

doi: 10.12029/gc20200320

詹骏彦, 覃小锋, 王宗起, 曹洁, 庞保成, 赵国英, 石浩, 王震. 2020. 桂南板城地区晚古生代硅质岩系砂岩夹层的碎屑锆石 U-Pb 年代学: 对沉积物源的限定[J]. 中国地质, 47(3):839-851.

Zhan Junyan, Qin Xiaofeng, Wang Zongqi, Cao Jie, Pang Baocheng, Zhao Guoying, Shi Hao, Wang Zhen. 2020. Detrital zircon U-Pb geochronology of Late Paleozoic sandstone intercalations of siliceous rock sequences in Bancheng area, southern Guangxi: Constraint on depositional provenance[J]. *Geology in China*, 47(3):839-851(in Chinese with English abstract).

## 桂南板城地区晚古生代硅质岩系砂岩夹层的碎屑 锆石 U-Pb 年代学: 对沉积物源的限定

詹骏彦<sup>1,2</sup>, 覃小锋<sup>1,2</sup>, 王宗起<sup>3</sup>, 曹洁<sup>4</sup>, 庞保成<sup>1,2</sup>, 赵国英<sup>1,2</sup>, 石浩<sup>1,2</sup>, 王震<sup>1,2</sup>

(1. 桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541004;  
3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 4. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029)

**摘要:** 桂南板城地区位于钦—杭结合带的西南段, 是研究华南地区古生代以来地质构造演化的关键地区。该区发育有一套上泥盆统至上二叠统连续沉积的硅质岩系, 近年来经过笔者系统野外地质调查发现, 钦州市板城镇石梯水库一带出露的晚古生代硅质岩系中常夹有(粉)砂岩层。本文对晚古生代硅质岩系下部和上部两个粉砂岩夹层样品进行 LA-MC-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 定年结果表明, 碎屑锆石年龄频谱显示出 407~573 Ma(早古生代)、644~954 Ma(新元古代)、1124~1636 Ma(中元古代)和 2368~2548 Ma(古元古代早期—新太古代晚期)4 个主要的年龄组(区间), 记录了物源区可能存在 4 期主要的区域构造热事件, 与华夏板块云开地区发育的相应时期岩浆岩时代基本吻合, 说明云开地区是晚古生代硅质岩系中砂岩的主要沉积物源区。晚古生代硅质岩系下部岩石和上部岩石的物源区存在明显区别, 由下往上其沉积物源越来越复杂、年龄相对更老的特征表明, 钦—杭结合带西南段的云开地块在加里东期造山作用结束后经历了快速剥蚀、隆升过程。晚古生代硅质岩系砂岩夹层的碎屑锆石年龄频谱记录了钦防海盆在晚古生代时期处于拉伸的构造背景。

**关键词:** 晚古生代硅质岩系; 砂岩夹层; 碎屑锆石 U-Pb 定年; 物源; 地质调查工程; 板城; 广西

中图分类号: P597.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)03-0839-14

## Detrital zircon U-Pb geochronology of Late Paleozoic sandstone intercalations of siliceous rock sequences in Bancheng area, southern Guangxi: Constraint on depositional provenance

ZHAN Junyan<sup>1,2</sup>, QIN Xiaofeng<sup>1,2</sup>, WANG Zongqi<sup>3</sup>, CAO Jie<sup>4</sup>, PANG Baocheng<sup>1,2</sup>,  
ZHAO Guoying<sup>1,2</sup>, SHI Hao<sup>1,2</sup>, WANG Zhen<sup>1,2</sup>

(1. College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 3. Institute of Mineral

收稿日期: 2017-01-05; 改回日期: 2018-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41362006)、广西自然科学基金项目(2013GXNSFAA019272)、桂林理工大学人才引进科研启动基金项目(002401003364)和中国地质调查局地质矿产调查项目(12120114039501、1212011085408、DD20160124)联合资助。

作者简介: 詹骏彦, 男, 1991 年生, 硕士生, 地质学专业; E-mail: 332088985@qq.com。

通讯作者: 覃小锋, 男, 1969 年生, 教授, 硕士生导师, 主要从事构造地质和岩石学的科研和教学工作; E-mail: qxf@glut.edu.cn。

*Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. Center of Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China)*

**Abstract:** Situated in the southwestern segment of Qinzhou–Hangzhou joint belt, Bancheng area of southern Guangxi is a pivotal area in understanding the geological tectonic evolution history of South China since the Paleozoic. Late Devonian to late Permian siliceous rock sequences are outcropped in this area. In recent years, the authors conducted systematic field geological survey and found that there exist a series of siltstone intercalations in late Paleozoic siliceous rock sequences of the Shiti reservoir in Bancheng Town, Qinzhou City. In this paper, LA–MC–ICP–MS U–Pb isotopic dating was performed for detrital zircons from two siltstone intercalation samples of the lower and upper late Paleozoic siliceous rock sequences. Detrital zircon U–Pb age spectra shows that there are four main age groups of 407–573 Ma (early Paleozoic), 644–954 Ma (Neoproterozoic), 1124–1636 Ma (Mesoproterozoic) and 2368–2548 Ma (Early Paleoproterozoic–late Neoproterozoic), which recorded four major tectonic thermal events in this area. These four periods of tectonic thermal events are consistent with the ages of widely developed magmatic rocks in Yunkai area of the Cathaysia Block, indicating that Yunkai area might have been major depositional provenance for the siltstone intercalations of late Paleozoic siliceous rock sequences. The depositional provenances of the lower and upper late Paleozoic siliceous rock sequences are significantly different, and there is a general tendency toward increasing complex and relatively older age of detrital zircon from the lower to the upper of late Paleozoic siliceous rock sequences, indicating that the Yunkai Block has experienced rapidly erosion and uplift process after Caledonian orogeny in the southwestern segment of Qinzhou–Hangzhou joint belt. Detrital zircon U–Pb age spectra of the sandstone intercalations of late Paleozoic siliceous rock sequences imply that the Qinzhou–Fangchang Basin was in an extension tectonic setting in Late Paleozoic period.

**Key words:** Late Paleozoic siliceous rock sequences; sandstone intercalation; detrital zircon U–Pb dating; provenance; geological survey engineering; Bancheng; Guangxi

**About the first author:** ZHAN Junyan, male, born in 1991, master candidate, majors in geology; E-mail: 332088985@qq.com.

**About the corresponding author:** QIN Xiaofeng, male, born in 1969, professor, supervisor of master candidates, engages in structural geology and petrology; E-mail: qxf@glut.edu.cn.

**Fund support:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41362006), the National Natural Science Foundation of Guangxi (No.2013GXNSFAA019272), Talent Introduction Research Start-up Funds of Guilin University of Technology (No.002401003364), the Program of China Geological Survey (No.12120114039501, No.1212011085408, No.DD20160124).

## 1 引 言

“钦防海槽”位于广西南部钦州—防城一带,是加里东期构造运动之后,扬子板块与华夏板块间的“残留海”受到东吴运动或印支运动的影响而形成的大陆边缘性质的造山带,其两侧被古隆起(地块)所夹持,其中东南侧为云开大山古隆起(地块),西北侧为大明山古隆起(微陆块)(广西壮族自治区地质矿产局,1985;许效松等,2001;吴浩若,2003)。该造山带传统上被认为是扬子板块与华夏板块结合带(称之为钦—杭结合带)的西南段(杨明桂和梅勇文,1997),属于中国19条重要成矿区带之一——钦杭成矿带的重要组成部分。该区作为华南地区唯一的上志留统至上二叠统深水相连续沉积的出露区,同时也是特提斯构造域和太平洋构造域叠加交汇的特殊地段,是研究扬子板块和华夏板块拼合造山过程及其相互关系的关键部位,历来受到中外

地质学者所瞩目(覃小锋等,2011,2013)。

目前普遍认为钦防地区晚古生代地层由上、下两套形成于不同环境、呈角度不整合接触的沉积岩系组成,其中下部为深水相的硅质岩系,传统上根据区域地层对比、叠置关系和少量的古生物化石将其时代定为晚泥盆世—中二叠世,并将其划分为石夹组和板城组两个组,其中下部石夹组中产牙形类 *Ancyrodella alata*、*Mesotaxis asymmetrica*、*Palmatolepis glabra pectinata*、*Siphonodella duplicata*、*S.cooperi*、*Schaliognathus archolaris*、*Gnathodus* sp.、*Idiognathodus* sp.和放射虫 *Heleniforelaticlavium*、*Holoeciscus foremanae*、*Albaillellaparadoxa*和 *A.cartalla*带,时限为晚泥盆世弗拉斯期至早石炭世维宪期;而上部板城组中产放射虫 *Albaillella sinuata*、*A.xiaodongensis*、*Follicucullus bipartitus*、*F.charveti*、*Pseudoalbaillella* sp.、*P.nodosa*、*P.elegans*、*P.lomentaria*、*P.sakmarensis*、*P.rhombothoracata*、*P.rakmarensis*和牙

形类 *Mesogondolella* sp.、*Neogondolella* sp.、*Gnathodus bilineatus* 等化石,其时代为早石炭世末至中二叠世(广西壮族自治区地质矿产局,1997;王玉净等,1998;邝国敦等,1999)。将上部由砂、砾岩组成的一套磨拉石建造划分为彭久组,时代属晚二叠世(广西壮族自治区地质矿产局,1997;邝国敦等,1999)。而近年来的研究表明,钦防地区晚古生代地层是受多期、多级褶皱、断层分割拼贴形成的极为复杂的岩层组合(王玉净等,1998),有人称之为“从外地漂移插入南海(华夏)古陆和扬子古陆间的外来地体”(吴诒等,1997)。

