中国科学: 地球科学 2017 年 第 47 卷 第 12 期: 1460 ~ 1468
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

南海西沙隆起基底成因新认识

朱伟林[1], 解习农[2], 王振峰[3], 张道军[3], 张成立[4], 曹立成[1], 邵磊[1*]

1. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092;
2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074;
3. 中海石油中国有限公司湛江分公司, 湛江 524057;
4. 西北大学地质学系, 西安 710069

* 通讯作者, E-mail: lshao@tongji.edu.cn

收稿日期: 2017-01-09; 接受日期: 2017-07-31; 网络版发表日期: 2017-09-01
国家科技重大专项项目(编号: 2017ZX05-26-005)和国家自然科学基金项目(批准号: 91128207、41576059)资助

摘要 基底年龄对重建海洋区域的构造演化历史具有重要意义. 南海西沙隆起盆地基底方面的研究主要局限在重磁和地震资料以及20世纪70年代西永一井的分析资料上, 长期没有新的突破. 本文针对新获取的西科一井两个基底样品开展了岩石学分析和锆石U-Pb同位素测年, 来研究西沙群岛基底的形成时间及构造属性. 结果表明, 基底成分为晚侏罗世角闪斜长片麻岩, 锆石$^{206}Pb/^{238}U$平均年龄为(152.9±1.7)Ma, 但是最年轻年龄为(137±1)Ma, 说明变质作用结束时间大致在早白垩世. 变质岩底部与二长花岗岩突变接触, 为早白垩世晚期((107.8±3.6)Ma)岩浆侵入的结果, 与西永一井早期测得的前寒武纪基底年龄(全岩Rb-Sr法, 627Ma)明显不同, 西科一井的基底锆石都属于晚中生代岩浆活动的产物. 晚侏罗世-早白垩世的区域变质作用和花岗质岩浆侵入不仅出现于西沙, 在南海的珠江口盆地和南沙群岛等区域都有报道, 与东亚陆缘受到古太平洋板块大规模、长时间的俯冲密切相关, 其可能导致了中特提斯洋在南海的关闭. 对于南海是否发育有统一的前寒武纪变质结晶基底仍存在争议, 但是可以肯定的是, 中生代板块俯冲挤压与新生代裂陷拉张已经显著改造了南海地区的原始基底.

关键词 南海, 西沙, 基底, 中生代, 锆石定年

1 引言

南海地处欧亚板块、印-澳板块和太平洋板块的交汇位置, 具有特殊的大地构造背景, 地质演化特征复杂. 20世纪70年代以来, 南海的形成演化逐步成为全球研究热点(Cullen等, 2010; Franke等, 2014; Kido等, 2001; Li等, 2014; 周蒂等, 2005). 特别是1999年的大洋钻探计划(ODP)184航次和2014年、2017年的国际大洋发现计划(IODP)三个新的航次(349、367、368)将南海的深海地质研究工作推到了新高度. 相对而言, 对南海扩张之前所经历的地质过程了解的还不够深入.

基底是盆地形成的物质基础, 也与盆地的持续演化和油气的运移聚集密切相关(Braitenberg等, 2006). 20世纪80年代以来, 前人通过地球物理和地震资料对南海北部新生代盆地基底开展了一系列研究. 然而, 现有的地震资料主要是针对浅部地层设计采集的, 前

中文引用格式: 朱伟林, 解习农, 王振峰, 张道军, 张成立, 曹立成, 邵磊. 2017. 南海西沙隆起基底成因新认识. 中国科学: 地球科学, 47: 1460–1468, doi: 10.1360/N072017-00011
英文引用格式: Zhu W L, Xie X N, Wang Z F, Zhang D J, Zhang C L, Cao L C, Shao L. 2017. New insights on the origin of the basement of the Xisha Uplift, South China Sea. Science China Earth Sciences, 60: 2214–2222, doi: 10.1007/s11430-017-9089-9

© 2017 《中国科学》杂志社 www.scichina.com

新生界以下的地震资料信噪比低, 资料品质较差. 此外, 由于上覆沉积物埋深巨大, 目前钻遇前新生界地层或基底的井位仍分布有限, 造成对盆地前新生代基底的认识还存在不同意见(刘海龄等, 2004; 刘以宣和詹文欢, 1994; 谢锦龙等, 2010; 鲁宝亮等, 2011), 但是, 总体上一致认为以琼海断裂和阳江-一统暗沙东断裂为界(图1), 基底年龄呈现出自西向东逐渐变小的趋势(孙晓猛等, 2014). 早期研究认为南海西北部地区是在前寒武纪结晶基底上发育起来的, 其中最主要的依据之一就是70年代在西沙群岛西永一井获得的前寒武纪变质岩. 基底风化壳以下, 沉积变质岩主要由灰色、灰绿色花岗片麻岩和黑云二长片麻岩组成, 全岩Rb-Sr法同位素测年结果为6.27亿年(王崇友等, 1979). 在西永一井的约束下, 地震-重磁联合解释随后在珠江口盆地西部和琼东南盆地识别出可能代表前寒武纪基底的构造层. 岳军培等(2013)认为南海北部的结晶基底与福建下-中元古界迪口组、广东上元古界云开群和海南岛中元古界抱板群具有一定的可比性, 代表了华夏古陆的一部分. 但是, 也有观点认为西沙群岛的变质结晶基底是中南半岛昆嵩地块的东侧延伸(Liu等, 2011).

