

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.506>



丽水—椒江凹陷月桂峰组沉积物源性质及其物源方向:来自碎屑锆石U-Pb年代学和重矿物成分的证据

湛君明^{1,2}, 唐友军^{1,2*}, 刘彬², 徐雨², 伍炼华², 王庭旭², 陈培^{1,2}

1. 长江大学油气地球化学与环境湖北省重点实验室, 湖北武汉 430100
2. 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100

摘要:月桂峰组是丽水—椒江凹陷的主力烃源岩层,但其物源的研究薄弱,给油气勘探带来较大的困难。通过锆石U-Pb测年和重矿物分析等方法,对月桂峰组物源特征、差异及其地质意义进行系统分析对比。结果显示:物源以中酸性火成岩为主,含有少量变质岩,年龄以130~100 Ma为主,主要含有锆石、赤褐铁矿和磁铁矿等稳定重矿物;椒江凹陷与丽水东次凹物源主要来自雁荡凸起,丽水西次凹物源主要来自闽浙隆起带;少量火成岩和变质岩来自研究区附近的基底;锆石圆度偏好和ZTR值较高,说明物源经过中长距离搬运,这有利于中酸性岩浆岩中的石英和长石矿物富集,形成抗压实较好的石英质砂岩储层。

关键词:物源分析;锆石U-Pb同位素定年;重矿物分析;矿床学。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2024)04-1339-13

收稿日期: 2022-03-17

Sediment Provenance and Its Direction of Yueguifeng Formation in Lishui-Jiaojiang Depression: Evidence from Detrital Zircon U-Pb Chronology and Heavy Minerals

Zhan Junming^{1,2}, Tang Youjun^{1,2*}, Liu Bin², Xu Yu², Wu Lianhua², Wang Tingxu², Chen Pei^{1,2}

1. Hubei Key Laboratory of Petroleum Geochemistry and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China
2. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources of Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China

Abstract: Yueguifeng Formation is the main source rock in Lishui-Jiaojiang depression, but it's poor research on provenance which brings great difficulties to oil and gas exploration. Based on zircon U-Pb dating and heavy mineral analysis, it was systematically analyzed and compared for the provenance characteristics, differences and geological significance of the Yueguifeng Formation. The results show that the provenance is mainly medium-acid igneous rocks main ages of which are 130—100 Ma with a small amount of metamorphic rocks, mainly containing stable heavy minerals such as zircon, hematite and magnetite. The provenance of Jiaojiang depression and east Lishui sub-depression mainly came from Yandang uplift, and the provenance of west Lishui sub-depression mainly came from Fujian-Zhejiang uplift. A small amount of igneous and metamorphic rocks came from the

基金项目:国家自然科学基金(No. 41972148)。

作者简介:湛君明(1994—),男,硕士研究生,研究方向为岩石地球化学,ORCID: 0000-0001-6023-6144. E-mail: 761280158@qq.com

* 通讯作者:唐友军(1975—),男,教授,博士生导师,研究方向为油气地球化学,E-mail: tyj@yangtzeu.edu.cn

引用格式:湛君明,唐友军,刘彬,徐雨,伍炼华,王庭旭,陈培,2024.丽水—椒江凹陷月桂峰组沉积物源性质及其物源方向:来自碎屑锆石U-Pb年代学和重矿物成分的证据.地球科学,49(4):1339—1351.

Citation: Zhan Junming, Tang Youjun, Liu Bin, Xu Yu, Wu Lianhua, Wang Tingxu, Chen Pei, 2024. Sediment Provenance and Its Direction of Yueguifeng Formation in Lishui-Jiaojiang Depression: Evidence from Detrital Zircon U-Pb Chronology and Heavy Minerals. *Earth Science*, 49(4):1339—1351.

basement near the study area. Zircon roundness preference and ZTR values are higher, indicating that the provenance was transported over medium and long distances, which is conducive to the enrichment of quartz and feldspar minerals in medium-acid magmatic rocks, forming quartz sandstone reservoirs with good compaction resistance.

Key words: provenance analysis; zircon U-Pb isotopic dating; heavy mineral analysis; ore deposit geology.

0 引言

丽水—椒江凹陷是目前东海盆地西南侧重点油气勘探地区之一,前人对丽水—椒江凹陷已进行了大量的研究,证实了月桂峰组烃源岩分布广、厚度大、成熟度高,生烃能力强,是古新统的主力烃源岩层(田杨等,2016;雷闯等,2021)。古新统地层由下至上包括月桂峰组、灵峰组和明月峰组,但前人研究时,许多井尚未钻遇到月桂峰组地层,其研究还是局限停留在古新统月桂峰组以上地层(刘俊海等,2005;付晓伟等,2015a;陈春峰等,2017a,2017b)。目前对于月桂峰组物源研究比较少,前人主要利用碎屑锆石U-Pb测年法,认为丽水东次凹北部来自福州凹陷,中部来自灵峰凸起(付晓伟等,2015b;陈春峰,2017a);但仍需要综合各种方法进一步分析,减少单一方法可能带来的误判,而对于椒江凹陷和丽水西次凹及各次凹陷物源差异尚未清楚,有待深入研究,所以整个丽水—椒江凹陷月桂峰组物源分析还处于初步阶段。

近年来,碎屑锆石U-Pb测年物源分析方法在丽水—椒江凹陷及邻近区得以广泛运用,因为锆石矿物相对稳定,主要用于年龄范围限定和大致区分变质成因和岩浆成因锆石岩性的判别(付晓伟等,2015a;高顺莉,2019;刘松峰,2021),人为因素影响相对较小;地球化学方法在丽水—椒江凹陷也得到一定的运用(刘俊海等,2003,2005),虽然受人为因素影响小,但岩屑样品前处理相对复杂,存在混染的风险,另外元素活动性对现有解释图版的判别有一定的影响。而重矿物可以有效地揭示物源区母质类型、搬运距离和方向等信息,而且具有耐磨蚀、化学性质稳定等优势,受风化、搬运和成岩过程影响小,可以有效保存大量母岩的信息等优势(许苗苗等,2021)。基于前人对本地区的物源分析使用的各种方法,充分考虑各种方法的局限性,进行物源分析时充分利用各种方法的优势,取长补短,减少单一方法造成的误判。本文主要通过U-Pb定年法和重矿物分析方法,选取丽水—椒江凹陷典型探井,结合前人的研究,重点对各次凹陷月桂峰组的物源

年代、岩性、方向与距离等进行分析与对比,为月桂峰组物源体系研究及其大地构造背景提供一定的理论依据。

1 地质背景

丽水—椒江凹陷位于东海盆地西南侧,北与钱塘凹陷和渔山低凸起相接,西北与以闽浙隆起带相邻,西南以雁荡凸起与福州凹陷相隔,呈NE-SW向展布。椒江凹陷位于整个凹陷的西北部,丽水凹陷位于西南部,丽水凹陷内部的灵峰凸起将其分割成丽水东次凹和丽水西次凹2个次凹,是在中生代残留盆地基底拉张形成具有东断西超半地堑式特点盆地(图1)。

丽水—椒江凹陷构造演化复杂,从晚白垩纪至新近纪前后经历了基隆运动、雁荡运动、玉泉运动和龙井运动等,主要将其划分为3个构造演化阶段:晚白垩世—古新世断陷阶段(T_g-T_{80})、始新世拗陷阶段($T_{80}-T_{20}$)和新近纪区域沉降阶段(T_{20} —现今)(刘欢等,2021)。主要的生油气时段是古新统以泥质岩为主的巨厚时段,自下而上层位分别为月桂峰组、灵峰组和明月峰组,其中灵峰组和明月峰组又分别分为上、下段。月桂峰组烃源岩是以灰色和灰黑色泥岩为主的湖相沉积岩;灵峰组和明月峰组烃源岩均为海相沉积岩,其中灵峰组下段以砂岩夹灰色泥岩为主,灵峰组上段是以灰色和灰黑色泥岩为主的湖相沉积岩;明月峰组整体以灰色泥岩级泥质砂岩为主。月桂峰组沉积时期还处于裂谷早期,研究区是以浅湖—深湖相为主的三角洲—湖泊沉积体系,灵峰古潜山因构造突起遭到剥蚀,在其两侧出现多个近源堆积的扇三角洲,丽水凹陷因其分割,导致丽水东次凹和丽水西次凹沉积物源体系略有不同。椒江凹陷西侧和丽水西次凹西侧均发育了三角洲,椒江凹陷东侧和丽水东次凹东侧均发育扇三角洲(刘景彦等,2004)。

