

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2020.07009

晚中新世红河海底扇碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年龄： 物源区制约及红河袭夺事件探讨

徐强¹, 李冬¹, 朱伟林², 王英民³

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100027; 2. 中国海洋石油集团有限公司, 北京 100010; 3. 中国石油大学(北京), 北京 102249)

摘要:为确定晚中新世红河海底扇物源区以及“红河袭夺”事件,对钻遇红河海底扇的C2井中的53颗锆石颗粒进行了SHRIMP U-Pb年龄的测定。结果表明,该扇体碎屑锆石存在6个年龄段:230~300Ma, 400~500Ma, 700~1000Ma, 1700~1900Ma, 2400~2500Ma和~2700Ma。研究表明,红河海底扇碎屑锆石年龄频谱特征与红河最为相似,230~300Ma的锆石主要来自呵叻高原-昆嵩地块;400~500Ma、1700~1900Ma的锆石主要来自松潘甘孜地块;700~1000Ma的锆石来自扬子克拉通;2400~2500Ma和~2700Ma的锆石主要来自松潘甘孜地块古老的扬子克拉通的基底;年龄为400~500Ma、1700~1900Ma以及大于2.4Ga的锆石说明了古红河源头曾经延伸至松潘-甘孜地区,红河袭夺现象确实存在。红河物源的存在,为在琼东南盆地深水区中央峡谷水道实施油气勘探提供了重要的理论基础。

关键词:红河海底扇;碎屑锆石;SHRIMP U-Pb年龄;物源区;红河袭夺

中图分类号:P539.6; P534.63

文献标识码:A

红河袭夺或金沙江袭夺或长江形成时间问题是世界上研究的热点问题,经过100多年的研究,该问题仍处于争论之中,并没有得到统一的认识,这说明了该问题的复杂性以及研究的困难程度。中新世及其以前莺歌海-琼东南盆地红河海底扇是否存在?这不仅关系到油气勘探方向的制定,更与高原隆升过程中“红河袭夺”事件是否发生、何时发生等科学问题相联系。代表性的观点有:Clark等(2004)认为早期的长江水系,包括金沙江、大渡河等可能都是经红河注入莺歌海盆地的,直至晚中新世末期哀牢山-红河断裂转变为右旋走滑造成了滇西高原抬升,并阻止了部分河流的南流,使大渡河、金沙江等先后转向东流,汇入长江,发生红河袭夺现象^[1-2];Yi Y, Andrew C, Carl P, et al. (2011)指出有红河海底扇存在的可能,但没有指出其发育位置以及存在的证据^[3];韩建辉在其博士论文中指

出在莺-琼盆地结合部于归仁隆起东部黄流组地层中,发育一个巨型的沉积体,通过地震相分析,认为该巨型沉积体可能为深水海底扇沉积,结合沉积背景分析后,推测该扇体的主要物源可能为红河水系^[4]。近期笔者在莺歌海-琼东南盆地西部晚中新世地层中新发现了海底扇沉积,并通过地震资料、岩心和测录井资料、重矿物等对比分析,断定该扇体来自红河水系,将其命名为红河海底扇^[5-7]。

近年来,随着SHRIMP原位微区测年技术的广泛应用,碎屑沉积岩的碎屑锆石年龄谱研究在示踪沉积物物源区和探讨区域构造演化等方面起着越来越重要的作用^[8-15]。本文基于晚中新世红河海底扇沉积物碎屑锆石SHRIMP U-Pb年龄谱并结合稀土元素配分模式研究,为证实红河海底扇的存在提供了比较可靠的证据,并对晚中新世红河海底扇的物源区归属及“红河袭夺”事件进行了探讨。

收稿日期:2019-11-15; **改回日期:**2020-06-09

作者简介:徐强(1958-),男,博士,研究员,曾任中国海洋石油集团有限公司勘探专家,中海油研究总院海外评价中心副主任,主要从事石油沉积地质研究与勘探管理工作。E-mail:duxianlan@hotmail.com

资助项目:国家重点基础研究发展计划项目(973计划)课题7:《南海深水盆地远源碎屑岩沉积机理研究》(2009CB219407)。

1 地质背景

东南亚构造单元主要包括:华夏地块、扬子克拉通、松潘-甘孜地块、泰缅马苏地块、呵叻高原-昆嵩地块、羌塘地块以及一个高变质断裂构造带,即哀牢山-红河断裂带。同时,该区发育红河和湄公河两大向南流动的水系。红河发源于青藏高原

东部,流域较小,发育于高原低部位,现今流域主要源于扬子克拉通南部地区,沿着红河断裂带向东南流动,最终流入南海(图1,图2)。然而,前人研究发现红河入海处滨岸沉积物沉积总量远大于现今红河流域的剥蚀总量,认为红河水系曾经被相邻水系大规模袭夺,使得现今的红河流域规模变小^[12-13]。