尽管西沙前寒武纪的基底年龄被学者们广泛采用, 早期应用全岩Rb-Sr法来测定的西永一井变质岩的年龄很可能不具有特定的地质意义(Dickin, 2005). 其原因是一方面难以保证分析的样品为典型的正变质岩, 另一方面该Rb-Sr等时线不是用一块标本测定的, 分析得出的年代结果是偏老的. 孙嘉诗(1987)对该前寒武纪的年龄提出质疑, 随后采用K-Ar法重新测定基底岩石末次变质事件的年龄为96Ma, 从而推论西沙基底形成的时间应介于古生代和中生代之间(627~96Ma). 针对西沙基底年龄的不确定性, 本次研究对新获取的西科一井基底样品进行了岩石薄片鉴定和锆石U-Pb测年分析, 来重新认识西沙基底的形成时间. 锆石作为一种广泛分布于各类岩石中的副矿物, 稳定性较强, 可经受多期的沉积循环和中等强度的变质作用而不发生改变. 锆石U-Pb同位素体系的封闭温度是目前已知矿物中最高的, 这使得它成为确定各种高级变质作用峰期年龄和岩浆岩结晶年龄的理想对象. 西沙隆起基底成分及年代学的研究不仅有助于阐明南海北部前新生代相邻板块的构造演化过程, 而且对中生代残余盆地的油气勘探有重要指导意义.

2　构造背景

伴随着泥盆纪早期古特提斯洋的形成, 印支、华南和华北等陆块由冈瓦纳古陆东北缘裂离, 并逐渐向北漂移至现今的位置附近(Metcalfe, 2013). 自三叠纪至晚白垩纪, 巽他古陆和欧亚大陆东侧受到古太平洋板块长期的俯冲挤压, 在活动大陆边缘发育了大规模的岩浆活动, 造成了地壳的显著不均一性(Pubellier和Morley, 2014). 随后, 新生代早期南海北部陆壳强烈的拉张减薄进一步破坏了早期的基底结构, 并且南海东部的大陆边缘相对于西部拉伸程度更加强烈(Hayes和Nissen, 2005; Bai等, 2015). 中中新世南海停止扩张之后, 海盆及周缘地区仍伴随着阶段性的板内岩浆作用

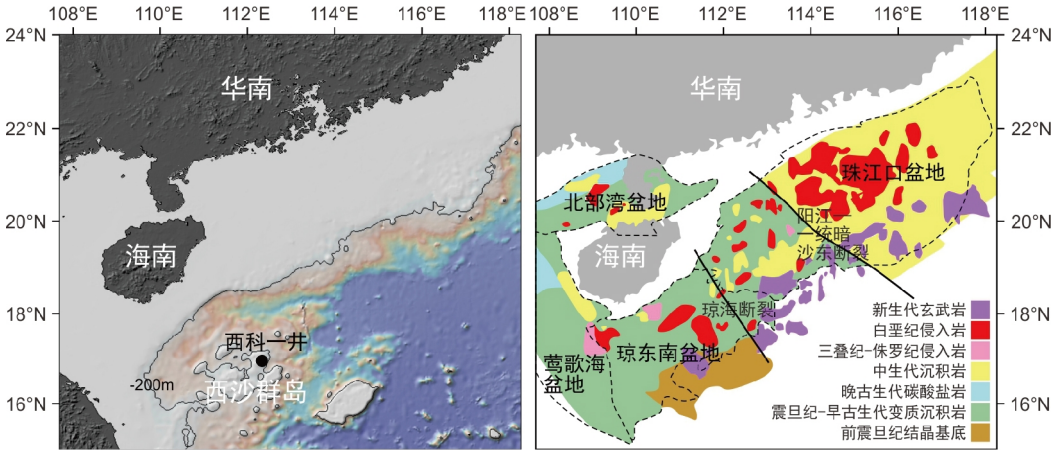


图 1　西科一井地理位置与南海北部基底岩性图

据孙晓猛等(2014)修改

(Huang等, 2013). 因此, 南海地区原始基底的成分和结构经历了多阶段构造活动的改造. 已有的重磁和地震勘测表明, 南海北部陆缘自北向南、自西向东地壳逐渐减薄(Wang等, 2006), 发育有陆壳、过渡型地壳和洋壳. 在基底之上发育了一系列新生代裂陷盆地, 由西向东分别为莺歌海盆地、琼东南盆地和珠江口盆地(图1).

研究地区西沙群岛位于南海西北部陆缘, 由一系列岛屿和暗礁组成, 西邻海南岛和越南陆架, 北濒西沙海槽, 东南方向与南海海盆和中沙群岛相接. 黄海波等(2011)发现, 西沙群岛的地壳厚度为26~28km, 代表了略有减薄的大陆型地壳. 在基底顶部直接覆盖着1~2km厚的低速层, 横波速度只有2.0~2.2km s^{-1}, 代表了新近纪持续的碳酸盐沉积. 相对于上地壳, 该区域下地壳存在明显的低速层(平均横波速度为3.5km s^{-1}), 认为这与地幔深部热活动引起的韧性流变构造和岩石矿物定向排列产生的各向异性有关. 西沙至中沙地区, 以正负相间的团块状弱磁异常为主, 整体背景值较低(−100~100nT). 有学者认为较低的磁异常背景代表了弱磁性的前寒武纪变质基底, 而局部的磁力高值可能由磁性较强的侵入岩体所引起(郝天珧等, 2009).

在西沙海域周围的主要断裂系统中, 西沙海槽的构造属性尤为重要. 根据早期的地震剖面和重力资料, Nissen等(1995)认为西沙海槽地壳向南表现出减薄的趋势, 两侧的地壳结构不对称. 姚伯初等(1994)则认为西沙海槽属于一条古缝合线, 西沙-中沙地区归属于印支地块. 但是, 随后横跨西沙海槽的OBH1996-IV测线识别出海槽两侧具有相似的地壳/上地幔结构, 莫霍面强烈上隆导致了地壳呈中间薄、两边厚的典型拉张裂谷特征(Qiu等, 2001). 此外, 该处在磁力上表现为条带状的高值正磁异常, 可能由基性-超基性物质反磁化或者海槽北缘强磁性隐伏岩石的斜磁化所引起(张永军等, 2009).