2 样品分析及测试方法

在中海油(中国)有限公司上海分公司提供的

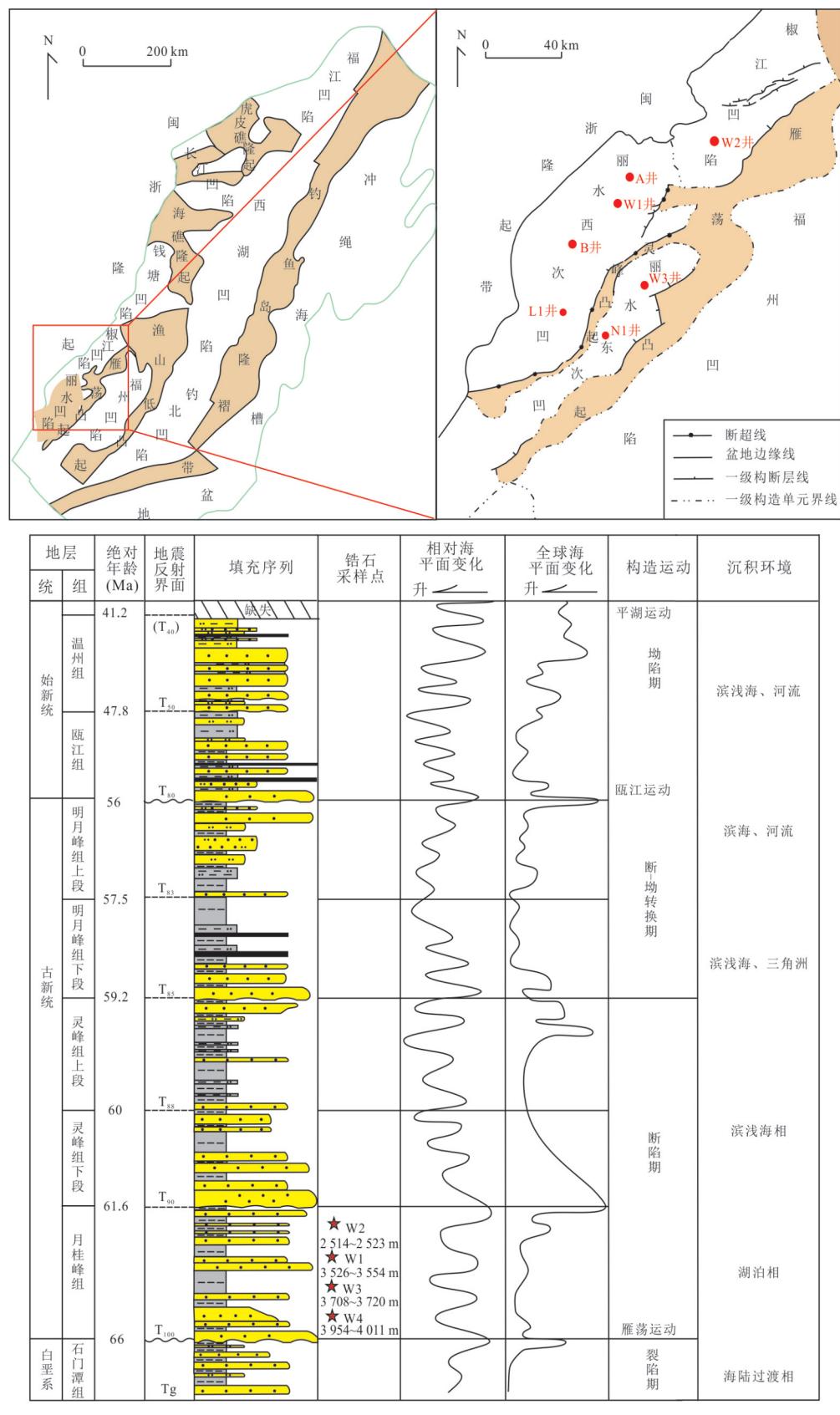


图1 丽水—椒江凹陷位置级构造单元及地层划分

Fig.1 Division of position-level tectonic units and layer in Lishui-Jiaojiang depression

据徐波等(2020);钟锴等(2018)修编

内部资料分析后及对新井 W1 井和其他几口典型井岩心和岩屑观察的基础上,选取几件月桂峰组岩屑样品,每件样品约 500 g。在实验前,首先对样品进行前预处理,对岩屑样品进行洗涤,剔除钻井产生的有机泥浆等杂质后晾干,再将其筛选颜色、岩性较为均一的砂岩岩屑颗粒,以减少样品中的杂质,提高实验结果的可靠性。

挑选好的样品由河北廊坊地质研究院进行锆石矿物的挑选,最终获得足够量锆石矿物进行 U-Pb 定年。锆石 U-Pb 年代分析测试是在湖北武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 分析完成。锆石 U-Pb 定年分析实验前首先采用标准密度和磁选技术提取锆石颗粒。随机选取的锆石颗粒在立体显微镜下手工挑选,并将其安装在环氧树脂中,然后抛光,将晶体切成两半进行分析。利用日立 S2250-N 扫描电子显微镜进行发透射光和阴极发光进行拍照得到锆石形态和内部结构,最后利用 ICP-MS 型号为 Agilent 7700e 的 GeolasPro 激光剥蚀系统进行分析。以上锆石 U-Pb 定年分析测试及其使用仪器详细参数参见文献(Zong *et al.*, 2017)。

3 结果分析

3.1 锆石 U-Pb 定年结果分析

3.1.1 碎屑锆石形态和内部结构 岩浆锆石内部结构一般具有岩浆振荡环带,是高温条件下微量元素扩散形成结晶环带,而变质锆石内部结构一般无分带、弱分带和扇形分带等(郑永飞和吴元保, 2004; Huang *et al.*, 2022; Shen *et al.*, 2022)。在光学显微镜下,2 个碎屑锆石样品颗粒基本以无色透明至半透明为主,锆石颗粒长度介于 80~200 μm,宽

度介于 60~150 μm,晶型为自形一半自形结构,锆石磨圆度中等一较好,碎屑锆石经历中长距离搬运。

W1 井共有 80 颗碎屑锆石颗粒,深度为 3 526~3 554 m,颗粒的横切面主要以次棱状一次圆状为主,CL 图像部分碎屑锆石颜色较暗,少部分碎屑锆石颜色较浅,锆石晶体粒径大小为 60~200 μm,而且多数碎屑锆石存在溶蚀孔洞(图 2a)。大部分的碎屑锆石颗粒磨圆度较好,发育清晰岩浆振荡环带、宽板状环带或者弱分带;存在少量岩浆振荡环带明显,锆石柱状晶形保留完好,磨圆度差;另外还存少量无分带、弱分带的碎屑锆石锆石。

W2 井共有 55 颗锆石年龄,深度为 2 514~2 523 m,颗粒的横切面主要以次棱状一次圆状为主,晶体粒径大小为 70~180 μm;CL 图像显示该层位的碎屑锆石晶形呈自形一半自形结构,颜色较浅,磨圆度中等,而且几乎所有的锆石内部结构呈现出明显的岩浆锆石振荡环带特征(图 2b)。

