黄骅坳陷歧口主凹区东营组砂岩物源方向与沉积模式：来自碎屑锆石 U-Pb 年代学的制约

李长海*，董晓伟，石倩茹，官全胜，张佼杨，朱华汇，张明振，董越崎，付东立，杨帆

中国石油大港油田公司，天津 300280

* 通信作者，E-mail：changhai0912@163.com

2024-11-18 收稿；2025-06-04 修回；2025-06-24 接受

基金项目：国家科技重大专项“渤海湾超级盆地油气富集规律与新领域勘探关键技术”(2024ZD1400100);中国石油大港油田公司博士后项目“歧口凹陷断砂耦合形成机制与控藏规律研究”(博 057)

中图分类号：P618.13　　文章编号：2096-8523(2025)05-0065-17　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240696

摘　要：歧口主凹新部署的 HT1 井在东营组三亚段(东三段)钻遇一套重力流砂体并获工业油流，取得了主凹区的勘探突破，但是目前对其物源方向和空间展布特征尚不明确，制约了下步勘探工作。基于地震和测录井资料，利用碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法对歧口主凹区东三段砂岩开展了源-渠-汇约束下的沉积体系研究工作。碎屑锆石 U-Pb 定年结果表明，歧口主凹东三段砂岩碎屑锆石年龄主要集中在 160 ~ 100, 300 ~ 240, 2 000 ~ 1 680, 2 600 ~ 2 300 Ma 4 个年龄区间内，其中 160 ~ 100 Ma 区间年龄峰值明显。盆外物源区沧县隆起 FU1X1 井东三段砂岩碎屑锆石年龄在二叠纪(300 ~ 240 Ma)具有明显峰值。北部燕山造山带发育有从太古宙到中生代的岩浆岩，中生代岩浆作用强烈，160 ~ 100 Ma 区间的年龄峰值特征明显。HT1 井东三段砂岩碎屑锆石年龄特征与燕山造山带年龄峰值特征具有较高一致性，表明北部燕山造山带为其物源区。结合前人轻重矿物研究成果和东三段沉积时期歧口主凹区北高南低的古地貌特征，构建了歧口主凹区东三段砂岩“远源供砂、沟槽输砂、深凹聚砂”的沉积模式。研究成果为后续主凹区井位部署提供了依据。

关键词：碎屑锆石；U-Pb 定年；歧口凹陷；沉积模式；物源

确定物源区是沉积学研究中的重要组成部分，目前常用的确定物源区的方法包括地球化学、轻重矿物、碎屑锆石 U-Pb 定年等[1-2]。锆石因性质稳定，抗风化能力强，其 U-Pb 同位素体系在搬运沉积过程中不易受到破坏，能较好地保留源区年龄信息，使得碎屑锆石 U-Pb 定年成为一种分析物源的可靠方法[3-5]。

黄骅坳陷歧口凹陷东营组三亚段(东三段)是油气勘探的主力层系，前人围绕该层系的沉积特征、储层特征开展了较为系统的研究，但是受制于前期勘探程度较低的影响，对于歧口主凹区东三段相关研究还较为缺乏。黄骅坳陷歧口主凹最新部署的风险探井 HT1 井于东营组三亚段(东三段)新钻遇一套重力流砂体，主要岩性为细砂岩，试油获得工业油流，实现了主凹区风险勘探的巨大突破[6]。本研究利用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱(laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometer，简称 LA-ICP-MS)U-Pb 定年方法对该区东三段砂岩中的碎屑锆石进行定年分析，以明确其物源区和物源方向，构建沉积模式，从而深化对歧口主凹东三段沉

著录信息：李长海，董晓伟，石倩茹，等. 黄骅坳陷歧口主凹区东营组砂岩物源方向与沉积模式：来自碎屑锆石 U-Pb 年代学的制约 [J]. 地质科技通报，2025，44(5)：65-81.

LI Changhai, DONG Xiaowei, SHI Qianru, et al. Source area and sedimentary model of the sandstone in the Third Member of Dongying Formation in main concave, Qikou Sag, Huanghua Depression: Constraints from detrital zircons U-Pb dating[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(5): 65-81.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

积演化特征的了解，支撑主凹区东三段下步勘探部署。

1　区域地质概况

渤海湾盆地经历了中–新生代从挤压到伸展多期构造活动，烃源岩发育较好，成藏条件优越，是中国东部重要含油气盆地之一[7]。黄骅坳陷作为渤海湾盆地重要含油气坳陷之一，包括北部的歧口凹陷和南部的沧东凹陷[8]。歧口凹陷可细分为歧口主凹和北塘、歧北、歧南、板桥以及埕北五大斜坡区（图 1）。五大斜坡区根据构造演化特征又可分为多阶挠曲型斜坡（歧北）、阶状断裂型斜坡（埕北）、单一宽缓型斜坡（北塘和歧南）、旋转掀斜型斜坡（板桥）4 种类型[10]。歧口主凹以东陆上部分勘探程度较高，相继在东营组和沙一下亚段取得了勘探突破。例如唐家河地区主力层位为东营组，探明储量 1 247.5×10^4 t，目前累计产油 421.45×10^4 t；南港地区新增探明与控制储量共计 4 000×10^4 t，其中 TD9X2 井在东三段取得了突破，获百吨高产，已累计产油 1.327×10^4 t，累计产气 460×10^4 m^3。歧口主凹主体位于海域，受制于井场条件，前期勘探程度相对较低。

歧口凹陷主要有北部燕山造山带、南部埕宁隆起、西部沧县隆起 3 个盆外物源区和港西凸起盆内物源区[11-13]。燕山造山带母岩形成时间跨度大，包括前寒武纪、晚古生代和中生代岩浆岩以及中生代沉积岩。西部沧县隆起主要发育的母岩类型为中生代火山岩、石炭纪–二叠纪碎屑岩、奥陶纪碳酸盐岩和新元古代碳酸盐岩。南部埕宁隆起的钻探结果表明其发育的母岩主要包括寒武纪–奥陶纪碳酸盐岩、石炭纪–二叠纪海相与海陆过渡相沉积岩、中生代碎屑岩、火山碎屑岩与岩浆岩。盆内港西凸起的母岩以晚侏罗世–早白垩世火山岩为主[14]，上述物源区在不同时期差异化供源使得歧口凹陷沉积了巨厚的新生界。歧口凹陷新生界从底到顶发育的地层主要有古近系沙河街组沙三段、沙二段和沙一段，东营组东三段、东二段和东一段，新近系馆陶组、明化镇组以及第四系平原组（图 2）。其中主力烃源岩层为沙三段和沙一段，储集层在沙河街组、馆陶组、明化镇组均有发育。

2　样品与测试方法

本研究从 HT1 井钻探获得的岩屑中取样，从东三段目的层砂岩中取 3 个样品进行碎屑锆石 U-Pb 定年，3 个样品取样深度分别为 4 162，4 177，4 209 m，

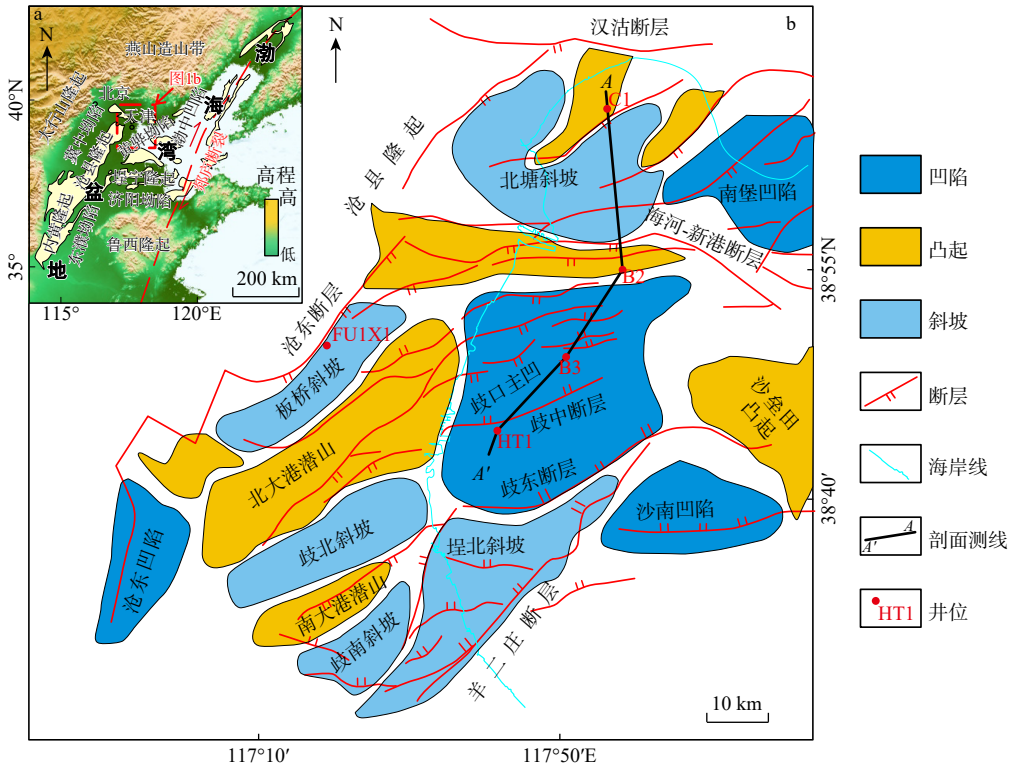


图 1　渤海湾盆地区域构造图（a）和歧口凹陷构造分区图（b）（据文献 [7，9] 修改）

Fig. 1　Regional tectonical map of Bohai Bay Basin (a) and tectonical division map of Qikou Sag (b)

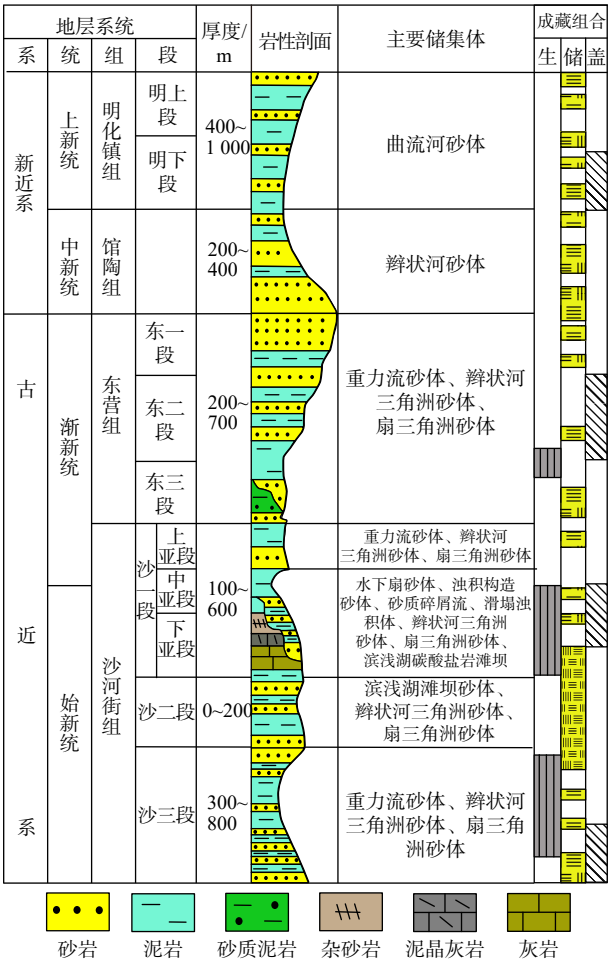


图 2　歧口凹陷新生界综合地层柱状图

Fig. 2　Comprehensive stratigraphic column of Cenozoic in Qikou Sag

分别编号为 HT4162、HT4177 和 HT4209。砂岩岩性均为岩屑长石砂岩，主要矿物成分为长石(体积分数约 50%)、岩屑(体积分数约 35%)、石英(体积分数约 15%)，矿物颗粒呈棱角状–次棱角状，分选中等。同时，为了解歧口凹陷盆外物源区年龄特征，从沧县隆起物源口选取 FU1X1 井，取东三段岩屑样品 1 个，深度为 1 680 m，编号为 FU1680(图 3)。该样品为岩屑长石砂岩，主要矿物成分为长石(体积分数约 55%)、岩屑(体积分数约 30%)、石英(体积分数约 15%)，矿物颗粒呈次棱角状，分选中等。