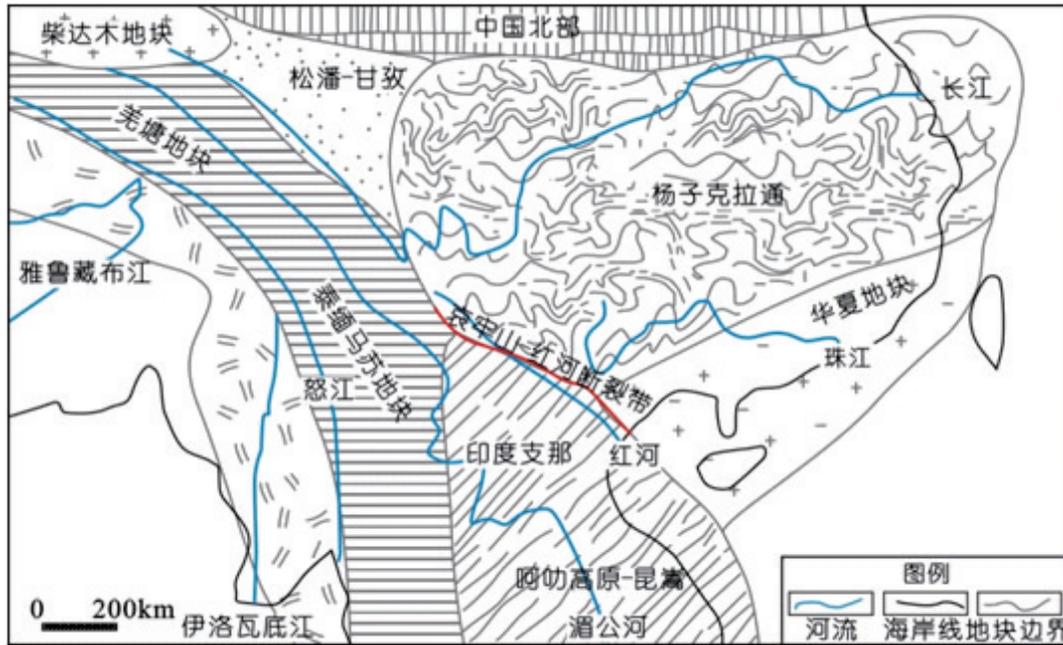


图1 东南亚主要地块分布图

Fig. 1 Distribution of main geological bodies in southeast Asia

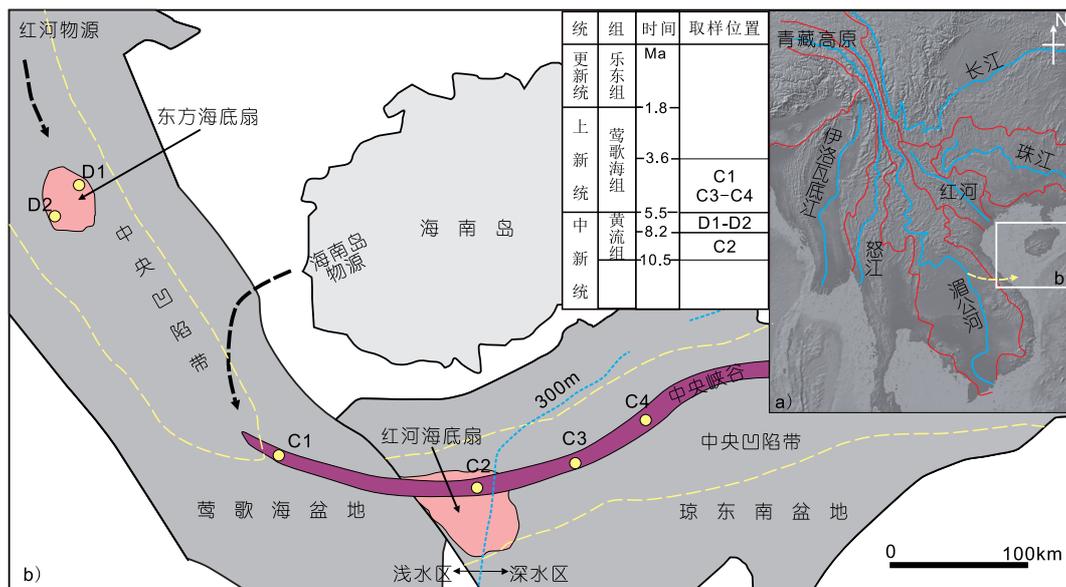


图2 区域地质概况及样点分布

Fig. 2 Regional tectonic units and sampling sites

2 分析及测试方法

研究样品均来自实际钻井取样,地层年代属于晚中新世和早上新世。采样点的分布情况见图 2,其中中央峡谷内部有 4 个采样点,分别为 C1、C2、C3 和 C4,为上新统样品(其中 C2 还采集了中新世红河海底扇样品)。锆石 SHRIMP U-Pb 定年工作在北京离子探针中心完成。在年龄测定之前进行了锆石透射光、反射光和阴极发光照相,以便分析锆石成因和确定锆石测年位置。每颗未知锆石样品数据点测定由 3~4 次扫描给出,标准锆石为 5 次扫描。一次离子流强度为 4~5 nA,束斑为 25~30 μm 。标准锆石 SL13(年龄和 U 含量分别为 572 Ma 和 238×10^{-6})和 TEM(年龄为 417 Ma)分别用于标定未知锆石样品的 U、Th 含量和年龄。标准锆石 TEM 与未知样品分析的比例约为 1:5。数据处理采用 SQUID 和 ISOPLOT 程序,根据实测 ^{204}Pb 进行普通铅校正,附表 1 所列为单个锆石分析数据结果。对于年轻锆石,放射性成因铅 ^{207}Pb 积累较少,难以获

得精确的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,而对于时代老的锆石,放射性损伤有可能引起锆石发生不同程度的铅丢失,所以当锆石年龄小于 1.2 Ga 时,使用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,反之使用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄。但是,对于锆石有铅丢失的年龄数据,尽管 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄小于 1.2 Ga,仍使用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄。

在测试过程中采用随机取点的原则,并删除结果中不谐和度大于 20% 的锆石,以确保年龄的准确度。鉴于当前对获得具有数理统计意义的碎屑锆石 U-Pb 年龄所需的锆石数目还存在争论, Dodson 等(1988)认为随机分析 60 粒锆石即可满足数理统计的需要, Anderson(2005)认为随机分析不少于 35~70 粒即可。本次研究中红河海底扇 21 粒锆石、东方海底扇 15 粒锆石以及中央峡谷 88 粒锆石,中央峡谷样品基本具有数理统计意义^[16-20]。虽然红河海底扇与东方海底扇有效数据较少,但是也能反映一定的物源信息。由于石油勘探商业原因,本文主要发表了 C2 井测试数据(表 1)。

表 1 C2 井晚中新世海底扇碎屑锆石 U-Pb SHRIMP 定年测试数据

Table 1 SHRIMP U-Pb dating results of detrital zircons from C2 Well in late Miocene submarine fan

测点	$^{206}\text{Pb}^c/\%$	U/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Th / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Th/U	$^{206}\text{Pb}^*$ $/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄/Ma	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄/Ma	不谐和 性/%
1	0.31	345	108	0.32	11.8	252 ± 5.3	272 ± 71	248 ± 10	7
2	0.20	361	53	0.15	21.6	434 ± 8.8	346 ± 47	437 ± 16	-25
3	0.41	856	291	0.35	19.9	171 ± 3.5	129 ± 71	160 ± 6	-33
4	0.17	658	84	0.13	54.6	594 ± 12.0	724 ± 32	625 ± 28	18
5	0.22	461	178	0.40	41.1	635 ± 12.8	628 ± 45	814 ± 21	-1
6	0.14	461	78	0.18	116.3	1659 ± 31.4	1760 ± 13	1807 ± 53	6
7	0.34	672	58	0.09	23.7	258 ± 5.2	229 ± 60	241 ± 23	-13
8	0.40	437	135	0.32	27.1	447 ± 9.6	320 ± 68	421 ± 21	-40
9	0.96	111	101	0.94	8.1	523 ± 11.8	406 ± 116	524 ± 19	-29
10	0.02	456	161	0.36	211.9	2785 ± 46.7	2728 ± 17	2845 ± 66	-2
11	0.04	221	134	0.62	87.3	2438 ± 43.3	2457 ± 11	2359 ± 54	1
12	0.10	615	294	0.49	65.2	749 ± 15.4	748 ± 29	769 ± 19	0
13	0.28	562	72	0.13	34.2	439 ± 8.6	354 ± 43	376 ± 31	-24
14	0.46	859	122	0.15	30.7	261 ± 5.4	70 ± 71	200 ± 19	-272
15	0.72	94	52	0.58	10.1	755 ± 20.3	727 ± 101	773 ± 39	-4
16	0.06	2608	127	0.05	154.3	429 ± 8.1	392 ± 18	404 ± 17	-10
17	0.25	325	159	0.50	39.4	847 ± 16.3	896 ± 46	867 ± 33	5
18	0.50	103	64	0.64	13.7	922 ± 19.2	966 ± 58	908 ± 32	5
19	1.23	283	47	0.17	5.0	129 ± 3.2	325 ± 188	505 ± 31	60
20	0.19	308	164	0.55	19.1	448 ± 9.5	428 ± 51	464 ± 13	-5
21	0.37	558	205	0.38	32.0	415 ± 9.4	366 ± 40	413 ± 12	-14

