	1064 ± 22	
		区间内个数		7 颗	28 颗	24 颗	12 颗	

前人根据各自样品定年的结果，对寿县组沉积环境也各持己见。Li 等人[8] [20]认为寿县组沉积年龄为 1.0~0.94 Ga；Sun 等人[9]则以~1.1 Ga 作为淮南地区八公山群最大沉积年龄；Zhao 等人[10]则~1.1 Ga 的最年轻加权平均年龄；李光金等人[11]根据寿县组和刘老碑组的定年结果认为寿县组沉积时间为~1.1 Ga 至~0.95 Ga。

由于淮南地区沉积地层中缺少火山岩夹层等，故难以对该地区沉积岩中碎屑锆石沉积时限做出精准限定。根据表 2 可看出前人进行碎屑锆石定年结果中有 8 个样品得最年轻单颗粒锆石年龄在 1.0 Ga 以下，其余 4 个样品得最年轻年龄也在 1.0~1.1 Ga 之间，结合 Zhao 等人[22]对徐州-淮北地区基性侵入岩定年结果以及侵入地层和寿县组上下层位对比关系，认为淮南地区寿县组沉积时限在 1.0 Ga 至~0.95 Ga 之间。

5.2. 潜在物源的柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫检验

柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫检验(The Kolmogorov-Smirnoff statistical test，简称 K-S 检验)常用于比较碎屑锆石 U-Pb 年龄的潜在物源[23]-[25]。K-S 检验是在累计分布函数的运算公式后，比较两个累计分布函数曲线的最大垂直差异 D 值，对比观察某一临界值 Dcrit 和差异值 Dobs，返回 P 值[26] [27]。置信水平为 95%，即如果 P 值超过 0.05 甚至更大，有很大把握认为两组碎屑锆石来自同一物源区，并且 P 值越大，样品相似度越高；如果 P 值小于 0.05 甚至趋近于 0。则有很大把握认为两组碎屑锆石来自不同物源区。

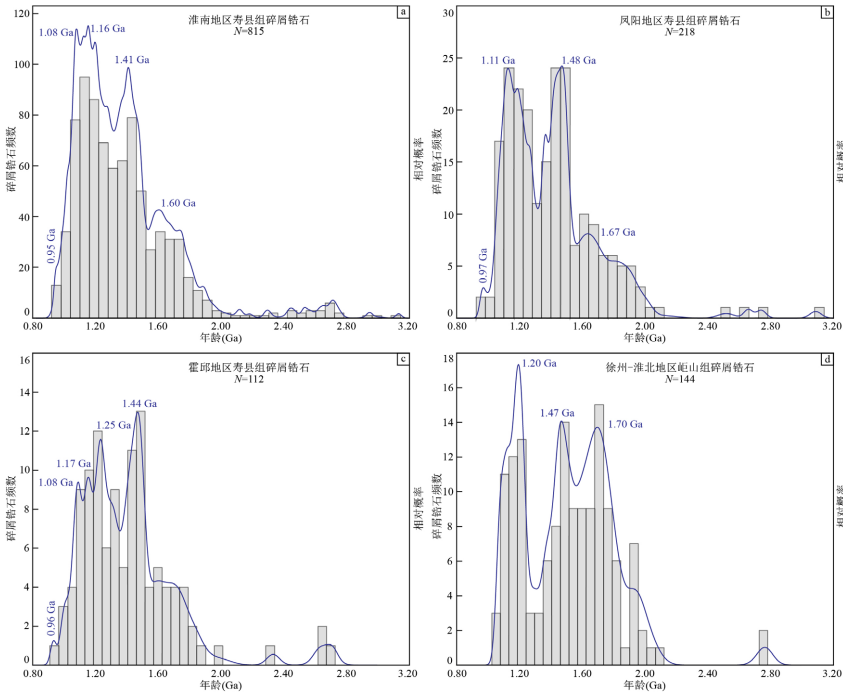
鉴于近五年来前人已对淮南地区各个寿县组出露片区包括淮南八公山、怀远平阿山、滁州凤阳山、霍邱四十里长山等地均进行了样品采集和碎屑锆石 U-Pb 年代学实验并已获得显著成果，故本次潜在沉积