3 材料和方法

西沙群岛早期已有4口科研钻井(西永一井、西永二井、西琛一井和西石一井), 其中只有西永一井钻穿了近1251m的生物礁地层. 西科一井是中海油湛江分公司于2013年在西沙群岛宣德环礁上的石岛进行的一口科学探测井(图1), 海拔高度1.5m, 井深1268.2m, 是目前西沙群岛勘探中取芯最完整的钻井. 该井基底岩石与上覆1257.5m厚的新生代碳酸盐沉积序列不整合接触. 本次研究获取的两个基底岩石样品见图2, 采样深度分别为1258.5m(XK1-1)和1261.5m(XK1-2).

在正交偏光显微镜下, 详细鉴定了岩石中的主要矿物成分、含量和结构构造, 进行岩石定名.

取自1258.5m深度岩芯XK1-1样品为深灰色角闪斜长片麻岩, 主要由斜长石(46%)、普通角闪石(11%)、黑云母(23%)和石英(12%)及钾长石(8%)组成, 含少量绿帘石、磷灰石、榍石和锆石等副矿物. 矿物大小介于10~0.2mm, 浅色矿物晶体普遍大于暗色矿物, 部分长石颗粒达10mm, 板状晶形. 暗色矿物晶体略小于浅色矿物, 多介于4~0.2mm. 多数矿物新鲜、未发生次生蚀变, 部分钾长石发生了泥化、吸附3价铁呈现出淡褐红色. 矿物定向排列明显, 由富浅色矿物层和富暗色矿物层互层组成, 构成中粗粒片麻状构造(图2b), 局部可见普通角闪石或斜长石矿物之间呈现三连点的平衡结构(图2f), 定名角闪斜长片麻岩. 角闪斜长片麻岩产出深度为1257.52~1260.52m, 顶部与结晶灰岩呈角度不整合接触, 两者之间可见风化壳(图2a), 部分岩石发生了碎裂, 其裂隙被后期方解石脉充填(图2c). 此外, 在1260.52m处, 角闪斜长片麻岩明显被花岗岩侵入呈侵入关系, 在接触面上片麻岩发生一定蚀变作用, 角闪石和黑云母均发生了绿泥石化, 长石也有较强的泥化及绢云母化, 但这些矿物整体仍保持定向排列(图2d、g).

XK1-2样品(1261.5m)浅灰色花岗岩, 矿物晶体粗大, 具典型的花岗结构, 矿物晶体多为半自形或自形晶, 大小介于20~5mm, 主要由酸性斜长石(22%±)、正长石(45%)和石英(28%±)组成, 暗色矿物为黑云母(5%±), 副矿物有褐帘石、磷灰石、锆石等, 定名为花岗岩, 分布层段为1260.52~1262.72m(图2e、h).

锆石的分选工作是在河北省区域地质矿产研究所完成. 在双目镜下随机选取200颗左右的锆石粘在双面胶上, 用无色透明的环氧树脂固定, 固化后将锆石靶样抛光. 随后, 对锆石进行阴极发光图像采集, 以观察锆石内部结构, 确定合适的微区分析位置. 锆石U-Pb同位素测年由中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)分析完成(Liu等, 2010). 激光剥蚀系统为GeoLas 2005, ICP-MS型号为Agilent 7500a. 激

