

山东长岛地区蓬莱群辅子乔组碎屑锆石年龄谱研究*

初航 陆松年 王惠初 相振群 刘欢

CHU Hang, LU SongNian, WANG HuiChu, XIANG ZhenQun and LIU Huan

天津地质矿产研究所, 天津 300170

Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China

2010-10-11 收稿, 2011-01-06 改回.

Chu H, Lu SN, Wang HC, Xiang ZQ and Liu H. 2011. U-Pb age spectrum of detrital zircons from the Fuzikuang Formation, Penglai Group in Changdao, Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4):1017–1028

Abstract The low-grade metasedimentary rocks of the Fuzikuang Formation, Penglai Group in Changdao, Yantai, Shandong Province are mainly composed of metamorphic quartz sandstones, with metamorphic siltstone and mud rock intercalations. The depositional age of the Penglai Group has long been debated. Based on the U-Pb age spectrum of detrital zircons, the authors conjecture that the age of the Fuzikuang Formation, Penglai Group in Changdao is Neoproterozoic. There are two age peaks, ~1600Ma and 1200~1100Ma, in the age spectrum of the detrital zircons. The younger age peak shows that the Fuzikuang Formation was sourced from a provenance with typical Greenville-period tectono-thermal events, which is different both from the North China and Yangtze blocks in geological evolution characteristics. Hence further work is needed to decipher the special source region.

Key words Fuzikuang Formation of the Penglai Group; Age spectrum of detrital zircons; Stratigraphic age; Sedimentary provenance

摘要 山东烟台长岛地区出露的蓬莱群辅子乔组浅变质沉积岩主要为变质石英砂岩夹变质粉砂岩和变质粘土岩。前人对蓬莱群的沉积时代存在较大争议, 本文根据长岛地区蓬莱群辅子乔组碎屑锆石年龄谱资料, 将辅子乔组的地层时代置于新元古代。碎屑锆石中出现 1600Ma 和 1200~1100Ma 左右两个年龄峰值, 后者表明辅子乔组曾接受来自具有格林威尔期构造热事件物源区的碎屑物质。这一物源区所反映的地质演化特点既不同于华北陆块, 也不同于扬子陆块, 应引起高度重视和进行深入的探索。

关键词 蓬莱群辅子乔组; 碎屑锆石年龄谱; 地层时代; 物源区

中图法分类号 P597.3

蓬莱群分布在郯庐断裂以东的鲁东胶北隆起区, 为一套浅变质沉积岩, 角度不整合在新太古代胶东群、古元古代粉子山群上。蓬莱群为华北陆块盖层的重要组成部分, 以顶、底界线清楚、产状稳定为特点, 关于蓬莱群的沉积时代曾存在较大争议。邓幼华等(1984)在蓬莱群中发现了具有洲际地层对比意义的巴甫林藻微体古生物化石, 认为其成岩时代为震旦纪。朱光等(1994)获得蓬莱群 Rb-Sr 全岩年龄 500Ma 和 473 ± 32 Ma, 并把该年龄解释为蓬莱群遭受埋藏变质的终止时间, 认为蓬莱群沉积成岩时代应早于该年龄

值, 并支持邓幼华等(1984)提出胶北福山地区蓬莱群属震旦纪地层的观点。张文起(1995)对栖霞地区蓬莱群进行全岩 Pb-Pb 法同位素测年, 获得 1165.85Ma 年龄。牛保祥等(1996)综合前人(邓幼华等, 1984; 杨志坚, 1990; 汤立成, 1990; 王沛成, 1992; 朱光等, 1994)在古生物及 Rb-Sr 全岩等时线测年等方面的认识, 并对蓬莱群古生物再次研究, 认为蓬莱群中产有我国苏皖北部、辽南地区震旦系常见的微古植物组合, 是蓬莱群时代属震旦纪的直接证据。然而, 山东地矿局区调队(1991)在开展 1:20 万《蓬莱、烟台市幅》区调工

* 本文受国家青年自然科学基金项目(40902021)、国家自然科学基金面上项目(40772120)和国土资源大调查项目(1212010911005)联合资助。

第一作者简介: 初航, 男, 1982 年生, 助理研究员, 从事前寒武纪地质学和变质地质学研究, E-mail: chuhangli@sina.com

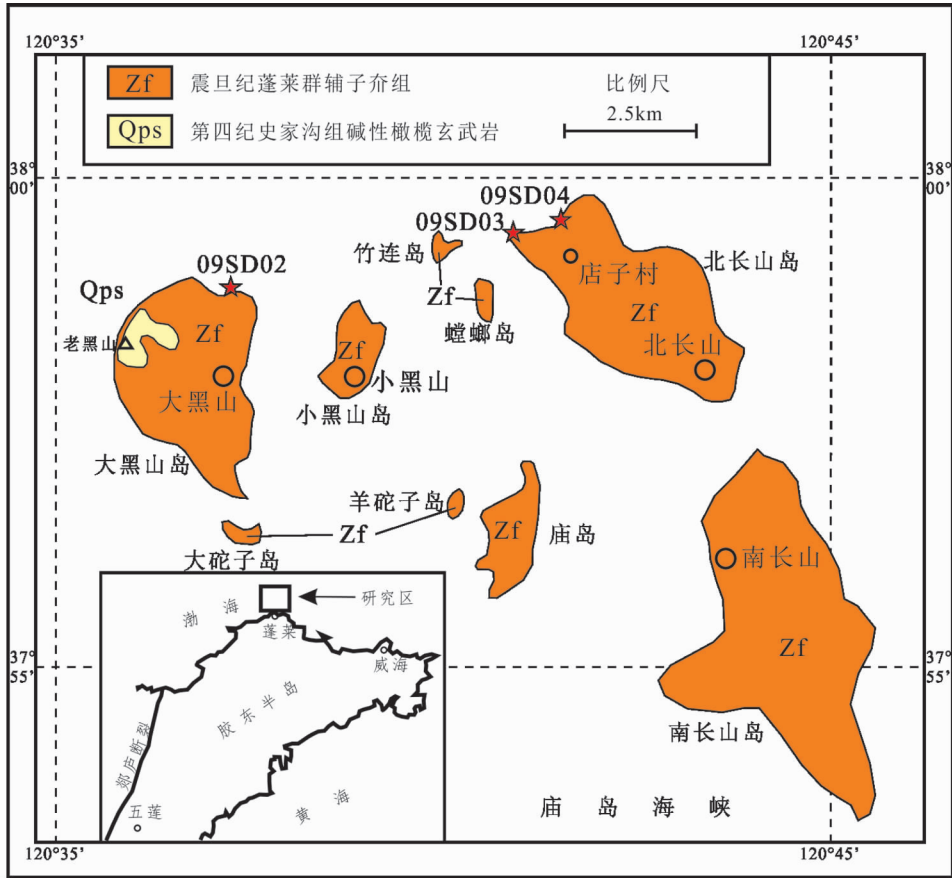


图1 研究区地质简图及采样点位置(据山东省地质调查院,2003 修改)

Fig.1 Geological sketch map of the studied area and the sample localities

作时,获得南庄组 Rb-Sr 全岩等时线年龄 $417 \pm 41\text{Ma}$, 认为蓬莱群形成于古生代。纪壮义和赵环金(1992)也以实体动物化石为基础结合同位素年龄资料,认为蓬莱群形成于早古生代。乔秀夫等(1996)利用地层对比方法,综合事件地层(地震活跃期的观点)、层序地层、年代地层及生物地层等资料,将蓬莱群与辽东半岛南部、淮南、苏北地区及鲁西浮莱山一带的震旦纪早期地层对比,各地在生物特征、地震事件、层序地层等方面具很大的相似性。山东省地质调查院(2003^①)综合区域变质、变形、生物特征等方面证据,认为蓬莱群沉积成岩时代主要为新元古代震旦纪。总之,蓬莱群形成时代归属之所以产生如此显著分歧,一是依据的证据有所差异,二是存在异物同名问题。

对于蓬莱群而言,除了其形成时代存在有前述各种分歧之外,蓬莱群沉积物源区研究目前也存在较大分歧。Li *et al.* (2007)对栖霞地区蓬莱群的碎屑锆石研究认为蓬莱群碎屑锆石具有 1700 ~ 1600Ma 及 1200Ma 两个年龄峰,所获得的碎屑锆石年龄在南部扬子板块有一定的出露,他认为蓬莱群沉积岩的源区不是华北克拉通,而是南部扬子板块,其缺失 1000 ~ 800Ma 碎屑锆石恰好说明了蓬莱群在此时沉积。另外,Zhou *et al.* (2008a)认为胶北蓬莱群碎屑锆石年龄范围从 2900Ma 到 1800Ma,年龄分为三组: > 2500Ma、2450 ~

2100Ma、2000 ~ 1800Ma,其碎屑锆石的物源区主要来自于下覆的古元古代荆山群和粉子山群,是胶-辽-吉带的一部分。因此,蓬莱群碎屑锆石物源区分析对揭示蓬莱群形成时构造演化具有重要意义(Zhou *et al.*, 2008b; Zhou *et al.*, 2008c; Faure *et al.*, 2001, 2003)。

1 地质背景

蓬莱群分布在蓬莱丹崖山及庙岛群岛以及蓬莱以南栖霞以东的部分地区,蓬莱丹崖山及庙岛群岛是蓬莱群命名地点,主要是一套浅变质石英砂岩,而建群分组标准剖面是在栖霞地区,分为豹山口组、辅子乔组、南庄组和香乔组。本群主要岩性为千枚岩、板岩、石英岩、大理岩、泥灰岩及结晶灰岩等。角度不整合于早前寒武纪基底之上,上为中生界及第四系覆盖。岩石可见到粒级层、波痕、斜层理,板岩中的微层理等变余原生构造。

