

基于多元统计分析的油-源对比

——以渤海湾盆地渤东凹陷为例

郭喜浩¹,徐昉昊¹,黄晓波²,江涛²,梁浩然¹,李长志¹,李智超¹

[1. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 中海石油(中国)有限公司 天津分公司, 天津 300459]

摘要:多元统计分析可以综合考虑多个相关参数间的相互联系,在分类判别方面具有独特的优势,是多套烃源岩发育的复杂背景下油气源对比的有效方法。然而不同的多元统计方法在同一案例中的对比应用以及各自的适用性尚没有学者进行专门的研究分析。渤海湾盆地渤东凹陷发育多套烃源岩,不同构造的油气来源异常复杂,是利用多元统计分析进行油-源对比的最佳案例。综合对比主成分分析、Fisher线性判别分析以及Bayes线性判别分析的应用情况,发现主成分分析不能区分不同层位的烃源岩,因而不能用于渤东凹陷的油源对比,而Fisher和Bayes线性判别分析建立的模型可以区分不同层位的烃源岩,但都不能准确识别混源油。在Bayes判别模型得到的分类概率的基础上,通过优化Bayes判别模型的判别准则,建立了适用于渤东凹陷的油源判别模型,并识别出渤东凹陷存在4类油族,其中油族A、油族B、油族C分别来源于东营组三段(东三段)、沙一段-沙二段、沙三段烃源岩,而油族D为来源于东三段和沙一段-沙二段烃源岩的混源油。

关键词:判别模型;线性判别分析;多元统计分析;油-源对比;渤东凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Oil-source correlation based on multivariate statistical analysis: A case study of the Bodong Sag, Bohai Bay Basin

Guo Xihao¹, Xu Fanghao¹, Huang Xiaobo², Jiang Tao², Liang Haoran¹, Li Changzhi¹, Li Zhichao¹

[1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Tianjin Branch of CNOOC, Tianjin 300459, China]

Abstract: Multivariate statistical analysis can comprehensively consider the interrelationship of multiple related parameters, and is of unique advantage in classification-based identification. It is thus an effective method for oil-source correlation with multiple suites of source rocks occurring simultaneously in a zone. However, no authors have conducted special research and analysis on the comparative application and applicability of diverse multivariate statistical methods to one case. There are multiple suites of source rocks developed in the Bodong Sag, Bohai Bay Basin, and the sources of oil and gas in different structures are extremely complex, which is the best case for oil-source correlation using multivariate statistical analysis. The comparison of principal component analysis (PCA), Fisher linear discriminant analysis (LDA) and Bayes LDA in terms of application shows that PCA cannot be applied to distinguish source rocks at different horizons, so it cannot be used for oil-source correlation in the Bodong Sag. However, the models established by Fisher and Bayes LDA can do this effectively, though neither of them could accurately identify oil of mixed sources. Based on the classification probability obtained from the Bayes LDA model, a discriminant model suitable for the Bodong Sag is established with the discriminant criteria of the Bayes model optimized, and four oil families are identified in the Bodong Sag, with oil family A, B and C are derived from the source rocks of the third member of the Oligocene Dongying Formation (Ed^3), the first to second member (Es^{1-2}) and the third member (Es^3) of the Eocene Shahejie Formation, respectively, and oil family D from the source rocks of Ed^3 and Es^{1-2} .

收稿日期:2021-09-24;修订日期:2022-07-10。

第一作者简介:郭喜浩(1997—),男,硕士研究生,油气藏地质学与成藏动力学。E-mail: 419312387@qq.com。

通讯作者简介:徐昉昊(1988—),男,博士、讲师,油气藏地质学与成藏动力学。E-mail: xufanghao17@cdut.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05024-002)。

Key words: discriminant model, linear discriminant analysis (LDA), multivariate statistical analysis, oil-source correlation, Bodong Sag, Bohai Bay Basin

引用格式:郭喜浩,徐昉昊,黄晓波,等.基于多元统计分析的油-源对比——以渤海湾盆地渤东凹陷为例[J].石油与天然气地质,2022,43(5):1259-1270. DOI:10.11743/ogg20220520.

Guo Xihao, Xu Fanghao, Huang Xiaobo, et al. Oil-source correlation based on multivariate statistical analysis: A case study of the Bodong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1259-1270. DOI: 10.11743/ogg20220520.

油-源对比是油气地球化学研究的重要内容之一,同时也是油气成藏研究的基础^[1]。目前油-源对比常用的方法主要为生物标志化合物参数的二维或三维交会图法,但其涉及的生物标志物参数较少,无法同时考虑3个以上参数的影响,因此难免会存在一定的局限性,使油-源对比结果具有不确定性^[2]。多元统计分析是一种高效的数据处理方法,可以同时考虑多个生物标志化合物参数的影响^[3],从而使得油-源对比结果更具可靠性。早在20世纪80年代,多元统计分析就被应用于油气地球化学领域,主要包括聚类分析(HCA)、主成分分析(PCA)以及线性判别分析(LDA)^[2]。Jürgen Rullkötter等通过对某示例盆地原油的芳烃参数进行聚类分析,成功将原油划分为3类油族^[4];Øygard等通过分析北海油田Brent, Cook, Statfjord和Trias构造原油的芳烃参数,使用主成分分析法确定了3类不同的原油类别^[5];Zumberge等通过对全球216个原油样品的萘烷参数进行判别分析,成功将原油划分成5类^[6]。值得注意的是,聚类分析主要依靠人为设定的相似性距离来确定分类,主观性较强,是一种相对比较粗糙的油-源对比方法。相比之下,主成分分析和线性判别分析在油-源对比中的应用效果更好。然而,上述多元统计方法在同一案例的对比应用和各自的适用性及优缺点尚没有学者进行专门的研究分析。

渤海湾盆地是中国东部的第二大产油盆地^[3],原油产量占全国总产量的近三分之一^[7]。渤东凹陷位于渤海湾盆地渤中坳陷东部的渤海区域,是渤海海域重要的油气勘探区^[8]。近年来,随着勘探程度的不断提高,渤东凹陷已经发现了多个含油气构造^[9],油气显示十分活跃,呈现出良好的勘探前景。渤东凹陷发育了沙河街组三段(沙三段)、沙一段-沙二段以及东营组三段等多套烃源岩^[10],为油气成藏提供了充足的烃源基础,但同时给油-源对比带来了很大困难,表现出异常复杂的油气成藏特征。厘清原油的来源是进行油气成藏分析的前提,对下步成藏主控因素分析以及有利勘探方向预测具有重要意义。鉴于此,基于GC-MS(色谱-质谱)测试得到的各系列生物标志化合物参数,本文分析对比了主成分分析以及线性判别分析在

渤东凹陷油-源对比研究中的应用效果,探索了各类方法的适用性,并结合实际地质情况予以改进,成功揭示了不同构造的油气来源,为渤东凹陷下一步的油气勘探提供技术指导。

1 区域地质背景

渤海湾盆地是位于中国东部沿海的大型新生代沉积盆地^[11-12],面积约 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。渤东凹陷位于渤海海域渤中坳陷东部,四周被多个凸起和隆起所包围,包括胶辽隆起、庙西北凸起、庙西南凸起、渤南低凸起以及渤东低凸起,北接辽东凹陷,西邻渤中凹陷(图1),总面积约3850 km²。渤海湾盆地的两条大型走滑断裂带——北西西向张蓬断裂带和北北东向郯庐走滑断裂带在研究区交汇发育^[13],其中郯庐走滑断裂带贯穿全区,形成了以北北东向和北东向为主的断裂体系,同时使得渤东凹陷整体走向呈北北东向,内部发育了多个次级洼陷。

新生代渤东凹陷的构造-沉积演化可划分为2个主要阶段,即裂陷阶段(65.0~24.6 Ma)和拗陷阶段(24.6 Ma)^[2]。裂陷阶段的沉积序列自下而上包括古近系孔店组(Ek)、沙河街组(Es)和东营组(Ed),以湖泊相和陆相三角洲沉积为主^[14]。一般认为,在古近纪裂陷期发育了多套优质烃源岩,主要包括东三段(Ed³)、沙一段-沙二段(Es¹⁻²)和沙三段(Es³)^[15-16],这3套烃源岩分布面积较广,有机质丰度较高,均具有一定的生烃潜力,其中沙三段和沙一段-沙二段烃源岩以I-II₁型干酪根为主,东三段烃源岩以II₁-III型干酪根为主^[17]。拗陷阶段的沉积序列自下而上包括新近系馆陶组(Ng)和明化镇组(Nm)以及第四系平原组(Qp),其中新近系以湖泊相和浅水三角洲相沉积为主^[18],第四系以河流相沉积为主^[19]。