对样品进行锆石颗粒分选，先用颚破机将样品粉碎到合适粒度，用淘砂盘淘洗出重矿物后再进行磁选，最后在实体显微镜下挑选出锆石。每个样品可挑选出近 1 000 粒碎屑锆石，从中随机选取约 150 粒进行制靶。完成阴极发光 (CL) 、透射及反射照相后，选大约 60 粒锆石进行 LA-ICP-MS U-Pb 测年分析。锆石 U-Pb 测年在北京燕都中实测试技术有限公司分析完成。激光剥蚀系统为德国 COMPEx 公

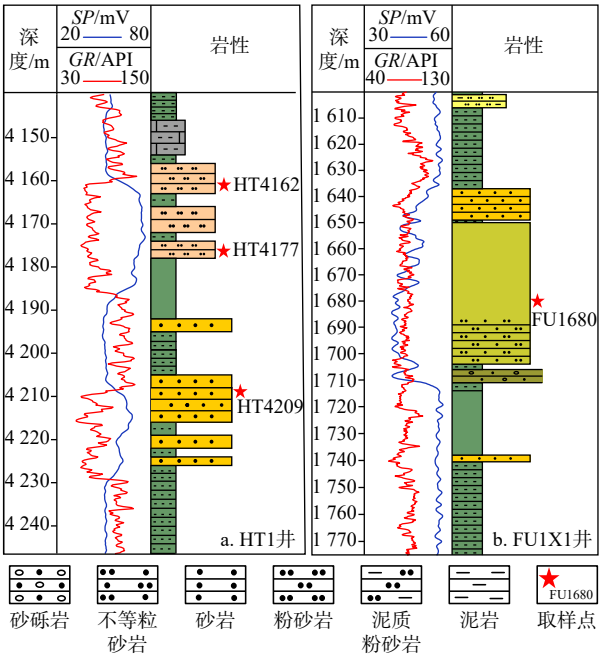


图 3　HT1 井（a）与 FU1X1 井（b）东三段取样层位（*SP*. 自然电位；*GR*. 自然伽马）

Fig. 3　Sample positions in Ed_3 of Well HT1 (a) and Well FU1X1 (b)

司生产的 GeoLasPro 型 193 nm ArF 准分子激光器，采用直径 32 μm、频率 7 Hz 的激光束斑进行样品分析。与激光器联用的是 Agilent 7900 型 ICP-MS 仪器，采用 He 作为剥蚀物质的载气。仪器最佳化采用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610，采用 91500 标准锆石外部校正法进行锆石原位 U-Pb 分析。测试结果利用 ICPMSDataCal(v.9.6) 软件计算同位素比值和$^{207}Pb/^{206}Pb$、$^{206}Pb/^{238}U$、$^{207}Pb/^{235}U$ 的年龄值[15]，在完成普通铅校正后[16]，利用 Isoplot 程序绘制年龄分布直方图。形成年代<1 000 Ma 的锆石选取其$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄；>1 000 Ma 的锆石选取其$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄，利用谐和度 90% 以上的年龄数据进行相关讨论，锆石 U-Pb 年龄数据如表 1 所示。

3　碎屑锆石 U-Pb 年龄特征

样品 HT4162 中的锆石颗粒呈自形–半自形，磨圆中等–差，具有碎屑锆石特征，粒径 45 ~ 115 μm。CL 图像显示锆石发育较好的韵律环带(图 4a)，Th/U 比值主要介于 0.15 ~ 1.55 之间，表明以岩浆锆石为主(图 5)[17]。60 颗锆石的 U-Pb 年龄主要分布在侏罗纪–白垩纪(154 ~ 116 Ma)，占比 40%；石炭纪–二叠纪(307 ~ 254 Ma)，占比 17%；古元古代占比 17%；新太古代占比 23%。除此之外，还有 2 颗锆石 U-Pb 年

表 1 碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年数据（σ.误差）

Table 1 Detrital zircons LA-ICP-MS U-Pb dating data

样品及数据点编号	Th	U	Th/U	同位素比值						年龄t/Ma						谐和度/%
	$w_B/10^{-6}$			$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	
HT4162																
1	664	578	1.15	0.0482	0.0007	0.1300	0.0021	0.0195	0.0002	108	34	124	2	125	1	99
2	312	223	1.40	0.0492	0.0011	0.1653	0.0039	0.0243	0.0002	158	54	155	3	155	2	100
3	816	528	1.55	0.0520	0.0006	0.3263	0.0042	0.0455	0.0004	286	28	287	3	287	2	100
4	721	544	1.33	0.0508	0.0010	0.2348	0.0041	0.0336	0.0004	233	45	214	3	213	3	100
5	46.1	60.9	0.76	0.1654	0.0017	10.9159	0.1018	0.4784	0.0035	2512	17	2516	9	2520	15	100
6	186	161	1.16	0.0488	0.0015	0.1370	0.0044	0.0204	0.0003	137	73	130	4	130	2	100
7	226	318	0.71	0.0517	0.0013	0.1557	0.0037	0.0219	0.0002	274	59	147	3	140	1	95
8	414	850	0.49	0.0493	0.0006	0.1668	0.0023	0.0245	0.0002	161	29	157	2	156	1	100
9	40.1	99.6	0.40	0.1387	0.0013	7.5183	0.0796	0.3925	0.0028	2211	17	2175	10	2135	13	98
10	77.0	187	0.41	0.1171	0.0015	5.6146	0.0758	0.3463	0.0026	1913	24	1918	12	1917	13	100
11	504	358	1.41	0.0488	0.0013	0.1332	0.0039	0.0198	0.0002	138	64	127	4	126	2	100
12	108	111	0.97	0.0490	0.0029	0.1317	0.0076	0.0197	0.0004	147	141	126	7	125	2	100
13	174	199	0.87	0.0510	0.0012	0.2838	0.0073	0.0403	0.0004	242	55	254	6	255	3	100
14	163	179	0.91	0.0491	0.0015	0.1521	0.0046	0.0225	0.0003	153	71	144	4	143	2	100
15	304	244	1.25	0.1178	0.0010	5.3014	0.0536	0.3269	0.0033	1923	16	1869	9	1824	16	98
16	480	433	1.11	0.0589	0.0019	0.1470	0.0037	0.0184	0.0003	561	69	139	3	117	2	84
17	291	246	1.18	0.0492	0.0015	0.1460	0.0047	0.0215	0.0002	158	70	138	4	137	1	99
18	230	344	0.67	0.0491	0.0011	0.1394	0.0031	0.0206	0.0002	152	53	133	3	132	1	99
19	44.3	30.3	1.46	0.1664	0.0015	10.9227	0.1250	0.4760	0.0043	2522	15	2517	11	2510	19	100
20	61.8	79.7	0.78	0.1703	0.0018	11.4655	0.1166	0.4885	0.0034	2561	17	2562	10	2564	15	100
21	324	316	1.03	0.0486	0.0013	0.1355	0.0041	0.0202	0.0002	127	62	129	4	129	2	100
22	84.4	142	0.59	0.1652	0.0018	10.7842	0.1139	0.4727	0.0045	2510	19	2505	10	2496	20	100
23	276	271	1.02	0.0485	0.0013	0.1380	0.0036	0.0207	0.0002	123	62	131	3	132	1	100
24	85.5	275	0.31	0.1115	0.0009	4.7631	0.0361	0.3100	0.0022	1824	14	1778	6	1741	11	98
25	305	243	1.26	0.0514	0.0011	0.2834	0.0069	0.0400	0.0004	260	50	253	5	253	2	100
26	184	375	0.49	0.1666	0.0008	10.8323	0.0744	0.4718	0.0034	2524	8	2509	6	2492	15	99
27	1.09	4.14	0.26	0.1731	0.0043	10.9248	0.2412	0.4639	0.0078	2588	42	2517	21	2457	34	98
28	87.2	164	0.53	0.0525	0.0010	0.3539	0.0079	0.0489	0.0005	306	45	308	6	308	3	100
29	60	74.7	0.80	0.1664	0.0018	10.9573	0.1128	0.4780	0.0032	2521	18	2520	10	2519	14	100
30	102	127	0.80	0.1108	0.0008	4.9213	0.0470	0.3219	0.0026	1813	12	1806	8	1799	13	100
31	493	519	0.95	0.0493	0.0009	0.1593	0.0027	0.0235	0.0002	162	42	150	2	150	1	100
32	93.9	206	0.46	0.0483	0.0016	0.1198	0.0040	0.0181	0.0002	112	79	115	4	115	1	100
33	187	230	0.81	0.0498	0.0014	0.1579	0.0039	0.0231	0.0003	187	66	149	4	148	2	99
34	29.2	32.5	0.90	0.1591	0.0016	9.7166	0.1111	0.4431	0.0036	2446	17	2408	11	2364	16	98
35	71.3	61.8	1.15	0.0497	0.0024	0.1347	0.0062	0.0199	0.0003	180	111	128	6	127	2	99
36	39	61	0.64	0.1652	0.0021	11.0167	0.1527	0.4840	0.0048	2510	22	2525	13	2545	21	99
37	88.1	118	0.75	0.1115	0.0010	4.5109	0.0397	0.2935	0.0015	1825	16	1733	7	1659	8	96
38	34.4	222	0.15	0.1131	0.0013	5.2332	0.0762	0.3353	0.0034	1849	21	1858	12	1864	16	100
39	84	100	0.84	0.0492	0.0024	0.1383	0.0066	0.0205	0.0003	157	112	132	6	131	2	100
40	113	223	0.51	0.0519	0.0013	0.2935	0.0071	0.0412	0.0004	280	59	261	6	260	2	100
41	52.1	128	0.41	0.1661	0.0019	10.4526	0.1464	0.4570	0.0046	2519	19	2476	13	2426	20	98
42	90.2	109	0.83	0.1137	0.0010	5.1511	0.0561	0.3288	0.0028	1859	15	1845	9	1833	14	99
43	594	549	1.08	0.0513	0.0008	0.2713	0.0047	0.0383	0.0004	256	35	244	4	243	2	99
44	90.3	86.4	1.05	0.0484	0.0025	0.1365	0.0072	0.0205	0.0003	119	120	130	6	131	2	99
45	50.8	117	0.43	0.0489	0.0019	0.1392	0.0055	0.0207	0.0003	145	93	132	5	132	2	100
46	102	201	0.51	0.0488	0.0019	0.1205	0.0049	0.0180	0.0002	140	93	116	4	115	2	99
47	80.4	129	0.62	0.0526	0.0013	0.3550	0.0094	0.0490	0.0005	310	55	308	7	308	3	100
48	29.8	28.2	1.06	0.0863	0.0064	0.2906	0.0197	0.0249	0.0007	1345	144	259	16	158	5	61