物源 K-S 检验引用 Li 等人[8] [20] [21]、Sun 等人[9]、Zhao 等人[10]、李光金等人[11]在淮南地区的相关锆石年龄数据。另外为便于沉积物源分析，再次引用 Li 等人[21]在华北克拉通东缘淮南地区北部徐州 - 淮北地区峨山组(寿县组对应地层)锆石年龄数据进行分析。

K-S P-values using error in the CDF	凤阳曹店 JS13	凤阳曹店 JS09	凤阳曹店 XZZ-1	怀远唐集 HN13	淮南八公山 M29	淮南八公山 17SX04	淮南八公山 19SX-1	淮南八公山 19SX-SX-1	霍邱马店 M19	霍邱马店 M28	徐州邳州 XS01	徐州邳州 XS02
凤阳曹店JS13		0.884	0.530	0.115	0.684	0.306	0.989	0.873	1.000	1.000	0.584	0.001
凤阳曹店JS09	0.884		0.100	0.026	0.852	0.557	0.404	0.301	0.753	0.782	0.142	0.000
凤阳曹店XZZ-1	0.530	0.100		0.001	0.080	0.023	0.970	0.562	0.981	0.402	1.000	0.002
怀远唐集HN13	0.115	0.026	0.001		0.572	0.053	0.006	0.001	0.043	0.032	0.001	0.000
淮南八公山M29	0.684	0.852	0.080	0.572		0.976	0.185	0.127	0.650	0.530	0.140	0.000
淮南八公山17SX04	0.306	0.557	0.023	0.053	0.976		0.007	0.029	0.409	0.289	0.104	0.000
淮南八公山19SX-1	0.989	0.404	0.970	0.006	0.185	0.007		0.985	0.995	0.942	0.936	0.000
淮南八公山19SX-SX-1	0.873	0.301	0.562	0.001	0.127	0.029	0.985		1.000	0.996	0.765	0.000
霍邱马店M19	1.000	0.753	0.981	0.043	0.650	0.409	0.995	1.000		0.998	0.883	0.001
霍邱马店M28	1.000	0.782	0.402	0.032	0.530	0.289	0.942	0.996	0.998		0.529	0.000
徐州邳州XS01	0.584	0.142	1.000	0.001	0.140	0.104	0.936	0.765	0.883	0.529		0.013
徐州邳州XS02	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.013	

Figure 4. P-value of U-Pb age K-S test for detrital zircons from Shouxian Formation (including error, calculated using an Excel spreadsheet designed by Laser Chron Centers at the University of Arizona (<http://www.laserchron.org>))
图 4. 寿县组碎屑锆石 U-Pb 年龄 K-S 检验的 P 值(含误差, 采用亚利桑那大学 Laser Chron Centers 设计的 Excel 表格(<http://www.laserchron.org>)计算)

从表格中结果可以看出, 淮南地区内淮南八公山、唐集平阿山、滁州凤阳山、霍邱四十里长山等地区寿县组定年样品相互之间均有大于 0.5 的 P 值出现(图 4), 如凤阳山样品 JS13、八公山样品 M29 与其他各样; 徐州 - 淮北地区邳州峨山组样品 XS01 除了与唐集平阿山寿县组样品 HN13 的 P 值小于 0.5 外, 与其他淮南地区寿县组定年样品的 P 值均大于 0.5。但同时也出现有唐集平阿山寿县组样品 HN13、邳州峨山组样品 XS02 与其他样品对比后有多数 P 值小于 0.5 的结果(图 4)。



注: (a) 数据来自 Li 等人[8]、Zhao 等人[10]、李光金等人[11]; (b) 数据来自 Li 等人[8]、Sun 等人[9]; (c) 数据来自 Li 等人[20]; (d) 数据来自 Li 等人[21]。

Figure 5. Cumulative age curve of detrital zircon dating data from Shouxian Formation
图 5. 寿县组碎屑锆石定年数据年龄累计曲线图