W3 井共有 59 颗锆石年龄,深度为 3 708~3 720 m,晶体粒径大小为 70~150 μm,颗粒的内部结构和外部形态与 W2 井基本类似;颗粒的横切面主要以次棱状一次圆状为主,CL 图像显示该层位的碎屑锆石晶形呈自形一半自形结构,颜色较浅,大部分锆石内部结构呈现出明显的岩浆锆石振荡环带特征,磨圆度中等一较好;少量锆石呈现出面状或弱分带和无分带的现象,磨圆度较好(图 2c)。

N1 井共有 53 颗锆石年龄,深度为 3 954~4 011 m,晶体粒径大小为 80~170 μm,颗粒的横切面主要以次棱状一次圆状为主,大部分锆石内部结构呈现出明显的岩浆锆石振荡环带特征,磨圆度中等一较好;少量锆石呈现出面状或弱分带和无分带的现象,磨圆度较好(图 2d)。

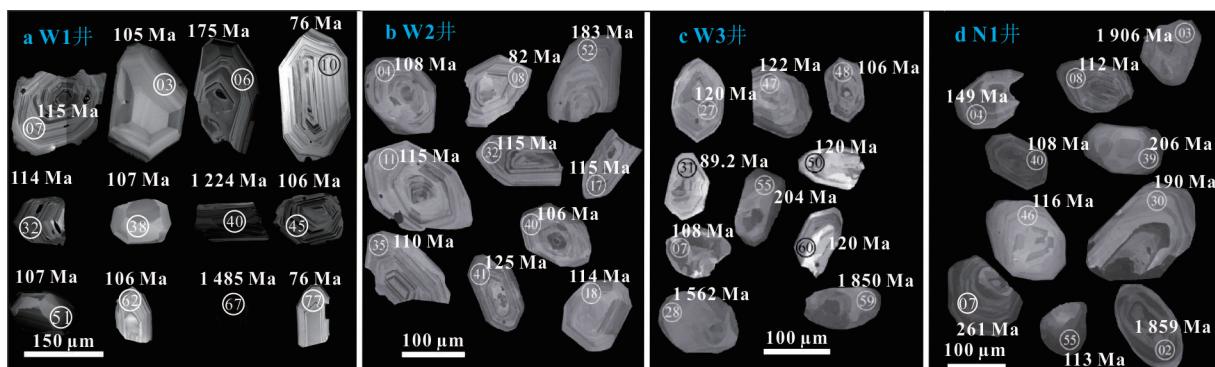


图 2 丽水—椒江凹陷砂岩碎屑锆石 CL 图像

Fig.2 Clastic zircon CL images of sandstone in Lishui-Jiaojiang sag

从碎屑锆石CL图像看,4个样品的碎屑锆石颗粒多为颜色较浅,具有明显的岩浆锆石振荡环带特征,含有少量变质锆石;而W1井部分锆石颗粒颜色比较深,可能因为U含量比较高而导致在阴极发光下显得较暗色色调。锆石内部结构和外部形态等特征显示,W1井的CL色调、磨圆度和溶蚀孔洞等特征与其他井存在明显的差别,暗示着其与椒江凹陷和丽水东次凹具有不同的物质来源。

3.1.2 锆石Th、U含量及其比值特征 从碎屑锆石的Th和U元素及其比值范围看,月桂峰组样品Th/U比值主要分布在0.01~2.05,均值范围为0.78~0.96,其中W1井该比值分布范围最大(图3,表1);碎屑锆石Th元素含量主要分布在 12×10^{-6} ~ 2198.48×10^{-6} ,均值范围在 170.77×10^{-6} ~ 598.31×10^{-6} ;碎屑锆石U元素含量主要分布在 23.60×10^{-6} ~ 2666.54×10^{-6} ,均值范围在 277.21×10^{-6} ~ 767.49×10^{-6} (表1)。从碎屑锆石Th/U比值图中显示,月桂峰组 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值主要分布在100~150之间,少量分布在<100、150~250和>1000,而且Th/U<0.4的样品 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值均

大于150。

通过4个样品的Th和U含量及进行对比,W1井的U、Th含量和Th/U平均比值明显比其他3口井的含量高(表1),这也显示其跟其他的井物源区可能不一样。根据前人的研究,一般认为Th/U比值 ≥ 0.4 为岩浆成因的锆石,而变质锆石的Th/U比值 <0.1 (Rubatto *et al.*, 2000)。根据4口井的Th/U比值结果特征,结合上述典型的锆石岩浆振荡环带的结构特征,认为大部分锆石来自于岩浆岩母岩,少部分来自于变质岩母岩,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值均大于150(图3,表1)。

3.1.3 碎屑锆石U-Pb年龄谱特征 4口井岩浆锆石年龄主要分为3个年龄段,以130~100 Ma的岩浆锆石为主,其中W1、W2、N1和W3井年龄峰值分别为107 Ma,111 Ma,119 Ma和116 Ma(图4),其岩浆锆石含量占比分别是93.4%、100%、91.5%和86.8%;另外含有少量相对年轻岩浆锆石,其年龄主要分布在90~73 Ma之间;还有年龄相对偏老的岩浆锆石,其年龄主要分布在245~159 Ma和409~475 Ma之间(表2);变质锆石年龄普遍>159 Ma,

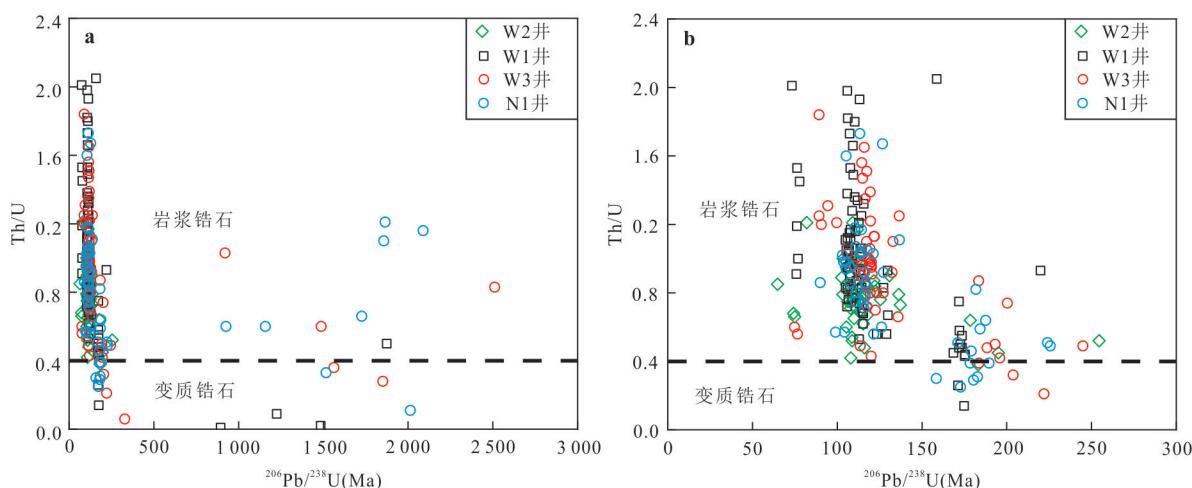


图3 丽水—椒江凹陷砂岩碎屑锆石Th/U比值

Fig.3 Detrital zircon Th/U ratio of sandstone in Lishui-Jiaojiang sag

表1 丽水—椒江凹陷月桂峰组锆石Th和U元素及其比值

Table 1 Zircon Th and U elements and their ratios in the Yueguifeng Formation, Lishui-Jiaojiang sag

井号	深度(m)	锆石 颗数	Th(10^{-6}) [*]	U(10^{-6}) [*]	Th/U [*]	Th/U<0.4 锆石颗数
W1	3 526~3 554	80	20.38~2 198.48 (598.31)	154.52~2 666.54 (767.49)	0.01~2.05 (0.96)	5
W2	2 514~2 523	55	12~750 (225.62)	23.60~792 (289.90)	0.38~1.21 (0.78)	1
W3	3 708~3 720	59	58~762 (273.67)	64.30~1 157.00 (326.36)	0.06~1.84 (0.90)	5
N1	3 999~4 011	53	24~502 (170.77)	25.8~1 412.00 (277.21)	0.11~1.73 (0.80)	7

