

华南河源盆地玄武岩年代学与地球化学：大陆裂谷作用新证据

林振文¹ 王玘^{2*} 阳峰¹ 罗俊超¹ 陆野¹ 白清霖¹ 郑思琦¹ 李雨龙¹

1. 广东省地质调查研究院, 广东 广州 510080

2. 边缘海与大洋地质实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州

摘要: 为揭示华南沿海中-新生代裂谷盆地中的火山岩形成时代及机制, 本研究对河源盆地玄武岩开展全岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年及地球化学分析。首次精确限定河源盆地玄武岩喷发于白垩纪-古近纪 (K-Pg) 界线附近 (68.65~64.52 Ma), 具有钠质亚碱性拉斑玄武岩特征。研究结果显示河源盆地玄武岩具有低 Mg、K、Ti, 高 Na、Al, 轻稀土轻微富集 ($(\text{La}/\text{Yb})_n = 4.48\text{--}6.68$) 的特征, 无明显 Eu、Ce、Nb、Ta 异常, 但具有正 Ba、Th、U 异常及负 P 异常, 关键元素比值高于原始地幔 ($\text{Th}/\text{Yb} = 1.72\text{--}1.15$, $\text{Th}/\text{Nb} = 0.20\text{--}0.21$, $\text{Hf}/\text{Th} = 1.13\text{--}1.35$), Sr-Nd 同位素比值为 $I_{\text{Sr}} = 0.70497\text{--}0.70676$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 0.11\text{--}1.55$, 指示其岩浆来源于亏损地幔受到了一定程度的壳源物质富集或者混染, 形成于大陆裂谷环境。结合前人对华南裂谷盆地火山岩的年代学和地球化学研究结果, 表明南海北部陆缘存在一条 NE-SW 向大陆裂谷, 其形成可能与古太平洋板块后撤作用密切相关。

关键词: 华南; 河源盆地; 玄武岩; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学; 大陆裂谷; 古太平洋板块后撤; 恐龙灭绝; K-Pg 界线

中图分类号: P581

收稿日期: 2025-05-21

Geochronology and Geochemistry of Basalts in the Heyuan Basin: New Evidence for Continental Rifting in South China

Lin Zhen Wen¹, Wang Pin^{2*}, Yang Feng¹, Luo Jun Chao¹, Lu Ye¹, Bai Qing Lin¹, Zheng Si Qi¹, Li Yulong¹

1. Guangdong Geological Survey Institute, Guangzhou 510080, China

2. Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese

Academy of Sciences, Guangzhou, China

基金项目: 本文为广东省地质勘查与城市地质专项“2023-19、2024-01、2025-01”和国家自然科学基金“42272098”资助成果。

第一作者: 林振文, 男 (1986-), 高级工程师, 主要从事区域地质和矿床地质调查与研究。Email:

linzhenwen9704@163.com, ORCID: 0009-0004-9935-3283

通讯作者: 王玘, 女 (1987-), 副研究员, 主要从事岩石地球化学研究。Email: wangpin@scsio.ac.cn.

Abstract: The formation and geodynamic setting of Mesozoic-Cenozoic volcanic rocks in the basins along the South China coast remain controversial, traditionally attributed to either Paleo-Pacific subduction or South China Sea spreading. Focusing on NE-trending fissure-erupted basalts from the Heyuan Basin, this study uses $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating to constrain their eruption ages to (67.29 ± 1.78) Ma and (66.48 ± 2.53) Ma. These ages coincide with the Cretaceous-Paleogene (K-Pg) boundary. Geochemically, the basalts exhibit sodic subalkaline tholeiitic characteristics ($\text{SiO}_2 = 47.43\text{--}52.67$ wt.%), with low Mg, K, and Ti but high Na and Al contents. Their rare earth element (REE) patterns indicate slight light REE (LREE) enrichment ($\Sigma\text{REE} = 77\text{--}85$ ppm; $(\text{La}/\text{Yb})_N = 4.48\text{--}6.68$), lacking significant Eu, Ce, Nb, Ta, or Ti anomalies, but displaying positive Ba, Th, and U anomalies and a negative P anomaly. Key elemental ratios ($\text{Th}/\text{Yb} = 1.72\text{--}1.15$, $\text{Th}/\text{Nb} = 0.20\text{--}0.21$, $\text{Nb}/\text{La} = 1.07\text{--}1.08$, $\text{Hf}/\text{Th} = 1.13\text{--}1.35$) suggest derivation from a depleted lithospheric mantle source with crustal contamination, formed in a continental rift setting. The Sr-Nd isotopic compositions indicate that the Heyuan basalts originated from a mixture of depleted mantle and enriched lithospheric mantle components. Regional comparisons with coeval basalts from the Nanxiong (79–69 Ma), Lianping, and Sanshui (61–54 Ma) basins reveal a NE-SW trending continental rift system along the northern South China margin during the Late Cretaceous to early Paleogene (79–54 Ma). This rifting episode likely responded to back-arc extension triggered by Paleo-Pacific plate rollback. Our findings provide critical constraints on the Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of South China and the incipient rifting stage of South China Sea.

Key words: South China; Heyuan Basin; basalts; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology; Continental rifting; Paleo-Pacific rollback; Dinosaur extinction; K-Pg boundary

引言

华南板块位于太平洋和特提斯两大构造域的交接部位，东临太平洋板块，西南为印度板块，是全球构造-岩浆活动最活跃的地区之一（图 1A），也是研究活动大陆边缘构造-岩浆作用、壳幔过程和板块俯冲的天然实验室（Zhao and Cawood, 2012; 张国伟等, 2013; 李三忠等, 2018; 虞鹏鹏等, 2023; 李建华等, 2024）。中生代以来，华南板块经历了从古特提斯构造域向太平洋构造域体制的转变，受控于古太平洋板块的俯冲作用，华南东部演变为一个安第斯型活动大陆边缘，发生了强烈大陆再造，并伴随巨量岩浆活动和爆发式成矿作用，形成 >1000 km 宽的大陆变形系统和长英质岩浆岩带（Li, 2000; Zhou and Li, 2000; 张岳桥等, 2012; Mao et al., 2013）。之后随着太平洋板块后撤、南海拉张等多期次构造事件（李三忠等, 2018），华南板块南缘产出一系列 NE-SW 向中-新生代盆地，如三水盆地、河源盆地、

连平盆地及南雄盆地等，并伴随有不同程度的火山活动，记录着华南板块南缘中-新生代构造体制转换的关键信息（Zhou and Li, 2000; 杜商岚等, 2022; 张敏等, 2023）。

这些盆地内的火山岩特别是玄武岩为研究华南边缘中新世代的构造演化提供了重要的岩石学和地球化学探针。前人对三水盆地、南雄盆地及连平盆地地层、火山作用及构造演化等方面进行了大量的研究（邹和平等, 1995; 付建明, 1997; Chung et al., 1997; 朱炳泉等, 2002; 肖龙等, 2006; 董月霞等, 2006; Huang et al., 2013; 张维和方念乔, 2014; 杜商岚等, 2022; Wang et al., 2022, 2023; 张敏等, 2023），三个盆地玄武岩喷发于 76~54Ma（Wang et al., 2023; 张煜和方念乔, 2021），多数学者认为这些玄武岩具有板内碱性、亚碱性玄武岩特征（Zhou et al., 2009; 杨锦等, 2022; Wang et al., 2023），具有大陆裂谷特征，并提出南海北缘存在威尔逊旋回早期的裂谷盆地（董月霞等, 2006; 肖龙等, 2006; 张煜和方念乔, 2021）。但前人对裂谷盆地的范围、方位和精确的演化时间缺少研究。河源盆地处于南雄盆地与三水盆地之间，同样受控于河源—邵武断裂，前人对该盆地玄武岩年代学及地球化学研究相对薄弱，缺少对火山活动精确年龄的限定（杜商岚等, 2022; Wang et al., 2022），限制了对整个华南地区新生代盆地的形成与晚中生代以来构造演化的深入理解。

本次研究对河源盆地玄武岩开展了详尽的野外地质调查，勾勒了其河源盆地玄武岩产出状态，并利用全岩 Ar-Ar 方法精确测定了玄武岩的喷出年龄，很好地补充了南雄盆地与三水盆地裂谷型火山岩年代上间隙，并通过全岩地球化学讨论了玄武岩性质及大地构造环境，为华南板块南缘新生代裂谷盆地的范围、方位和精确的演化时间提供了新的依据。

1. 区域地质背景

华南板块位于欧亚大陆东南缘，其东临太平洋板块，北连秦岭-大别造山带，西接龙门山和三江造山带，西南缘通过红河断裂与印支板块相连（图 1 A）。华夏地块位于华南板块的东南部，在新元古代沿江山-绍兴断裂带与扬子地块聚合形成统一的华南板块（Charvet et al., 1996; Zhao and Guo, 2012; 蒋少涌和马盈, 2024）。之后，华南板块经历了广泛的裂谷作用形成南华盆地，其可能与新元古代罗迪尼亚（Rodinia）超大陆裂解有关（Wang et al., 2003）。显生宙以来，华南板块先后经历了至少三期重要的构造-岩浆-变质事件，分别为早古生代的加里东造山运动（460 ~ 400 Ma）、早中生代的印支运动（240 ~ 210 Ma）和晚中生代的燕山运动（190 ~ 90 Ma）（Zhou et al., 2006; Li and Li, 2007; Wang et al., 2013）。侏罗纪-早白垩世华南板块经历了本区最为强烈的构造-岩浆-成矿事件，是一个成岩成大爆发时代（Mao et al., 2013; Zhou et al., 2006）。此时期本区构造演化分歧很大，产生了诸多构造演化模型，主要包括盆岭构造（Gilder et al., 1991）、三叠纪阿尔卑斯型陆陆碰撞（Hsu et al., 1990）、及

古太平洋西向俯冲模型 (Li and Li, 2007; Mao et al., 2013; Wang et al., 2013) 等, 目前为较多学者接受的是古太平洋板块西向俯冲模型。晚白垩世以来, 俯冲带朝洋跃迁, 导致新的海沟与日本弧之间处于拉张应力状态 (舒良树, 2012), 整个中国东部陆内全面进入构造伸展期, 以发育大量断陷盆地及非造山碱性花岗岩体和基性岩脉为特征 (Zhou et al., 2006; 张岳桥等, 2012)。

河源盆地位于广东省东部, 受控于北东走向的河源-邵武断裂和紫金-博罗断裂, 总体呈北东-南西展布, 面积约 790 km² (图 1 B), 与周缘地层和岩浆岩呈不整合接触 (图 1b; 凌秋贤和张显球, 2002), 是华南板块南缘晚中生代伸展断陷盆地体系的重要组成部分。河源-邵武断裂带是北西侧控盆断裂, 呈北东走向, 倾向南东, 倾角多为 30~50°; 发育宽约 10~100m 的构造角砾岩或硅化岩带 (图 1 B, 白石嶂), 具有多期活动的特征。紫金-博罗断裂带控制了河源盆地东南沿边界, 延长超过 300km, 倾向南东, 具有走滑逆冲的特征。

河源盆地及其周缘出露的地层与华夏地块南部出露的地层相似 (Wang et al., 2013), 除志留系和奥陶系外, 其他地层都有出露, 从老到新依次为震旦系、寒武系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系, 总厚度大于 21800m。自古生代以来, 研究区经历了多期次剧烈岩浆侵位事件, 出露有燕山期花岗岩、中晚侏罗纪至早白垩纪火山岩、新生代玄武岩以及大量岩脉等 (旷健等, 2020; 张敏等, 2021, 2023; Wang et al., 2022)。