研究区位于胶东半岛北部长山列岛(图1),主要由南长

① 山东省地质调查院. 2003. 中华人民共和国区域地质调查报告烟台市幅(1:25万),内部资料:13-51

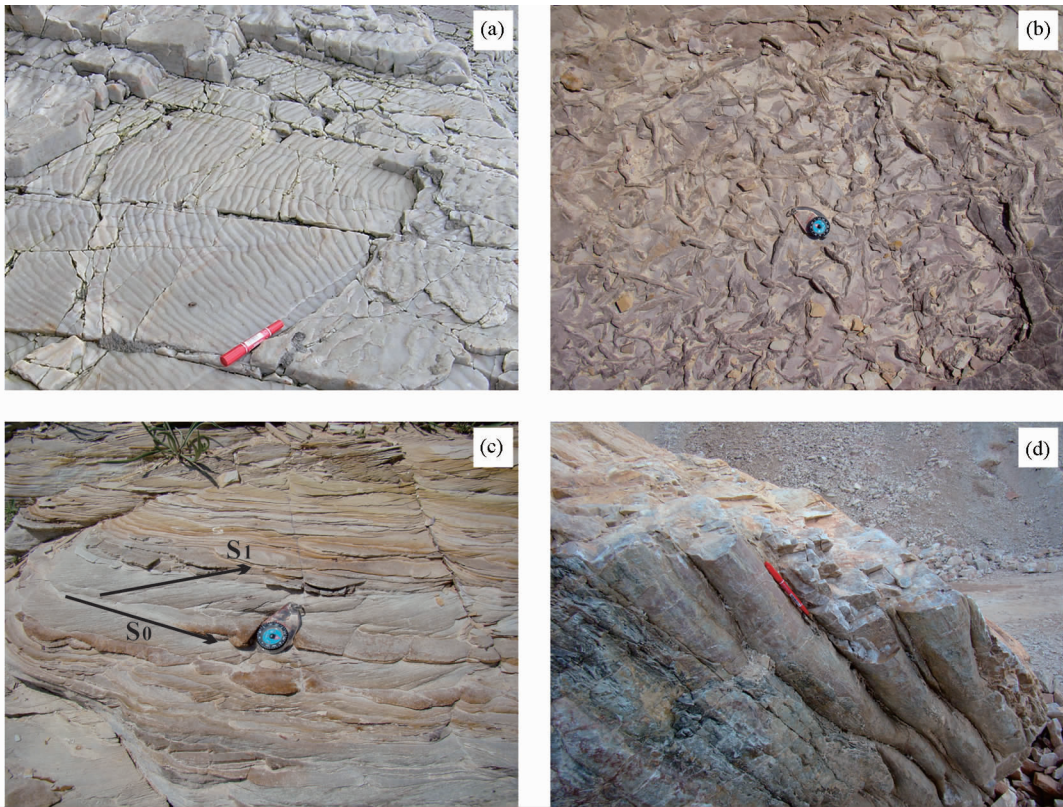


图2 野外照片

(a)-波痕印模;(b)-泥裂印模;(c)-层片交切关系;(d)-窗棂构造

Fig.2 Outcrop Photos

(a)-Ripple impression; (b)-Mud crack impression; (c)-Crosscutting relationship between bedding and schistosity; (d)-Mullion structure

山岛、北长山岛和大黑山岛等岛屿组成,南长山岛相距蓬莱不足10千米。岛上出露岩石主要为蓬莱群辅子乔组变质石英砂岩夹少量变质粉砂岩和变质泥质岩,在大黑山岛的老黑山顶有第四纪碱性橄榄玄武岩覆盖其上。变质石英砂岩为巨厚层状,黄褐色,显微观察分析表明该岩石为中细粒等粒状变晶结构,变余砂状结构。主要矿物成分为石英,含少量雏晶黑云母、绢云母、斜长石及尘状铁质物。变质石英砂岩中发育粒序层理、斜层理等原生沉积构造,原岩为一套滨海浅海相成熟度较高的石英砂岩夹少量粘土岩沉积。

本次研究作者等主要考察了大黑山岛和北长山岛。大黑山岛东北部为一陡崖,已开发为旅游景区。蓬莱群浅变质石英砂岩出露良好,产状近水平,其中的变质粉砂质岩石夹层因相对不抗风化,经海蚀风化后形成一条凹入的天然栈道。在栈道入口处附近,变质石英砂岩中可见波痕构造印模(图2a),变质粉砂质泥质岩夹层中则可见泥裂印模(图2b),沉积示顶构造均指示地层为倒转层序。在变质粉砂岩夹层(粉砂质板岩)中可见层片交切关系(图2c),即岩石中发育一组与层理斜交的轴面劈理,层理产状为 $15^{\circ} \angle 5^{\circ}$,劈理产状为 $300^{\circ} \angle 16^{\circ}$ 。轴面劈理代表大型褶皱的轴面产状,与层理交角愈大愈接近褶皱转折端。因此附近露头应处于一个大型近平卧褶皱的倒转翼翼部与转折端的过渡部位,

褶皱转折端位于东侧,褶皱枢纽向北缓倾。

北长山岛的西北部为长岛地质公园的主景区(九丈崖景区),也是一海蚀崖,地势陡峭,露头极好,出露岩石主要为浅变质石英砂岩夹少量变质粉砂岩。岩层产状近水平(地层产状 $355^{\circ} \angle 3 \sim 10^{\circ}$),砂岩中未见层片交切关系,但普遍见有发育良好的交错层理和波痕构造,并指示倒转层序,表明九丈崖附近为一大型平卧褶皱的倒转翼。在北长山岛的东部海边,可以见到该大型褶皱的转折端向东翘起,层理包络面产状为 $85^{\circ} \angle 52^{\circ}$,轴面劈理产状为 $275^{\circ} \angle 28^{\circ}$,枢纽产状为 $2^{\circ} \angle 10^{\circ}$,在层理包络面上可见良好的窗棂构造(图2d)。

野外观察表明,虽然表面上部分区域沉积构造保存完整,大部分地层产状水平,但是长山岛地区的蓬莱群地层并非想象的那样简单,而是受过强烈构造运动影响,发生了翻天覆地的变化。

2 样品岩石学特征

样品09SD02(变质中-细粒石英砂岩夹变质粘土岩)采自大黑山岛北部($N37^{\circ}58'52.21''$; $E120^{\circ}37'14.92''$),岩石层理近水平,从野外露头的泥裂印模及层片交切关系判断,附

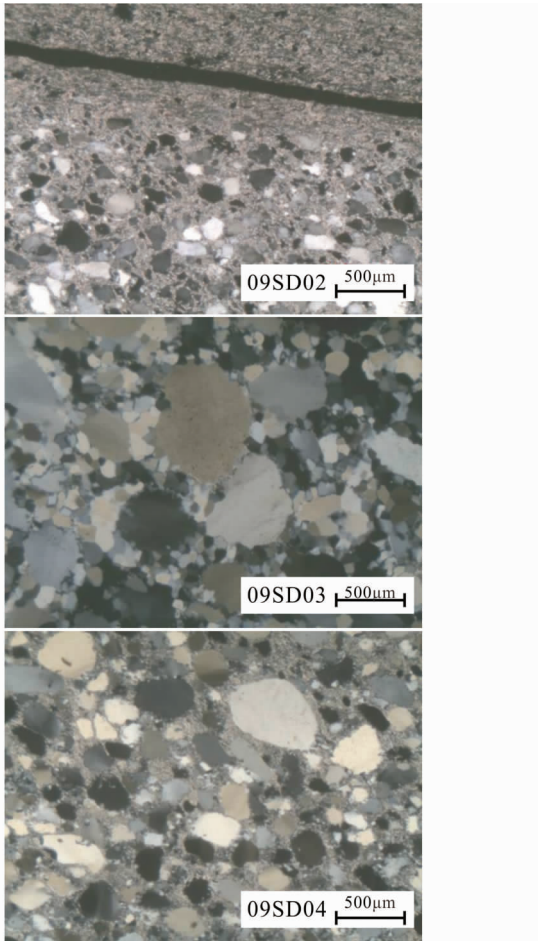


图3 样品显微照片

Fig. 3 Photomicrographs of analyzed samples

近为接近大型平卧褶皱转折端的倒转翼。主要由石英组成, 杂基支撑, 石英碎屑常呈次圆状, 次棱角状次之, 波状消光, 粒径以 0.25~0.07mm 为主。填隙物由粘土质组成, 已变为微鳞片状绢云母, 绢云母有时相对集中呈条纹状、薄层状分布(图3)。

样品 09SD03(变质中粗粒石英砂岩)采自北长山岛北部九丈崖(N37°59'24.72";E120°40'54.43"), 层理近水平, 此处地层保留了波痕构造印模和交错层理, 指示附近地层也为倒转层序。岩石中石英颗粒常呈次圆状, 圆状次之, 具有波状消光特征; 由于重结晶作用石英颗粒边缘略显凹凸状, 粒径大小以 0.5~1.2mm 为主。填隙物由硅质、少量铁质和粘土质组成, 硅质已重结晶为微细粒镶嵌状石英, 大小 0.06~0.18mm, 粘土质变为微鳞片状绢云母, 围绕砂粒边缘分布(图3)。

样品 09SD04(变质细粒石英砂岩)采自北长山岛北部月牙湾(N37°59'32.96";E120°41'30.49"), 具变余细粒砂状结构。岩石主要由石英碎屑组成, 杂基支撑, 石英常呈次圆状, 次棱角状次之, 大小为 0.25~0.07mm, 具波状消光。填隙物由粘土质杂基、铁质、硅质胶结物组成, 粘土质已变

