单玄龙,王志豪,卫哲,等.珠江口盆地白云凹陷始新统物源体系展布特征.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):1896-1911.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240238.
Shan Xuanlong, Wang Zhihao, Wei Zhe, et al. Eocene Provenance System Distribution in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(6): 1896-1911.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240238.

珠江口盆地白云凹陷始新统物源体系展布特征

单玄龙[1],王志豪[1],卫 哲[2,3],张朋霖[1],郝国丽[1],闫 博[1]

1.吉林大学地球科学学院,长春 130061
2.中海石油深海开发有限公司,广东 深圳 518054
3.中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东 深圳 518054

摘要:珠江口盆地白云凹陷是南海北部陆缘主要的油气产区之一,因其广阔的油气远景而受到了国内外学者的广泛关注;然而目前对始新统沉积的源区构造背景、源岩成分、古水系及古地貌特征有待进一步研究,坳陷期—断坳转换期物源体系的演化仍不甚清晰。本文通过岩石矿物学分析、稀土元素特征研究及三维地震数据体解析等手段,系统揭示了白云凹陷始新统古地貌演化及物源展布特征。结果表明:文昌期、恩平期源区构造背景均具有再旋回造山带属性,而恩平组沉积同时受到了混合造山带及稳定陆块源区的制约,显示了断坳转换期混源的特征。此外,金红石/石榴石等深成岩矿物比重在恩平组较高,可能指示了源区强烈的构造变质作用。稀土元素特征显示白云凹陷始新统源岩与花岗岩的配分模式相似。坳陷期—断坳转换期古水系由收敛至发散,整体呈顺时针摆动。物源供给总体呈现盆内轴向供给—北部缓坡供给—盆外长轴供给的转换特征,湖盆特征也呈现出小盆浅湖—大盆深湖—宽缓湖盆—浅水广盆的特征。

关键词:珠江口盆地;白云凹陷;稀土元素;古水系;古地貌;物源体系
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240238 **中图分类号**:P618.13 **文献标志码**:A

Eocene Provenance System Distribution in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

Shan Xuanlong[1], Wang Zhihao[1], Wei Zhe[2,3], Zhang Penglin[1], Hao Guoli[1], Yan Bo[1]

1. *College of Earth Science, Jilin University, Changchun* 130061, *China*
2. *CNOOC Deepwater Development Limited, Shenzhen* 518054, *Guangdong, China*
3. *CNOOC China Limited, Shenzhen Branch, Shenzhen* 518054, *Guangdong, China*

Abstract: Baiyun sag is one of the main oil and gas producing areas in the northern continental margin of the South China Sea. It has been widely discussed by scholars wroldwide because of its broad oil and gas prospects. However, the tectonic background, source rock composition, ancient water

收稿日期:2024-08-25

作者简介:单玄龙(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事非常规和深层油气地质方面的研究,E-mail:shanxl@jlu.edu.cn

通信作者:王志豪(2000—),男,硕士研究生,主要从事石油地质方面的研究,E-mail:zhihaow22@mails.jlu.edu.cn

基金项目:中国海洋石油有限公司"十四五"重大科技项目(KJGG2021-0100)
Supported by the Major Science and Technology Project of CNOOC During the 14th Five-Year Plan Period (KJGG2021-0100)

system, and ancient landform characteristics of the Eocene sedimentary source area need to be further studied. The evolution of the source system during the depression-fault-depression transition period is still not clear. In this paper, the characteristics of paleogeomorphology evolution and provenance distribution of Eocene in Baiyun sag are systematically revealed based on rock mineralogy, rare earth element, and three-dimensional seismic data. The results show that the tectonic background of the source area in Wenchang and Enping periods has the attribute of recycled orogenic belt, and the deposition of Enping Formation is restricted by the mixed orogenic belt and the stable continental block source area, which shows the characteristics of mixed source in the fault-depression transition period. In addition, the proportion of deep rock minerals such as rutile/garnet is higher in the Enping Formation, which may indicate strong tectonic metamorphism in the source area. The characteristics of rare earth elements show that the distribution patterns of Eocene source rocks and granites in Baiyun sag are similar. The ancient water system transits clockwise from convergence to divergence in the depression-fault-depression transition period. The source supply generally shows the characteristics of axial supply in the basin-the supply of the northern gentle slope-the long axis supply outside the basin. The characteristics of the lake basin also show the characteristics of small basin shallow lake-large basin deep lake-wide gentle lake basin-shallow water wide basin.

Key words: Pearl River Mouth basin; Baiyun sag; rare earth elements; ancestral river; ancient landscape; systems of provenance

0　引言

白云凹陷是南海北部深水区域油气勘查的核心区域，从 21 世纪初开始，区域内已陆续探明了番禺、荔湾、流花等气田群以及流花油田群，成为南海北部的主要油气产区之一，其油气资源总量大约为 31 亿 t 油当量，其中 L3、LW9 等井在文昌组、恩平组均有油气显示[1]。前人[2]研究认为，白云凹陷始新统文昌组物源主要由盆内低隆起与低凸起提供中—酸性火成岩，周缘番禺低隆起、云荔低隆起与云东低凸起为盆内潜在物源区，基底岩性主要为花岗岩和凝灰岩[3]。曾智伟[4]提出南海北部陆缘古近系恩平组存在两大物源体系影响：盆地外部华南大陆陆缘碎屑物质影响；盆地内部隆起地区物源供给影响。但目前关于研究区的研究尺度整体较粗，缺乏对白云凹陷始新统物源体系的精细分析研究。

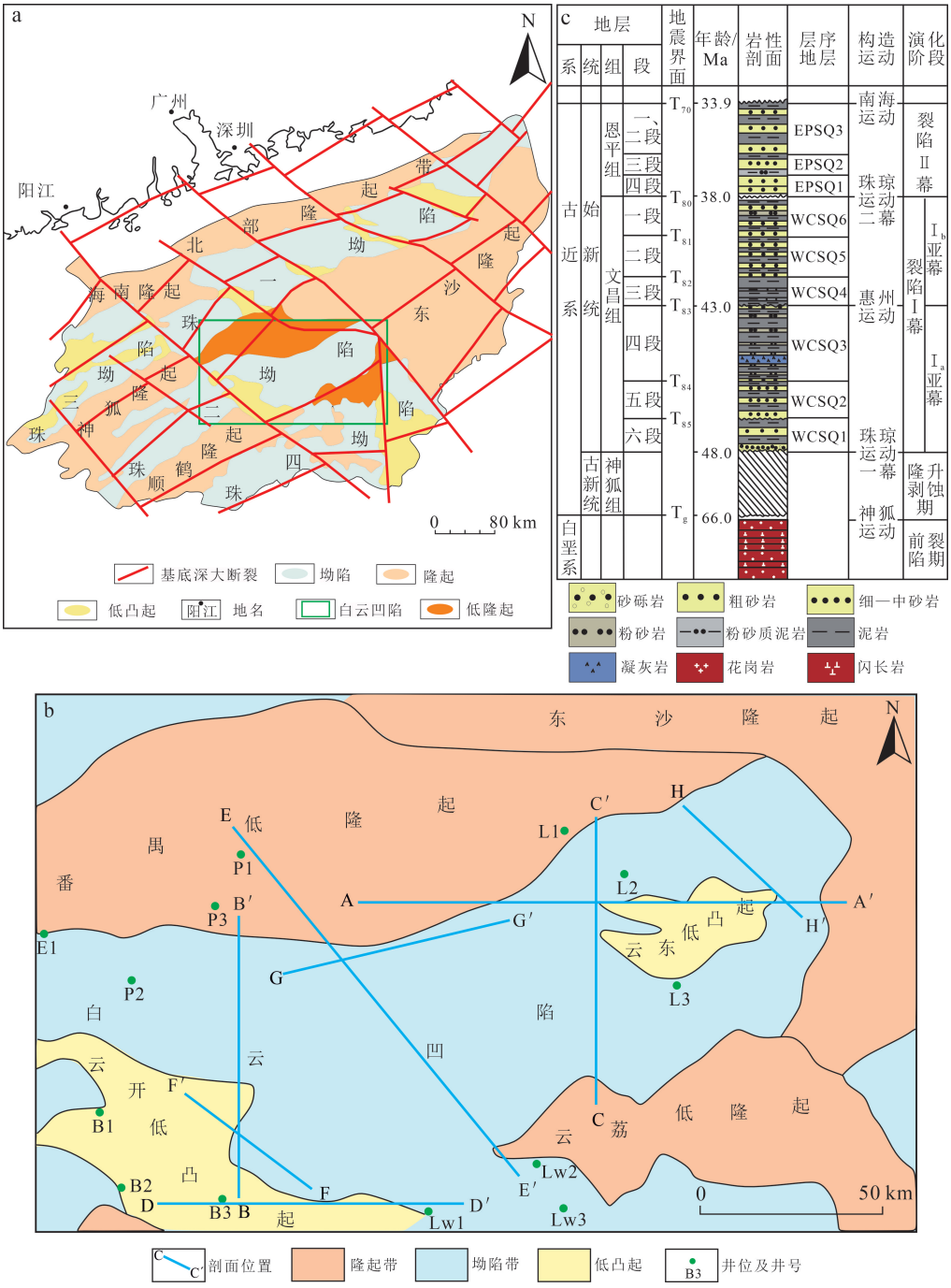
物源体系在盆地分析中占据关键的位置，沉积物源研究的目的在于通过分析沉积物的组成和结构来探索物源区的特征[5]，重建和解释物源区母岩到埋藏地碎屑沉积物的演化历史[6]。目前，中国的物源体系研究主要集中在陆相盆地上，珠江口盆地等洋陆交界型盆地研究面临的主要难点在于盆地类型的多样性。物源区与搬运区受到多重因素的共同影响以及物源区类型的多样性[7]。研究区白云凹陷位于珠江口盆地内，其物源区在演化过程中曾发生过重要的变化，在古近系主要表现为沟渠等搬运通道在形式上的多样性，研究白云凹陷深水深层少井及无井区的物源体系，对于白云凹陷的储层预测和深层油气探索都具有关键的参考意义。为此，本文基于覆盖白云凹陷的三维地震资料和部分已钻井资料，从岩矿组分、动态剥蚀演化规律及古水流方向刻画等多方面入手，对白云凹陷始新统沉积期的源区开展研究，以期对白云凹陷物源区进行系统划分。