河源盆地内主要沉积了晚白垩世三水组、大塍山组及古近纪莘庄村组 (图 1 B)。晚白垩世三水组和大塍山组为一套山麓-河湖相沉积地层, 上部为紫红色泥质粉砂岩、粉砂岩、含砾砂岩为主, 沉积韵律明显; 中部暗紫红色中厚层-巨厚层层状粉砂岩、含砾砂岩; 下部为紫红色泥质粉砂岩、灰白含砾砂岩、粗砾岩为主, 以巨厚层底砾岩为标志层, 以角度不整合覆于晚古生代地层之上, 总体呈北东走向, 倾向北西, 局部产状变化较大, 厚度 900~1048m (张敏等, 2023)。古近纪莘庄村组为一套由砖红色、紫红色中厚层状含砾砂岩和粉砂岩互层所组成的陆相粗碎屑岩建造, 上部以粉砂岩、泥质粉砂岩为主, 中部为砂岩与粉砂岩互层, 间夹含砾砂岩, 下部以砂岩、含砾砂岩为主, 底部为含砾砂岩夹玄武岩。该组地层产状较为平缓, 不整合覆于大塍山组之上, 厚度 209~1150m (张敏等, 2023)。

杨村镇、观音阁镇天井塘北东侧—牛筋岭地区均有玄武岩的出露，大致呈北东向展布，地貌上呈现若干个环状凸起，呈盾状火山形态，直径约 400~500m，高 30~50m，从边部向火山口依次出露玄武岩、气孔状玄武岩、杏仁状玄武岩、辉绿辉长岩等岩性，在火山口中部残积土还残存有火山弹，火山弹直径 10~20cm。

玄武岩呈青灰-灰黑色致密块状（图 2A 样品 T095-2），岩石风化呈橙黄色，岩石中矿物粒径<0.5mm，含少量气孔或杏仁体（图 2B 样品 T034）。气孔孔径 3-10cm；杏仁体含量少（< 5%），呈椭圆球状，长轴 2~5mm，主要由石英组成。岩石的主要矿物为斜长石（65%~70%）和单斜辉石（30%~35%），呈间粒结构（图 2D、E），副矿物主要为磷灰石。斜长石呈半自形板状，粒度多为 0.2 ~ 0.5 mm，局部被绢云母及黝帘石交代。单斜辉石半自形-它形柱状，粒度多为 0.02 ~ 0.1 mm，局部被绿泥石和磁铁矿交代，部分为假象（图 2D）。

杏仁状玄武岩呈青灰色、灰黑色，为微晶-隐晶质结构（图 2C 样品 T095），发育大量杏仁体或气孔，呈椭圆形、不规则状，大小一般 2~15mm，星散状分布或定向排列，气孔填充矿物为方解石、绿泥石、石英和沸石（图 2F）。主要矿物为斜长石（55%~60%）、单斜辉石（30%~40%）及橄榄石（5%~10%）（图 2C、F）。斜长石半自形板状，粒度多为 0.1~0.2mm，局部被绢云母交代。单斜辉石呈半自形-它形，柱状，粒度多为 0.01~0.1mm。橄榄石半自形-自形粒状，粒径 0.01~0.05mm，大部分被伊利石交代，镜下呈红褐色（图 2F）。

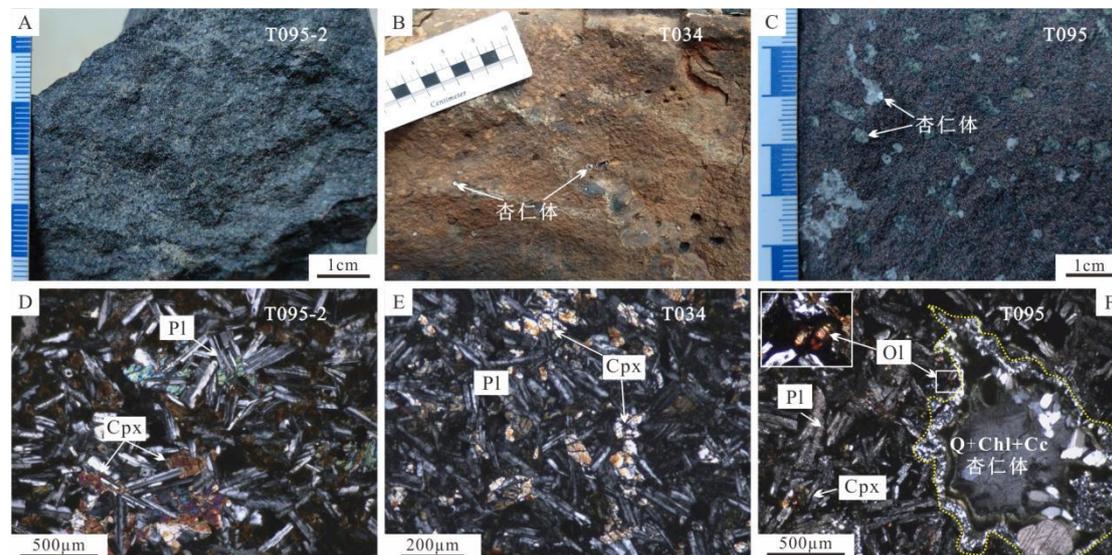


图 2 河源盆地玄武岩露头、手标本（A-C）及显微照片(D-F)

A. 暗绿色玄武岩；B. 隐晶质杏仁状玄武岩露头照片；C. 紫红色杏仁状玄武岩；D. 玄武岩显微照片（正交偏光）；E. 杏仁状玄武岩显微照片（正交偏光），显微间粒结构；F.杏仁状玄武岩显微照片（正交偏光），间粒结构，角图为橄榄石； Cpx: 辉石； Cc: 方解石； Chl: 绿泥石； Ol: 橄榄石； Pl: 斜长石； Q: 石英

Figure 2 Photographs showing petrography of the Heyuan basalt rocks

A. Dark green basalt; B. Outcrop photograph of aphanitic almond basalt; C. Purplish red almond basalt; D. Micrograph of basalt (perpendicular polarized light); E. Micrograph of Basalts (perpendicular polarized light), Intergranular structure; F. Micrograph of almond basalts (perpendicular polarized light).

Cpx: pyroxene; Cc: calcite; Chl: chlorite; Ol: olivine; Pl: plagioclase; Q: quartz

3 样品描述和分析方法

3.1 全岩主微量元素分析

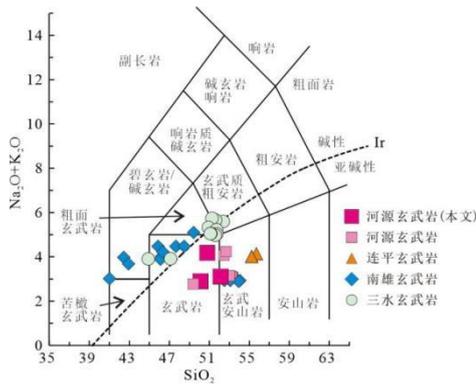
全岩测试样品采玄武岩盆地中球形风化新鲜样品杏仁状玄武岩 (T034、T095) 和玄武岩 (T095-2)。样品 T034 采集于 $E114^{\circ} 34' 29''$, $N23^{\circ} 28' 10''$; 样品 T095 和 T095-2 采集于 $14^{\circ} 30' 59''$, $23^{\circ} 27' 21''$ 。所有样品均选取弱蚀变样品进行分析测试, 杏仁状玄武岩剔除杏仁体后再进行分析测试。所有样品粉碎至 200 目粉末并保证混合均匀, 粉碎过程保证无污染, 然后称取适量粉末样品进行全岩主微量元素测试。

样品的主微量元素测试均在澳实分析检测(广州)有限公司矿物实验室完成。主量元素采用硼酸锂/偏硼酸锂熔融, X 射线荧光光谱法(XRF)分析, 精度优于 0.5%。微量元素和稀土元素采用多酸(四酸)消解, 电感耦合等离子体质谱分析(ICP-MS), 相对标准偏差小于 5%。结果见表 1。

3.2 全岩氩氩测年

本研究取了上述玄武岩样品 (T095-2) 和杏仁状玄武岩样品 (T034) 开展全岩氩氩测年。

全岩氩氩测年分析将所选样品经粉碎后用稀硝酸 (5%) 浸泡以去除碳酸盐, 然后用去离子水在超声波清洗器中清洗, 置于 80°C 烘箱中烘干。待测样品和标准样品 (ZBH-2506 北京房山花岗闪长岩黑云母, 其年龄为 132.7 Ma (王松山, 1983) 及 FCs 国际标样, 28.201Ma (Kuiper et al., 2008), 用铝箔包装成直径~5 mm 的小圆饼或圆柱, 装入石英管中。为了准确获得样品的照射参数 J 值, 铝管两端装标样, 且每隔 2~4 个样品中间插入 1 个标样, 尽量保持标样之间距离相近, 记录每个样品和标样的厚度和位置。样品照射前, 在辐照罐外层包裹 0.5 mm 厚的 Cd 皮以屏蔽热中子。于 2023 年 3 月在成都夹江核动力研究院(岷江堆)照射, 共照射 72 小时。标样用激光全熔进行质谱氩同位素组成分析, 得到各样品 J 值, 然后根据



J值变化曲线的函数关系和样品的位置计算出每个样品的J值。样品 T034 的J值为 $0.04234573 \pm 0.00004235$ ，样品 T095-2 的J值为 $0.04240425 \pm 0.00004240$ 。

样品激光阶段加热在广州地球化学研究所完成，采用激光阶段加热对样品进行气体提取分析，并且每隔 3 个样品进行空白分析。矫正因子通过同期处理的 CaF_2 和 K_2SO_4 进行分析所得，干扰同位素的校正因子为 $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}}: (4.17 \pm 0.07) \times 10^{-4}$ ， $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}}: (18.4 \pm 3.6) \times 10^{-4}$ ， $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}}: (146.5 \pm 42.4) \times 10^{-4}$ 。仪器的质量歧视矫正因子为：0.996611。采用专业软件 ArArCALC (v.2.4)进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄计算和作图 (Koppers, 2002)，数据处理过程中还使用到的常数如下：

空气氩比值： $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}_{\text{air}} = 298.56$ (Lee et al., 2006)

衰变常数：采用 Renne (Renne et al., 2011)

^{40}K ： $(5.463 \pm 0.214) \times 10^{-10}$ (1sd, 3.93%)

$^{40}\text{K}(\text{EC}, \beta^-)$ ： $(0.58 \pm 0.014) \times 10^{-10}$ (1sd, 2.41%)

$^{40}\text{K}(\beta^-)$ ： $(4.884 \pm 0.099) \times 10^{-10}$ (1sd, 2.27%)

4 分析结果

4.1 主量元素

本次研究的河源盆地玄武岩 SiO_2 含量变化范围为 47.43%~52.67%，具有较高的 Na_2O 含量(2.60%~2.73%)和较低的 K_2O 含量(0.23%~0.68%)， Al_2O_3 含量 14.84%~16.04%， MgO 含量 4.87%~6.89%， Mg\# 值为 45~52， TiO_2 含量 1.39%~1.56%(附表 1)。在 TAS 岩石分类图解(图 3)中，落入玄武岩区域，碱含量 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 为 2.85%~3.90%，属于亚碱性到碱性玄武岩的过渡范围。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图 4 A)中落入低钾拉斑系列，在 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解中(图 4 B)，落入钠质系列区域。

图 3. 河源盆地玄武岩 TAS(底图据 Bas et al., 1986; 数据来源见附表 1)

Figure 3 TAS plots of the basalts from the Heyuan Basin (Base map based on Bas et al., 1986; The data sources are shown in Appendix 1.)