为微鳞片状绢云母, 硅质重结晶成为少数石英砂粒的自生加大边(图3)。

3 分析测试及数据

3.1 测试方法及实验条件

通过人工重砂法从新鲜的样品中分选出锆石, 然后在双目显微镜下挑选出裂缝和包裹体相对较少、透明干净的锆石颗粒, 制作锆石环氧树脂样品靶, 经过打磨、抛光, 然后进行反射光和透射光照相, 并进行 CL 图像分析, 以根据锆石透、反射图像和 CL 图像所揭示的锆石晶体裂隙和内部包裹体发育情况以及内部结构特征, 选择合适的激光剥蚀点位进行 U-Pb 同位素分析。用激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)进行锆石微区原位 U-Pb 同位素测定(李怀坤等, 2009, 2010)。在测试过程中尽量避开裂纹和包裹体以免对测试结果造成影响。之后采用 TEMORA 作为外部锆石年龄标准进行 U、Pb 同位素分馏校正(Black *et al.*, 2003; Jackson *et al.*, 2004)。采用中国地质大学刘勇胜博士研发的 ICPMSDataCal 程序(Liu *et al.*, 2009)和 Ludwig 的 Isoplot 程序(Ludwig, 2003)进行数据处理, 采用²⁰⁸Pb 校正法对普通铅进行校正(Anderson, 2002)。利用 NIST612 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。

锆石分选工作在河北省廊坊区域地质调查所实验室完成; 测年样品靶在天津地质矿产研究所同位素实验室制备; 阴极荧光(CL)图像照相在北京离子探针中心完成; 激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱(LA-MC-ICPMS)的测试在天津地质矿产研究所同位素实验室测试完成。LA-MC-ICPMS 年龄测定实验条件和关键参数为: 激光波长 193nm, 斑束直径为 35µm, 激光能量密度为 10J/cm², 频率为 8Hz, 冷却气体 16L/min, 辅助气体 0.75L/min, Ar 载气 0.968L/min, He 载气 0.86L/min, RF 功率 1251W, 积分时间 0.131s, 样品信号采集时间 60s(其中 20 秒为空白的测定)。

3.2 锆石特征及测试结果

三个样品所分选出的碎屑锆石为浅棕色, 浑圆状, 具有明显的碎屑锆石特征, 反映了锆石经历了较远的搬运作用。在 CL 图像中(图4), 三个样品中锆石大部分为具有振荡环带的岩浆锆石, 而后经过搬运磨圆的产物, 少数几颗锆石具有核-边结构, 为变质锆石结构特点。实验中变质锆石以“.1”(核部)和“.2”(边部)标注, 由于其代表了两期事件, 故作为两个年龄数据参与统计。例如 09SD04 锆石的 2.1 和 2.2 区域。

利用 LA-MC-ICPMS 分别对 3 个样品进行锆石原位微区 U-Pb 同位素测试, 共测试 194 点, 其中有效数据 190 点(去除实验信号不稳定的 4 个点), 数据见表 1。

09SD02 有效数据 70 个点(图 5a), 除去谐和度不理想(谐和度大于 110 或小于 90)的 20 个点, 参与碎屑锆石年龄

表 1 蓬莱群碎屑锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 同位素分析结果

Table 1 LA-MC-ICPMS U-Pb isotopic data of detrital zircons from the Penglai Group

测点号	Pb ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		误差 相关	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		谐 和 度
				比值	err (%)	比值	err (%)	比值	err (%)		Age (Ma)	1 σ	Age (Ma)	1 σ	Age (Ma)	1 σ	
				09SD02.1	22	92	0.3312	0.2360	0.89		2.691	3.24	0.0826	3.14	0.251	1366	
09SD02.2	11	46	0.7216	0.2239	0.94	2.541	3.61	0.0823	3.54	0.199	1302	12	1284	46	1254	69	104
09SD02.3	20	97	0.4398	0.2016	0.86	2.125	3.24	0.0764	3.17	0.221	1184	10	1157	38	1106	63	107
09SD02.4	31	93	0.5543	0.3093	0.84	4.226	3.14	0.0991	3.08	0.202	1737	15	1679	53	1606	57	108
09SD02.5	14	47	0.5860	0.2813	1.05	3.878	3.33	0.0999	3.21	0.276	1598	17	1609	54	1622	60	98
09SD02.6	12	53	0.4659	0.2046	0.84	2.242	3.44	0.0794	3.36	0.215	1200	10	1194	41	1181	66	102
09SD02.7	7	32	0.5232	0.1920	0.86	2.097	3.95	0.0791	3.90	0.161	1132	10	1148	45	1176	77	96
09SD02.8	24	62	0.7863	0.3255	0.87	5.054	3.15	0.1125	3.08	0.223	1817	16	1828	58	1840	56	99
09SD02.9	43	121	0.6883	0.3163	0.80	4.940	3.11	0.1132	3.06	0.197	1772	14	1809	56	1851	55	96
09SD02.10	55	171	0.4867	0.2952	0.85	4.237	3.13	0.1040	3.05	0.220	1668	14	1681	53	1697	56	98
09SD02.11	11	44	0.4358	0.2269	0.81	2.793	3.38	0.0893	3.33	0.184	1318	11	1354	46	1410	64	94
09SD02.12	8	38	0.5898	0.1904	0.84	2.076	3.78	0.0790	3.70	0.205	1123	9	1141	43	1172	73	96
09SD02.13	12	41	0.4768	0.2578	0.92	3.553	3.33	0.0999	3.22	0.253	1479	14	1539	51	1621	60	91
09SD02.14	66	152	0.2628	0.4130	0.81	8.290	3.11	0.1455	3.05	0.206	2229	18	2263	70	2294	52	97
09SD02.15	55	185	0.4034	0.2751	0.80	3.730	3.13	0.0983	3.06	0.211	1567	13	1578	49	1591	57	98
09SD02.16	12	39	0.5180	0.2750	0.89	3.587	3.30	0.0946	3.23	0.208	1566	14	1547	51	1520	61	103
09SD02.17	16	45	0.5230	0.3240	0.86	5.416	3.18	0.1212	3.11	0.222	1809	16	1887	60	1973	55	92
09SD02.18	22	76	0.4652	0.2724	0.83	3.822	3.15	0.1017	3.09	0.200	1553	13	1597	50	1655	57	94
09SD02.19	36	135	0.1631	0.2724	0.79	3.958	3.12	0.1053	3.07	0.192	1553	12	1626	51	1719	56	90
09SD02.20	28	99	0.3169	0.2682	0.86	3.796	3.15	0.1026	3.08	0.224	1532	13	1592	50	1671	57	92
09SD02.21	22	81	0.6301	0.2430	0.81	3.302	3.18	0.0985	3.12	0.203	1402	11	1481	47	1595	58	88
09SD02.22	21	83	0.0628	0.2651	0.89	3.696	3.19	0.1010	3.10	0.233	1516	13	1570	50	1643	58	92
09SD02.23	41	128	0.3320	0.3038	0.81	4.837	3.12	0.1154	3.06	0.198	1710	14	1791	56	1886	55	91
09SD02.24	25	89	0.6066	0.2544	0.83	3.464	3.15	0.0987	3.09	0.203	1461	12	1519	48	1600	58	91
09SD02.25	12	45	0.4958	0.2589	0.87	3.568	3.30	0.0999	3.22	0.223	1484	13	1542	51	1622	60	92
09SD02.26	34	193	0.3591	0.1727	0.84	1.851	3.14	0.0777	3.08	0.208	1027	9	1064	33	1139	61	90
09SD02.27	38	107	0.5457	0.3212	0.82	5.242	3.12	0.1183	3.06	0.211	1795	15	1859	58	1931	55	93
09SD02.28	67	351	0.0282	0.2031	0.79	2.273	3.11	0.0812	3.06	0.193	1192	9	1204	37	1225	60	97
09SD02.29	47	203	1.0687	0.1883	0.83	2.078	3.16	0.0800	3.09	0.218	1112	9	1142	36	1198	61	93
09SD02.30	11	43	0.5900	0.2371	0.83	2.970	3.36	0.0908	3.30	0.203	1371	11	1400	47	1442	63	95
09SD02.31	20	72	0.5103	0.2535	0.85	3.414	3.21	0.0976	3.13	0.225	1457	12	1508	48	1579	58	92
09SD02.32	43	127	0.5860	0.3038	0.84	4.653	3.13	0.1111	3.07	0.211	1710	14	1759	55	1817	56	94
09SD02.33	21	72	0.5110	0.2655	0.84	3.577	3.17	0.0977	3.10	0.220	1518	13	1544	49	1580	58	96
09SD02.34	9	48	0.6425	0.1799	0.83	1.961	3.67	0.0790	3.59	0.209	1066	9	1102	40	1173	71	91
09SD02.35	41	207	0.5687	0.1835	0.80	2.040	3.12	0.0806	3.07	0.199	1086	9	1129	35	1213	60	90
09SD02.36	36	145	0.4054	0.2307	0.80	3.055	3.13	0.0961	3.07	0.202	1338	11	1422	44	1549	58	86
09SD02.37	32	169	0.8047	0.1654	0.81	1.804	3.15	0.0791	3.10	0.199	987	8	1047	33	1176	61	84
09SD02.38	22	72	0.5477	0.2701	0.82	3.945	3.17	0.1060	3.11	0.201	1541	13	1623	51	1732	57	89
09SD02.39	35	122	0.7909	0.2468	0.82	3.347	3.14	0.0984	3.07	0.212	1422	12	1492	47	1594	57	89
09SD02.41	6	40	0.8101	0.1404	0.84	1.561	4.26	0.0806	4.21	0.161	847	7	955	41	1213	83	70
09SD02.42	48	200	0.3906	0.2307	0.80	3.233	3.11	0.1017	3.06	0.199	1338	11	1465	46	1655	57	81
09SD02.43	19	72	0.6699	0.2317	0.79	3.227	3.18	0.1010	3.12	0.200	1343	11	1464	47	1643	58	82
09SD02.44	13	49	0.3495	0.2558	0.82	3.796	3.20	0.1077	3.15	0.194	1468	12	1592	51	1761	58	83
09SD02.45	37	160	0.3312	0.2243	0.81	3.104	3.13	0.1004	3.07	0.207	1305	11	1434	45	1631	57	80
09SD02.46	9	50	1.3747	0.1501	0.60	1.717	3.06	0.0830	3.00	0.186	901	5	1015	31	1268	59	71
09SD02.47	9	37	0.6182	0.2232	0.82	3.046	3.42	0.0990	3.38	0.174	1299	11	1419	49	1606	63	81
09SD02.48	22	97	0.4576	0.2116	0.87	2.715	3.19	0.0931	3.11	0.230	1237	11	1332	42	1489	59	83
09SD02.49	122	904	0.8796	0.1244	0.80	1.841	3.11	0.1074	3.05	0.202	756	6	1060	33	1755	56	43
09SD02.50	14	56	0.5525	0.2253	0.82	2.876	3.32	0.0926	3.25	0.209	1310	11	1376	46	1479	62	89

