

胡高伟, 刘显童, 陈杨, 等. 莺歌海盆地黄流组一段沉积物源综合识别[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(6): 62-74.

HU Gaowei, LIU Xiantong, CHEN Yang, et al. Comprehensive identification of sediment source in the First Member of Huangliu Formation in Yinggehai Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(6): 62-74.

莺歌海盆地黄流组一段沉积物源综合识别

胡高伟¹, 刘显童^{2*}, 陈杨¹, 邱隆伟², 李彦丽¹

(1 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海口 570100; 2 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266000)

摘要:通过重矿物直观比对法确定了莺歌海盆地黄流组一段沉积物中各物源区的重矿物特征, 并初步认识了其古母岩特征。研究区周围存在三大主要物源区, 即海南岛、越南北部(红河)及越南中部。结果表明, 越南物源以铁矿物、钛矿等沉积岩型重矿物组合为主; 海南物源以锆石、电气石、金红石等酸性火山岩型重矿物组合为主。基于余弦距离及皮尔森相关系数的谱系聚类结果表明, 莺歌海盆地黄流组一段锆石、电气石、金红石、锐钛矿、白钛矿等矿物受成岩作用影响较小, 为该时期的稳定矿物组合。综合稳定重矿物复杂拓扑网络、地震属性、地震剖面及锆石年龄等方法对主导物源区进行划分, 确定了莺歌海盆地东方 13 区及东方 1 区的部分扇体主要受控于越北红河物源, 东方 13 区及东方 29 区的绝大多数扇体主要受越中物源及海南北部物源的双重影响, 乐东区受控于海南南部物源。基于海南南部物源的古物源分布模式, 建立了重矿物-地震特征-锆石年代学的物源识别方法。

关键词:物源识别; 重矿物指数; 拓扑复杂网络; 地震属性; 莺歌海盆地

中图分类号: P736; P512.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.071

0 引言

前人针对沉积古物源的研究提出了诸多方法, 既包括有一百多年应用历史且不断推陈出新的重矿物指示方法^[1-3], 也包括近二三十年来随着分析测试技术进步提出的以 U-Pb 测年为代表的年代指示方法^[4-5]; 既包括常用于浅层沉积或现代沉积物源识别的地球化学元素指示方法^[6-7], 也包括通过深部地震反射特征或平面地震属性对物源识别的地震指示方法等^[8]。然而, 单一的古物源研究方法常受到诸多制约, 深层样品难以取得, 不能做到样品对盆地的全面覆盖, 导致古物源识别中各类指数在平面上的变化难以连续呈现; 取得的样品常受到强烈成岩作用的影响, 其矿物成分、化学组分早已与物质

沉积时产生差异, 难以直观指示物质来源, 且导致其数据分布模式复杂, 限制多元统计中各类度量方法的使用; 因此, 对已有数据进行充分利用, 需通过多种方法、多个维度识别结果的综合比对及相互制约来提高古物源识别的准确度。莺歌海盆地作为典型的多物源汇聚型盆地, 表现出复杂的物源特征, 其黄流组一段埋深最深可达 3 900 m 左右^[9-10], 成岩作用强烈, 且盆地经历多期构造运动, 形成大量底辟构造, 既为天然气运移提供了良好的通道, 也导致了盆内扇体受到强烈的热液改造作用, 对其矿物含量产生了极大的影响^[11-12]。本文以莺歌海盆地黄流组一段为例, 通过重矿物-地震-锆石测年的综合方法, 对其物源进行识别, 以期能提高对其古物源的认识程度。

1 研究区概况

莺歌海盆地是位于海南岛与越南之间的走滑-伸展型盆地, 其形成受控于红河断裂与南海扩张的双重影响, 整体呈 NE—SW 向展布^[13-15], 盆地整体可划分为河内拗陷带、临高转换带、中央拗陷带、莺东斜坡带、莺西斜坡带 5 个构造单元^[16](图 1),

收稿日期: 2023-03-23

资助项目: 中海石油(中国)有限公司“万亿大气区”重大综合科研项目“南海西部近海大中型天然气田勘探潜力与突破方向”(CCL2021HNFN0203)

第一作者: 胡高伟(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事石油勘探与地球物理方面的研究工作. E-mail: hujian1028@126.com

* 通讯作者: 刘显童(1998—), 男, 在读硕士, 主要从事矿物岩石学、地球化学方面的研究工作. E-mail: 1029589822@qq.com

自新生代以来, 莺歌海盆地先后经历左旋走滑—热沉降—右旋走滑三大成盆演化阶段, 上中新统黄流组时期(10.5~5.5 Ma)盆地处于走滑停止后的热沉

降阶段^[17-20], 该时期盆地内部主要发育滨海相的三角洲沉积及浅海相的海底扇沉积、重力流水道沉积等沉积相类型^[21-24]。

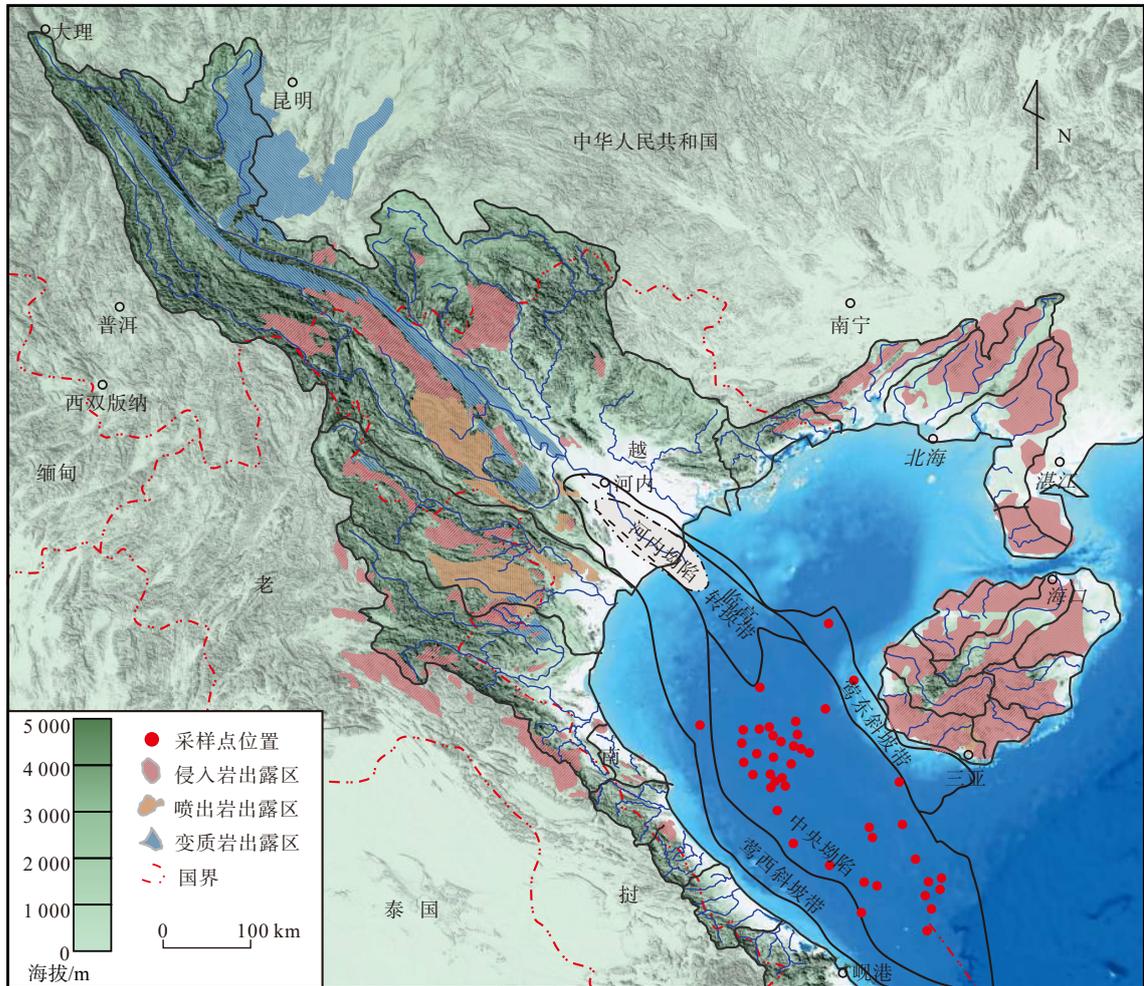


图 1 研究区位置及周边物源区地层出露特征

Fig.1 The study area and types of rock exposed in surrounding provenances

盆地周缘主要存在三大物源区, 分别为海南岛、越南北部红河及越南中部。海南岛物源区主要出露大面积的侵入岩, 包括新生代形成的基性侵入岩, 以及中元古代和前寒武纪时期形成的中-酸性侵入岩^[25], 现今出露的侵入岩中占比最多的为海西-印支期形成的花岗岩^[26]。海南岛西部主要入海河流从北到南主要有珠碧江、昌化江、北黎河、通天河、感恩河、望楼河和宁远河。红河作为越南第一大河流, 其对莺歌海盆地的陆源碎屑供应起到了至关重要的作用, 因此常将红河物源区作为越南北部红河及其流域物源区的总称^[27]。越北红河物源区现今出露的岩石类型复杂, 沉积岩、岩浆岩、变质岩均有出露, 但总体上以变质岩为主, 主要包括片岩、片麻岩和大理岩等岩石类型。越南中部主要入海河流