由于“钦防海槽”以深水相沉积为主,其中晚泥盆世至中二叠世以硅质岩、硅质泥岩为主,缺少碎屑岩沉积,前人对该地区的研究主要集中在硅质岩的成因上,主要通过硅质岩岩石学、地层序列划分、地球化学以及微体古生物化石年代学等的研究来探讨其沉积演化和形成的构造背景,而对“钦防海槽”晚古生代时期盆地沉积物源的研究尚属空白。笔者近年来对钦州市板城镇石梯水库一带晚古生代硅质岩系的研究发现,硅质岩系中往往夹有少量呈薄—中层状产出的(粉)砂岩层。由于碎屑沉积岩可以很好地记录不同地区的沉积环境、沉积物源等信息,而碎屑锆石作为沉积岩中最稳定的矿物,其年龄频谱不仅可限定沉积物的最大沉积年龄和物源区性质,而且能够为探讨其盆山构造演化过程和古地理格局恢复提供约束。因而,近年来根据碎屑岩的物质组成,特别是碎屑锆石年代学的研究来限定沉积物源区性质、沉积时代和沉积环境已成为盆地形成及其物源区构造演化研究的重要手段(Dickinson and Suczek, 1979; Carter and Steve, 1999; Fedo et al., 2003; Weltje and Eynatten, 2004; Andersen, 2005)。因此,本文拟对板城镇石梯水库一带晚古生代硅质岩系中粉砂岩夹层的碎屑锆石进行U-Pb年龄测定,分析其年龄频谱特征,探讨其沉积物源区性质,进而为研究钦—杭结合带西南段的构造演化提供重要的沉积学信息。

## 2 地质背景

桂南板城地区位于扬子板块与华夏板块结合带(称之为钦—杭结合带)的西南端(杨明桂等,1997)(图1a),按《广西壮族自治区区域地质志》(广

西壮族自治区地质矿产局,1985)的划分,则属于“钦州残余地槽”的重要组成部分。区内以出露一套古生代连续沉积的深水相地层和北东向展布的海西—印支期大容山—十万大山巨型S型花岗岩带而著称(图1b)。其中下古生界和下一中泥盆统为一套以砂、泥岩及少量硅质岩和碳酸盐岩组成的复理石建造。晚古生代硅质岩系(包括上泥盆统—下石炭统石夹组和下石炭统一中二叠统板城组)主要岩性为薄层状硅质岩、放射虫硅质岩、泥质硅质岩夹硅质泥岩、含锰硅质岩、黑色泥岩,在板城镇—高山岭一带夹有多层浅绿色条带状碧玉岩和凝灰岩,在石梯水库一带还夹有多层呈薄—中层状产出的(粉)砂岩。上二叠统彭久组为一套由砂、砾岩组成的磨拉石建造,其中下部为厚层砾岩、含砾不等粒岩屑砂岩、细砂岩夹泥岩;中部为薄—厚层状泥质粉砂岩、粉砂质泥岩夹少量细砂岩;上部为薄层泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩夹硅质岩、不等粒岩屑砂岩、含砾砂岩。下三叠统南洪组仅在小董镇—太平镇一带零星分布,岩性主要为薄层状钙质泥岩夹泥灰岩。北东向展布的海西—印支期巨型S型花岗岩带可划分为中三叠世细粒(含紫苏)石榴堇青黑云二长花岗岩、中三叠世中粒(含紫苏)石榴堇青黑云二长花岗岩、中三叠世连斑(含紫苏/堇青)花岗斑岩和中三叠世碎斑(含紫苏/堇青)花岗斑岩等不同类型的侵入岩。

## 3 样品特征与分析方法

### 3.1 样品特征

本次研究在野外详细的宏观地质特征调查研究的基础上,在广西钦州市板城镇石梯水库边简易公路上的晚古生代硅质岩系剖面下部(10ST1-10)和上部(10ST1-13)分别采集粉砂岩夹层样品,具体采样位置见图1b,每个样品重量约为5 kg。其中剖面下部(粉)砂岩夹层厚度相对较薄,一般厚度<35 cm,以薄层状为主,个别层达中层状,往延伸方向具变薄、尖灭现象(图2a);而剖面上部(粉)砂岩夹层含量相对增多,厚度也相对较大,厚度较大者达45 cm(图2b)。所采集的2个样品岩石风化均较强,风化面呈褐黄色,显微镜下观察,两个样品的矿物粒径均较细小,绝大部分颗粒<0.1 mm,且磨圆度较差,多呈棱角—次棱角状,其中剖面下部样品(10ST1-10)的碎屑成分主要为石英和岩屑及少量

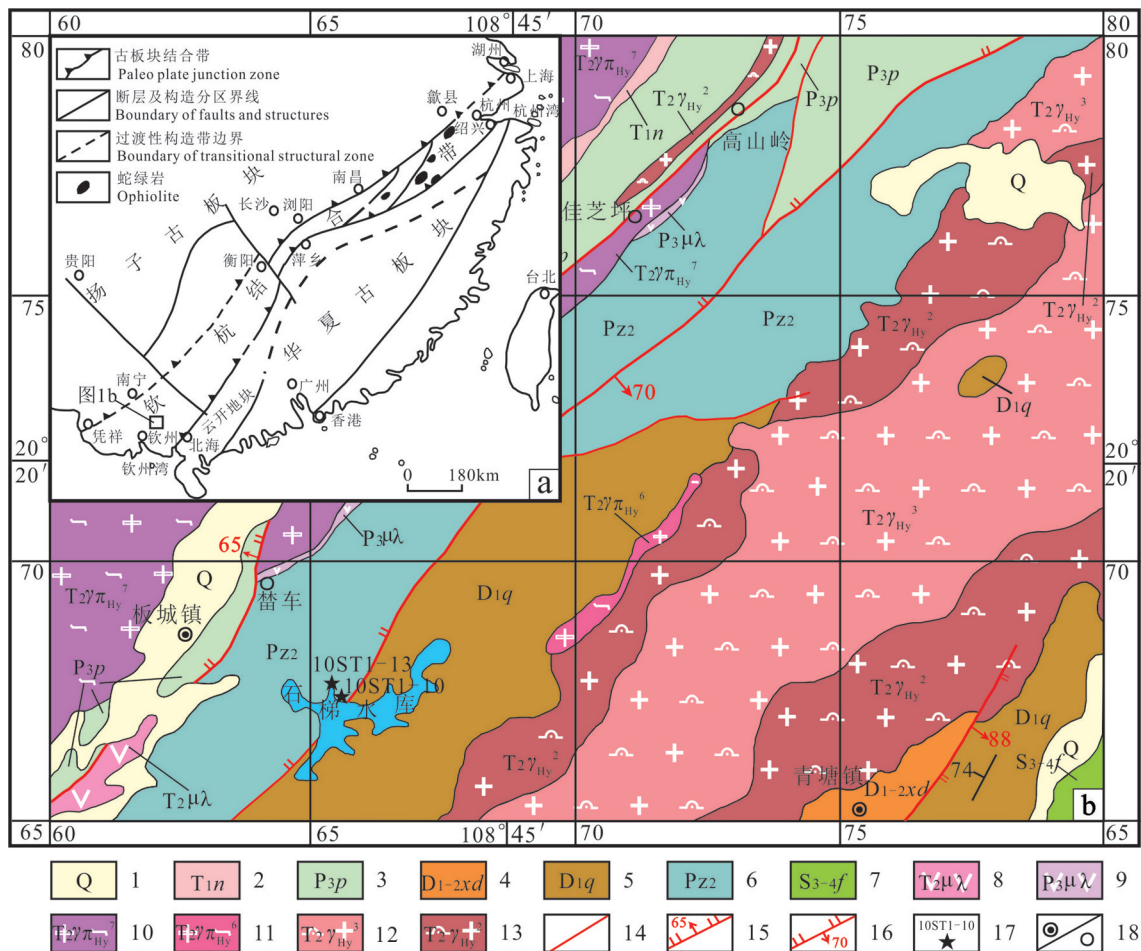


图1 桂南钦州板城区地质简图

(a图根据杨明桂和梅勇文,1997修改,b图根据广西地质调查研究院,2009修改<sup>①</sup>)

1—第四系;2—下三叠统南洪组;3—上二叠统彭久组;4—下—中泥盆统小董组;5—下泥盆统钦州组;6—上古生界硅质岩系;7—上一顶志留统防城组;8—中三叠世火山熔岩;9—晚二叠世火山熔岩;10—中三叠世碎斑(含紫苏/堇青)花岗斑岩;11—中三叠世连斑(含紫苏/堇青)花岗斑岩;12—中三叠世中粒石榴堇青黑云二长花岗岩;13—中三叠世细粒石榴堇青黑云二长花岗岩;14—性质不明断层;15—正断层;16—逆断层;17—采样位置及编号;18—镇/村

Fig.1 Geological sketch map of Bancheng area in Qinzhou, southern Guangxi

(a modified from Yang Minggui and Mei Yongwen 1997; b modified from Guangxi Geological Survey Research Institute, 2009<sup>①</sup>)

1—Quaternary; 2—Lower Triassic Nanhong Formation; 3—Upper Permian Pengjiu Formation; 4—Lower–Middle Devonian Xiaodong Formation; 5—Lower Devonian Qinzhou Formation; 6—Upper Paleozoic siliceous rock sequences; 7—Upper Silurian Fangcheng Formation; 8—Middle Triassic volcanic lava; 9—Late Permian volcanic lava; 10—Middle Triassic porphyroclastic hypersthene/cordierite granite porphyry; 11—Middle Triassic multi porphyritic hypersthene/cordierite granite porphyry; 12—Middle Triassic medium-grained garnet-cordierite-biotite monzonite granite; 13—Middle Triassic fine-grained garnet-cordierite-biotite monzonite granite; 14—Unknown fault; 15—Normal fault and its attitude; 16—Thrust fault and its attitude; 17—Sampling location and its serial number; 18—Town/village