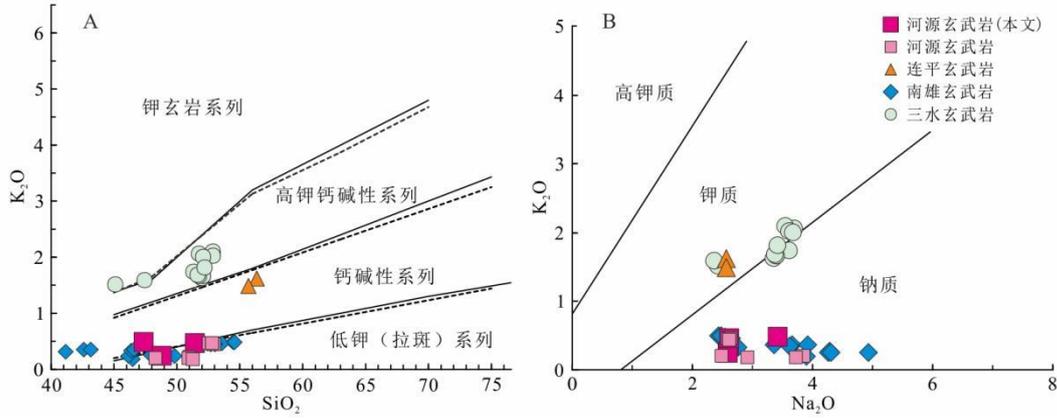


图 4. 河源及周边盆地玄武岩 K_2O-SiO_2 图解(A; 底图据 Rickwood, 1989)和 K_2O-Na_2O 图解(B; 底图据 Middlemost, 1975); 数据来源见附表 1.

Figure 4 $K_2O - SiO_2$ (A Based on Rickwood, 1989) and $K_2O - Na_2O$ (B, Based on Middlemost, 1975) plots of the basalts from the Heyuan and nearby Basins (The data sources are shown in Appendix 1.)

4.2 微量元素

玄武岩稀土元素总量 77.52~85.06ppm, LREE/HREE 值为 3.07~5.04, $(La/Sm)_N$ 比值为 1.94~2.38, $(La/Yb)_N$ 比值为 4.48~6.68, 表明轻、重稀土元素分馏程度中等, 富集轻稀土元素(附表 2; 图 5 A)。Eu 负异常不明显或显示为正异常 ($\delta Eu=1.01\sim 1.05$), Ce 无明显异常 ($\delta Ce=0.98\sim 1.0$)。

玄武岩具有较高的 Ba (135~373 ppm), Sr (263~373 ppm), Th (2.28~2.74 ppm), 富集大离子亲石元素; Nb (11.5~13.8 ppm)、Zr (117~127 ppm), Ta (0.70~0.80ppm), Hf 含量 (3.00~3.10 ppm) 较高; Cr 含量为 190~220ppm, Ni 含量为 124~147ppm, Pb 含量为 2.40~3.10ppm、Nb/La 值为 1.07~1.08, La/Ta 值为 16.50~18.50, Th/Yb 值为 1.72~1.15, Th/Nb 值为 0.20~0.21, Hf/Th 值为 1.13~1.35(附表 2)。在原始地幔标准化的微量元素配分图解中, 河源盆地玄武岩显示富集 Ba、Sr、Th 等大离子亲石元素, Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素无明显亏损, Pb 富集(图 5 B)。

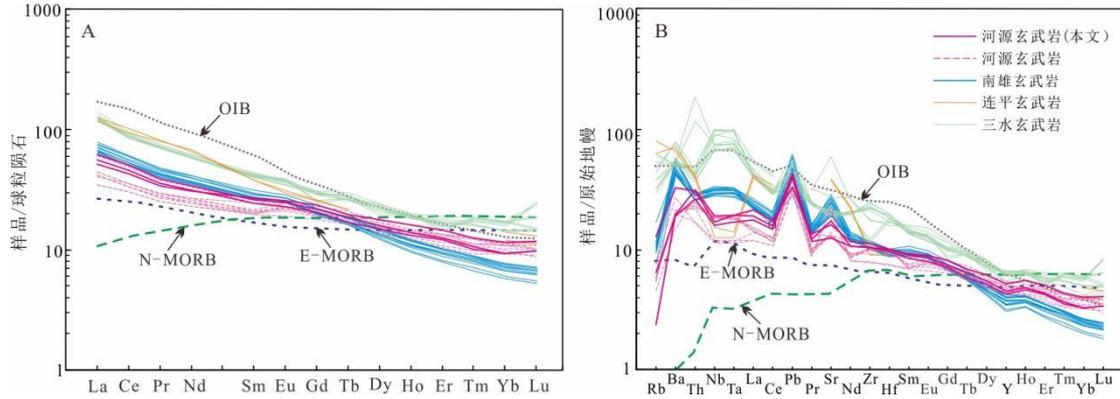


图 5 河源及周边盆地玄武岩稀土元素配分图解及微量元素原始地幔标准化图解(据 Sun et al., 1989 标准化; 数据来源见附表 2。

Fig. 5 Chondrite-normalized REE distribution patterns and Primary mantle normalized trace element patterns of the Heyuan and nearby Basalt volcanic rocks (after Sun et al., 1989); The data sources are shown in Appendix 2.

4.3 氩氩年代学

样品 T034 的总气体年龄为 (68.22 ± 0.69) Ma, 在第 5 到第 34 阶段构成的坪年龄为 (68.65 ± 0.67) Ma(MSWD = 1.29), 对应了 99.87%的 ^{39}Ar 释放量, 相应的 $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 等时线年龄为 (67.29 ± 1.78) Ma, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值为 295.4 ± 7.5 ; $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 反等时线年龄为 (67.31 ± 1.76) Ma, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值为 295.38 ± 7.52 (附表 3、图 6 A, B)。

样品 T095-2 的总气体年龄为 (64.11 ± 1.88) Ma, 在第 3 到第 36 阶段构成的坪年龄为 64.52 ± 1.60 (MSWD = 1.12), 对应了 98.14%的 ^{39}Ar 释放量, 相应的 $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 等时线年龄为 (66.48 ± 2.53) Ma, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值为 297.49 ± 3.37 ; $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 反等时线年龄为 (66.70 ± 2.55) Ma, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值为 297.46 ± 3.37 (附表 3、图 6C, D)。

从结果可以看出, T034、T095 样品总气体年龄、坪年龄、相应的等时线年龄和反等时线年龄在差范围内一致, 年龄范围为 $(68.65 \pm 0.67) \sim (64.52 \pm 1.60)$ Ma。从样品的拟合结果可以看出, 两个样品的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始值在误差范围内和现代大气氩比值(295.5)接近, 表明玄武岩没有捕获过剩氩, 因此样品坪年龄可以代表矿物的结晶年龄, 年龄范围为 $(68.65 \sim 64.52)$ Ma。

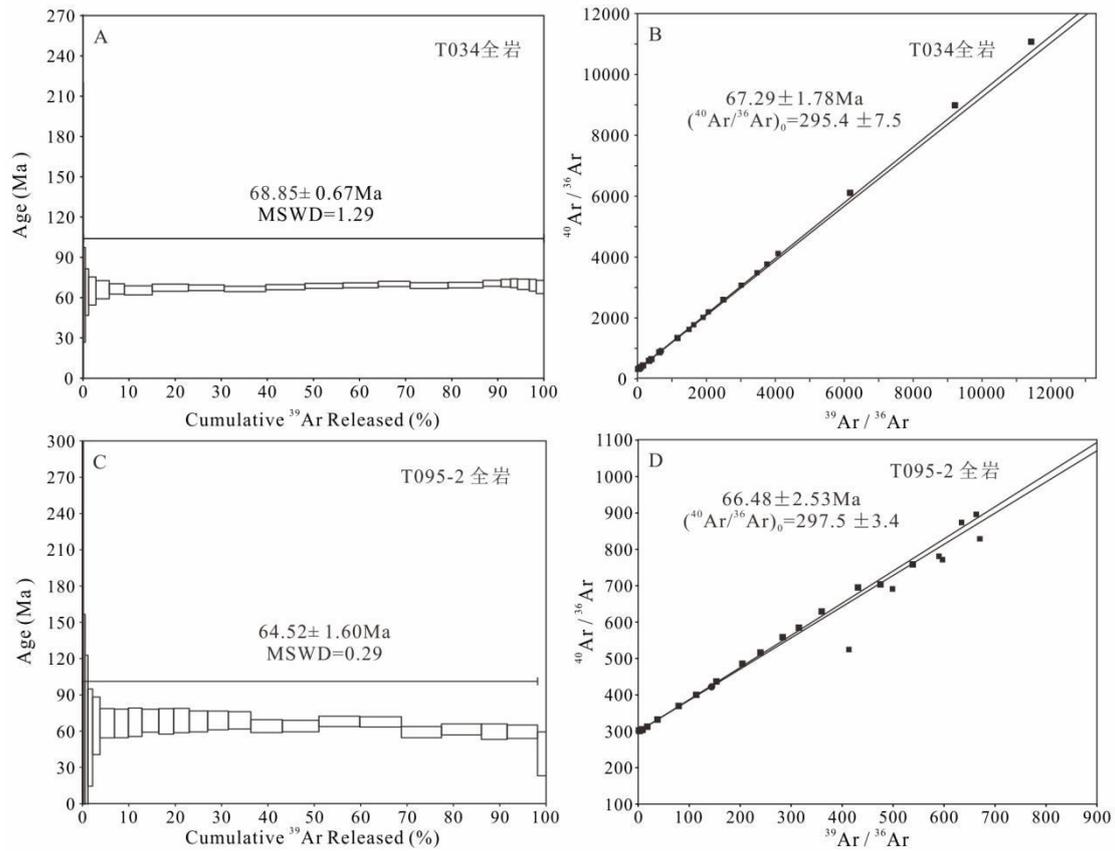


图 6 玄武岩全岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄(A, C)与“正等时线”(B, D)

Figure 6 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau age (A, C) and normal isochrones (B, D) of whole-rock basalt

4.4 全岩 Sr-Nd 同位素

玄武岩样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 测定值为 0.704993 ~ 0.706825, 根据样品 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄返算得到成岩时的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值 (I_{Sr}), 为 0.70497 ~ 0.70676, 平均为 0.70557。玄武岩样品的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 测定值为 0.512626 ~ 0.512706, 返算得到成岩时的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 初始比值 (I_{Nd}), 为 0.512558 ~ 0.512629, 平均为 0.512662, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 0.11 ~ 1.55; Nd 单阶段模式年龄 T_{DM1} 集中于 1.21 ~ 1.58 Ga 之间 (附表 4)。

5 讨论

5.1 河源盆地火山活动时限

河源盆地内大面积出露了玄武岩, 但其形成时代及成因仍存在较大争议。前人通过 K-Ar

法及锆石年代学对河源盆地玄武岩进行测定。李时若和唐吉阳（1966）根据野外特征，将玄武岩划分为三个大的喷发阶段，总体喷发时代为第三纪（古近纪），并且认为它们的生成与断裂构造密切相关，以溢流相熔岩流为主。凌秋贤和张显球（2002）通过全岩 K-Ar 测年认为玄武岩喷发育于~74 Ma；Wang et al.（2022）通过钻孔观察，认为玄武岩与古近系莘庄村地层互层，并根据玄武岩中单颗锆石 SHRIMP U-Pb 的测年结果（~34 Ma），提出玄武岩喷发不早于始新世。

本次研究在详细的野外地质调查基础上，采集了不同区域不同类型的玄武岩进行全岩氩氦年代学测定。分析结果表明，玄武岩呈北东向溢流式喷发，其 $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 等时线年龄为 68.65~64.52 Ma，可反映玄武岩的喷发时代，晚于南雄盆地玄武岩（79~76 Ma），早于三水盆地（61~54 Ma）及珠江口盆地（54~17 Ma）的火山岩。