包括蓝江、里河、秋盆河和归仁河^[28], 其中, 蓝江和里河发源于长山造山带, 秋盆河和归仁河发源于昆嵩地体中, 本文中把这些河流流经地区统称为越中物源区, 该区出露岩石主要以岩浆岩、碎屑沉积岩为主, 昆嵩地体附近出露少量前寒武系形成的变质岩^[29]。

2 样品与数据

共收集莺歌海盆地 43 口井的 388 个样品点的数据(图 1), 采样点覆盖全盆各个沉积相带。由于海上钻井取芯成本较高, 故所取样品多为黄流组一段砂岩岩屑样品, 岩芯样品较少。所取样品由中海油实验中心湛江实验中心进行分析测试, 通过对岩

石破碎、酸洗、冲洗、烘干后,筛选粒度在 0.063~0.25 mm 的细砂岩样品,通过密度瓶对重矿物进行分离后用天平统计重矿质量并计算其百分含量。研究区内的重矿物包括锆石、电气石、金红石、石榴石、锐钛矿、赤铁矿、褐铁矿、重晶石等,其中主要重矿物为锆石(0.3%~64.2%)、电气石(0.3%~

20.2%)、石榴石(0.2%~37.7%)、赤(褐)铁矿(0.9%~99.8%)、白钛矿(0.2%~92.9%)、锐钛矿(0.1%~19.4%)、重晶石(0.2%~95.6%)、黄铁矿(0.2%~89.9%);其次为角闪石(0.1%~8.9%)、榍石(0.2%~9.5%)、十字石(0.0%~9.5%)、碳酸盐矿物(0.2%~9.5%)等(表 1)。

表 1 黄流组一段取芯井重矿物含量范围

Table 1 Content range of heavy minerals in coring wells in the First Member of Huangliu Formation

	锆石	电气石	石榴石	帘石类	磁铁矿	赤褐铁矿	白钛矿	绿泥石	角闪石	榍石	金红石	十字石
最大值/%	64.2	20.2	37.7	3.2	38.7	99.8	92.9	3.2	8.9	9.5	6.7	9.5
最小值/%	0.3	0.3	0.2	0	0	0.9	0.2	0	0.1	0.2	0.2	0
	板钛矿	辉石	红柱石	磷灰石	独居石	硬石膏	重晶石	碳酸盐	闪锌矿	海绿石	锐钛矿	黄铁矿
最大值/%	1.8	38.1	0.7	3.5	3.2	4.1	95.6	9.1	1.2	1.3	19.4	89.9
最小值/%	0	0.1	0.2	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0	0.3	0.2
	蓝锥矿	刚玉	橄榄石	黑云母	萤石	硬绿泥石	蓝晶石	铜矿物	未定矿	尖晶石	富铝红柱石	霓辉石
最大值/%	0.2	8.5	0.8	3.2	0.4	3	2.7	0.6	0.3	3.5	1.4	11.2
最小值/%	0	0.2	0	0.4	0	0	0	0	0	0.2	0	0

3 重矿物直接比对法识别盆外古母岩特征

重矿物直接比对法可以通过比对矿物组合上的差异大体上对碎屑沉积物源区的构造背景、岩石圈层进行识别^[30]。GARZANTI 等^[31]根据重矿物组合类型的差异,划分出大洋岩石圈、岩浆弧地壳和大陆岩石圈 3 个碎屑沉积物的基本来源;BOGGS 等^[32]根据重矿物组合特征划分出可能的母岩岩性(表 2)。

通过对莺歌海盆地黄流组一段河流三角洲沉积物中的重矿物组合特征进行研究(部分钻井数据缺失采用相邻层段或近似同源的井中的重矿物数据),确定了该时期各河流向盆地内部供源的主要岩石类型及重矿物特征。越南北部红河物源重矿物以含有较高的沉积型铁矿物和钛矿物为主要特

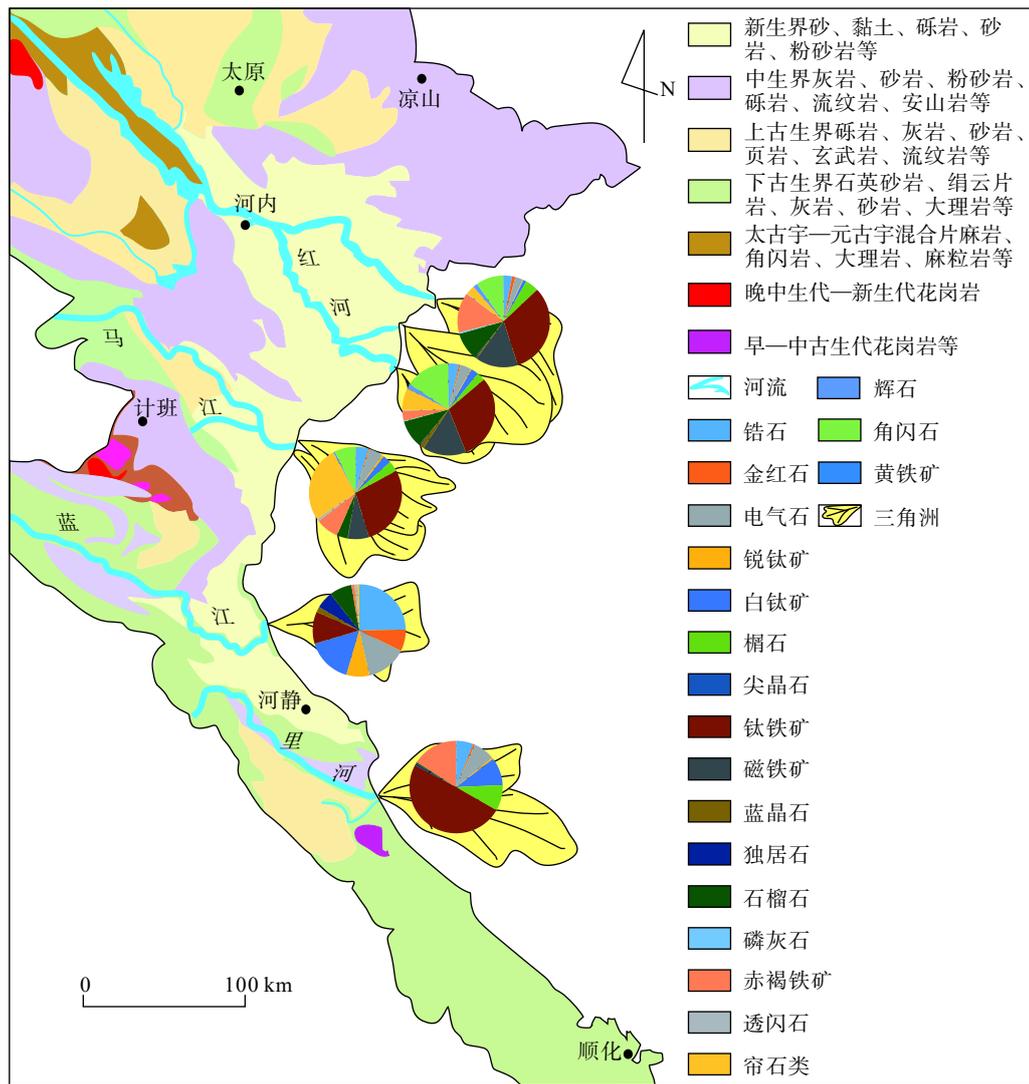
征,亦含有一定量的石榴石、蓝晶石、十字石、帘石类矿物的变质矿物组合,及少量的橄榄石、辉石的基性火山岩矿物组合;其中,极少量的橄榄石、萤石、铜矿物为越北红河物源特有的重矿物类型。越中物源中,马江、蓝江、里河所携带的重矿物均与红河物源有一定的相似性,均以高铁矿物、钛矿物、金红石、电气石、锆石的沉积型重矿物组合为主要特征,混杂少量的火山岩及变质岩重矿物组合,但是其沉积重矿物组合占比相较于红河物源更高,变质岩重矿物组合占比更低,其火山岩重矿物组合也有向酸性成分过渡的趋势(图 2)。