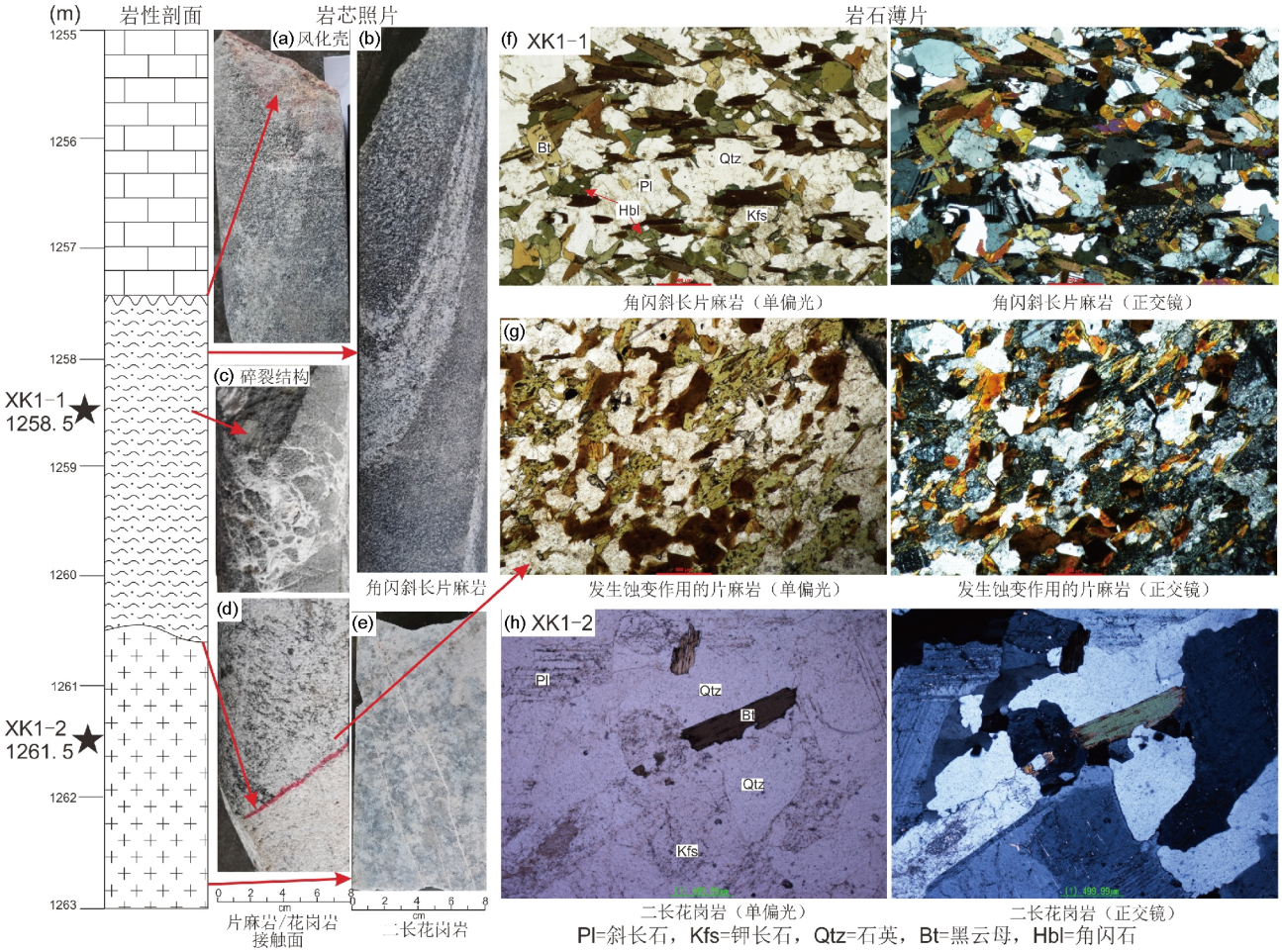


图 2　西科一井基地岩性组成与岩石学特征

光脉冲频率为1Hz, 束斑大小为32μm, 选取的剥蚀位置为锆石边部的韵律环带. 每个分析数据包括20s的空白信号和50s的样品信号. 锆石标准91500作为外标进行同位素分馏校正, 每分析6个样品点分析2次91500. 同时, 采用锆石标准GJ-1来监测分析结果的准确度. 锆石微量元素的含量测定采用玻璃610作为外标、Si作内标的方法进行定量计算. 分析数据的离线处理借助软件ICPMSDataCal(Liu等, 2009)完成, 计算得出的U-Th-Pb同位素比值(1σ)采用Andersen(2002)的方法进行普通Pb校正. U-Pb年龄谐和图的绘制和加权平均年龄的计算由软件Isoplot(Ludwig, 2003)完成.

4　锆石U-Pb测年

基底的锆石LA-ICP-MS U-Pb测年分析结果见表1. 样品XK1-1和XK1-2中锆石的Th/U比值变化范围为0.37~0.88和0.39~1.01(图3), 结合阴极发光图像中典型的韵律环带特征, 代表岩浆结晶的产物(Hoskin和Schaltegger, 2003). 锆石U-Pb年龄谐和图及年龄加权平均结果见图4. 样品XK1-1的17个分析结果中, 16个锆石是谐和的, 有14个点集中在晚侏罗世, 2个点在早白垩世早期年龄范围从(160±2.5)到(137±1)Ma. 其中, 14个晚侏罗世锆石得出的$^{206}Pb/^{238}U$加权平均年龄为(152.9±1.7)Ma(MSWD=5.5), 剩下的2个较年轻的年龄分别为(137±1)和(144±1)Ma. 样品XK1-2中, 6个锆石的U-Th-Pb同位素结果投影在谐和曲线之外. 剩余的10个谐和锆石中年龄从(117±2)到(101±2)Ma, 全部集中在早白垩世晚期, 8个相对年轻锆石得出$^{206}Pb/^{238}U$加权平均年龄为(107.8±3.6)Ma(MSWD=4.3), 两个锆石年龄稍老((116±1.8)和(117±2)Ma).