在 K-S 表格检验的前提下, 将 12 个样品得锆石定年数据结果进行概率累积统计, 并制成年龄累计曲线图(图 5)。可以看到, 引用的 12 个样品年龄累计曲线也存在极大地相似性, 即都存在少数年龄小于 1.0 Ga 的锆石, 在 1.0~1.6 Ga 年龄之间的锆石占绝大部分并快速累积, 1.6~2.0 Ga 年龄的锆石数量开始减少, 2.0~3.0 Ga 年龄的锆石偶有几颗, 年龄大于 3.0 Ga 的锆石几乎没有。

尽管每个样品之间潜在物源 K-S 检验 P 值并不都大于 0.5, 且年龄累计曲线图并不完全重合, 但考虑到沉积岩碎屑锆石定年本身存在一定误差, 例如锆石混样、实验仪器精确度下降等非人为偏差, 因此综合可认为以上 4 个小片区均为同一沉积物源区。

5.3. 沉积物源讨论

在引用 Li 等人[8] [20] [21]、Sun 等人[9]、Zhao 等人[10]、李光金等人[11]锆石 U-Pb 部分定年数据进行同一物源区判断后, 使用 Isoplot 3.0 程序[28]绘制锆石年龄频谱图并计算峰值年龄(图 6)。

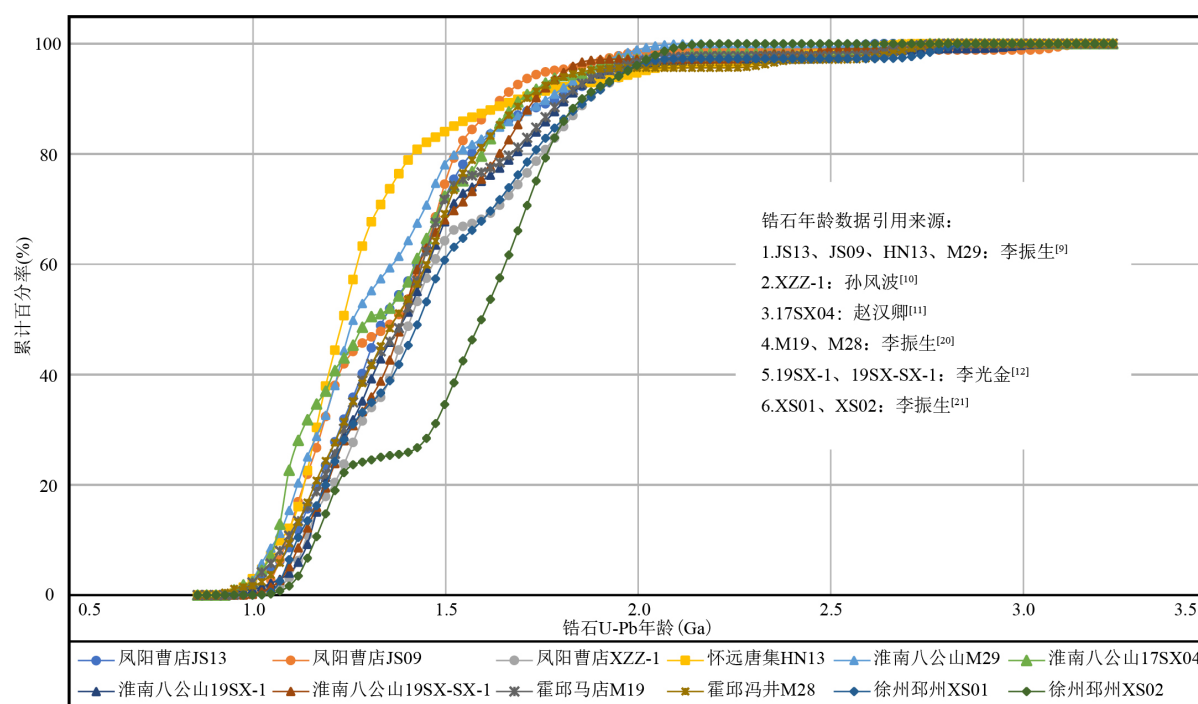


Figure 6. Regional statistical map of detrital zircon age of Shouxian formation and its corresponding strata in Xuzhou-Huainan area of eastern margin of North China Craton