续表 1

Continued Table 1

测点号	Pb ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		误差 相关	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		谐 和 度
				比值	err (%)	比值	err (%)	比值	err (%)		Age (Ma)	1 σ	Age (Ma)	1 σ	Age (Ma)	1 σ	
09SD02.51	8	27	1.1534	0.2231	0.89	3.207	3.66	0.1042	3.57	0.219	1298	12	1459	53	1700	66	76
09SD02.52	12	51	0.2419	0.2288	0.84	2.953	3.36	0.0936	3.28	0.220	1328	11	1396	47	1500	62	89
09SD02.53	42	151	0.3266	0.2691	0.79	3.863	3.12	0.1041	3.06	0.198	1536	12	1606	50	1699	56	90
09SD02.54	10	33	1.0097	0.2599	0.83	3.664	3.40	0.1022	3.33	0.198	1489	12	1564	53	1665	62	89
09SD02.55	25	86	0.4927	0.2656	0.90	3.602	3.19	0.0983	3.09	0.244	1518	14	1550	49	1592	58	95
09SD02.56	9	44	0.4016	0.1948	0.82	2.093	3.57	0.0780	3.53	0.159	1147	9	1147	41	1147	70	100
09SD02.57	4	17	0.4654	0.2263	0.87	2.841	4.58	0.0909	4.48	0.199	1315	11	1367	63	1444	85	91
09SD02.58	102	637	0.4019	0.1568	0.80	2.128	3.10	0.0984	3.05	0.195	939	8	1158	36	1594	57	59
09SD02.59	27	102	0.5914	0.2438	0.81	3.170	3.14	0.0943	3.09	0.197	1407	11	1450	46	1514	58	93
09SD02.60	8	55	0.6405	0.1465	0.90	1.557	3.62	0.0771	3.58	0.175	881	8	953	35	1123	71	78
09SD02.61	11	44	0.5068	0.2423	0.84	3.024	3.34	0.0905	3.29	0.185	1399	12	1414	47	1436	63	97
09SD02.62	38	150	0.6737	0.2305	0.80	2.852	3.12	0.0897	3.06	0.196	1337	11	1369	43	1419	59	94
09SD02.63	24	76	0.6655	0.2821	0.81	4.049	3.16	0.1041	3.09	0.206	1602	13	1644	52	1698	57	94
09SD02.64	28	147	0.5671	0.1767	0.89	1.806	3.18	0.0741	3.10	0.228	1049	9	1048	33	1045	63	100
09SD02.65	9	27	1.4020	0.2526	0.83	3.307	3.52	0.0949	3.44	0.209	1452	12	1483	52	1525	65	95
09SD02.66	21	86	0.5183	0.2278	0.80	2.851	3.16	0.0908	3.12	0.185	1323	11	1369	43	1443	59	92
09SD02.67	17	85	0.6820	0.1771	0.83	1.846	3.25	0.0756	3.19	0.206	1051	9	1062	35	1085	64	97
09SD02.68	28	90	1.2046	0.2426	0.79	3.081	3.15	0.0922	3.10	0.191	1400	11	1428	45	1471	59	95
09SD02.69	21	73	0.2398	0.2779	0.81	3.953	3.15	0.1032	3.10	0.196	1581	13	1625	51	1683	57	94
09SD02.70	23	83	0.5207	0.2537	0.84	3.313	3.17	0.0948	3.10	0.211	1457	12	1484	47	1524	58	96
09SD02.71	34	126	0.4633	0.2535	0.79	3.374	3.12	0.0966	3.07	0.196	1457	12	1498	47	1559	58	93
09SD02.72	104	343	0.6252	0.2699	0.80	3.845	3.10	0.1034	3.05	0.198	1541	12	1602	50	1686	56	91
09SD03.1	8	29	0.3177	0.2512	0.92	2.969	4.18	0.0857	4.07	0.224	1445	13	1400	59	1332	79	108
09SD03.2	16	24	0.2035	0.5842	0.86	17.421	3.62	0.2165	3.53	0.221	2966	26	2958	107	2955	57	100
09SD03.3	8	35	0.4708	0.2062	0.85	2.229	4.20	0.0783	4.08	0.246	1209	10	1190	50	1155	81	105
09SD03.4	20	60	0.4687	0.3060	0.85	4.438	3.63	0.1053	3.55	0.205	1721	15	1719	62	1719	65	100
09SD03.5	32	123	0.3474	0.2491	0.83	3.017	3.62	0.0879	3.54	0.219	1434	12	1412	51	1380	68	104
09SD03.6	43	170	0.3227	0.2450	0.85	2.977	3.62	0.0882	3.53	0.221	1413	12	1402	51	1386	68	102
09SD03.7	7	33	0.6809	0.1942	0.86	2.178	4.42	0.0815	4.34	0.188	1144	10	1174	52	1233	85	93
09SD03.8	6	23	0.6915	0.2465	0.87	3.262	4.33	0.0961	4.27	0.171	1421	12	1472	64	1549	80	92
09SD03.9	71	223	0.6433	0.2864	0.84	3.786	3.60	0.0959	3.51	0.219	1623	14	1590	57	1546	66	105
09SD03.10	19	58	0.5585	0.2943	0.82	3.999	3.67	0.0986	3.59	0.209	1663	14	1634	60	1598	67	104
09SD03.11	22	87	0.4532	0.2346	0.88	2.843	3.67	0.0879	3.57	0.231	1359	12	1367	50	1381	69	98
09SD03.12	14	45	0.5169	0.2830	0.92	3.848	3.74	0.0987	3.65	0.226	1606	15	1603	60	1600	68	100
09SD03.13	33	178	0.0373	0.1942	0.89	2.062	3.64	0.0770	3.53	0.237	1144	10	1136	41	1122	70	102
09SD03.14	21	68	0.5105	0.2849	0.86	3.858	3.65	0.0983	3.56	0.223	1616	14	1605	59	1592	66	102
09SD03.15	65	302	0.0741	0.2275	0.83	2.395	3.59	0.0764	3.51	0.212	1322	11	1241	45	1106	70	120
09SD03.16	26	73	1.2618	0.2793	0.86	3.685	3.65	0.0958	3.55	0.227	1588	14	1568	57	1543	67	103
09SD03.17	41	141	0.6439	0.2580	0.94	3.450	3.79	0.0968	3.60	0.325	1480	14	1516	57	1564	67	95
09SD03.18	58	182	0.7241	0.2798	0.82	3.731	3.60	0.0968	3.51	0.213	1591	13	1578	57	1563	66	102
09SD03.19	18	60	0.2701	0.2936	0.85	3.993	3.67	0.0987	3.58	0.219	1660	14	1633	60	1599	67	104
09SD03.20	9	51	0.3169	0.1752	0.83	1.929	3.92	0.0799	3.85	0.193	1041	9	1091	43	1195	76	87
09SD03.21	42	144	0.5683	0.2652	0.88	3.332	5.05	0.0912	4.98	0.165	1516	13	1489	75	1450	95	105
09SD03.22	89	443	0.0628	0.2118	0.82	2.319	3.59	0.0795	3.51	0.211	1238	10	1218	44	1184	69	105
09SD03.23	14	48	0.5147	0.2642	0.86	3.366	3.75	0.0924	3.66	0.220	1511	13	1497	56	1476	69	102
09SD03.24	21	68	0.3794	0.2864	0.84	4.003	3.64	0.1015	3.56	0.210	1623	14	1635	60	1651	66	98