(续表 1)

测点	$^{206}\text{Pb}^c/\%$	U/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Th/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Th/U	$^{206}\text{Pb}^*$ $/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄/Ma	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄/Ma	不谐和 性/%
22	0.18	540	88	0.17	32.8	440 ± 8.5	431 ± 39	412 ± 16	-2
23	0.45	165	83	0.52	9.9	434 ± 11.0	376 ± 76	452 ± 17	-15
24	1.32	416	497	1.24	60.9	1003 ± 18.8	908 ± 54	1109 ± 27	-10
25	0.54	273	334	1.27	17.7	466 ± 9.4	406 ± 85	465 ± 12	-15
26	0.09	546	186	0.35	93.9	1175 ± 24.4	1154 ± 17	1150 ± 30	-2
27	0.42	155	55	0.37	14.8	677 ± 14.9	658 ± 65	782 ± 32	-3
28	0.87	266	170	0.66	16.2	439 ± 10.5	139 ± 166	414 ± 22	-215
29	2.22	63	82	1.34	6.6	721 ± 18.0	564 ± 232	739 ± 36	-28
30	0.26	302	161	0.55	42.6	977 ± 18.5	958 ± 33	979 ± 25	-2
31	0.11	111	79	0.74	44.3	2461 ± 45.7	2489 ± 15	2409 ± 61	1
32	0.05	578	443	0.79	58.6	718 ± 13.5	717 ± 24	719 ± 16	0
33	0.09	457	175	0.40	112.0	1618 ± 28.1	1719 ± 13	1677 ± 37	6
34	0.06	554	169	0.32	154.7	1812 ± 36.0	1856 ± 23	1801 ± 49	2
35	0.82	436	123	0.29	15.0	251 ± 5.2	125 ± 84	222 ± 12	-101
36	0.15	175	52	0.31	52.8	1939 ± 41.3	2483 ± 15	1865 ± 60	22
37	0.05	376	206	0.56	52.4	967 ± 18.2	972 ± 23	963 ± 22	0
38	0.30	179	79	0.45	24.8	962 ± 18.8	948 ± 45	949 ± 31	-1
39	0.48	309	135	0.45	18.5	433 ± 8.6	351 ± 67	440 ± 15	-23
40	0.40	126	147	1.21	29.2	1538 ± 29.9	1541 ± 32	1510 ± 38	0
41	1.64	187	79	0.44	4.1	160 ± 4.1	82 ± 303	140 ± 18	-96
42	0.22	427	82	0.20	26.5	448 ± 8.7	435 ± 45	450 ± 20	-3
43	0.82	185	121	0.68	20.3	769 ± 15.3	643 ± 80	734 ± 27	-20
44	0.08	155	86	0.57	64.5	2549 ± 43.5	2722 ± 11	2620 ± 60	6
45	0.82	72	90	1.30	20.8	1860 ± 37.0	1767 ± 42	1787 ± 52	-5
46	0.19	314	208	0.68	34.3	769 ± 14.6	671 ± 39	767 ± 19	-15
47	0.36	588	165	0.29	30.3	374 ± 9.4	327 ± 58	362 ± 16	-15
48	0.15	648	76	0.12	40.1	448 ± 8.7	362 ± 35	425 ± 16	-24
49	0.10	833	34	0.04	86.1	731 ± 26.3	764 ± 60	703 ± 65	4
50	0.49	521	134	0.27	18.0	252 ± 5.1	166 ± 91	224 ± 14	-52
51	0.19	58	54	0.96	22.4	2392 ± 57.7	2420 ± 23	2346 ± 77	1
52	0.58	187	203	1.12	6.0	236 ± 5.3	214 ± 110	236 ± 8	-10
53	0.23	642	144	0.23	39.0	439 ± 8.4	476 ± 43	426 ± 16	8

数据测试:北京离子探针中心

3 锆石特征及测年结果

C2井位于琼东南盆地中央峡谷水道,在C2井晚中新世沉积物中,共在53个锆石颗粒上进行了53个点的测定(图2-3)。锆石多呈椭圆状,部分呈现长柱状,颗粒大小约50~150 μm ;在阴极发光图像中,大多数锆石颗粒具有密集平行岩浆环带,表明它们主要来源于花岗岩物源区。大部分锆石颗粒的边界切割内部环带结构,表明它们为碎屑成因;同时,从锆石颗粒磨圆程度较好可以看出这些锆石经过了长距离的搬运。从53个锆石颗粒测试

结果来看,其U、Th含量和Th/U比值存在明显的变化,分别为58~2608 $\mu\text{g}/\text{g}$,34~497 $\mu\text{g}/\text{g}$ 和0.04~1.34(表1)。数据点Th/U比值普遍大于0.1,但是仍然有部分小于0.1(测点7、16和49)。

所测的数据点沿谐和线或靠近谐和线分布,在年龄谱中主要存在6个年龄变化范围:230~300Ma,400~500Ma,700~1000Ma,1700~1900Ma,2400~2500Ma和~2700Ma(图4)。不存在小于200Ma的锆石,最老锆石的年龄为2728±17Ma(测点10)和2722±11Ma(测点44),不谐和度分别为-2%和6%,两颗锆石颗粒具有明显的岩浆环带。