的云母和褐铁矿等,填隙物主要为泥质(图2b);与剖面下部样品相比,剖面上部样品(10ST1-13)的碎屑成分中石英含量相对较多,岩屑含量较少,且泥质填隙物的含量也相对比剖面下部样品的少(图2d)。

### 3.2 样品制备及分析方法

将野外采集到的2个测年岩石样品送广西区域地质调查研究院实验室进行锆石分选,首先采用常

规方法将样品机械粉碎至60目左右,并采用常规的重力浮选和电磁法分选出重矿物后,在双目显微镜下手工挑选出具有代表性(晶形和透明度较好、无裂隙)的锆石颗粒作为测定对象,然后将选出的锆石送北京锆石领航科技有限公司进行锆石样品靶的制备。锆石靶制作完成后,送中国地质科学院地质研究所(北京离子探针中心)进行阴极发光(CL)

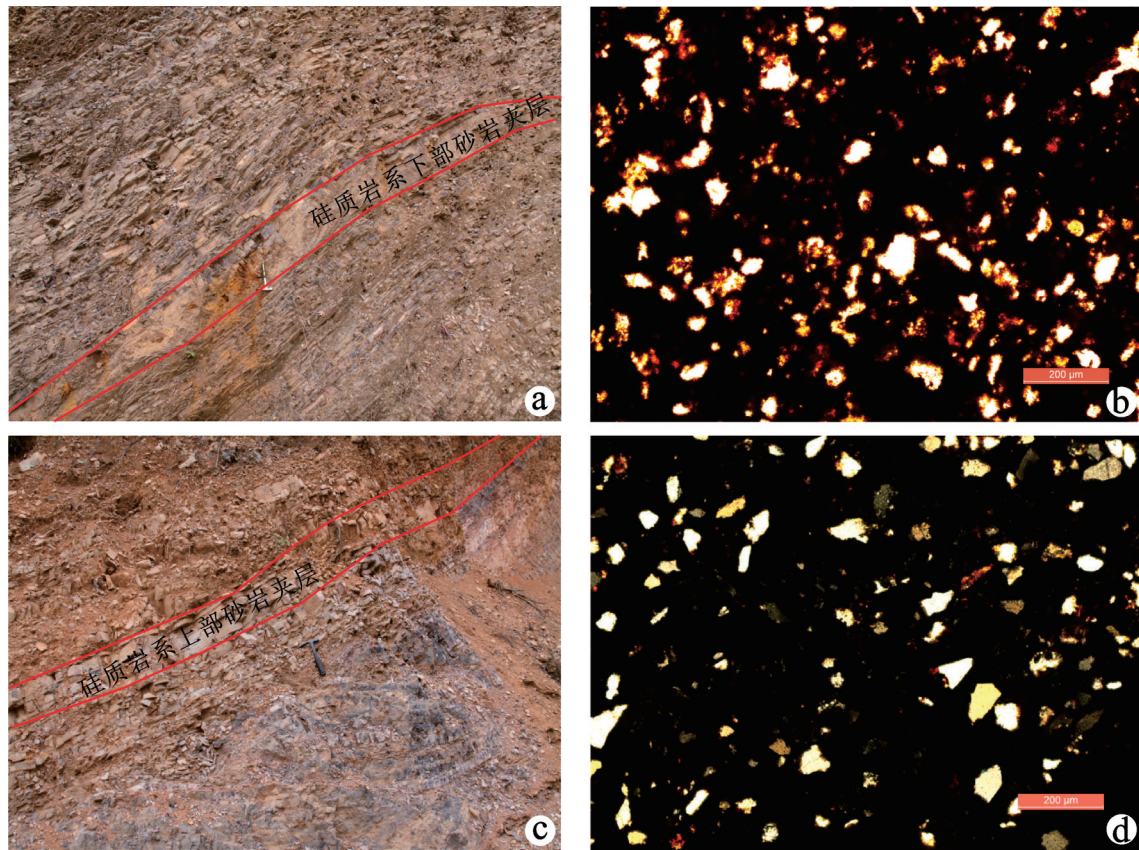


图2 晚古生代硅质岩系中粉砂岩夹层野外露头(a,c)和显微镜下照片(b,d)

Fig.2 Outcrop (a, c) and microscopic photos of siltstone intercalations of Late Paleozoic siliceous rock sequences (b, d)

成像观察,以确定锆石颗粒的内部结构及适合于LA-MC-ICP-MS测定分析的锆石颗粒与位置,阴极发光图像研究在HITACHI S3000-N型扫描电子显微镜并配有GATAN公司Chroma阴极发光探头分析仪器上完成。LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb年龄测试在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成,分析仪器为Thermo Finningan Neptune型多接收等离子质谱仪,详细的分析流程、实验原理和仪器参数见侯可军等(2009)的描述。年龄数据处理及谐和图的绘制使用美国Berkeley地质年代中心Kenneth R. Ludwig编制的计算程序Isoplot(3.0版)(Ludwig, 2003)完成,并采用 $^{204}\text{Pb}$ 法对普通铅进行校正。在具体年龄分析中,对于 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄<1000 Ma的锆石采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄做分析,而 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄>1000 Ma的锆石,则采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄进行分析(Jordan, 1988; Anderson, 2007)。测试结果见表1和表2。

## 4 碎屑锆石特征及LA-MC-ICP-MS U-Pb测年结果

### 4.1 碎屑锆石特征

晚古生代硅质岩系粉砂岩夹层样品中含有大量的碎屑锆石,锆石在光学显微镜下大部分呈无色透明状,形态上多呈柱状晶体,宽多在50~150  $\mu\text{m}$ ,长宽比在1:1~3:1。在透射光下可见,2件样品中锆石颗粒的磨圆度均相差很大,从棱柱状至浑圆状均有出现,反映出粉砂岩夹层的物质来源较复杂,物源沉积过程或搬运距离具有较大差别;在锆石阴极发光图像(CL)(图3)上,锆石的亮度也存在较大差异,多数颗粒内部具有较明显的振荡环带和不规则分带,部分颗粒内部还发育有包裹体,表明其以岩浆成因的锆石为主;个别颗粒结构较复杂,具有核边结构(具有残留的晶核,而边部出现亮白色的增生边),具有岩浆捕获锆石或变质锆石再沉积的特征。此外,从表1和表2中可以看出,晚古生代硅质

表 1 晚古生代硅质岩系下部粉砂岩夹层样品(10ST1-10)碎屑锆石U-Pb年龄测试结果

Table 1 U-Pb dating results for the detrital zircons of siltstone intercalations in the lower part of Late Paleozoic siliceous rock sequences (Sample 10ST1-10)