表 1　西科一井基底样品锆石LA-ICP-MS U-Pb测年分析结果

样品	含量(ppm)		Th/U	原始比值						校正后年龄(Ma)					
	Th	U		$^{207}Pb/^{206}Pb$	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
XK1-1															
1	208.93	309.94	0.67	0.0550	0.0038	0.1876	0.0133	0.0252	0.0004	413	143	175	11	160	3
2	752.41	964.99	0.78	0.0491	0.0016	0.1671	0.0057	0.0246	0.0003	151	70	157	5	156	2
3	1322.34	1510.45	0.88	0.0500	0.0013	0.1632	0.0046	0.0237	0.0003	195	53	154	4	151	2
4	443.01	617.41	0.72	0.0526	0.0021	0.1682	0.0063	0.0233	0.0002	313	76	158	5	149	1
5	552.24	746.67	0.74	0.0518	0.0019	0.1725	0.0063	0.0241	0.0002	275	74	162	5	153	1
6	81.61	214.78	0.38	0.0593	0.0040	0.1884	0.0121	0.0240	0.0004	579	125	175	10	153	2
7	224.87	610.62	0.37	0.0563	0.0025	0.1721	0.0079	0.0221	0.0002	464	91	161	7	141	2
8	254.78	630.28	0.40	0.0465	0.0018	0.1540	0.0059	0.0240	0.0002	25	70	145	5	153	1
9	565.69	772.07	0.73	0.0516	0.0018	0.1612	0.0057	0.0225	0.0002	268	72	152	5	144	1
10	1361.66	2395.08	0.57	0.0508	0.0015	0.1510	0.0046	0.0214	0.0002	232	61	143	4	137	1
11	238.84	558.31	0.43	0.0510	0.0021	0.1706	0.0068	0.0243	0.0002	241	81	160	6	155	1
12	1170.73	1433.09	0.82	0.0493	0.0014	0.1630	0.0046	0.0238	0.0002	164	58	153	4	152	1
13	274.84	377.08	0.73	0.0512	0.0023	0.1669	0.0074	0.0238	0.0003	251	90	157	6	152	2
14	612.19	871.96	0.70	0.0471	0.0016	0.1583	0.0052	0.0243	0.0002	55	63	149	5	155	1
15	416.73	707.63	0.59	0.0518	0.0019	0.1783	0.0064	0.0250	0.0003	276	72	167	6	159	2
16	189.74	419.34	0.45	0.0522	0.0024	0.1799	0.0082	0.0251	0.0003	293	97	168	7	160	2
17	398.89	934.97	0.43	0.0474	0.0016	0.1546	0.0054	0.0235	0.0002	71	71	146	5	149	1
XK1-2															
16	173.31	172.33	1.01	0.0538	0.0063	0.1198	0.0125	0.0168	0.0003	363	223	115	11	107	2
17	1097.47	1847.00	0.59	0.0549	0.0018	0.1411	0.0051	0.0186	0.0003	89	89	116	6	117	2
18	72.73	113.89	0.64	0.0755	0.0084	0.1796	0.0192	0.0183	0.0004	1081	209	168	16	117	3
19	74.33	106.37	0.70	0.1057	0.0089	0.2316	0.0186	0.0166	0.0004	865	295	141	20	102	3
20	209.01	535.10	0.39	0.0681	0.0060	0.1926	0.0173	0.0207	0.0004	873	180	179	15	132	2
21	144.69	156.66	0.92	0.0611	0.0064	0.1455	0.0149	0.0176	0.0004	643	216	138	13	113	2
22	84.52	99.55	0.85	0.1222	0.0115	0.2519	0.0200	0.0171	0.0004	1989	133	228	16	109	3
23	75.27	109.95	0.68	0.0520	0.0078	0.1241	0.0194	0.0170	0.0004	286	314	119	17	108	2
24	151.51	168.20	0.90	0.0493	0.0053	0.1050	0.0115	0.0166	0.0003	160	224	101	11	106	2
25	1276.40	1394.15	0.92	0.0473	0.0017	0.1190	0.0042	0.0182	0.0002	63	70	114	4	116	1
26	191.92	213.44	0.90	0.0572	0.0054	0.1319	0.0119	0.0170	0.0003	501	193	126	11	109	2
27	163.88	161.79	1.01	0.0661	0.0057	0.1623	0.0137	0.0184	0.0004	811	168	153	12	118	2
28	83.47	115.65	0.72	0.0682	0.0072	0.1560	0.0164	0.0177	0.0004	874	213	147	14	113	2
29	124.82	133.85	0.93	0.0689	0.0081	0.1356	0.0145	0.0157	0.0004	896	215	129	13	101	2
30	87.05	100.25	0.87	0.0796	0.0097	0.1637	0.0176	0.0161	0.0004	1187	208	154	15	103	2
31	60.96	96.85	0.63	0.0750	0.0098	0.1666	0.0213	0.0170	0.0004	1068	256	156	19	109	3

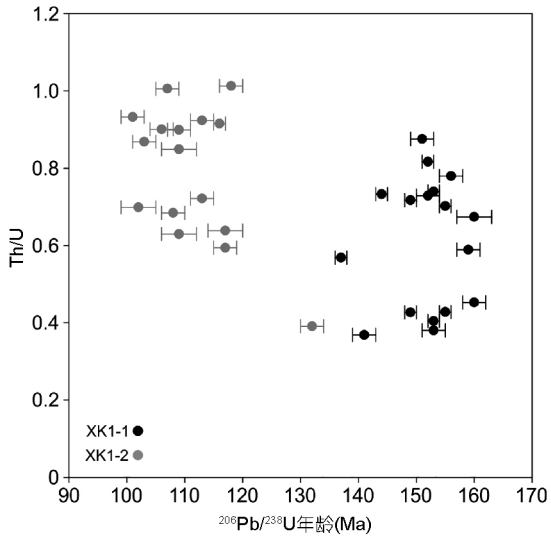


图 3　西科一井基底锆石U-Pb年龄与Th/U比值

5　讨论

西科一井基底角闪斜长片麻岩之下为年龄更年轻的早白垩纪花岗岩侵入体(107.8Ma), 对应晚燕山期的岩浆活动. 晚中生代大规模的岩浆活动并非局限在南海周缘陆上地区(如华南、中南半岛东南部和婆罗洲等), 在南海的珠江口盆地、中沙和南沙等区域的油气钻井或者拖网都有发现同期的花岗质岩石(Yan等, 2014). 此次岩浆活动时间跨度较大, 据不完全统计, 相对较年轻的侵入岩体多发现于珠江口盆地, 如ZHU2井2379m深度获取的黑云母花岗岩K-Ar测年为70.5Ma, 而年龄最老的为南沙群岛S08-18站位获得的斜长花岗岩, 锆石LA-ICP-MS U-Pb测年结果为157.8~159.1Ma(Yan等, 2010). 尽管这些晚中生代侵入体的岩性差异较大, 它们的元素地球化学特征指示出南海新生代裂陷之前存在着主动大陆边缘的构造背景(Yan等, 2014). 中生代东亚陆缘受到古太平洋板块长期的俯冲挤压, 在向陆一侧形成了大规模的岩浆活动, 在俯冲前缘发育了增生楔堆积(Metcalfe, 2013; Isozaki, 1997). 但是, 关于中生代俯冲增生带在南海地区存在的位置一直存在争议, 例如在Morley(2012)和Zahirovic等(2014)重建的构造演化模型中, 中生代俯冲带穿过华南沿岸和海南岛东侧直接进入中南半岛东部和婆罗洲西部. 与之相反, Taylor和Hayes(1983)认为古太平洋板块向西北俯冲于北巴拉望和礼乐滩之下. 此外, 也有学者着眼于南海北部台西南盆地至中沙群岛间近NE45°走向的条带构造, 其布格重力异常总梯度峰值在强度和规模上与马尼拉海沟俯冲带相近. 该条带与海底地形和新生代构造应力方向斜交, 并且具有较高的磁正异常, 可能指示与俯冲有关的火山弧(Zhou等, 2008; Li等, 2008).