续表 1

Continued Table 1

测点号	Pb ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		误差 相关	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		谐 和 度
				比值	err (%)	比值	err (%)	比值	err (%)		Age (Ma)	1 σ	Age (Ma)	1 σ	Age (Ma)	1 σ	
09SD03.25	9	30	0.5460	0.2668	0.85	3.403	3.90	0.0926	3.82	0.211	1525	13	1505	59	1479	72	103
09SD03.26	28	84	1.0739	0.2738	0.85	3.750	3.63	0.0994	3.55	0.213	1560	13	1582	57	1613	66	97
09SD03.27	15	53	0.8132	0.2406	0.82	2.971	3.71	0.0896	3.63	0.206	1390	11	1400	52	1417	69	98
09SD03.28	10	36	0.4762	0.2564	0.83	3.519	3.81	0.0996	3.73	0.209	1471	12	1531	58	1616	69	91
09SD03.29	49	287	0.0615	0.1791	0.84	1.840	3.60	0.0746	3.52	0.216	1062	9	1060	38	1056	71	101
09SD03.30	50	190	0.6186	0.2376	0.82	2.959	3.60	0.0904	3.52	0.212	1374	11	1397	50	1434	67	96
09SD03.31	34	117	0.4471	0.2765	0.83	3.940	3.61	0.1034	3.52	0.218	1574	13	1622	59	1686	65	93
09SD03.32.1	18	66	0.3323	0.2637	0.94	3.605	3.67	0.0993	3.57	0.232	1509	14	1551	57	1610	67	94
09SD03.32.2	21	74	0.3611	0.2696	0.84	3.715	3.64	0.1000	3.55	0.222	1539	13	1575	57	1624	66	95
09SD03.33	46	179	0.4072	0.2437	0.82	3.096	3.59	0.0922	3.51	0.210	1406	11	1432	51	1471	67	96
09SD03.34	28	74	0.4540	0.3492	0.82	6.116	3.61	0.1271	3.53	0.212	1931	16	1993	72	2059	62	94
09SD03.35	32	169	0.5048	0.1775	0.80	1.833	3.62	0.0749	3.55	0.202	1053	8	1057	38	1067	71	99
09SD03.36	33	70	0.5985	0.4086	0.82	8.753	3.60	0.1554	3.52	0.213	2209	18	2313	83	2407	60	92
09SD03.37	26	112	0.2576	0.2303	0.83	2.937	3.62	0.0926	3.54	0.211	1336	11	1392	50	1479	67	90
09SD03.38	76	355	0.3227	0.2082	0.84	2.413	3.60	0.0841	3.51	0.220	1219	10	1247	45	1295	68	94
09SD03.39.1	18	88	0.9230	0.1687	0.84	1.683	3.78	0.0724	3.69	0.218	1005	8	1002	38	996	75	101
09SD03.39.2	74	431	0.4084	0.1647	0.82	1.645	3.60	0.0725	3.51	0.215	983	8	988	36	1000	71	98
09SD03.40	65	389	0.2509	0.1660	0.82	1.665	3.60	0.0728	3.52	0.209	990	8	995	36	1008	71	98
09SD03.41	36	129	0.5251	0.2555	0.83	3.527	3.60	0.1001	3.52	0.214	1467	12	1533	55	1625	65	90
09SD03.42.1	13	52	0.4398	0.2403	0.83	3.027	3.77	0.0912	3.69	0.210	1388	11	1414	53	1452	70	96
09SD03.42.2	17	73	0.0350	0.2408	0.83	3.084	3.66	0.0927	3.58	0.213	1391	12	1429	52	1482	68	94
09SD03.43	107	337	0.5930	0.2808	0.62	4.210	3.55	0.1085	3.47	0.209	1595	10	1676	59	1775	63	90
09SD03.44	73	427	0.3661	0.1639	0.80	1.726	3.59	0.0762	3.52	0.206	978	8	1018	37	1101	70	89
09SD03.45	18	67	0.5148	0.2512	0.83	3.520	3.68	0.1014	3.59	0.219	1445	12	1532	56	1650	67	88
09SD03.46	36	136	0.4864	0.2399	0.81	3.248	3.61	0.0980	3.54	0.206	1386	11	1469	53	1587	66	87
09SD03.47	68	275	0.2856	0.2388	0.82	3.167	3.59	0.0961	3.51	0.210	1380	11	1449	52	1549	66	89
09SD03.48	35	129	0.3123	0.2542	0.81	3.557	3.61	0.1014	3.53	0.208	1460	12	1540	56	1650	66	88
09SD03.49	83	439	0.3833	0.1798	0.82	2.004	3.59	0.0808	3.51	0.212	1066	9	1117	40	1217	69	88
09SD03.50	40	84	0.4458	0.4161	0.83	9.577	3.60	0.1671	3.52	0.214	2243	19	2395	86	2529	59	89
09SD03.51	23	81	0.5658	0.2623	0.82	3.726	3.64	0.1032	3.56	0.211	1501	12	1577	57	1683	66	89
09SD03.52	20	68	0.6539	0.2679	0.85	3.857	3.68	0.1047	3.60	0.210	1530	13	1605	59	1708	66	90
09SD03.53	41	186	1.0820	0.1831	0.82	2.092	3.62	0.0830	3.54	0.212	1084	9	1146	41	1270	69	85
09SD03.54	32	119	0.1718	0.2675	0.83	3.882	3.61	0.1055	3.53	0.212	1528	13	1610	58	1722	65	89
09SD03.55	19	84	0.7955	0.1936	0.84	2.268	3.70	0.0852	3.61	0.215	1141	10	1202	44	1319	70	86
09SD03.56	56	189	0.3211	0.2861	0.82	4.368	3.59	0.1110	3.51	0.211	1622	13	1706	61	1815	64	89
09SD03.57	59	192	0.2741	0.2982	0.84	4.594	3.60	0.1120	3.51	0.217	1682	14	1748	63	1832	64	92
09SD03.58	30	92	0.2668	0.3163	0.82	5.193	3.61	0.1194	3.53	0.208	1772	15	1851	67	1947	63	91
09SD03.59	35	110	0.4114	0.2963	0.84	4.692	3.61	0.1152	3.54	0.204	1673	14	1766	64	1883	64	89
09SD03.60	17	85	0.5066	0.1912	0.81	2.224	3.72	0.0846	3.64	0.202	1128	9	1189	44	1306	71	86
09SD03.61.1	84	199	0.6892	0.3657	0.85	6.934	3.60	0.1379	3.51	0.223	2009	17	2103	76	2201	61	91
09SD03.61.2	79	312	0.2990	0.2444	0.82	3.630	3.59	0.1080	3.51	0.210	1410	12	1556	56	1766	64	80
09SD03.62	11	34	0.6862	0.2891	0.83	4.429	3.81	0.1114	3.71	0.223	1637	14	1718	65	1822	67	90
09SD03.63	17	80	0.6246	0.1905	0.83	2.281	3.75	0.0871	3.66	0.224	1124	9	1206	45	1362	70	83
09SD03.64	27	144	0.4681	0.1778	0.83	2.080	3.64	0.0851	3.56	0.203	1055	9	1142	42	1318	69	80
09SD03.65	21	56	0.7270	0.3283	0.88	5.328	3.64	0.1181	3.55	0.226	1830	16	1873	68	1928	64	95
09SD04.1	21	62	0.3481	0.3194	0.88	5.227	3.77	0.1190	3.72	0.171	1787	16	1857	70	1941	67	92
09SD04.2.1	40	160	0.1577	0.2527	0.91	3.366	3.76	0.0969	3.71	0.180	1452	13	1497	56	1565	69	93
09SD04.2.2	71	289	0.0527	0.2576	0.94	3.266	3.76	0.0922	3.70	0.190	1478	14	1473	55	1471	70	100
09SD04.3	33	115	0.6023	0.2599	0.82	3.321	3.75	0.0929	3.72	0.149	1489	12	1486	56	1486	70	100