2 样品与实验

2.1 样品概况

为比较不同烃源岩层段的生物标志化合物特征差

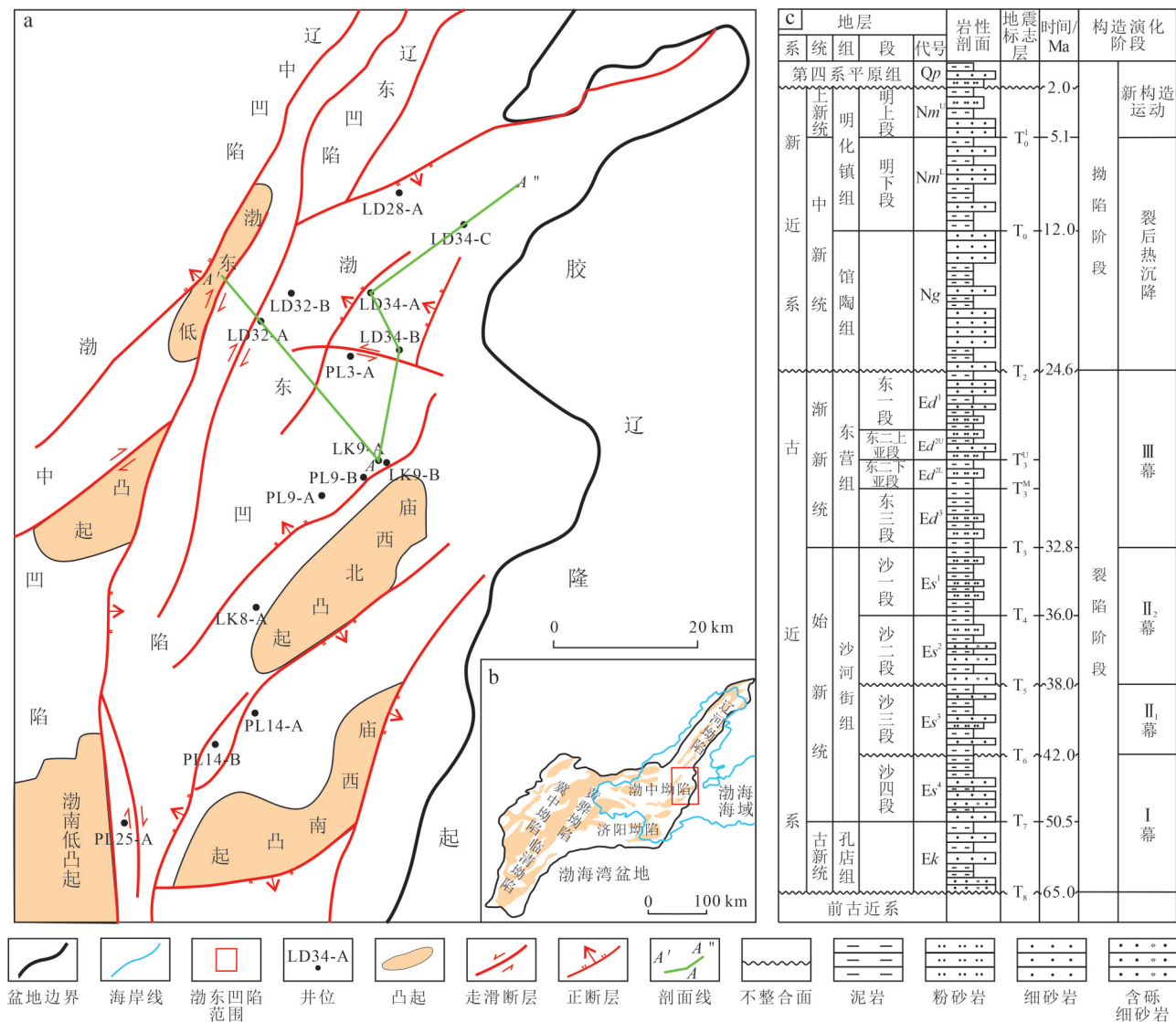


图1 渤海湾盆地渤东凹陷构造单元特征及地层综合柱状图

Fig. 1 Location, structural units and comprehensive stratigraphic column of the Bodong Sag, Bohai Bay Basin

a. 构造单元特征; b. 渤东凹陷在渤海湾盆地中的构造位置; c. 地层综合柱状图

异,此次研究分别从渤东凹陷东三段、沙一段、沙二段和沙三段共取了34个泥岩样品。另外,从渤东凹陷LD28,LD32,LD34等7个构造共取了28个原油样品,用来研究不同构造原油的来源。

2.2 气相色谱-质谱分析

本次气相GC-MS分析在中国海洋石油总公司天津分公司实验室中心进行。具体步骤为:先将泥岩样品清洗后磨成粉末,经氯仿/甲醇(87:13)进行索氏抽提72 h,并采用柱层析的方法将抽提物和原油样品分离为饱和烃、芳香烃和胶质等族组分;然后使用HP6890GC/5973MSD仪器对提取物和原油样品的饱和烃组分进行气相色谱-质谱分析,仪器配备HP-5MS石英毛细管柱(30 m×0.25 mm×25 μm),以氦气作

为载气。升温程序设置为50℃停留2 min,然后以20℃/min升温至100℃,之后以3℃/min升温至310℃,停留16.5 min。质谱仪在全扫描和选择离子扫描两种模式下操作,根据保留时间和峰型特征识别化合物,并由单个化合物的峰面积计算生物标志化合物比率。

3 多元统计方法对比与选择

油-源对比的前提条件是存在多套烃源岩且具有各自明显的特征^[2],因此,油-源对比方法的选择首先应考虑其是否能根据各类生物标志化合物参数有效区分各套烃源岩。此次研究分别探讨多元统计分析中主成分分析、Fisher线性判别分析以及Bayes线性判别分

析等方法在渤东凹陷油源对比中的适用性。

前人在进行渤东凹陷临近区域的油-源对比中发现,4-MSI(4-甲基甾烷/ Σ C₂₉甾烷)、ETR[ETR=(C₂₈甾烷+C₂₉甾烷)/(C₂₈甾烷+C₂₉甾烷+Ts)]、Gam/C₃₀H(伽马蜡烷/C₃₀藿烷)、C₁₉TT/C₂₃TT(C₁₉三环萜烷/C₂₃三环萜烷)、C₂₁TT/C₂₃TT(C₂₁三环萜烷/C₂₃三环萜烷)、TT/C₃₀H(三环萜烷/C₃₀藿烷)、C₂₃TT/C₃₀H(C₂₃三环萜烷/C₃₀藿烷)、Gam/C₂₄Tet(伽马蜡烷/C₂₄四环萜烷)和Gam/C₃₁H(S+R)[伽马蜡烷/C₃₁藿烷(S+R)]等9个生物标志化合物

物参数可以有效反映各套烃源岩之间的母质来源和沉积环境差异^[20-23],鉴于此,此次研究采用这些参数进行多元统计分析。渤东凹陷烃源岩的主要生物标志化合物参数特征如表1所示。