1　区域地质概况

珠江口盆地位于我国南海北部的陆坡边缘处，呈 NE—SW 向展布，其总面积约为 $17.5\times10^4\ km^2$，是我国近海最大的含油气盆地之一[8]。珠江口盆地大陆动力学背景复杂，在古生代及中生代形成了复杂的褶皱基底，这主要是由于受到了太平洋板块、印度洋板块以及欧亚板块强烈的交汇作用的影响，其构造格局主要受 NE 向断裂体系的影响，NE 向断裂体系与 NWW 向断裂共同作用决定了盆地的隆坳模式（图 1）。整体上，珠江口盆地具有南北分带、东西分块的构造特征，并被划分为 5 个构造单元（图

1a),呈现出“三隆夹两坳”的构造格局,包括北部隆起带、北部坳陷带、中央隆起带、南部坳陷带、南部隆起带[10-11],其中北部坳陷带由珠一坳陷和珠三坳陷组成,珠二坳陷则位于珠江口盆地南部。

研究区白云凹陷是珠江口盆地最大的凹陷,地处珠二坳陷的东北部,面积大于 20 000 km^2,水深跨度较大,为200～3 000 m,其中约70%的盆地面积水深大 500 m,是珠江口盆地的沉降和沉积中心,



a. 珠江口盆地构造位置图[7];b. 白云凹陷及邻区构造单元划分图[9];c. 白云凹陷地层综合柱状图[7]。

图 1 珠江口盆地白云凹陷构造位置、邻区构造单元及始新统柱状图

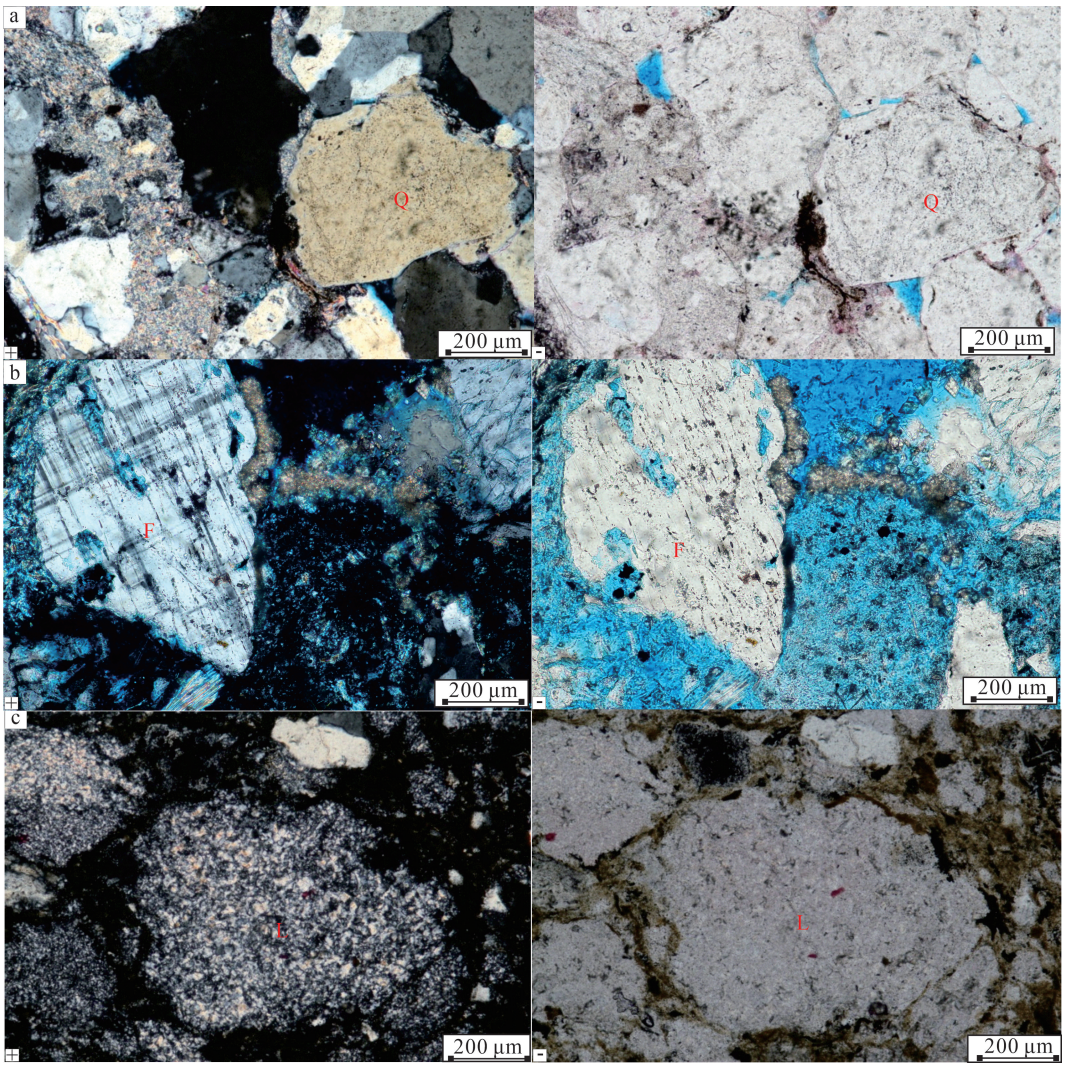
Fig.1 Structural location, adjacent structural units and Eocene stratigraphic histogram of Baiyun sag in Pearl River Mouth basin

整体上表现为海陆过渡相[12-14]。白云凹陷的构造位置独特，北侧是番禺低隆起与斜坡带，西侧是云开低凸起与陡坡带，南部为云开低凸起、南部隆起带及断阶带，东侧为东沙隆起，洼陷内多发育低隆起（图 1b）。整体上，白云凹陷表现为 NEE 走向的复式地堑结构，一共可被划分为三个次级洼陷，分别为白云主洼（约 4 800 km^2）、白云东洼（约 512 km^2）和白云西洼（约 900 km^2），其中白云主洼北侧为缓坡带，南侧为陡坡断阶带，整体上表现为断裂不完全控制沉积中心的断坳结构[15-16]。白云凹陷始新统主要发育文昌组、恩平组（图 1c）。在文昌组时期，白云凹陷整体上具有“洼陷分隔”的沉积格局，然而在恩平组沉积阶段，由于受到了断坳拉张作用以及深部热衰减作用的影响，白云凹陷整体发生沉降，沉积范围不断扩大，东南与荔湾凹陷相连[8,17-19]。

2　岩矿分析

2.1　岩石骨架颗粒特征

定量的碎屑岩岩相学分析是岩石学研究的重要环节，本文系统鉴定了白云深水区的 13 口井，共计 130 个碎屑岩薄片样品，结果表明研究区岩石骨架颗粒成分主要以石英为主，岩屑体积分数较高，其类型主要为火成岩、变质岩及沉积岩岩屑（图 2）。



a. P3 井，恩平组一、二段，3 714.2 m，典型石英特征；b. B3 井，恩平组三段，2 398.0 m，典型长石特征；c. L3 井，文昌组四段，3 887.0 m，典型岩屑特征。Q. 石英；F. 长石；L. 岩屑。

图 2　珠江口盆地碎屑岩的典型薄片照片

Fig.2　Typical thin section photos of clastic rocks in the Pearl River Mouth basin

断陷期,下文昌组岩石中石英平均体积分数为63%,长石平均体积分数为26%,岩屑平均体积分数为11%(其中火成岩岩屑体积分数为6%,沉积岩岩屑体积分数为1%,变质岩岩屑体积分数为4%);上文昌组沉积时期,石英平均体积分数有所增加,达到了68%,长石平均体积分数减少至12%,岩屑平均体积分数为20%(其中火成岩岩屑体积分数为18%,沉积岩岩屑体积分数为1%,变质岩岩屑体积分数为1%)。断坳转换期,下恩平组岩石中石英平均体积分数为66%,长石平均体积分数为19%,岩屑平均体积分数为15%(其中火成岩岩屑体积分数为10%,变质岩岩屑体积分数为5%);上恩平组岩石中石英平均体积分数为57%,长石平均体积分数为5%,岩屑平均体积分数显著增加高达38%,(其中火成岩岩屑体积分数为35%,变质岩岩屑体积分数为3%)(图3)。