海南岛北部的朱碧江、昌化江物源及海南岛中部的北黎河、通天河、感恩河物源均含有较高的锆石、电气石、金红石、角闪石等酸性火山岩型重矿物组合,及部分铁矿、重晶石、白钛石、金红石、电气石等沉积岩型重矿物组合和少量蓝晶石、十字石、石榴石等变质岩型重矿物组合;海南岛南部望楼河、

表 2 不同母岩重矿物组合特征^[32]

Table 2 Characteristics of heavy mineral assemblies from different parent rocks^[32]

重矿物	母岩
磷灰石、黑云母、板钛矿、角闪石、独居石、白云母、金红石、榍石、电气石、锆石	酸性火山岩
锡石、蓝线石、萤石、石榴石、独居石、白云母、黄玉、电气石、黑钨矿、磷钼矿	花岗伟晶岩
辉石、铬铁矿、透辉石、紫苏辉石、钛铁矿、磁铁矿、橄榄石、尖晶石	基性火山岩
红柱石、硅镁石、刚玉、石榴石、金云母、十字石、黄玉、浮山石、硅灰石、黝帘石	接触变质岩
红柱石、硬绿泥石、绿帘石、石榴石、蓝闪石、蓝晶石、硅线石、十字石、榍石、黝帘石-斜黝帘石	热动力变质岩
重晶石、铁矿、白钛石、金红石、电气石、锆石	再旋回沉积岩



据参考文献 [28] 修改

图 2 越南主要出露岩石类型及黄流组一段重矿物类型

Fig.2 Main rock types in Vietnam and heavy mineral assembly of deltas in the First Member of Huangliu Formation

宁远河物源相较海南岛北部物源, 仍以岩浆岩重矿物组合为主导, 其次为沉积岩重矿物组合, 但其变质岩重矿物组合含量更少(图 3)。

整体而言, 盆地周缘现今出露的地层与通过重矿物组合识别出的黄流组一段时期剥蚀掉为盆地供源的古母岩有一定程度的相似性, 均表现出越北、越中以沉积岩为主, 海南以岩浆岩为主的特征, 这也与自中新世至今盆地持续稳定的热沉降, 盆地周缘构造活动较少的认识相符。

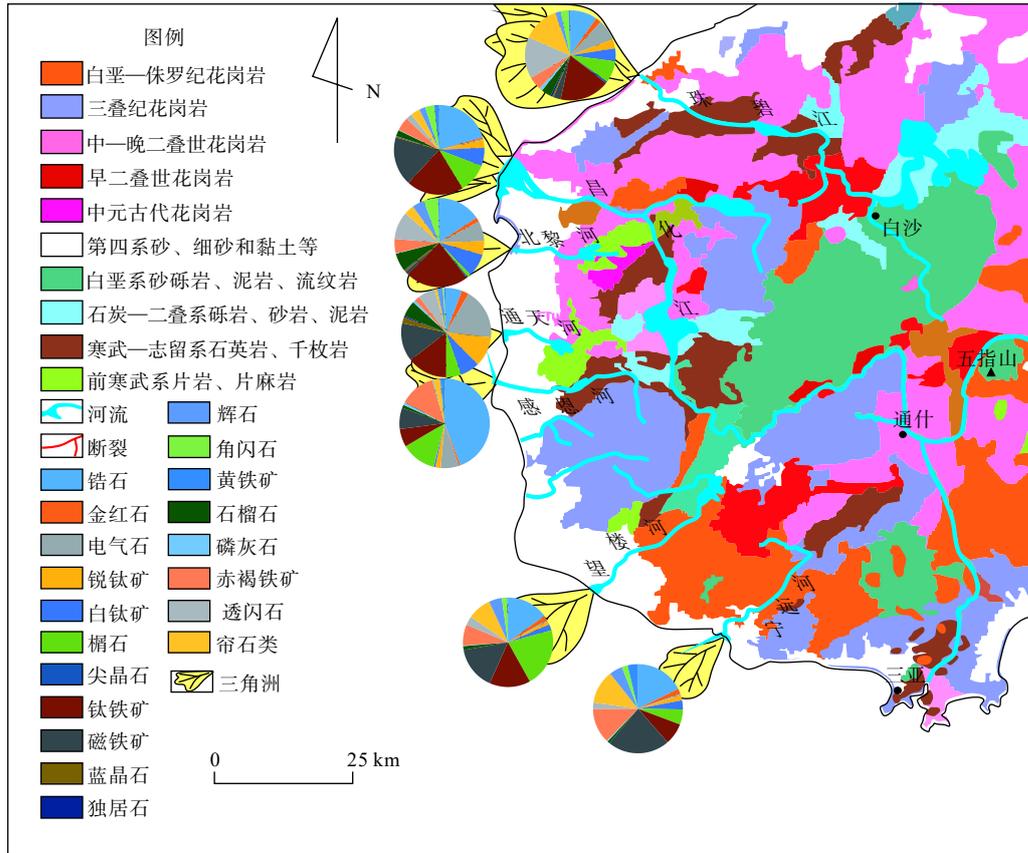
4 盆内主导物源区划分

4.1 重矿物指数对盆内主导物源区的初步划分

直接对重矿物组合的特征进行比对, 可以在一

定程度上识别盆地边部三角洲上的物源特征, 然而在对盆地中心多源海底扇主导物源的判别上较为乏力, 可通过重矿物指数等方法对重矿物的物源响应进行进一步挖掘。前人提出多种重矿物指数对物源进行识别, MORTON 等^[33] 提出以单一重矿物在与其水力学条件、化学稳定性相近的重矿物中的占比来指示物源, 减弱分选及成岩作用对沉积物中重矿物的影响, 虽然单一重矿物可能在特定环境下受风化、次生加大等作用的影响不能明确指示物源但其仍有一定的指示意义; GARZANTI 等^[34] 提出了一系列多矿物占比指标, 既可以判断物源也可以在一定程度上判断水力分选和成岩作用对重矿物的影响。

结合莺歌海盆地黄流组一段沉积物的重矿物特征, 选取 7 个重矿物指数对其物源进行识别, 具



据文献 [28] 修改

图3 海南主要出露岩石类型及黄流组一段重矿物类型

Fig.3 Main rock types and heavy mineral assembly of deltas in the First Member of Huangliu Formation in Hainan

体为 GZi(石榴子石指数)、RZi(TiO₂ 矿物指数)、RuZi(金红石指数)、ZTR(极稳定矿物指数)、POS(基性岩物源指数)、%ZR(锆石金红石指数)、%Op(不透明矿物指数),其定义如表3所示。

通过 Surfer 软件对计算后的重矿物指数进行插值并形成平面等值线图,对比多种插值方法后发现克里格插值法所形成的平面图与盆地周围河流分布较为吻合,所形成的平面图可分为两大类:①对越北红河物源识别较为敏感的指数(图4b),如 GZi、POS、RZi、RuZi、%Op 指数,所形成平面图在盆地北部形成高值区,其中, GZi、POS、RuZi 指数

在平面图中仅在红河物源影响范围形成高值区,反映了越北红河物源高石榴子石,高金红石、高基性组分、低锆石的特征;RZi 指数在越北、越中、海南岛中部物源区均形成高值区,反映了锐钛矿、板钛矿、金红石等 TiO₂ 矿物及铜矿物、铁矿物的主要来源;②对越北红河物源识别不明显,但对越南中南部及海南岛物源有较好识别效果的重矿物指数(图4a),如 ZTR、%ZR 指数。两类指数的结论并不违和,只是针对多源盆地各物源特征不同指示效果有所差异。

采用传统重矿物分析的直接对比法和重矿物

表3 不同重矿物指数定义^[33-34]

Table 3 Definition of different heavy mineral indices^[33-34]

指数名称	涉及矿物	指数定义
GZi	石榴子石、锆石	100×石榴子石/(石榴子石+锆石)
RZi	TiO ₂ 矿物、锆石	100×TiO ₂ 矿物/(TiO ₂ 矿物+锆石)
RuZi	金红石、锆石	100×金红石/(金红石+锆石)
ZTR	锆石、电气石、金红石	100×(锆石+电气石+金红石)/透明重矿物
POS	辉石、橄榄石、尖晶石	100×(辉石+橄榄石+尖晶石)/透明重矿物
%ZR	锆石、金红石、电气石	100×(锆石+金红石)/(锆石+金红石+电气石)
%Op	所有重矿物	100×不透明重矿物/总的重矿物