注:^{*}最小值~最大值(均值)。

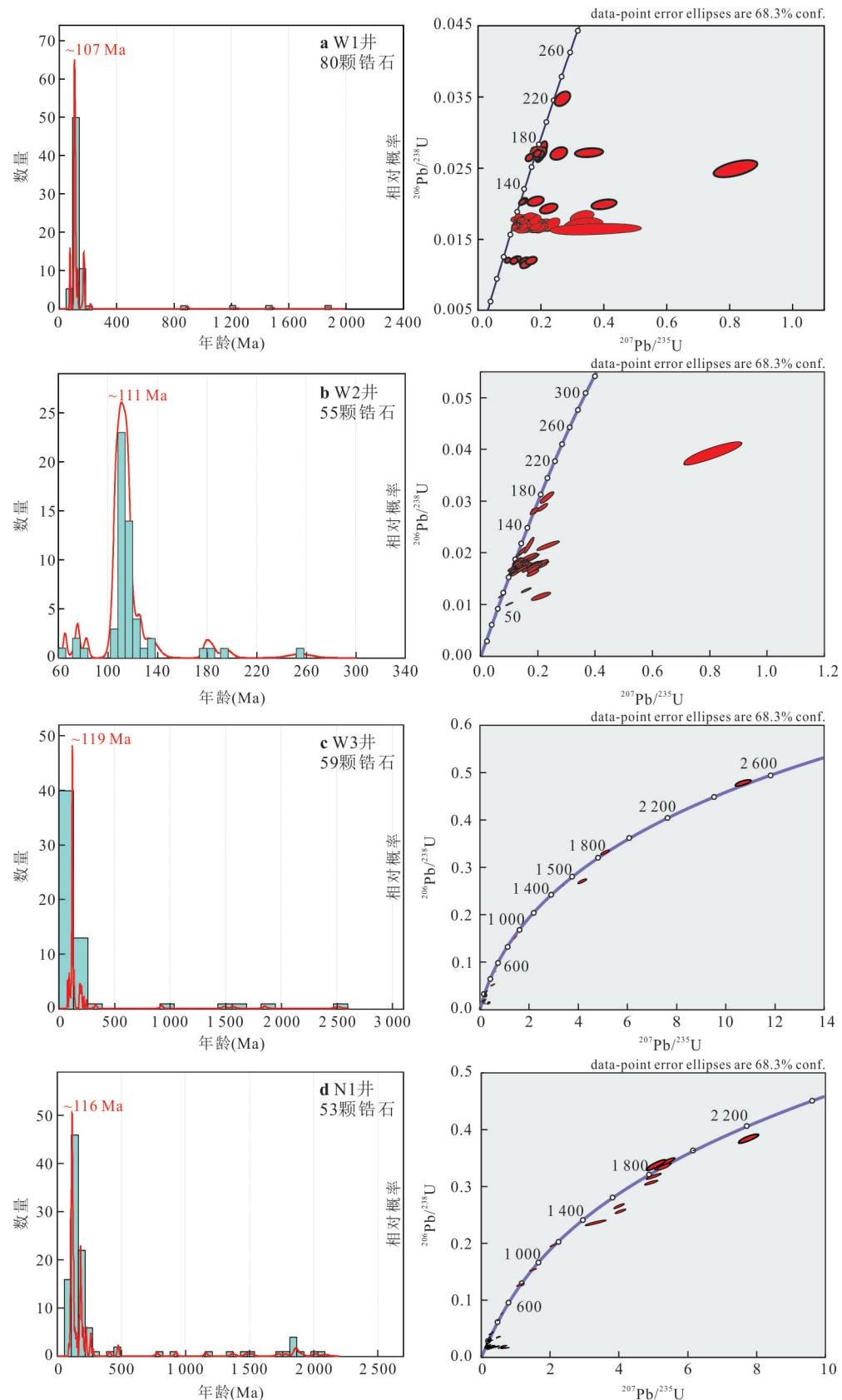


图4 丽水—椒江凹陷砂岩碎屑锆石年龄谱和谐图

Fig.4 Detrital zircon age spectrum and concordant diagrams of sandstone in Lishui-Jiaojiang sag

主要集中在159~222 Ma之间,但其年龄分布范围极大,甚至有的变质锆石年龄大于1 000 Ma(表2)。

通过4口井碎屑锆石年龄数据对比分析,丽水西次凹W1井岩浆锆石年龄峰值最低,其他3口井年龄峰值相对较高;在相对偏老的岩浆锆石和变质岩浆锆石年龄中,丽水东次凹N1井的碎屑锆石年龄比其他3口井年龄大,而且变质锆石含量最高,约占锆石总数13.2%,这可能跟其井位离灵峰凸起比较近有关;而椒江凹陷W2井岩浆锆石含量高达100%,没有出现变质锆石的现象,这可能与其远离灵峰凸起有关,结合其他井情况,这可能说明灵峰凸起是重要变质锆石物源区。

3.2 重矿物结果分析

重矿物的物理化学性质相对稳定,在迁移搬运过程中,具有较强的抗磨蚀能力和稳定性,能够保留其完整的物源区母岩特征,可以很好地反映重矿物物源区的岩石相关信息(East *et al.*, 2015; Achab *et al.*, 2017)。不同物源区的重矿物组成存在明显的差异,那么来源相同或者相近的沉积物中的重矿物组成和含量相同或者相近,因此可以根据其沉积物中的重矿物变化规律和相关种矿物特征指数判断

母岩的类型和物源方向(Morton *et al.*, 1995),其中ZTR指数可以指示矿物成熟度和物源方向,ZTR值越高,稳定矿物含量越高,搬运距离越远,ZTR=100×(锆石+电气石+金红石)/透明重矿物(许苗苗,2021)。根据重矿物的稳定性主要分为超稳定矿物、稳定矿物、一般稳定矿物和不稳定矿物4类(田豹,2017),丽水—椒江凹陷月桂峰组含有的主要重矿物分类及平均百分比含量如表3所示。

位于椒江凹陷W2井的重矿物组合为赤褐铁矿(51.4%)+锆石(30.6%)+白钛矿(5.6%)+磁铁矿(4.9%)+石榴石(3.5%)+黄铜矿(2.1%),ZTR指数为87;位于丽水东次凹以北W3井的重矿物组合为锆石(30.6%)+白钛矿(47.6%)+石榴石(7.2%)+磁铁矿(2.3%)+赤褐铁矿(5.9%)+锐钛矿(3.2%),ZTR指数在48~95之间,均值为74;位于丽水东次凹以南N1井的重矿物组合为锆石(46.7%)+磁铁矿(30%)+白钛矿(11.8%)+锐钛矿(9.5%)+赤褐铁矿(3.4%)+石榴石(2.2%)+钛铁矿(2.1%)+电气石(1.9%)+金红石(1.1%),ZTR指数在88~96之间,均值为92(表3,图5)。

位于丽水西次凹以北的A井重矿物组合为赤

表2 丽水—椒江凹陷月桂峰组锆石年龄特征

Table 2 Zircon age characteristics of Yueguifeng Formation in Lishui-Jiaojiang sag

井号	深度(m)	岩浆锆石年龄(Ma)			变质锆石年龄(Ma)
		主要年龄	年轻年龄	偏老年龄	
W1	3 526~3 554	130~105	78~73	220~159	175~171、894、1 224、1 485
W2	2 514~2 523	126~103	82~75	245~183	—
W3	3 708~3 720	122~100	89~75	245~183、328	204~222、328、1 562、1 850
N1	3 999~4 011	128~103	90	151~226、409~475	158、173~199、261~277、1 369~1 515、1 860~2 013