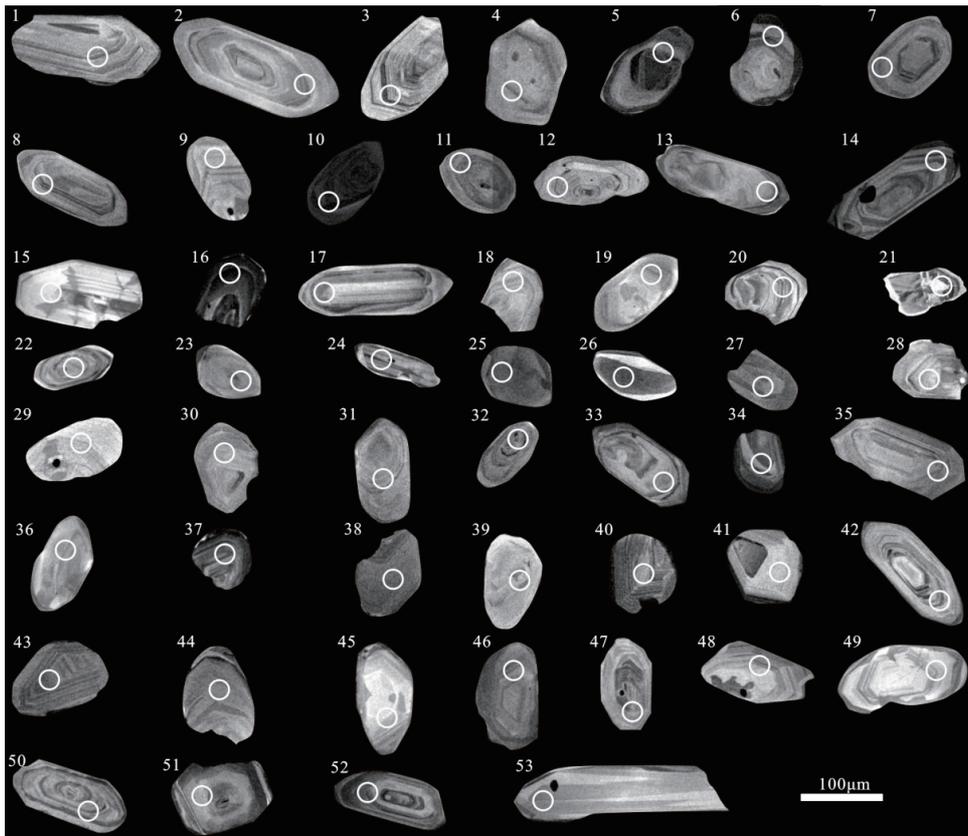


图3 C2井晚中新世红河海底扇碎屑锆石阴极发光影像

Fig. 3 Cathodoluminescence images of detrital zircons from C2 Well in Red River submarine fan

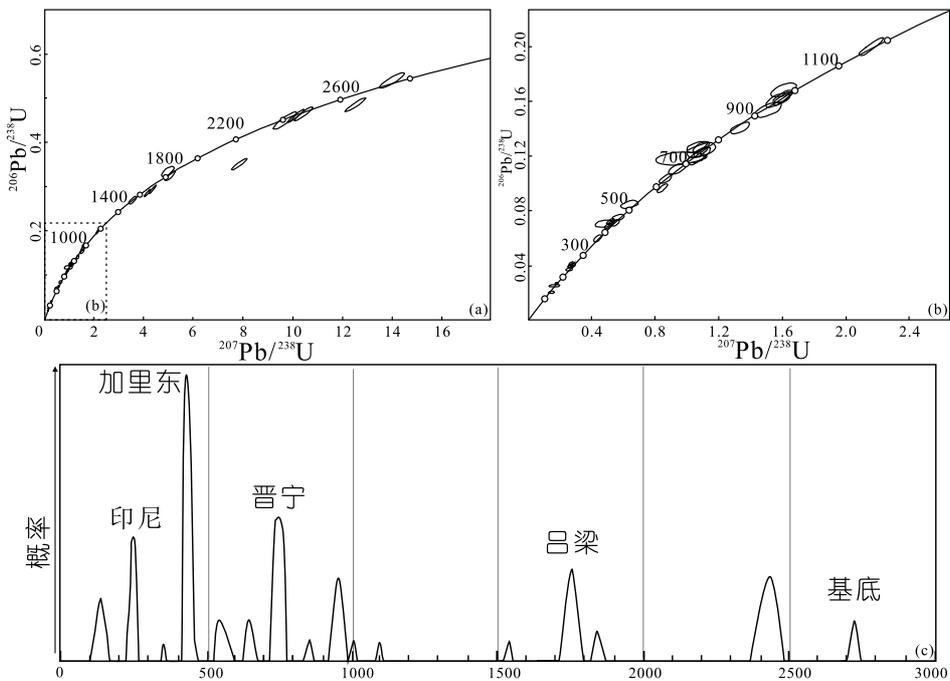


图4 C2井晚中新世红河海底扇碎屑锆石年龄谱和曲线及年龄谱

Fig. 4 U-Pb concordia and age spectrum diagram of detrital zircons from C2 Well

4 讨论

4.1 物源区探讨

综合前人研究成果,对东南亚主要构造单元碎屑锆石 U-Pb 年龄谱特征进行了总结,为讨论 C2 井物源区归属奠定基础。华夏地块锆石年龄分布范围主要在 750~1900Ma 之间(图 4,5a),单峰的特征明显,峰值主要集中在 1400Ma 左右,从河流流域范围来看,仅珠江流经该地块,因此,珠江水系沉积物具有该地块的特征^[21-23]。哀牢山-红河断裂带以具有高变质岩为特征,锆石年龄分布范围较为局限,呈明显的单峰特征,其锆石年龄在 20~35Ma 左右出现明显的峰值(图 4,5b),主要响应于喜马拉雅造山运动^[24-28]。扬子克拉通南部锆石年龄分布呈现两个主峰和一个次峰的特征(图 4,5c):第一个主峰位于 200~250Ma,主要响应于燕山运动;第二个主峰位于 700~1000Ma,与晋宁运动相对应;而次峰位于 1100~1150Ma^[29-31]。松潘-甘孜地块锆石年龄分布较广,从 200Ma 到 2700Ma 均有发育,整体上表现为三个主峰和一个次峰(图 4,5d):主峰主要分布在 250~300Ma、400~500Ma 和 1800~2000Ma,分别与东南亚所发生的印支运动、加里东造山运动、吕梁运动相对应^[32];次峰分布于 2500Ma 左右,代表了古老的扬子克拉通的基底^[33-36]。印度支那中部的呵叻高原-昆嵩地块锆石年龄集中于 200~300Ma(图 4,5e),与印支运动相对应,而与加里东造山运动、吕梁运动相对应的锆石发育较少^[28,37-39]。位于西藏中部的羌塘地块的锆石年龄分布较为单一(图 5f),主要分布于 200~300Ma 之间,与印支运动相对应^[40-41]。

湄公河与红河沉积物锆石年龄分布较为相似(图 4,5g 和图 4,5h),均发育 200~300Ma、400~500Ma、1700~1800Ma 和 2500Ma 左右的锆石^[42]。但是两者在 2 个区域存在明显的差别,可据此将两条河流的沉积物加以区分:第一区域位于 700~1000Ma,即与晋宁运动相对应的锆石年龄区域,因红河水系切割扬子板块南部而湄公河水系并没有切至扬子板块,因此在红河沉积物中 700~1000Ma 的锆石较为发育;第二区域为小于 500Ma 区域,特别是在 210~290Ma 一带,湄公河沉积物锆石年龄发育 210~290Ma,而红河沉积物较年轻的锆石不发育,仅发育 230~290Ma 的锆石,从河流流域以及各地块锆石年龄分布特征来看,230~290Ma 的锆石应