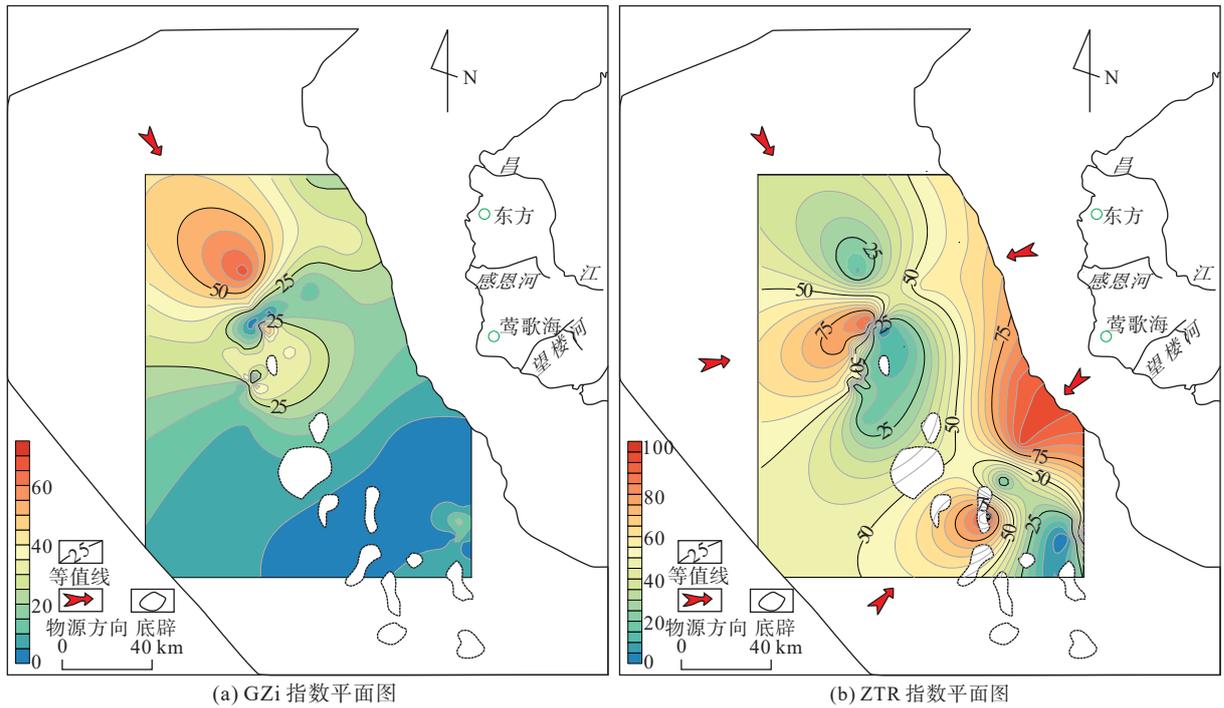


图 4 不同重矿物指数平面等值线图

Fig.4 Contour lines of different heavy mineral indices

指数法在一定程度上可以识别各物源的重矿物组合特征及各物源影响范围, 受限于主观差异对重矿物组合识别的影响及采样点数量和插值方法等因素, 传统重矿物物源识别方法虽有一定的参考价值, 但其对矿物组合、物源范围、主导物源识别的准确度仍需其他物源识别方法的佐证。重矿物的稳定性及重矿物组合的划分既取决于矿物本身的结构特征, 也取决于盆地内部对应时期的沉积环境和物质来源特征, 针对不同盆地、不同时期重矿物稳定性及矿物组合特征上应存在一定差异, 不能盲目参照前人对其他盆地所做出的重矿物组合及稳定重矿物划分方式, 因此需通过多元统计方法、地震特征和年龄特征等方法对稳定重矿物组合特征、物源影响范围及各扇体主导物源进行进一步识别及验证。

4.2 多元统计方法对盆内主导物源区的划分

4.2.1 关于度量的讨论

多元统计方法可使用多种距离衡量样本与变量间的相关关系, 然而在针对不同对象、不同目标时所采用的度量也有所差异, 在地质中常用的距离主要有欧式距离、马氏距离、余弦距离、皮尔森相关系数等。

欧式距离 (Euclidean Distance) 代表多维空间中 2 点间的绝对距离, 但其在计算过程中将样本中

不同量纲下的属性一视同仁的进行处理, 忽略了总体变异对距离的影响。然而, 重矿物中一些含量较低的矿物反而对源区有着较好的指示作用, 这也导致不能将欧式距离作为衡量各样本重矿物相似性的度量。

马氏距离 (Mahalanobis Distance) 由统计学家 MAHALANOBIS^[35] 提出。与欧式距离相比, 马氏距离消除了欧式距离中各变量相关性及其量纲的影响, 放大了微小变量的作用, 但其值的大小常受异点的影响, 剔除异点又会导致数据信息的缺失, 故本文中亦不采用马氏距离进行相似度的计算^[36]。

余弦距离 (Cosine Distance) 为 1 减去余弦相似度, 余弦相似度为两数据向量的点积与其模长之积的比, 多维空间中 2 个变量 $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_p)^T$, $\vec{y} = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_p)^T$, 其余弦相似度为^[37]:

$$\cos\theta = \frac{\vec{x} \cdot \vec{y}}{\|\vec{x}\| \cdot \|\vec{y}\|} = \frac{\sum_{i=1}^p x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (x_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^p (y_i)^2}} \quad (1)$$

$$D_c = 1 - \cos\theta \quad (2)$$

D_c 相较于欧式距离, 余弦距离不再关注数值上的绝对差异, 而是侧重于衡量两样本间演化趋势的相似程度, 可以较好地消除变量本身数值大小对距离计算的影响, 在本文中将余弦距离应用为衡量物

源相似程度及矿物在迁移演化过程中行为的相似程度的指标之一。

皮尔森相关系数(Pearson correlation coefficient)其几何意义与余弦相似度相似,在计算余弦相似度前对数据进行中心化处理得到皮尔森相关系数,对多维空间中符合正态分布的两变量 $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_p)^T$, $\vec{y} = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_p)^T$, 其相关系数为^[38]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^p (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^p (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

相较于余弦相似度,皮尔森相关系数计算时,首先要求样本数据满足多元正态分布,否则异点数据会对其计算结果产生较大影响。其次,皮尔森相关系数只对线性相关较为敏感,但其仍有较高的实际应用价值,本文以皮尔森相关系数为另一参考度量,对物源相似程度进行衡量。

4.2.2 数据分布特征

对数据进行正态分布检验,发现所采集的重矿物数据大多数不符合正态分布,而多属于双峰、多峰分布或多重长尾分布(图5)。在地质多元统计中

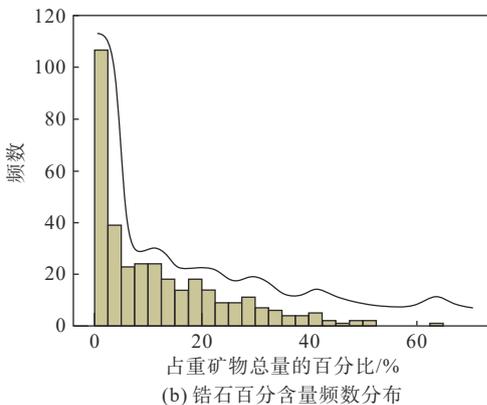
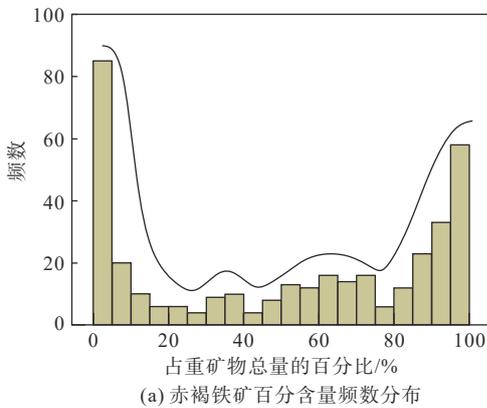


图5 典型矿物百分含量频数图

Fig.5 Frequency of percentage content of typical minerals

常认为单一地质作用下所产出的数据应符合正态分布或近似符合正态分布,现有数据的分布特征表明,盆地内部重矿物分布受到多期或多种地质作用的影响,地质成因较为复杂^[39](图6)。

数据复杂的分布形态也限制了部分度量方式的使用,导致部分度量在使用时可能因数据形态使计算结果失真,故而采用余弦距离与皮尔森相关系数两种距离相互佐证,以确保后续较好的聚类效果。