表3 月桂峰组重矿物分类及平均百分比含量(%)

Table 3 Classification and average percentage content of heavy minerals in Yueguifeng Formation (%)

井号	超稳定				稳定						一般 稳定	不稳定	
	锆石	电气石	金红石	合计	石榴石	磁铁矿	白钛矿	赤褐铁矿	锐钛矿	其他	合计		
W2井	31.2	—	0.7	31.9	3.5	5.0	5.7	52.5	—	—	66.7	0.7	0.7
A井	16.1	0.2	—	16.3	2.4	7.8	1.6	67.2	0.9	0.9	80.8	0.3	2.6
B井	8.1	0.3	0.7	9.0	0.3	1.1	1.1	88.3	0.3	—	91.0	—	—
L1井	35.6	0.1	0.2	36.0	1.1	0.2	59.7	0.2	2.0	0.6	63.8	—	0.2
W3井	30.8	0.7	0.4	31.9	7.2	2.3	47.9	6.0	3.2	—	66.5	1.1	0.4
N1井	47.7	1.9	1.2	50.8	2.3	30.6	12.0	3.4	0.8	—	49.1	—	0.1

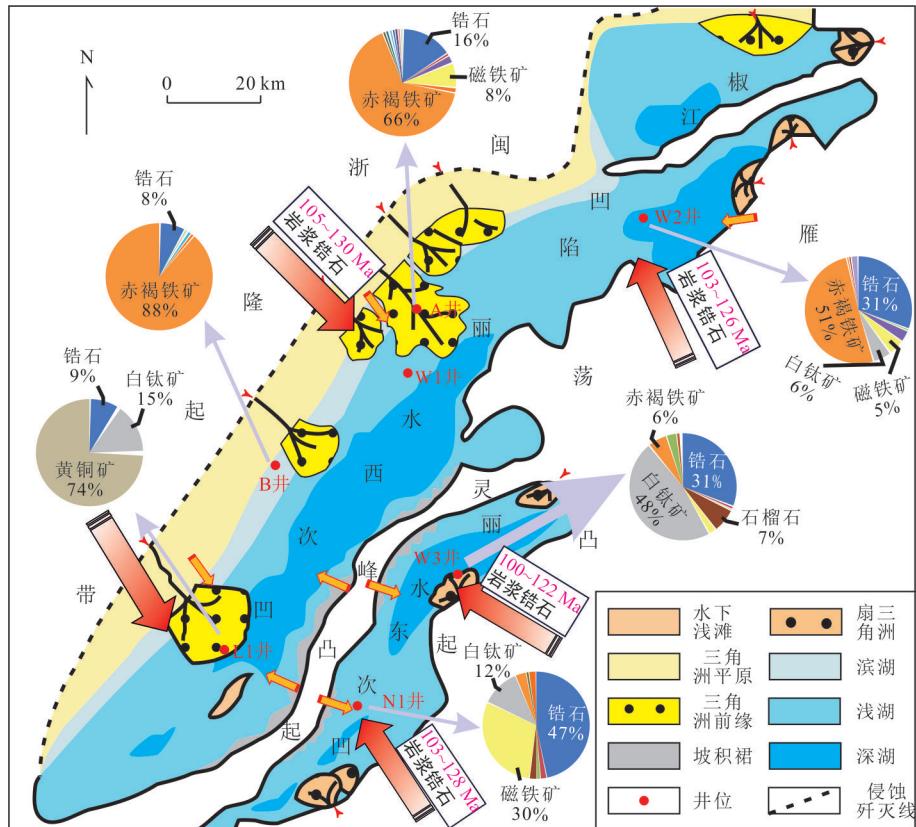


图 5 月桂峰组物源综合分析图

Fig.5 Comprehensive analysis of provenance of Yueguifeng Formation

红色箭头代表火山岩物源方向,黄色箭头代表变质岩物源方向,饼图代表重矿物组合百分比

褐铁矿(66.1%)+锆石(15.8%)+磁铁矿(7.7%)+石榴石(2.2%)+白钛矿(1.5%),ZTR 指数在 67~89 之间,均值为 76. 位于丽水西次凹中部 B 井重矿物组合为赤褐铁矿(88.3%)+锆石(8.1%)+磁铁矿(1.1%)+白钛矿(1.1%),ZTR 指数在 94~100 之间,均值为 98. 位于丽水西次凹以南的 L1 井重矿物组合为黄铜矿(74.2%)+白钛矿(15.1%)+锆石(9.01%),ZTR 指数在 79~94 之间,均值为 89(表 3, 图 5).

4 讨论

4.1 潜在物源岩层区分

研究区基底潜在物源地层主要以中酸性火山岩、火山岩—沉积互层和变质岩基底为主。花岗岩基底在研究区分布面积比较小, 主要分布在椒江凹陷的东北部和灵峰凸起与雁荡凸起相连附近; 变质岩基底主要分布在环椒江凹陷的西部及西北部以及东部的雁荡凸起地区, 环丽水西次凹中西部和灵峰凸起的中南部, 丽水东次凹的南部, 而且灵峰凸

起出露了不同年龄片麻岩变质岩, 其基底上覆着明月峰组地层, 其中 LF-1 还钻遇了 1806 Ma 的片麻岩基底(王长势等, 2014); 火山岩基底主要以安山岩、流纹岩等中酸性火山岩或火山岩—沉积岩互层为主, 是丽水—椒江凹陷分布最广盆地基底, 在花岗岩和变质岩区周围地区都有其分布。根据前人研究, 闽浙沿海地区燕山期 NE 向的岩浆岩带可能与研究区花岗岩和火山岩具有一致性(王长势等, 2014), 因此研究区潜在物源与闽浙地区潜在物源可以进行对比与分析。

中生代时期, 在闽浙沿海潜在物源区曾出现多期的岩浆活动。其中在晚三叠世, 受印支运动影响, 华北地块与扬子地块挤压碰撞, 东海南部的岩石圈发生挠曲变形, 开始发育被动大陆边缘海盆(姚伯初等, 2011; 王明健等, 2022), 此时在闽浙沿海地区出现以花岗岩类为主的侵入岩, 年龄在 231.7~215.0 Ma 之间(Li et al., 2009; 李万友等, 2012; Mao et al., 2013); 在燕山早期, 华北地块与扬子地块碰撞减弱, 但古太平洋板块开始向亚欧板块 NWW 方向俯冲, 在俯冲过程中古太平洋板

出现变

质脱水与熔融,诱发了其上覆陆壳或地幔楔部分熔融,东海南部开始进入安第斯型活动陆缘阶段,在研究区的雁荡凸起附近出现岛弧岩浆活动,丽水—椒江凹陷此时属于弧前坳陷盆地,雁荡凸起以东则以隆升为主,局部发育小型坳陷盆地,而闽浙沿海地区则出现零星分布的各类花岗质侵入岩,年龄在160.0~147.2 Ma之间(王明健等,2022;陈润生等,2013);燕山中晚期,华北地块与扬子地块碰撞已经定型,东海南部地区主要受中特提斯洋NE方向和伊泽奈崎板块的NNW向俯冲机制控制,并且这一时期伊泽奈崎板块曾分别在161.6~148.2 Ma与136.5~101.7 Ma之间经历两次强烈的俯冲作用,此时华南内陆地区岩石圈达到减薄峰期,并伴随着强烈的中酸性岩浆活动,而此时闽浙沿海地区的侵入岩仍然以各类花岗岩为主,其年龄为107~86 Ma(邱检生等,2008;He and Xu, 2012; Li et al., 2014),在这一时期由于古板块俯冲回撤,形成了由内陆向海洋方向变年轻的花岗岩,因此在闽浙沿海东部的潜在物源区侵入岩可能会更加年轻(姚伯初等,2011;付晓伟等,2015b;王明健等,2022)。值得一提的是,此时(晚白垩世)闽浙地区东部构造体发生构造挤压反转,新一轮火山活动明显减弱;到晚白垩世末期(~70 Ma),火山活动基本趋于平静(Tian et al., 2010;任俊和张岳桥,2021),这与丽水—椒江凹陷在晚白垩世出现一段岩浆活动间歇期有一定的联系。