图 6. 华北克拉通东缘徐州 - 淮南地区寿县组及相应层位碎屑锆石年龄区域统计图

由各个片区锆石年龄频谱图及年龄峰值可以看出华北克拉通东缘徐州 - 淮南地区锆石年龄多在 1.7~1.0 Ga 之间, 年龄小于 1.0 Ga 和大于 1.7 Ga 的锆石数量占少部分, 并且均有~1.65 Ga、~1.4 Ga、~1.2 Ga 和一个小于 1.0 Ga 的年龄峰(图 6)。年龄在 1.7 Ga 以上的锆石数量各占地区总数的 10%~15%, 由此表明年龄大于 1.8 Ga 的地体为寿县组提供了较少的主要沉积物源。根据华北克拉通早期频繁的岩浆裂谷活动并在~1.85 Ga 左右完成克拉通化这一结论[29] [30], 结合淮南以西霍邱杂岩中出现的 1.9~1.8 Ga 的变质年龄和 2.9~1.8 Ga 范围内的岩浆年龄[31]-[35]以及淮南北部蚌埠地区五河杂岩和凤阳群中记录的 2.5~1.8 Ga 范围内的变质年龄和~2.9、2.5~1.8 Ga 的岩浆年龄[36]-[41], 可认为华北克拉通变质基底可以作为淮南地区寿县组大于 1.7 Ga 碎屑锆石的沉积物源。

1.7~1.2 Ga 之间的碎屑锆石数量占总数的一半以上, 并得到~1.65 Ga、~1.4 Ga、~1.2 Ga 的峰值年龄

(图 5)。同时期华北克拉通有多期裂谷岩浆和沉积事件[42] [43], 如熊耳裂谷系和燕辽裂谷系等, 但是除朝鲜平南地区记录有 1.6~1.2 Ga 的裂谷岩浆活动[44], 其他未见有相同时期的记录, 因此 1.7~1.2 Ga 的碎屑锆石来源尚不能完全肯定来自于华北克拉通内部。

由于目前尚未出现大量 1.2~1.0 Ga 和小于 1.0 Ga 的岩浆活动记录, 但朝鲜平南盆地直岬群[45] [46]、辽南地区细河群桥头组[10] [47]、鲁西地区土门群浮莱山组[48]出现大量 1.2~1.0 Ga 碎屑锆石的记录, 一方面判断该时期物源来自华北克拉通内部, 另一方面研究者认为可能来自华北克拉通外部的物源区[9] [49] [50]。Wu 等人[51]和 Zhao 等人[10] [22]通过对华北克拉通东缘本溪 - 大连、徐州 - 淮北、淮南地区进行锆石定年和基性岩床的古地磁学研究后, 认为华北克拉通可能与劳伦古大陆相连, 中 - 新元古代碎屑锆石物源可能来自劳伦大陆格林威尔造山带或相邻的同期造山带。

结合华北克拉通东缘各地区出现的大量 1.2~1.0 Ga 的碎屑锆石以及寿县组浅海 - 临滨带的陆棚沉积环境, 认为寿县可以接受较远地区的搬运沉积物源, 存在华北克拉通外部劳伦古大陆格林威尔或其他造山带, 但同时也存在沉积物源来自华北克拉通内部的可能, 未来仍需进一步去研究。

6. 结论

1) 华北板块东南缘淮南地区凤阳山出露的寿县组粒度分析结果表明, 整体为极细砂 - 粗粉砂岩, 整体分选好, 磨圆度较好, 主要呈次圆状, 沉积环境较稳定, 水动力条件较弱, 为浅海 - 临滨带的陆棚沉积环境。

2) 结合淮南地区寿县组碎屑锆石定年结果及其周边地区对应上下层位出现的基性侵入岩相关定年情况, 本次研究认为淮南地区八公山群寿县组沉积时限为 1.0~0.95 Ga, 更小范围的沉积时限需要进一步研究探讨。