续表 1

Continued Table 1

测点号	Pb ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		误差 相关	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		谐 和 度
				比值	err (%)	比值	err (%)	比值	err (%)		Age (Ma)	1 σ	Age (Ma)	1 σ	Age (Ma)	1 σ	
09SD04.4	25	69	1.2278	0.2846	0.89	3.909	3.81	0.0999	3.75	0.180	1615	14	1616	62	1622	70	100
09SD04.5	70	228	0.8989	0.2622	0.84	3.521	3.74	0.0977	3.70	0.162	1501	13	1532	57	1580	69	95
09SD04.6	12	38	0.4150	0.3026	0.86	4.376	3.85	0.1052	3.81	0.157	1704	15	1708	66	1718	70	99
09SD04.7	7	23	0.5797	0.2582	0.97	3.226	4.43	0.0908	4.36	0.178	1481	14	1463	65	1442	83	103
09SD04.8	18	95	0.4711	0.1821	0.92	1.821	3.91	0.0727	3.84	0.196	1079	10	1053	41	1005	78	107
09SD04.9	71	251	0.1786	0.2840	0.98	3.996	3.78	0.1024	3.70	0.211	1611	16	1633	62	1668	68	97
09SD04.10	40	133	0.1930	0.3001	0.85	4.297	3.74	0.1042	3.70	0.159	1692	14	1693	63	1701	68	99
09SD04.11	20	64	0.3478	0.2949	0.86	4.181	3.79	0.1032	3.74	0.167	1666	14	1670	63	1682	69	99
09SD04.12	11	36	0.3377	0.2963	0.91	4.162	3.91	0.1021	3.84	0.198	1673	15	1667	65	1663	71	101
09SD04.13	17	88	0.5638	0.1761	0.88	1.848	3.88	0.0764	3.84	0.155	1045	9	1063	41	1105	77	95
09SD04.14	27	94	0.7124	0.2556	0.86	3.317	3.78	0.0944	3.74	0.161	1468	13	1485	56	1516	71	97
09SD04.15	10	36	0.5624	0.2602	0.83	3.499	3.96	0.0977	3.91	0.157	1491	12	1527	60	1581	73	94
09SD04.16	20	92	0.2408	0.2220	0.83	2.596	3.76	0.0850	3.73	0.152	1293	11	1300	49	1316	72	98
09SD04.17	71	146	0.5288	0.4288	0.84	9.766	3.73	0.1655	3.69	0.156	2300	19	2413	90	2513	62	92
09SD04.18	17	61	0.5446	0.2561	0.84	3.475	3.79	0.0986	3.75	0.159	1470	12	1522	58	1598	70	92
09SD04.19	12	65	0.3169	0.1878	0.82	2.042	3.88	0.0790	3.84	0.151	1109	9	1130	44	1171	76	95
09SD04.20	45	157	0.3162	0.2775	0.86	4.020	3.74	0.1052	3.70	0.161	1579	14	1638	61	1718	68	92
09SD04.21	25	102	0.0628	0.2520	0.82	3.317	3.76	0.0956	3.72	0.156	1449	12	1485	56	1540	70	94
09SD04.22	28	101	0.4810	0.2607	0.85	3.507	3.75	0.0978	3.72	0.150	1493	13	1529	57	1582	70	94
09SD04.23	20	71	0.7691	0.2536	0.83	3.348	3.79	0.0959	3.76	0.148	1457	12	1492	57	1547	71	94
09SD04.24	25	90	0.5133	0.2548	0.81	3.302	3.76	0.0942	3.73	0.144	1463	12	1481	56	1511	70	97
09SD04.25	31	114	0.5719	0.2473	0.86	3.171	3.75	0.0932	3.71	0.155	1425	12	1450	54	1492	70	95
09SD04.26	37	199	0.4845	0.1765	0.82	1.811	3.75	0.0746	3.72	0.149	1048	9	1049	39	1058	75	99
09SD04.27	24	85	0.6416	0.2495	0.83	3.277	3.76	0.0956	3.73	0.143	1436	12	1476	55	1539	70	93
09SD04.28	29	111	0.2307	0.2618	0.84	3.546	3.74	0.0985	3.71	0.150	1499	13	1538	58	1597	69	94
09SD04.29	22	81	0.6437	0.2395	0.82	3.057	3.79	0.0928	3.75	0.149	1384	11	1422	54	1485	71	93
09SD04.30	6	26	1.3927	0.1815	0.97	1.797	5.17	0.0720	5.10	0.167	1075	10	1044	54	986	104	109
09SD04.31	25	84	0.2256	0.2933	0.90	4.113	3.76	0.1021	3.71	0.173	1658	15	1657	62	1663	69	100
09SD04.32	22	86	0.7487	0.2308	0.97	2.650	3.84	0.0835	3.75	0.215	1339	13	1315	50	1281	73	104
09SD04.33	12	39	0.6978	0.2667	0.92	3.441	3.93	0.0940	3.89	0.160	1524	14	1514	59	1507	73	101
09SD04.34	15	52	0.5436	0.2667	0.87	3.484	3.83	0.0950	3.78	0.174	1524	13	1524	58	1528	71	100
09SD04.35	32	105	0.3939	0.2877	0.92	4.117	3.76	0.1041	3.71	0.179	1630	15	1658	62	1699	68	96
09SD04.37	32	111	0.1972	0.2870	0.82	4.134	3.74	0.1047	3.71	0.151	1626	13	1661	62	1710	68	95
09SD04.38	8	40	0.5190	0.1966	0.95	2.214	4.15	0.0820	4.13	0.140	1157	11	1186	49	1245	81	93
09SD04.39	6	18	0.5352	0.3017	0.94	4.537	4.22	0.1091	4.13	0.206	1700	16	1738	73	1785	75	95
09SD04.40	19	99	0.3084	0.1879	0.91	2.050	3.81	0.0792	3.77	0.170	1110	10	1132	43	1178	74	94
09SD04.41	11	49	0.2023	0.2252	0.92	2.720	3.93	0.0877	3.89	0.166	1309	12	1334	52	1376	75	95
09SD04.42	24	89	0.4035	0.2543	0.88	3.322	3.78	0.0948	3.73	0.176	1461	13	1486	56	1525	70	96
09SD04.43	11	36	0.9289	0.2593	0.94	3.617	3.92	0.1013	3.87	0.170	1486	14	1553	61	1649	72	90
09SD04.44	13	61	1.1227	0.1753	0.97	1.758	4.01	0.0728	3.94	0.193	1041	10	1030	41	1008	80	103
09SD04.45	25	95	0.4561	0.2502	0.61	3.259	3.68	0.0946	3.66	0.124	1439	9	1471	54	1520	69	95
09SD04.46	42	147	0.1740	0.2855	0.84	3.946	3.74	0.1003	3.70	0.158	1619	14	1623	61	1630	69	99
09SD04.47	42	254	0.0501	0.1759	0.92	1.766	3.78	0.0728	3.71	0.196	1045	10	1033	39	1009	75	104
09SD04.48	15	52	0.7107	0.2513	0.84	3.176	3.87	0.0917	3.83	0.157	1445	12	1451	56	1460	73	99
09SD04.49	19	70	0.4753	0.2496	0.93	3.031	3.81	0.0881	3.77	0.165	1436	13	1415	54	1385	72	104
09SD04.50	13	43	0.6885	0.2620	0.83	3.324	3.89	0.0919	3.85	0.147	1500	13	1487	58	1466	73	102

注:误差为1 σ ;同位素比值已采用 ^{208}Pb 校正法进行了普通铅校正;表面年龄谐和度计算公式为: $t_{206/238}/t_{207/206} \times 100$;谐和度数据阴影代表作年龄分布图时去掉的数据点

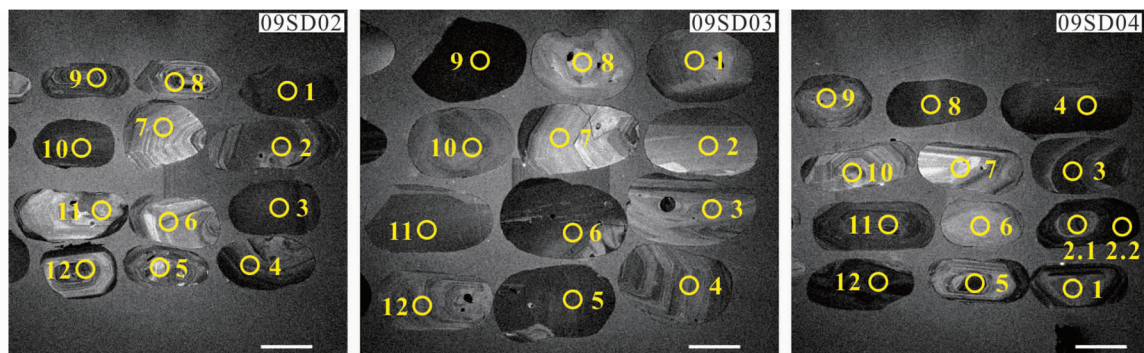


图4 锆石阴极发光图像(线段长度为100 μm)

Fig.4 Cathodoluminescence images of zircons (the scale bar is 100 μm long)

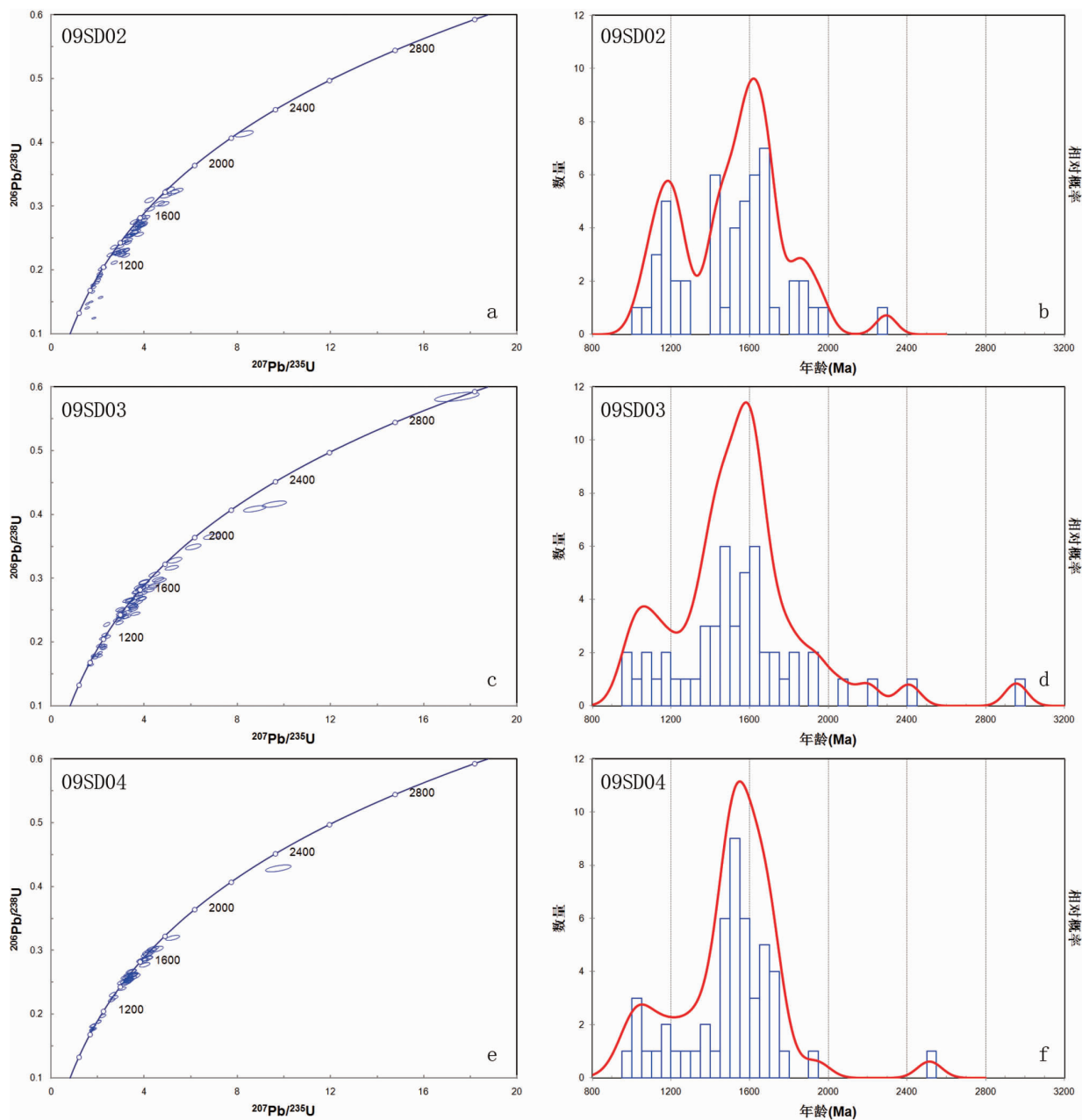


图5 锆石 U-Pb 同位素年龄谐和图及频率图

Fig.5 Concordia diagrams of zircon U-Pb ages and histograms of $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ apparent ages