续表

样品及数据点编号	Th	U	Th/U	同位素比值						年龄t/Ma						谐和度/%
	$w_B/10^{-6}$			$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	
49	88.9	101	0.88	0.1658	0.0015	10.2421	0.0923	0.4482	0.0035	2515	15	2457	8	2387	15	97
50	260	84.9	3.06	0.1654	0.0011	10.8862	0.0941	0.4767	0.0032	2512	11	2514	8	2513	14	100
51	247	282	0.88	0.0512	0.0011	0.2832	0.0061	0.0402	0.0003	251	48	253	5	254	2	100
52	30.8	172	0.18	0.1649	0.0015	10.3224	0.1364	0.4546	0.0065	2507	16	2464	12	2416	29	98
53	75.9	210	0.36	0.1649	0.0017	9.5995	0.1226	0.4229	0.0039	2507	18	2397	12	2274	18	95
54	114	210	0.54	0.1665	0.0018	11.0031	0.1495	0.4801	0.0045	2523	18	2523	13	2528	20	100
55	97.3	155	0.63	0.0501	0.0019	0.1684	0.0065	0.0246	0.0003	199	89	158	6	156	2	99
56	78.9	233	0.34	0.1119	0.0013	4.5996	0.0614	0.2987	0.0022	1831	22	1749	11	1685	11	96
57	59.6	111	0.54	0.0525	0.0014	0.3745	0.0099	0.0519	0.0005	307	58	323	7	326	3	99
58	517	428	1.21	0.0497	0.0010	0.1955	0.0042	0.0286	0.0002	179	46	181	4	182	2	100
59	310	303	1.02	0.0515	0.0010	0.2840	0.0061	0.0401	0.0004	261	43	254	5	254	3	100
60	230	392	0.59	0.0514	0.0013	0.2819	0.0077	0.0398	0.0004	257	60	252	6	252	3	100
HT4177																
1	113	101	1.12	0.0482	0.0021	0.1341	0.0057	0.0202	0.0003	108	104	128	5	129	2	99
2	84.5	108	0.78	0.1119	0.0011	5.0003	0.0495	0.3241	0.0031	1831	17	1819	8	1810	15	99
3	39.7	66	0.60	0.1695	0.0014	11.2128	0.1116	0.4793	0.0044	2553	14	2541	9	2524	19	99
4	223	278	0.80	0.0521	0.0008	0.3370	0.0061	0.0468	0.0004	289	34	295	5	295	3	100
5	175	277	0.63	0.0521	0.0009	0.3201	0.0060	0.0446	0.0004	291	40	282	5	281	3	100
6	94	123	0.76	0.1870	0.0022	13.5432	0.1569	0.5267	0.0051	2716	19	2718	11	2727	21	100
7	89.8	188	0.48	0.0493	0.0018	0.1491	0.0053	0.0220	0.0002	162	83	141	5	140	2	99
8	151	219	0.69	0.0483	0.0014	0.1331	0.0040	0.0200	0.0002	116	67	127	4	128	1	100
9	21.2	43.1	0.49	0.1065	0.0014	4.6094	0.0760	0.3142	0.0038	1740	24	1751	14	1762	19	99
10	301	520	0.58	0.0485	0.0010	0.1170	0.0024	0.0175	0.0002	125	47	112	2	112	1	100
11	151	229	0.66	0.0524	0.0011	0.3055	0.0066	0.0424	0.0005	304	47	271	5	268	3	99
12	170	230	0.74	0.1121	0.0009	5.0596	0.0640	0.3274	0.0029	1833	15	1829	11	1826	14	100
13	56	161	0.35	0.0738	0.0008	1.7545	0.0236	0.1725	0.0015	1035	21	1029	9	1026	8	100
14	76.2	65.2	1.17	0.0550	0.0018	0.1970	0.0071	0.0262	0.0005	413	74	183	6	166	3	91
15	93.9	177	0.53	0.0481	0.0020	0.1222	0.0053	0.0184	0.0002	103	99	117	5	118	1	99
16	54.5	119	0.46	0.1522	0.0022	9.3829	0.1725	0.4460	0.0068	2371	24	2376	17	2377	30	100
17	85	204	0.42	0.1664	0.0017	10.1168	0.1554	0.4421	0.0059	2521	18	2446	14	2360	26	97
18	57.1	73.9	0.77	0.0498	0.0027	0.1261	0.0069	0.0184	0.0003	187	124	121	6	118	2	98
19	119	127	0.94	0.0499	0.0019	0.1414	0.0053	0.0208	0.0003	190	90	134	5	132	2	99
20	127	294	0.43	0.1650	0.0014	10.7104	0.1085	0.4712	0.0040	2507	15	2498	9	2489	18	100
21	78.6	124	0.63	0.1663	0.0016	10.4863	0.0982	0.4581	0.0037	2521	16	2479	9	2431	16	98
22	40.9	94.8	0.43	0.1164	0.0010	5.5468	0.0516	0.3458	0.0023	1902	15	1908	8	1915	11	100
23	101	159	0.64	0.1122	0.0015	5.1147	0.0722	0.3311	0.0028	1835	24	1839	12	1844	14	100
24	420	758	0.55	0.0554	0.0007	0.3561	0.0053	0.0467	0.0004	428	30	309	4	294	2	95
25	66.4	109	0.61	0.0604	0.0025	0.1797	0.0073	0.0217	0.0003	619	89	168	6	138	2	83
26	39.4	34.4	1.15	0.1549	0.0025	9.1773	0.1387	0.4312	0.0046	2400	27	2356	14	2311	21	98
27	117	49.7	2.35	0.1655	0.0017	10.7806	0.1355	0.4736	0.0046	2513	17	2504	12	2499	20	100
28	132	277	0.48	0.1177	0.0010	4.9624	0.0493	0.3067	0.0025	1921	16	1813	8	1724	12	95
29	79.5	197	0.40	0.1064	0.0018	4.5841	0.0796	0.3132	0.0030	1739	32	1746	15	1756	15	99
30	61.2	56.1	1.09	0.1667	0.0017	10.8507	0.1380	0.4733	0.0043	2525	17	2510	12	2498	19	100
31	563	338	1.67	0.0493	0.0011	0.1692	0.0040	0.0249	0.0002	161	51	159	4	159	1	100
32	48.2	229	0.21	0.1059	0.0010	2.8617	0.0347	0.1961	0.0013	1730	18	1372	9	1155	7	84
33	258	256	1.01	0.0527	0.0009	0.3505	0.0061	0.0484	0.0005	315	39	305	5	305	3	100
34	35.5	41.3	0.86	0.1650	0.0018	10.7582	0.1300	0.4732	0.0049	2508	19	2503	11	2498	21	100
35	88.9	105	0.85	0.0530	0.0016	0.3505	0.0098	0.0482	0.0006	328	67	305	7	304	3	100
36	25.6	46.5	0.55	0.1656	0.0020	10.8869	0.1418	0.4769	0.0039	2514	20	2514	12	2514	17	100
37	51.9	95.5	0.54	0.0565	0.0012	0.5619	0.0108	0.0728	0.0007	470	49	453	7	453	5	100

续表

样品及数据点编号	Th	U	Th/U	同位素比值						年龄t/Ma						谐和度/%
	$w_B/10^{-6}$			$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	
38	290	333	0.87	0.1647	0.0020	10.3777	0.1178	0.4561	0.0038	2505	20	2469	11	2422	17	98
39	282	449	0.63	0.0512	0.0008	0.2892	0.0051	0.0409	0.0005	248	36	258	4	259	3	100
40	232	355	0.65	0.1543	0.0012	9.2988	0.1087	0.4366	0.0042	2394	13	2368	11	2336	19	99
41	104	99.7	1.04	0.1704	0.0016	11.4803	0.1594	0.4879	0.0056	2561	15	2563	13	2562	24	100
42	28.1	31.1	0.90	0.1656	0.0022	11.0063	0.1947	0.4806	0.0055	2514	22	2524	17	2530	24	100
43	68	88.5	0.77	0.1119	0.0011	5.1763	0.0627	0.3352	0.0031	1831	18	1849	10	1864	15	99
44	107	305	0.35	0.1615	0.0012	9.7019	0.0812	0.4355	0.0030	2471	13	2407	8	2331	13	97
45	52.7	149	0.35	0.1693	0.0015	11.3500	0.1209	0.4864	0.0036	2551	15	2552	10	2555	16	100
46	1300	830	1.57	0.0491	0.0014	0.1235	0.0036	0.0183	0.0002	153	67	118	3	117	1	99
47	243	234	1.04	0.0517	0.0012	0.2930	0.0073	0.0410	0.0004	272	53	261	6	259	2	99
48	180	214	0.84	0.1650	0.0014	10.3367	0.1167	0.4543	0.0042	2508	15	2465	11	2414	19	98
49	176	333	0.53	0.0511	0.0010	0.2863	0.0063	0.0406	0.0004	244	46	256	5	257	2	100
50	102	166	0.61	0.1143	0.0011	5.3905	0.0702	0.3412	0.0032	1869	18	1883	11	1892	15	100
51	151	194	0.78	0.0576	0.0016	0.1684	0.0048	0.0212	0.0002	515	59	158	4	135	1	86
52	120	238	0.50	0.1660	0.0019	10.8792	0.1657	0.4753	0.0044	2518	19	2513	14	2507	19	100
53	53.9	377	0.14	0.1122	0.0012	5.1409	0.0666	0.3319	0.0033	1836	20	1843	11	1848	16	100
54	236	94.8	2.49	0.1324	0.0120	0.4528	0.0475	0.0238	0.0006	2130	159	379	33	152	4	40
55	210	369	0.57	0.0479	0.0011	0.1364	0.0034	0.0207	0.0002	93	56	130	3	132	1	98
56	338	357	0.95	0.0489	0.0012	0.1523	0.0038	0.0226	0.0003	142	56	144	3	144	2	100
57	26.2	39.5	0.66	0.1651	0.0023	11.1150	0.1941	0.4879	0.0064	2508	23	2533	16	2562	28	99
58	79	162	0.49	0.1658	0.0019	10.9577	0.1690	0.4795	0.0049	2516	20	2520	14	2525	22	100
59	473	500	0.95	0.1607	0.0011	8.8104	0.0970	0.3972	0.0027	2463	12	2319	10	2156	13	93
60	145	236	0.61	0.0700	0.0007	1.4917	0.0214	0.1545	0.0014	929	22	927	9	926	8	100
HT4209																
1	38.4	47.2	0.81	0.1647	0.0019	10.8036	0.1283	0.4758	0.0042	2504	20	2506	11	2509	18	100
2	109	160	0.68	0.1314	0.0015	7.0197	0.0720	0.3877	0.0033	2117	21	2114	9	2112	15	100
3	139	516	0.27	0.1118	0.0012	5.1156	0.0582	0.3317	0.0030	1829	19	1839	10	1847	15	100
4	33.7	39.3	0.86	0.1588	0.0022	10.2504	0.1431	0.4680	0.0050	2443	23	2458	13	2475	22	99
5	202	234	0.86	0.1653	0.0019	10.7690	0.1167	0.4728	0.0040	2511	19	2503	10	2496	18	100
6	22.7	23.8	0.95	0.1478	0.0021	8.6167	0.1265	0.4234	0.0043	2320	25	2298	13	2276	19	99
7	46.4	133	0.35	0.1321	0.0014	6.8424	0.0643	0.3764	0.0035	2126	18	2091	8	2059	17	98
8	120	141	0.85	0.0507	0.0015	0.2921	0.0095	0.0417	0.0005	227	68	260	8	264	3	99
9	115	331	0.35	0.1653	0.0015	10.8514	0.0916	0.4768	0.0042	2511	15	2511	8	2513	18	100
10	49.5	656	0.08	0.1318	0.0011	6.2908	0.0481	0.3465	0.0025	2122	15	2017	7	1918	12	95
11	109	244	0.45	0.0496	0.0015	0.1380	0.0040	0.0203	0.0002	178	72	131	4	129	2	99
12	136	160	0.85	0.1123	0.0010	5.1169	0.0428	0.3310	0.0026	1836	16	1839	7	1843	13	100
13	182	222	0.82	0.0487	0.0013	0.1209	0.0031	0.0181	0.0002	133	65	116	3	116	1	100
14	97.2	129	0.75	0.0487	0.0016	0.1661	0.0052	0.0249	0.0003	134	77	156	5	158	2	98
15	64.1	72.7	0.88	0.1520	0.0014	9.3104	0.0939	0.4447	0.0034	2369	16	2369	9	2372	15	100
16	28.6	208	0.14	0.1649	0.0017	10.9274	0.1339	0.4811	0.0049	2507	17	2517	11	2532	21	99
17	95.8	164	0.58	0.1125	0.0008	5.1295	0.0527	0.3311	0.0031	1840	13	1841	9	1844	15	100
18	22.3	32	0.70	0.1664	0.0020	10.8105	0.1854	0.4718	0.0071	2522	20	2507	16	2491	31	99
19	83.9	222	0.38	0.0512	0.0011	0.2794	0.0061	0.0397	0.0003	250	50	250	5	251	2	100
20	87.8	178	0.49	0.1598	0.0014	9.9056	0.1132	0.4498	0.0044	2454	15	2426	11	2394	20	99
21	92.3	69.5	1.33	0.0493	0.0026	0.1365	0.0070	0.0202	0.0004	163	124	130	6	129	2	99
22	40.4	59.6	0.68	0.0517	0.0022	0.2964	0.0129	0.0418	0.0006	273	99	264	10	264	4	100
23	275	263	1.05	0.0722	0.0008	1.5734	0.0188	0.1583	0.0013	990	23	960	7	947	7	99
24	343	258	1.33	0.0505	0.0013	0.1616	0.0043	0.0232	0.0003	219	58	152	4	148	2	97
25	299	371	0.81	0.0518	0.0010	0.3093	0.0064	0.0435	0.0006	276	45	274	5	274	4	100
26	84.6	115	0.74	0.1160	0.0016	5.4193	0.0730	0.3390	0.0029	1895	24	1888	12	1882	14	100