砂岩碎屑组分与受大地构造背景控制的物源区密切相关,它不仅反映了母岩的性质,也反映了源区构造背景。本研究采用最常见的Gazzi-Dickinson法进行砂岩的碎屑颗粒统计并进行投图[20],绘制Qt-F-L、Qm-P-K、Qp-Lv-Ls和Qm-F-Lt等4个三角图解(图4)。其中Qt-F-L对砂岩碎屑成分的区分度较弱,侧重反映砂岩的成熟度;Qm-F-Lt用于分析源岩成分;Qp-Lv-Ls对砂岩碎屑成分的区分度最强,能够体现岩屑体积分数;Qm-P-K通常说明各矿物的相对体积分数。

从砂岩碎屑成分来看,白云凹陷始新统砂岩颗粒以石英和岩屑为主,含部分长石(图4)。在Qm-F-Lt三角图解(图4d)中,白云凹陷样品点大部分位于再旋回造山带区域,其中早文昌期样品主要为石英再旋回,晚、早恩平期样品则以过渡再旋回为主,值得注意的是,晚恩平期样品燧石/石英比率明显增加。在Qt-F-L图解(图4a)中,样品点大部分落于再旋回造山带区域,下恩平期部分样品点落在过渡大陆区,说明早恩平期这部分样品对应物源区岩石类型增加。在Qp-Lv-Ls图解(图4c)中,样品均位于混合造山带区域。在Qm-P-K图解(图4b)里,样品基本位于稳定陆块。

2.2 重矿物特征

重矿物可以参与其他一些碎屑物质的产生、搬运乃至沉积的全部过程,能够较好地保留其母岩特性。相同或相似的重矿物组合可以指示相同的母岩区,为判别物源区位置、沉积和构造活动提供线索[21]。

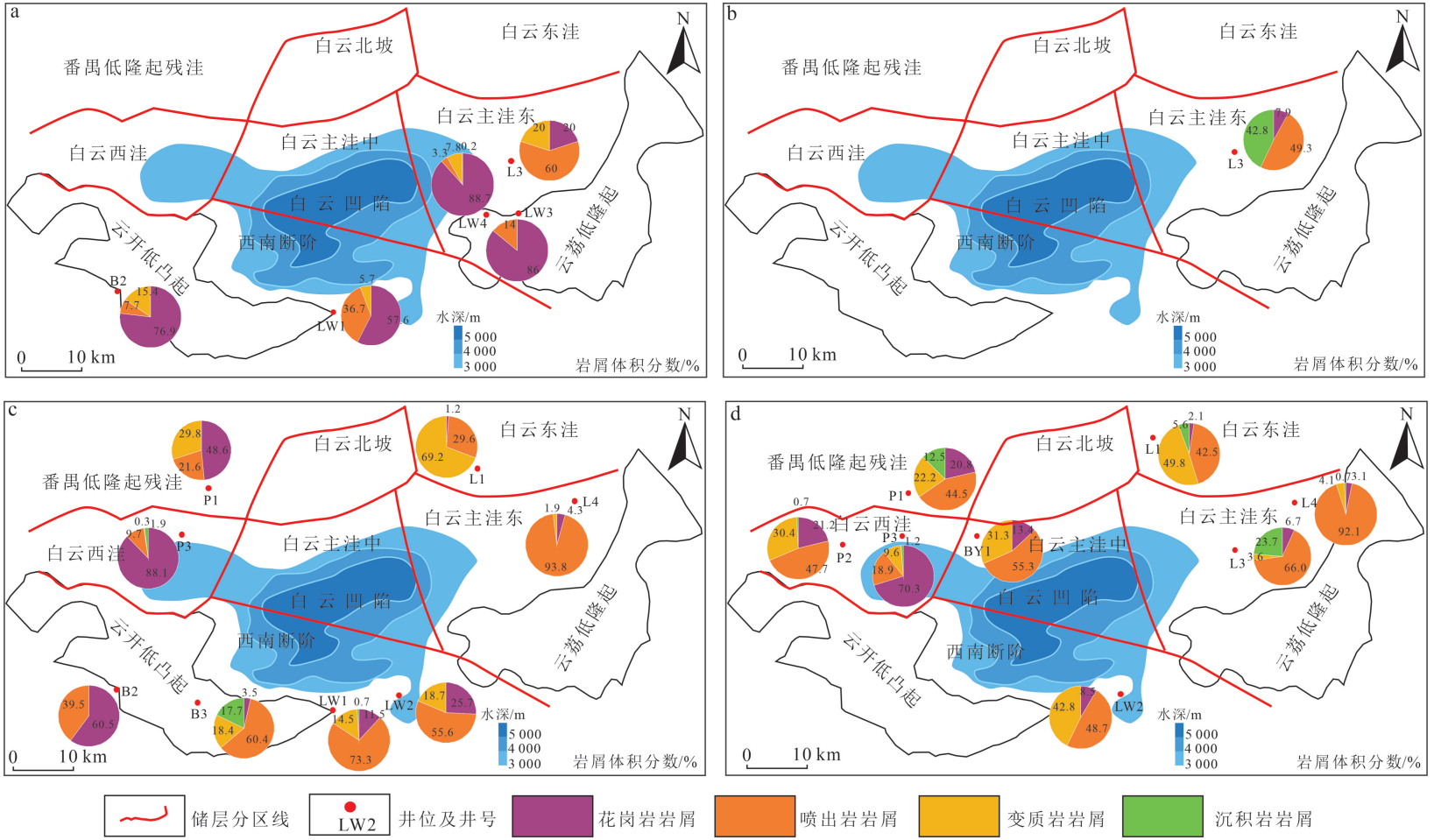
研究区重矿物组合整体上为黄铁矿+白钛矿+锆石+重晶石+磁铁矿+赤褐铁矿(图5)。锆石作为岩浆岩中常见的副矿物,主要分布在文昌期云荔低隆起及番禺低隆起等周缘物源区;金红石/石榴石等深成岩矿物比重在恩平组较高,可能指示了源区强烈的构造变质作用。

基于重矿物分布和比例,计算出不同的重矿物指数能反映出沉积岩的物源信息,I_{GZ}和I_{RUZ}指数(图6)常用来指示物源区深成岩的比例,其值越大,则深成岩占比越多[22]。通过对研究区重矿物指数计算(图6),发现研究区内:早文昌期I_{GZ}指数平均为4.4%,I_{RUZ}指数平均为4.6%;晚文昌期I_{GZ}指数平均为20.3%,I_{RUZ}指数平均为3.1%;早恩平期I_{GZ}指数平均为14.3%,I_{RUZ}指数平均为16.3%;晚恩平期I_{GZ}指数平均为3.4%,I_{RUZ}指数平均为14.3%。恩平期I_{RUZ}指数明显高于文昌期,说明源区深成岩比例增加。

3 稀土元素特征

Nothdurft等[23]研究表明稀土元素(REE)在风化、迁移、沉积和成岩过程中具有很强的稳定性。通常将沉积岩中的稀土元素总量($w(\sum REE)$)(澳大利亚后太古宙页岩(PAAS)质量分数为184.8×10^{-6})[23]作为陆地物质总量的一个指标:当沉积物或沉积岩中的$w(\sum REE)$接近或高于该值时,说明其微量元素主要由陆源碎屑提供;当$w(\sum REE)$远低于这个值,说明它受陆相物质的影响较小[23]。白云凹陷文昌组、恩平组样品稀土元素总量除12号样品外均低于PAAS值(表1),表明其他样品陆源碎屑物质供给有限。样品中稀土元素$w(\sum REE)$介于$98.57\times10^{-6}\sim188.85\times10^{-6}$之间,$w$(HREE)介于$14.05\times10^{-6}\sim24.08\times10^{-6}$之间,$w$(LREE)介于$84.52\times10^{-6}\sim166.59\times10^{-6}$之间,$w$(LREE)/$w$(HREE)介于6.02~7.55之间,平均值为6.69(表1)。上述结果显示研究区轻、重稀土元素分异明显,轻稀土元素富集而重稀土元素亏损。