来自呵叻高原-昆嵩地块,而湄公河所发育的 210~230Ma 锆石应来自羌塘地块^[42]。经过上述分析可以看出,东南亚各主要构造单元以及向南流动的主要河流沉积物的锆石年龄分布特征存在明显的不同,因此可以利用沉积物的锆石年龄的分布特征对其物源区归属或流域归属问题进行判定^[42]。

就 C2 井位置来看,对其晚中新世的沉积物来源问题主要存在三种观点:第一种观点认为该井沉积物来自海南岛南部,因为 C2 井离海南岛南部最近;第二种观点认为该井沉积物来自湄公河,其理由为 C2 井位置与湄公河东西向流动段几乎在一条直线上,推断湄公河可能在历史时期发生决口,在 C2 井处形成巨厚的海底扇;第三种观点认为该海底扇来自于红河水系,其依据为该扇体与同期红河三角洲沉积物重矿物组合特征较为相似。

从 C2 井晚中新世海底扇锆石年龄谱特征来看,锆石年龄主要存在 6 个年龄变化范围:230~300Ma,400~500Ma,700~1000Ma,1700~1900Ma,2400~2500Ma 和 ~2700Ma,主要对应于印支期、加里东期、晋宁期、吕梁期和基底。从锆石 SHRIMP U-Pb 年龄来看(图 4,5),并不存在小于 200Ma 的锆石,可以说明海南岛并不是该扇体的主要物源^[43];从样品测试的锆石年龄图谱上来看,其形态特征与湄公河和红河相似;但是从内部特征来看,该海底扇的锆石年龄在 700~1000Ma 较为发育,并且在测试数据中并不存在 210~230Ma 的锆石,这些特征与红河最为相似。

另外,在晚中新世沉积物的稀土元素配分模式中,红河三角洲、湄公河以及海南岛沉积物均表现为轻稀土元素富集,重稀土元素亏损的特征,其中湄公河与海南岛沉积物表现为明显的负铕异常,表明其物源区中酸性岩成分占有重要地位,而红河三角洲沉积物表现为明显的正铕异常,说明沉积物来源中基性岩/深部物质占有重要地位;而从 C2 井海底扇的稀土元素配分模式中可以看出其具有明显的正铕异常,与红河三角洲沉积物最为相似(图 6)。根据上述特征可认为该扇体沉积物可能来自于红河物源。

通过与红河流域各地块的锆石年龄特征对比可以进一步分析:230~300Ma 的锆石主要来自呵叻高原-昆嵩地块;400~500Ma、1700~1900Ma 的锆石来自松潘甘孜地块,与 Bruguier 等^[34]在 1997 年利用铀铅法所测得锆石年龄相比,C2 井测点 2、16、

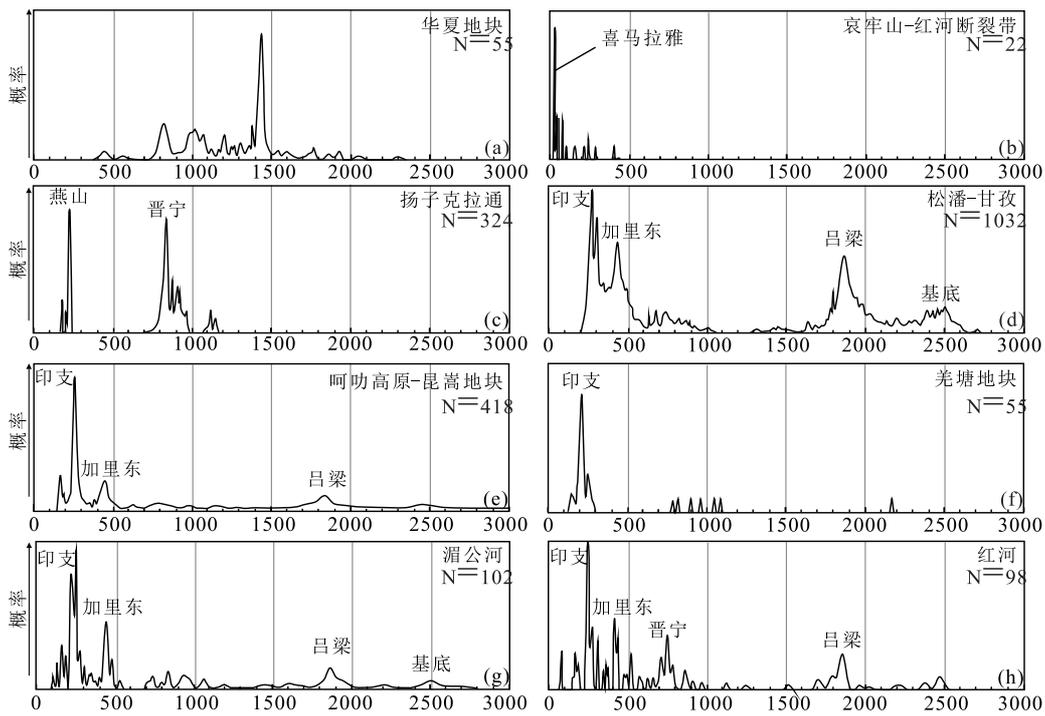


图5 东南亚主要地块、红河及湄公河锆石年龄谱(据参考文献^[42])

Fig. 5 Age spectrum diagram for U-Pb ages measured from detrital zircons in the Red and Mekong Rivers (after Clift, 2006)