西科一井与西永一井相距约1km, 两者都钻遇的高级变质岩很可能受同期构造热事件的影响. 但是, 本次研究中西科一井角闪斜长片麻岩样品(XK1-1)的锆石平均结晶年龄为152.9Ma, 最年轻的年龄为(137±1)Ma, 代表了晚侏罗纪-早白垩时期的变质作用, 远小于早期西永一井基底Rb-Sr法测定的前寒武纪年龄结果(627Ma). 在南海周缘陆上, 已有大量的研究揭示出海南岛、华南和越南昆嵩地块之下都存在前寒武纪的结晶基底. 但是, 南海地区是否也发育有统一的早期变质基底仍缺乏系统的研究和广泛的证据. 虽然本次XK1-1样品锆石测得$^{206}Pb/^{238}U$年龄的平均标准权重偏差稍大(5.5), 但是年龄仍相对集中, 没有测到古生代及更老的年龄. 近期, 孙晓猛等(2014)汇总了南海北部盆地多口钻遇前寒武纪至古生代变质岩的油气探井. 但实际上, 这些钻井(如珠江口盆地的KP1-1-1井和YJ35-1-1井)的基底样品仍缺乏准确的测年或地层层序依据, 其时代有待进一步研究. 位于珠江口盆地东部的LF2-1-1井在2480m深度钻遇了二云母斜长片麻岩, 现有的同位素K-Ar法全岩测年结果为100 Ma(李平鲁等, 1999). 此外, 在南沙群岛80年代开展的SO23和SO72航次也有中生代变质岩的报道(Kudrass等, 1986), 云母K-Ar法测得石榴石-云母片岩、闪岩、副片麻岩和石英千枚岩均产生于晚侏罗纪到早白垩的变质事件(113~146Ma). 虽然Fyhn等(2010)推测南沙地块在中生代时期为位于古太平洋板块西缘的微陆块, 新生代早期才与中南半岛碰撞拼合, 但是本文研究表明南沙和西沙基底在晚中生代共同经历了区域变质作用的影响, 持续时间可能从晚侏罗纪到早白垩纪. 此外, 中-西沙和南沙地块的磁性基底特征十分相似, 推测在南海扩张之前二者可能为同一块体(郝天珧等, 2009).

众所周知, 南海中生代构造背景极为复杂, 被认为是特提斯域与古太平洋域交互的地区, 在中生代晚期发生了板块碰撞拼合作用(Pichot等, 2014; 夏戡原和黄慈流, 2000; 蔡乾忠, 1998; 李家彪, 1999; 姚伯初, 1998;