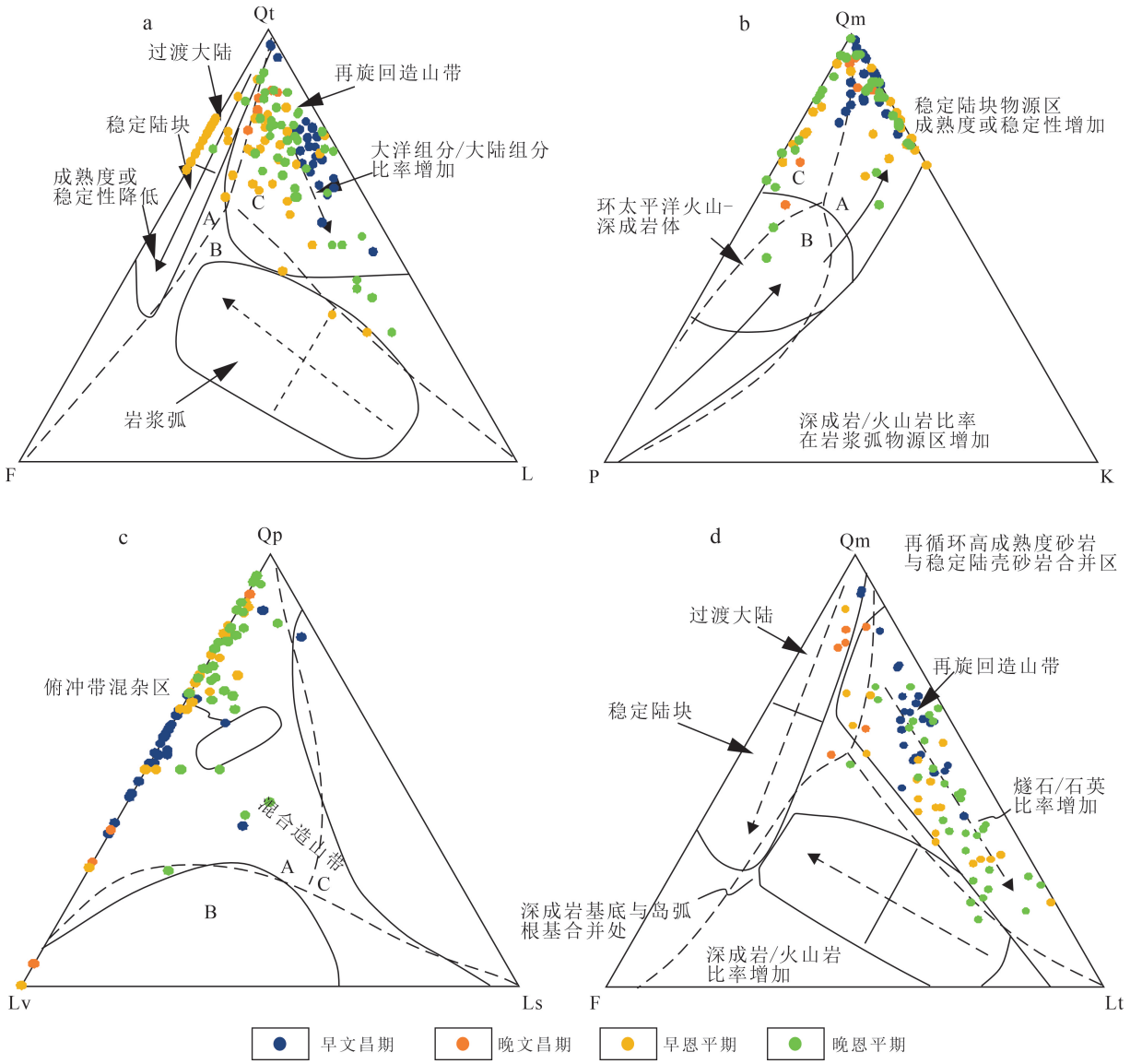
稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图7a)显示,研究区样品的稀土元素配分模式基本类似,La—Sm曲线呈略陡的下降趋势,Dy—Lu曲线变化不明显,说明重稀土元素亏损、轻稀土元素富集;Eu出现小规模波动,略有亏损(表1)。通常酸性花岗岩以δEu负异常($\delta Eu<0.90$)为特征,玄武岩以δEu无明显异常($0.90<\delta Eu<1.0$)为特征,而中



a. 早文昌期；b. 晚文昌期；c. 早恩平期；d. 晚恩平期。

图 3　白云凹陷早晚文昌、恩平期岩屑体积分数饼状图

Fig.3　Pie chart of rock debris volume fraction in lower and upper Wenchang and Enping periods in Baiyun sag



底图据文献[21]。Qt.石英总量(Qt=Qm+Qp);F.长石(F=P+K);L.不稳定岩屑(L=Lv+Ls);Qm.单晶石英;Qp.多晶石英(包括燧石);P.斜长石;K.碱性长石;Lv.火山/变火山岩屑;Ls.沉积/变沉积岩屑;Lt.岩屑总量(Lt=L+Qp)。A.稳定陆块;B.岩浆弧;C.再旋回造山带。

图4 白云凹陷岩性及构造三角图版

Fig.4 Lithology and structural triangle plate of Baiyun sag

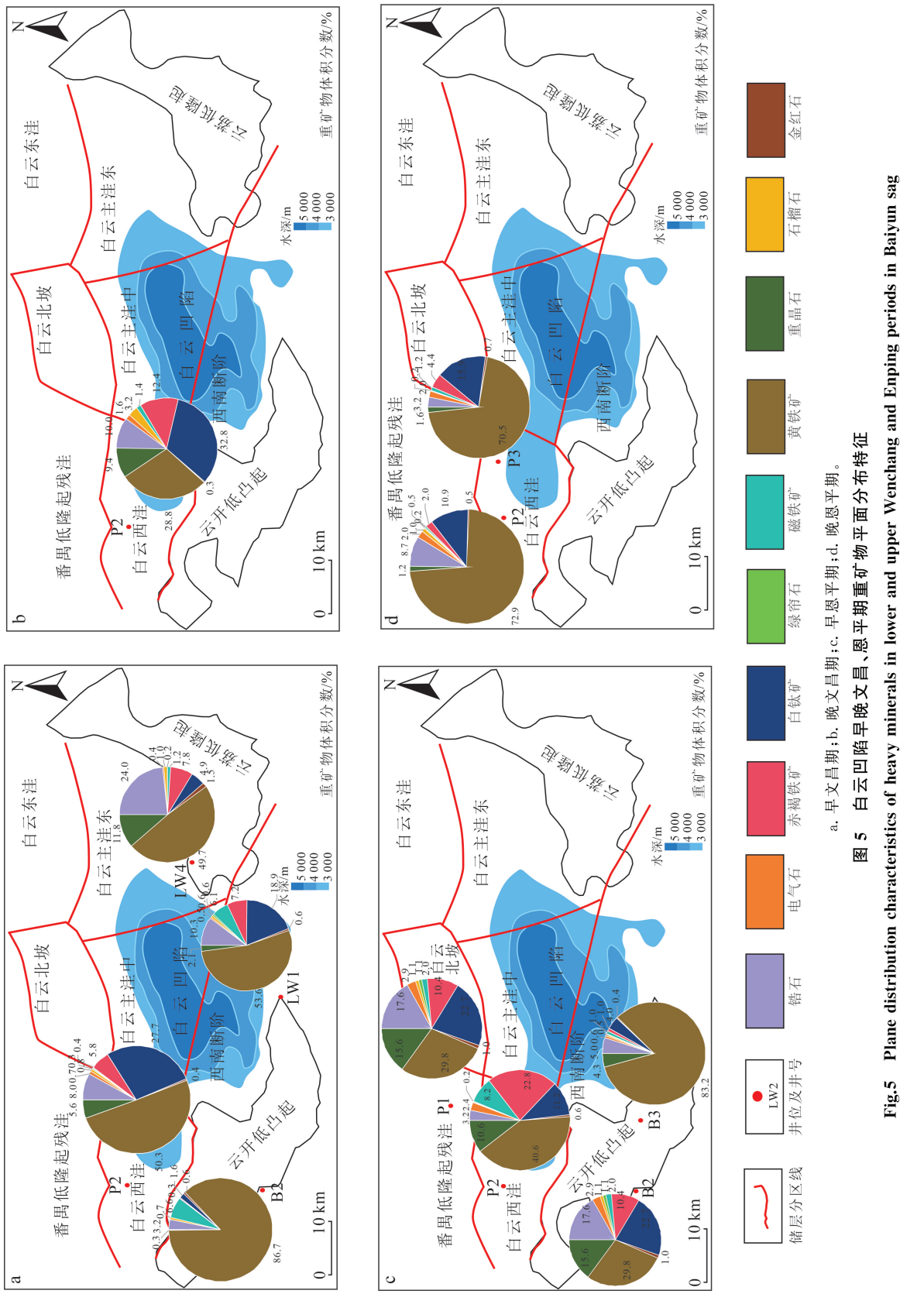
性斜长石以 δEu 正异常($1.01<\delta Eu<2.33$)为特征[25-27]。白云凹陷文昌组、恩平组的 δEu 值为0.20～0.35,平均值为0.25,表现为明显负异常,表明其源岩主要是酸性花岗岩,这种特征在文昌组、恩平组中均有体现(图7),说明物源区较为稳定。从 La/Yb-w(∑REE)二元图解(图7b)可以看出,白云凹陷文昌组、恩平组样品的 La/Yb 值介于8.33～12.18之间,大多落在花岗岩区域,说明花岗岩是白云凹陷文昌组、恩平组的主要源岩。

4 物源体系

4.1 主要前积体古水系特征

在物源体系的研究当中,对古水流方向的恢复是一项重要内容。前积反射构型是地震和层序地层学的基本类型之一,被广泛认为是最常见的地震内反射构型之一,对古水流方向和沉积物源的判别具有指示意义[28]。

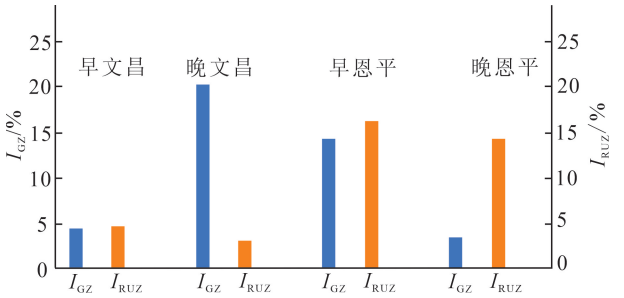
根据前积反射成因,选取两条交点处目的层位



a. 早文昌期；b. 晚文昌期；c. 早恩平期；d. 晚恩平期。

图 5　白云凹陷早晚文昌、恩平期重矿物平面分布特征

Fig.5　Plane distribution characteristics of heavy minerals in lower and upper Wenchang and Enping periods in Baiyun sag