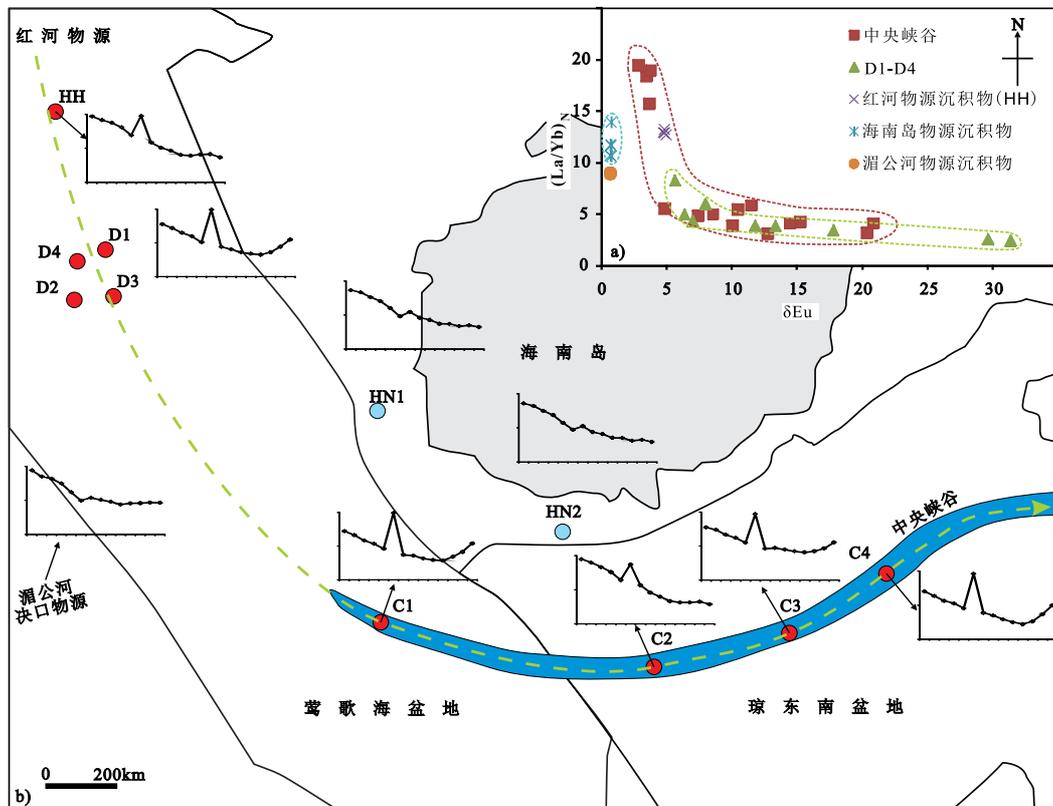


图6 湄公河、海南岛、红河三角洲及 C2 井红河海底扇沉积物稀土元素配分模式

Fig. 6 The Distribution patterns of rare earth elements in sediments of Mekong, Hainan Island, Red River Delta and C2 well in Red River submarine-fan

23 和 39 可与年龄为 432Ma 的锆石相对比,测点 6、45 可与年龄为 1762Ma 的锆石相对比。在 700 ~ 1000Ma 区间内,测点 17 与测点 18 等年龄可与 Li 等^[29]于 1999 年利用铀铅法所测年龄为 842Ma 和 923Ma 的锆石相对比,推测 C2 井中该部分锆石来自扬子克拉通;2400 ~ 2500Ma 和 ~ 2700Ma 的锆石可与松潘甘孜地块古老的扬子克拉通的基底中锆石相对比。

4.2 “红河袭夺”事件

Clark 于 2004 年基于青藏高原东南缘的地形学研究,依据古河流体系规模控制沉积物通量大小的原理提出了“红河袭夺”的观点,其认为:现今流经青藏高原东南缘的河流(金沙江等)在历史时期是经由红河注入南海,淞虹-莺歌海盆地为沉积中心,而后期由于高原的隆升造成了古河流体系的分离,红河流域发生袭夺,红河流域面积减小,搬运到沉积盆地中的沉积物总量也随之变小,并认为“红河袭夺”发生的时期可能是中新世^[12]。然而红河袭夺的时间及规模一直是争论的热点问题:有些学者通过热年代学的数据研究认为古红河水系被金沙江截断的时间发生在始新世^[44];也有学者基于物质平衡原理,通过相对于区域夷平面剥蚀厚度与南中国海盆地沉积岩体积研究认为红河流域发生袭夺的时间为渐新世^[45]。

近期大量的研究表明,30Ma 以来沉积于莺歌海盆地的沉积物总量为 385000 km³,通过化学风化损失调整后^[46]相当于 504350 km³剥蚀岩体,这说明如果按照现今红河流域面积(143000 km²)来估算,流域内 30Ma 以来应被整体削减 3.53 km,或者古红河水系流域面积更大。但是,目前并没有直接的证据来限制古红河流域的面积和物源区的大小,同时莺歌海盆地可能存在多个物源(海南岛和越南西部物源)的影响,故不能确定古红河流域面积与现今相比相似还是更大。

C2 井红河海底扇中 400 ~ 500Ma、1700 ~ 1900Ma 的锆石以及大于 2.4Ga 的锆石,通过物源区分析后可以断定其来自松潘-甘孜地区以及该区的扬子克拉通基底,说明在晚中新世时期,古红河水系源头曾经延伸至松潘-甘孜地区;而从现今的红河流域来看,源头发育在扬子克拉通南部(图 1),从此可以说明在晚中新世时期古红河水系的流域应该大于现今的红河流域,在随后的上新世或第四纪某个时期红河水系被金沙江等水系袭夺,流域变

小。因为红河袭夺的发生将导致红河流域的面积、沉积物供给总量的减小,该转变在红河沉积体系上有所反映(如红河沉积体系的规模突变等),红河袭夺发生的具体时间可以通过红河沉积体系的演化特征进一步确定。通过红河沉积体系演化研究,上新世以来,红河沉积体系组成发生了明显的变化,以 3.6Ma 为界可划分为两个演化阶段。第一阶段为 5.5 ~ 3.6Ma,该阶段红河三角洲、限制性深水扇以及中央峡谷非常发育,限制性的红河海底扇发育受池状可容纳空间的限制,发育部位位于沉积中心附近,沉积速率在 4.2 ~ 5.5Ma 可达 1200m/Ma,平均为 180m/Ma,在 3.6Ma ~ 4.2Ma 最高达 2400m/Ma,平均为 516m/Ma。由于红河断裂的右旋走滑运动,造成莺歌海盆地结合部发生拉张沉降而形成池状可容纳空间,形成限制性红河深水扇,并由于高原隆升导致了红河水系沉积物供给能力增强,使得沉积物充满池状可容纳空间后发生溢出,并在重力的作用下向东侵蚀地层而形成中央峡谷,该时期是中央峡谷发育的主要时期。第二阶段为 3.6 ~ 1.8Ma,红河沉积体系再次发生重大变化,在该阶段,以红河沉积体系主体(红河三角洲、红河海底扇和中央峡谷)不发育为特征,而以莺歌海盆地东部槽坡向西南快速推进为特征。在 3.6Ma 红河沉积体系发生了重大突变,红河水系沉积物供给能力突然减弱,莺-琼盆地沉积速率由 516m/Ma 骤降到 96m/Ma。因此,推断红河袭夺发生的时间可能为 3.6Ma。

5 油气勘探意义

C2 井位于琼东南盆地中央峡谷水道,碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年龄频谱特征与红河最为相似,说明红河物源已经影响到中央峡谷水道。指示了红河入海后,沉积物沿着莺歌海盆地、同时也向琼东南盆地中央峡谷水道搬运沉积,即中央峡谷水道可能存在红河物源的储层发育,这具有重要的深水油气勘探意义。因此,该认识为在南海西部盆地琼东南盆地中央峡谷水道实施油气勘探提供了重要的理论基础,为南海深水油气勘探指出了一个新的领域,并且 XXX 勘探井在琼东南盆地深水区中央峡谷水道获得重大商业突破^[47]。