续表

样品及数据点编号	Th	U	Th/U	同位素比值						年龄t/Ma						谐和度/%
	$w_B/10^{-6}$			$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	
27	341	308	1.11	0.0494	0.0017	0.1386	0.0046	0.0204	0.0003	167	79	132	4	130	2	99
28	147	330	0.45	0.1673	0.0015	10.5373	0.1763	0.4564	0.0066	2531	15	2483	16	2424	29	98
29	156	180	0.87	0.1650	0.0016	10.8834	0.1032	0.4783	0.0033	2508	17	2513	9	2520	15	100
30	340	306	1.11	0.0505	0.0009	0.2419	0.0049	0.0347	0.0003	218	43	220	4	220	2	100
31	15.2	18.4	0.83	0.1728	0.0039	11.9152	0.2961	0.4981	0.0061	2585	37	2598	23	2606	26	100
32	296	370	0.80	0.1653	0.0015	10.6687	0.1198	0.4678	0.0043	2510	16	2495	10	2474	19	99
33	420	288	1.46	0.0539	0.0010	0.4441	0.0085	0.0597	0.0005	366	41	373	6	374	3	100
34	75.3	82.1	0.92	0.1143	0.0016	5.3889	0.0838	0.3420	0.0045	1869	25	1883	13	1896	22	99
35	303	604	0.50	0.0487	0.0009	0.1234	0.0022	0.0184	0.0002	131	43	118	2	118	1	100
36	1300	1310	0.99	0.0490	0.0006	0.1559	0.0023	0.0230	0.0002	150	31	147	2	147	1	100
37	40	65.9	0.61	0.1698	0.0021	11.6372	0.1782	0.4973	0.0065	2555	20	2576	14	2602	28	99
38	16.3	40.6	0.40	0.1042	0.0015	4.3786	0.0610	0.3052	0.0029	1701	26	1708	12	1717	14	100
39	84.1	82.4	1.02	0.1652	0.0022	10.7736	0.1461	0.4726	0.0049	2509	23	2504	13	2495	22	100
40	74.8	96.5	0.78	0.1128	0.0011	4.7876	0.0536	0.3078	0.0027	1845	17	1783	9	1730	13	97
41	470	277	1.70	0.0511	0.0010	0.2726	0.0049	0.0387	0.0004	247	43	245	4	245	2	100
42	2.19	28.1	0.08	0.1123	0.0031	5.1844	0.1299	0.3358	0.0041	1838	50	1850	21	1867	20	99
43	27.3	30.3	0.90	0.1608	0.0023	10.1664	0.1313	0.4599	0.0045	2464	25	2450	12	2439	20	100
45	122	157	0.78	0.1123	0.0009	5.0651	0.0516	0.3269	0.0028	1836	14	1830	9	1823	14	100
46	1190	823	1.45	0.1698	0.0016	5.5253	0.0953	0.2359	0.0037	2556	16	1905	15	1365	20	72
47	226	169	1.34	0.1579	0.0019	8.5597	0.1155	0.3928	0.0042	2433	20	2292	12	2136	19	93
48	35.8	40.2	0.89	0.1071	0.0014	4.6152	0.0684	0.3125	0.0034	1751	24	1752	12	1753	17	100
49	349	927	0.38	0.0510	0.0007	0.2931	0.0051	0.0417	0.0005	242	33	261	4	263	3	99
50	66.6	91.1	0.73	0.1125	0.0014	5.0807	0.0648	0.3278	0.0032	1840	22	1833	11	1828	16	100
51	126	74	1.70	0.0493	0.0027	0.1314	0.0069	0.0195	0.0003	164	126	125	6	124	2	99
52	105	173	0.61	0.0541	0.0018	0.4862	0.0146	0.0655	0.0010	373	75	402	10	409	6	98
53	111	358	0.31	0.1536	0.0012	9.2212	0.0606	0.4356	0.0033	2387	13	2360	6	2331	15	99
54	78.4	62.7	1.25	0.1653	0.0017	10.9929	0.1449	0.4821	0.0049	2511	18	2523	12	2536	21	99
55	51.8	76.4	0.68	0.1193	0.0012	5.7875	0.0740	0.3517	0.0034	1945	19	1945	11	1943	16	100
56	87.3	147	0.59	0.1120	0.0012	5.0128	0.0612	0.3243	0.0027	1833	19	1822	10	1811	13	99
57	320	337	0.95	0.0512	0.0009	0.2801	0.0057	0.0396	0.0004	251	42	251	5	251	2	100
58	325	346	0.94	0.1649	0.0025	8.1146	0.1964	0.3570	0.0071	2506	25	2244	22	1968	34	88
59	539	549	0.98	0.0493	0.0012	0.1578	0.0043	0.0233	0.0003	160	58	149	4	148	2	100
60	66.8	90.1	0.74	0.1586	0.0016	9.9241	0.1373	0.4531	0.0045	2441	17	2428	13	2409	20	99
FU1680																
1	113	93.6	1.20	0.1631	0.0022	10.2734	0.1581	0.4565	0.0045	2487	23	2460	14	2424	20	98%
2	380	303	1.25	0.0560	0.0017	0.3179	0.0086	0.0415	0.0005	450	67	280	7	262	3	93%
3	338	194	1.74	0.0501	0.0026	0.1478	0.0076	0.0215	0.0003	211	119	140	7	137	2	97%
5	54.0	43.5	1.24	0.1629	0.0022	12.0152	0.2075	0.5352	0.0075	2487	23	2606	16	2763	31	94%
6	79.8	218	0.37	0.1571	0.0018	9.2581	0.1239	0.4271	0.0041	2424	19	2364	12	2293	18	96%
8	147	171	0.86	0.0530	0.0019	0.2700	0.0096	0.0371	0.0004	332	77	243	8	235	2	96%
10	373	467	0.80	0.0526	0.0013	0.2582	0.0067	0.0355	0.0004	322	54	233	5	225	2	96%
11	213	738	0.29	0.0515	0.0010	0.2805	0.0064	0.0394	0.0004	265	46	251	5	249	3	99%
12	58.0	110	0.53	0.0550	0.0024	0.3841	0.0161	0.0512	0.0007	413	92	330	12	322	4	97%
13	270	448	0.60	0.0530	0.0014	0.3314	0.0081	0.0455	0.0004	328	27	291	6	287	3	98%
14	323	263	1.23	0.0591	0.0014	0.4832	0.0117	0.0592	0.0006	572	50	400	8	371	4	92%
15	117	112	1.05	0.0543	0.0033	0.1578	0.0093	0.0214	0.0004	383	140	149	8	137	2	91%
16	190	158	1.21	0.0553	0.0019	0.3190	0.0111	0.0419	0.0005	433	76	281	9	264	3	93%
17	87.1	154	0.57	0.0533	0.0027	0.1774	0.0088	0.0244	0.0003	339	117	166	8	155	2	93%
19	278	241	1.15	0.0509	0.0017	0.2716	0.0088	0.0388	0.0005	235	71	244	7	246	3	99%
20	286	212	1.35	0.0540	0.0018	0.2888	0.0097	0.0388	0.0005	372	79	258	8	245	3	95%

续表

样品及数据点编号	Th	U	Th/U	同位素比值						年龄t/Ma						谐和度/%
	$w_B/10^{-6}$			$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	
21	96.4	129	0.75	0.0540	0.0023	0.3424	0.0137	0.0461	0.0005	372	94	299	10	290	3	97%
22	104	138	0.75	0.1118	0.0016	5.0801	0.0723	0.3285	0.0026	1829	26	1833	12	1831	12	99%
24	158	259	0.61	0.0547	0.0015	0.3595	0.0103	0.0475	0.0004	467	58	312	8	299	3	95%
25	156	200	0.78	0.1697	0.0020	11.7356	0.1925	0.5000	0.0068	2554	19	2584	15	2614	29	98%
26	296	142	2.08	0.0534	0.0020	0.2891	0.0107	0.0394	0.0004	343	85	258	8	249	3	96%
27	0.12	9.85	0.01	0.1222	0.0043	6.7049	0.2471	0.3995	0.0069	1989	62	2073	33	2167	32	95%
28	452	300	1.51	0.0484	0.0018	0.1688	0.0064	0.0253	0.0003	117	89	158	6	161	2	98%
30	37.9	66.4	0.57	0.0545	0.0025	0.3479	0.0161	0.0462	0.0007	394	106	303	12	291	4	95%
31	125	327	0.38	0.0513	0.0013	0.3034	0.0082	0.0428	0.0005	254	64	269	6	270	3	99%
32	135	181	0.74	0.0538	0.0016	0.3444	0.0102	0.0465	0.0005	365	69	300	8	293	3	97%
33	35.2	46.2	0.76	0.0553	0.0036	0.3459	0.0229	0.0457	0.0008	433	146	302	17	288	5	95%
34	180	252	0.71	0.0540	0.0014	0.3413	0.0092	0.0458	0.0005	369	59	298	7	289	3	96%
35	63.0	257	0.24	0.1162	0.0015	5.4812	0.0755	0.3417	0.0032	1898	22	1898	12	1895	15	99%
36	118	294	0.40	0.1117	0.0014	4.4985	0.0644	0.2915	0.0028	1828	22	1731	12	1649	14	95%
37	49.6	338	0.15	0.1118	0.0013	5.0175	0.0639	0.3249	0.0025	1829	21	1822	11	1814	12	99%
38	152	201	0.76	0.1699	0.0020	10.6750	0.1306	0.4552	0.0035	2556	20	2495	11	2418	16	96%
39	251	441	0.57	0.0548	0.0014	0.2748	0.0070	0.0363	0.0003	406	57	247	6	230	2	93%
40	153	221	0.69	0.0522	0.0016	0.3152	0.0093	0.0439	0.0005	295	64	278	7	277	3	99%
42	190	200	0.95	0.0545	0.0014	0.4571	0.0119	0.0608	0.0006	394	53	382	8	381	3	99%
43	109	170	0.64	0.0653	0.0014	1.1762	0.0261	0.1307	0.0013	783	44	790	12	792	8	99%
44	37.8	67.9	0.56	0.1827	0.0024	12.7475	0.2090	0.5046	0.0053	2677	21	2661	15	2634	23	98%
45	90.9	472	0.19	0.1128	0.0013	4.7650	0.0551	0.3058	0.0020	1856	20	1779	10	1720	10	96%
47	84.9	622	0.14	0.0707	0.0009	1.3663	0.0185	0.1398	0.0008	950	26	875	8	843	5	96%
48	89.9	78.2	1.15	0.1534	0.0021	9.3683	0.1301	0.4424	0.0038	2384	23	2375	13	2361	17	99%
49	503	646	0.78	0.0568	0.0010	0.3781	0.0067	0.0483	0.0005	487	34	326	5	304	3	93%
50	510	462	1.11	0.0544	0.0010	0.4314	0.0082	0.0575	0.0005	387	43	364	6	360	3	98%
52	87.9	95.6	0.92	0.0932	0.0016	3.4621	0.0585	0.2695	0.0028	1492	33	1519	13	1538	14	98%
54	50.4	65.4	0.77	0.1101	0.0019	4.1498	0.0725	0.2732	0.0028	1811	32	1664	14	1557	14	93%
55	139	358	0.39	0.0511	0.0012	0.3447	0.0087	0.0489	0.0005	243	56	301	7	308	3	97%
57	266	494	0.54	0.0531	0.0011	0.2991	0.0065	0.0408	0.0003	332	53	266	5	258	2	96%
58	99.4	99.3	1.00	0.0530	0.0025	0.2882	0.0147	0.0392	0.0005	328	107	257	12	248	3	96%
59	97.9	176	0.56	0.1055	0.0016	3.7968	0.0623	0.2603	0.0029	1724	28	1592	13	1491	15	93%
60	155	212	0.73	0.0568	0.0016	0.3406	0.0091	0.0435	0.0005	483	61	298	7	275	3	91%

龄为三叠纪，占比 3%(图 6a, b)。

样品 HT4177 中的锆石颗粒呈自形−半自形，粒径 50 ~ 120 μm，磨圆中等−差，显示搬运磨蚀的特征。CL 图像显示锆石发育较好的韵律环带(图 4b)，结合较高的 Th/U 比值(0.14 ~ 2.49)(图 5)，可判断碎屑锆石颗粒以岩浆锆石为主。60 颗锆石的 U-Pb 年龄主要分布在中侏罗世−早白垩世(160 ~ 118 Ma)，占比 25%；晚石炭世−二叠纪(294 ~ 259 Ma)，占比 15%；新元古代，占比 3%；古元古代，占比 27%；新太古代，占比 28%。除此之外，还有一颗 U-Pb 年龄为 452 Ma 的晚奥陶世锆石(图 6c, d)。