河源盆地玄武岩在 K/Pg 界线（~66 Ma）附近喷发，残留多个火山口（图 1 B），且玄武岩的围岩地层大塍山组中产出丰富的恐龙蛋化石（张显球等, 2005），这或许和晚白垩纪河源盆地内恐龙大规模灭绝相关。

5.2 岩石成因

本文分析结果显示，河源盆地玄武岩属于亚碱性低钾钠质玄武岩（图 4），具有富集轻稀土和大离子亲石元素 Ba、Sr、Th 等元素，高场强元素（Nb、Ta、Zr、Hf）无明显亏损，无 Nb、Ta 和 Ti 的负异常、 $\text{Th}/\text{Nb}<1$ 且 $\text{Nb}/\text{La}\geq 1$ 等大陆玄武岩的典型地球化学特征（夏林圻等, 2007 及其参考文献；李玉琼等, 2017）。样品 $\text{Mg}^\#$ 低于原生岩浆 65 的参考值（Olsen, 1995），相容元素 Cr（190~220ppm）、Ni（124~147ppm）含量也远低于原生玄武岩浆岩范围（Cr: 300~500ppm, Ni: 300~400ppm; Hess, 1992），表明玄武岩岩浆形成过程经历了一定程度的分离结晶，且玄武岩具有轻微的 Eu 正异常（ $\delta\text{Eu}=1.01\sim 1.05$ ），表明岩浆演化过程中发生了镁铁质矿物（橄榄石、辉石和铬铁矿）的分离结晶，没有发生明显的斜长石结晶分异作用。另一方面，Ba（135~373 ppm）、Sr（263~373 ppm）、Th（2.28~2.74 ppm）等大离子亲石元素富集，且 Th/U 比值 5.3~4.2 接近大陆上地壳平均值（ $\text{Th}/\text{U}\approx 4$ ）可能反映富集地幔源区或者地壳物质的混染（Taylor and McLennan, 1985; Hofmann, 1997）。

河源盆地玄武岩在 Hf/3-Th-Ta 三元图解（图 7 A）中，落入岛弧碱性玄武岩和板内拉斑玄武岩交界处；在 Th/Yb-Ta/Yb 图解中（图 7 B），落入活动大陆边缘（陆源弧）内，这可能与遭受了地壳混染作用的影响相关。因此，为进一步判别河源盆地玄武岩形成的构造环境，使用 Zr/Y-Zr 和 Ta/Hf-Th/Hf 图解进行分析。结果显示，河源盆地玄武岩均落入板内玄武岩区域（图 7 C），在 Ta/Hf-Th/Hf 图解（图 7 D），样品落入大陆裂谷环境，表明其形成环境

更可能为拉张的大陆裂谷环境。

在 $\epsilon_{Nd}(t)$ - I_{Sr} 图解 (图 8) 中, 河源盆地玄武岩样品数据点落于第一、二象限, 玄武岩 Sr 同位素显示较低的初始比值 (0.70497 ~ 0.70676), 略高于典型亏损地幔, 但低于富集地幔端元 (EM1 或 EM2), 表明源区主要为亏损地幔, 可能是亏损地幔与壳源物质的混合。结合 Nd 同位素, $\epsilon_{Nd}(t)=0.11 \sim 1.55$, 且单阶段模式年龄 T_{DM1} 集中于 1.21 ~ 1.58 Ga 之间, 反映源区可能为亏损地幔发生了一定的壳源物质富集或混染, 可能经历了中元古代的地幔富集事件 (如古俯冲或者地壳再循环)。河源玄武岩的 Sr-Nd 同位素特征与典型大陆裂谷玄武岩或板内玄武岩 Sr-Nd 同位素特征一致。河源玄武岩的 Sr-Nd 同位素特征与南雄、三水盆地玄武岩同位素相近, 与典型大陆裂谷玄武岩或板内玄武岩 Sr-Nd 同位素特征一致 (图 8)。另外, 三水盆地粗面岩 Sr 同位素较高可能是受到地壳混染作用的影响 (Zhou et al., 2009)。结合元素地球化学特征, 河源盆地玄武岩应形成于大陆裂谷环境, 岩浆来源于富集岩石圈地幔低程度部分熔融, 伴随了分离结晶作用 (橄榄石、铬铁矿分离结晶)。

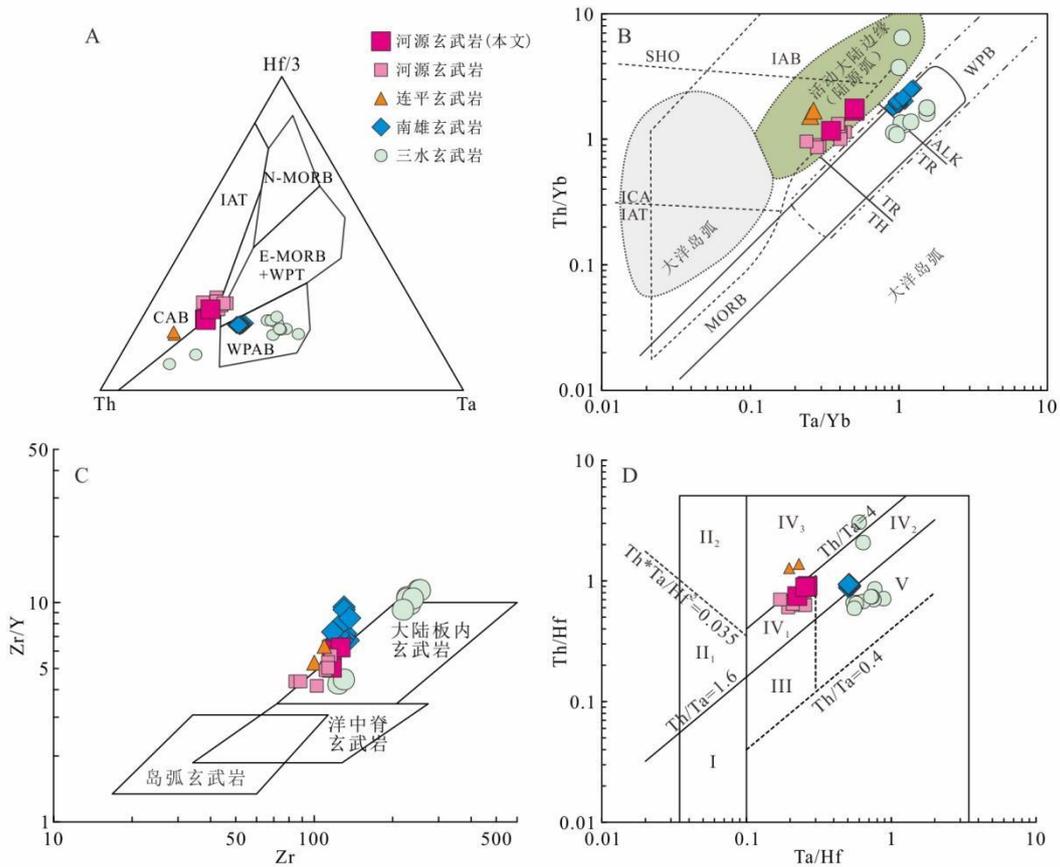


图 7. 河源盆地玄武岩构造环境判别图解 (数据来源见附表 2)

A. Hf/3-Th-Ta 图解, B Th/Yb-Ta/Yb 图解, C. Zr/Y-Zr 图解, D. Ta/Hf-Th/Hf 图解

图 A 缩写: IAT: 岛弧拉斑玄武岩; CAB: 钙碱性玄武岩; WPT: 板内拉斑玄武岩; WPAB: 碱性板内玄武岩; 图 B 缩写: IAT: 拉斑质玄武岩; ICA: 钙碱质玄武岩; SHO: 橄榄玄粗岩; IAB: 岛弧玄武岩; WPB: 板内玄武岩; 图 D 缩写: I: 板块发散边缘 N-MORB 区; II: 板块汇聚边缘 (II₁: 大洋岛弧玄武岩区; II₂: 陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩区); III: 大洋板内洋岛、海山玄武岩区及 T-MORB、E-MORB 区; IV: 大陆板内 (IV₁: 陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区; IV₂: 陆内裂谷碱性玄武岩区; IV₃: 大陆拉张带玄武岩区); V: 地幔柱玄武岩区。

Figure.7 Tectonic setting diagram of Heyuan basalts. A. Hf/3-Th-Ta diagram, B Th/Yb-Ta/Yb diagram C. Zr/Y-Zr diagram and D. Ta/Hf-Th/Hf diagram .(The data sources are shown in Appendix 2.)

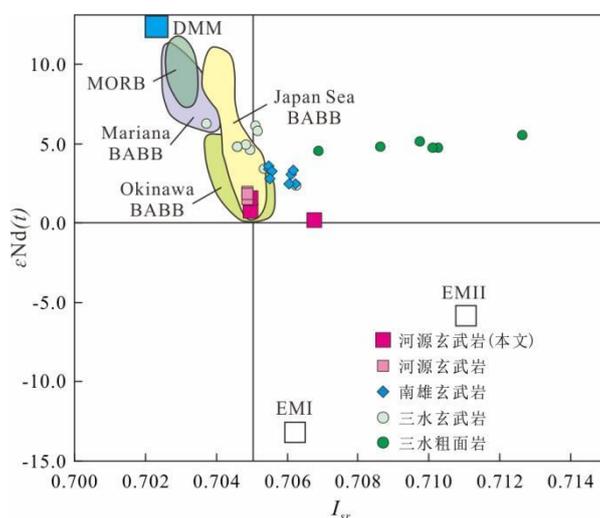


图 8 河源玄武岩 $\epsilon\text{Nd}(t)$ vs. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解, 数据来源见附表 4; MORB、EMI、EMII、DMM 数据据 Zindler and Hart, 1986; Hart, 1988; 弧后盆地玄武岩数据来源于岩石学数据库 (<http://www.Earthchem.org/petdb>); 缩写: BABB: 弧后玄武岩。

Figure 8 $\epsilon\text{Nd}(t)$ vs. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram of Heyuan basalt .(The data sources are shown in Appendix 4).

5.3 大地构造意义

华南在新生代形成了多个盆地, 其中, 在广东形成了河源盆地、南雄盆地、连平盆地及三水盆地 (图 1 A)。最新的研究表明, 广东地区新生代盆地的岩浆活动呈现由北至南逐年年轻的趋势: 如南雄盆地记录了 76~69Ma 的玄武岩活动 (Wang et al., 2023); 三水盆地的岩浆活动主要集中在 61~54Ma, 呈双峰式特征, 由早至晚形成了具大陆裂谷特征的亚碱性

玄武岩(60Ma)、碱性玄武岩(58~54Ma)、和中酸性火山岩(<54Ma)(张煜和方念乔, 2021);南部的珠江口盆地玄武岩形成于 51.7~17.6Ma(邹和平等, 1995)。河源盆地空间上处于南雄盆地和三水盆地之间, 本次研究表明河源盆地玄武岩喷发于 67~65Ma, 晚于其北部南雄盆地的玄武岩, 而早于其南部三水盆地的双峰式火山岩, 填补了南雄盆地与三水盆地火山喷发的时间间隙。以上年代学证据指示这些北东向展布的火山盆地在成因和演化上可能存在着联系, 可能受控于同一深部动力学过程(Chung et al., 1997; 董月霞等, 2006; 肖龙等, 2006)。