4.2.3 稳定矿物组合

莺歌海盆地黄流组一段沉积埋深较深,且盆地内部发育大量底辟构造,为水蒸气、CO₂ 气体、氦气、及油气运移提供了良好的运移通道,也使得盆地中心部位成岩作用复杂,流体对矿物有强烈的改造作用。为排除成岩作用对重矿物改造的影响,利用余弦距离与皮尔森相关系数,通过 SPSS 软件分别对盆地内所有重矿物数据和边部受成岩作用、热液流体影响较弱的井中的重矿物数据进行谱系聚类(图7),剔除在2次聚类中差异较大的重矿物,即受成岩作用影响较大的重矿物,研究各重矿物在迁移演化过程中行为的相似性,划分出专适于莺歌海盆地受后期改造作用影响较弱、只随物质迁移而改变

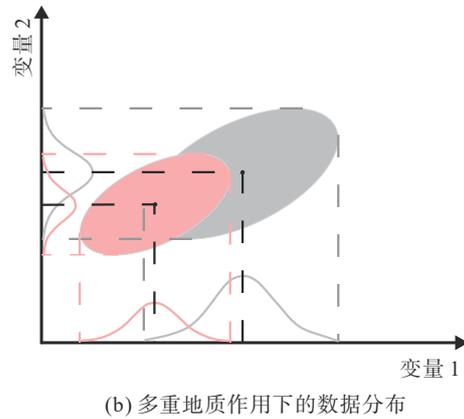
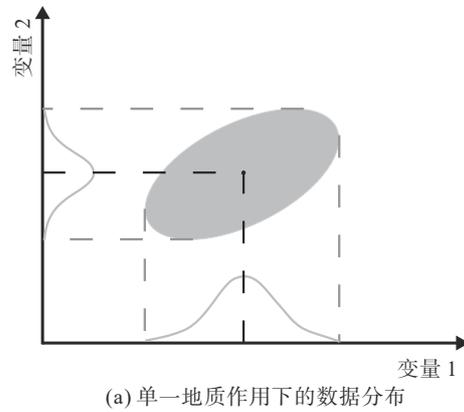
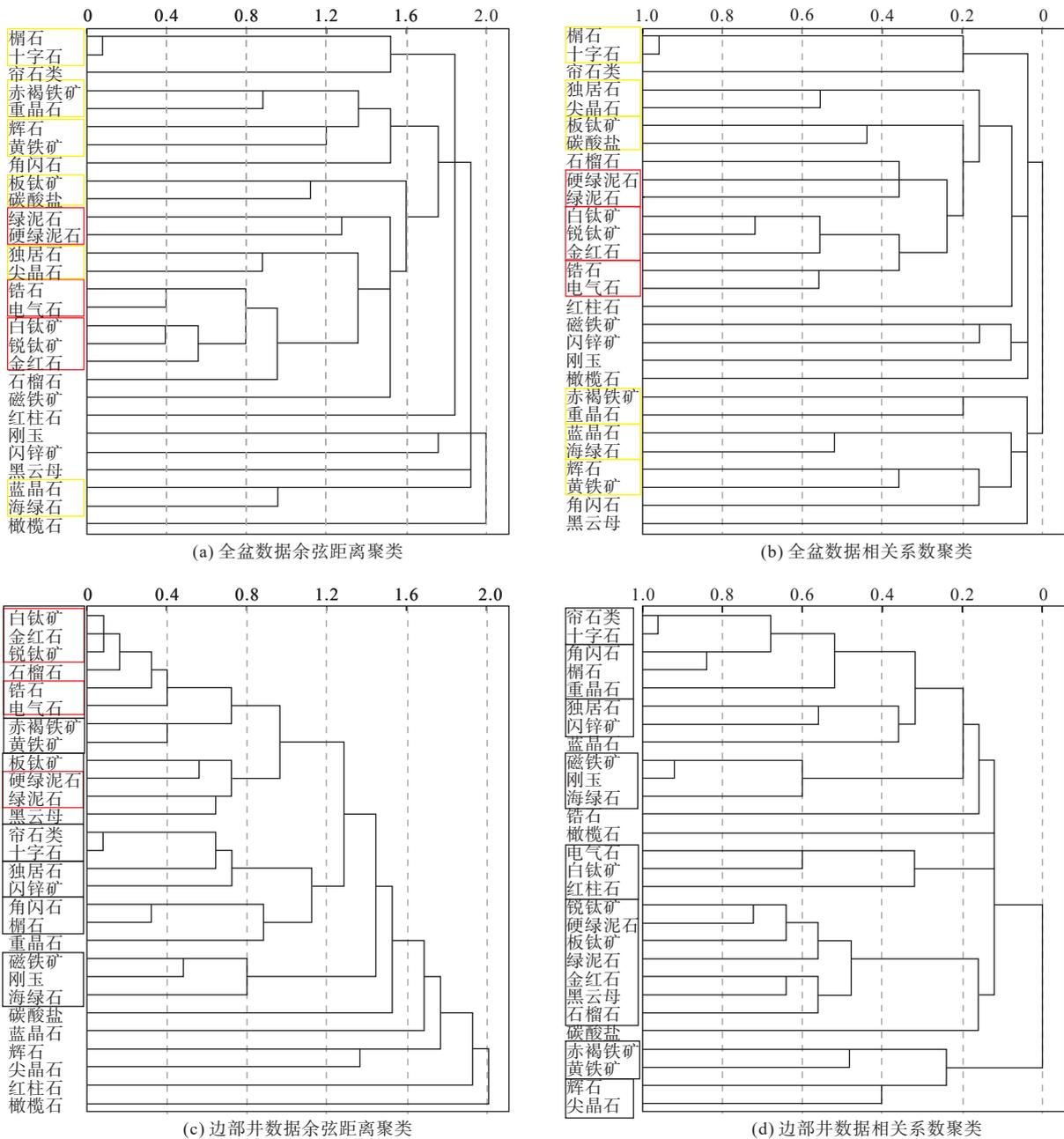


图6 数据分布模式

Fig.6 Data distribution pattern



红色框线为在边部井聚类及全盆聚类中结果相同的矿物组合; 黄色框线为在全盆聚类中出现但在边部井聚类中未出现的矿物组合; 黑色框线为只在边部井中出现的重矿物组合。

图 7 重矿物聚类谱系

Fig.7 Hierarchical clustering of heavy minerals

的稳定重矿物组合。

横向对比相同数据不同度量下的聚类结果可以看出, 对全盆的大量数据进行聚类分析时, 余弦距离聚类与皮尔森相关系数聚类有极大的相似性, 但在选取盆地边部井, 减少数据量后余弦距离聚类仍能重现部分全盆的聚类组合, 但相关系数聚类则重现性较差, 体现了数据量对皮尔森相关系数计算结果的影响。通过对比全盆聚类结果和边部井聚类结果, 锆石、电气石、金红石、白钛矿、锐钛矿、

绿泥石、硬绿泥石在两次聚类中行为相似, 认为该矿物组合为莺歌海盆地黄流组一段沉积时期受成岩作用、热液流体改造作用影响较小的稳定重矿物组合。

4.2.4 拓扑复杂网络对各井主导物源的识别

复杂网络指具有自组织、自相似、存在吸引子、小世界和无标度的部分或全部特性的大系统。它以节点、边和拓扑矩阵为特征^[40]。对拓扑复杂网络的研究主要集中在发现关键节点、发现社区和链接

路径的预测 3 个方面^[41];社区结构是揭示网络复杂结构的重要特征,通常情况下同一社区内节点之间的连接相对紧密,而不同社区之间节点之间的联系相对稀疏^[42]。通过对社区结构的研究能够对复杂网络中的节点进行合理的划分^[43],本文主要应用复杂网络对社区单元进行划分,并对盆地内各井的主导物源进行识别。

利用聚类分析识别出的受成岩作用及热液流体影响较小的稳定重矿物数据,计算各样品点的相关系数及余弦距离,以皮尔森相关系数(图 8)、余弦距离为复杂网络边的权重,以样品点为节点,通过 Gephi 软件构建多模块化解析度、多连通度下的拓扑复杂网络,对盆地内各扇体的主导物源进行研究。由于余弦距离越大相关性越差,故而实际取余弦相似度为复杂网络边的权重(图 9)。通过对比发现,当模块化解析度为 0.7 时,两类度量下的模块化结果相似性较高。

4.3 地震数据及锆石年龄的对比约束

提取莺歌海盆地弧长、瞬时频率、均方根等多种地震属性,并进行标准化处理,统计钻井砂体含量,通过井旁地震属性与砂体含量的相关系数确定对砂体含量敏感的属性组合,利用多种对砂体含量敏感的属性进行加权叠加对全盆砂体含量进行预测(图 10a)。在此基础上,绘制沉积相图的(图 10b),结合拓扑复杂网络中各井的主导物源划分,落实盆地内各物源的影响范围,并结合地震剖面上楔状前积特征对所取得的结果进行验证(图 11、12)。