3.1 主成分分析

主成分分析是一种用于特征提取和线性降维的无监督学习方法,能够通过线性变换将多元数据集转换为一组不相关的、最大限度反映原始数据集大部分信

表1 渤东凹陷烃源岩生物标志化合物参数

Table 1 Biomarker parameters of source rock samples from the Bodong Sag

井号	深度/m	层位	Pr/Ph	ETR	$\frac{\text{Gam}}{\text{C}_{30}\text{H}}$	4-MSI	$\frac{\text{TT}}{\text{C}_{30}\text{H}}$	$\frac{\text{C}_{19}\text{TT}}{\text{C}_{23}\text{TT}}$	$\frac{\text{C}_{21}\text{TT}}{\text{C}_{23}\text{TT}}$	$\frac{\text{Gam}}{\text{C}_{24}\text{Tet}}$	$\frac{\text{C}_{23}\text{TT}}{\text{C}_{30}\text{H}}$	$\frac{\text{Gam}}{\text{C}_{31}\text{H}(\text{S} + \text{R})}$
LD28-A	2 920 ~ 2 930	Ed ³	1.88	0.26	0.03	0.11	0.14	2.48	1.87	1.25	0.01	0.07
LD28-A	2 960 ~ 2 970	Ed ³	1.89	0.21	0.04	0.10	0.09	0.53	1.22	1.95	0.01	0.11
LD34-A	2 850 ~ 2 860	Ed ³	1.50	0.11	0.10	0.06	0.04	0.31	0.77	3.61	0.01	0.31
PL14-A	3 200 ~ 3 210	Ed ³	1.06	0.25	0.06	0.09	0.07	0.60	0.80	2.33	0.01	0.20
PL14-A	3 400 ~ 3 410	Ed ³	1.02	0.11	0.07	0.10	0.07	0.45	0.86	2.64	0.01	0.19
PL14-A	3 600 ~ 3 610	Ed ³	0.84	0.12	0.09	0.12	0.12	0.55	1.01	2.03	0.02	0.24
PL14-A	3 700 ~ 3 715	Ed ³	0.97	0.15	0.11	0.12	0.19	0.49	1.13	2.63	0.03	0.29
PL14-B	2 740 ~ 2 760	Ed ³	1.62	0.11	0.07	0.11	0.07	0.53	0.89	2.51	0.01	0.20
PL14-B	2 760 ~ 2 780	Ed ³	1.45	0.11	0.08	0.12	0.06	0.63	0.97	2.89	0.01	0.21
LD28-A	3 000 ~ 3 010	Es ¹⁻²	1.34	0.32	0.07	0.13	0.40	0.38	0.99	1.80	0.07	0.19
LD34-A	2 930 ~ 2 940	Es ¹⁻²	0.57	0.44	0.33	0.12	0.22	0.07	0.69	7.30	0.05	1.20
LD34-C	2 030 ~ 2 040	Es ¹⁻²	1.25	0.41	0.31	0.16	0.23	0.17	1.03	15.96	0.04	1.81
LD34-C	2 080 ~ 2 090	Es ¹⁻²	1.31	0.41	0.29	0.17	0.41	0.20	0.88	10.97	0.09	1.46
LD34-C	2 110 ~ 2 120	Es ¹⁻²	0.99	0.59	0.33	0.14	0.44	0.11	0.89	11.69	0.08	0.95
LD34-C	2 140 ~ 2 150	Es ¹⁻²	0.47	0.37	0.21	0.16	0.59	0.33	1.42	4.56	0.09	0.44
LK8-A	2 670 ~ 2 680	Es ¹⁻²	0.52	0.56	0.23	0.18	1.08	0.10	0.88	2.71	0.19	0.78
LK9-A	2 170 ~ 2 180	Es ¹⁻²	1.73	0.17	0.06	0.16	0.08	0.07	1.00	5.07	0.01	0.19
LK9-A	2 240 ~ 2 250	Es ¹⁻²	0.94	0.59	0.25	0.15	0.65	0.09	0.71	5.39	0.14	0.83
PL3-A	2 410 ~ 2 420	Es ¹⁻²	1.62	0.11	0.12	0.08	0.06	0.48	1.02	5.13	0.01	0.26
PL3-A	2 460 ~ 2 470	Es ¹⁻²	1.43	0.12	0.14	0.11	0.06	0.32	0.91	4.66	0.01	0.38
PL9-A	2 630 ~ 2 640	Es ¹⁻²	2.19	0.16	0.10	0.11	0.03	0.33	1.06	7.38	0.01	0.26
PL14-A	3 815 ~ 3 825	Es ¹⁻²	1.23	0.28	0.09	0.09	0.34	0.35	1.18	2.52	0.06	0.26
PL14-A	3 888 ~ 3 891	Es ¹⁻²	1.04	0.12	0.08	0.09	0.09	0.53	0.94	2.47	0.02	0.20
PL14-A	2 840 ~ 2 860	Es ¹⁻²	0.96	0.15	0.12	0.15	0.13	0.28	0.96	3.68	0.03	0.35
LD34-B	2 200 ~ 2 210	Es ³	1.52	0.45	0.21	0.17	0.33	0.15	0.96	7.23	0.06	0.53
LD34-B	2 250 ~ 2 260	Es ³	1.71	0.48	0.21	0.23	0.37	0.30	1.11	6.43	0.06	0.55
LD34-B	2 350 ~ 2 360	Es ³	1.30	0.39	0.12	0.14	0.25	0.31	0.87	4.39	0.04	0.22
LD34-B	2 370 ~ 2 380	Es ³	1.39	0.34	0.17	0.15	0.29	0.13	0.87	5.54	0.06	0.34
LD34-C	2 180 ~ 2 190	Es ³	0.70	0.48	0.21	0.18	1.00	0.15	0.76	2.98	0.26	0.50
LD34-C	2 200 ~ 2 210	Es ³	1.59	0.22	0.16	0.09	1.25	0.16	0.81	1.91	0.34	0.42
PL9-A	2 830 ~ 2 840	Es ³	0.61	0.51	0.18	0.17	0.48	0.08	0.81	2.74	0.13	0.61
PL25-A	1 653 ~ 1 656	Es ³	0.21	0.56	0.14	0.19	1.02	0.27	0.42	1.27	0.20	0.29
PL25-A	1 887 ~ 1 890	Es ³	0.23	0.61	0.13	0.28	1.20	0.03	0.50	1.28	0.26	0.30
PL25-A	1 974 ~ 1 977	Es ³	0.27	0.59	0.11	0.14	0.73	0.02	0.44	1.47	0.16	0.35

息的新变量^[24-26],称为“主成分”,其常被应用在油气地球化学相关研究中^[27-28]。

为了检验主成分分析的适用性,此次研究首先对不同层位烃源岩样品的生物标志化合物数据集进行了主成分分析。在实际应用中,通常认为特征值大于1的主成分最有用,并且当主成分的累计贡献率超过85.00%时,便能反映原始数据的大部分信息^[29]。因此,此次研究提取了前3个主成分(PC1,PC2和PC3)来进行油-源对比,这3个主成分均满足特征值大于1并且累积贡献率达86.17%(图2),可以充分表征渤东凹陷不同层位烃源岩样品的地球化学特征。基于主成分分析的因子得分图表明(图3),东三段和沙三段烃源岩样品得到了有效分离,效果较为明显,但沙一段-沙二段烃源岩样品分布较为分散,与东三段和沙三段烃源岩样品间的相关性较强,区分效果差,因此主成分分析无法适用于渤东凹陷后续的油-源对比。

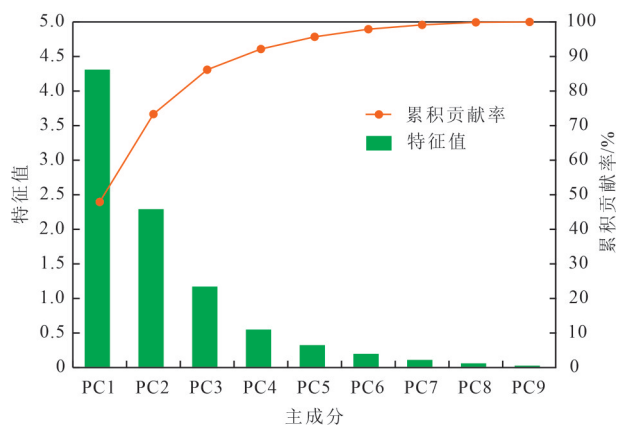


图2 渤东凹陷烃源岩样品各主成分特征值与累积贡献率

Fig. 2 Eigenvalues and cumulative contribution rates of principal components in the source rocks from the Bodong Sag

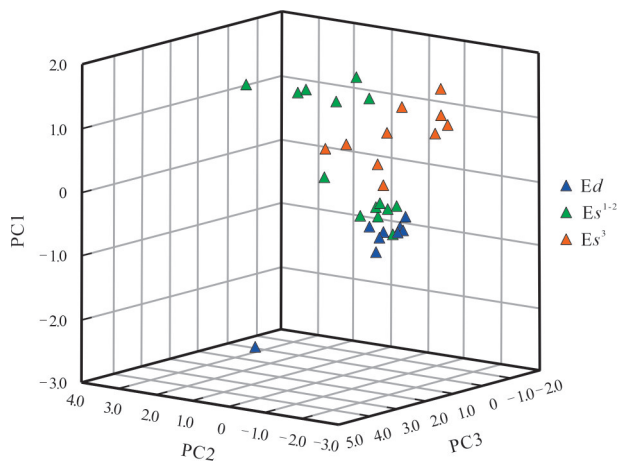


图3 渤东凹陷烃源岩样品主成分分析的因子得分图

Fig. 3 Factor score diagram for principal component analysis of source rock samples taken from the Bodong Sag

3.2 Fisher线性判别分析

Fisher线性判别分析是一种有监督型的线性降维方法^[30],其基本原理是:利用Fisher准则找到最佳的投影方向,使得投影后的样品在组间具有最大的差异,在组内具有最小的差异^[31],从而达到样品类别最佳的分离效果。相比之下,主成分分析没有考虑样品类别之间的差异,因此Fisher线性判别分析更适用于分类^[2]。Fisher线性判别分析的基本思想是:根据一系列已知类别的样品集作为训练集来建立判别函数模型,再利用得到的判别函数模型来判别未知的样品^[32]。

此次研究将渤东凹陷34个烃源岩样品的生物标志化合物数据集作为训练集,同时将东三段、沙一段-沙二段和沙三段烃源岩作为分组变量,利用IBM SPSS Statistics软件进行Fisher线性判别分析,得到2个典型判别函数。通过绘制典型判别函数的组质心图(图4),发现东三段、沙一段-沙二段和沙三段烃源岩样品被有效分离,各组烃源岩之间的界限较为明显,说明基于Fisher线性判别分析的烃源岩分类判别效果明显优于主成分分析法。此外,为检查判别函数模型的可靠性,对烃源岩样品进行了总体验证(即用所有烃源岩样品数据得到的判别函数模型对每一个烃源岩样品进行验证)。经计算,总体验证正确率为85.3%(表2),表明该判别函数模型具有一定的可靠性,可以应用于研究区的油-源对比。