测点 号	含量/ $10^{-6}$			Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$
					$^{206}\text{Pb}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$				
1	335	192	266	0.72	0.0554	0.0002	0.519	0.005	0.0679	0.0006	432	9	424	4	423	4
2	322	101	66	1.53	0.0671	0.0005	1.096	0.015	0.1186	0.0016	840	12	751	7	722	9
3	1363	104	88	1.17	0.0630	0.0019	0.625	0.028	0.0719	0.0011	707	63	493	17	448	7
4	185	104	76	1.36	0.0666	0.0006	1.089	0.016	0.1187	0.0015	828	25	748	8	723	9
5	613	29	24	1.23	0.0700	0.0006	1.424	0.018	0.1476	0.0013	929	19	899	8	887	8
6	222	125	49	2.58	0.0637	0.0009	1.042	0.019	0.1188	0.0019	732	32	725	10	724	11
7	1353	23	21	1.12	0.0652	0.0014	1.063	0.025	0.1185	0.0015	789	41	736	12	722	8
8	31	36	21	1.72	0.0663	0.0007	1.083	0.014	0.1186	0.0011	817	22	745	7	723	6
9	1141	307	85	3.61	0.0550	0.0004	0.458	0.005	0.0605	0.0005	413	19	383	3	379	3
10	428	72	35	2.03	0.1690	0.0004	10.244	0.103	0.4396	0.0041	2548	5	2457	9	2349	19
11	131	20	30	0.67	0.0913	0.0004	2.886	0.027	0.2294	0.0020	1454	9	1378	7	1332	10
12	574	31	43	0.72	0.0681	0.0010	1.245	0.030	0.1326	0.0027	872	30	821	14	803	15
13	141	17	9	1.78	0.2484	0.0010	21.282	0.292	0.6213	0.0079	3176	6	3152	13	3115	32
14	3057	213	184	1.16	0.2797	0.0052	3.200	0.085	0.0828	0.0013	3361	29	1457	21	513	8
15	884	109	92	1.19	0.0564	0.0007	0.530	0.012	0.0682	0.0010	478	28	432	8	425	6
16	7639	157	140	1.12	0.1730	0.0008	1.812	0.023	0.0760	0.0008	2587	8	1050	8	472	5
17	32	69	145	0.47	0.0558	0.0003	0.465	0.006	0.0605	0.0007	456	11	388	4	379	4
18	118	40	130	0.30	0.0848	0.0003	2.094	0.024	0.1792	0.0019	1310	7	1147	8	1063	11
19	230	130	102	1.28	0.0648	0.0005	0.926	0.013	0.1037	0.0012	769	16	666	7	636	7
20	675	84	136	0.61	0.1796	0.0048	1.657	0.067	0.0668	0.0016	2650	43	992	26	417	10
21	737	133	48	2.79	0.1624	0.0012	7.964	0.174	0.3557	0.0074	2481	13	2227	20	1962	35
22	357	143	74	1.94	0.0854	0.0016	1.569	0.033	0.1339	0.0016	1324	37	958	13	810	9
23	117	26	50	0.52	0.1061	0.0007	4.664	0.063	0.3188	0.0040	1800	12	1761	11	1784	20
24	581	143	138	1.03	0.0999	0.0002	3.905	0.054	0.2834	0.0039	1633	4	1615	11	1609	20
25	72	38	18	2.06	0.0657	0.0007	1.103	0.020	0.1217	0.0017	794	22	755	10	741	10
26	82	36	46	0.77	0.0713	0.0004	1.449	0.018	0.1477	0.0018	965	12	909	7	888	10
27	246	239	212	1.13	0.0562	0.0002	0.529	0.007	0.0683	0.0008	461	9	431	4	426	5
28	510	84	78	1.08	0.1601	0.0003	9.274	0.088	0.4201	0.0040	2457	4	2365	9	2261	18
29	154	113	134	0.85	0.0594	0.0003	0.559	0.006	0.0681	0.0007	583	9	451	4	425	4
30	89	40	29	1.38	0.0676	0.0005	1.133	0.011	0.1217	0.0010	857	15	769	5	740	6
31	535	114	86	1.32	0.1519	0.0004	6.731	0.073	0.3213	0.0035	2369	4	2077	10	1796	17
32	650	96	73	1.32	0.1595	0.0004	9.603	0.094	0.4366	0.0043	2450	4	2398	9	2336	19
33	130	70	82	0.85	0.0711	0.0007	0.641	0.007	0.0654	0.0005	961	23	503	5	408	3
34	138	109	123	0.89	0.0560	0.0003	0.527	0.005	0.0682	0.0005	454	13	430	3	426	3
35	471	364	434	0.84	0.0582	0.0007	0.547	0.006	0.0683	0.0005	539	19	443	4	426	3
36	1044	1068	673	1.59	0.0653	0.0003	0.417	0.005	0.0463	0.0005	787	9	354	3	292	3
37	116	23	38	0.62	0.0941	0.0009	1.465	0.019	0.1129	0.0011	1509	18	916	8	690	6
38	73	26	42	0.63	0.0800	0.0004	2.061	0.016	0.1869	0.0013	1198	9	1136	5	1105	7
39	202	163	191	0.85	0.0563	0.0003	0.530	0.004	0.0683	0.0004	465	9	432	3	426	3
40	252	87	168	0.52	0.0717	0.0002	1.576	0.011	0.1594	0.0011	976	7	961	5	954	6
41	74	72	71	1.02	0.0551	0.0006	0.504	0.006	0.0664	0.0005	417	26	415	4	414	3
42	199	137	88	1.56	0.0580	0.0003	0.680	0.006	0.0850	0.0005	528	13	527	4	526	3
43	162	20	32	0.62	0.2239	0.0005	15.846	0.101	0.5133	0.0033	3009	3	2868	6	2671	14
44	117	18	119	0.15	0.0687	0.0005	1.268	0.016	0.1338	0.0013	889	17	831	7	810	7
45	88	61	97	0.63	0.0618	0.0008	0.582	0.009	0.0682	0.0007	733	26	466	6	426	5

续表1

测点号	含量/ $10^{-6}$			Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}$	
					$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
46	108	27	34	0.80	0.0672	0.0006	1.293	0.015	0.1395	0.0011	856	17	843	6	842	6
47	193	169	243	0.70	0.0575	0.0003	0.479	0.006	0.0604	0.0006	509	11	397	4	378	4
48	63	60	100	0.60	0.0564	0.0004	0.532	0.005	0.0684	0.0005	478	17	433	3	427	3
49	219	107	32	3.32	0.0665	0.0005	1.163	0.012	0.1269	0.0009	822	17	783	6	770	5
50	209	71	31	2.30	0.0707	0.0008	1.491	0.020	0.1529	0.0012	950	22	927	8	917	7
51	723	105	79	1.33	0.1635	0.0003	10.126	0.066	0.4492	0.0028	2492	3	2446	6	2392	12
52	112	42	69	0.61	0.0722	0.0003	1.523	0.012	0.1530	0.0010	991	8	940	5	918	6
53	101	74	108	0.69	0.0608	0.0017	0.562	0.014	0.0671	0.0013	632	66	453	9	419	8
54	163	120	294	0.41	0.0560	0.0003	0.527	0.007	0.0682	0.0008	454	11	430	5	425	5
55	169	105	113	0.93	0.0708	0.0008	0.654	0.008	0.0671	0.0006	954	22	511	5	419	4
56	119	15	13	1.14	0.1689	0.0007	10.470	0.114	0.4493	0.0044	2547	6	2477	10	2392	20
57	235	159	231	0.69	0.0621	0.0002	0.584	0.005	0.0682	0.0004	676	25	467	3	425	3
58	448	370	281	1.32	0.0559	0.0002	0.526	0.004	0.0683	0.0004	456	7	429	3	426	3
59	765	323	178	1.81	0.0741	0.0003	1.550	0.013	0.1517	0.0014	1056	7	950	5	911	8
60	126	72	137	0.53	0.0565	0.0005	0.531	0.006	0.0681	0.0006	472	23	432	4	425	3
61	159	83	121	0.69	0.0619	0.0003	0.887	0.007	0.1039	0.0007	672	11	645	4	637	4
62	122	24	27	0.87	0.1647	0.0007	9.131	0.079	0.4021	0.0030	2506	12	2351	8	2179	14
63	263	69	79	0.87	0.0678	0.0009	1.138	0.013	0.1218	0.0013	865	31	772	6	741	8
64	57	31	26	1.19	0.0670	0.0005	1.124	0.012	0.1218	0.0009	839	17	765	6	741	5
65	316	116	25	4.60	0.0711	0.0010	1.546	0.029	0.1577	0.0019	961	30	949	11	944	11
66	328	65	72	0.90	0.1132	0.0004	4.612	0.030	0.2955	0.0017	1851	1	1751	5	1669	9
67	139	37	39	0.95	0.0758	0.0008	1.767	0.022	0.1690	0.0011	1100	20	1033	8	1006	6
68	189	64	32	2.02	0.0637	0.0018	1.024	0.034	0.1164	0.0012	732	29	716	17	710	7
69	106	38	56	0.69	0.0665	0.0006	1.116	0.015	0.1218	0.0012	820	180	761	7	741	7

岩系下部粉砂岩夹层样品(10ST1-10)碎屑锆石的Th/U在0.15~4.60,上部粉砂岩夹层样品(10ST1-13)碎屑锆石的Th/U在0.07~3.93,除样品10ST1-13中的一个测点(52点Th/U=0.07)的Th/U小于0.1外,其他颗粒的Th/U比值均>0.1;2个样品共121个测点中有117个测点的Th/U比值>0.4,亦表明这些锆石主要以岩浆锆石为主(通常认为岩浆锆石的Th/U比值>0.4,而变质锆石的Th/U比值<0.1)(Belousova et al., 2002; Corfu et al., 2003)。

#### 4.2 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年结果

##### 4.2.1 晚古生代硅质岩系下部粉砂岩夹层样品(10ST1-10)

本次研究中选择晚古生代硅质岩系下部粉砂岩夹层样品(10ST1-10)中69粒碎屑锆石进行了LA-MC-ICP-MS U-Pb年龄分析,测试结果见表1。其碎屑锆石的谐和图和年龄频谱见图4。从表1和图4中可以看出,该样品的锆石年龄分布范围为(292±3)~(3176±6) Ma,大多数锆石的年龄分析数据

点分布在谐和线上,部分点则位于谐和线之下(图4a),表明有可能是Pb丢失或有少量普通Pb的存在。在年龄数据的频谱图(图4b)上显示出,U-Pb有效年龄集中分布于3个主要的年龄组内。

(1)408~526 Ma年龄组:共有22颗锆石测点,占总有效数据的31.88%,其年龄加权平均值为432 Ma,峰值年龄为423 Ma。这些锆石的Th/U比值介于0.41~1.56,CL图像显示出强振荡环带特征,属于岩浆成因锆石。

(2)690~954 Ma年龄组:有24颗锆石测点,占总有效数据的34.78%,可细分为690~810 Ma和842~954 Ma两个亚年龄组。①690~810 Ma亚年龄组:共有16颗锆石测点,占总有效数据的23.19%,年龄加权平均值为742 Ma,峰值为732 Ma;其Th/U比值介于0.15~3.32,CL图像显示出弱-强振荡环带特征,为岩浆成因。②42~954 Ma亚年龄组:共有8颗锆石测点,占总有效数据的11.59%,年龄加权平均值为907 Ma,峰值为908 Ma;其Th/U比值介于

表2 晚古生代硅质岩系上部粉砂岩夹层样品(10ST1-13)碎屑锆石U-Pb年龄测定结果

Table 2 U-Pb dating results for the detrital zircons of siltstone intercalations in the upper part of the siliceous rock sequences (Sample 10ST1-13)