在晚中生代,闽东南沿海潜在物源区广泛分布酸性火山岩,以火山角砾岩、流纹岩和英安岩等为主,其中南园组年龄约为162.9~130.0 Ma,小溪组年龄约130~126 Ma,其上覆盖的石帽山群年龄为104~95 Ma(肖爱芳等,2012;付晓伟,2015b;薛德杰,2019);浙东南地层以酸性火山碎屑为主,其中从下至上地层分别是大爽组、高坞组、西山头组、茶湾组、九里坪组和永康群,其年龄分别是145~125 Ma、136~132 Ma、132~125 Ma、122 Ma、125~106 Ma和106~94 Ma(肖爱芳等,2012;李万友等,2012;Hu et al., 2012)。

4.2 月桂峰组物源分析

4.2.1 物源年代与岩性特征

根据研究区锆石年代和内部结构特征,可以粗略判断年龄和岩性。丽水—椒江凹陷的岩浆锆石年龄呈现出3个不同年龄段的锆石,主要以130~100 Ma年龄为主,而且具有清晰岩浆振荡环带、宽板状环带等中酸性岩浆结晶

特征;较年轻的岩浆锆石年龄为89~65 Ma,具有明显振荡环带特征,磨圆度差,晶型保存完好,可能来自附近晚燕山期的花岗质侵入岩;而大于150 Ma的年龄较老的岩浆锆石磨圆度好,可能来自印支期和早燕山期的花岗质侵入岩。对于各凹陷内变质岩锆石都呈现出较大的年龄的现象,椒江凹陷W2井的变质岩可能主要来自东部的雁荡凸起变质岩基底,丽水西次凹西侧的井变质岩主要来自闽浙隆起附近的变质岩基底,丽水东次凹变质岩主要来自灵峰古潜山(图5)。

重矿物对物源变化具有敏感的指示意义,因此可以用重矿物特性来恢复母岩岩性和沉积环境。中酸性火山岩一般富含赤褐铁矿、磁铁矿、磷灰石等矿物,变质岩富含石榴子石和白钛矿,氧化环境富含赤褐铁矿、磁铁矿等矿物,而富含黄铁矿和黄铜矿则指示还原缺氧环境(田豹等,2017;彭治超等,2017;何苗等,2019)。从重矿物特征来看,丽水—椒江凹陷富含赤褐铁矿、锆石磁铁矿等稳定矿物为主,因此母岩以中酸性火山岩为主,而石榴子石和白钛矿的出现,说明物源有来自变质岩母岩的贡献。椒江凹陷W2井和丽水东次凹以锆石、赤褐铁矿、磁铁矿等为主,说明其形成于氧化环境;而L1井黄铜矿的出现,说明其沉积环境偏还原环境。

从重矿物组合和锆石内外部形态及Th、U等特征来看,椒江凹陷W2井和丽水东次凹的重矿物组合特征具有一定的相似性,Th、U元素含量和Th/U比值都相对W1井低,因此也具有一定相似性,说明椒江凹陷W2和丽水东次凹存在一个共同物源区,结合月桂峰组古构造环境看,这个物源区可能是雁荡凸起地区,福州凹陷的物质因雁荡古潜山阻隔不能到达这些地区;而丽水西次凹因受灵峰古潜山阻隔远离雁荡凸起,物源可能主要来自西部闽浙隆起带,而导致丽水西次凹与椒江凹陷和丽水东次凹物源存在差异。

4.2.2 物源距离分析

物源搬运距离可以通过锆石磨圆度和ZTR值对物源远近进行粗略判断,一般情况下,锆石磨圆度好,ZTR值越高,代表物源经历长距离搬运,矿物成熟度越高。W1井锆石整体磨圆中等偏好,说明W1井物源主要经历中长距离搬运,少量近源物质贡献。A井ZTR值相对其他井低一些,但ZTR值还是比较高,经历中等距离搬运。B和L1井的ZTR值都偏高,说明其矿物成熟度高,物源经历长距离搬运。W2井锆石磨圆度较好,ZTR值都

偏高,说明物源主要以较长距离搬运为主.W3锆石整体磨圆度较好,ZTR值整体较高,说明W3井主要以较长距离物源贡献为主.N1井锆石磨圆度较好,ZTR值中等偏高,综合考虑N1井主要以中长距离物源贡献为主.综上所述,丽水—椒江凹陷的物源主要经历较长距离搬运,稳定矿物含量高,矿物成熟度高.

4.2.3 综合物源分析及地质意义 丽水—椒江凹陷月桂峰组处于裂陷盆地早期,一般情况以近物源贡献为主,但锆石磨圆度和ZTR指示丽水—椒江凹陷物源都经历中长距离搬运,因此精确判断其物源范围还是比较困难的.根据前人研究,闽浙沿海地区燕山期NE向的岩浆岩带可能与研究区花岗岩和火山岩具有一致性(王长势等,2014).因此可以将研究区的火成岩与闽浙地区潜在物源地层年代和岩性进行对比,结合各凹陷物源性质异同,可以粗略判断物源方向与距离.

丽水—椒江凹陷物源主要来自中生代年龄为130~100 Ma的中酸性火山岩,含有少量来自不同时期的花岗质侵入岩和年龄较大的变质岩基底物质.与潜在物源地层岩石对比,丽水西次凹的物源主要来自闽浙隆起带经过中长距离搬运的火山岩物质,对应的地层是晚中生代的西山头组、茶湾组和九里坪组地层;少量侵入岩物源主要来自附近燕山期形成的花岗岩,变质岩物源主要来自西侧时代更久远的变质岩基底.椒江凹陷和丽水东次凹物源主要来自雁荡凸起经过中长距离搬运而来的火山岩,其少量侵入岩物源主要来自附近燕山期形成的花岗岩,椒江凹陷W2井变质岩主要来自雁荡凸起,丽水东次凹主要来自灵峰古潜山(图5).

通常情况下,研究区的储层物性受砂岩组分含量的多少所控制,而砂岩组分又受物源所控制,因此不同构造背景下的物源控制了不同的油气储层物性的形成.其中,良好的储层物性通常在成岩作用过程中具有良好的抗压能力,从而减少孔隙度的损失.一般情况下,砂岩中的石英或长石含量越高,对成岩作用的抗压能力越强,则形成的良好物性的储层.丽水—椒江凹陷的物源主要是来自中酸性火山岩区,在矿物成分上本身富含长石和石英;而且ZTR指数和锆石颗粒磨圆度显示,物源经历了中长距离搬运,在搬运过程更有利于长石和石英等稳定矿物富集,在凹陷内部形成抗压能力强的石英质砂岩沉积层,成岩作用后形成孔隙度和渗透率良

好的油气储层.

5 结论

(1)月桂峰组沉积时期,椒江凹陷W2井和丽水东次凹重矿物组合和锆石内外部结构及其U,Th元素特征具有一定的相似性,说明其来自一个共同的雁荡凸起物源区,而且形成于氧化环境,而丽水西次凹则物源主要来自闽浙隆起带.

(2)丽水—椒江凹陷月桂峰组的碎屑锆石磨圆度普遍较好,ZTR值整体偏高,说明沉积物源经历了中长距离搬运,沉积物成熟度高,有利于石英和长石等稳定矿物富集.

(3)丽水—椒江凹陷曾经出现多期的岩浆活动,主要以130~100 Ma火山活动为主,使物源区拥有大量中生代中酸性火山岩.富含长石和石英矿物的中酸性火山岩经过长距离搬运,在凹陷内形成抗压能力强的良好物性油气储层.

致谢:在此衷心感谢本文在研究过程中能得到中海有限公司上海分公司的项目及样品和数据的支持.同时,对审稿专家的中肯意见,也在此一起表示衷心感谢!