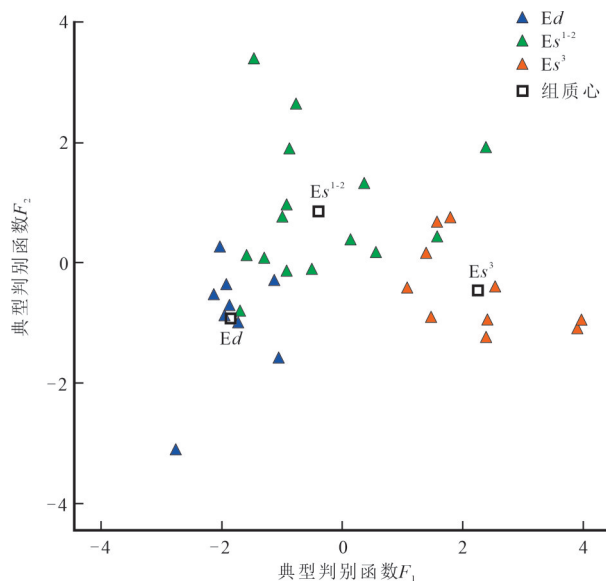


图4 基于Fisher线性判别分析的渤东凹陷烃源岩样品典型判别函数组质心图

Fig. 4 Group centroid map of typical discriminant function based on Fisher linear discriminant analysis for the source rock samples from the Bodong Sag

表2 渤东凹陷烃源岩样品 Fisher 线性判别分析和 Bayes 线性判别分析的总体验证结果

Table 2 Overall verification results of Fisher and Bayes linear discriminant analyses for the source rock samples from the Bodong Sag

判别方法	实测类别	预测类别计数/个			正确率/%	
		东三段	沙一段-沙二段	沙三段	分类	平均
Fisher	东三段	9	0	0	100.0	
	沙一段-沙二段	3	10	2	66.7	85.3
	沙三段	0	0	10	100.0	
Bayes	东三段	8	1	0	88.9	
	沙一段-沙二段	1	12	2	80.0	88.2
	沙三段	0	0	10	100.0	

3.3 Bayes 线性判别分析

Bayes 线性判别分析同样也是一种有效的分类工具,通过 Bayes 准则,建立判别函数模型并计算每个样品的分类概率,以最大分类概率预测样品的类别,并使得判别分类具有最小的错判率^[33]。

利用 IBM SPSS Statistics 软件对渤东凹陷烃源岩样品的生物标志化合物数据集进行 Bayes 线性判别分析,建立了分类判别模型,该模型的总体验证正确率可达 88.2%(表 2),可靠性高。将 Bayes 线性判别分析得到的分类概率绘制成三元图(图 5),同样可以看出,东三段、沙一段-沙二段和沙三段烃源岩样品得到了有效分离,这表明 Bayes 判别模型可以用于研究区的油-源对比。

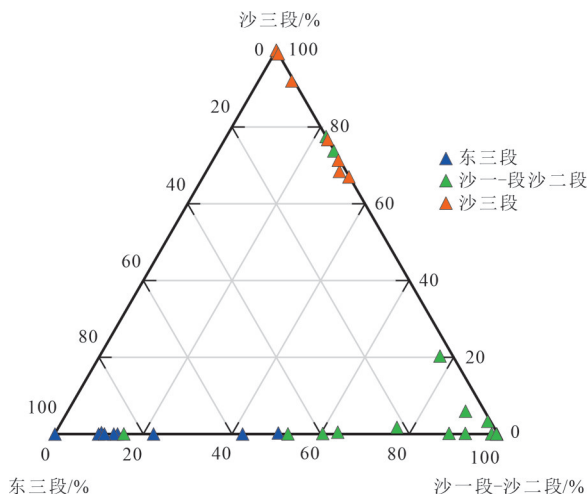


图5 渤东凹陷烃源岩样品分类概率三元图

Fig. 5 Ternary diagram of classification probability of source rock samples from the Bodong Sag

4 油源判别标准的建立及判别结果

上述研究论证了 Fisher 线性判别分析和 Bayes 线性判别分析均能适用于渤东凹陷的油-源对比,下步将同时采用这两种方法进行油源判别并对比分析其判别效果。

基于渤东凹陷烃源岩样品的生物标志化合物数据集, Fisher 线性判别分析得到了如下两个典型判别函数:

$$F_1 = 0.345 \times \frac{\text{Gam}}{C_{24}\text{Tet}} - 4.708 \times \frac{\text{Gam}}{C_{31}\text{H}(S+R)} + 8.539 \times \text{ETR} + 7.126 \times 4 - \text{MSI} + 52.621 \times \frac{C_{23}\text{TT}}{C_{30}\text{H}} - 10.896 \times \frac{\text{TT}}{C_{30}\text{H}} + 1.464 \times \frac{\text{Gam}}{C_{30}\text{H}} - 0.854 \times \frac{C_{19}\text{TT}}{C_{23}\text{TT}} + 0.221 \times \frac{C_{21}\text{TT}}{C_{23}\text{TT}} - 3.209 \quad (1)$$

$$F_2 = 0.096 \times \frac{\text{Gam}}{C_{24}\text{Tet}} - 1.188 \times \frac{\text{Gam}}{C_{31}\text{H}(S+R)} - 2.626 \times \text{ETR} - 5.084 \times 4 - \text{MSI} - 30.952 \times \frac{C_{23}\text{TT}}{C_{30}\text{H}} + 8.322 \times \frac{\text{TT}}{C_{30}\text{H}} + 2.034 \times \frac{\text{Gam}}{C_{30}\text{H}} - 2.351 \times \frac{C_{19}\text{TT}}{C_{23}\text{TT}} + 2.573 \times \frac{C_{21}\text{TT}}{C_{23}\text{TT}} - 1.978 \quad (2)$$

将渤东凹陷不同构造的原油样品生物标志化合物参数代入典型判别函数得到点坐标(F_1, F_2),然后计算并比较该点与各套烃源岩组质心之间的距离,并取距离最短的作为判别分类。基于 Fisher 线性判别分析,

渤东凹陷原油样品的判别结果如表 3 所示。

基于渤东凹陷烃源岩样品的生物标志化合物数据集, Bayes 线性判别分析得到了如下 3 个分类判别函数:

$$Y_1 = 0.115 \times \frac{\text{Gam}}{C_{24}\text{Tet}} - 6.387 \times \frac{\text{Gam}}{C_{31}\text{H}(S+R)} + 28.463 \times \text{ETR} + 55.976 \times 4 - \text{MSI} + 227.626 \times \frac{C_{23}\text{TT}}{C_{30}\text{H}} - 56.115 \times \frac{\text{TT}}{C_{30}\text{H}} + 6.962 \times \frac{\text{Gam}}{C_{30}\text{H}} - 6.099 \times \frac{C_{19}\text{TT}}{C_{23}\text{TT}} + 28.384 \times \frac{C_{21}\text{TT}}{C_{23}\text{TT}} - 17.881 \quad (3)$$

$$Y_2 = 0.783 \times \frac{\text{Gam}}{C_{24}\text{Tet}} - 11.083 \times \frac{\text{Gam}}{C_{31}\text{H}(S+R)} + 36.148 \times \text{ETR} + 57.254 \times 4 - \text{MSI} + 248.775 \times \frac{C_{23}\text{TT}}{C_{30}\text{H}} - 57.098 \times \frac{\text{TT}}{C_{30}\text{H}} + 12.687 \times \frac{\text{Gam}}{C_{30}\text{H}} - 11.505 \times \frac{C_{19}\text{TT}}{C_{23}\text{TT}} + 33.269 \times \frac{C_{21}\text{TT}}{C_{23}\text{TT}} - 23.839 \quad (4)$$

$$Y_3 = 1.572 \times \frac{\text{Gam}}{C_{24}\text{Tet}} - 25.124 \times \frac{\text{Gam}}{C_{31}\text{H}(S+R)} + 62.229 \times \text{ETR} + 82.795 \times 4 - \text{MSI} + 428.775 \times \frac{C_{23}\text{TT}}{C_{30}\text{H}} - 96.868 \times \frac{\text{TT}}{C_{30}\text{H}} + 13.916 \times \frac{\text{Gam}}{C_{30}\text{H}} - 10.702 \times \frac{C_{19}\text{TT}}{C_{23}\text{TT}} + 30.498 \times \frac{C_{21}\text{TT}}{C_{23}\text{TT}} - 32.381 \quad (5)$$