测点号	含量/10 <sup>-6</sup>			Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma					
	Pb	Th	U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ
1	90	35	40	0.88	0.0690	0.0005	1.214	0.017	0.1276	0.0016	898	19	807	8	774	9
2	184	93	61	1.52	0.0655	0.0004	1.150	0.020	0.1273	0.0021	791	8	777	9	773	12
3	116	54	76	0.71	0.0711	0.0005	1.248	0.020	0.1273	0.0020	961	15	823	9	772	11
4	35	11	14	0.76	0.1006	0.0007	3.847	0.060	0.2773	0.0039	1636	14	1603	13	1578	20
5	128	50	28	1.77	0.0656	0.0035	1.142	0.077	0.1261	0.0039	794	111	774	37	765	23
6	108	75	68	1.10	0.0559	0.0005	0.520	0.007	0.0675	0.0007	456	25	425	5	421	4
7	314	103	119	0.87	0.0694	0.0004	1.225	0.021	0.1280	0.0021	922	11	812	10	776	12
8	255	97	119	0.82	0.0558	0.0004	0.519	0.007	0.0675	0.0009	443	17	424	5	421	6
9	356	95	57	1.68	0.0652	0.0005	1.139	0.017	0.1268	0.0017	789	15	772	8	770	10
10	225	26	26	1.01	0.0989	0.0005	3.598	0.048	0.2638	0.0032	1603	9	1549	11	1509	16
11	537	85	79	1.08	0.0925	0.0004	3.198	0.052	0.2507	0.0041	1480	9	1457	13	1442	21
12	97	30	27	1.10	0.0714	0.0006	1.485	0.027	0.1508	0.0024	969	18	924	11	906	13
13	251	79	38	2.10	0.0699	0.0004	1.374	0.016	0.1426	0.0015	924	7	878	7	860	8
14	1149	374	240	1.56	0.0723	0.0002	1.549	0.017	0.1553	0.0017	994	10	950	7	931	9
15	1091	963	1216	0.79	0.3561	0.0036	4.578	0.108	0.0929	0.0017	3733	16	1745	20	573	10
16	213	78	51	1.53	0.0670	0.0004	1.179	0.014	0.1275	0.0013	839	11	791	7	774	8
17	277	78	152	0.51	0.0868	0.0003	2.485	0.035	0.2076	0.0028	1367	6	1268	10	1216	15
18	91	27	51	0.53	0.0723	0.0004	1.510	0.020	0.1515	0.0017	994	11	934	8	909	10
19	213	120	93	1.30	0.0779	0.0005	1.299	0.021	0.1211	0.0020	1144	18	845	9	737	12
20	108	65	42	1.56	0.0673	0.0005	1.099	0.012	0.1184	0.0010	856	17	753	6	722	6
21	21	20	74	0.27	0.0623	0.0004	0.902	0.010	0.1051	0.0010	683	18	653	5	644	6
22	774	146	120	1.21	0.1692	0.0003	10.305	0.103	0.4417	0.0042	2550	3	2463	9	2358	19
23	95	33	53	0.63	0.0895	0.0004	2.796	0.031	0.2265	0.0024	1417	10	1354	8	1316	13
24	343	164	85	1.93	0.0714	0.0003	1.558	0.014	0.1581	0.0012	970	14	954	6	946	7
25	38	11	17	0.65	0.0714	0.0011	1.416	0.025	0.1440	0.0016	969	30	896	11	867	9
26	146	91	58	1.59	0.0651	0.0006	1.044	0.013	0.1163	0.0012	789	20	726	7	709	7
27	236	149	145	1.02	0.0668	0.0002	1.172	0.010	0.1272	0.0010	832	3	788	5	772	6
28	158	143	63	2.26	0.0588	0.0004	0.640	0.006	0.0789	0.0006	561	15	502	4	490	4
29	138	123	56	2.19	0.0579	0.0004	0.629	0.007	0.0787	0.0007	528	10	495	5	488	4
30	81	87	58	1.50	0.0674	0.0004	0.834	0.009	0.0898	0.0008	850	11	616	5	554	5
31	24	21	21	1.02	0.0714	0.0006	1.477	0.016	0.1501	0.0012	969	16	921	6	902	7
32	235	30	28	1.06	0.2807	0.0007	25.089	0.215	0.6482	0.0055	3367	3	3312	8	3221	21
33	169	162	41	3.93	0.0572	0.0005	0.622	0.007	0.0789	0.0006	498	19	491	4	489	3
34	230	241	107	2.26	0.0676	0.0004	0.736	0.010	0.0789	0.0010	857	17	560	6	490	6
35	32	21	14.7	1.44	0.0682	0.0011	1.148	0.021	0.1223	0.0015	876	32	776	10	744	9
36	296	116	47	2.45	0.0788	0.0004	2.153	0.019	0.1982	0.0017	1166	5	1166	6	1166	9
37	52	19	39	0.49	0.0950	0.0005	3.166	0.031	0.2415	0.0022	1529	9	1449	8	1395	11
38	91	32	25	1.30	0.0786	0.0011	1.897	0.039	0.1751	0.0027	1161	29	1080	14	1040	15
39	478	258	95	2.71	0.0659	0.0003	1.154	0.011	0.1269	0.0010	806	9	779	5	770	6
40	99	48	38	1.25	0.0651	0.0005	1.077	0.013	0.1199	0.0012	789	19	742	6	730	7
41	103	56	49	1.15	0.0724	0.0007	1.269	0.018	0.1271	0.0015	998	14	832	8	772	9
42	40	11	7	1.61	0.0722	0.0016	1.226	0.030	0.1238	0.0020	991	45	813	14	753	12
43	491	114	84	1.36	0.0946	0.0003	3.245	0.032	0.2488	0.0024	1520	3	1468	8	1432	12
44	100	37	44	0.85	0.0662	0.0007	1.033	0.017	0.1132	0.0016	813	21	720	9	692	9
45	146	47	20	2.30	0.0731	0.0009	1.371	0.030	0.1357	0.0021	1018	24	877	13	821	12
46	578	213	85	2.51	0.0722	0.0003	1.501	0.016	0.1508	0.0015	991	7	931	6	906	8
47	173	85	159	0.54	0.0724	0.0002	1.479	0.017	0.1482	0.0016	998	6	922	7	891	9
48	187	73	39	1.89	0.0771	0.0007	1.877	0.029	0.1766	0.0022	1124	19	1073	10	1049	12
49	529	416	233	1.79	0.0712	0.0004	0.894	0.013	0.0911	0.0014	963	13	648	7	562	8
50	112	48	55	0.86	0.0561	0.0015	0.505	0.019	0.0652	0.0013	454	64	415	13	407	8
51	60	29	19	1.56	0.0689	0.0012	1.195	0.026	0.1261	0.0019	898	69	798	12	766	11
52	15	13	185	0.07	0.0641	0.0003	1.033	0.012	0.1169	0.0013	746	9	720	6	713	7



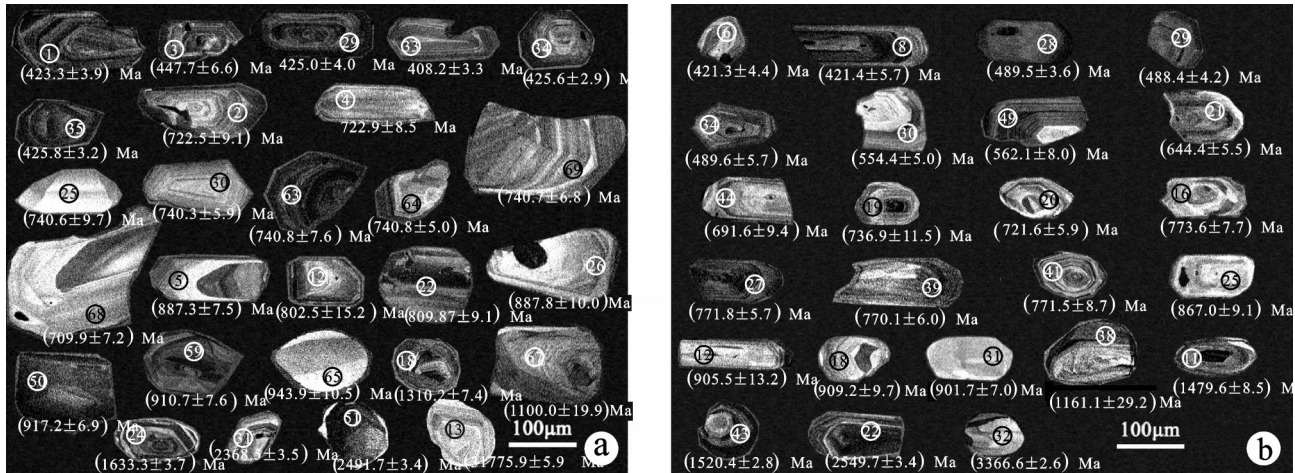


图3 晚古生代硅质岩系中粉砂岩夹层代表性阴极发光图像(a为10ST1-10;b为10ST1-13)

Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images of selected zircons from siltstone intercalations of Late Paleozoic siliceous rock sequences

0.52~4.60, CL 图像显示出弱振荡环带或面状分带, 应多为岩浆成因。

(3) 2368~2548 Ma 年龄组: 共有 8 颗锆石测点, 占总有效数据的 11.59%, 年龄加权平均值为 2463 Ma, 峰值为 2470 Ma; Th/U 比值介于 0.87~2.79, CL 图像显示锆石呈均质无分带, 个别具变质增生边。

此外, 还有 2 颗锆石的 U-Pb 年龄为 3009 Ma 和 3176 Ma, 占总有效数据的 2.90%, 其 Th/U 比值分别为 0.62~1.78, CL 图像显示锆石无分带结构。其中最小的锆石 U-Pb 年龄值为 (292±3) Ma, 该年龄值应代表其沉积的下限年龄。