I_{GZ}=100%×石榴石/(石榴石+锆石)；I_{RUZ}=100%×金红石/(金红石+锆石)。

图6 白云凹陷早晚文昌、恩平期重矿物相关指数

Fig.6 Heavy mineral correlation index of lower and upper Wenchang and Enping periods in Baiyun sag

能显示清晰前积反射现象的测线，测量视倾角后根据适量叠加原理即可定量计算古水流方向。首先，本文选取具有典型前积反射结构的剖面(图8a)，对上下地层进行层拉平以消除构造运动带来的影响；其次，利用张金伟等[29]建立的方法计算最大前积角(图8b)。通过计算发现下文昌组白云凹陷西南部前积体规模较大，文六段主古水流方位角集中于60°，文五段及文四段主古水流方向分别为65°和80°。上文昌组白云北坡前积体规模逐渐变大，文三段至文二段主古水流方位角由140°过渡为170°；文三段后西南部前积体逐渐萎缩并消失，古水流方向集中于50°；然而由于文一段参与厚度较薄，无法准确识别前积体方向。恩平组西北部出现沟通盆外源区的大规模前积体[9]，古水流方向集中于120°，而西南部前积体仍呈现90°最大方位角特征。由此可见，文昌期—恩平期古水系整体呈现顺时针摆动。

4.2 古地貌演化及物源展布特征

古地貌的形态及物源区的分布对盆地充填及沉积体系的空间配置起着控制作用。古地貌恢复方法众多，主要包括印模法、层拉平法、地层趋势面法和高分辨率法等[30-32]。印模法适用于上覆标志层条件较好的状况，但其精度较低，误差较大；高分辨率法需要高分辨率层序等时格架的建立及上覆对比参照物的正确选取。本文依据现有资料以及复杂地质背景的限制，选择地层趋势法恢复研究区剥蚀厚度。该方法操作简单，考虑了后期构造作用，误差小，有助于直观地表现研究区古地貌的特征。

通过地层趋势法对白云凹陷文昌期、恩平期削截现象识别并对剥蚀厚度进行恢复发现，在早文昌期呈现出总体持续剥蚀的特征，白云东洼剥蚀厚度逐渐变小(图9a)，而白云西南和北坡剥蚀厚度逐渐变大(图9b)；晚文昌期维持持续剥蚀特征，但白云北坡剥蚀厚度逐渐变大(图9c)，白云西南剥蚀厚度逐渐变小(图9d)；然而到了恩平期，白云凹陷西北区剥蚀厚度逐渐变大(图9e)。

将研究区文昌组、恩平组剥蚀地层厚度与相应层段残余地层厚度进行累加，得出原始地层厚度。再叠合古水流方向，即可形成白云凹陷文昌、恩平期三级层序下的古地貌图。从恢复的古地貌图(图10)中可以看出，早文昌期盆地为NE向构造体系，以轴向物源供给为主(图10a、b、c)，晚文昌期为NEE-EW向构造体系，北部缓坡物源逐渐占据主导地位(图10d、e、f)，恩平期为EW向构造体系，物源供给逐步演化为盆外长轴物源供给为主(图10g、h、i)。

下文昌组为白云凹陷强断陷期，此时期对应珠江口盆地珠琼运动一幕的裂陷Ⅰ幕中的$Ⅰ_a$亚幕构造演化阶段。此次运动使珠江口盆地发生强烈断陷沉降、抬升剥蚀，形成区域性不整合面T_g，且边界断裂的强烈活动控制形成了许多彼此分隔的湖盆[33-34]。此阶段白云凹陷湖盆整体表现为小盆浅湖特征，该时期以轴向物源沉积为主，凹陷以西南部云开低凸起为主要物源区，岩石类型主要为长石石英砂岩，发育单断槽为物源通道的辫状河三角洲沉积[35]。此外，早文昌期处于均一裂陷——强烈伸展构造阶段，差异隆升造成复杂的供源体系，轴向物源供给快速堆积[7]。

上文昌组进入到弱断陷期，此阶段对应珠江口盆地珠琼运动一幕的裂陷Ⅰ幕中的$Ⅰ_b$亚幕，与$Ⅰ_a$亚幕以不整合面T_{83}为界[33-34]。白云凹陷北部砂体规模进一步扩大，且东北部砂体叠置连片，西南部源区规模较小。该时期湖盆地貌逐渐平缓，这一时期白云凹陷整体上延续了之前的沉积发育格局，然而北部缓坡物源成为主要供给来源，凹陷呈现宽缓湖盆形态，规模砂体零散分布。

恩平期进入到断坳转换期，此阶段对应珠江口盆地珠琼运动二幕的裂陷Ⅱ幕。此次构造运动最强烈，珠江口盆地再次抬升并大量剥蚀[33-34]，研究区断陷湖盆开始向坳陷湖盆演化，沉积环境也由文昌期的湖相环境逐渐向局限海湾环境过渡。在恩平早期，周缘隆起还对白云凹陷有一定供源，在之前的发育格局上垂向叠置。值得注意的是，该时期白云凹

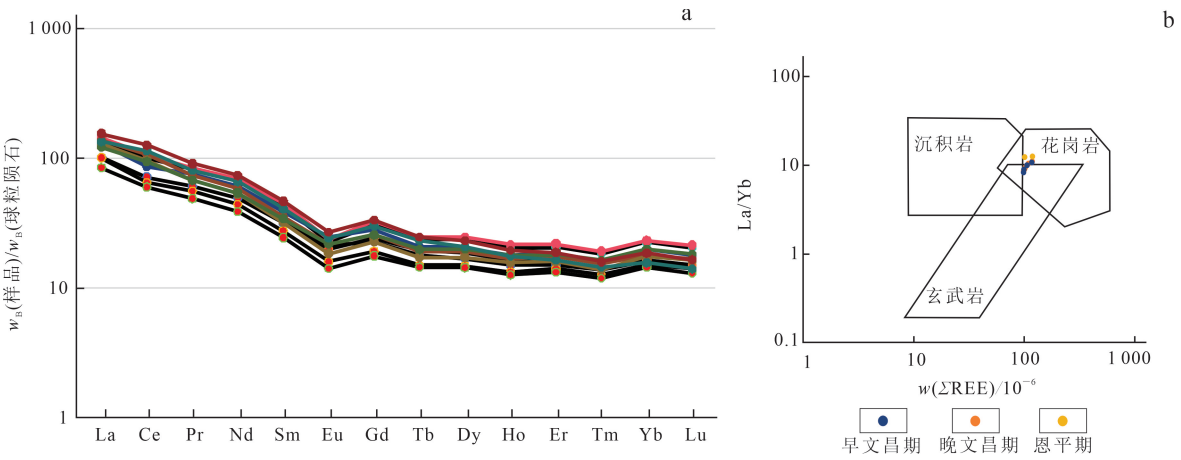
表 1　白云凹陷始新统稀土元素测试结果及相关参数特征

Table 1　The test results of rare earth elements and related parameter characteristics of Eocene in Baiyun sag

样品号	深度/m	地层	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
1	3 569.7	下文昌组	24.54	43.73	6.05	23.05	4.76	1.26	4.76	0.71	4.20	0.89
2	3 825.0	下文昌组	29.59	57.52	6.79	24.98	4.89	1.19	5.09	0.77	4.71	0.99
3	3 940.5	下文昌组	24.25	39.76	5.60	20.75	4.16	0.96	4.03	0.60	3.69	0.80
4	4 178.6	下文昌组	20.33	36.57	4.89	18.22	3.67	0.85	3.70	0.58	3.58	0.75
5	3 670.0	上文昌组	33.11	61.24	8.25	31.39	6.41	1.35	6.44	0.94	5.82	1.23
6	3 690.0	上文昌组	34.33	65.06	8.48	32.67	6.72	1.42	6.80	0.99	6.11	1.29
7	3 785.0	上文昌组	31.45	52.90	7.61	28.84	5.82	1.47	5.90	0.83	5.12	1.08
8	3 852.0	上文昌组	33.08	65.06	7.36	27.17	5.32	1.30	5.40	0.77	4.80	1.01
9	3 885.0	上文昌组	30.79	58.95	6.81	24.94	4.83	1.11	4.79	0.69	4.30	0.94
10	3 976.0	上文昌组	29.20	57.62	6.77	25.45	5.13	1.31	5.38	0.79	4.96	1.08
11	3 560.0	恩平组	32.24	70.24	8.14	31.08	6.14	1.45	6.32	0.93	5.21	1.05
12	3 569.7	恩平组	37.37	76.97	9.09	34.55	6.99	1.62	7.01	0.99	5.79	1.17
球粒陨石			0.24	0.61	0.10	0.47	0.15	0.06	0.21	0.04	0.25	0.06