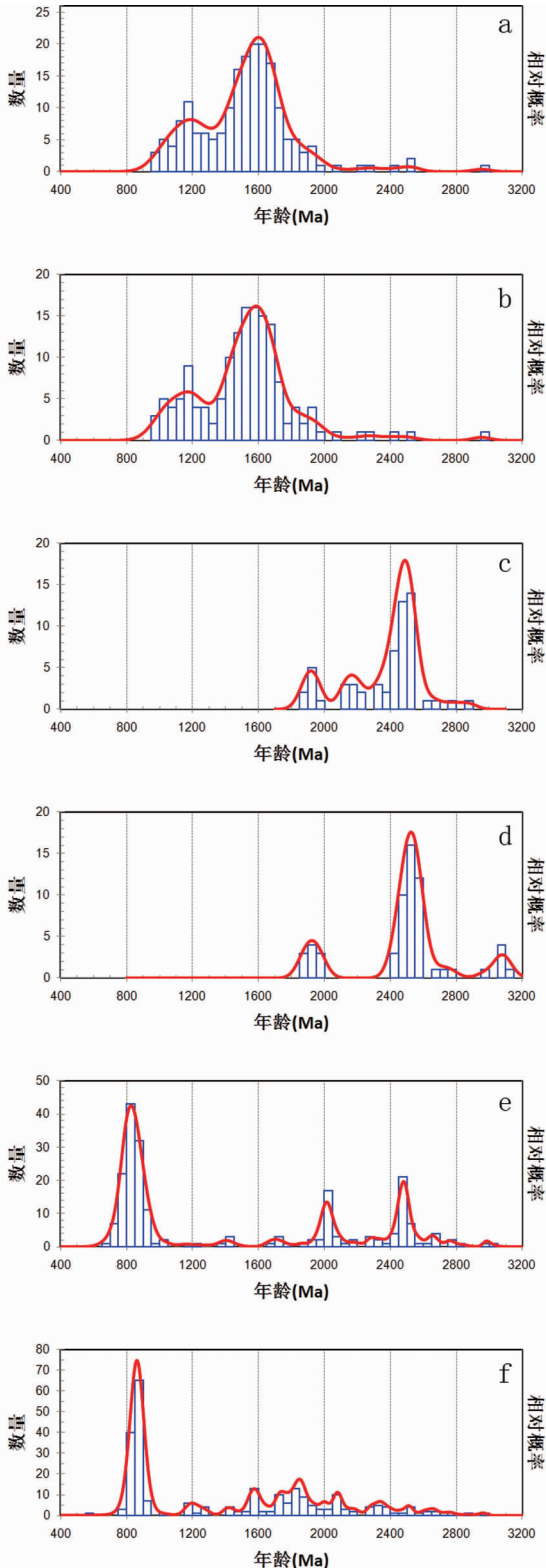


图6 锆石 U-Pb 同位素年龄频率图

(a)-蓬莱群(未去掉不谐和数据);(b)-蓬莱群;(c)-常州沟组(陆松年等, 2009);(d)-长龙山组(陆松年等, 2009);(e)-下江群(Sun *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2009);(f)-梵净山群(Sun *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2009)

Fig. 6 Histograms of zircon U-Pb ages

(a)-Penglai Group (all data); (b)-Penglai Group (90% < concordance < 110%); (c)-Changzhougou Formation (Lu *et al.*, 2009); (d)-Changlongshan Formation (Lu *et al.*, 2009); (e)-Xiajiang Group (Sun *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2009); (f)-Fanjingshan Group (Sun *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2009)

统计的数据有 50 个, 其中除了一个点的表面年龄 ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) 为 2294Ma 外, 其它年龄都在 2000 ~ 1000Ma 之间, 出现了 1625Ma 和 1180Ma 两个年龄值高频区(图 5b)。年龄最小的锆石年龄为 1045Ma。

09SD03 有效数据 69 个点(图 5c), 除去谐和度不理想的 18 个点, 参与碎屑锆石年龄统计的数据有 51 个, 其中有 4 个点的表面年龄 ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) 为大于 2000Ma, 其它年龄都在 1950 ~ 950Ma 之间, 出现了 1600Ma 和 1100Ma 两个年龄值高频区(图 5d)。年龄最小的锆石年龄为 996Ma。

09SD04 有效数据 50 个点(图 5e), 谐和度全部在 90 ~ 110 之间, 全部参与碎屑锆石年龄统计, 其中除了一个点的表面年龄 ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) 为 2513Ma 外, 其它年龄都在 2000 ~ 1000Ma 之间, 出现了 1540Ma 和 1050Ma 两个年龄值高频区(图 5f)。年龄最小的锆石年龄为 986Ma。

4 讨论与结论

(1) 蓬莱群存在同名异物的问题, 杨志坚(1989a, 1989b, 1992)曾多次指出由于历史上命名的混乱, 真正的蓬莱群应为其命名地点处蓬莱丹崖山及庙岛群岛的蓬莱群, 栖霞地区的“蓬莱群”为假蓬莱群。而 Li *et al.* (2007) 在栖霞地区的研究说明了栖霞地区也存在真蓬莱群。另外, Zhou *et al.* (2008) 所讨论的栖霞地区“蓬莱群”可能不是真正的蓬莱群, 其碎屑锆石特点为富含 2500Ma 左右和 1900Ma 左右的锆石, 虽然岩性较为一致, 但物源区不同可以清楚地说明它应该归属另外的地层单元, 其碎屑锆石特点更像荆山群、粉子山群或是芝罘群。由此, 碎屑锆石年龄谱特征可以成为区分真假蓬莱群的重要标志。

(2) 对样品数据的筛选, 通常选取谐和度 80% ~ 120% 的测点进行统计, 本文为更真实反映碎屑锆石的特点, 因此选取谐和度 90% ~ 110% 的数据进行统计, 利用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄做图。这是因为, 当锆石存在严重铅丢失情况时, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄并不能代表锆石形成的年龄, 统计年龄分布没有意义, 故应舍弃谐和度不在 90% ~ 110% 范围内的数据。如图 6a, b, 舍弃不谐和点后的年龄谱图形和全部点的年龄谱有一定差别, 年龄谱图形部分失真, 所得出的结论也会稍有差别。

(3) 三个样品的年龄谱显示了基本相同的特点, 最年轻的锆石年龄分别为 1045Ma, 996Ma, 986Ma, 表明蓬莱群的沉积时代应晚于 986Ma。根据区域地层对比资料, 与蓬莱群相似的地层序列平行不整合于寒武系之下, 因此, 蓬莱群辅子

乔的时代可置于新元古代。

(4) 蓬莱群碎屑锆石年龄集中在 2000 ~ 1000Ma 的范围里, 具有 1600Ma 左右和 1200 ~ 1100Ma 左右的两个年龄峰值, 代表了长岛地区蓬莱群沉积岩物源区的岩石组成特点, 后者是格林威尔期造山作用岩浆活动的时代; 而该时期大规模的岩浆活动既不是华北陆块, 也不是扬子陆块地质演化的特点。

(5) 华北陆块中新元古代沉积岩碎屑锆石具有华北陆块地质演化的显著特点 (Wan *et al.*, 2006), 如燕辽裂陷带蓟县剖面常州沟组 (中元古代)、长龙山组 (新元古代) 的碎屑锆石年龄全部大于 1800Ma, 并富含 2500Ma 左右和 1900Ma 左右的锆石 (图 6c, d) (陆松年等, 2009)。不仅如此, 到目前为止, 华北地区三叠纪以前的沉积岩碎屑锆石也都有此特点 (未发表内部资料)。这些都与蓬莱群碎屑锆石特点形成鲜明对照, 因此蓬莱群变质沉积岩的源区并非来自华北陆块的基底。

(6) 扬子陆块沉积岩的特点是富含 1000 ~ 740Ma 的碎屑锆石, 并有少量 2500Ma 左右、2000Ma 左右和 1800Ma 左右的锆石 (Sun *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2010)。扬子陆块中并未出现典型格林威尔期的岩浆活动, 在新元古代碎屑岩如下江群和梵净山群 (图 5e, f) 也未出现格林威尔期的碎屑锆石。此外, 扬子陆块与华北陆块最终拼合完成于早中生代 (Mattauer *et al.*, 1985; Meng and Zhang, 1999, 2000; 李任伟等, 2004), 难以给新元古代蓬莱群提供物源。因此, 蓬莱群碎屑物质也不是来自南部的扬子陆块。

(7) 蓬莱群的碎屑锆石反映了重要物源区信息, 说明我国东部曾有一个中元古代碎屑锆石的供给区。该区除发育大量 1600Ma 左右的锆石物源区外, 还发育了与格林威尔期锆石年龄相似的 1200 ~ 1100Ma 左右的物源区。这一时代的锆石目前无论在华北, 或扬子都找不到它们确切的位置。那么这样的碎屑锆石究竟来源于何处, 应该是一个值得深思和有待进一步深入探索的问题。

致谢 李怀坤研究员、李惠民研究员、耿建珍、郝爽、张永清等对锆石 LA-MC-ICPMS 测年工作给予了大力支持, 河北省廊坊区域地质调查所实验室在单矿物分选、薄片磨制、薄片鉴定工作中给予了大力支持, 长岛旅游局部分同志参加了早期的野外工作, 作者在此一并致以诚挚的谢意。