同样将渤东凹陷不同构造原油的生物标志化合物参数代入上述的分类判别函数分别进行计算,并比较函数值的大小,若 Y_1 值最大,则认为油样来源于东三段烃源岩;若 Y_2 值最大,则认为油样来源于沙一段-沙二段烃源岩;若 Y_3 值最大,则认为油样来源于沙三段烃源岩。此外还可以通过计算分类概率来判别类别,哪一类的分类概率最大则判别为哪一类,两种判别方法得到的判别结果均一致。基于Bayes线性判别分析,渤东凹陷原油样品的判别结果如表3所示。

对比这两种线性判别分析得出的结果,可知除

LD32-A井2388 m深度的样品外,基于Fisher判别分析和Bayes判别分析得到的油样分类结果均一致。值得注意的是:基于Bayes判别模型可知,LD32-A井2388 m深度原油样品来源于东三段烃源岩的分类概率为0.42,来源于沙一段-沙二段烃源岩的分类概率为0.52,两种类别的分类概率均较大,说明该原油样品应同时具有东三段和沙一段-沙二段烃源岩的贡献,但该模型只以最大分类概率作为判别分类标准。不管是Fisher判别模型还是Bayes判别模型,模型给出的判别分类结果都是单一油源,无法判断多油源混合情况。

表3 渤东凹陷烃源岩样品Fisher判别模型与Bayes判别模型的判别结果

Table 3 Classification results based on the Fisher and Bayes discriminant models for the source rock samples from the Bodong Sag

井号	深度/m	层位	Fisher判别分析			Bayes判别分析							油族
			F_1	F_2	分类	Y_1	Y_2	Y_3	概率1	概率2	概率3	分类	
LD28-A	2 530	Ng	2.22	0.28	3	29.87	35.37	38.27	0	0.05	0.95	3	C
LD32-A	2 388	Ng	-0.28	-0.89	1	12.42	12.57	10.35	0.42	0.52	0.06	2	D
LD32-A	2 662	Ng	0.90	-1.17	3	15.06	16.40	17.69	0.05	0.20	0.75	3	C
LD32-A	2 745	Ng	1.74	-0.80	3	17.64	20.81	23.84	0	0.04	0.95	3	C
LD32-A	2 917	Ed ^{2U} -Ed ^I	1.59	-0.49	3	16.11	19.60	21.81	0	0.10	0.90	3	C
LD32-B	2 792	Ed ^{2U} -Ed ^I	-1.70	-1.37	1	15.30	12.53	7.20	0.94	0.06	0	1	A
LD32-B	2 909	Ed ^{2U} -Ed ^I	-0.33	-1.68	1	21.33	19.96	18.67	0.74	0.21	0.06	1	A
LD34-A	2 417	Ed ^{2U} -Ed ^I	-0.55	-0.99	1	11.18	10.72	7.93	0.58	0.40	0.02	1	D
LD34-A	2 634	Ed ³ -Ed ^{2L}	-2.55	1.16	2	10.42	10.67	-0.23	0.36	0.64	0	2	D
LD34-B	1 971	Ed ^{2U} -Ed ^I	5.04	-1.88	3	41.93	47.88	61.10	0	0	1.00	3	C
LD34-B	2 142	Ed ³ -Ed ^{2L}	3.94	0.57	3	28.29	36.74	43.83	0	0	1.00	3	C
LD34-B	2 364	Es ³	1.43	-0.21	3	20.08	23.75	25.18	0	0.19	0.81	3	C
LD34-C	2 131	Es ¹⁻²	-0.40	-0.63	2	15.31	15.67	12.82	0.36	0.60	0.04	2	D
LD34-C	2 150	Es ¹⁻²	-0.45	-0.40	2	14.32	15.02	11.74	0.29	0.68	0.03	2	D
LK8-A	1 845	Ng	-1.51	-1.26	1	10.94	8.64	3.66	0.90	0.10	0	1	A
LK8-A	1 963	Ng	-2.59	-1.46	1	5.80	1.62	-5.97	0.98	0.02	0	1	A
LK8-A	1 963	Ng	-2.46	-2.12	1	7.57	2.39	-4.00	0.99	0.01	0	1	A
LK9-A	1 292	Nm ^L	-1.83	-0.87	1	7.32	5.26	-1.08	0.88	0.12	0	1	A
LK9-A	1 293 ~ 1 309	Nm ^L	-2.57	-0.94	1	7.32	5.26	-1.08	0.88	0.12	0	1	A
LK9-A	1 308	Nm ^L	-2.93	-1.04	1	4.94	0.99	-8.05	0.98	0.02	0	1	A
LK9-A	1 515	Ng	-3.27	-0.46	1	13.14	9.74	-0.97	0.97	0.03	0	1	A
LK9-A	2 211	Es ¹⁻²	4.51	1.21	3	30.85	41.02	48.76	0	0	1.00	3	C
LK9-B	1 773	Ed ²	-1.97	3.00	2	12.16	16.62	4.85	0.01	0.99	0	2	B
PL3-A	1 709	Ng	-1.11	0.38	2	11.62	12.68	6.61	0.22	0.78	0	2	B
PL3-A	2 234	Ed ^{2U} -Ed ^I	-0.56	0.60	2	16.44	18.64	13.73	0.08	0.91	0.01	2	B
PL3-A	2 256	Ed ^{2U} -Ed ^I	-1.21	0.72	2	17.07	18.63	11.85	0.15	0.85	0	2	B
PL9-A	2 455	Ed ^{2U} -Ed ^I	-1.82	-0.58	1	13.52	11.92	5.24	0.81	0.19	0	1	A
PL9-B	1 675 ~ 1 700	Ng	-3.53	-0.46	1	7.92	4.10	-7.29	0.98	0.02	0	1	A

注:表中分类列的1代表东三段,2代表沙一段-沙二段,3代表沙三段。

为改善线性判别分析在渤东凹陷油-源对比的应用效果,考虑到 Bayes 判别分析辨别烃源岩的准确率更高,此次研究以 Bayes 判别模型为例,基于分类概率的概念,对判别模型的判别准则进行了改进,使其可以适用于多源混合情况下的油源对比分析研究。改进的判别准则如下:

- 1) 若样品类别1的分类概率 $\geq 50\%$,且类别2和类别3的分类概率均 $\leq 25\%$ 时,则将该样品判别为类别1。
- 2) 若样品类别1和类别2的分类概率均 $> 25\%$,且类别3的分类概率 $\leq 25\%$ 时,则将该样品判别为类别1和类别2的混合。
- 3) 若样品类别1、类别2和类别3的分类概率均 $> 25\%$,则将该样品判别为类别1、类别2和类别3的混合。

基于上述改进的判别准则可以将分类概率三元图划分为7个大区(图6),分别为I区(Ed^3 区)、II区(Es^{1-2} 区)、III区(Es^3 区)、IV区(Ed^3 与 Es^{1-2} 双混源区)、V区(Es^{1-2} 和 Es^3 双混源区)、VI区(Es^3 与 Es^{1-2} 双混源区)以及VII区(Ed^3 , Es^{1-2} 与 Es^3 三混源区)。渤东凹陷的原油样品主要位于I区、II区、III区和IV区,因此可以将油样划分为4类油族,即油族A、油族B、油族C和油族D。油族A包括LD32-B井、PL9-A井、PL9-B井、LK8-A井的所有油样以及LK9-A井的馆陶组-明化镇组下段油样(表3),油源判别结果为东三段烃源岩;油族B包括LK9-B井和PL3-A井的油样,油源判别结果为沙一段-沙二段烃源岩;油族C包括LD28-A井和LD34-B井的油样、LK9-A井沙河街组的油样以及LD32-A井的部分油样,油源判别结果为沙三段烃源岩;油族D包

括LD34-A井和LD34-C井的油样以及LD32-A井的部分油样,油源判别结果为东三段与沙一段-沙二段烃源岩。

5 油源判别结果

为检验油源判别结果是否具有地质意义,通过多元统计分析所使用的主要生物标志化合物参数,对不同层位烃源岩和各油族的地球化学特征进行了详细的分析,并根据构造等资料分析了原油充注过程。

5.1 地球化学分析

5.1.1 烃源岩地球化学特征

在渤海湾盆地的分子地球化学研究中,伽马蜡烷指数($Gam/C_{30}H$)和长链三环萜烷指数 ETR 常被用于指示地层沉积时期的水体盐度, $Gam/C_{30}H$ 高值和 ETR 高值均代表沉积环境盐碱度高^[34-35]。也有学者使用 $Gam/C_{31}H(S+R)$ 和 $Gam/C_{24}Tet$ 来衡量沉积水体的盐度^[22,24],比值越大代表沉积水体盐度越高。渤东凹陷东三段烃源岩的 $Gam/C_{30}H$, ETR , $Gam/C_{31}H(S+R)$ 和 $Gam/C_{24}Tet$ 平均值明显低于沙一段-沙二段和沙三段烃源岩(图7a—d),表明东三段烃源岩沉积于水体盐度较低的淡水湖泊环境,而沙一段-沙二段和沙三段烃源岩沉积于水体盐度较高的碱性湖泊环境。