6 结论

(1)晚中新世红河海底扇碎屑锆石 SHRIMP U-

Pb 年龄主要存在 6 个年龄范围,分别为:230 ~ 300Ma,400 ~ 500Ma,700 ~ 1000Ma,1700 ~ 1900Ma,2400 ~ 2500Ma 和 ~ 2700Ma,锆石年龄频谱特征与红河最为相似,故推定红河海底扇体主要来自于红河物源。

(2) 对比分析认为:230 ~ 300Ma 和 2400 ~ 2500Ma 的锆石主要来自呵叻高原-昆嵩地块;400 ~ 500Ma、1700 ~ 1900Ma 的锆石来自松潘甘孜地块;700 ~ 1000Ma 的锆石来自扬子克拉通;大于 2.4Ga 的锆石来自松潘甘孜地块古老的扬子克拉通的基底。

(3) 晚中新世红河海底扇中具有年龄为 400 ~ 500Ma、1700 ~ 1900Ma 以及大于 2.4Ga 的锆石,说明古红河源头曾经延伸至松潘-甘孜地区,“红河袭夺”现象确实存在。

(4) 琼东南盆地中央峡谷水道碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年龄频谱特征与红河相似,说明红河物源已经影响到中央峡谷水道,这在琼东南盆地中央峡谷水道实施深水油气勘探提供了重要的理论基础,且深水油气勘探现已取得重大商业突破。

参考文献:

- [1] Clark M K, Schoenbohm L M, Royden L H, et al. Surface uplift, tectonics, and erosion of Eastern Tibet from large-scale drainage patterns [J]. *Tectonics*, 2004, 23: TC1006.
- [2] Clift P, Lee J I, Clark M K, et al. Erosional response of South China to arc rifting and monsoonal strengthening; a record from the South China Sea [J]. *Marine Geodesy*, 2002, 184: 207-26.
- [3] Yi Y, Andrew C, Carl P, et al. Understanding sedimentation in the Song Hong-Yinggehai Basin, South China Sea [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2011, 12: 1-5.
- [4] 韩建辉. 南海西北部复杂陆坡地质特征演化及油气成藏条件 [D]. (博士学位论文). 北京: 中国石油大学(北京), 2009.
- [5] 王英民, 徐强, 李冬, 等. 南海西北部晚中新世的红河海底扇 [J]. *科学通报*, 2011, 56: 781-87.
- [6] 李冬. 南海红河沉积体系沉积过程响应 [D]. 博士学位论文. 北京: 中国石油大学(北京), 2011: 1-100.
- [7] 李冬, 王英民, 王永凤, 等. 红河深水扇沉积物重力流特征 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2011, 35: 13-9.
- [8] 董春艳, 李才, 万渝生, 等. 西藏羌塘龙木错-双湖缝合带南侧奥陶纪温泉石英岩碎屑锆石年龄分布模式: 构造归属及物源区制约 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41: 299-308.
- [9] 万渝生, 刘敦一, 董春艳, 等. 西峡北部秦岭群变质沉积岩锆石 SHRIMP 定年: 物源区复杂演化历史和沉积、变质时代确定 [J]. *岩石学报*, 2011, 27: 1172-1178.
- [10] 万渝生, 张巧大, 宋天锐. 北京十三陵长城系常州沟组碎屑锆石 SHRIMP 年龄: 华北克拉通盖层物源区及最大沉积年龄的限定 [J]. *科学通报*, 2003, 48: 1969-1975.
- [11] 高林志, 张传恒, 史晓颖, 等. 华北古陆下马岭组归属中元古界的锆石 SHRIMP 年龄新证据 [J]. *科学通报*, 2008, 53: 2617-2623.
- [12] 张建光, 姚光庆, 陈亚兵, 等. 南襄盆地泌阳凹陷深水湖底扇厘定及碎屑锆石 U-Pb 年代学物源追踪 [J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2011, 36: 1105-1117.
- [13] 朱弟成, 赵志丹, 牛耀龄, 等. 西藏拉萨地块过铝质花岗岩中继承锆石的物源区示踪及其古地理意义 [J]. *岩石学报*, 2011, 27: 1917-1930.
- [14] 贾军涛, 郑洪波, 杨守业, 等. 长江流域岩体的时空分布与碎屑锆石物源示踪 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, 38: 1375-1380.
- [15] 向芳, 杨栋, 田馨, 等. 湖北宜昌地区第四纪沉积物中锆石的 U-Pb 年龄特征及其物源意义 [J]. *矿物岩石*, 2011, 31: 106-114.
- [16] Dodson M H, Compston W, Williams I S, et al. A search for ancient detrital zircons [J]. *J. Geol. Soc. London*, 1988, 145: 977-983.
- [17] Andersen T. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: Limiting conditions from statistics and numerical simulation [J]. *Chem. Geol.*, 2005, 216: 249-270.
- [18] Black L P, Kamo S L, Allen C M, et al. TEMORAL: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology [J]. *Chem. Geol.*, 2003, 200: 155-170.
- [19] Ludwig K R. *Squid 1.02; A user's manual* [M]. Berkeley Geochronol Centre Spec. Publ., 2001, 2: 1-19.
- [20] Black L P, Kamo S L, Williams I S, et al. The application of SHRIMP to Phanerozoic geochronology: A critical appraisal of four zircon standards [J]. *Chem. Geol.*, 2003, 200: 171-188.
- [21] Li X, Tatsumoto M, Premo W R, et al. Age and origin of the Tanghu Granite, southeastern China: Results from U-Pb single zircon and Nd isotopes [J]. *Geology*, 1989, 17: 395-399.
- [22] Li X H, Zhou H, Chung S L, et al. Geochemical and Sm-Nd isotopic characteristics of metabasites from central Hainan Island, South China and their tectonic significance [J]. *Island Arc*, 2002, 11: 193-205.
- [23] Li W X, Li X H, Li Z X. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance [J]. *Precambrian Res.*, 2005, 136: 51-66.
- [24] Schärer U, Tapponnier P, Lacassin R, et al. Intraplate tectonics in Asia: A precise age for large-scale Miocene movement along the Ailao Shan-Red River shear zone, China [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1990, 97: 65-77.
- [25] Schärer U, Zhang L S, Tapponnier P. Duration of strike-slip movements in large shear zones: The Red River Belt [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1994, 126: 379-397.
- [26] Zhang L S, Schärer U. Age and origin of magmatism along the Cenozoic Red River shear belt, China [J]. *Contrib. Mineral*