References

Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chem. Geol.*, 192:59 - 79
 Black LP, Kamo SL, Allen CM, Aleinikoff JN, Davis DW, Kosch RJ and Foudoulis C 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chem. Geol.*, 200:155 - 170
 Deng YH, Hu QH, Xu HQ, Yan YK and Qian MP. 1984. Study on Penglai Group and Fenzhishan Group in eastern Shandong Province. *Bull. Nanjing Inst. Geol. MR, Chinese Acad. Geol. Sci.*, 5(2):1

- 80 (in Chinese)
 Faure M, Le Breton N, Lin W and Monie P. 2001. Where is the North China-South China block boundary in eastern China? *Geology*, 29: 119 - 122
 Faure M, Lin W, Monie P, Le Breton N, Poussineau S, Panis D and Deloule E. 2003. Exhumation tectonics of the ultra high pressure metamorphic rocks in the Qinling orogen in East China: New petrological-structural-radiometric insights from the Shandong Peninsula. *Tectonics*, 22:1018 - 1040
 Jackson, SE, Pearson NJ, Griffin WL and Belousova EA 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211:47 - 69
 Ji ZY and Zhao HJ. 1992. New proof of the age of Penglai Group in eastern Shandong Province. *Journal of stratigraphy*, 16(3):237 - 239 (in Chinese with English abstract)
 Li HK, Geng JZ, Hao S, Zhang YQ and Li HM. 2009. The study of determination of zircon ages using LA-MC-ICP-MS. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 28 (Suppl.): 77 (in Chinese with English abstract)
 Li HK, Zhu SX, Xiang ZQ, Yang FJ, Su WB, Lu SN, Zhou HY and Geng JZ. 2010. Zircon U-Pb dating of tuff bed from the Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Beijing: Further constraints on the new subdivision and timescale of the Mesoproterozoic stratigraphy in the northern part of North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7):2131 - 2140 (in Chinese with English abstract)
 Li RW, Wan YS, Chen ZY, Zhou JX, Xu RH, Li Z and Jiang MS. 2004. The Dabie Orogen as the Early Jurassic sedimentary provenance: Constraints from the detrital zircon SHRIMP U-Pb dating. *Science in China (Ser. D)*, 34(4):320 - 328 (in Chinese)
 Li XH, Chen FK, Guo JH, Li QL, Xie LW and Siebel W. 2007. South China provenance of the lower-grade Penglai Group north of the Sulu UHP orogenic belt, eastern China: Evidence from detrital zircon ages and Nd-Hf isotopic composition. *Geochemical Journal*, 41:29 - 45
 Liu YS, Gao S, Hu ZC, Gao CG, Zong KQ and Wang DB. 2009. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1 - 2):537 - 571
 Lu SN, Li HK, Wang HC, Chen ZH, Zheng JK and Xiang ZQ. 2009. Detrital zircon population of Proterozoic metasedimentary strata in the Qingling-Qilian-Kunlun Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2195 - 2208 (in Chinese with English abstract)
 Ludwig KR. 2003. User's Manual for Isoplot/Ex, Version 300. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel Berkeley Geochronology Center Special Publication, No 4:1 - 70
 Mattauer M, Matte P, Malavieille J, Tapponnier P, Maluski H, Xu Z, Lu Y and Tang Y. 1985. Tectonics of the Qinling belt: Build-up and evolution of eastern Asia. *Nature*, 317:496 - 500
 Meng QR and Zhang GW. 1999. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation. *Geology*, 27:123 - 126
 Meng QR and Zhang GW. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China. *Tectonophysics* 323: 183 - 196
 Niu BX, Liu SC and Liu HS. 1996. The age of the Penglai Group in Qixia region belongs to the Sinian Period. *Geology of Shandong*, 12(1):63 - 68 (in Chinese)
 Qiao XF, Ji Q, Gao LZ, Zhang YX and Gao ZJ. 1996. Stratigraphic correlation of the Sinian in the eastern part of the Northern China Plate. *Regional Geology of China*, 2:135 - 142 (in Chinese with English abstract)
 Sun WH, Zhou MF, Gao JF, Yang YH, Zhao XF and Zhao JH. 2009. Detrital zircon U-Pb geochronological and Lu-Hf isotopic constraints on the Precambrian magmatic and crustal evolution of the western Yangtze Block, SW China. *Precambrian Research*, 172:99 - 126
 Tang LC. 1990. Discussion on the age of Penglai Group Xiangkuang Formation and the Palaeo-weathering crust on it. *Geological*

- Intelligence of Shandong, 4: 10 - 13 (in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Song B, Liu DY, Wilde SA, Wu JS, Shi YR, Yin XY and Zhou HY. 2006. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectonothermal event. *Precambrian Research*, 149: 249 - 271
- Wang LJ, Griffin WL, Yu JH and O'Reilly SY. 2010. Precambrian crustal evolution of the Yangtze Block tracked by detrital zircons from Neoproterozoic sedimentary rocks. *Precambrian Research*, 177(1 - 2): 131 - 144
- Wang PC. 1992. The age and the deformation structures of Penglai Group. *Geological Intelligence of Shandong*, 1: 17 - 20 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZJ. 1989a. Enlightenment from discovering of strata of Upper-Ordovician to Silurian and Devonian, Korea. *Bull. Nanjing Inst. Geol. MR, Chinese Acad. Geol. Sci.*, 10(1): 17 - 26 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZJ. 1989b. On the tectonic evolutions of Jiaodong Massif and its extension to east. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 9(2): 1 - 11 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZJ. 1990. Discussion on the age and geological zoning of Penglai Group. *Geological Intelligence of Shandong*, 3: 1 - 8 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZJ. 1992. New progress in the study of the Jiaodong block. *Regional Geology of China*, 1: 43 - 50 (in Chinese with English abstract)
- Zhang WQ. 1995. Discussion on lead isotope compositions of the Fenzishan and Penglai groups in the Jiaodong region. *Geology of Shandong*, 11(1): 18 - 24 (in Chinese with English abstract)
- Zhou JB, Wilde SA, Zhao GC, Zheng CQ, Jin W, Zhang XZ and Cheng H. 2008a. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Neoproterozoic Penglai Group and Archean gneisses from the Jiaobei Terrane, North China, and their tectonic implications. *Precambrian Research*, 160: 323 - 340
- Zhou JB, Wilde SA, Zhao GC, Zhang XZ, Zheng CQ, Jin W and Cheng H. 2008b. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Wulian complex: Defining the boundary between the North and South China cratons in the Sulu Orogenic Belt, China. *Precambrian Research*, 162: 559 - 576
- Zhou JB, Wilde SA, Zhao GC, Zheng CQ, Jin W, Zhang XZ and Cheng H. 2008c. Detrital zircon U-Pb dating of low-grade metamorphic rocks in the Sulu UHP belt: Evidence for overthrusting of the North China Craton onto the South China Craton during continental subduction. *Journal of the Geological Society, London*, 165: 423 - 433
- Zhu G, Xu JW, Fitches WR and Fletcher CJN. 1994. Isotopic ages of the Penglai Group in the Jiaobei Belt and their geotectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 68(2): 158 - 172 (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 邓幼华, 胡秋华, 许洪泉, 阎永奎, 钱迈平. 1984. 鲁东地区蓬莱群、粉子山群的研究. *中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊*, 5(2): 1 - 80
- 纪壮义, 赵环金. 1992. 鲁东蓬莱群时代新证. *地层学杂志*, 16(3): 237 - 239
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 张永清, 李惠民. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究. *矿物岩石地球化学通报*, 28(增刊): 77
- 李怀坤, 朱士兴, 相振群, 杨锋杰, 苏文博, 陆松年, 周红英, 耿建珍. 2010. 北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束. *岩石学报*, 26(7): 2131 - 2140
- 李任伟, 万渝生, 陈振宇, 周剑雄, 许荣华, 李忠, 江茂生. 2004. 根据碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 测年恢复早侏罗世大别造山带源区特征. *中国科学(D辑)*, 34(4): 320 - 328
- 陆松年, 李怀坤, 王惠初, 陈志宏, 郑健康, 相振群. 2009. 秦-祁-昆造山带元古宙副变质岩层碎屑锆石年龄谱研究. *岩石学报*, 25(9): 2195 - 2208
- 牛保祥, 刘书才, 刘怀书. 1996. 栖霞地区蓬莱群的时代属震旦纪. *山东地质*, 12(1): 63 - 68
- 乔秀夫, 季强, 高林志, 章雨旭, 高振家. 1996. 北中国板块东部震旦系对比. *中国区域地质*, 2: 135 - 142
- 汤立成. 1990. 关于“蓬莱群”香奂组和顶面的古风化壳及其时代的探讨. *山东地质情报*, 4: 10 - 13
- 王沛成. 1992. 蓬莱群的时代及变形构造. *山东地质情报*, 1: 17 - 20
- 杨志坚. 1989a. 朝鲜晚奥陶世-志留纪和泥盆纪地层发现的启示. *中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊*, 10(1): 17 - 26
- 杨志坚. 1989b. 胶东地块构造演化及其东延去向问题. *海洋地质与第四纪地质*, 9(2): 1 - 11
- 杨志坚. 1990. 论蓬莱群的时代与分区. *山东地质情报*, 3: 1 - 8
- 杨志坚. 1992. 胶东地块研究取得新进展. *中国区域地质*, 1: 43 - 50
- 张文起. 1995. 胶东地区粉子山群及蓬莱群地层铅同位素组成探讨. *山东地质*, 11(1): 18 - 24
- 朱光, 徐家炜, Fitches WR, Fletcher CJN. 1994. 胶北蓬莱群的同位素年龄及其区域大地构造意义. *地质学报*, 68(2): 158 - 172