样品 HT4209 中的锆石颗粒呈自形−半自形，粒径 45 ~ 125 μm，部分锆石呈次圆状，磨圆中等，大部分锆石呈棱角状−次棱角状，磨圆较差。CL 图像显示部分锆石颗粒具有核边结构，表明经历了变质作用改造(图 4c)。锆石发育较好的韵律环带，结合 Th/U 比值(0.08 ~ 1.70)(图 5)，可判断碎屑锆石颗粒以岩浆锆石为主，但可能也混有变质锆石。60 颗锆石的 U-Pb 年龄主要分布在晚侏罗世−早白垩世(150 ~ 130 Ma)，占比 17%；中二叠世−中三叠世(264 ~ 240 Ma)，占比 13%；泥盆纪，占比 3%；古元古代，占比 40%；新太古代，占比 23%。除此之外，还有 2 颗锆石 U-Pb 年龄分别为 947, 2 993 Ma(图 6e, f)。

FU1680 样品中的锆石呈自形−半自形，粒径 50 ~ 100 μm，呈次棱角状−次圆状，磨圆中等−差。CL 图像显示锆石发育较好的韵律环带(图 4d)，结合较高

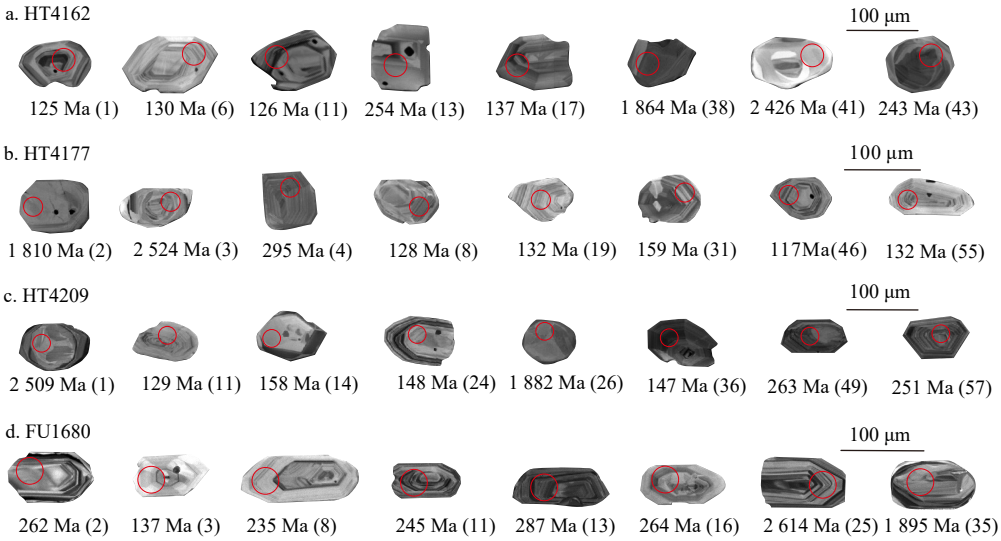


图 4　代表性锆石 CL 图（红圈为激光打点位置，下方为该点年龄，括号内数字为数据点号）

Fig. 4　Representative detrital zircons CL images

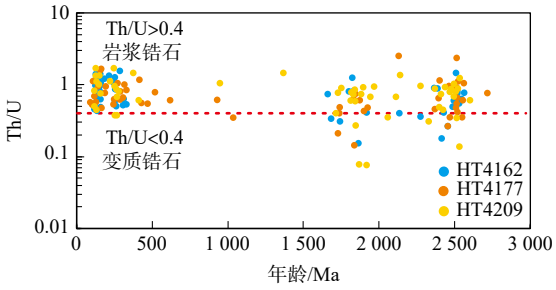


图 5　碎屑锆石样品 Th/U 比值散点图

Fig. 5　Th/U ratios of the detrital zircons

的 Th/U 比值(0.13 ~ 2.18)(图 5)，表明碎屑锆石颗粒以岩浆锆石为主。60 颗锆石的 U-Pb 年龄主要包括中生代(占比 24%)、晚古生代(占比 39%)、古元古代(占比 30%)、新太古代(占比 6%)(图 6g, h)。

4　源区特征与物源对比

4.1　潜在源区锆石年龄特征

东部沧县隆起为盆外物源区之一，主要发育的母岩类型为中生代火山岩、石炭纪–二叠纪碎屑岩、奥陶纪碳酸盐岩和新元古代碳酸盐岩。基于 FU1X1 井东三段砂岩测年结果，东部沧县隆起盆外物源区具 300 ~ 240 Ma 年龄峰值特征，而 160 ~ 100 Ma 的中生代年龄峰值较弱，同时中元古代和太古宙年龄峰值也较弱，这与沧县隆起地层沉积时代特征和发育中生代火山岩的特征相符。

对于南部埕宁隆起，钻探结果表明其发育的母岩主要包括寒武纪–奥陶纪碳酸盐岩，石炭纪–二叠纪海相与海陆过渡相沉积岩，中生代碎屑岩、火山碎屑岩与岩浆岩[11]。虽然没有相关锆石定年数据，但是埕宁隆起母岩时代与沧县隆起母岩具有相似性，其年龄峰值应该也以 300 ~ 240 Ma 为主。盆内港西凸起母岩以晚侏罗世–早白垩世火山岩为主，缺少晚古生代、元古宙和太古宙母岩。

燕山造山带是歧口凹陷以北规模较大的盆外物源区。燕山造山带作为中生代板内造山带，从构造单元上以集宁–尚义–赤城–古北口–平泉断裂为界，分为北部的内蒙古隆起和南部的燕山造山带[18]。该造山带以华北克拉通前寒武纪岩浆岩和变质岩为基底，受到古亚洲洋构造域和古太平洋构造域的叠加影响，出露的岩石时代跨度大，包括前寒武纪、晚古生代和中生代岩浆岩。前寒武纪岩浆岩主要出露在密云–冀东地区以及冀西北怀安–张家口–宣化一带[19]，岩浆岩期次主要包括 2.60 ~ 2.50, 约 2.45, 约 2.20, 约 2.00, 1.93 ~ 1.81 Ga[20-24]。中元古代岩浆岩在河北大庙、密云地区有所出露，比如河北大庙形成时代在约 1.7 Ga 的斜长杂岩体，密云地区侵位时代在 1.75 ~ 1.65 Ga 的非造山环斑花岗岩[25-28]。

燕山地区晚古生代岩浆岩形成时代包括泥盆纪(400 ~ 360 Ma)、早石炭世晚期–中二叠世(330 ~ 265 Ma)及二叠纪末–三叠纪(250 ~ 200 Ma)3 个不同阶段[29]。其中，泥盆纪侵入岩主要为碱性杂岩体，规模较小，集中出露于冀北张家口水泉沟地区，侵位时代为 390 Ma。由于碱性杂岩体本身规模较小，同时锆石含量也较低，可能难以为渤海湾盆地提供物源[30]。早石炭世晚期–中二叠世侵入岩分布面积较大，主要出露于燕山造山带北部，岩性主要为闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩及花岗岩，典型代表岩体如冀北隆化、大光顶花岗闪长岩[18-31]。二叠纪末–

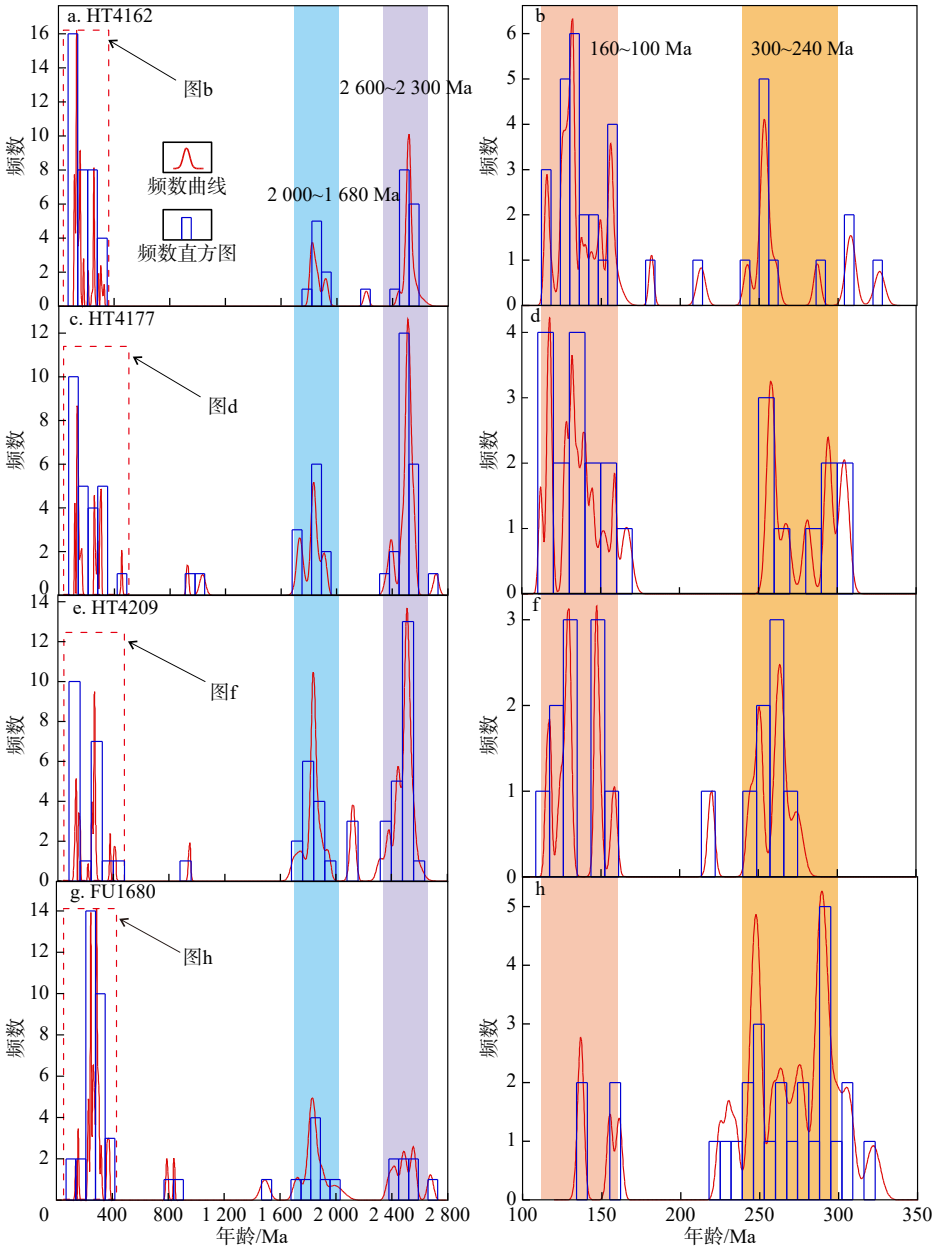


图 6　碎屑锆石年龄频数分布直方图（左列为各样品所有样品点，右列为虚线框内柱状图详细特征）

Fig. 6　Binned frequency histograms of detrital zircons U-Pb ages

三叠纪岩浆岩分布范围也很广泛，岩性主要包括钾长花岗岩、二长花岗岩[32-33]。进入中生代，古太平洋构造域主导了燕山地区的构造演化，发育了大量中生代岩浆岩，其中中–晚侏罗世和早白垩世岩浆岩分布最为广泛，岩性以二长花岗岩、花岗闪长岩等为主[34-35]。燕山地区中–晚侏罗世岩浆岩侵位时代主要呈现出 166，161 ~ 159，152 Ma 3 个年龄峰值；早白垩世岩浆岩侵位时代呈现出 138，133，129，125，120 Ma 5 个主年龄峰值。基于上文讨论，通过统计前人发表的燕山造山带有关岩浆岩锆石年代学数据，绘制了燕山造山带母岩年龄分布频谱图。可以看出，燕山造山带岩浆岩年龄主要分布在 160 ~ 100，300 ~ 240，2 000 ~ 1 680，2 600 ~ 2 300 Ma 4 个年龄区间内，且 160 ~ 100 Ma 年龄峰值十分明显（图 7）。

4.2　物源分析与对比

HT1 井东三段不同深度 3 个砂岩样品中的碎屑锆石年龄主要分布在 160 ~ 100、300 ~ 240、2 000 ~ 1 680，2 600 ~ 2 300 Ma 4 个区间范围内，表明母岩区提供了中生代、晚古生代、元古宙和太古宙 4 个不同时代的锆石。160 ~ 100 Ma 的年龄峰值较强，反映了物源区中生代母岩较为发育同时供源能力强。基于前文对歧口凹陷潜在物源区母岩锆石年龄的讨论，沧县隆起和埕宁隆起具有强的 300 ~ 240 Ma 年龄峰值，160 ~ 100 Ma 的年龄峰值较弱。港西凸起母岩