样品号	深度/m	地层	Er	Tm	Yb	Lu	∑REE	LREE	HREE	LREE/HREE	La/Yb	δEu
1	3 569.7	下文昌组	2.55	0.41	2.73	0.44	120.07	103.38	16.69	6.19	9.00	0.24
2	3 825.0	下文昌组	2.81	0.42	2.78	0.45	142.97	124.96	18.01	6.94	10.63	0.22
3	3 940.5	下文昌组	2.37	0.38	2.57	0.42	110.32	95.47	14.85	6.43	9.45	0.20
4	4 178.6	下文昌组	2.25	0.36	2.44	0.39	98.57	84.52	14.05	6.02	8.33	0.20
5	3 670.0	上文昌组	3.52	0.55	3.81	0.61	164.66	141.75	22.91	6.19	8.69	0.33
6	3 690.0	上文昌组	3.72	0.58	3.95	0.64	172.75	148.68	24.08	6.18	8.70	0.35
7	3 785.0	上文昌组	3.14	0.47	3.35	0.54	148.51	128.08	20.43	6.27	9.40	0.28
8	3 852.0	上文昌组	2.95	0.46	3.07	0.50	158.23	139.29	18.94	7.35	10.79	0.23
9	3 885.0	上文昌组	2.71	0.41	2.96	0.49	144.70	127.42	17.28	7.37	10.41	0.22
10	3 976.0	上文昌组	3.11	0.49	3.37	0.55	145.20	125.47	19.72	6.36	8.66	0.27
11	3 560.0	恩平组	2.78	0.43	2.65	0.42	169.08	149.30	19.78	7.55	12.18	0.24
12	3 569.7	恩平组	3.19	0.48	3.15	0.49	188.85	166.59	22.27	7.48	11.88	0.27
球粒陨石			0.17	0.03	0.17	0.03						

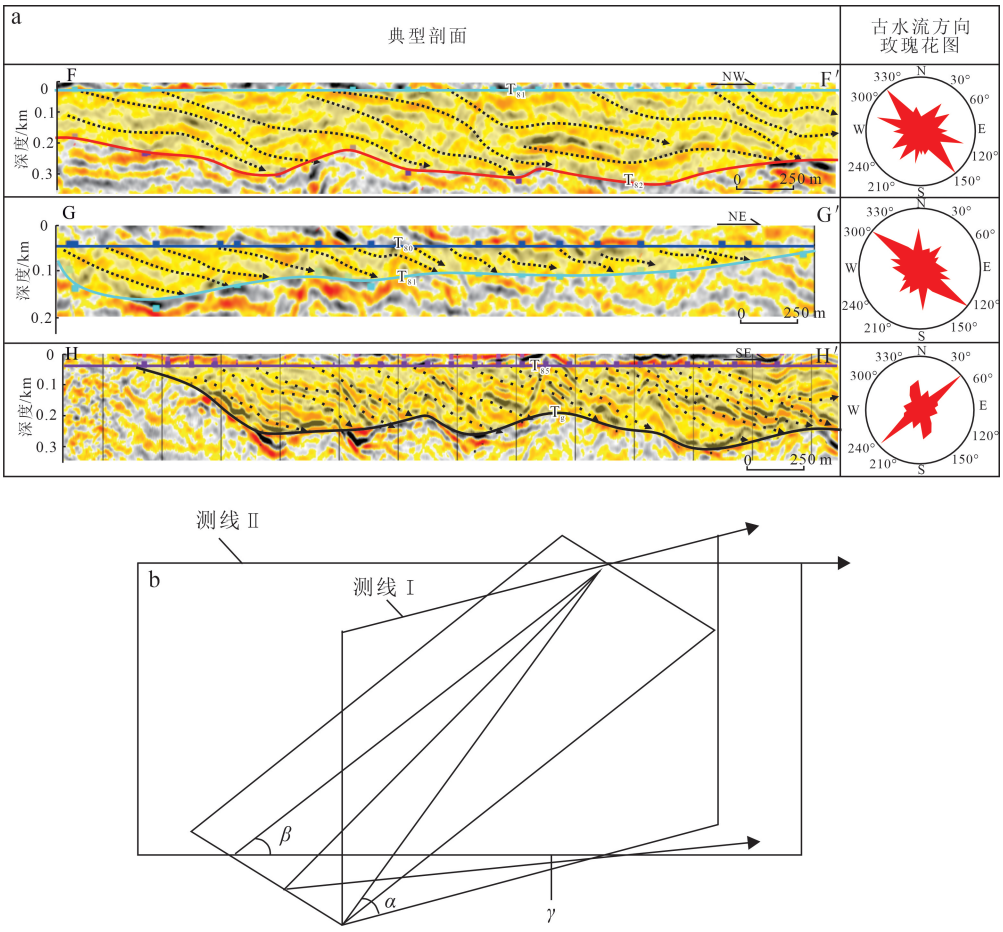
注：稀土元素质量分数单位为 10^{-6}。球粒陨石数据据文献[23]。



底图据文献[24]。

图7 白云凹陷始新统样品球粒陨石标准化配分模式图(a)及源岩属性判别图解(b)

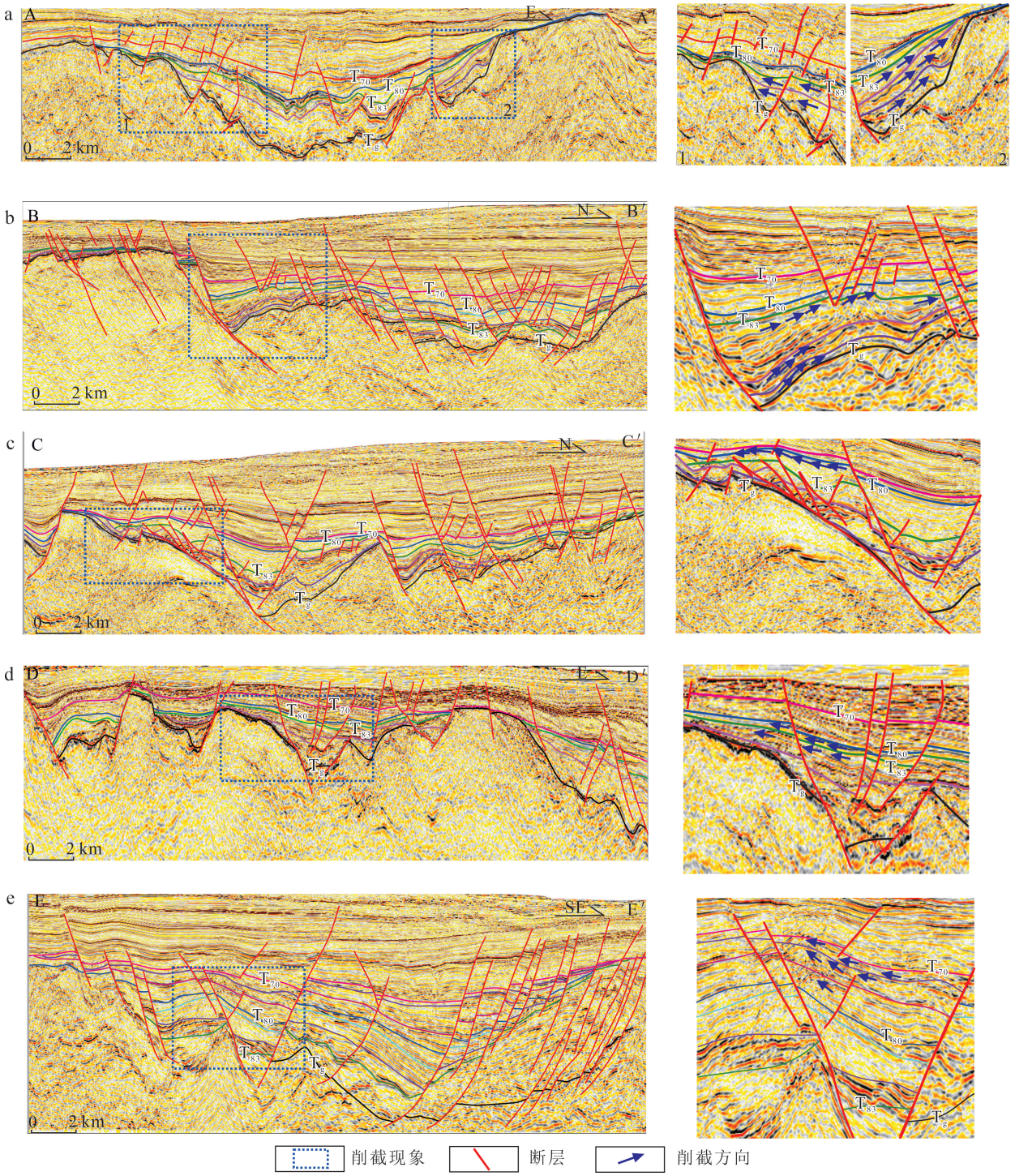
Fig.7 Standard distribution pattern of chondrites (a) and discrimination diagram of source rock properties (b) of Eocene samples in Baiyun sag



据文献[29]修改。前积剖面位置见图1。α.前积反射面沿测线Ⅰ方向的视倾角;β.前积反射面沿测线Ⅱ方向的视倾角;$\gamma=\arctan(\tan\beta/\tan\alpha)$。

图8 白云凹陷文昌组、恩平组典型前积地震剖面(a)及前积反射面空间几何关系(b)

Fig.8 Typical progradational seismic profiles of Wenchang and Enping Formations in Baiyun sag (a) and spatial relationship of progradational reflectors (b)