#### 4.2.2 晚古生代硅质岩系上部粉砂岩夹层样品 (10ST1-13)

本次对晚古生代硅质岩系上部粉砂岩夹层样品 (10ST1-13) 中 52 粒锆石进行了 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄分析 (表 2)。其年龄频谱见图 4。从表 2 和碎屑锆石的谐和图 (图 4c) 可知, 该样品的锆石 U-Pb 年龄值分布于 (407±8)~(3367±3) Ma 区间内。在年龄数据的频谱图 (图 4d) 上可以看出, 其年龄分布比晚古生代硅质岩系下部粉砂岩夹层的锆石年龄更为复杂, U-Pb 有效年龄集中分布于 3 个主要的年龄组内:

(1) 407~573 Ma 年龄组: 共有 10 颗锆石测点, 占总有效数据的 19.23%, 年龄加权平均值为 484 Ma, 峰值为 489 Ma; 其 Th/U 比值介于 0.79~3.93, 锆石 CL 图像呈现出较清晰的振荡环带, 为岩浆成因。

(2) 644~946 Ma 年龄组: 共有 30 颗锆石测点, 占总有效数据的 57.69%, 可细分为 644~776 Ma 和 820~946 Ma 两个亚年龄组。① 644~776 Ma 亚年龄组: 共有 20 颗锆石测点, 占总有效数据的 38.46%, 年龄加权平均值为 737 Ma, 峰值为 772 Ma; 其 Th/U 比值介于 0.07~2.71, CL 图像显示锆石呈明显的振荡环带特征, 为岩浆成因。② 820~946 Ma 亚年龄组: 共有 10 颗锆石测点, 占总有效数据的 19.23%, 年龄加权平均值为 889 Ma, 峰值为 906 Ma; 其 Th/U 比值介于 0.53~2.51, CL 图像显示锆石呈弱-强振荡环带或面状分带特征, 属于岩浆成因。

(3) 1124~1636 Ma 年龄组: 共有 10 颗锆石测点, 占总有效数据的 19.23%, 可细分为 1124~1166 Ma 和 1367~1636 Ma 两个亚年龄组。① 1124~1166 Ma 亚年龄组: 共有 3 颗锆石测点, 占总有效数据的 5.77%, 年龄加权平均值为 1164 Ma, 峰值为 1164 Ma; 其 Th/U 比值介于 1.30~2.45, CL 图像显示锆石呈弱振荡环带, 应多为岩浆成因, 个别颗粒边部有薄的变质增生边。② 1367~1636 Ma 亚年龄组: 共有 7 颗锆石测点, 占总有效数据的 13.46%, 年龄加权平均值为 1501 Ma, 没有明显的峰值; 其 Th/U 比值介于 0.49~1.36, 呈弱振荡环带, 部分锆石有继承锆石的残留核, 应为岩浆成因。

该样品中还有 1 颗锆石的 U-Pb 年龄为 3367 Ma, 为样品中最老的年龄值, 占总有效数据的 1.92%, 其 Th/U 比值为 1.06, CL 图像显示锆石无分

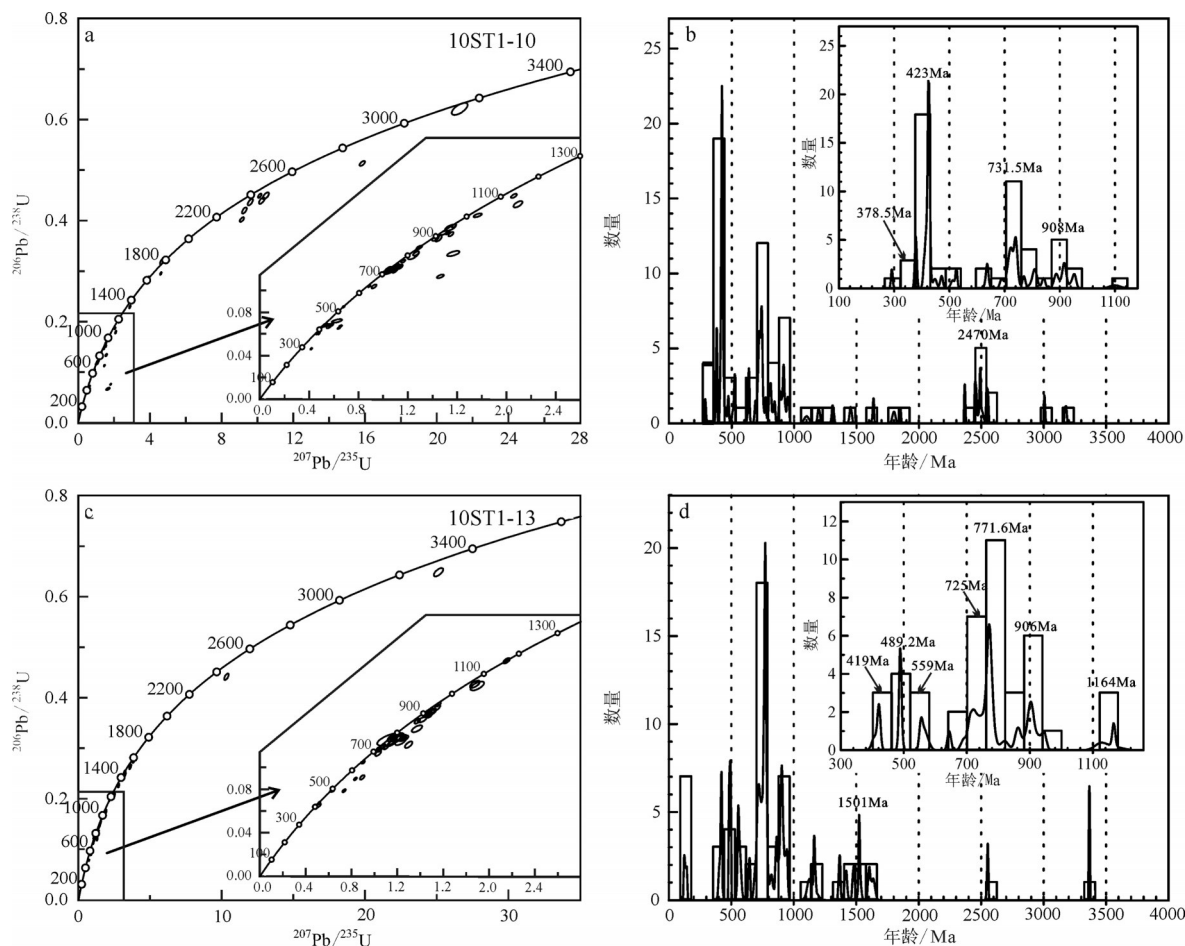


图4 晚古生代硅质岩系中粉砂岩夹层碎屑锆石U-Pb谐和曲线(a、c)和年龄频谱图(b、d)

Fig.4 U-Pb concordia diagrams (a, c) and age histograms (b, d) of the detrital zircon ages of siltstone intercalations of Late Paleozoic siliceous rock sequences

带结构。

## 5 讨论

### 5.1 区域构造热事件及物源区分析

由于盆地物源的多样性、不同物源区贡献差异性以及碎屑物搬运过程中分异作用等的影响,使得通过岩石碎屑组成及地球化学组成判别物源变得非常困难,而同位素及其年代学的发展为这一问题的解决提供了新的可能,不仅促使物源分析向精细化方向发展,而且有效弥补其他判别方法的不足,使最终分析结果更为准确可信。由于不同来源的碎屑物具有不同的年龄组成,该层位中颗粒锆石必然具多个频率峰值,因此,盆地内沉积物颗粒锆石年龄谱系能有效地示踪源区背景和性质(Fedo et al., 2003)。

#### 5.1.1 区域构造热事件

根据上述晚古生代硅质岩系下部(10ST1-10)和

上部(10ST1-13)2个粉砂岩夹层样品的测年结果综合研究分析表明,本次所获得121个有效定年数据的锆石中大多数为岩浆锆石,在年龄数据的频谱图(图4b、d)上可以识别出407~573 Ma(早古生代)、644~954 Ma(新元古代)、1124~1636 Ma(中元古代)和2368~2548 Ma(古元古代早期—新太古代晚期)4个主要的年龄组(区间),记录了物源区(区域上)可能存在4期主要的区域构造热事件。其中以早古生代和新元古代最为突出,暗示这两期构造-岩浆活动较为活跃,为区内最重要的构造活动时期。

其中获得的407~573 Ma(早古生代)年龄组,在晚古生代硅质岩系砂岩夹层的2个样品中均占较大的比例(仅次于新元古代的年龄),总共有32组锆石年龄数据,约占总体(121颗锆石,下同)的26.45%,在2个样品中的峰值分别为423 Ma和489 Ma,分别对应于中—晚志留世和晚寒武世。早古生代花岗

岩在华夏板块的云开地块中广泛发育(彭松柏等, 2006; Wang et al., 2007; 覃小锋等, 2013); 此外, 覃小锋等(2017)在云开地块北缘岑溪市糯洞、白爽和安平一带获得(变质)中基性火山岩的一系列(441±2)~(444±2)Ma的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄, 这些年龄与碎屑锆石限定的岩浆活动时间基本相吻合, 表明早古生代存在有大规模的岩浆活动。