结合重矿物指数平面图(图 4)及各扇体在盆地

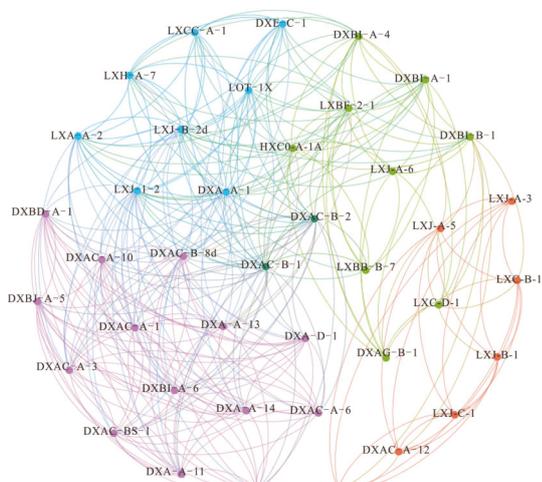


图 8 稳定重矿物相关系数拓扑复杂网络图

Fig.8 Topological complex network of correlation coefficients of stable heavy minerals

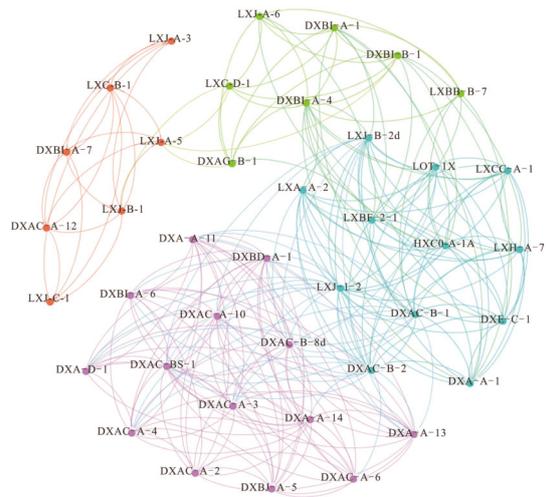


图 9 稳定重矿物余弦距离拓扑复杂网络图

Fig.9 Topological complex network of cosine distance of stable heavy minerals

内部的位置(图 10),对拓扑复杂网络的社区内部结构进行分析,紫色社区中的井受到越南中部马江、蓝江,越南北部红河,海南岛北部昌化江、北黎河、感恩河的影响,且其主导物源为越南北部的红河物源,影响范围主要为东方 1 区、东方 13 区和东方 29 区的部分扇体;橙色社区以海南岛南部的望楼河、宁远河物源为主导,主要影响了乐东 10 区、乐东 3 区的部分扇体;蓝色社区和绿色社区均表现为东部海南岛物源与越南中部物源混合的特征,其受越北红河物源影响较小,蓝色社区更多受到海南物源的影响,绿色社区更多受到越南中部物源的影响。对社区间的结构分析发现,紫色社区所代表的越北物源与橙色社区所代表的海南岛中部、南部物源之间连通程度不高,说明越北物源的影响范围有限,未能达到海南岛中部、南部物源的影响区域,反观紫色社区与蓝色社区、蓝色社区与绿色社区间均有较高的连通度,且有大量处于两社区边缘的样品点,对应盆地中也大量存在处于北部红河物源与越中物源交汇、越中物源与海南物源交汇的扇体。

锆石测年数据能够较为精确地确定物质来源,但所需样品量较大,对深层样品采样测试成本较高,难以做到面上的覆盖,故采用已有的锆石测年数据点对上述物源划分进行约束,共收集 7 口井的黄流组一段锆石测年数据(图 13)。通过锆石年龄的对比可以看出,海南岛北部物源主要具有 226~247、412~440、82~100 Ma 的年龄群峰值,例如 HXC0-C-1A 井;越南中部物源主要具有 245~255、410~450 Ma 的年龄群峰值,例如 LOT-1X 井;而盆地中部海底扇上的 DXAC-A-3 井、DXAC-A-2 井、

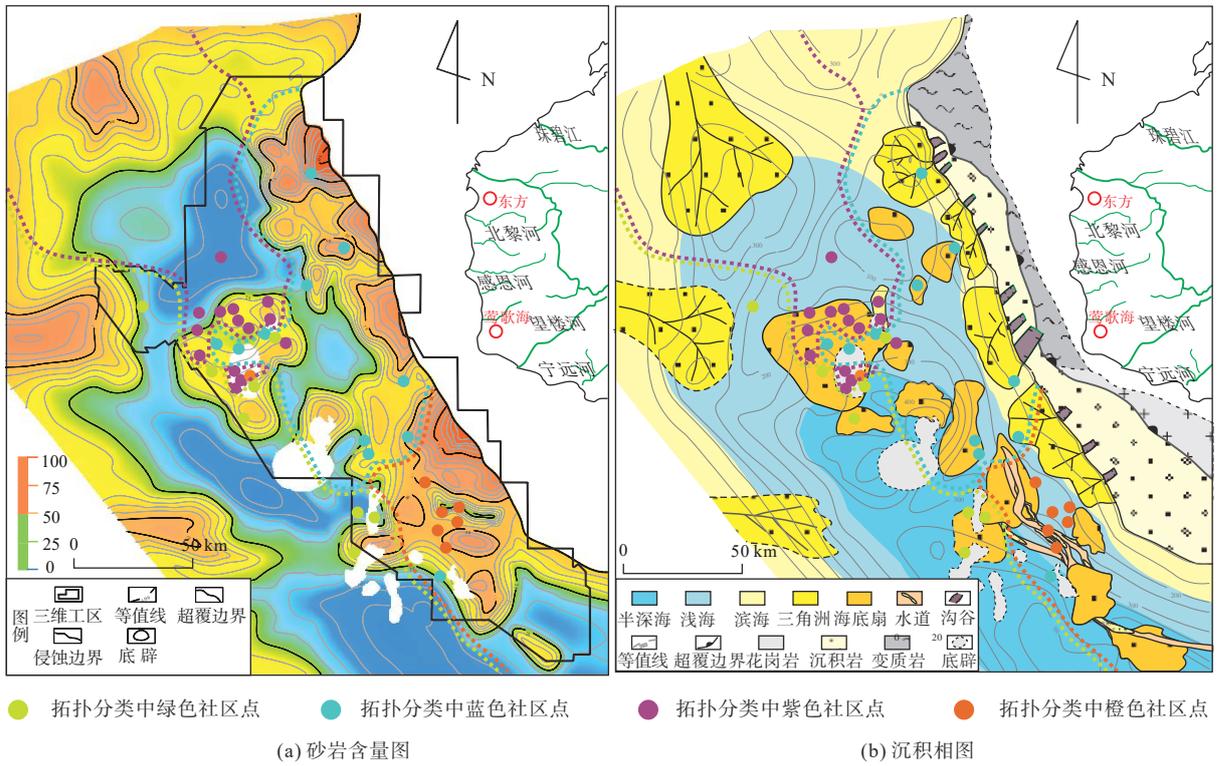


图 10 莺歌海盆地黄流组一段各物源主导范围

Fig.10 Dominant range of each provenance in the First Member of Huangliu Formation in Yinggehai Basin