3) 淮南地区霍邱、淮南、凤阳和徐州 - 淮北等地区的 K-S 潜在物源检验表明均可能为同一物源区。根据前人定年得到的大量 1.7~1.0 Ga 年龄的碎屑锆石及整体数量分布情况, 认为淮南地区八公山群寿县组的沉积物源可能来自于华北克拉通相连的劳伦古大陆造山带, 也可能是华北克拉通内部提供的物源。

参考文献

- [1] 朱日祥, 朱光, 李建威. 华北克拉通破坏[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [2] 官玉龙, 罗顺社, 周庆安. 淮南地区淮南群沉积特征和层序地层[J]. 当代化工, 2020, 49(2): 476-479.
- [3] 杨清和, 张友礼, 郑文武, 等. 苏皖北部震旦亚界的划分与对比[M]//中国震旦亚界. 天津: 天津科学技术出版社, 1980: 231-265.
- [4] 徐嘉伟. 华北南部寒武系下限问题[J]. 地质评论, 1958, 18(1): 41-56.
- [5] 杨志坚. 淮南、霍邱早寒武世沉积若干问题的探讨[J]. 地质科学, 1960, 3(4): 182-188.
- [6] 郑文武. “淮南生物群”的主要特征及其在地层研究中的意义[J]. 合肥工业大学学报, 1979, 14(2): 97-108.
- [7] 汪贵翔, 张世恩, 李尚湘, 等. 苏皖北部上寒武系研究[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1984, 73-84.
- [8] Li, Z., Ma, X., An, W., Mitchell, R.N., Li, Q., Lan, Z., et al. (2023) Provenance Transition of the Mesoproterozoic-Neoproterozoic Xuhuai Basin: Constraining the Accretion of the Northern Qinling Terrane with the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, **251**, Article ID: 105675. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2023.105675>
- [9] Sun, F., Peng, P., Zhou, X., Magalhães, A.J.C., Guadagnin, F., Zhou, X., et al. (2020) Provenance Analysis of the Late Mesoproterozoic to Neoproterozoic Xuhuai Basin in the Southeast North China Craton: Implications for Paleogeographic Reconstruction. *Precambrian Research*, **337**, Article ID: 105554. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105554>
- [10] Zhao, H., Zhang, S., Ding, J., Chang, L., Ren, Q., Li, H., et al. (2019) New Geochronologic and Paleomagnetic Results from Early Neoproterozoic Mafic Sills and Late Mesoproterozoic to Early Neoproterozoic Successions in the Eastern North China Craton, and Implications for the Reconstruction of Rodinia. *GSA Bulletin*, **132**, 739-766. <https://doi.org/10.1130/b35198.1>
- [11] 李光金, 王霄鹏, 孙云鹏, 等. 淮南地区中-新元古界 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 地层学杂