前人对华南地区火山盆地中玄武岩的岩石成因的认识较为统一, 多数研究指示南雄盆地、三水盆地、连平盆地玄武岩具有亚碱性玄武岩特征(Zhou et al., 2009; 杨锦等, 2022; Wang et al., 2023)。最新的研究表明, 南雄盆地火山岩具有大陆裂谷玄武岩的特征(Shu et al., 2004; Wang et al., 2023); 而三水盆地内双峰式火山岩组合及演化研究则普遍认为三水盆地具有大陆裂谷特征的板内碱性、亚碱性玄武岩(董月霞等, 2006; 肖龙等, 2006; Zhou et al., 2009; Zhang et al., 2019; 袁晓博和方念乔, 2019; 杨锦等, 2022; 张煜和方念乔 2021), 其物质来源于上地幔的软流圈地幔源区部分熔融(杨锦等, 2022), 形成于石榴石-尖晶石橄榄岩过渡区(张煜和方念乔, 2021)。这些结果与河源盆地玄武岩样品的地球化学特征一致, 均指示广东新生代盆地的玄武岩岩浆活动具有大陆裂谷板内玄武岩的特征。

前人基于对三水盆地的研究, 提出南海北缘在古近纪存在类似红海扩张前岩浆活动、属于南海盆地威尔逊旋回早期的裂谷盆地(董月霞等, 2006; 肖龙等, 2006; 袁晓博和方念乔, 2019; 张煜和方念乔, 2021), 但对于裂谷盆地的范围、方位和精确的演化时间缺少研究。本次针对河源盆地火山岩年代学和地球化学的研究, 很好的补充了南雄盆地与三水盆地裂谷型火山岩年代上的间隙, 综合最新的华南北缘地质年代学和地球化学证据, 我们提出南海北缘华南地区在 79~60Ma 可能存在一条自北向南打开的大陆裂谷盆地。

结合同时期大地构造环境可发现, 控制或影响河源盆地北缘的河源-邵武断裂带往北可延伸至福建邵武, 控制了南雄盆地、连平盆地, 往南东则穿过东莞盆地、三水盆地, 地震反演剖面揭示该断裂是一条区域性深大断裂(张敏等, 2023), 且是一条重要地震活动带, 是东南地震带的西部边界(刘大任, 2000)。该断裂在河源盆地边缘、玄武岩带北东端处发育宽约 10~100m 的硅化石英脉, 石英脉中流体包裹体记录年龄为 79~66Ma(Wang et al., 2022), 这与南雄盆地火山喷发时间一致, 表明受断裂带控制或影响分布的中-新生代沉积盆地发生活化, 形成大陆裂谷盆地继而沉积了古近纪红层。研究区北侧湖南衡阳(71.0Ma)、江西吉安(71.3Ma)、吉泰(63.6Ma)等区域同期也喷发了玄武岩(Meng et al., 2012), 南侧玄武岩喷发中心则持续南迁, 如珠江口盆地玄武岩喷发于 51.7~17.6Ma, 南海扩张洋中脊玄武岩喷发于 30~15.5Ma, 且洋中脊不断向南迁移(肖龙等, 2006)(图 1 A)。

综合上述研究，我们提出在晚白垩纪至早古近纪，南海北缘华南地区存在着一条自北东向南东（南雄盆地（79~69Ma）、河源盆地（68~64Ma）、三水盆地（61~36Ma）、珠江口盆地（51~17Ma））裂开的大陆裂谷盆地（图9），结合南海扩张洋中脊往南迁移特征，指示该大陆裂谷盆地的形成与消亡可能受太平洋俯冲板块重启和持续后撤相关。

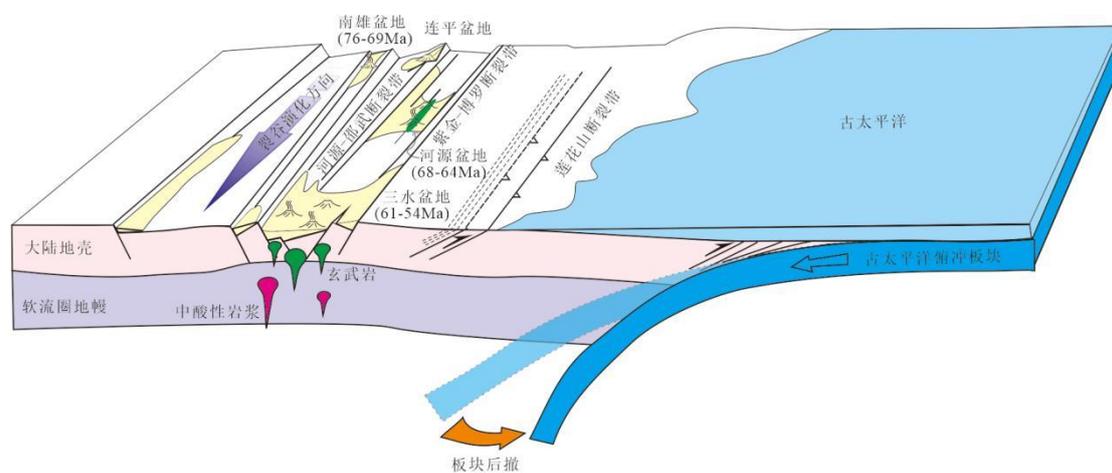


图9 南海北缘华南地区晚白垩世至古近纪大陆裂谷与盆地演化模式图

Figure 9 Evolutionary model of continental rifts and basins in the northern margin of the South China Sea (South China region) from the Late Cretaceous to Paleogene.

6 结论

(1) 最新的玄武岩全岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 结果显示，河源玄武岩喷发于 68.65~64.52 Ma，形成于 K/Pg 界线附近；

(2) 河源盆地玄武岩为低 Mg、K，高 Na、Al 的钠质亚碱性拉斑玄武岩，轻稀土轻微富集，富集 Ba、Th、U 等大离子亲石元素，无明显 Eu、Ce、Nb、Ta 和 Ti 的负异常，指示玄武岩形成于大陆裂谷环境；

(3) 河源盆地玄武岩具有较低的 I_{Sr} (0.70497 ~ 0.70676) 和正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (0.11 ~ 1.55)，表明河源盆地玄武岩主要来源于亏损地幔，并受到了一定程度的壳源物质富集或者混染，单阶段模式年龄 T_{DMI} 集中于 1.21 ~ 1.58 Ga 之间，反映源区可能经历了中元古代的地幔富集事件。

(4) 南海北缘华南地区在晚白垩至早古近纪（79~54Ma）存在一条自北东向南西扩张的大陆裂谷。

致谢： 本文成文过程中得到黄文婷博士的大力支持，审稿过程中获得审阅人宝贵意见，特此一并致谢。

(作者贡献度说明：作者 1：进行野外工作、数据处理、文章构思、图件绘制和写作；作者 2：进行了数据处理、参与文章构思、写作、并修改和审核文章内容；作者 3：进行野外工作、剖面测制、数据处理，参与文章内容修改；作者 4：进行野外工作、数据处理和图件检查；作者 5：进行野外工作、参与修改文章内容；作者 6：进行野外工作、参与修改文章图件内容；作者 7：进行野外工作、参与修改文章内容；作者 8：进行野外工作、参与修改文章内容)

参考文献

- Bas, M. L., Maitre, R. L., Streckeisen, A., et al., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3):745–750.
- Charvet, J., 2013. The Neoproterozoic-early Paleozoic Tectonic Evolution of the South China Block: An Overview. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74(sep.25), 198-209.
- Chung, S., Cheng, H., Jahn, B., et al., 1997. Major and Trace Element, and Sr-Nd Isotope Constraints on the Origin of Paleogene Volcanism in South China Prior to the South China Sea Opening. *Lithos*, 40(2):203-220.
- Gilder, S. A., Keller, G. R., Luo, M., et al., 1991. Eastern Asia and the Western Pacific Timing and Spatial Distribution of Rifting in China, *Tectonophysics*, 197(2–4):225-243.
- Hess, P. C., 1992. Origin of Igneous Rocks. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- Hofmann, A.W., 1997, Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism: *Nature*, 385: 219–229.
- Hsu, V., Merrill, D. L., Shibuya, H., 1990. Paleomagnetic Transition Records of the Cobb Mountain Event from Sediments of the Celebes and Sulu Seas. *Geophysical Research Letters*, 17: 2069-2072.
- Huang, X., Niu, Y., Xu, Y., et al., 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. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165(3):437-455.
- Koppers, A. A. P., 2002. ArArCALC-Software for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Age Calculations. *Computers & Geosciences*, 28(5): 605-619.

- Kuiper, K. F., Deino, A., Hilgen, F. J., et al., 2008. Synchronizing Rock Clocks of Earth History. *Science*, 320(5875): 500-504.
- Lee, J. Y., Marti, K., Severinghaus, J. P. et al., 2006. A redetermination of the Isotopic Abundances of Atmospheric Ar[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 70(17): 4507-4512.
- Li, Z. X., Li, X. H., 2007. Formation of the 1300-km-wide Intracontinental Orogen and Postorogenic Magmatic Province in Mesozoic South China: A Flat-slab Subduction Model. *Geology*, 35 (2): 179-182.
- Mao, J. W., Cheng, Y. B., Chen, M. H., et al., 2013. Major Types and Time-space Distribution of Mesozoic ore Deposits in South China and Their Geodynamic Settings. *Miner Deposita*, 48: 267-294.
- Meng, L., Li, Z., Chen, H., et al., 2012. Geochronological and Geochemical Results from Mesozoic Basalts in Southern South China Block Support the Flat-slab Subdction Model. *Lithos*, 132–133: 127-140.
- Middlemost, E. A., 1975. The basalt clan. *Earth-Science Reviews*. 11(4): 337–364.
- Olsen, K. H., 1995. Continental Rifts: Evolution, Structure, Tectonics. *Amsterdam: Elsevier*, 255–260.
- Rickwood, P. C., 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22(4): 247–263.
- Shu, L., Deng, P., Wang, B., et al., 2004. Lithology, Kinematics and Geochronology Related to Late Mesozoic Basin-Mountain Evolution in the Nanxiong-Zhuguang Area, South China. *Sci. China Ser. D-Earth Sci.* 47: 673–688.
- Taylor, S.R., and McLennan, S.M., 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*: Oxford, UK, Blackwell Scientific Publications, 312 p.
- Wang, M. H., Xin, Q., Wang, W. T., et al., 2023. Ar-Ar Ages and Geochemistry of Late Cretaceous Basalts in the Nanxiong Basin, SE China: Constraints on the Subduction and Rollback of the Paleo-Pacific Plate. *Journal of Asian earth sciences*, 253. 105732.
- Wang, Q. M., Li, H. L., Li, T. L., et al., 2022. Two-episode Tectono-thermal Events of the Heyuan Fault in Late Cretaceous and Oligocene and Their Tectonic Implications, Southernmost South China Block. *Acta geologica Sinica (Beijing)*, 96(2):447-459.
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Zhang, G. W., et al., 2013. Phanerozoic Tectonics of the South China Block: Key Observations and Controversies, *Gondwana Research*, 23(4): 1273-1305.