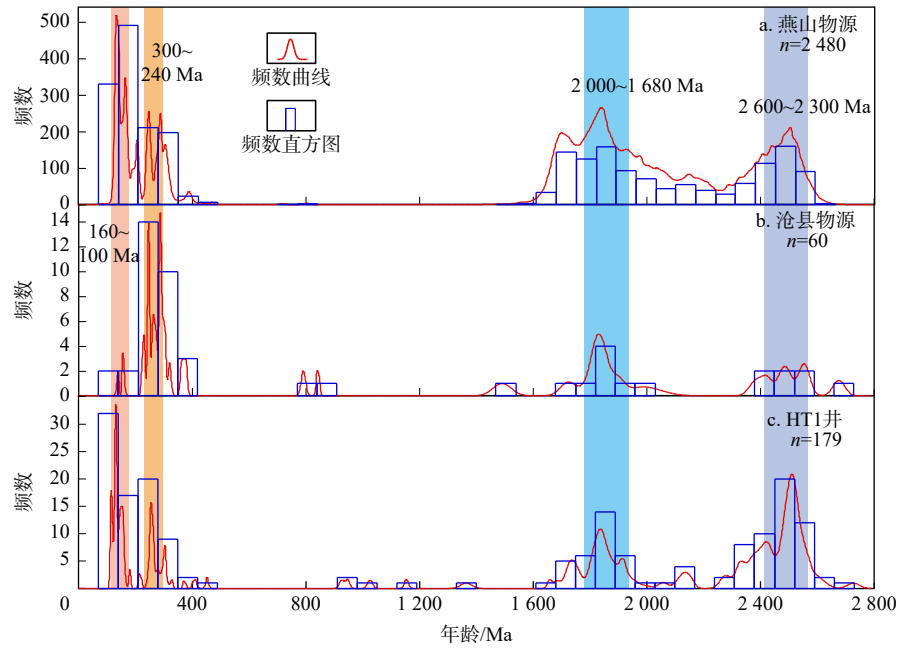


图 7　燕山物源 (a)、沧县物源 (b) 与 HT1 井 (c) 锆石年龄频谱对比图（*n*. 锆石总数）

Fig. 7　Compared frequency histograms for Yanshan (a), Cangxian (b) sources and Well HT1 (c)

以晚侏罗纪–早白垩世火山岩为主，缺少晚古生代、元古宙和太古宙母岩。燕山造山带母岩年龄主要分布在 160 ~ 100, 300 ~ 240, 2 000 ~ 1 680, 2 600 ~ 2 300 Ma 4 个年龄区间内，且 160 ~ 100 Ma 年龄区间峰值明显。因此，歧口深凹区东三段砂岩物源区应为燕山造山带。

前人[36-38]也利用轻重矿物特征对歧口东三段物源区进行了相关研究。北部燕山造山带重矿物具有低锆石、低电气石、低金红石和低石榴石组合特征，沧县隆起具有低锆石、低电气石、低金红石和中石榴石组合特征，埕宁隆起具有中锆石、中电气石、低金红石和高石榴石组合特征[36]。重矿物 *ZTR* 指数（锆石、电气石和金红石三者含量）是判断沉积物搬运方向和距离的重要指标，距离物源区越远，3 种矿物的含量就越高。歧口凹陷东三段地层重矿物 *ZTR* 指数呈现出自北塘凹陷向南到歧口主凹逐渐升高的特征，表明北部物源区向南供给物源的趋势[37-38]。同时从东三段砂地比平面图看出，东三段砂地比呈现出从北向南逐渐降低的趋势，表明陆源碎屑物质自北向南输送（图 8），支撑物源区在北部的结论。

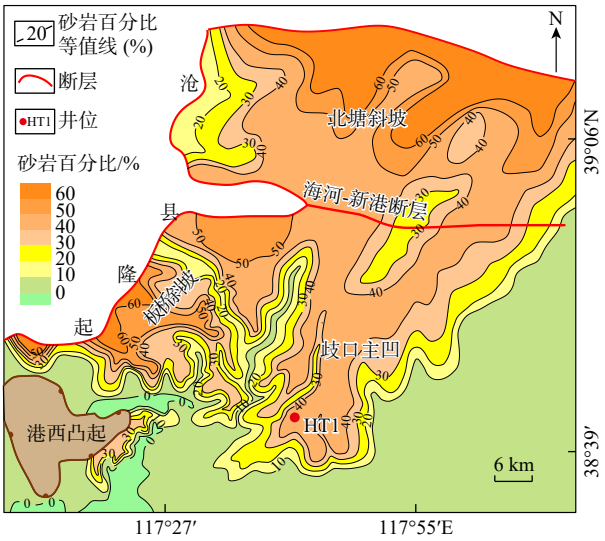


图 8　歧口凹陷东三段砂地比图

Fig. 8　Sand ratio of Ed_3 in Qikou Sag

4.3　源–渠–汇过程分析

源区只有隆升才具有供源的可能，前人对燕山造山带的构造抬升历史也进行了相关研究。张拴宏等[39]利用斜长石–角闪石温度计，提出了燕山造山带北部的内蒙古隆起强烈的隆升和剥蚀事件发生在晚石炭世–早侏罗世，而南部的燕山造山带的强烈隆升则发生在晚侏罗世–早白垩世之后。吴珍汉等[40]提出了燕山造山带的快速隆升主要分为 3 个时期，分别是早期（96 ~ 35 Ma）燕山中段快速隆升、中期（20 ~ 13 Ma）燕山西段快速隆升和晚期（6 Ma 以来）燕山西南缘快速隆升，上述快速隆升历史与燕山周缘盆地的裂陷过程也呈现出较好的对应关系。吴中海等[41]提出了燕山及邻区自晚白垩世以来经历了 6 次快速隆升事件，分别是 120 ~ 105, 95 ~ 85, 60 ~ 50, 38, 25 ~ 20, 10 ~ 5 Ma，上述隆升过程造成燕山及邻区约 7 km 厚的剥蚀量。陈子健[42]利用最新的锆石 (U-Th)/He 热年代学方法，提出了燕山西段延庆–丰宁地区发生过 2 期统一的大范围快速隆升事件：第 1 期 124 ~ 100 Ma

全区统一隆升，第 2 期 46 ~ 19 Ma 南部与中部统一隆升。总的来看，燕山造山带的构造抬升历史与渤海湾盆地自新生代以来的沉降沉积历史有较高的一致性，两者共同组成盆山耦合系统，燕山造山带可为渤海湾盆地持续供给物源。

碎屑物质从源到汇搬运的过程中，沉积路径是重要的一环。从燕山造山带物源区到歧口凹陷直线距离为 150 ~ 300 km，古水系的发育情况是碎屑物质能否远距离输送入盆地的关键。基于前人对华北古近纪–新近纪古水系的研究成果[43]，古永定河、古潮白河和古滦河 3 条古河流的上游支流流经燕山造山带。其中古永定河上游支流北起尚义、怀安，流经张家口–宣化；古潮白河上游北起赤城、延庆等地，流经密云。上述古河流汇水面积大，覆盖了整个燕山地区，可将隆升的前寒武纪–中生代的岩浆岩母岩剥蚀搬运，为渤海湾盆地歧口凹陷提供碎屑物质(图 9)。

碎屑物质进入渤海湾盆地后，继续向歧口凹陷搬运。在歧口凹陷经北塘斜坡到歧口主凹的 SN 向地震剖面上，可见一系列南倾正断层发育，地层呈现出向南阶状下掉、整体北高南低的地貌形态(图 10)。东三段振幅属性图上均显示出物源从北向南输送的特征(图 11a)，从东三段古地貌图(图 11b)可以看出，

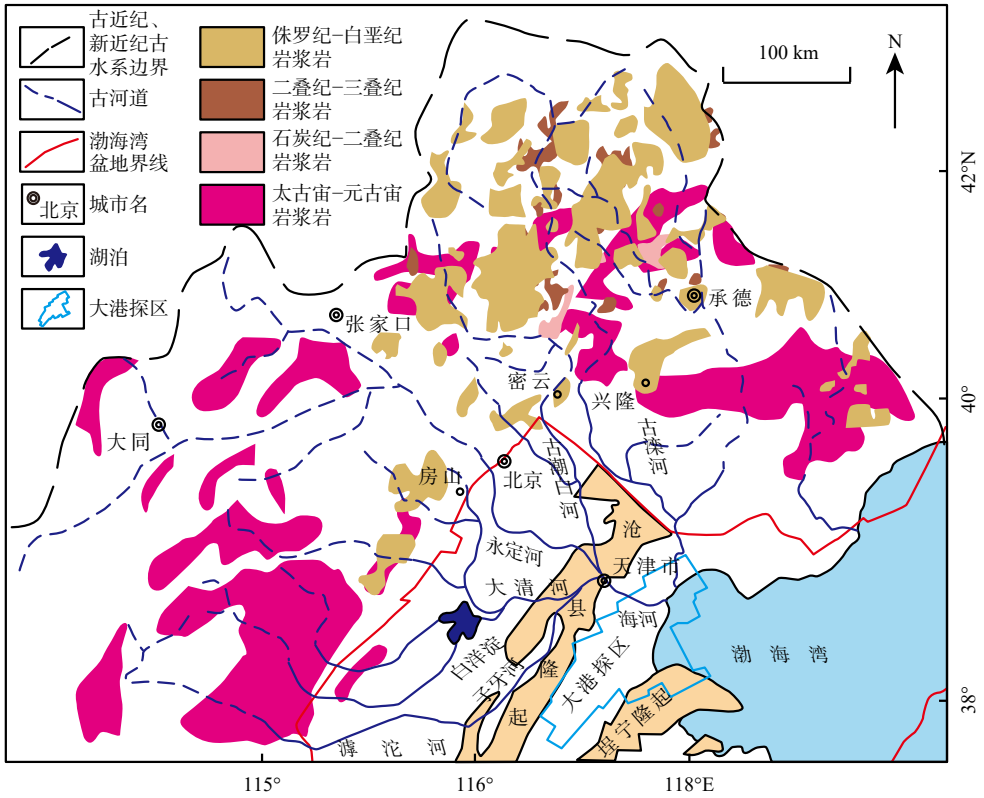
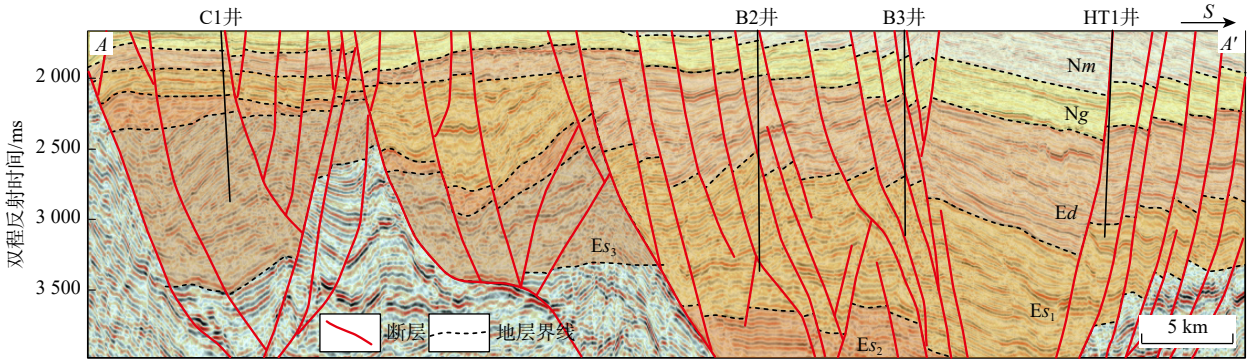


图 9　华北古近纪–新近纪水系与燕山地区岩浆岩空间分布图[43]

Fig. 9　Spatial distribution of Paleogene drainage in Huabei and igneous rocks in Yanshan area