本次获得690~954 Ma(新元古代)年龄组在2个样品中均占显著优势地位, 共有54个锆石年龄数据, 约占总体的44.63%, 在两个样品中的峰值分别为732 Ma和772 Ma, 并获得906 Ma和908 Ma小的峰值。最新的研究资料表明, 华南地区前寒武纪四堡群/冷家溪群/梵净山群/天堂山岩群和丹洲群/板溪群/云开群之间存在的高角度不整合与Grenville造山运动无关, 它反映的是发生于820 Ma左右的四堡运动的构造事件(高林志等, 2015; 陈建书等, 2016; 李利阳等, 2016; 王敏等, 2016)。由此表明, 900 Ma左右和730~770 Ma的峰值可能分别代表华夏与扬子板块之间一次重要的拼合事件和拼合之后的一次裂解事件。华夏板块零星出露有新元古代的岩浆岩(Wan et al., 2010); 在云开地块前寒武纪变质基底中还获得了一系列约850 Ma深熔事件的年龄(未发表数据), 这些年龄与碎屑锆石限定的岩浆活动时间基本一致。因此, 该年龄组应与华夏与扬子板块在四堡期(约820 Ma)发生拼合及之后发生裂解所伴随的构造岩浆活动有关。

1124~1636 Ma(中元古代)年龄组仅在晚古生代硅质岩系上部粉砂岩夹层样品中见有发育, 只有10个锆石年龄数据, 约占总体的8.26%, 较为次要, 可细分为1124~1166 Ma和1367~1636 Ma两个亚年龄组, 峰值分别为1164 Ma和1501 Ma。云开地区发育有978~997 Ma与岛弧相关的镁铁质火山岩(Zhang et al., 2012), 与Grenville期造山事件相对应, 表明前者与Grenville期构造岩浆活动有关, 但其所占比例极少, 说明物源区(云开地区)不在Rodinia超级大陆中心, 可能处于其边缘地区。

2368~2548 Ma(古元古代早期-新太古代晚期)年龄组占比例也较少, 只有9个锆石年龄数据, 约占总体的7.44%, 主要见于晚古生代硅质岩系下部粉砂岩夹层样品中, 上部的样品中只有1颗。其峰值为2470 Ma。由于在华夏地块至今没有真正的太古

宙结晶基底的报道, 且这些锆石大都呈它形, 磨圆程度也较高, 说明其应为经历了长距离的搬运再沉积的产物。

### 5.1.2 物源区

综上所述, 广西钦州市板城镇石梯水库晚古生代硅质岩系粉砂岩夹层的两个样品记录的构造热事件中, 具有明显优势的年龄均为早古生代(407~573 Ma)和新元古代(644~954 Ma), 其分别与云开地块广泛发育的早古生代岩浆活动年龄以及新元古代岩浆活动和深熔作用年龄相当, 说明碎屑锆石的主要年龄与云开地区的岩浆活动和深熔作用是匹配的。此外, 从阴极发光图像(图3)上看, 两个年龄组的锆石形态均多呈自形-半自形柱状, 显示其为从源区短距离搬运沉积的产物。由此推测, 其主要沉积物源可能来自于离钦防海盆不远的华夏板块云开地区。

从年龄数据的频谱图(图4b、d)上可以看出, 晚古生代硅质岩系下部(10ST1-10)和上部(10ST1-13)两个粉砂岩夹层样品, 虽然占明显优势的年龄均为407~573 Ma(早古生代)和644~954 Ma(新元古代), 但下部样品(10ST1-10)的两组锆石占测试比例分别为31.88%和34.78%, 二者大致相当, 指示晚古生代硅质岩系下部岩石的源区物质主要以早古生代和新元古代地质体为主; 而上部样品(10ST1-13)的两组锆石占测试比例分别为19.23%和57.69%, 暗示早古生代物源所占比例已经显著下降, 晚古生代硅质岩系上部岩石的源区物质主要以新元古代地质体为主, 早古生代地质体成为次要的物源区。同时, 在图4b、d中还可以看出, 除了古元古代早期-新太古代晚期经历了长距离搬运再沉积的锆石外, 晚古生代硅质岩系下部岩石(10ST1-10)早古生代(407~573 Ma)和新元古代(644~954 Ma)两个年龄组的峰值(分别为423 Ma和732 Ma)均比上部岩石(10ST1-13)的峰值(分别为489 Ma和772 Ma)年轻; 上部岩石(10ST1-13)源区物质中还出现较高比例(19.23%)1124~1636 Ma的地质体。此外, 根据王玉净等(1998)和邝国敦等(1999)对地层中牙形类和放射虫类等化石的研究资料表明, 其地层时代为晚泥盆世-中二叠世; 而前述碎屑锆石U-Pb年代学研究表明, 其锆石的最小年龄值为(292±3)Ma(早二叠世), 该年龄值应代表该样

品沉积的下限年龄,和古生物化石的证据相吻合。结合晚古生代硅质岩系由下往上的沉积物源越来越复杂,年龄相对更老的特征表明,钦—杭结合带西南段的云开地块在早古生代造山作用结束后迅速而强烈地隆升成为剥蚀源区,在晚泥盆世—中二叠世时期随着隆升、剥蚀程度的加大,更深、更远的源区物质被剥蚀、搬运、沉积到钦—杭结合带西南段的钦防海盆中。

## 5.2 沉积盆地大地构造属性判别

利用碎屑沉积岩反演源区特征、盆地古地理格局以及盆地大地构造属性已成为沉积学研究的重要内容。近年来,Cawood et al.(2012)通过对各种类型沉积盆地的研究表明,聚合背景的沉积盆地(包括海沟盆地、弧后盆地和弧前盆地)由于主要接受同沉积时代岩浆活动的物源,在该类型沉积盆地的碎屑沉积岩中通常有超过50%的碎屑锆石年龄接近地层沉积的年龄;在碰撞背景的沉积盆地(包括同碰撞盆地和后碰撞盆地)中,由于主要接受了碰撞期岩浆、早期的岛弧和卷入造山带的克拉通古老物质三方面的物源,故在该类型沉积盆地中一般只有比较少的锆石接近地层沉积的年龄(通常只有10%~50%的碎屑锆石年龄与地层沉积年龄之差不超过150 Ma);而在拉伸环境下往往以发育基性岩浆活动为主,基性岩本身的岩浆锆石一般较少,所以在拉伸背景的沉积盆地(包括被动大陆边缘盆地和裂谷盆地等)中往往只有不超过5%的碎屑锆石的年龄与地层沉积年龄之差不超过150 Ma。因此,可以通过碎屑锆石所记录的年龄来判断沉积盆地的大地构造属性。从上述的测年结果看,晚古生代硅质岩系下部粉砂岩夹层样品(10ST1-10)中只有4颗晚古生代同沉积的碎屑锆石,占5.80%,而上部粉砂岩夹层样品(10ST1-13)中缺失晚古生代同沉积的碎屑锆石。根据Cawood et al.(2012)提出的沉积盆地大地构造属性类型判别方法,该盆地应属于拉伸背景的沉积盆地。

## 6 结 论

(1)采用LA-MC-ICP-MS 锆石U-Pb定年方法,在广西钦州市板城镇石梯水库晚古生代硅质岩系下部和上部两个粉砂岩夹层样品中分别获得了69个和52个有效年龄。碎屑锆石年龄频谱显示出

407~573 Ma(早古生代)、644~954 Ma(新元古代)、1124~1636 Ma(中元古代)和2368~2548 Ma(古元古代早期—新太古代晚期)4个主要的年龄组(区间),记录了物源区存在4期主要的区域构造热事件。

(2)对晚古生代硅质岩系中粉砂岩夹层碎屑锆石U-Pb年龄的综合分析认为,华夏板块的云开地区是晚古生代硅质岩系中粉砂岩的主要沉积物源区。晚古生代硅质岩系下部岩石和上部岩石的物源区存在明显区别,其中下部岩石的沉积物源主要以早古生代和新元古代地质体为主,而上部岩石的沉积物源主要来自新元古代地质体,早古生代和中元古代地质体成为次要的物源区。此外,晚古生代硅质岩系下部岩石早古生代和新元古代两个年龄组的峰值(分别为423 Ma和732 Ma)均比上部岩石相应年龄组的峰值(分别为489 Ma和772 Ma)年轻。晚古生代硅质岩系由下往上的沉积物源越来越复杂,年龄相对更老的特征表明,钦—杭结合带西南段的云开地块在早古生代造山作用结束后迅速而强烈地隆升成为剥蚀源区,在晚泥盆世—中二叠世时期随着隆升、剥蚀程度的加大,更深、更远的源区物质被剥蚀、搬运、沉积到钦—杭结合带西南段的钦防海盆中。

(3)晚古生代硅质岩系粉砂岩夹层中含极少或缺少晚古生代同沉积的碎屑锆石,暗示钦—杭结合带西南段的钦防海盆在晚古生代时期应处于拉伸的构造背景,该盆地应属于拉伸背景的沉积盆地。

**致谢:**感谢参加野外工作的宋炯、黄杰、杨文和朱安汉等,在LA-ICP-MS 锆石U-Pb测年和数据分析过程中得到中国地质科学院矿产资源研究所侯可军博士的热心指导和帮助,在此一并致以衷心的感谢!

## 注释

①广西地质调查研究院. 2009. 1:25万南宁幅、北海幅区域地质调查报告[R].

## References

- Andersen T. 2005. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: Limiting conditions from statistics and numerical simulation[J]. *Chemical Geology*, 216: 249-270.
- Anderson D L. 2007. *New Theory of the Earth*[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 1-384.

- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, Fisher N J. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Mineralogy and Petrology*, 143: 602–622.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region. 1985. *Regional Geology of Guangxi Zhuang Autonomous Region* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–853(in Chinese).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region. 1997. *Stratigraphy(Lithostratic) of Guangxi Zhuang Autonomous Region*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1–310(in Chinese).
- Carter A, Steve J M. 1999. Combined detrital-zircon fission track and U-Pb dating: A new approach to understanding hinterland evolution[J]. *Geology*, 27(3): 235–238.
- Cawood P A, Hawkesworth C J, Dhuime B. 2012. Detrital zircon record and tectonic setting[J]. *Geology*, 40(10): 875–898.
- Chen Jianshu, Dai Chuangu, Peng Chenglong, Wang Min, Lu Dingbiao, Wang Xuehua, Luo Shan. 2016. The filling sequence and stratigraphic framework of rift basin during the Neoproterozoic 820–635 Ma in Hunan, Guizhou and Guangxi[J]. *Geology in China*, 43(3): 899–920(in Chinese with English abstract).
- Corfu F, Hancher J M, Hoskin P W O, Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 469–500.
- Dickinson W R, Suczek C A. 1979. Plate tectonics and sandstone compositions[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 63(12): 2164–2182.
- Fedo C M, Sircombe K N, Rainbird R H. 2003. Detrital zircon analysis of the sedimentary record[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 277–303.
- Gao Linzhi, Yin Chongyu, Ding Xiaozhong, Wang Zejiu, Zhangheng. 2015. Rating data of the Neoproterozoic chronostratigraphy and stratigraphic correlation in south China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 36(5): 533–545 (in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting- ICP- MS[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481–492(in Chinese with English abstract).
- Jordan T H. 1988. Structure and formation of the continental tectosphere[J]. *Journal of Petrology*, 29: 11–37.
- Kuang Gouden, Li Jiexiang, Zhong Keng, Su Yibao, Tao Yebin. 1999. *Carboniferous of Guangxi*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 1–258(in Chinese).
- Li Liyang, You Guoqing, Zhang Chuanheng, Jia Longlong, Han Yao, Zhang Heng, Liu Bo, Feng Xin, Li Xinfu, Zhang Jinlong. 2016. SHRIMP age of the lava from the Sibao Group in Guilin and its chronostratigraphic significance[J]. *Geology in China*, 43(6):1992–1998 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. *User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1–70.
- Peng Songbai, Jin Zhenmin, Liu Yunhua, Fu Jianming, He Longqing, Cai Minghai, Wang Yanbin. 2006. Petrochemistry, chronology and tectonic setting of strong peraluminous anatectic granitoids in Yunkai orogenic belt, Western Guangdong Province, China[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 17(1):1–12 (in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaofeng, Wang Zongqi, Cao Jie, Hu Guiang, Pan Luozhong. 2013. Petrogenesis of early indosinian granites from the southwestern segment of Qinfang tectonic belt, Southern Guangxi: Constraints from zircon U-Pb chronology and geochemistry[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(5): 1471–1488(in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaofeng, Wang Zongqi, Gong Jianghua, Zhao Guoying, Shi Hao, Zhan Junyan, Wang Zhen. 2017. The confirmation of Caledonian intermediate-mafic volcanic rocks in northern margin of Yunkai block: Evidence for early Paleozoic paleo-ocean basin in southwestern segment of Qinzhou-Hangzhou joint belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3): 791–809 (in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaofeng, Wang Zongqi, Hu Guiang, Cao Jie, Feng Zuohai. 2013. Geochronology and geochemistry of Hudong gneissic composite pluton in the junction of Guangdong and Guangxi Provinces: Implications for Early Paleozoic tectono-magmatism along the northern margin of Yunkai block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 3115–3130(in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaofeng, Wang Zongqi, Zhang Yingli, Pan Luozhong, Hu Guiang, Zhou Fusheng. 2011. Geochronology and geochemistry of early mesozoic acid volcanic rocks from southwest Guangxi: Constraints on tectonic evolution of the southwestern segment of Qinzhou-Hangzhou joint belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 794–808(in Chinese with English abstract).
- Wan Y S, Liu D Y, Wilde S A, Cao J J, Chen B, Du L L. 2010. Evolution of the Yunkai terrane, South China: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating, geochemistry and Nd isotope[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37: 140–153.
- Wang Min, Dai Chuangu, Chen Jianshu, Wang Xuehua, Ma Huizhen. 2016. Neoproterozoic geochronologic framework of magmatism in Fanjingshan area and its tectonic implications[J]. *Geology in China*, 43(3): 843–856(in Chinese with English abstract).
- Wang Y J, Fan W M, Zhao G C, Ji S C, Peng T P. 2007. Zircon U-Pb geochronology of gneissic rocks in the Yunkai massif and its implications on the Caledonian event in the South China Block[J]. *Gondwana Research*, 12(4): 404–416.
- Wang Yujing, Luo Hui, Kuang Gouden, Li Jiexiang. 1998. Late Devonian-Late Permian strata of cherty facies at Xiaodong and Bancheng Counties of the Qinzhou area, SE Guangxi[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 15(4): 351–366(in Chinese with English abstract).

- Weltje G J, Eynatten H V. 2004. Quantitative provenance analysis of sediments: Review and outlook[J]. *Sedimentary Geology*, 171: 1–11.
- Wu Haoruo. 2003. Discussion on tectonic palaeogeography of Nanpanjiang sea in the late Palaeozoic and Triassic[J]. *Journal of Palaeogeography*, 5(1): 63–76(in Chinese with English abstract).
- Wu Yi, Gong Yiming, Du Yuansheng. 1997. Devonian Sequence Stratigraphy and Sea Level Change of South China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 1–110(in Chinese).
- Xu Xiaosong, Yin Fuguang, Wan Fang, Liang Zonghua, Wei Baodong, Zhang Jinduan. 2001. The migration of the Qinzhou – Fangcheng trough in Guangxi and associated sedimentary–tectonic transform surfaces[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 21(4): 1–10(in Chinese with English abstract).
- Yang Minggui, Mei Yongwen. 1997. Characteristics of geology and metallogenesis in the Qinzhou–Hangzhou paleoplate juncture[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 9 (3): 52–59(in Chinese with English abstract).
- Zhang A M, Wang Y J, Fan W M, Zhang Y Z, Yang J. 2012. Earliest Neoproterozoic (ca. 1.0 Ga) arc–back–arc basin nature along the northern Yunkai Domain of the Cathaysia Block: Geochronological and geochemical evidence from the metabasite[J]. *Precambrian Research*, 220–221(8): 217–233.
- 附中文参考文献**
- 陈建书, 戴传固, 彭成龙, 王敏, 卢定彪, 王雪华, 骆珊. 2016. 湘黔桂相邻区新元古代 820–635 Ma 时期裂谷盆地充填序列与地层格架[J]. *中国地质*, 43(3): 899–920.
- 高林志, 尹崇玉, 丁孝忠, 王泽九, 张恒. 2015. 华南地区新元古代年代地层标定及地层对比[J]. *地球学报*, 36(5): 533–545.
- 广西壮族自治区地质矿产局. 1985. 广西壮族自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社: 1–853.
- 广西壮族自治区地质矿产局. 1997. 广西壮族自治区岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 1–310.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA–MC–ICP–MS 锆石微区原位 U–Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 28(4): 481–492.
- 邝国敦, 李家骧, 钟铿, 苏一保, 陶业斌. 1999. 广西的石炭系[M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 1–258.
- 李利阳, 游国庆, 张传恒, 贾龙龙, 韩瑶, 张恒, 刘博, 冯欣, 李新发, 张金龙. 2016. 桂北四堡群火山岩锆石 SHRIMP 年龄及其地层学意义[J]. *中国地质*, 43(6): 1992–1998.
- 彭松柏, 金振民, 刘云华, 付建明, 何龙清, 蔡明海, 王彦斌. 2006. 云开造山带强过铝深熔花岗岩地球化学、年代学及构造背景[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(1): 110–120.
- 覃小锋, 王宗起, 曹洁, 胡贵昂, 潘罗忠. 2013. 桂南钦防构造带西南段印支早期花岗岩的成因: 年代学和地球化学约束[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 43(5): 1471–1488.
- 覃小锋, 王宗起, 宫江华, 赵国英, 石浩, 詹俊彦, 王震. 2017. 云开地块北缘加里东期中—基性火山岩的厘定: 钦—杭结合带西南段早古生代古洋盆存在的证据[J]. *岩石学报*, 33(3): 791–809.
- 覃小锋, 王宗起, 胡贵昂, 曹洁, 冯佐海. 2013. 两广交界地区壶洞片麻状复式岩体的年代学和地球化学: 对云开地块北缘早古生代构造–岩浆作用的启示[J]. *岩石学报*, 29(9): 3115–3130.
- 覃小锋, 王宗起, 张英利, 潘罗忠, 胡贵昂, 周府生. 2011. 桂西南早中生代酸性火山岩年代学和地球化学: 对钦—杭结合带西南段构造演化的约束[J]. *岩石学报*, 27(3): 794–808.
- 王敏, 戴传固, 陈建书, 王雪华, 马会珍. 2016. 贵州省梵净山区新元古代岩浆活动的年代学格架及其大地构造意义[J]. *中国地质*, 43(3): 843–856.
- 王玉净, 罗辉, 邝国敦, 李家骧. 1998. 广西钦州小董–板城上古生代硅质岩相地层[J]. *微体古生物学报*, 15(4): 351–366.
- 吴浩若. 2003. 晚古生代—三叠纪南盘江海的构造古地理问题[J]. *古地理学报*, 5(1): 63–76.
- 吴诒, 龚一鸣, 杜远生. 1997. 华南泥盆纪层序地层及海平面变化[M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 1–110.
- 许效松, 尹福光, 万方, 梁宗华, 韦宝东, 张金端. 2001. 广西钦防海槽迁移与沉积–构造转换面[J]. *沉积与特提斯地质*, 21(4): 1–10.
- 杨明桂, 梅勇文. 1997. 钦—杭古板块结合带与成矿带的主要特征[J]. *华南地质与矿产*, 9(3): 52–59.