- Yu, P. P., Hu, Z. B., Zheng Y., et al., 2024. A potential giant gallium deposit hosted in the tailing dam of the Fankou Zn-Pb deposit in northern Guangdong Province, South China, *China Geology*, 7, 157-160.
- Zhang, W., Fang, N. Q., Yuan, X. B., et al., 2019. Geochemical and Mineralogical Investigation on Different Types of Cenozoic Basalts in the Sanshui Basin: Implications for Magma Mixing Processes. *Journal of Earth Science*, 34(2): 178-189.
- Zhao, G. C. and Cawood, P., 2012. Precambrian Geology of China. *Precambrian Research*, 222-223, 13-54.
- Zhao, G. C., and Guo, J. H., 2012. Precambrian Geology of China: Preface. *Precambrian Research*, 222-223:1-12.
- Zhou, H. M., Xiao, L., Dong, Y. X., et al., 2009. Geochemical and Geochronological Study of the Sanshui Basin Bimodal Volcanic Rock Suite, China: Implications for Basin Dynamics in Southeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(2): 178-189.
- Zhou, X. M., and Li, W. X., 2000. Origin of Late Mesozoic Igneous Rocks in Southeastern China: Implications for Lithosphere Subduction and Underplating of Mafic Magmas, *Tectonophysics*, 326(3-4):269-287.
- Zhou, X. M., Sun, T., Shen, W. Z., et al., 2006. Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Volcanic Rocks in South China: A Response to Tectonic Evolution. *Episodes*, 29(1), 26-33.
- 董月霞, 肖龙, 周海民, 等. 2006. 广东三水盆地双峰式火山岩:空间展布、岩石学特征及其盆地动力学意义. *大地构造与成矿学*, 30(01):82-92.
- 杜商岚, 李鹏飞, 张运迎, 等. 2022. 粤东河源盆地晚白垩世玄武岩地球化学特征及其大地构造意义. *大地构造与成矿学*, 46(06): 1245-1261.
- 付建明. 1997. 琼北新生代火山作用与构造环境. *桂林工学院学报*, 17(1): 26-33.
- 蒋少涌, 马盈. 2024. 华夏地块造山型金矿床:时空分布规律,地质-地球化学特征,成矿机制与动力学背景.*地质学报*, 98(3):920-940.
- 旷健, 祁士华, 王帅, 等. 2020. 广东惠州花岗岩体及其地热意义. *地球科学*, 45(04):1466-1480.
- 李建华, 董树文, 赵国春, 等. 2024. 华南晚中生代大陆变形、深部过程及动力学. *地质学报*, 98(3):829-861.
- 李三忠, 索艳慧, 李玺瑶, 等. 2018. 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. *科学通报*, 63 (16):1550~1593.

- 李时若, 唐吉阳. 1966. 广东河源盆地玄武岩的初步研究. 地质论评, 24(03):236-241.
- 李玉琼, 张旗, 王金荣, 等. 2017. 全球大陆弧玄武岩(CAB)的特征——与岛弧玄武岩(IAB)和弧后玄武岩(BAB)的对比. 地质科学, 52(3): 693-713.
- 凌秋贤, 张显球. 2002. 广东河源盆地红层的初步研究. 地层学杂志, 26(04):264-271.
- 刘大任. 2000. 初论邵武——河源断裂带的活动性. 江西地质, 14(2):81-87.
- 王松山. 我国 K-Ar 法标准样 ^{40}Ar - ^{40}K 和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄测定及放射成因 ^{40}Ar 的析出特征. 地质科学, 1983, 18(4): 315-323.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 2007. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩. 岩石矿物学杂志, 26(1):77-89.
- 肖龙, 周海民, 董月霞, 等. 2006. 广东三水盆地火山岩:地球化学特征及成因——兼论火山岩性质的时空演化和南海形成的深部过程. 大地构造与成矿学, 30(01):72-81.
- 杨锦, 杨帆, 黄小龙, 等. 2022. 南海扩张前序岩浆活动:解译华南三水盆地古近纪玄武质岩浆作用过程. 大地构造与成矿学, 46(03):530-551.
- 虞鹏鹏, 丁望, 曾长育, 等. 2023. 华南云开地区幕式岩浆作用与大陆再造. 地球科学, 48, 3205-3220.
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 2013. 中国华南大陆构造与问题. 中国科学:地球科学, 43(10): 1553-1582.
- 张敏, 旷健, 肖志才, 王帅. 2021. 广东惠州燕山期以来地质构造演化:对华南构造的新启示. 地球科学, 46(01):242-258.
- 张敏, 李海龙, 唐灵, 等. 2023. 粤东河源盆地的深部构造、沉积序列与盆地演化. 地球学报. 45(3):291-308.
- 张维, 方念乔. 2014. 广东三水盆地始新世火山岩地球化学特征. 地球科学, 39(01):37-44.
- 张显球, 吕君昌, 边戈果, 等. 2005. 广东省河源盆地北部红层的初步研究. 地质学报, 5:720.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 等. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展. 地球学报, 33(3):257~279.
- 朱炳泉, 王慧芬, 陈毓蔚, 等. 2002. 新生代华夏岩石圈减薄与东亚边缘海盆构造演化的年代学与地球化学制约. 地球化学. 31(03): 213-221.
- 邹和平, 李平鲁, 饶春涛. 1995. 珠江口盆地新生代火山岩地球化学特征及其动力学意义. 地球化学, 24(S1): 33-45.

附表 1 河源及邻区盆地玄武岩主量元素(wt.%)组成

Appendix 1. Major elements (wt.%) composition of the basalts in Heyuan and adjacent basins

地点	样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ T	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	Mg#	数据来源	
河源	BT034-2	51.48	1.56	15.31	11.44	0.15	6.89	8.58	2.62	0.45	0.16	1.22	99.86	54.40	本文	
	BT095	47.43	1.39	14.84	10.30	0.16	4.87	10.10	3.43	0.47	0.18	6.59	99.76	48.36	本文	
	BT095-2	48.87	1.47	16.04	11.41	0.13	6.12	9.81	2.60	0.23	0.21	2.47	99.36	51.52	本文	
	L20SC11-1	53.03	1.67	15.19	11.05	0.16	6.76	8.96	2.62	0.42	0.14	0.66	100.27	54.79	①	
	L20SC11-2	52.85	1.71	14.98	11.34	0.16	6.80	8.95	2.60	0.45	0.16	0.59	100.00	54.29	①	
	L20SC11-3	52.54	1.68	15.19	11.34	0.16	6.88	8.98	2.62	0.45	0.16	0.78	100.34	54.58	①	
	L20SC11-4	52.82	1.71	15.23	11.05	0.16	6.73	9.04	2.66	0.45	0.15	0.49	99.90	54.68	①	
	L20SC11-5	52.93	1.71	15.11	11.14	0.16	6.81	8.94	2.62	0.43	0.14	0.82	100.36	54.77	①	
	K-1	51.06	1.36	15.66	10.88	0.15	6.06	7.10	3.87	0.20	0.15	3.28	99.76	52.46	②	
	K-2	48.34	1.60	15.71	12.10	0.13	7.23	9.63	2.49	0.19	0.19	2.32	99.92	54.21	②	
	K-3	51.00	1.39	15.72	11.03	0.16	6.38	7.31	3.73	0.18	0.15	2.92	99.95	53.40	②	
	K-4	51.34	1.62	15.15	11.47	0.14	6.33	8.78	2.93	0.17	0.16	1.76	99.85	52.23	②	
	南雄	X1-A	49.43	1.81	16.65	6.57	0.17	4.04	8.85	4.86	0.23	0.26	6.34	99.21	54.94	③
		X1-B	47.63	1.69	17.00	9.26	0.14	4.45	9.01	4.21	0.26	0.23	6.24	100.11	48.75	③
X1-C		46.27	1.79	16.60	9.22	0.18	5.09	9.39	3.83	0.18	0.26	6.77	99.58	52.23	③	
X1-D		48.45	1.75	16.54	8.86	0.20	2.96	8.95	4.21	0.24	0.24	7.27	99.66	39.80	③	

	ZD-203	51.70	2.00	16.05	—	0.15	5.81	7.68	3.63	1.98	0.52		—	⑤	
	18SS082-1	51.31	2.02	16.25	11.20	0.14	5.31	8.24	3.33	1.66	0.53		48.43	⑤	
	18SS082-2	51.84	2.03	16.12	10.82	0.15	5.15	8.17	3.38	1.80	0.53		48.53	⑤	
连 平	GLP-1	55.76	0.99	16.91	8.38	0.15	4.26	7.96	2.52	1.61	0.52		99.06	50.18	⑥
	GLP-3	55.21	1.05	17.48	8.71	0.16	4.28	7.84	2.53	1.48	0.56		99.30	49.33	⑥
	GLS-1	62.79	0.53	16.67	4.64	0.09	2.50	3.19	4.91	1.57	0.29		97.18	51.63	⑥

参考文献：①杜商岚等，2022；②Wang et al., 2022;③Wang et al., 2023;④Zhou et al., 2009;⑤张煜和方念乔，2021;⑥Chung et al., 1997.

附表 2 河源及邻区盆地玄武岩微量元素（ppm）组成

Appendix 2. Trace elements (ppm) composition of the basalts in Heyuan and adjacent basins

地 点	样品号	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sn	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd
	BT034-2	7.30	0.830	22.8	152	220	51.8	144	47.9	110	20.5	4.10	263	23.5	117	11.5	1.00	0.140	136	12.3	26.3	3.25	14.5
	BT095	46.10	0.870	20.3	156	210	50.0	148	102.0	104	19.3	8.30	373	19.3	117	12.2	1.00	1.68	234	13.2	28.0	3.38	14.6
	BT095-2	14.80	0.940	19.2	166	190	40.2	124	58.8	104	18.5	1.50	344	20.5	127	13.8	2.00	0.060	138	14.8	31.2	3.72	16.0
河 源	L20SC11-1	7.62	0.940	23.2	162	222	45.9	138	50.3	103	19.9	3.57	289	20.4	116	13.2	1.09	0.110	143	9.81	20.7	2.62	11.5
	L20SC11-2	7.55	0.870	22.5	156	208	47.1	136	53.5	101	19.3	3.73	271	22.5	112	13.0	1.04	0.110	136	10.5	21.9	2.83	12.5
	L20SC11-3	7.35	0.920	21.8	155	211	47.4	139	57.8	99	19.6	4.01	274	22.6	111	13.0	1.06	0.110	136	10.5	21.7	2.79	12.1
	L20SC11-4	6.84	0.930	21.9	154	207	44.4	134	54.5	100	19.2	4.25	276	21.4	113	13.0	1.05	0.120	139	9.95	20.7	2.66	11.7
	L20SC11-5	7.20	0.990	21.8	154	205	46.8	135	47.8	101	18.8	3.62	274	21.6	112	13.0	1.02	0.110	136	9.84	20.3	2.56	11.4

	K-1	24.4	0.790	20.8	141	182	44.6	144	59.9	91.3	17.7	4.81	484	19.6	86	8.12	1.02	0.620	192	8.23	18.8	2.39	10.9
	K-2	12.6	0.900	22.1	157	224	46.9	168	70.2	100	20.1	2.91	278	22.7	114	13.1	1.16	0.056	101	14.4	29.7	3.60	15.6
	K-3	24.8	0.750	21.8	145	197	44.9	146	69.9	92.9	18.9	3.68	449	20.3	89	8.39	1.03	0.510	138	8.21	19.0	2.39	10.7
	K-4	17.2	0.740	23.6	163	198	43.3	127	52.6	105	20.0	1.45	278	24.9	103	8.26	1.21	0.075	147	9.55	22.1	2.74	12.5
	X1-A	79.6		18.5	106	182	33.7	142	59.4	106	17.1	5.99	618	19.2	131	24.3		1.82	317	17.5	36.4	4.42	19.1
	X1-B	70.8		16.7	123	162	31.3	101	54.3	89.7	17.4	8.01	554	16.8	118	22.7		3.52	323	16.6	33.5	4.08	17.1
	X1-C	79.9		18.3	115	181	44.4	139	59.8	101	20.4	3.40	517	17.8	128	23.9		1.31	293	16.8	34.5	4.24	18.2
	X1-D	65.6		17.7	105	171	33.6	128	53.7	66.3	17.0	6.64	582	18.1	126	23.2		2.69	378	18.5	37.1	4.53	19.2
	X1-E	64.4		17.6	125	175	31.2	104	55.8	73.6	16.7	6.65	581	18.3	125	23.0		2.72	336	17.8	36.2	4.36	18.4
	X2-A	39.8		16.8	112	180	32.6	122	42.7	74.1	17.3	8.21	407	18.0	115	21.3		1.21	310	15.9	30.4	3.89	16.6
	X2-B	32.0		17.4	113	181	34.7	131	64.3	78.4	17.7	6.32	417	17.2	117	20.9		0.960	307	15.4	30.2	3.77	16.2
	X2-C	25.0		18.0	115	191	37.0	139	57.1	88.8	18.8	4.82	428	16.8	120	21.9		0.247	310	15.2	30.7	3.82	16.4
	X2-D	40.0		17.8	110	188	34.5	126	36.0	76.5	17.9	6.15	405	19.0	118	21.2		0.609	297	16.8	32.4	4.02	17.3
	X2-E	42.7		16.8	105	187	30.9	114	43.4	71.4	17.5	10.9	408	17.2	116	21.4		2.70	318	15.5	28.5	3.75	16.1
	X4-A	77.5		17.8	91.3	180	58.6	173	59.7	141	18.5	6.36	521	13.8	126	22.7		0.797	346	15.5	32.2	3.99	17.1
	X4-B	75.2		17.8	95.7	175	60.5	176	58.3	130	18.9	7.21	481	15.6	126	22.6		1.82	414	15.0	31.2	3.90	16.7
	X4-C	46.7		16.0	74.0	162	36.5	122	51.0	70.1	16.2	7.04	443	15.4	113	20.2		1.89	324	16.0	32.0	3.94	16.9
	X4-D	60.5		18.0	78.9	180	54.2	167	58.7	186	18.8	7.49	485	14.3	127	22.7		1.73	388	15.7	32.3	4.01	17.3
	X4-E	82.0		18.9	104	190	65.3	187	61.0	95.7	19.7	6.64	536	16.0	133	23.7		0.894	404	15.9	33.0	4.10	17.6
三	DF							83.9			19.1	28.0	1284	23.7	203	66.7			569	37.3	74.3	8.90	35.4