Nm. 明化镇组；Ng. 馆陶组；Ed. 东营组；Es$_1$. 沙一段；Es$_2$. 沙二段；Es$_3$. 沙三段

图 10　过 HT1 井 SN 向地震剖面图（剖面位置见图 1）

Fig. 10　SN seismic profile crossing Well HT1

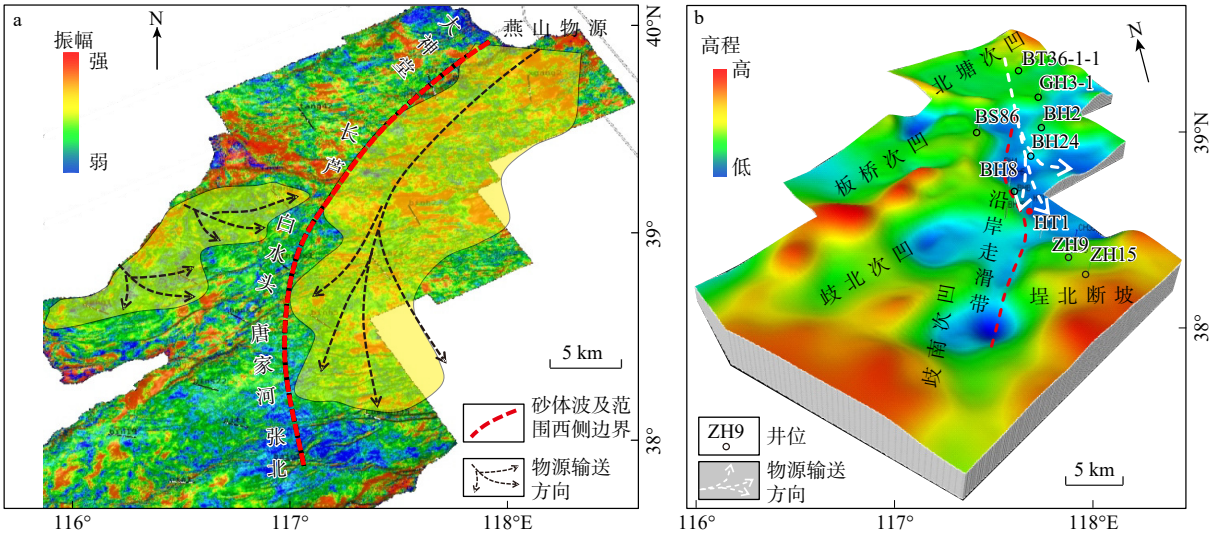


图 11　歧口凹陷东三段振幅属性图（a）和古地貌图（b）

Fig. 11　Amplitude attribute (a) and the palaeotopography (b) of Ed_3 in Qikou Sag

在歧口凹陷东侧发育一条古沟槽，从燕山地区进入歧口凹陷的碎屑物质可以沿该沟槽进行长距离输送，一直到歧口主凹区。从沉积相图来看(图 12)，歧口凹陷自北部北塘次凹向南跨过海河断层直到歧口主凹区发育了辫状河三角洲和远岸水下扇等沉积微相，表明北部燕山造山带东三段沉积时期供源能力强，波及范围大。整体来看，歧口凹陷深凹区东三段砂岩以燕山造山带作为物源区，从源到汇组成了“远源供砂、沟槽输砂、深凹聚砂”的沉积模式。通过本研究，深化了燕山造山带对歧口主凹东三段沉积过程控制作用的认识，为下步歧口主凹勘探部署和油气增储上产提供了支撑。

5　结　论

(1)滨海斜坡深凹区东三段砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄主要集中在 160 ~ 100, 300 ~ 240, 2 000 ~ 1 680, 2 600 ~ 2 300 Ma 4 个区间内，且 160 ~ 100 Ma 年龄峰值特征明显。

(2)通过与沧县隆起、埕宁隆起、港西凸起和燕山造山带母岩锆石年龄特征进行对比，结合前人轻重矿物研究成果和东三段沉积时期北高南低的古地貌特征，认为北部燕山造山带是歧口主凹东三段砂岩的主要物源区。

(3)基于华北古近系–新近系古水系研究成果，古永定河、古潮白河是连接燕山造山带和歧口主凹的沉积路径，实现了“远源供砂”的可能；歧口主凹区东三段沉积时期发育古沟槽及深湖盆，有利于盆内输砂和聚砂，基于此研究构建了东三段砂岩“远源供砂、沟槽输砂、深凹聚砂”的沉积模式。

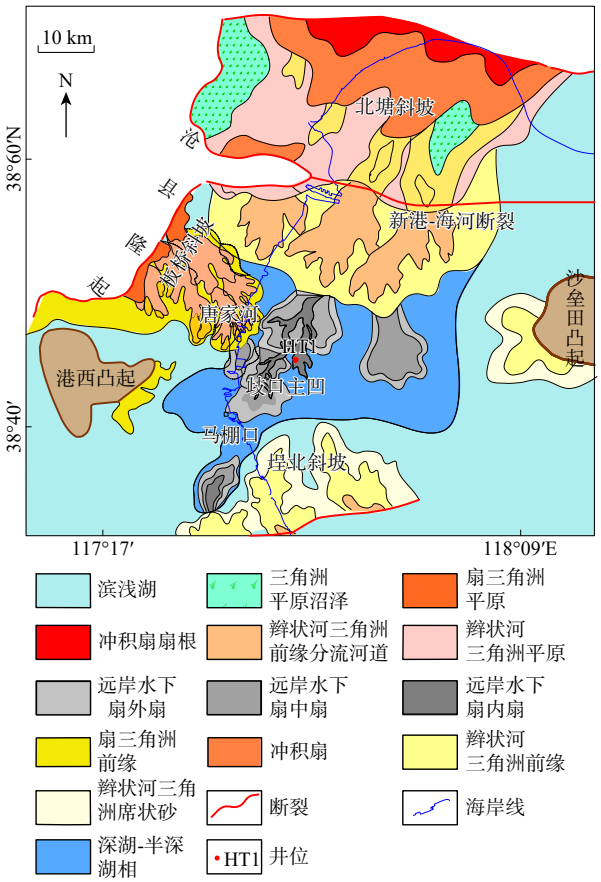


图 12　歧口凹陷东三段沉积体系图

Fig. 12　Sedimentary system of Ed_3 in Qikou Sag

所有作者声明无利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1]　马收先，孟庆任，曲永强. 轻矿物物源分析研究进展 [J]. 岩石学

报, 2014, 30(2): 597-608.
MA S X, MENG Q R, QU Y Q. Development on provenance analysis of light minerals[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(2): 597-608. (in Chinese with English abstract)

[2] 陈星渝, 张志杰, 万力, 等. 深时源-汇系统要素的常用定量分析方法 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(1): 89-107.
CHEN X Y, ZHANG Z J, WAN L, et al. Quantitative analysis methods of source-to-sink systems in deep-time and their progress [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(1): 89-107. (in Chinese with English abstract)

[3] 张凌, 王平, 陈玺赟, 等. 碎屑锆石 U-Pb 年代学数据获取、分析与比较 [J]. 地球科学进展, 2020, 35(4): 414-430.
ZHANG L, WANG P, CHEN X Y, et al. Review in detrital zircon U-Pb geochronology: Data acquisition, analysis and comparison[J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(4): 414-430. (in Chinese with English abstract)

[4] 潘双苹, 胡光明, 李积永, 等. 柴达木盆地扎哈泉地区新近纪物源分析 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(3): 201-209.
PAN S P, HU G M, LI J Y, et al. Analysis of Neogene provenance in Zhahaquan area, Qaidam Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(3): 201-209. (in Chinese with English abstract)

[5] 龚胜利, 闫琢玉, 李百强, 等. 琼东南盆地中中新统海底扇碎屑岩锆石 U-Pb 年龄特征及物源分析 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(5): 45-54.
GONG S L, YAN Z Y, LI B Q, et al. U-Pb age characteristics of detrital zircon and provenance analysis of a Middle Miocene submarine fan in the Qiongdongnan Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(5): 45-54. (in Chinese with English abstract)

[6] 周立宏, 何海清, 陈长伟, 等. 歧口凹陷滨海斜坡深凹区海探 1 井东营组勘探突破与启示 [J]. 中国石油勘探, 2023, 28(6): 78-89.
ZHOU L H, HE H Q, CHEN C W, et al. Exploration breakthrough and enlightenment of Dongying Formation in Well Haitan 1 in the deep subsag area in Binhai slope, Qikou Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(6): 78-89. (in Chinese with English abstract)

[7] 李三忠, 索艳慧, 周立宏, 等. 华北克拉通内部的拉分盆地: 渤海湾盆地黄骅坳陷结构构造与演化 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(5): 1362-1379.
LI S Z, SUO Y H, ZHOU L H, et al. Pull-apart basins within the North China Craton: Structural pattern and evolution of Huanghua Depression in Bohai Bay Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(5): 1362-1379. (in Chinese with English abstract)

[8] 任建业, 廖前进, 卢刚臣, 等. 黄骅坳陷构造变形格局与演化过程分析 [J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(4): 461-472.
REN J Y, LIAO Q J, LU G C, et al. Deformation framework and evolution of the Huanghua Depression, Bohai Gulf[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2010, 34(4): 461-472. (in Chinese with English abstract)

[9] 周琦杰, 刘永江, 王德英, 等. 渤海湾中部中、新生代构造演化与潜山的形成 [J]. 地学前缘, 2022, 29(5): 147-160.
ZHOU Q J, LIU Y J, WANG D Y, et al. Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution and buried hill formation in central Bohai Bay[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(5): 147-160. (in Chinese with English abstract)

[10] 刘海涛, 于海涛, 孙雨, 等. 断陷盆地多类型斜坡形成与油气差异富集规律: 以渤海湾盆地为例 [J]. 岩石学报, 2022, 38(9): 2697-2708.
LIU H T, YU H T, SUN Y, et al. Formation and differential enrichment of oil and gas on multiple types of slopes in rifted basins: Taking the Bohai Bay Basin as an example, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 38(9): 2697-2708. (in Chinese with English abstract)

[11] 吕琳, 焦养泉, 吴立群, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷古近系沙一段物源–沉积体系重建 [J]. 沉积学报, 2012, 30(4): 629-638.
LÜ L, JIAO Y Q, WU L Q, et al. Reconstruction of provenance-sedimentary system of the First Member of the Paleogene Shahejie Formation in the Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(4): 629-638. (in Chinese with English abstract)

[12] 周素彦, 马建英, 周可佳, 等. 歧口地区港西凸起周缘沙二段沉积体系特征 [J]. 东北石油大学学报, 2019, 43(4): 88-98.
ZHOU S Y, MA J Y, ZHOU K J, et al. Sedimentary features of the Second Member of Shahejie Formation in the Gangxi uplift of Qikou area[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2019, 43(4): 88-98. (in Chinese with English abstract)

[13] 郑斯赫, 韩国猛, 汪晓敏, 等. 歧口凹陷板桥–滨海地区沙二段沉积体系展布特征及成藏效应 [J]. 东北石油大学学报, 2021, 45(1): 11-19.
ZHENG S H, HAN G M, WANG X M, et al. Sedimentary depositional system and hydrocarbon accumulation effect in the 2nd Member of the Shahejie Formation of Banqiao-Binhai area, Qikou Sag[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2021, 45(1): 11-19. (in Chinese with English abstract)

[14] 于海涛. 歧口凹陷中南部沙河街组源–汇体系特征及控砂机制 [D]. 黑龙江大庆: 东北石油大学, 2020.
YU H T. Characteristics of source-to-sink system and sand control mechanism of Shahejie Formation in central and southern Qikou Depression[D]. Daqing Heilongjiang: Northeast Petroleum University, 2020. (in Chinese with English abstract)

[15] LIU Y S, HU Z C, ZONG K Q, et al. Reappraisement and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(15): 1535-1546.

[16] ANDERSEN T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb[J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59-79.

[17] KIRKLAND C L, SMITHIES R H, TAYLOR R J M, et al. Zircon Th/U ratios in magmatic environs[J]. Lithos, 2015, 212: 397-414.

[18] 张拴宏, 赵越, 宋彪, 等. 冀北隆化早前寒武纪高级变质区内的晚古生代片麻状花岗闪长岩: 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造意义 [J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 621-626.
ZHANG S H, ZHAO Y, SONG B, et al. The Late Paleozoic gneissic granodiorite pluton in early Pre-Cambrian high-grade metamorphic terrains near Longhua County in northern Hebei Province, North China: Result from zircon SHRIMP U-Pb dating

and its tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(3): 621-626. (in Chinese with English abstract)

[19] 万渝生, 董春艳, 颉颃强, 等. 华北克拉通新太古代早期–中太古代晚期(3.0 ~ 2.6 Ga)巨量陆壳增生: 综述 [J]. 地质力学学报, 2022, 28(5): 866-906.
WAN Y S, DONG C Y, XIE H Q, et al. Huge growth of the Late Mesoarchean-Early Neoarchean(3.0-2.6 Ga) continental crust in the North China Craton: A review[J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(5): 866-906. (in Chinese with English abstract)

[20] TANG L, SANTOSH M. Neoarchean-Paleoproterozoic terrane assembly and Wilson cycle in the North China Craton: An overview from the central segment of the Trans-North China Orogen[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 182: 1-27.