萜烷可以反映沉积环境以及母质来源^[20],通常认为 C_{23} 三环萜烷优势指示丰富的藻类贡献,而 C_{19} 三环萜烷或 C_{21} 三环萜烷优势则指示高的陆源有机质输入^[36],因此 $C_{19}TT/C_{23}TT$ 比值或 $C_{21}TT/C_{23}TT$ 比值可反映母质来源,比值越高代表陆源有机质输入越多。渤东凹陷东三段烃源岩具有很高的 $C_{19}TT/C_{23}TT$ 比值和较高的 $C_{21}TT/C_{23}TT$ 比值(图7e, f),表明陆源有机质输入量大;沙一段-沙二段烃源岩具有较低的 $C_{19}TT/C_{23}TT$ 比值和稍低的 $C_{21}TT/C_{23}TT$ 比值,表明陆源有机质输入较少;沙三段烃源岩的 $C_{19}TT/C_{23}TT$ 比值和 $C_{21}TT/C_{23}TT$ 比值最少,表明陆源有机质输入相对前两者更少。此外, $TT/C_{30}H$ 比值和 $C_{23}TT/C_{30}H$ 比值也是重要的母源参数,可用于比较细菌或藻类与原核生物的相对贡献^[37]。渤东凹陷东三段烃源岩具有非常低的 $TT/C_{30}H$ 比值和 $C_{23}TT/C_{30}H$ 比值(图7g, h),表明菌藻类贡献小;沙一段-沙二段烃源岩具有较低-较高的 $TT/C_{30}H$ 比值和 $C_{23}TT/C_{30}H$ 比值,表明菌藻类贡献中等;沙三段烃源岩具有高的 $TT/C_{30}H$ 比值和 $C_{23}TT/C_{30}H$ 比值,表明菌藻类贡献大。

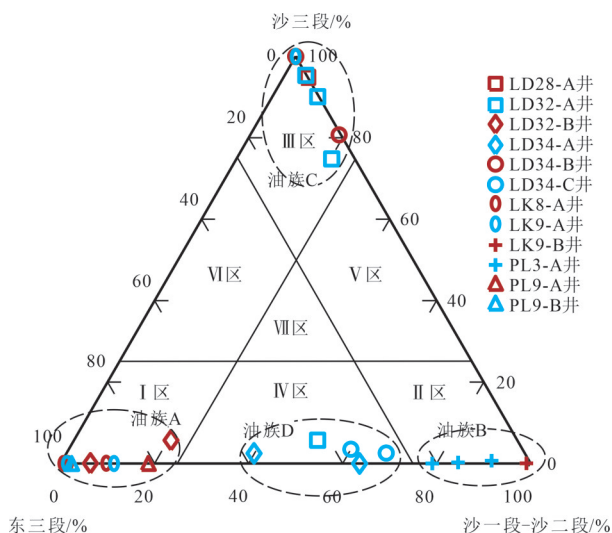


图6 渤东凹陷油样分类概率三元图

Fig. 6 Ternary diagram of classification probability of oil samples from the Bodong Sag

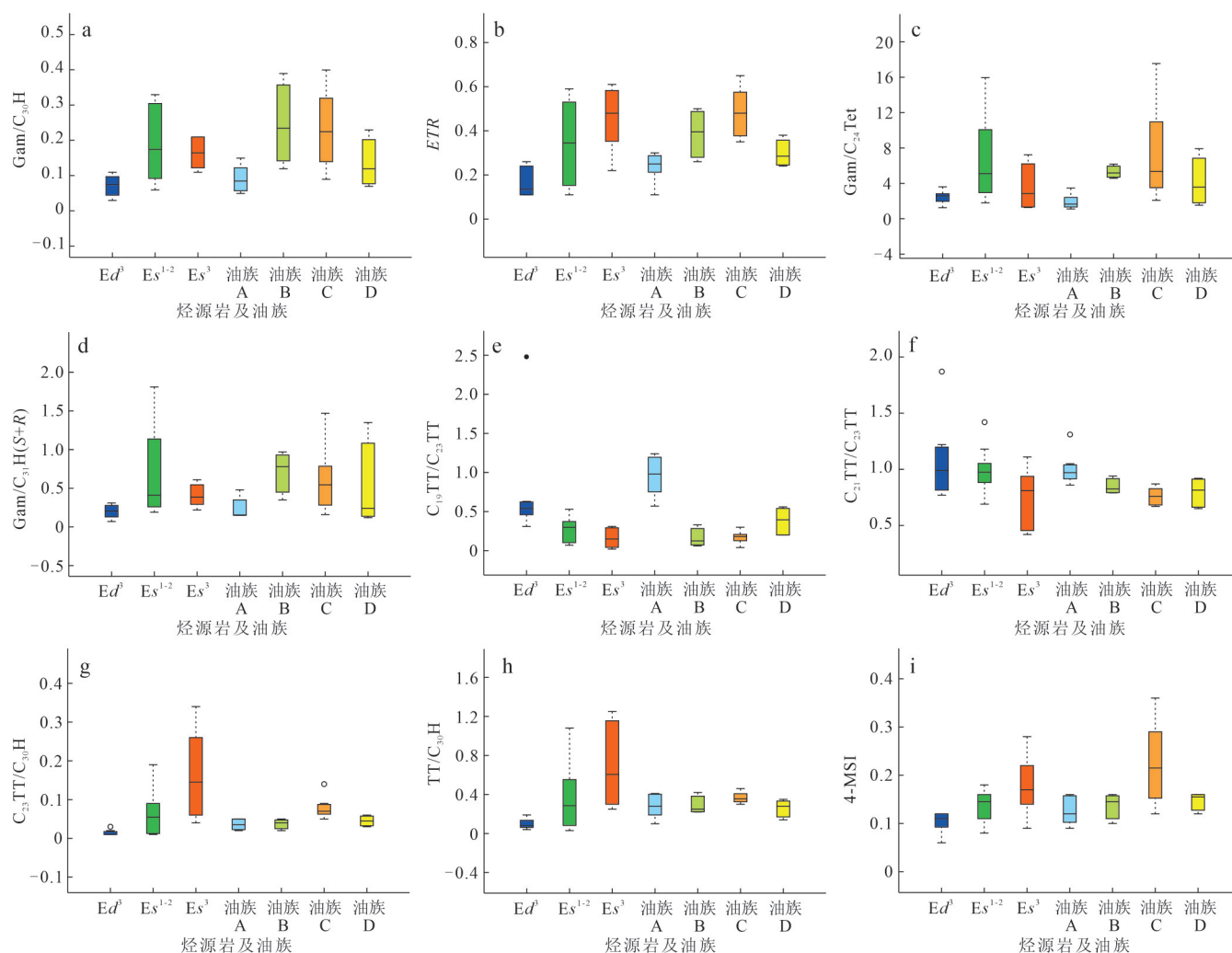


图7 渤东凹陷各烃源岩和油族的生物标志化合物参数箱状图

Fig. 7 Box plots of biomarker parameters for the source rocks and oil families from the Bodong Sag

a. Gam/C₃₀H; b. ETR; c. Gam/C₂₄Tet; d. Gam/C₃₁H(S+R); e. C₁₉TT/C₂₃TT; f. C₂₁TT/C₂₃TT; g. C₂₃TT/C₃₀H; h. TT/C₃₀H; i. 4-MSI

甾烷同样可以反映母质来源,在渤海湾盆地常使用4-MSI来指示丰富的沟鞭藻贡献^[23]。渤东凹陷从东三段到沙三段,4-MSI值逐渐升高,表明沟鞭藻的生源贡献逐渐增大(图7i)。

5.1.2 原油地球化学特征

油族A具有最低的Gam/C₃₀H比值、最低的ETR值、最低的Gam/C₂₄Tet比值、最低的Gam/C₃₁H(S+R)比值、最高的C₁₉TT/C₂₃TT比值、最高的C₂₁TT/C₂₃TT比值、较高的C₂₃TT/C₃₀H比值和较低的4-MSI值(图7),反映烃源岩沉积于淡水湖泊环境,陆源有机质输入很多而沟鞭藻贡献较小,与东三段烃源岩具有良好的相关性,吻合度较高。

油族B表现出最高的Gam/C₃₀H比值、较高的ETR值、较高的Gam/C₂₄Tet比值、较高的Gam/C₃₁H(S+R)比值、较低的C₁₉TT/C₂₃TT比值、较低的C₂₁TT/C₂₃TT比值、