水	DF2								91.2			18.8	31.0	582	24.7	198	65.1		553	39.2	77.4	9.02	36.9
	ZD-201-A	22.5	1.88	23.1	165	218	41.9	113	66.4	114	21.9	20.8	418	28.7	252	52.6	0.490	395	30.2	53.4	6.88	28.3	
	ZD-201	21.5	1.65	21.5	155	192	37.3	95.3	61.3	106	20.8	19.0	412	27.3	251	48.3	0.390	374	29.1	51.3	6.55	27.1	
	14SSZD-N	—	1.61	21.2	159	139	42.8	108	51.1	107	22.4	24.3	447	29.4	256	71.8	0.480	402	28.1	53.4	6.61	27.4	
	14SSZD-S2	—	1.67	20.1	148	184	38.9	126	42.8	102	21.6	39.8	414	28.2	276	74.2	0.360	358	28.7	54.0	6.57	26.7	
	ZD-101	11.1	1.75	22.5	165	199	40.3	108	67.1	113	22.4	41.0	413	27.5	251	55.1	0.370	363	29.6	52.0	6.61	27.1	
	14SSZD-S1	—	1.56	20.7	151	196	40.8	132	42.9	106	22.0	20.5	388	28.5	280	73.2	0.180	370	29.3	54.7	6.69	27.2	
	ZD-202	19.2	1.66	21.5	153	156	41.3	92.7	44.7	102	21.7	20.9	445	28.9	263	54.9	0.420	398	31.3	56.4	6.78	27.5	
	ZD-203	10.1	1.64	21.3	153	147	39.9	86.1	40.7	106	21.9	34.9	410	29.1	240	54.4	0.310	367	33.0	58.5	7.05	28.7	
	18SS082-1	10.5	1.35	22.1	177	165	62.3	101	64.8	156	22.3	20.9	451	30.0	129	48.8	0.290	391	27.8	51.6	6.64	27.2	
	18SS082-2	7.57	1.71	21.9	185	173	60.5	108	62.6	161	22.7	24.5	437	30.6	137	50.0	0.140	367	28.1	53.6	6.69	27.3	
连 平	GLP-1				159	83.0		26.0	47.0	111	20.0	41.0	814	19.0	113	11.0		510	29.4	61.9		30.2	
	GLP-3				170	60.0		20.0	8.00	97.0	19.0	52.0	837	20.0	101	9.00		477	27.7	56.9		31.5	
	GLS-1				67.0	34.0		13.0	1.00	83.0	19.0	143	626	13.0	123	11.0		353	30.3	55.4		23.5	
地 点	样品号	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Tl	Pb	Th	U	ΣREE	δEu	δCe	(La/Sm)N	(La/Yb)N	数据来源
河 源	BT034-2	4.10	1.50	4.85	0.740	4.51	0.910	2.42	0.320	1.97	0.300	3.10	0.700	0.020	2.90	2.28	0.430	77.67	1.03	1.02	1.94	4.48	本文
	BT095	3.76	1.33	4.26	0.630	3.75	0.750	2.01	0.260	1.59	0.250	3.00	0.800	0.060	3.10	2.67	0.620	77.52	1.02	1.03	2.27	5.96	本文
	BT095-2	4.01	1.45	4.44	0.700	4.03	0.780	2.07	0.270	1.59	0.250	3.10	0.800	0.020	2.40	2.74	0.740	85.06	1.05	1.03	2.39	6.68	本文
	L20SC11-1	3.06	1.34	3.90	0.630	3.90	0.710	1.92	0.280	1.71	0.260	3.12	0.750	0.010	2.93	1.95	0.420	62.08	1.19	1.00	2.07	4.12	①

	L20SC11-2	3.21	1.27	4.25	0.710	4.26	0.810	2.24	0.310	1.88	0.300	2.98	0.750	0.020	2.92	2.10	0.430	66.67	1.05	0.99	2.11	4.01	①
	L20SC11-3	3.30	1.42	4.20	0.690	4.05	0.790	2.15	0.310	1.87	0.290	2.99	0.760	0.020	2.75	2.09	0.430	65.87	1.17	0.98	2.06	4.03	①
	L20SC11-4	3.09	1.31	4.00	0.650	3.92	0.790	2.04	0.290	1.86	0.280	3.06	0.750	0.020	2.76	2.00	0.380	62.96	1.14	0.99	2.08	3.84	①
	L20SC11-5	3.22	1.36	4.06	0.680	4.05	0.790	2.24	0.320	1.90	0.300	3.04	0.780	0.020	2.74	1.88	0.440	62.72	1.15	0.99	1.97	3.72	①
	K-1	3.05	1.12	3.73	0.620	3.51	0.670	1.72	0.240	1.56	0.230	2.34	0.460	0.040	2.22	1.40	0.380	56.54	1.02	1.04	1.74	3.79	②
	K-2	3.73	1.34	4.44	0.700	4.10	0.790	2.10	0.290	1.84	0.260	2.89	0.720	0.033	2.89	2.41	0.430	82.63	1.01	1.01	2.50	5.62	②
	K-3	3.11	1.21	3.90	0.620	3.49	0.690	1.81	0.250	1.68	0.220	2.27	0.480	0.031	2.10	1.44	0.420	57.06	1.06	1.05	1.71	3.51	②
	K-4	3.76	1.43	4.68	0.790	4.48	0.840	2.27	0.290	1.97	0.260	2.71	0.470	0.032	2.72	1.86	0.320	67.40	1.04	1.06	1.64	3.48	②
	X1-A	4.75	1.65	4.80	0.722	3.81	0.681	1.67	0.219	1.23	0.169	3.14	1.37		3.35	2.53	33.1	96.95	1.06	1.02	2.38	10.21	③
	X1-B	4.09	1.46	4.16	0.633	3.37	0.610	1.52	0.202	1.13	0.159	2.95	1.30		3.90	2.24	18.7	88.46	1.08	1.00	2.62	10.54	③
	X1-C	4.35	1.56	4.45	0.672	3.59	0.656	1.65	0.222	1.30	0.180	3.10	1.37		2.86	2.45	4.29	92.19	1.09	1.00	2.50	9.27	③
	X1-D	4.49	1.55	4.51	0.693	3.72	0.668	1.68	0.226	1.28	0.179	3.05	1.34		4.50	2.45	29.0	98.15	1.05	0.99	2.66	10.37	③
	X1-E	4.41	1.54	4.49	0.687	3.69	0.665	1.66	0.219	1.26	0.173	3.02	1.31		4.25	2.42	23.9	95.38	1.06	1.01	2.61	10.14	③
南 雄	X2-A	4.06	1.44	4.16	0.639	3.55	0.663	1.68	0.221	1.26	0.177	2.76	1.21		2.77	2.23	2.01	84.46	1.07	0.95	2.53	9.06	③
	X2-B	3.92	1.43	4.08	0.630	3.40	0.623	1.58	0.213	1.21	0.169	2.81	1.21		2.34	2.22	2.14	82.66	1.09	0.97	2.54	9.13	③
	X2-C	4.02	1.47	4.12	0.627	3.40	0.614	1.55	0.210	1.21	0.169	2.89	1.25		2.05	2.26	1.03	83.34	1.11	0.99	2.44	9.01	③
	X2-D	4.19	1.48	4.37	0.666	3.59	0.663	1.67	0.224	1.28	0.178	2.82	1.23		2.73	2.25	2.87	88.65	1.06	0.97	2.59	9.42	③
	X2-E	3.94	1.42	4.04	0.623	3.39	0.620	1.57	0.210	1.19	0.163	2.80	1.22		2.94	2.23	2.36	80.85	1.09	0.92	2.54	9.35	③
	X4-A	4.17	1.47	3.99	0.596	3.05	0.535	1.30	0.168	0.97	0.132	2.99	1.30		3.22	2.40	15.4	85.04	1.10	1.00	2.40	11.43	③
	X4-B	4.05	1.42	4.05	0.618	3.27	0.597	1.51	0.203	1.17	0.163	3.01	1.30		2.91	2.42	4.59	83.69	1.07	1.00	2.39	9.20	③

	X4-C	4.09	1.43	4.08	0.614	3.27	0.586	1.45	0.194	1.13	0.157	2.70	1.14		3.51	2.21	19.8	85.68	1.07	0.99	2.53	10.16	③
	X4-D	4.12	1.45	4.12	0.605	3.13	0.547	1.33	0.179	1.01	0.138	3.03	1.29		3.04	2.44	13.6	85.80	1.08	1.00	2.46	11.15	③
	X4-E	4.28	1.53	4.22	0.647	3.41	0.611	1.53	0.209	1.20	0.164	3.16	1.34		3.41	2.53	10.6	88.24	1.10	1.00	2.40	9.51	③
	DF	6.96	2.35	6.80	0.940	5.29	1.01	2.55	0.310	1.98	0.320	4.98	3.52		3.98	1.09	184.11	1.05	1.00	3.46	13.52	④	
	DF2	7.16	2.56	7.23	1.02	5.33	1.06	2.68	0.360	2.06	0.340	5.21	4.25		3.45	0.980	192.04	1.09	1.01	3.54	13.66	④	
	ZD-201-A	6.66	2.17	6.24	1.11	6.05	1.10	2.67	0.460	2.88	0.620	6.03	3.28	0.130	4.60	3.72	1.20	148.04	1.03	0.91	2.93	7.52	⑤
	ZD-201	6.50	2.12	5.95	1.06	5.65	1.06	2.54	0.440	2.77	0.600	6.02	3.04	0.220	3.56	3.75	1.14	142.04	1.04	0.91	2.89	7.53	⑤
	14SSZD-N	6.23	2.09	6.23	1.00	5.59	1.06	2.81	0.410	2.42	0.360	5.82	4.03	-	2.41	3.82	1.02	143.35	1.03	0.96	2.92	8.33	⑤
三	14SSZD-S2	6.01	1.98	5.91	0.950	5.41	1.02	2.73	0.400	2.45	0.370	6.18	4.15	-	2.60	4.27	1.15	142.83	1.02	0.96	3.09	8.41	⑤
水	ZD-101	6.34	2.09	5.98	1.06	5.57	1.05	2.58	0.430	2.67	0.630	5.79	3.41	0.160	3.89	3.63	1.29	142.96	1.04	0.91	3.01	7.94	⑤
	14SSZD-S1	6.11	2.01	6.09	0.970	5.44	1.04	2.78	0.410	2.44	0.370	6.22	4.12	-	2.91	4.27	1.14	145.18	1.01	0.96	3.10	8.62	⑤
	ZD-202	6.12	2.15	5.81	0.970	5.82	1.07	2.93	0.440	2.83	0.470	5.72	3.17	0.110	3.12	16.5	1.18	150.06	1.10	0.95	3.30	7.93	⑤
	ZD-203	6.30	2.22	6.09	1.01	5.99	1.12	3.06	0.470	2.93	0.480	5.35	3.13	0.120	3.29	10.3	1.23	156.44	1.10	0.94	3.38	8.08	⑤
	18SS082-1	6.44	2.25	5.00	0.990	5.17	1.07	2.40	0.460	2.93	0.380	5.40	2.84	0.090	2.69	3.31	0.970	139.95	1.21	0.93	2.79	6.81	⑤
	18SS082-2	6.17	2.17	5.28	0.990	4.90	1.07	2.42	0.470	2.84	0.370	5.68	2.91	0.070	2.09	3.14	0.890	142.00	1.16	0.96	2.94	7.10	⑤
	GLP-1	5.74	1.71		0.800					2.37	0.330	2.80	0.580		3.60	0.500					3.31	8.90	⑥
连	GLP-3	5.73	1.79		0.800					2.03	0.280	2.80	0.520		3.40	0.600					3.12	9.79	⑥
平	GLS-1	4.02	1.28		0.510					1.55	0.210	3.20	0.670		5.30	0.900					4.87	14.03	⑥