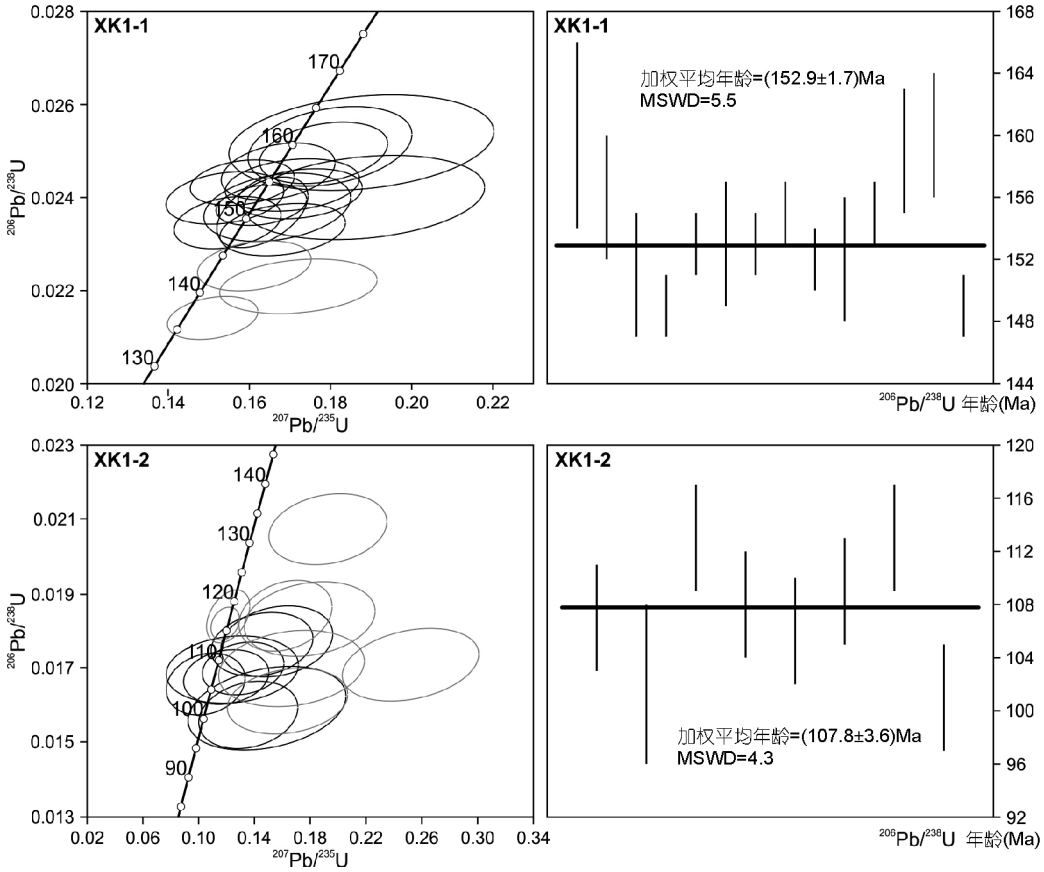


图 4　西科一井基底样品锆石U-Pb年龄谐和图及加权平均年龄

吴浩若, 1999; 颜佳新和周蒂, 2001). 颜佳新和周蒂(2001)从南海中生代分布展布规律及地层发育时间, 认为在白垩纪中期, 由于北巴拉望-礼乐-南沙地块与华南大陆边缘的碰撞导致中特提斯洋关闭. 西科一井基底变质岩和花岗岩年龄的确定对认识南海北部中特提斯构造演化、合理解释南海北部陆缘区地壳结构在东西向和南北向的差异十分关键. 结合珠江口盆地同时期变质岩的存在以及潮汕坳陷MZ-1井基底花岗岩K-Ar法(102.2±1.1)Ma的变质年龄均反映出, 南海北部在白垩纪存在一个E-W向展布的变质带. 该变质带极有可能是中特提斯洋在南海北部陆缘区俯冲关闭造成的. 但是该变质带向西如何伸展, 是进入红河带还是经加里曼丹Meratus缝合线与苏门答腊Woyla缝合线所代表的洋盆相连, 还需要进一步细致的研究工作.

6　结论

西沙群岛西科一井基底样品的岩石学分析和锆石U-Pb测年结果显示, 晚侏罗世的角闪斜长片麻岩((152.9±1.7)Ma)后期被早白垩世花岗岩((107.8±3.6)Ma)侵入. 对于南海地区是否发育有统一的前寒武纪变质结晶基底还需要进一步研究. 结合西永一井基底的K-Ar测年结果(孙嘉诗, 1987), 可以认为, 西沙基底在中生代晚期(152.9~96.3Ma)经历了区域变质作用, 这与东亚陆缘受到大规模、长期的俯冲挤压密切相关, 极有可能代表了中特提斯洋在该时期的碰撞关闭.

参考文献

蔡乾忠. 1998. “残留特提斯”的猜想——从中国近海域发现海相中生界古新统谈起. 中国地质, 251: 39–41

郝天珧, 徐亚, 赵百民, 张永军, 彭利丽. 2009. 南海磁性基底分布特征的地球物理研究. 地球物理学报, 52: 2763–2774

黄海波, 丘学林, 胥颐, 曾钢平. 2011. 利用远震接收函数方法研究南海西沙群岛下方地壳结构. 地球物理学报, 54: 2788–2798

李家彪. 1999. 南海地体系迁移与碰撞. 见: 许东禹, 编. 海洋地质学

与古海洋学. 第30届国际地质大会论文集. 北京. 13: 24–34
李平鲁, 梁慧娴, 代一丁, 林鹤鸣. 1999. 珠江口盆地燕山期岩浆岩的成因及构造环境. 广东地质, 1: 23–34
刘海龄, 阎贫, 张伯友, 邱学林, 夏斌. 2004. 南海前新生代基底与东特提斯构造域. 海洋地质与第四纪地质, 24: 15–28
刘以宣, 詹文欢. 1994. 南海变质基底基本轮廓及其构造演化. 安徽地质, 4: 82–90
鲁宝亮, 王璞珺, 张功成, 张斌, 孙晓猛, 李伍志, 郎元强. 2011. 南海北部陆缘盆地基底结构及其油气勘探意义. 石油学报, 32: 580–587
孙嘉诗. 1987. 西沙基底形成时代的商榷. 海洋地质与第四纪地质, 7: 5–6
孙晓猛, 张旭庆, 张功成, 鲁宝亮, 岳军培, 张斌. 2014. 南海北部新生代盆地基底结构及构造属性. 中国科学: 地球科学, 44: 1312–1323
王崇友, 何希贤, 裘松余. 1979. 西沙群岛西永一井碳酸盐岩地层与微体古生物的初步研究. 石油实验地质, 7: 23–38
吴浩若. 1999. 放射虫硅质岩对华南古地理的启示. 古地理学报, 1: 28–34
夏戡原, 黄慈流. 2000. 南海中生代特提斯期沉积盆地的发现与找寻中生代含油气盆地的前景. 地学前缘, 7: 227–238
谢锦龙, 余和中, 唐良民, 傅瑾君, 武金云. 2010. 南海新生代沉积基底性质和盆地类型. 海相油气地质, 15: 35–47
姚伯初. 1998. 南海北部陆缘的地壳结构及构造意义. 海洋地质与第四纪地质, 18: 1–16
姚伯初, 曾维军, 陈艺中, 张锡林. 1994. 南海西沙海槽, 一条古缝合线. 海洋地质与第四纪地质, 14: 1–10
颜佳新, 周蒂. 2001. 南海北部陆缘区中特提斯构造演化研究. 海洋地质与第四纪地质, 21: 51–56
岳军培, 张艳, 沈怀磊, 尤龙, 鲁宝亮,王璞珺. 2013. 华南陆缘地质特征对南海北部盆地基底的约束. 石油学报, 34: 120–128
张永军, 刘振军, 赵百民. 2009. 关于西沙海槽正磁异常带的地球物理认识. 地球物理学进展, 24: 1987–1994
周蒂, 刘海龄, 陈汉宗. 2005. 南沙海区及其周缘中-新生代岩浆活动及构造意义. 大地构造与成矿学, 29: 354–363
Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb. Chem Geol, 192: 59–79
Bai Y L, Wu S G, Liu Z, Müller R D, Williams S E, Zahirovic S, Dong D D. 2015. Full-fit reconstruction of the South China Sea conjugate margins. Tectonophysics, 661: 121–135
Braitenberg C, Wienecke S, Wang Y. 2006. Basement structures from satellite-derived gravity field: South China Sea ridge. J Geophys Res, 111: B05407
Cullen A, Reemst P, Henstra G, Gozzard S, Ray A. 2010. Rifting of the South China Sea: New perspectives. Petrol Geosci, 16: 273–282
Dickin A P. 2005. Radiogenic Isotope Geology. New York: Cambridge University Press
Franke D, Savva D, Pubellier M, Steuer S, Mouly B, Auxietre J L, Meresse F, Chamot-Rooke N. 2014. The final rifting evolution in the South China Sea. Mar Pet Geol, 58: 704–720
Fyhn M B W, Pedersen S A S, Boldreel L O, Nielsen L H, Green P F, Dien P T, Huyen L T, Frei D. 2010. Palaeocene-early Eocene inversion of the Phuquoc-Kampot Som Basin: SE Asian deformation associated with the suturing of Luconia. J Geol Soc, 167: 281–295
Hayes D E, Nissen S S. 2005. The South China sea margins: Implications for rifting contrasts. Earth Planet Sci Lett, 237: 601–616
Hoskin P W O, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. Rev Mineral Geochem, 53: 27–62
Huang X L, Niu Y, Xu Y G, Ma J L, Qiu H N, Zhong J W. 2013. Geochronology and geochemistry of Cenozoic basalts from eastern Guangdong, SE China: Constraints on the lithosphere evolution beneath the northern margin of the South China Sea. Contrib Mineral Petrol, 165: 437–455
Isozaki Y. 1997. Jurassic accretion tectonics of Japan. Isl Arc, 6: 25–51
Kido Y, Suyehiro K, Kinoshita H. 2001. Rifting to spreading process along the northern continental margin of the South China Sea. Mar Geophys Res, 22: 1–15
Kudrass H R, Wiedicke M, Cepek P, Kreuzer H, Müller P. 1986. Mesozoic and Cainozoic rocks dredged from the South China Sea (Reed Bank area) and Sulu Sea and their significance for plate-tectonic reconstructions. Mar Pet Geol, 3: 19–30
Li C F, Xu X, Lin J, Sun Z, Zhu J, Yao Y, Zhao X, Liu Q, Kulhanek D K, Wang J, Song T, Zhao J, Qiu N, Guan Y, Zhou Z, Williams T, Bao R, Briais A, Brown E A, Chen Y, Clift P D, Colwell F S, Dadd K A, Ding W, Almeida I H, Huang X L, Hyun S, Jiang T, Koppers A A P, Li Q, Liu C, Liu Z, Nagai R H, Peleo-Alampay A, Su X, Tejada M L G, Trinh H S, Yeh Y C, Zhang C, Zhang F, Zhang G L. 2014. Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP Expedition 349. Geochem Geophys Geosyst, 15: 4958–4983
Li C F, Zhou Z, Hao H, Chen H, Wang J, Chen B, Wu J. 2008. Late Mesozoic tectonic structure and evolution along the present-day northeastern South China Sea continental margin. J Asian Earth Sci, 31: 546–561
Liu H L, Zheng H B, Wang Y L, Lin Q J, Wu C H, Zhao M S, Du Y K. 2011. Basement of the South China Sea Area: Tracing the Tethyan Realm. Acta Geol Sin-Engl Ed, 85: 637–655
Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. 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. J Petrol, 51: 537–571
Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, Gao C G, Gao S, Xu J, Chen H H. 2010. Reappraisement and refinement of zircon U-Pb isotope and trace ele-