较低的C₂₃TT/C₃₀H比值和较低的4-MSI值(图7),反映烃源岩沉积于碱性湖泊环境,陆源有机质输入少,沟鞭藻贡献均较小,与沙一段-沙二段烃源岩具有良好的相关性,吻合度较高。

油族C整体上表现出较高的Gam/C₃₀H比值、最高的ETR值、最高的Gam/C₂₄Tet比值、较高的Gam/C₃₁H(S+R)比值、较低的C₁₉TT/C₂₃TT比值、最低的C₂₁TT/C₂₃TT比值、较高的C₂₃TT/C₃₀H比值和最高的4-MSI值(图7),反映烃源岩沉积于碱性湖泊,陆源有机质输入很少而沟鞭藻贡献很大,这与沙三段烃源岩具有良好的相关性,吻合度较高。

油族D整体上表现出较低-较高的Gam/C₃₀H比值、较低-较高的ETR值、较低-较高的Gam/C₂₄Tet比值、低-高的Gam/C₃₁H(S+R)比值、较低-较高的C₁₉TT/C₂₃TT比值、中等的C₂₁TT/C₂₃TT比值、中等的C₂₃TT/C₃₀H比值和较低的4-MSI值(图7),反映烃源岩沉积水体

盐度变化大,陆源有机质输入变化范围也较大,但沟鞭藻的贡献很小。这说明油组D为来自沙一段-沙二段和东三段烃源岩的混源油,吻合度较高。

5.2 原油充注分析

为佐证此次油源判别的准确性,专门对油源较为复杂的典型构造进行原油充注过程分析。LD34-B井原油来源于沙三段烃源岩,该井临近沙三段烃源灶(图8),由此推测为近源成藏模式,为附近的沙三段烃源岩生成的原油沿断裂垂向运移至古近系储层并聚集成藏。

LD32-A井位于3套烃源岩的烃源灶之上,具有优越的物质基础。油源判别结果显示,馆陶组上段原油(深度2 388 m)为来自东三段与沙一段-沙二段烃源岩的混源油,馆陶组下段-东二上亚段原油(深度2 662~2 917 m)来源于沙三段烃源岩,这与油源断裂的发育情况相吻合。馆陶组上段的油源断裂仅断至沙一段-沙二段烃源岩,没有沟通沙三段烃源岩,导致上部原油没有沙三段烃源岩的贡献;而馆陶组下段-东二上亚段的油源断裂断至沙三段烃源岩,有利于沙三段烃源岩生成的原油沿断裂垂向运移并聚集成藏。当然东三段和沙一段-沙二段烃源岩也可能具有一定的贡献,但贡献率较低。

LK9-A井、LD34-A井以及LD34-C井均远离烃源灶,因此推测这3口井均为远源成藏。油源判别结果

显示,LK9-A井新近系储层原油来源于东三段烃源岩,推测为东三段烃源岩生成的原油经断裂- T_2 不整合面复合输导体系长距离运移后在新近系聚集成藏;而古近系储层原油来源于沙三段烃源岩,推测为沙三段烃源岩生成的原油经断裂- T_3 不整合面复合输导体系长距离运移后在古近系成藏。LD34-A井和LD34-C井的原油均为来自东三段与沙一段-沙二段烃源岩的混源油,推测为洼陷区域的东三段和沙一段-沙二段烃源岩生成的原油发生长距离运移并聚集成藏。

6 结论

1) 主成分分析法不能有效地区分渤东凹陷东三段、沙一段-沙二段以及东三段主力烃源岩,而线性判别分析可以实现不同层位烃源岩间的准确分离,可以用于渤东凹陷的油-源对比研究。

2) 渤东凹陷东三段烃源岩沉积于相对富氧的淡水湖泊环境,陆源有机质输入多而沟鞭藻贡献小;沙一段-沙二段烃源岩沉积于相对缺氧的碱性湖泊环境,陆源有机质输入少且沟鞭藻贡献均较小;沙三段烃源岩沉积于相对缺氧的碱性湖泊环境,陆源有机质输入较少而沟鞭藻贡献大。

3) Fisher判别分析和Bayes判别分析均不能判别实际中存在的混源油情况,为此在Bayes判别模型的基础上对判别准则进行了优化,将分类概率三元图划

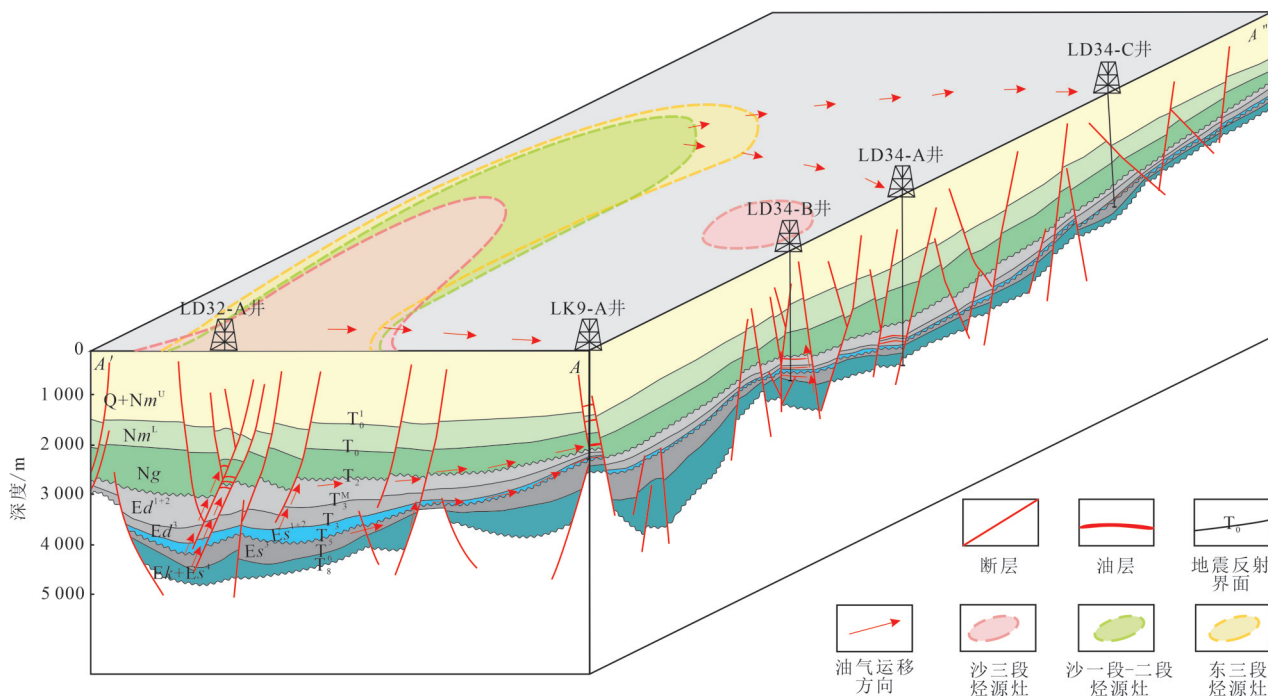


图8 渤东凹陷北部构造带油气成藏立体图

Fig. 8 Stereogram of hydrocarbon accumulation model in the northern part of the Bodong Sag

分为7大区,并成功识别出渤东凹陷存在的4类油族:油族A来源于东三段烃源岩;油族B来源于沙一段-沙二段烃源岩;油族C来源于沙三段烃源岩;油族D来源于东三段和沙一段-沙二段烃源岩。这4类油族的地球化学特征与对应烃源岩是相吻合的,同时典型构造的原油充注分析也佐证了此次油源判别结果的正确性。