- 志, 2021, 45(2): 115-141.
- [12] 安徽省地质矿产局. 安徽省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [13] 安徽省地质矿产局. 安徽省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
- [14] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- [15] 李敏, 李双应, 李振生, 等. 合肥盆地下白垩统朱巷组沉积相与油气勘探前景[J]. 天然气地质学, 2018, 29(11): 1608-1618.
- [16] 左鹏飞, 李雨, 郑德顺, 等. 豫西澠池地区中元古界兵马沟组沉积环境分析[J]. 地质科技情报, 2019, 38(3): 70-80.
- [17] Siirio, P., Räsänen, M.E., Gingras, M.K., *et al.* (2005) Application of Laser Diffraction Grain Size Analysis to Reveal Depositional Processes in Tidally Influenced Systems. *Special Publications of the International Association of Sedimentologists*, **35**, 159-180.
- [18] Basanta K. Sahu, (1964) Depositional Mechanisms from the Size Analysis of Clastic Sediments. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, **34**, 73-83. <https://doi.org/10.1306/74d70fce-2b21-11d7-8648000102c1865d>
- [19] 庞科, 唐卿, 万斌, 等. 华北地台胶辽徐淮地区中-新元古代地层研究进展[J]. 地层学杂志, 2021, 45(4): 467-492.
- [20] Li, Z., Ma, X., Li, S., An, W., Li, Q., Dong, Y., *et al.* (2023) Mesoproterozoic-Neoproterozoic Chronostratigraphic Framework and Provenance Analysis in the Southeastern North China Craton and Its Tectonic Significance. *Geological Journal*, **58**, 3096-3120. <https://doi.org/10.1002/gj.4754>
- [21] Li, Z., Dong, Y., An, W., Mitchell, R.N., Lan, Z., Wang, D., *et al.* (2024) The Late Stenian and Late Tonian Provenance Transitions in the Northern Xuhuai Basin: Implications for the Precambrian Evolution of the Southeastern North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, **264**, Article ID: 106070. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2024.106070>
- [22] Zhao, H., Zhang, S., Ren, W., Ding, J., Yang, K., Li, H., *et al.* (2022) New Paleomagnetic Results from the Ca. 1.0 Ga Jiayuan Formation of the Huaibei Group in the North China Craton, and Their Paleogeographic Implications. *Precambrian Research*, **379**, Article ID: 106807. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2022.106807>
- [23] 郭佩, 刘池洋, 王建强, 等. 碎屑锆石年代学在沉积物源研究中的应用及存在问题[J]. 沉积学报, 2017, 35(1): 46-56.
- [24] Henrique-Pinto, R., Guilmette, C., Bilodeau, C. and McNicoll, V. (2017) Evidence for Transition from a Continental Forearc to a Collisional Pro-Foreland Basin in the Eastern Trans-Hudson Orogen: Detrital Zircon Provenance Analysis in the Labrador Trough, Canada. *Precambrian Research*, **296**, 181-194. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.04.035>
- [25] Fedo, C.M. (2003) Detrital Zircon Analysis of the Sedimentary Record. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **53**, 277-303. <https://doi.org/10.2113/0530277>
- [26] 李振生, 贾超, 赵卓娅, 等. 华北克拉通南缘栾川群的形成时代、物源及其对区域构造演化的意义: 锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素制约[J]. 地质学报, 2020, 94(4): 1046-1066.
- [27] George, G. (2012) Detrital Zircon U-Pb Geochronology: Current Methods and New Opportunities. In: Busby, C.J. and Ingersoll, R.V., Eds., *Tectonics of Sedimentary Basins*, John Wiley & Sons, 45-62.
- [28] Ludwig, K.R. (2003) User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, 1-70.
- [29] Zhao, G. and Zhai, M. (2013) Lithotectonic Elements of Precambrian Basement in the North China Craton: Review and Tectonic Implications. *Gondwana Research*, **23**, 1207-1240. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.08.016>
- [30] Li, Y., Zhu, G., Gu, C., Su, N., Xiao, S., Zhang, S., *et al.* (2018) Structural Evolution of the Paleoproterozoic Trans-North China Orogen: Evidence from the Xiaoqinling Region, Central China. *Precambrian Research*, **316**, 244-274. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.08.020>
- [31] Wan, Y., Dong, C., Wang, W., Xie, H. and Liu, D. (2010) Archean Basement and a Paleoproterozoic Collision Orogen in the Huoqiu Area at the Southeastern Margin of North China Craton: Evidence from Sensitive High Resolution Ion Micro-Probe U-Pb Zircon Geochronology. *Acta Geologica Sinica—English Edition*, **84**, 91-104. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2010.00173.x>
- [32] 杨晓勇, 王波华, 杜贞保, 等. 论华北克拉通南缘霍邱群变质作用、形成时代及霍邱 BIF 铁矿成矿机制[J]. 岩石学报, 2012, 28(11): 3476-3496.
- [33] Wang, Q., Zheng, J., Pan, Y., Dong, Y., Liao, F., Zhang, Y., *et al.* (2014) Archean Crustal Evolution in the Southeastern North China Craton: New Data from the Huoqiu Complex. *Precambrian Research*, **255**, 294-315. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.10.005>
- [34] Liu, L., Yang, X., Santosh, M. and Aulbach, S. (2015) Neoproterozoic to Paleoproterozoic Continental Growth in the Southeastern Margin of the North China Craton: Geochemical, Zircon U-Pb and Hf Isotope Evidence from the Huoqiu Complex. *Gondwana Research*, **28**, 1002-1018. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.08.011>
- [35] 聂峰, 张忠宝, 石永红, 等. 郯庐断裂(安徽段)两侧肥东群与霍邱群特征性岩石对比研究[J]. 岩石学报, 2016,