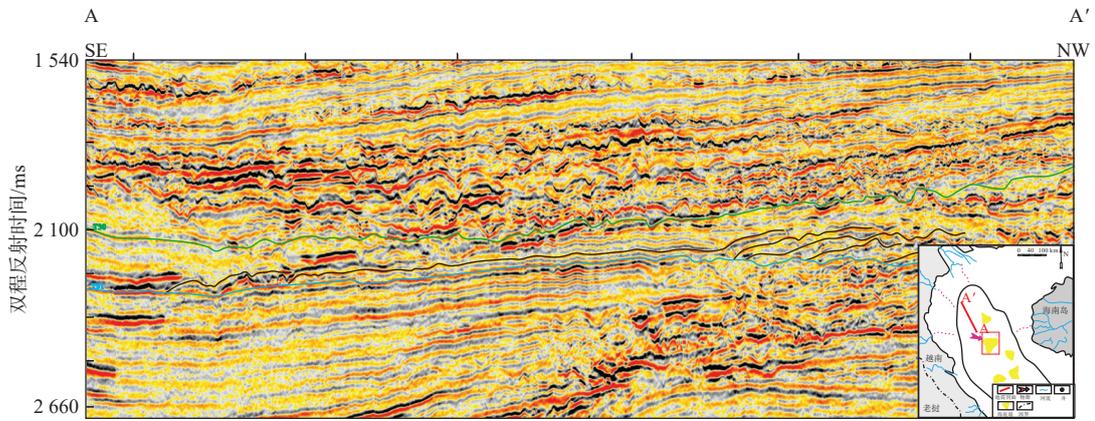


图 11 楔状前积地震剖面

Fig.11 Seismic profile of wedge-shaped progradation

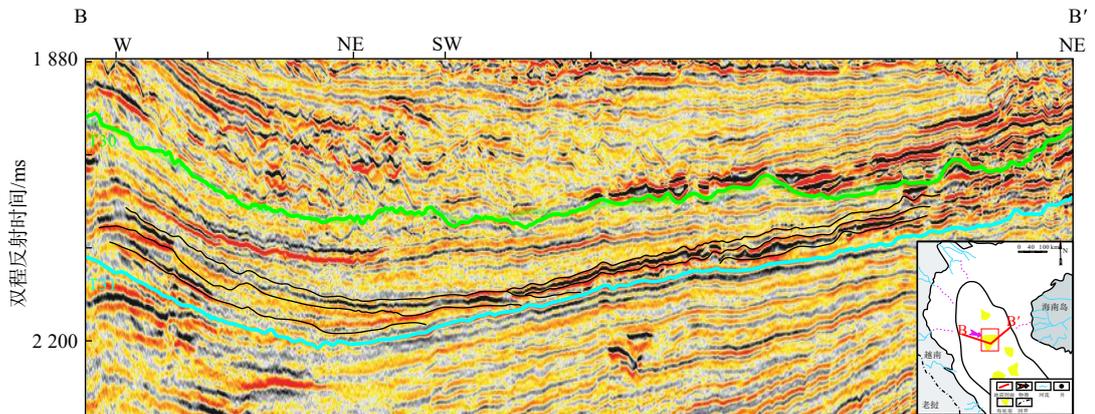


图 12 东西物源交汇地震剖面

Fig.12 Seismic profile of east-west source intersection

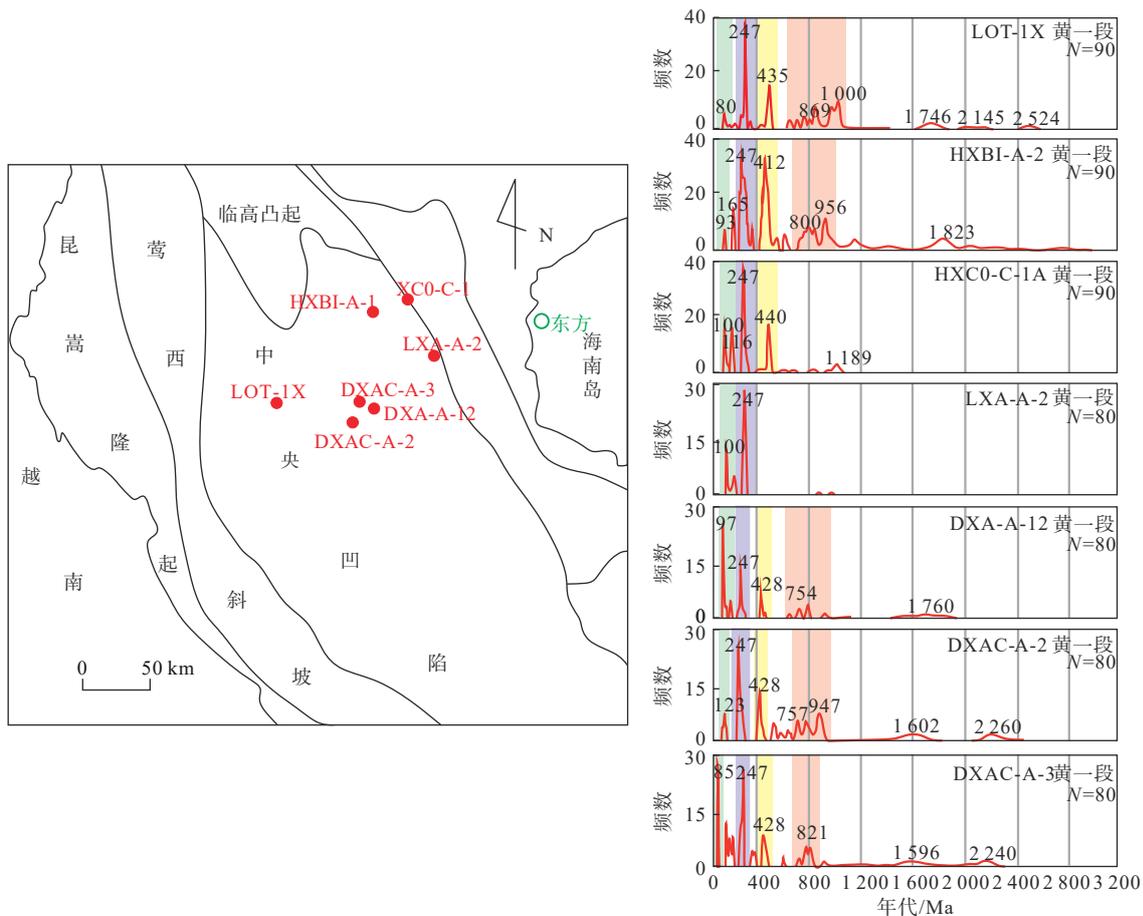


图 13 莺歌海盆地黄流组一段锆石年龄分布特征

Fig.13 Distribution of zircon U-Pb age of the First Member of Huangliu Formation in Yinggehai Basin

DXAC-A-12 井均表现出东西物源交汇的特点, 其中特有的年龄峰值群可能来自红河物源, 这也为前期通过重矿物数据及地震数据划分的主导物源及其影响范围提供了支撑。

5 讨论

本文主要通过重矿物组合特征对盆地周缘黄流组一段时期的古母岩特征进行初步识别, 使用多元统计方法进一步识别出的受成岩作用影响较小的稳定重矿物组合, 通过井中稳定重矿物组合在特定度量下构建的拓扑复杂网络结合地震及锆石年龄特征, 划分盆内主导物源区域, 最终建立由越北沉积岩、少量基性岩浆岩及变质岩母岩主控的紫色物源区; 越中沉积岩主控的绿色物源区; 海南岛北部酸性岩浆岩及少量沉积岩、变质岩母岩主导的蓝绿色物源区及海南岛南部中酸性岩浆岩及少量基性岩浆岩、沉积岩、变质岩母岩主导的橙红色物源区(图 10), 为进一步研究母岩类型对各区域储层物性的影响奠定基础。

虽然使用聚类方法确定的稳定重矿物组合对主导物源区进行划分, 能在一定程度上规避底辟带来的热液流体对重矿物数据的影响, 但从主导物源区的划分结果来看, 绝大多数样品点的识别结果与地震数据、锆石数据所形成的认识相同, 对位于底辟区正上方的几个样品点的识别效果仍不尽理想, 其结果与地震属性及沉积相图相违背, 说明仅通过多元统计方法划分稳定重矿物组合并不能完全排除底辟流体对重矿物数据的影响, 应结合重矿物分析鉴定中镜下重矿物的颗粒特征对适用于莺歌海盆地特定时期、特定成岩环境下的稳定重矿物组合特征进行检验, 排除成岩作用对重矿物数据的干扰, 使得最终确定的稳定重矿物数据的变化仅是受到物质迁移的影响, 来提高对底辟区样品物源识别的准确性。

6 结论

(1) 通过重矿物直观对比法对研究区周缘被剥蚀掉的母岩进行初步识别, 认为黄流组一段沉积时

期越南古母岩成分以碎屑沉积岩为主,海南古母岩成分以酸性岩浆岩为主。通过物源综合识别方法确定了莺歌海盆地各扇体主导物源的影响范围及其特征。其中,越北红河物源主要影响东方1区及东方13区的部分扇体,东方13区、东方29区及乐东区的绝大多数扇体都受到越中物源及海南物源的双重影响,乐东10区、乐东3区的部分扇体主要受到海南南部物源的影响。

(2)通过多元统计方法,确定了莺歌海盆地黄流组一段沉积时期锆石、电气石、金红石、锐钛矿、白钛矿、绿泥石、硬绿泥石等受成岩作用、热液流体改造作用影响较小,为特定时期、特定环境下的稳定重矿物组合。

(3)在地质学中常用的衡量相关性的度量中,余弦距离、皮尔森相关系数更适用于体现物源差异,其中皮尔逊相关系数受数据量影响较大,在数据量充足的情况下,这两种度量均能对物源识别产生较好的效果。

参考文献:

- [1] 田豹,李维锋,祁腾飞,等.重矿物物源分析研究进展[J].中国锰业,2017,35(1):107-109,115.
- [2] ROSER B P, KORSCH R J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major element data[J]. *Chemical Geology*, 1988, 67(1/2): 119-139.
- [3] 徐杰,姜在兴.碎屑岩物源研究进展与展望[J].古地理学报,2019,21(3):379-396.
- [4] EYNATTEN V, DUNKL H I. Assessing the sediment factory: The role of single grain analysis[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 115(1/2): 97-120.
- [5] 谢玉洪,童传新,裴健翔,等.莺歌海盆地黄流组二段碎屑锆石年龄与储层物源分析[J].大地构造与成矿学,2016,40(3):517-530.
- [6] 姜龙杰,孙志鹏,翟世奎,等.琼东南盆地深水钻并岩屑稀土元素地球化学特征及其对沉积物源和环境的指示[J].海洋科学,2018,42(4):89-100.
- [7] 毛光周,刘池洋.地球化学在物源及沉积背景分析中的应用[J].地球科学与环境学报,2011,33(4):337-348.
- [8] 杨仁超,李进步,樊爱萍,等.陆源沉积岩物源分析研究进展与发展趋势[J].沉积学报,2013,31(1):99-107.
- [9] 刘为,邓广君,应明雄,等.莺歌海盆地深层超高温超高压天然气勘探新问题及对策[J].世界地质,2021,40(1):107-114.
- [10] 冯冲,黄志龙,童传新,等.莺歌海盆地地层压力演化特征及其与天然气运聚成藏的关系[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(5):1341-1350.
- [11] 宋瑞有,于俊峰,韩光明,等.莺歌海盆地底辟类型及侵入方式[J].世界地质,2017,36(4):1235-1243.
- [12] 金博,刘震,李绪深.莺歌海盆地天然气底辟优势聚集规律及勘探意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2009,39(2):196-204.
- [13] 张建新,范彩伟,谭建财,等.莺歌海盆地中新世沉积体系演化特征及勘探意义[J].地质科技情报,2019,38(6):51-59.
- [14] 郭令智,钟志洪,王良书,等.莺歌海盆地周边区域构造演化[J].高校地质学报,2001,7(1):1-12.
- [15] 张启明.莺-琼盆地的演化与构造-热体制[J].天然气工业,1999,19(1):36-42.
- [16] 李伟,刘平,艾能平,等.莺歌海盆地乐东地区中深层储层发育特征及成因机理[J].岩性油气藏,2020,32(1):19-26.
- [17] 杨东辉.莺歌海盆地拗陷期构造变形特征及古构造环境探索[D].北京:中国石油大学(北京),2019.
- [18] 向宏发,韩竹军,骞顺民,等.红河断裂带大型右旋走滑运动与伴生构造地貌变形[J].地震地质,2004,26(4):597-610.
- [19] 陈文寄,李齐,汪一鹏.哀牢山-红河左旋走滑剪切带中新世抬升的时间序列[J].地质评论,1996,42(5):385-390.
- [20] LÉLOUP P H, HARRISON T M, RYERSON F, et al. Structural, petrological and thermal evolution of a Tertiary ductile strike-slip shear zone, Diancang Shan, Yunnan[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(B4): 6715-6743.
- [21] 尤丽,范彩伟,吴仕玖,等.莺歌海盆地乐东地区储层碳酸盐胶结物成因机理及与流体活动的关系[J].地质学报,2021,95(2):578-587.
- [22] 王振峰,裴健翔,郝德峰,等.莺-琼盆地中新统大型重力流储集体发育条件、沉积特征及天然气勘探有利方向[J].中国海上油气,2015,27(4):13-21.
- [23] 谢玉洪,范彩伟.莺歌海盆地东方区黄流组储层成因新认识[J].中国海上油气,2010,22(6):355-359,386.
- [24] 谢玉洪,王振峰,解习农,等.莺歌海盆地坡折带特征及其对沉积体系的控制[J].地球科学,2004,29(5):569-574.
- [25] 徐德明,桑隆康,马大铨,等.海南岛中新元古代花岗岩类的成因及其构造意义[J].大地构造与成矿学,2008,32(2):247-256.
- [26] 李孙雄,云平,范渊,等.海南岛琼中地区琼中岩体锆石U-Pb年龄及其地质意义[J].大地构造与成矿学,2005,29(2):227-233,241.
- [27] HOANG L V, WU F Y, CLIFT P D, et al. Evaluating the evolution of the Red River system based on in situ U-Pb dating and Hf isotope analysis of zircons[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2013, 10(11): 1-20.
- [28] 王策.莺歌海盆地上中新统一更新统储层物源识别:来自碎屑锆石U-Pb年代学和地球化学制约[D].广州:中国科学院研究生院(广州地球化学研究所),2016.
- [29] ROGER F, JOLIVET M, LACASSIN R, et al. Long and complex thermal history of the Song chay metamorphic dome (northern Vietnam) by multi-system geochronology[J]. *Tectonophysics*, 2000, 321(4): 449-466.
- [30] 许苗苗,魏晓椿,杨蓉,等.重矿物分析物源示踪方法研究进展[J].地球科学进展,2021,36(2):154-171.
- [31] GARZANTI E, ANDÒ S. Chapter 20 heavy mineral concentration in modern sands: implications for provenance interpretation[J]. *Developments in Sedimentology*, 2007, 58(7): 517-545.

- [32] BOGGS S. Petrology of Sedimentary Rocks [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009: 600.
- [33] MORTON A C, HALLSWORTH C. Identifying provenance specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones[J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(3): 241-256.
- [34] GARZANTI E, ANDÓ S. Heavy minerals for junior wood chucks[J]. *Minerals*, 2019, 9(3): 148.
- [35] MAHALANOBIS P C. On the generalized distance in statistics[J]. *National Institute of Science of India*, 1936, 2: 49-55.
- [36] ROUSSEEUW P J, DRIESSEN K V. A fast algorithm for the minimum covariance determinant estimator[J]. *Technometrics*, 1999, 41(3): 212-223.
- [37] 吴娟. 基于余弦距离的智能拼图算法的应用研究[J]. *信息与电脑(理论版)*, 2022, 34(2): 56-58, 73.
- [38] GIBBONS J D, CHAKRABORTI S. Nonparametric statistical inference [M]. New York: M Dekker, 1992: 122.
- [39] 纪宏金, 时艳香, 陆继龙. 地球化学数据统计分析 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 2013: 22, 142.
- [40] 段忠祥. 复杂网络中个体行为一致性控制研究[J]. *计算机技术与发展*, 2019, 29(9): 102-105, 140.
- [41] PENG N, ZHU X Y, LIU Y S. Complex network dynamics of the topological structure in a geochemical field from the Nanling area in South China[J]. *Nature*, 2020, 10(1): 19826.
- [42] 梁世娇, 柴争义. 基于多目标自适应Memetic算法的复杂网络社区检测[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(3): 262-267, 280.
- [43] 梁世娇, 柴争义. 基于节点亲密度的标签传播重叠社区发现算法[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(1): 58-65.

Comprehensive identification of sediment source in the First Member of Huangliu Formation in Yinggehai Basin

HU Gaowei¹, LIU Xiantong^{2*}, CHEN Yang¹, QIU Longwei², LI Yanli¹

(1 Hainan Branch of CNOOC (China) Ltd., Haikou 570100, China;

2 School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266000, China)

Abstract: The characteristics of heavy mineral assemblages from each sediment provenance of the Huangliu Formation in the Yinggehai Basin were determined in intuitive comparison method, from which the characteristics of ancient parent rocks were clarified. There are three main provenances around the research area, namely Hainan Island, northern Vietnam (Red River), and central Vietnam. Results indicate that the provenances from Vietnam are mainly composed of sedimentary rock typed iron and titanium minerals, and other sedimentary rock typed ones alike, while the Hainan provenance is mainly composed of acidic volcanic rock typed heavy mineral assemblages including zircon, tourmaline, and rutile. The spectral clustering results based on cosine distance and Pearson correlation coefficient show that zircon, tourmaline, rutile, anatase, and perovskite in the Huangliu Formation are less affected by diagenesis and thus are stable minerals. The dominant source areas were divided using complex topological networks of stable heavy minerals, seismic attributes, seismic profiles, and zircon ages. It was determined that some fan bodies in the Dongfang 13 and 1 areas of the Yinggehai Basin were controlled mostly by the northern Vietnam (Red River) provenance, while the vast majority of fans in the Dongfang 13 and 29 areas were affected jointly by the central Vietnam and northern Hainan provenances. The Ledong area was controlled by the southern Hainan source. Therefore, a comprehensive method to determine provenance was established combining heavy mineral assemblage, seismic attribute, and zircon chronology.

Key words: source identification; heavy mineral index; topological complex network; seismic attribute; Yinggehai Basin