参 考 文 献

- [1] Wang Y P, Zou Y R, Shi J T, et al. Review of the chemometrics application in oil-oil and oil-source rock correlations[J]. *Journal of Natural Gas Geoscience*, 2018, 3(4): 217-232.
- [2] Zhang L P, Bai G P, Zhao X Z, et al. Oil-source correlation in the slope of the Qikou Depression in the Bohai Bay Basin with discriminant analysis[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 109: 641-657.
- [3] Ye T, Chen A Q, Hou M C, et al. Characteristic of the Bodong segment of the Tanlu Fault Zone, Bohai sea area, eastern China: Implications for hydrocarbon exploration and regional tectonic evolution[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 201: 108473.
- [4] Jürgen R, Dietrich H W. Oil-oil and oil-condensate correlation by low eV GC-MS measurements of aromatic hydrocarbons [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1980, 12: 93-102.
- [5] Øygard K, Grahl-Nielsen O, Ulvøen S. Oil/oil correlation by aid of chemometrics[J]. *Organic Geochemistry*, 1984, 6: 561-567.
- [6] Zumbege J E. Prediction of source rock characteristics based on terpane biomarkers in crude oils: A multivariate statistical approach[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51(6): 1625-1637.
- [7] Li C Z, Xu G S, Xu F H, et al. A model for faults to link the Neogene reservoirs to the Paleogene organic-rich sediments in low-relief regions of the south Bohai Sea, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 200: 108360.
- [8] Wu Z P, Cheng Y J, Yan S Y, et al. Development characteristics of the fault system and its control on basin structure, Bodong Sag, East China[J]. *Petroleum Science*, 2013, 10: 450-457.
- [9] 李春荣. 渤海海域渤东凹陷结构特征与勘探方向[J]. *海洋石油*, 2015, 35(4): 1-7+34.
- [10] 李宏义, 刘丽芳, 吴克强, 等. 渤海海域渤东凹陷烃源岩特征与勘探潜力[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(6): 131-135.
- [11] Wang Q, Hao F, Xu C G, et al. Geochemical characterization of QHD29 oils on the eastern margin of Shijiutuo uplift, Bohai Sea, China: Insights from biomarker and stable carbon isotope analysis [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 64: 266-275.
- [12] 蒋有录, 苏圣民, 刘华, 等. 渤海湾盆地油气成藏期差异性及其主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6): 1255-1264.
- [13] Jiang Youlu, Su Shengming, Liu Hua, et al. Differences in hydrocarbon accumulation stages and main controlling factors in the Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1255-1264.
- [14] 张参, 牛成民, 官大勇, 等. 渤东凹陷东南斜坡构造变换带识别及其石油地质意义[J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(1): 36-42.
- [15] Zhang Can, Niu Chengming, Guan Dayong, et al. Identification of structural transfer zones on southeast slope of Bodong Sag and its implications for hydrocarbon accumulation[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2017, 33(1): 36-42.
- [16] Huang L, Liu C Y. Evolutionary characteristics of the sags to the east of Tan-Lu Fault Zone, Bohai Bay Basin (China): Implications for hydrocarbon exploration and regional tectonic evolution [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 79: 275-287.
- [17] 刘朋波, 官大勇, 王昕, 等. 渤东地区新近系“脊-断”耦合控藏模式与定量表征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(4): 470-477.
- [18] Liu Pengbo, Guan Dayong, Wang Xin, et al. Study on quantitative characterization of “ridge-fault” coupling reservoir -controlling model in the Neogene of Bodong area, Bohai Sea, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2017, 44(4): 470-477.
- [19] 薛永安, 王飞龙, 汤国民, 等. 渤海海域页岩油气地质条件与勘探前景[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(4): 696-709.
- [20] Xue Yongan, Wang Feilong, Tang Guoming, et al. Geological condition and exploration prospect of shale oil and gas in the Bohai Sea[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(4): 696-709.
- [21] 刘丽芳, 林青, 吴克强, 等. 渤海海域渤东地区烃源特征及资源潜力[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(9): 28-37.
- [22] Liu Lifang, Lin Qing, Wu Keqiang, et al. Characteristics of hydrocarbon source rocks and resource potential in the Bodong region of Bohai Sea Basin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(9): 28-37.
- [23] 王蓓, 尹太举. 渤东中部地区新近系储集体控砂因素分析[J]. *石油知识*, 2014, 30(1): 50-51.
- [24] Wang Bei, Yin Taiju. Analysis of sand control factors of Neogene reservoir in central Bodong area [J]. *Petroleum Knowledge*, 2014, 30(1): 50-51.
- [25] 詹润, 朱光, 杨贵丽, 等. 渤海海域新近纪断层成因与动力学状态[J]. *地学前缘*, 2013, 20(4): 151-165.
- [26] Zhan Run, Zhu Guang, Yang Guili, et al. The genesis of the faults and the geodynamic environment during Neogene for offshore of the Bohai sea [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(4): 151-165.
- [27] Hao F, Zhou X H, Zhu Y M, et al. Mechanisms of petroleum accumulation in the Bozhong sub-basin, Bohai Bay Basin, China. Part 1: Origin and occurrence of crude oils[J]. *Marine &*

- Petroleum Geology, 2009, 26(8): 1528–1542.
- [21] Wang Q, Hao F, Xu C G, et al. Geochemical characterization of QHD29 oils on the eastern margin of Shijiutuo uplift, Bohai Sea, China: Insights from biomarker and stable carbon isotope analysis [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 64: 266–275.
- [22] Tian J Q, Hao F, Zhou X H, et al. Distribution, controlling factors, and oil-source correlation of biodegraded oil in the Bohai offshore area, Bohai Bay basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2017, 101(3): 361–386.
- [23] 咎灵, 张枝焕, 王顺华, 等. 4-甲基甾烷在油源对比中的应用——以渤南洼陷北部陡坡带为例[J]. 沉积学报, 2012, 30(4): 770–778.
- Zan Ling, Zhang Zhihuan, Wang Shunhua, et al. Application of 4-methyl steranes in oil-source correlation: A case study from northern steep slope zone of Bonan Sag [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(4): 770–778.
- [24] Gürgey K. Correlation, alteration, and origin of hydrocarbons in the GCA, Bahar, and Gum Adasi fields, western South Caspian Basin: geochemical and multivariate statistical assessments [J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20(10): 1119–1139.
- [25] 檀朝东, 贺甲元, 周彤, 等. 基于PCA-BNN的页岩气压裂施工参数优化[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2020, 42(6): 56–62.
- Tan Chaodong, He Jiayuan, Zhou Tong, et al. A study on the optimization of fracturing operation parameters based on PCA-BNN [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2020, 42(6): 56–62.
- [26] 申波, 王刚, 樊海涛, 张金凤, 等. 一种基于变骨架参数的孔隙度预测新方法[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 711–716.
- Shen Bo, Wang Gang, Fan Haitao, et al. A new method for porosity prediction based on variable matrix parameters [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 711–716.
- [27] Wang Y P, Zhang F, Zou Y R, et al. Chemometrics reveals oil sources in the Fangzheng Fault Depression, NE China [J]. Organic Geochemistry, 2016, 102: 1–13.
- [28] Maria A M, Caroline A, Eliane S, et al. Degradation-resistant biomarkers in the Pirambóia Formation tar sands (Triassic) and their correlation with organic facies of the Irati Formation source rocks (Permian), Paraná Basin (Brazil) [J]. Journal of South American Earth Sciences, 2020, 104: 102873.
- [29] Gu H Y, Ma F S, Guo J, et al. Hydrochemistry, multidimensional statistics, and rock mechanics investigations for Sanshandao Gold Mine, China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(3): 62.
- [30] Ren R B, Han K C, Zhao P H, et al. Identification of asphalt fingerprints based on ATR-FTIR spectroscopy and principal component-linear discriminant analysis [J]. Construction and Building Materials, 2019, 198: 662–668.
- [31] Sun P Y, Bao K W, Li H S, et al. An efficient classification method for fuel and crude oil types based on m/z 256 mass chromatography by COW-PCA-LDA [J]. Fuel, 2018, 222: 416–423.
- [32] 施龙青, 王晓丽, 邱梅, 等. 利用微量元素Fisher法识别灰岩突水水源[J]. 中国科技论文, 2020, 15(5): 491–496.
- Shi Longqing, Wang Xiaoli, Qiu Mei, et al. Recognition of limestone water inrush source by Fisher method of trace elements [J]. China Sciencepaper, 2020, 15(5): 491–496.
- [33] 王伟, 康胜松, 高峰, 等. 基于模糊C均值聚类与Bayes判别的致密油储层分类评价[J]. 特种油气藏, 2020, 27(5): 118–124.
- Wang Wei, Kang Shengsong, Gao Feng, et al. Classification and evaluation of tight oil reservoirs based on fuzzy C-Means Clustering and Bayes discrimination [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(5): 118–124.
- [34] 曹怀仁, 胡建芳, 彭平安, 等. 松辽盆地青山口组二段下部湖泊水体环境变化[J]. 地学前缘, 2017, 24(1): 205–215.
- Cao Huaren, Hu Jianfang, Peng Pingan, et al. The variation of paleo-lake environment in the Lower Member 2 of Qingshankou Formation in the Songliao Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(1): 205–215.
- [35] 陈治军, 张春明, 贺永红, 等. 银额盆地古生界过成熟烃源岩特征及其地球化学意义[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 682–695.
- Chen Zhijun, Zhang Chunming, He Yonghong, et al. Characteristics and geochemical indication of over-mature source rocks in the Paleozoic, Yingen-Ejinaqi Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 682–695.
- [36] 冯伟平, 王飞宇, 王宗秀, 等. 乌兰花凹陷原油特征及成因[J]. 地质力学学报, 2020, 26(6): 932–940.
- Feng Weiping, Wang Feiyu, Wang Zongxiu, et al. Characteristics and origin of crude oils in the Wulanhua sag [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(6): 932–940.
- [37] Peters K, Walters C, Moldowan J. The biomarker guide: Biomarkers and isotopes in petroleum exploration and earth history [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005: 76–83.

(编辑 张玉银)