References

- Achab, M., Moral Cardona, J. P., Gutiérrez-Mas, J. M., et al., 2017. Sedimentary Provenance and Depositional History of Cadiz Bay (SW Spain) Based on the Study of Heavy Minerals Surface Textures. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 33(1): 29—42. <https://doi.org/10.1007/s41208-016-0018-6>
- Chen, C.F., Zhong, K., Zhu, W.L., et al., 2017a. Provenance of Sediments and Its Effects on Reservoir Physical Properties in Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin. *Oil & Gas Geology*, 38(5): 963—972 (in Chinese with English abstract).
- Chen, C.F., Zhu, W. L., Fu, X. W., et al., 2017b. Provenance Change and Its Influence in Late Paleocene, Jiaojiang Sag, East China Sea Shelf Basin. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 45(10): 1522—1530, 1548 (in Chinese with English abstract).
- Chen, R.S., Li, J.W., Cao, K., et al., 2013. Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Dating of the Shangfang Tungsten Deposit in Northern Fujian Province: Implications for Regional Mineralization. *Earth Science*, 38(2): 289—304 (in Chinese with English abstract).
- East, A. E., Clift, P. D., Carter, A., et al., 2015. Fluvial-

- Elolian Interactions in Sediment Routing and Sedimentary Signal Buffering: An Example from the Indus Basin and Thar Desert. *Journal of Sedimentary Research*, 85(6): 715—728. <https://doi.org/10.2110/jsr.2015.42>
- Fu, X.W., Zhu, W.L., Chen, C.F., et al., 2015a. Detrital Zircon Provenance of Upper Mingyuefeng Formation in West Slope of Lishui-Jiaojiang Sag, the East China Sea. *Earth Science*, 40(12): 1987—2001 (in Chinese with English abstract).
- Fu, X.W., Zhu, W.L., Zhong, K., et al., 2015b. Discovery of Late Paleozoic Detrital Zircons in Lishui Sag, East China Sea, and Its Significance. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 43(6): 924—931 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S.L., Zhao, H., Wang, J.Q., et al., 2019. Zircon U-Pb Dating and Its Significance in Jiaojiang Sag, East China Sea Basin. *Petroleum Geology and Experiment*, 41(3): 311—318 (in Chinese with English abstract).
- He, M., Jiang, Y., Zhang, H., et al., 2019. Heavy Mineral Characteristics and Its Implication for Provenance of the Triassic, NW Junggar. *Geological Review*, 65(2): 464—476 (in Chinese with English abstract).
- He, Z. Y., Xu, X. S., 2012. Petrogenesis of the Late Yan-shanian Mantle-Derived Intrusions in Southeastern China: Response to the Geodynamics of Paleo-Pacific Plate Subduction. *Chemical Geology*, 328: 208—221. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.09.014>
- Hu, G., Hu, W. X., Cao, J., et al., 2012. Zircon U-Pb Dating of the Shipu Limestone in Zhejiang Province, Coastal Southeast China: Implications for the Early Cretaceous Environment. *Cretaceous Research*, 37: 65—75. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2012.03.005>
- Huang, G. W., Pan, J. Y., Xia, F., et al., 2022. Provenance of Uranium Mineralization of the Yuqia Area, Northwest China: Constraints from Detrital Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopes. *Journal of Earth Science*, 33(6): 1549—1570. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1654-9>
- Lei, C., Yin, S. Y., Ye, J. R., et al., 2021. Geochemical Characteristics and Hydrocarbon Generation History of Paleocene Source Rocks in Jiaojiang Sag, East China Sea Basin. *Earth Science*, 46(10): 3575—3587 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. H., Zhang, Y. Q., Dong, S. W., et al., 2014. Cretaceous Tectonic Evolution of South China: A Preliminary Synthesis. *Earth-Science Reviews*, 134: 98—136. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.03.008>
- Li, W. Y., Ma, C. Q., Liu, Y. Y., et al., 2012. Discovery of the Indosinian Aluminum A-Type Granite in Zhejiang Province and Its Geological Significance. *Science China Earth Sciences*, 42(2): 164—177 (in Chinese).
- Li, X. H., Li, W. X., Li, Z. X., et al., 2009. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb Zircon Ages, Geochemistry and Nd-Hf Isotopes of the Shuangxiwu Volcanic Rocks. *Precambrian Research*, 174(1—2): 117—128. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.07.004>
- Liu, H., Xu, C.H., Shen, W.L., et al., 2021. Characteristics of Transfer Zones in Lishui Sag, East China Sea and Its Significance for Petroleum Geology. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 28(4): 12—22 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. H., Wu, Z. X., Yu, S., et al., 2005. Paleocene Trace Element Geochemistry and Its Geological Significance in Lishui Sag. *China Offshore Oil and Gas*, 17(1): 8—11 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. H., Yang, X. H., Yu, S., et al., 2003. The REE Geochemical Characteristics of Paleocene-Eocene in the Lishui Sag of the Donghai Basin. *Geoscience*, 17(4): 421—427 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. Y., Chen, Z. Y., Lin, C. S., et al., 2004. Analysis on Sequence-Tracts and Distribution of Depositional Systems of Paleocene Mingyuefeng Formation in West Lishui Sag, East China Sea. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(3): 380—386 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. F., Li, S., Nie, X., et al., 2021. Detrital Zircon Geochronology from Southeastern Sea of Hainan Island: Provenance Tracing and Tectonic Implications. *Earth Science*, 46(11): 4084—4096 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. R., Ye, H. M., Liu, K., et al., 2013. The Indosinian Collision-Extension Event between the South China Block and the Palaeo-Pacific Plate: Evidence from Indosinian Alkaline Granitic Rocks in Dashuang, Eastern Zhejiang, South China. *Lithos*, 172/173: 81—97. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.04.004>
- Morton, A., Hurst, A., Dunay, R.E., et al., 1995. Correlation of Sandstones Using Heavy Minerals: An Example from the Statfjord Formation of the Snorre Field, Northern North Sea. *Geological Society of London Special Publications*, 89(1): 3—22. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1995.089.01.02>
- Peng, Z. C., Fu, X. H., Liu, J. C., et al., 2017. Analysis Methods and Research Progress of Sediment Source. *Journal of Xi'an University (Natural Science Edition)*,