参考文献: ①杜商岚等, 2022; ②Wang et al., 2022;③Wang et al., 2023;④Zhou et al., 2009; ⑤张煜和方念乔, 2021; ⑥Chung et al., 1997.

附表3 河源盆地玄武岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测试结果Appendix 3. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating results of Heyuan basalt

实验编号	$^{36}\text{Ar}(\text{a})$	$^{37}\text{Ar}(\text{ca})$	$^{38}\text{Ar}(\text{cl})$	$^{39}\text{Ar}(\text{k})$	$^{40}\text{Ar}(\text{r})$	Age (Ma)	$\pm 2s$	$^{40}\text{Ar}(\text{r})$ (%)	$^{39}\text{Ar}(\text{k})$ (%)
T034-1									
GZ10C44-S05	8.428543	991.04	0.6297645	233.665	192.749	62.08	± 35.30	7.11	0.40
GZ10C44-S07	7.044920	1278.06	0.5946869	407.202	347.026	64.10	± 17.35	14.16	0.69
GZ10C44-S08	9.676640	2822.85	0.3135395	941.238	813.363	64.98	± 10.46	21.95	1.60
GZ10C44-S09	10.617890	6174.76	0.0000000	1707.740	1497.298	65.92	± 6.77	32.04	2.91
GZ10C44-S12	5.782005	7114.53	0.0000000	1924.192	1701.010	66.45	± 3.88	49.55	3.28
GZ10C44-S13	8.800265	13752.82	0.0000000	3537.572	3077.272	65.41	± 3.41	53.84	6.02
GZ10C44-S14	7.259478	18676.71	0.0000000	4607.348	4131.329	67.39	± 2.66	65.45	7.84
GZ10C44-S16	3.940712	19068.52	0.0000000	4568.280	4094.352	67.35	± 2.12	77.48	7.78
GZ10C44-S17	3.533519	22413.40	0.0000000	5293.879	4680.283	66.46	± 1.97	81.38	9.01
GZ10C44-S18	2.619588	21556.46	0.0000000	4986.343	4499.609	67.81	± 1.90	84.95	8.49
GZ10C44-S19	1.933822	21889.86	0.0000000	4847.409	4437.299	68.77	± 1.87	88.23	8.25
GZ10C44-S20	1.490656	21058.77	0.0000000	4491.633	4136.910	69.18	± 1.88	90.02	7.65
GZ10C44-S23	0.996437	20190.91	0.0000000	4068.392	3804.451	70.22	± 1.90	92.47	6.93
GZ10C44-S24	1.392994	27373.68	0.1982756	4833.924	4438.520	68.97	± 2.12	91.16	8.23
GZ10C44-S25	1.185426	24601.81	0.4342601	4454.841	4111.410	69.32	± 2.07	91.80	7.58
GZ10C44-S27	0.371819	13596.36	0.3801506	2295.113	2159.528	70.65	± 2.19	94.82	3.91
GZ10C44-S28	0.106586	9414.83	0.4240732	1218.342	1148.261	70.76	± 2.85	97.00	2.07
GZ10C44-S29	0.096689	7709.20	0.4423682	891.167	839.706	70.74	± 3.33	96.38	1.52
GZ10C44-S32	0.602401	15913.75	1.4719973	1492.683	1389.507	69.91	± 3.84	88.29	2.54

GZ10C44-S33	0.421978	10024.82	0.6523055	868.169	800.475	69.25	±4.38	86.16	1.48
GZ10C44-S34	0.608001	13293.69	0.7294922	993.503	898.544	67.96	±4.92	82.96	1.69

BT095-2

GZ10C43-S03	11.34095	28.29	0.148713	7.995	37.349	326.80	±1019.87	1.09	0.03
GZ10C43-S04	26.16510	301.66	0.506498	42.555	6.618	11.88	±321.15	0.08	0.17
GZ10C43-S05	22.18482	656.82	0.750389	93.698	31.493	25.59	±131.09	0.47	0.38
GZ10C43-S07	19.35330	965.77	0.602915	152.614	97.583	48.37	±74.35	1.66	0.62
GZ10C43-S08	14.13921	1826.69	0.474518	249.880	180.989	54.70	±40.19	4.11	1.01
GZ10C43-S09	10.32769	3444.54	0.394063	389.871	333.384	64.40	±23.83	9.75	1.58
GZ10C43-S12	9.76718	7494.25	0.198727	774.651	684.671	66.53	±12.11	19.00	3.13
GZ10C43-S13	6.52013	6442.78	0.075008	742.046	654.367	66.38	±11.83	25.14	3.00
GZ10C43-S14	4.72484	6167.71	0.164581	723.702	648.106	67.39	±11.79	31.45	2.92
GZ10C43-S16	4.40034	7695.15	0.071481	898.926	819.999	68.62	±9.52	38.38	3.63
GZ10C43-S17	3.31572	6815.39	0.157665	794.598	719.008	68.08	±10.59	42.01	3.21
GZ10C43-S18	2.95426	7339.92	0.102798	836.498	764.246	68.73	±10.04	46.35	3.38
GZ10C43-S19	3.09689	8758.60	0.297995	976.220	882.319	68.00	±8.68	48.75	3.95
GZ10C43-S20	3.07290	10270.03	0.395615	1106.327	1012.966	68.87	±7.71	52.38	4.47
GZ10C43-S23	2.77878	11621.12	0.431127	1198.252	1098.056	68.93	±7.16	56.86	4.84
GZ10C43-S24	3.54667	17150.01	0.218338	1684.305	1432.934	64.08	±5.34	57.39	6.81
GZ10C43-S25	3.60691	20412.69	0.351945	1942.193	1654.519	64.16	±4.76	60.44	7.85
GZ10C43-S27	3.44562	23281.33	1.214116	2185.948	1977.173	68.05	±4.32	65.63	8.83
GZ10C43-S28	3.35012	24732.89	1.528986	2221.702	1997.324	67.65	±4.30	66.48	8.98
GZ10C43-S29	4.28573	26283.59	1.956994	2138.345	1677.181	59.16	±4.62	56.60	8.64
GZ10C43-S32	3.61269	25719.98	2.261824	2132.053	1737.251	61.42	±4.55	61.55	8.62
GZ10C43-S34	2.29010	16135.59	1.001288	1367.066	1079.893	59.57	±6.44	61.09	5.52

附表 4 河源及邻区盆地玄武岩全岩 Sr-Nd 同位素组成

Appendix 4. Sr-Nd isotopic compositions of the basalts in Heyuan and adjacent basins

地点	样品号	岩性	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	1σ	I_{Sr}	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	1σ	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$T_{\text{DMI}}(\text{Ga})$	数据来源
河源	BT095-2	玄武岩	0.704993	0.000004	0.70498	0.512656	0.000002	0.512592	0.72	1.21	本文
	BT095-1	玄武岩	0.706825	0.000003	0.70676	0.512626	0.000002	0.512558	0.11	1.38	本文
	BT034-2	玄武岩	0.705016	0.000005	0.70497	0.512706	0.000002	0.512629	1.55	1.58	本文
	L20SC11-1	玄武岩	0.704916	0.000004	0.70488	0.512713	0.000010	0.512635	1.80	1.26	①
	L20SC11-3	玄武岩	0.704933	0.000004	0.70489	0.512698	0.000010	0.512618	1.50	1.40	①
	L20SC11-4	玄武岩	0.704935	0.000004	0.70489	0.512715	0.000011	0.512638	1.90	1.23	①
南雄	X1-A	玄武岩	0.706241	0.000004	0.70624	0.512765	0.000002		2.49		②
	X1-E	玄武岩	0.706047	0.000003	0.70605	0.512765	0.000002		2.49		②
	X2-A	玄武岩	0.705493	0.000003	0.70549	0.512810	0.000002		3.35		②
	X2-C	玄武岩	0.705484	0.000003	0.70548	0.512821	0.000002		3.58		②
	X2-E	玄武岩	0.705563	0.000003	0.70556	0.512804	0.000002		3.24		②
	X4-A	玄武岩	0.706114	0.000003	0.70611	0.512796	0.000003		3.08		②
	X4-C	玄武岩	0.705513	0.000004	0.70551	0.512780	0.000003		2.78		②
	X4-E	玄武岩	0.706187	0.000003	0.70619	0.512808	0.000003		3.31		②
三水	KS-2	玄武岩	0.706287	0.000010	0.70625	0.512734	0.000005		2.30		③
	KS-10	玄武岩	0.704714	0.000023	0.70461	0.512865	0.000010		4.80		④
	KS-15	玄武岩	0.705061	0.000009	0.70496	0.512860	0.000006		4.60		④
	KS-25	玄武岩	0.704584	0.000022	0.70535	0.512794	0.000005		3.40		④
	KS-36	玄武岩	0.705048	0.000009	0.70485	0.512871	0.000005		4.90		④

K-40	玄武岩	0.705158	0.000015	0.70511	0.512932	0.000015	6.10	④
K-41	玄武岩	0.703873	0.000012	0.70373	0.512936	0.000012	6.20	④
K-9	玄武岩	0.704728	0.000017	0.70461	0.512878	0.000009	4.80	④
DF	玄武岩	0.705218	0.000010	0.70519	0.512863	0.000008	5.80	④
K-50	粗面岩	0.715520	0.000080	0.71266	0.512905	0.000024	5.50	④
K-51	粗面岩	0.729400	0.000012	0.70863	0.512864	0.000005	4.80	④
KS-28	粗面岩	0.727400	0.000009	0.71027	0.512857	0.000004	4.70	④
XBS-1	粗面岩	0.721985	0.000015	0.70688	0.512878	0.000013	4.50	④
XJ-1	粗面岩	0.722368	0.000009	0.70975	0.512930	0.000006	5.10	④
XJ-2	粗面岩	0.731564	0.000025	0.71012	0.512798	0.000012	4.70	④

参考文献：①杜商岚等, 2022; ②Wang et al., 2023; ③Chung et al., 1997; ④Zhou et al., 2009.