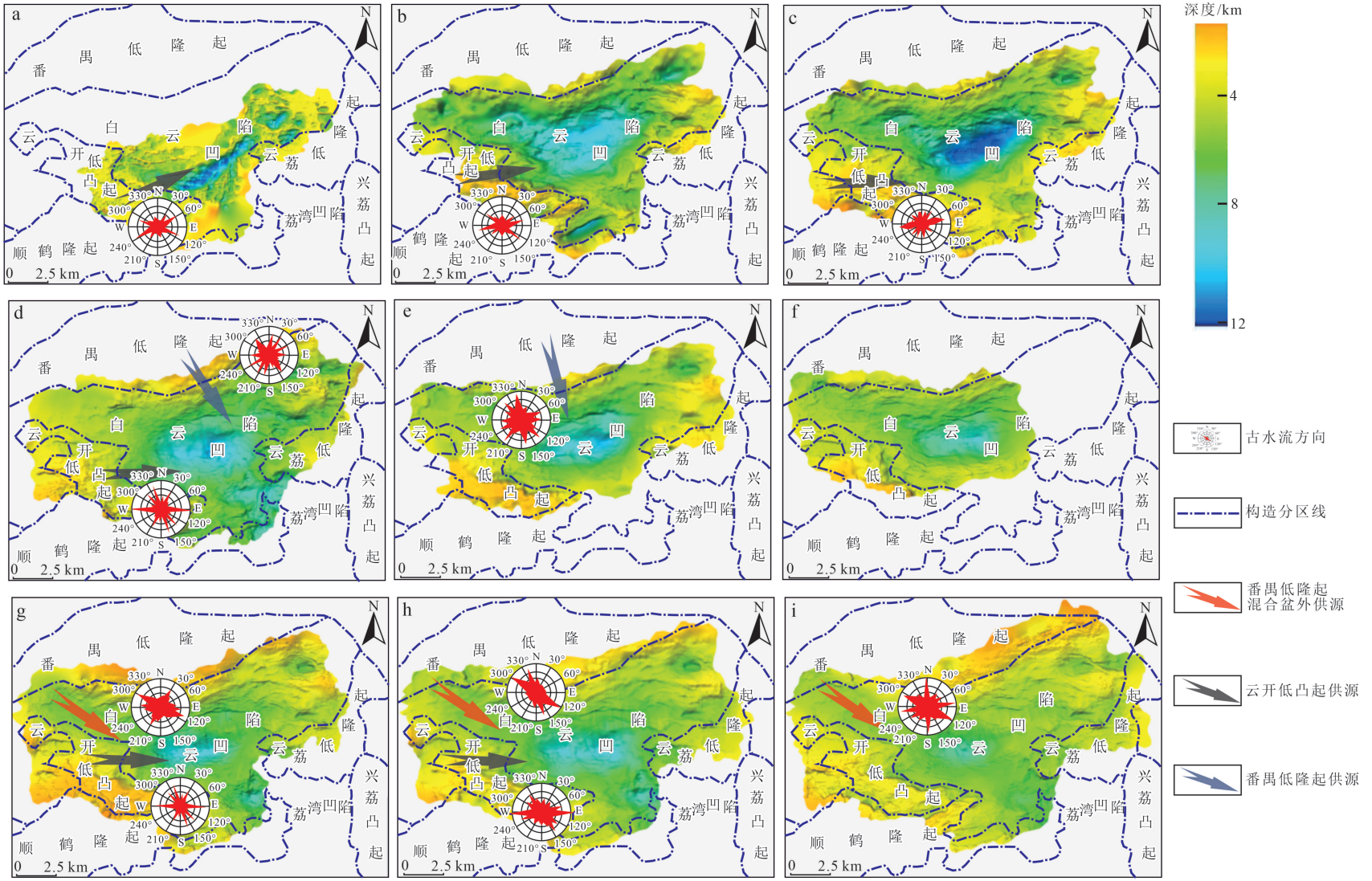


剖面位置见图 1。a、b.早文昌期；c、d.晚文昌期；e.恩平期。

图 9　白云凹陷始新统削截典型剖面

Fig.9　Typical section of Eocene truncation in Baiyun sag

陷西北物源通道打开，受到来自古珠江水系的物源供给，形成规模巨大的盆外长轴搬运的三角洲体系。恩平期整体具有坳陷特征，恩平末期盆外强烈隆升，盆地整体处于断坳转换期，盆内隆起萎缩准平原化，最终以盆外长轴物源供给为主，浅水广盆，规模砂体连片分布。



a. 文昌组六段；b. 文昌组五段；c. 文昌组四段；d. 文昌组三段；e. 文昌组二段；f. 文昌组一段；g. 恩平组四段；h. 恩平组三段；i. 恩平组二、一段。

图 10　白云凹陷始新统古地貌及物源体系特征

Fig.10　Characteristics of paleogeomorphology and provenance system of Eocene in Baiyun sag

5　结论

1）文昌期、恩平期源区构造背景均具有再旋回造山带属性，而且恩平组沉积同时受到了混合造山带及稳定陆块源区的制约，显示断坳转换期混源的特征。此外，金红石/石榴石等深成岩矿物比重在恩平组较高，可能指示了源区强烈的构造变质作用。

2）始新统轻稀土元素富集而重稀土元素亏损，Eu 负异常明显的特征与花岗岩的配分模式相似，稀土元素表明受陆相物质影响较小。

3）早文昌期—晚文昌期—恩平期古水系整体呈顺时针摆动，盆地由窄盆深湖过渡为宽缓湖盆形态，而后盆内隆起萎缩准平原化，最终周缘隆起供源逐渐减弱，盆外长轴物源供给占据主导，进而形成规模巨大的混合物源供给体系。

参考文献（References）：

[1] 郭帅，杨海长，曾清波，等. 白云凹陷恩平组南部物源研究及其油气地质意义[J]. 海洋地质前沿，2020，36(6)：56－63.
Guo Shuai，Yang Haichang，Zeng Qingbo，et al. Provenance Study of the Southern Enping Formation in the Baiyun Sag and Its Geological Significance for Oil and Gas[J]. Marine Geology Frontiers，2020，36(6)：56－63.

[2] 曾智伟. 珠江口盆地白云凹陷古近系恩平组源-汇系统研究[D]. 武汉：中国地质大学(武汉)，2016.
Zeng Zhiwei. Study on the Source-Sink System of the Paleogene Enping Formation in the Baiyun Sag of the Pearl River Mouth Basin [D]. Wuhan：China University of Geosciences(Wuhan)，2016.

[3] 崔宇驰，曹立成，乔培军，等. 南海北部古近纪沉积物碎屑锆石 U－Pb 年龄及物源演化[J]. 地球科学，2018，43(11)：4169－4179.
Cui Yuchi，Cao Licheng，Qiao Peijun，et al. U－Pb Ages of Detrital Zircon and Provenance Evolution of Paleogene Sediments in the Northern South China Sea [J]. Earth Science，2018，43(11)：4169－4179.

[4] 曾智伟. 南海北部珠江口盆地古近纪源-汇系统耦合研究[D]. 武汉：中国地质大学(武汉)，2020.
Zeng Zhiwei. Coupling Study of Paleogene Source-Sink System in Pearl River Mouth Basin，Northern South China Sea [D]. Wuhan：China University of Geosciences(Wuhan)，2020.

[5] 徐亚军，杜远生，杨江海. 沉积物物源分析研究进展[J]. 地质科技情报，2007，26(3)：26－32.
Xu Yajun，Du Yuansheng，Yang Jianghai. Progress in Provenance Analysis of Sediments [J]. Geological Science and Technology Information，2007，26(3)：26－32.

[6] Weltje G J，von Eynatten H. QuantitativeProvenance Analysis of Sediments：Review and Outlook [J]. Sedimentary Geology，2004，171(1/2/3/4)：1－11.

[7] 高阳东，彭光荣，张向涛，等. 珠江口盆地白云凹陷古近系文昌组源-汇系统特征及演化[J]. 石油与天然气地质，2023，44(3)：584－599.
Gao Yangdong，Peng Guangrong，Zhang Xiangtao，et al. Characteristics and Evolution of the Source-Sink System of the Paleogene Wenchang Formation in the Baiyun Sag，Pearl River Mouth Basin[J]. Petroleum & Natural Gas Geology，2023，44(3)：584－599.

[8] 刘志峰，王升兰，印斌浩，等. 珠江口盆地珠Ⅰ、珠Ⅲ坳陷裂陷期湖相分布差异及其控制因素[J]. 石油实验地质，2013，35(5)：523－527.
Liu Zhifeng，Wang Shenglan，Yin Binhao，et al. Differences in Lacustrine Distribution and Controlling Factors During the Rift Phase of the ZhuⅠ and ZhuⅢ Depressions in the Pearl River Mouth Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment，2013，35(5)：523－527.

[9] Zeng Z，Zhu H，Yang X，et al. Using Seismic Geomorphology and Detrital Zircon Geochronology to Constrain Provenance Evolution and Its Response of Paleogene Enping Formation in the Baiyun Sag，Pearl River Mouth Basin，South China Sea：Implications for Paleo-Pearl River Drainage Evolution[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering，2019，177：663－680.

[10] 柳保军，庞雄，颜承志，等. 珠江口盆地白云深水区沉积充填演化及控制因素分析[J]. 中国海上油气，2011，23(1)：19－25.
Liu Baojun，Pang Xiong，Yan Chengzhi，et al. Analysis of Sedimentary Filling Evolution and Controlling Factors in the Deepwater Area of the Baiyun Sag，Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil & Gas，2011，23(1)：19－25.