[21] ZHANG H F, ZHAI M G, SANTOSH M, et al. Low-Al and high-Al trondhjemites in the Huai′an complex, North China Craton: Geochemistry, zircon U-Pb and Hf isotopes, and implications for Neoarchean crustal growth and remelting[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 49: 203-213.

[22] LIU F, GUO J H, PENG P, et al. Zircon U-Pb ages and geochemistry of the Huai′an TTG gneisses terrane: Petrogenesis and implications for ~ 2.5 Ga crustal growth in the North China Craton[J]. Precambrian Research, 2012, 212: 225-244.

[23] ZHAO G, WILDE S A, SUN M, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Huai′an Complex: Constraints on Late Archean to Paleoproterozoic magmatic and metamorphic events in the Trans-North China Orogen[J]. American Journal of Science, 2008, 308(3): 270-303.

[24] SU Y P, ZHENG J P, GRIFFIN W L, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotope of gneissic rocks from the Huai′an Complex: Implications for crustal accretion and tectonic evolution in the northern margin of the North China Craton[J]. Precambrian Research, 2014, 255: 335-354.

[25] 赵太平, 陈福坤, 翟明国, 等. 河北大庙斜长岩杂岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 685-690.
ZHAO T P, CHEN F K, ZHAI M G, et al. Single zircon U-Pb ages and their geological significance of the Damiao anorthosite complex, Hebei Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(3): 685-690. (in Chinese with English abstract)

[26] 杨进辉, 吴福元, 柳小明, 等. 北京密云环斑花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2005, 21(6): 1633-1644.
YANG J H, WU F Y, LIU X M, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of the Miyun rapakivi granites from Beijing, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(6): 1633-1644. (in Chinese with English abstract)

[27] 高维, 张传恒, 高林志, 等. 北京密云环斑花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造意义 [J]. 地质通报, 2008, 27(6): 793-798.
GAO W, ZHANG C H, GAO L Z, et al. Zircon SHRIMP U-Pb age of rapakivi granite in Miyun, Beijing, China, and its tectono-stratigraphic implications[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(6): 793-798. (in Chinese with English abstract)

[28] ZHANG S H, LIU S W, ZHAO Y, 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 Orogen[J]. Precambrian Research, 2007, 155(3/4): 287-312.

[29] 张拴宏, 赵越, 刘建民, 等. 华北地块北缘晚古生代–早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景 [J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 824-842.
ZHANG S H, ZHAO Y, LIU J M, et al. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic-Early Mesozoic magmatism in the northern margin of the North China Block: A preliminary review[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2010, 29(6): 824-842. (in Chinese with English abstract)

[30] 韩宝福, 加加美宽雄, 李惠民. 河北平泉光头山碱性花岗岩的时代、Nd-Sr 同位素特征及其对华北早中生代壳幔相互作用的意义 [J]. 岩石学报, 2004, 20(6): 74-87.
HAN B F, JIA J M K X, LI H M. Age and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Guangtoushan alkaline granite, Hebei Province, China: Implications for Early Mesozoic crust-mantle interaction in North China Block[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(6): 74-87. (in Chinese with English abstract)

[31] 王惠初, 赵凤清, 李惠民, 等. 冀北闪长质岩石的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 晚古生代岩浆弧的地质记录 [J]. 岩石学报, 2007, 23(3): 597-604.
WANG H C, ZHAO F Q, LI H M, et al. Zircon SHRIMP U-Pb age of the dioritic rocks from northern Hebei: The geological records of Late Paleozoic magmatic arc[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(3): 597-604. (in Chinese with English abstract)

[32] 马寅生, 曾庆利, 宋彪, 等. 燕山中段盘山花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定及其构造意义 [J]. 岩石学报, 2007, 23(3): 547-556.
MA Y S, ZENG Q L, SONG B, et al. SHRIMP U-Pb dating of zircon from Panshan granitoid pluton in Yanshan Orogenic Belt and its tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(3): 547-556. (in Chinese with English abstract)

[33] 罗镇宽, 苗来成, 关康, 等. 冀东都山花岗岩基及相关花岗斑岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 法定年及其意义 [J]. 地球化学, 2003, 32(2): 173-180.
LUO Z K, MIAO L C, GUAN K, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Dushan granitic batholith and related granite-porphyry dyke, eastern Hebei Province, [J]. Geochimica, 2003, 32(2): 173-180. (in Chinese with English abstract)

[34] ZHANG S H, ZHAO Y, DAVIS G A, et al. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 131: 49-87.

[35] 李三忠, 索艳慧, 李玺瑶, 等. 西太平洋中生代板块俯冲过程与东亚洋陆过渡带构造–岩浆响应 [J]. 科学通报, 2018, 63(16): 1550-1593.
LI S Z, SUO Y H, LI X Y, et al. Mesozoic plate subduction in West Pacific and tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(16): 1550-1593. (in Chinese with English abstract)

[36] 白云风, 王振升, 韦阿娟, 等. 黄骅坳陷东营组重矿物时空展布特征及物源体系分析 [J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(2): 39-42.
BAI Y F, WANG Z S, WEI A J, et al. Time and space distribution

characteristics and material resource system of heavy minerals in Dongying Formation of Huanghua Depression[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(2): 39-42. (in Chinese with English abstract)

[37] 王华, 白云风, 黄传炎, 等. 歧口凹陷古近纪东营期古物源体系重建与应用 [J]. 地球科学, 2009, 34(3): 448-456.
WANG H, BAI Y F, HUANG C Y, et al. Reconstruction and application of the Paleogene provenance system of the Dongying Formation in Qikou Depression[J]. Earth Science, 2009, 34(3): 448-456. (in Chinese with English abstract)

[38] 孙熙邦. 歧口凹陷滨海断鼻东三段沉积微相与砂体展布规律研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
SUN X B. Study on sedimentary microfacies and sand body distribution of Ed_3 of Binhai fault nose in Qikou Sag[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023. (in Chinese with English abstract)

[39] 张拴宏, 赵越, 刘健, 等. 华北地块北缘晚古生代–中生代花岗岩体侵位深度及其构造意义 [J]. 岩石学报, 2007, 23(3): 625-638.
ZHANG S H, ZHAO Y, LIU J, et al. Emplacement depths of the Late Paleozoic-Mesozoic granitoid intrusions from the northern North China Block and their tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(3): 625-638. (in Chinese with English abstract)

[40] 吴珍汉, 崔盛芹, 吴淦国, 等. 燕山山脉隆升过程的热年代学分析 [J]. 地质论评, 2000, 46(1): 49-57.
WU Z H, CUI S Q, WU G G, et al. Thermochronological analysis on the uplift process of the Yanshan mountains[J]. Geological Review, 2000, 46(1): 49-57. (in Chinese with English abstract)

[41] 吴中海, 吴珍汉. 燕山及邻区晚白垩世以来山脉隆升历史的低温热年代学证据 [J]. 地质学报, 2003, 77(3): 399-406.
WU Z H, WU Z H. Low-temperature thermochronological analysis of the uplift history of the Yanshan Mountain and its neighboring area[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(3): 399-406. (in Chinese with English abstract)

[42] 陈子健. 燕山西段延庆–丰宁地区白垩纪岩体剥露过程的低温热年代学研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
CHEN Z J. Low-temperature thermochronological study on the exhumation process of Cretaceous potos in Yanqing-Fengning area of the western Yanshan Belt[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019. (in Chinese with English abstract)

[43] 吴忱, 马永红, 张秀清. 华北山地的古河道与古水系 [J]. 地理研究, 1996, 15(3): 33-41.
WU C, MA Y H, ZHANG X Q. Palaeochannel and palaeodrainage patterns in the North China mountains[J]. Geographical Research, 1996, 15(3): 33-41. (in Chinese)

Summary for “黄骅坳陷歧口主凹区东营组砂岩物源方向与沉积模式: 来自碎屑锆石 U-Pb 年代学的制约”

Source area and sedimentary model of the sandstone in the Third Member of Dongying Formation in main concave, Qikou Sag, Huanghua Depression: Constraints from detrital zircons U-Pb dating

LI Changhai*, DONG Xiaowei, SHI Qianru, GUAN Quansheng, ZHANG Jiaoyang, ZHU Huahui, ZHANG Mingzhen, DONG Yueqi, FU Dongli, YANG Fan

PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China

* Corresponding author, E-mail: changhai0912@163.com

Abstract: [**Objective**] The Qikou Sag, a significant hydrocarbon-bearing sub-basin within the Bohai Bay Basin of eastern China, has recently witnessed a critical exploration breakthrough. Well HT1, drilled in the main trough, encountered a sandstone reservoir within the Third Member of the Dongying Formation (Ed_3) and achieved commercial oil flow. However, the precise provenance and spatial distribution of this Ed_3 sandstone remain enigmatic. Identifying the sediment source is fundamental to constructing a reliable "source-to-sink" system, which is crucial for predicting the distribution of high-quality reservoirs. This study aims to definitively determine the provenance of the Ed_3 sandstone through detrital zircon U-Pb geochronology and establish a robust sedimentary model to guide exploration. [**Methods**] To address the provenance question, this study employed laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS) U-Pb dating on detrital zircons extracted from the Ed_3 sandstone. Zircon is an ideal mineral for provenance analysis due to its high physical and chemical stability, allowing it to survive multiple cycles of erosion and transport while preserving its primary crystallization age. Thus,

the age spectrum of detrital zircons in a sedimentary rock serves as a unique fingerprint that can be compared to the age signatures of potential source areas, enabling a direct link between the sediment and its origin. [**Results**] The U-Pb dating results from the Ed_3 sandstone revealed a characteristic age distribution pattern. The detrital zircon ages cluster into four primary intervals: 2 600−2 300 Ma (Neoarchean to Paleoproterozoic), 1 680−2 000 Ma (Paleoproterozoic), 300−240 Ma (Permian), and a remarkably dominant peak between 160−100 Ma (Jurassic to Cretaceous). The overwhelming abundance of zircons in the 160−100 Ma range immediately pointed towards a significant contribution from a source region with intense Mesozoic magmatic activity. The zircon age signature of the Cangxian uplift was examined. Its age spectrum is characterized by a strong peak at 300−240 Ma and a relative lack of Mesozoic zircons, presenting a clear mismatch with the Ed_3 sandstone signature and effectively ruling it out as the primary source. In contrast, the Yanshan orogenic belt to the north is a complex tectonic zone with a prolonged magmatic history spanning from the Archean to the Mesozoic. Critically, it is renowned for widespread Jurassic-Cretaceous (Yanshanian) magmatism, with a pronounced age peak precisely between 160 and 100 Ma. The striking similarity between the Ed_3 zircon age pattern and the magmatic record of the Yanshan belt provides compelling evidence that the latter served as the principal provenance for the sandstone. Previous studies indicate that the Yanshan orogenic belt experienced significant Cenozoic uplift, coeval with the deposition of the Ed_3, creating a well-defined mountain-basin system. Several major paleo-rivers, such as the ancient Yongding River, ancient Chaobai River, and ancient Luan River, are interpreted to have acted as efficient sediment conduits. These rivers eroded the Mesozoic granitic rocks of the Yanshan belt and transported the detritus southward over long distances into the Qikou Sag. [**Conclusions**] This study successfully resolves the provenance of the Ed_3 sandstone in the main trough of the Qikou Sag. Detrital zircon U-Pb geochronology unequivocally identifies the northern Yanshan orogenic belt as the primary source, excluding the nearby Cangxian uplift. The construction of the "remote source, channelized transport, deep-trough deposition" model has profound implications for exploration. It validates the existence of high-quality sandstone reservoirs in the deep troughs formed by long-distance transport systems. Consequently, future exploration efforts should prioritize mapping the paleo-drainage pathways that funneled sediments from the Yanshan belt into the main trough of the Qikou Sag. This model significantly reduces exploration risk in the deep plays of the depression and provides a valuable analog for searching for similar subtle reservoirs in other continental rift basins worldwide.

Key words: detrital zircon；U-Pb age dating；Qikou Sag；sedimentation model；source

Received：2024-11-18；Revised：2025-06-04；Accepted：2025-06-24

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240696