ment analyses by LA-ICP-MS. Chin Sci Bull, 55: 1535–1546

Ludwig K R. 2003. User's manual for isoplot 3.00: A geochronological toolkit for microsoft excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center

Metcalfe I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys. J Asian Earth Sci, 66: 1–33

Morley C K. 2012. Late Cretaceous-Early Palaeogene tectonic development of SE Asia. Earth-Sci Rev, 115: 37–75

Nissen S S, Hayes D E, Bochu Y, Zeng W, Chen Y, Nu X. 1995. Gravity, heat flow, and seismic constraints on the processes of crustal extension: Northern margin of the South China Sea. J Geophys Res, 100: 22447–22483

Pichot T, Delescluse M, Chamot-Rooke N, Pubellier M, Qiu Y, Meresse F, Sun G, Savva D, Wong K P, Watremez L, Auxiètre J L. 2014. Deep crustal structure of the conjugate margins of the SW South China Sea from wide-angle refraction seismic data. Mar Pet Geol, 58: 627–643

Pubellier M, Morley C K. 2014. The basins of Sundaland (SE Asia): Evolution and boundary conditions. Mar Pet Geol, 58: 555–578

Qiu X L, Ye S Y, Wu S M, Shi X B, Zhou D, Xia K Y, Flueh E R. 2001. Crustal structure across the Xisha Trough, northwestern South China Sea. Tectonophysics, 341: 179–193

Taylor B, Hayes D E. 1983. Origin and history of the South China Sea basin. In: Hayes D E, ed. The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands: Part 2. Washington DC: American Geophysical Union. 23–56

Wang T K, Chen M K, Lee C S, Xia K. 2006. Seismic imaging of the transitional crust across the northeastern margin of the South China Sea. Tectonophysics, 412: 237–254

Yan Q S, Shi X F, Castillo P R. 2014. The late Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of the South China Sea: A petrologic perspective. J Asian Earth Sci, 85: 178–201

Yan Q S, Shi X F, Liu J H, Wang K S, Bu W R. 2010. Petrology and geochemistry of Mesozoic granitic rocks from the Nansha micro-block, the South China Sea: Constraints on the basement nature. J Asian Earth Sci, 37: 130–139

Zahirovic S, Seton M, Müller R D. 2014. The Cretaceous and Cenozoic tectonic evolution of Southeast Asia. Solid Earth, 5: 227–273

Zhou D, Sun Z, Chen H Z, Xu H H, Wang W Y, Pang X, Cai D S, Hu D K. 2008. Mesozoic paleogeography and tectonic evolution of South China Sea and adjacent areas in the context of Tethyan and Paleo-Pacific interconnections. Isl Arc, 17: 186–207