[11] 吴伟中，夏斌，姜正龙，等. 珠江口盆地白云凹陷沉积演化模式与油气成藏关系探讨[J]. 沉积与特提斯地质，2013，33(1)：25－33.
Wu Weizhong，Xia Bin，Jiang Zhenglong，et al. Discussion on Sedimentary Evolution Model and Hydrocarbon Accumulation in the Baiyun Sag，Pearl

River Mouth Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2013, 33(1): 25-33.

[12] 陈亮,庞雄,刘军,等. 珠江口盆地白云凹陷深水重力流优质砂岩储集层特征及识别方法[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(4): 463-471.
Chen Liang, Pang Xiong, Liu Jun, et al. Characteristics and Identification Methods of High-Quality Sandstone Reservoirs from Deepwater Gravity Flows in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(4): 463-471.

[13] 李成海,王家豪,柳保军,等. 珠江口盆地白云凹陷古近系沉积相类型[J]. 沉积学报, 2014, 32(6): 1162-1170.
Li Chenghai, Wang Jiahao, Liu Baojun, et al. Sedimentary Facies Types of the Paleogene in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(6): 1162-1170.

[14] 邓运华,李建平. 渤中25-1油田勘探评价过程中地质认识的突破[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(6): 646-652.
Deng Yunhua, Li Jianping. Baozhong 25-1 Oilfield Exploration and Evaluation in the Process of Geological Understanding of the Breakthrough [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(6): 646-652.

[15] 曹敬贺,夏少红,孙金龙,等. 珠江口盆地北部断裂构造特征对比及其地质学意义[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2364-2369.
Cao Jinghe, Xia Shaohong, Sun Jinlong, et al. Comparison of Fault Structures in the Northern Pearl River Mouth Basin and Their Geological Significance [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2364-2369.

[16] 代一丁. 珠江口盆地西江南洼古近系构造演化与沉积特征[J]. 中国海上油气, 2013, 25(3): 1-7.
Dai Yiding. Structural Evolution and Sedimentary Characteristics of the Paleogene in the Xijiang South Sub-Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil & Gas, 2013, 25(3): 1-7.

[17] 王维,叶加仁,杨香华,等. 珠江口盆地惠州凹陷古近纪多幕裂陷旋回的沉积物源响应[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2015, 40(6): 1061-1071.
Wang Wei, Ye Jiaren, Yang Xianghua, et al. Response of Sediment Provenance to the Multi-Stage Rift Cycles of the Paleogene in the Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(6): 1061-1071.

[18] 米立军,何敏,翟普强,等. 珠江口盆地深水区白云凹陷高热流背景油气类型与成藏时期综合分析[J]. 中国海上油气, 2019, 31(1): 1-12.
Mi Lijun, He Min, Zhai Puqiang, et al. Comprehensive Analysis of Hydrocarbon Types and Accumulation Periods Under High Heat Flow Conditions in the Deepwater Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil & Gas, 2019, 31(1): 1-12.

[19] 远光辉,彭光荣,张丽丽,等. 珠江口盆地白云凹陷古近系深层高变温背景下储层成岩作用与低渗致密化机制[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 44-64.
Yuan Guanghui, Peng Guangrong, Zhang Lili, et al. Diagenesis and Mechanism of Low-Permeability Tightening of Deep Reservoirs Under High Temperature Variation in the Paleogene of the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Petroleum & Natural Gas Geology, 2024, 45(1): 44-64.

[20] Dickinson W R, Valloni R. Plate Settings and Provenance of Sands in Modern Ocean Basin[J]. Geology, 1980, 8: 82-86.

[21] 杜林涛,毕文军,李亚林,等. 羌塘盆地安多114道班地区上白垩统阿布山组沉积环境、物源分析及其构造意义[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 245-259.
Du Lintao, Bi Wenjun, Li Yalin, et al. Sedimentary Environment, Provenance Analysis, and Tectonic Significance of the Upper Cretaceous Abushan Formation in the Anduo 114 Daoban Area, Qiangtang Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 245-259.

[22] 李秋杭.松花江水系沉积物的重矿物组成及其影响因素分析[D].哈尔滨:哈尔滨师范大学, 2023.
Li Qiuhang. Analysis of Heavy Mineral Composition and Its Influencing Factors in Songhua River Sediments [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2023.

[23] Nothdurft L D, Webb G E, Kamber B S. Rare Earth Element Geochemistry of Late Devonian Reefal Carbonates, Canning Basin, Western Australia: Confirmation of a Seawater REE Proxy in Ancient Limestones[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2004, 68(2): 263-283.

[24] 潘世乐,蒋赟,康健,等. 柴北缘冷湖七号下干柴沟组上段古气候及物源分析[J]. 沉积学报, 2021, 39(5): 1292-1304.

Pan Shile, Jiang Yun, Kang Jian, et al. Paleoclimate and Provenance Analysis of the Upper Member of the Lower Ganchaigou Formation in Well No7, Lenghu, Northern Margin of Qaidam Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(5): 1292 - 1304.

[25] 张金亮，张鑫.塔中地区志留系砂岩元素地球化学特征与物源判别意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(11): 2990 - 3002.
Zhang Jinliang, Zhang Xin. Geochemical Characteristics of Elements and Provenance Discrimination Significance of Silurian Sandstone in Tazhong Area [J]. Lithological Journal, 2007, 23 (11) : 2990 - 3002.

[26] 刘恒福，徐云甫，李善平，等.三十九种元素的分组及元素地球化学[M].武汉：中国地质大学出版社，2017.
Liu Hengfu, Xu Yunfu, Li Shanping, et al. Compilation of Thirty-Nine Elements and Element Geochemistry [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2017.

[27] 秦何星，陈雷，卢畅，等. 上扬子南缘五峰组—龙马溪组页岩地球化学特征及其对风化、物源与构造背景的指示[J]. 地质论评, 2024, 70(4): 1314 - 1334.
Qin Hexing, Chen Lei, Lu Chang, et al. Geochemical Characteristics of Shales from the Wufeng-Longmaxi Formations at the Southern Margin of Upper Yangtze and Their Indications for Weathering, Provenance, and Tectonic Setting [J]. Geological Review, 2024, 70(4): 1314 - 1334.

[28] 蔡来星，操应长，周磊，等. 梨树断陷营城组二段物源体系特征及其对储层物性的影响[J]. 大庆石油学院学报, 2012, 36(3): 34 - 40.
Cai Laixing, Cao Yingchang, Zhou Lei, et al. Provenance System Characteristics of the Second Member of the Yingcheng Formation in the Lishu Fault Depression and Their Impact on Reservoir Properties[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2012, 36(3): 34 - 40.

[29] 张金伟，王军，吴明荣. 利用地震前积反射特征确定古水流方向的沉积几何方法[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(5): 53 - 55.
Zhang Jinwei, Wang Jun, Wu Mingrong. Sedimentary Geometry Method for Determining Paleo-Flow Direction Using Seismic Fore-Set Reflection Characteristics[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(5): 53 - 55.

[30] 王高平，王震亮，赵雪娇，等. 鄂尔多斯盆地延安地区奥陶系风化壳古地貌恢复[J].沉积学报，2013，31(4)：563 - 570.
Wang Gaoping, Wang Zhenliang, Zhao Xuejiao, et al. Restoration of Ordovician Weathered Crust Paleogeomorphology in the Yan'an Area, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013,31(4): 563 - 570.

[31] 姜素华，李金山，夏冬明，等. 剥蚀厚度恢复法在渤海湾盆地济阳坳陷孔店组应用[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版)，2011，41(4)：97 - 102.
Jiang Suhua, Li Jinshan, Xia Dongming, et al. Application of Erosion Thickness Recovery Method to the Kongdian Formation in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2011, 41(4): 97 - 102.

[32] 王建国，蒋传杰，常森，等. 克拉通盆地微古地貌恢复的构造趋势面转换法[J]. 石油学报，2017，38(1)：77 - 83，104.
Wang Jianguo, Jiang Chuanjie, Chang Sen, et al. Tectonic Trend Surface Conversion Method for Micro-Paleogeomorphology Restoration in Cratonic Basins[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(1): 77 - 83, 104.

[33] 单玄龙，热西提·亚力坤，刘培，等. 珠江口盆地西江主洼珠琼运动的沉积响应及构造意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2023，53(2)：329 - 342.
Shan Xuanlong, Rexiti Yalikun, Liu Pei, et al. Sedimentary Response and Tectonic Significance of the Zhu-Qiong Movement in the Xijiang Main Sag of the Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(2): 329 - 342.

[34] 热西提·亚力坤.西江主洼古近系洼陷结构、岩浆改造和烃源岩分布[D].长春：吉林大学，2022.
Rexiti Yalikun. Paleogene Subsag Structure, Magmatic Reformation and Source Rock Distribution in Xijiang Main Subsag [D]. Changchun: Jilin University, 2022.

[35] 郭伟，徐国强，柳保军，等. 珠江口盆地白云凹陷文昌组构造-沉积响应关系[J]. 地球科学，2022，47(7)：2433 - 2453.
Guo Wei, Xu Guoqiang, Liu Baojun, et al. Structural-Sedimentary Response Relationship of Wenchang Formation in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Earth Science, 2022,47 (7): 2433 - 2453.