- Petrol. , 1999,134:67 – 85.
- [27] Nagy E A, Scharer U, Nguyen T M. Oligo-Miocene granitic magmatism in central Vietnam and implications for continental deformation in Indochina [J]. *Terra Nova*, 2000, 12:67 – 76
- [28] Carter A, Roques D, Bristow C, et al. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia; Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogeny) in Vietnam [J]. *Geology*, 2001, 29:211 – 214.
- [29] Li X H. U-Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze Block; Timing of Neoproterozoic Jinning orogeny in SE China and implications for Rodinia assembly [J]. *Precambrian Res*, 1999, 97: 43 – 57.
- [30] Ling W, Gao S, Zhang B, et al. Neoproterozoic tectonic evolution of the northwestern Yangtze Craton, South China; Implications for amalgamation and break-up of the Rodinia supercontinent[J]. *Precambrian Res*, 2003,122: 111 – 140.
- [31] Yang J H, Chung S L, Wilde S A, et al. Petrogenesis of postorogenicyenites in the Sulu orogenic belt, east China; Geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence [J]. *Chem. Geol*, 2005, 214: 99 – 125.
- [32] Chen J F, Jahn B M. Crustal evolution of southeastern China; Nd and Sr isotopic evidence [J]. *Tectonophysics*, 1998, 284: 101 – 133.
- [33] Zheng J, Griffin W L, O'Reilly S L, et al. Widespread Archean basement beneath the Yangtze craton [J]. *Geology*, 2006, 34: 417 – 420.
- [34] Bruguier O, Lancelot J R, Malavielle J. U-Pb dating on single detrital zircon grains from the Triassic Songpan-Ganze Flysch (central China); Provenance and tectonic correlations [J]. *Earth Planet. Sci. Lett*, 1997, 152: 217 – 231.
- [35] Wang P L, Lo C H, Chung S L, et al. Onset timing of left-lateral movement along the Ailao Shan-Red River shear zone; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating constraint from the Nam Dinh area, northeastern Vietnam [J]. *Asian Earth Sci.*, 2000, 18: 281 – 292.
- [36] Weislogel A L, Graham S A, Chang E Z, et al. Detrital zircon provenance of the Late Triassic Songpan-Ganzi complex; Sedimentary record of collision of the North and South China blocks [J]. *Geology*, 2006, 34: 97 – 100.
- [37] Nagy E A, Maluski H, Lepvrier C, et al. Geodynamic significance of the Kontum Massif in central Vietnam; Composite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and U-Pb ages from Paleozoic to Triassic [J]. *J. Geol.* 2001, 109: 755 – 770.
- [38] Carter A, Moss S J. Combined detrital-zircon fission-track and U-Pb dating: A new approach to understanding hinterland evolution [J]. *Geology*, 1999, 27: 235 – 238
- [39] Carter A, Bristow C S. Linking hinterland evolution and continental basin sedimentation by using detrital zircon thermochronology: A study of the Khorat Plateau basin, eastern Thailand [J]. *Basin Res.*, 2003, 15: 271 – 285.
- [40] Roger F, Leloup P H, Jolivet M, et al. Long and complex thermal history of the Song Chay metamorphic dome (northern Vietnam) by multi-system geochronology [J]. *Tectonophysics*, 2000, 321: 449 – 466.
- [41] Roger F, Arnaud N, Gilder S, et al. Geochronological and geochemical constraints on Mesozoic suturing in east central Tibet [J]. *Tectonics*, 2003, 22:1037 .
- [42] Clift P D, Carter A, Campbell I H, et al. Thermochronology of mineral grains in the Red and Mekong Rivers, Vietnam: Provenance and exhumation implications for Southeast Asia [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2006, 7:1 – 28.
- [43] Yan Y, Carter A, Xia B, et al. A fission-track and (U-Th)/He thermochronometric study of the northern margin of the South China Sea; An example of a complex passive margin [J]. *Tectonophysics*, 2009, 474: 584 – 594.
- [44] Richardson N J, Densmore A L, Seward D, et al. Did incision of the Three Gorges begin in the Eocene [J]. *Geology*, 2010, 38: 551 – 554.
- [45] Clift P D, Blusztajn J, Nguyen A D. Large-scale drainage capture and surface uplift in eastern Tibet-SW China before 24 Ma inferred from sediments of the Hanoi Basin, Vietnam [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, 33: L19403, doi: 10.1029/2006GL027772.
- [46] Moon S, Huh Y, Qin J, et al. Chemical weathering in the Hong (Red) River basin; Rates of silicate weathering and their controlling factors [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2007, 71: 1411 – 1430.
- [47] 朱伟林, 米立军, 高阳东, 等. 领域性突破展现中国近海油气勘探前景——2011 年中国近海油气勘探回顾[J]. *中国海上油气*, 2012, (01): 5 – 9.

SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons: Discussions on provenance control and the Red River Capture Event

Xu Qiang¹, Li Dong¹, Zhu Weilin², Wang Yingmin³

(1. *CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China*; 2. *China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100010, China*; 3. *China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*)

Abstract: A huge Red River submarine fan has been discovered recently in Upper Miocene along the northwestern margin of the South China Sea. To further explore the provenance of the submarine fan and the controversial issue of the Red River capture, SHRIMP U-Pb ages of detrital zircons have been measured using the samples recovered from the well S which intersected the fan. The result shows: 1. Six main age intervals have been recognized in the zircon grains of the Red River submarine fan, which are 230-300Ma, 400-500Ma, 700-1000Ma, 1700-1900Ma, 2400-2500Ma and ~2700Ma, respectively. The age distribution spectrum of zircons displays a good similarity with the Red River drainage area. It thus can be inferred that the zircons between 230-300Ma are mainly from the Khorat Plateau-Kon Tum block. Zircons of 400-500Ma and 1700-1900Ma are linked with the Songpan-Ganze block, and the 700-1000Ma zircons are considered to be from the Yangtze Craton. Zircons with the age of 2400-2500Ma and ~2700Ma are related with the ancient basement of Yangtze Craton within Songpan-Ganze block. 2. The zircon grains of the Red River submarine fan, including the ages of 400-500Ma, 1700-1900Ma and older than 2.4 Ga, are proved to exist in the Songpan-Ganze block. It indicates that the Red River had once extended into the Songpan-Ganze block, holding a far more larger drainage area than today. The general decrease of the drainage area today implies that the Red River be once captured. 3. The samples of zircon grains are mainly from the late-Miocene Red River fan, suggesting the Red River had not been captured by the Late Miocene. Once took place, this capture would be inevitable to cause a dramatic decrease in the drainage area and the according loss of the sediment supply, both of which would be recorded in the basin fill. Subsequently, the timing of the Red River capture can be identified through the careful investigation on the evolution history of the Red River depositional systems, as well as the calculations of parameters such as the sediment flux or total volume.

Key words: Red River submarine-fan; detrital zircon; SHRIMP U-Pb age; provenance; Red River Capture