- 20(1): 116–121 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J.S., Xiao, E., Hu, J., et al., 2008. Petrogenesis of Highly Fractionated I-Type Granites in the Coastal Area of Northeastern Fujian Province: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Nd-Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2468–2484 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J., Zhang, Y. Q., 2021. Cretaceous Volcano-Sedimentary Sequences in the Jianning-Taining Region of Mts Wuyi, Western Fujian: Constraint on Late Mesozoic Tectonic Evolution of SE China. *Acta Geologica Sinica*, 95(8): 2411–2435 (in Chinese with English abstract).
- Rubatto, D., Gebauer, D., Pagel, M., 2000. Use of Cathodoluminescence for U-Pb Zircon Dating by Ion Microprobe: Some Examples from the Western Alps. *Cathodoluminescence in Geosciences*. Springer, Berlin, Heidelberg: 373–400. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04086-7_15
- Shen, Y. F., Liang, M. Y., Wu, J. X., et al., 2022. Detrital-Zircon Evidence for the Origin of the Late Quaternary Loess in Qingzhou, Shandong Province and Its Implications for the Evolution of the Yellow River. *Journal of Earth Science*, 33(1): 205–214. <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1489-9>
- Tian, B., 2017. A Research Progress in Provenance Analysis of Heavy Minerals. *China's Manganese Industry*, 35(1): 107–109, 115 (in Chinese with English abstract).
- Tian, M., Shi, W., Li, J., et al., 2010. Tectonic Deformation Analysis and Paleostress Field Sequence of the Grabens in the Northwestern Jianghan Basin. *Acta Geologica Sinica*, 84(2): 159–170. <https://doi.org/10.1017/S0004972710001772>
- Tian, Y., Ye, J.R., Lei, C., et al., 2016. Development Controlling Factors and Forming Model for Source Rock of Yueguifeng Formation in Lishui-Jiaojiang Sag, the East China Sea Continental Shelf Basin. *Earth Science*, 41(9): 1561–1571 (in Chinese with English abstract).
- Wang, M. J., Pan, J., Gao, H. F., et al., 2022. Mesozoic Basin Evolution and Hydrocarbon Potential in the Northern South China Sea and Southern East China Sea. *Earth Science Frontiers*, 29(2): 294–302 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.S., Zhu, W.L., Chen, C.F., et al., 2014. Basement Lithology and Distribution of Lishui-Jiaojiang Cenozoic Sag in East China Sea. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 42(4): 636–644 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, A.F., Li, D.P., Liu, X.M., 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating for the Volcanic Rocks of the Lower Formation of the Shimaoshan Group and Evolution of the Cretaceous Magmatism in the Zijinshan Cu-Au Ore-field, Fujian Province. *Geotectonica et Metallogenesis*, 36(4): 613–623 (in Chinese with English abstract).
- Xu, B., Hu, B.Y., Zhang, Y.N., et al., 2020. Geochemical Characteristics of Light Hydrocarbons in Crude Oil from Lishui 36-1 Oil and Gas Field. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, 22(4): 12–18 (in Chinese with English abstract).
- Xu, M. M., Wei, X. C., Yang, R., et al., 2021. Research Progress of Provenance Tracing Method for Heavy Mineral Analysis. *Advances in Earth Sciences*, 36(2): 154–171 (in Chinese with English abstract).
- Xue, D.J., 2019. Characteristics of Geological Tectonic Evolution of the Southern End of Guangze-Wuping Fault Belt in the Late Mesozoic. *Geology of Fujian*, 38(4): 263–277 (in Chinese with English abstract).
- Yao, B.C., Zhang, L., Wei, Z.Q., et al., 2011. The Mesozoic Tectonic Characteristics and Sedimentary Basins in the Eastern Margin of South China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 31(3): 47–60 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y.F., Wu, Y.B., 2004. Mineralogical Study of Zircon Genesis and Its Constraints on U-Pb Age Interpretation. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589–1604 (in Chinese).
- Zhong, K., Zhu, W.L., Gao, S.L., et al., 2018. Key Geological Questions of the Formation and Evolution and Hydrocarbon Accumulation of the East China Sea Shelf Basin. *Earth Science*, 43(10): 3485–3497 (in Chinese with English abstract).
- Zong, K. Q., Klemd, R., Yuan, Y., et al., 2017. The Assembly of Rodinia: The Correlation of Early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) High-Grade Metamorphism and Continental Arc Formation in the Southern Beishan Orogen, Southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB). *Precambrian Research*, 290: 32–48. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.12.010>

中文参考文献

- 陈春峰, 钟楷, 朱伟林, 等, 2017a. 东海丽水凹陷物源及其对储层物性影响. 石油与天然气地质, 38(5):963–972.
- 陈春峰, 朱伟林, 付晓伟, 等, 2017b. 东海椒江凹陷晚古新世物源变化. 同济大学学报(自然科学版), 45(10):

- 1522—1530, 1548.
- 陈润生, 李建威, 曹康, 等, 2013. 闽北上房钨矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义. 地球科学, 38(2): 289—304.
- 付晓伟, 朱伟林, 陈春峰, 等, 2015a. 丽水—椒江凹陷西斜坡明月峰组上段碎屑锆石物源. 地球科学, 40(12): 1987—2001.
- 付晓伟, 朱伟林, 钟锴, 等, 2015b. 东海丽水凹陷晚古生代碎屑锆石的发现及其意义. 同济大学学报(自然科学版), 43(6): 924—931.
- 高顺莉, 赵洪, 王建强, 等, 2019. 东海陆架盆地椒江凹陷锆石 U-Pb 定年及意义. 石油实验地质, 41(3): 311—318.
- 何苗, 姜勇, 张恒, 等, 2019. 准噶尔盆地西北缘三叠系重矿物特征及其物源指示意义. 地质论评, 65(2): 464—476.
- 雷闯, 殷世艳, 叶加仁, 等, 2021. 东海盆地椒江凹陷古新统烃源岩地球化学特征及生烃历史. 地球科学, 46(10): 3575—3587.
- 李万友, 马昌前, 刘园园, 等, 2012. 浙江印支期铝质 A型花岗岩的发现及其地质意义. 中国科学(地球科学), 42(2): 164—177.
- 刘欢, 许长海, 申雯龙, 等, 2021. 东海丽水凹陷构造转移带特征及其油气地质意义. 油气地质与采收率, 28(4): 12—22.
- 刘景彦, 陈志勇, 林畅松, 等, 2004. 东海丽水西次凹古新统明月峰组层序: 体系域分析及沉积体系展布. 沉积学报, 22(3): 380—386.
- 刘俊海, 吴志轩, 于水, 等, 2005. 丽水凹陷古新统微量元素地球化学特征及其地质意义. 中国海上油气, 17(1): 8—11.
- 刘俊海, 杨香华, 于水, 等, 2003. 东海盆地丽水凹陷古新统沉积岩的稀土元素地球化学特征. 现代地质, 17(4): 421—427.
- 刘松峰, 李顺, 聂鑫, 等, 2021. 海南岛东南海域碎屑锆石年代学物源示踪及构造指示意义. 地球科学, 46(11): 4084—4096.
- 彭治超, 付星辉, 刘俊超, 等, 2017. 沉积物源分析方法及研究进展. 西安文理学院学报(自然科学版), 20(1): 116—121.
- 邱检生, 肖娥, 胡建, 等, 2008. 福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约. 岩石学报, 24(11): 2468—2484.
- 任俊, 张岳桥, 2021. 闽西武夷山建宁—泰宁地区白垩纪火山—沉积序列: 对华南东部晚中生代构造演化的制约. 地质学报, 95(8): 2411—2435.
- 田豹, 2017. 重矿物物源分析研究进展. 中国锰业, 35(1): 107—109, 115.
- 田杨, 叶加仁, 雷闯, 等, 2016. 东海陆架盆地丽水—椒江凹陷月桂峰组烃源岩发育控制因素及形成模式. 地球科学, 41(9): 1561—1571.
- 王明健, 潘军, 高红芳, 等, 2022. 南海北部—东海南部中生代盆地演化与油气资源潜力. 地学前缘, 29(2): 294—302.
- 王长势, 朱伟林, 陈春峰, 等, 2014. 东海丽水—椒江新生代凹陷基底的岩性及分布. 同济大学学报(自然科学版), 42(4): 636—644.
- 肖爱芳, 黎敦朋, 柳小明, 2012. 福建省紫金山铜金矿田石帽山群下组火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年与白垩纪岩浆活动期次. 大地构造与成矿学, 36(4): 613—623.
- 徐波, 胡碧瑶, 张亚男, 等, 2020. 丽水 36-1 油气田原油轻烃地球化学特征. 重庆科技学院学报(自然科学版), 22(4): 12—18.
- 许苗苗, 魏晓椿, 杨蓉, 等, 2021. 重矿物分析物源示踪方法研究进展. 地球科学进展, 36(2): 154—171.
- 薛德杰, 2019. 光泽—武平断裂带南端晚中生代地质构造演化特征. 福建地质, 38(4): 263—277.
- 姚伯初, 张莉, 韦振权, 等, 2011. 华南东部中生代构造特征及沉积盆地. 海洋地质与第四纪地质, 31(3): 47—60.
- 郑永飞, 吴元保, 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589—1604.
- 钟锴, 朱伟林, 高顺莉, 等, 2018. 东海陆架盆地形成演化及油气成藏关键地质问题. 地球科学, 43(10): 3485—3497.