- 32(4): 1087-1100.
- [36] 许文良, 杨德彬, 裴福萍, 等. 蚌埠隆起区五河群的形成时代: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年证据[J]. 中国地质, 2006, 33(1): 132-137.
- [37] 杨德彬, 许文良, 裴福萍, 等. 蚌埠隆起区古元古代钾长花岗岩的成因: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素的制约[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2009, 34(1): 148-164.
- [38] 郭素淑, 李曙光. 华北克拉通东南缘古元古代变质和岩浆事件的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39(6): 694-699.
- [39] Liu, Y.C., Wang, A.D., Rolfo, F., Groppo, C., Gu, X.F. and Song, B. (2009) Geochronological and Petrological Constraints on Palaeoproterozoic Granulite Facies Metamorphism in Southeastern Margin of the North China Craton. *Journal of Metamorphic Geology*, **27**, 125-138. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2008.00810.x>
- [40] 聂峰, 石永红, 张忠宝, 等. 安徽北部郯庐断裂两侧基底岩石年龄及对郯庐断裂初始开启时间的限定[J]. 科学通报, 2015, 60(24): 2315-2326.
- [41] Liu, C., Zhao, G., Liu, F. and Cai, J. (2018) The Southwestern Extension of the Jiao-Liao-Ji Belt in the North China Craton: Geochronological and Geochemical Evidence from the Wuhe Group in the Bengbu Area. *Lithos*, **304**, 258-279. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.01.021>
- [42] 旷红伟, 柳永清, 耿元生, 等. 中国中-新元古代地层研究进展及建议划分、对比方案[J]. 地质学报, 2023, 97(12): 3861-3901.
- [43] 赵太平, 翟明国, 夏斌, 等. 熊耳群火山岩锆石 SHRIMP 年代学研究: 对华北克拉通盖层发育初始时间的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(22): 2342-2349.
- [44] 朴贤旭, 翟明国, 杨正赫, 等. 朝鲜半岛平南盆地中元古代岩浆事件[J]. 岩石学报, 2016b, 32(10): 3033-3044.
- [45] 杨正赫, 彭澎, 郑哲寿, 等. 朝鲜平南盆地古元古界-下古生界沉积岩碎屑锆石年龄谱对比及意义[J]. 岩石学报, 2016, 32(10): 3155-3179.
- [46] 朴贤旭, 翟明国, 杨正赫, 等. 朝鲜平南盆地祥原超群的沉积时代与拉伸纪早期碳同位素负漂移[J]. 岩石学报, 2016, 32(7): 2181-2195.
- [47] 吴昊. 辽宁本溪新元古界上部沉积学特征及构造属性[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 2018.
- [48] 陆松年, 相振群, 李怀坤, 等. 华北克拉通对罗迪尼亚超大陆事件的响应——GOSEN 连接假设[J]. 地质学报, 2012, 86(9): 1396-1406.
- [49] Sun, F., Peng, P., Zheng, D. and Zuo, P. (2022) Reappraising the Provenance of Early Neoproterozoic Strata in the Southern-Southeastern North China Craton and Its Implication for Paleogeographic Reconstruction. *Minerals*, **12**, Article 510. <https://doi.org/10.3390/min12050510>
- [50] 彭澎, 胡波, 张志越, 等. 朝鲜半岛平南盆地地质演化综述[J]. 岩石学报, 2021, 37(1): 129-142.
- [51] Wu, Z., Lu, C., Qiu, L., Zhao, H., Wang, H., Tan, W., *et al.* (2022) New Detrital Zircon Geochronological Results from the Meso-Neoproterozoic Sandstones in the Southern-Eastern Liaoning Region, North China Craton, and Their Paleogeographic Implications. *Precambrian Research*, **381**, Article ID: 106847. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2022.106847>