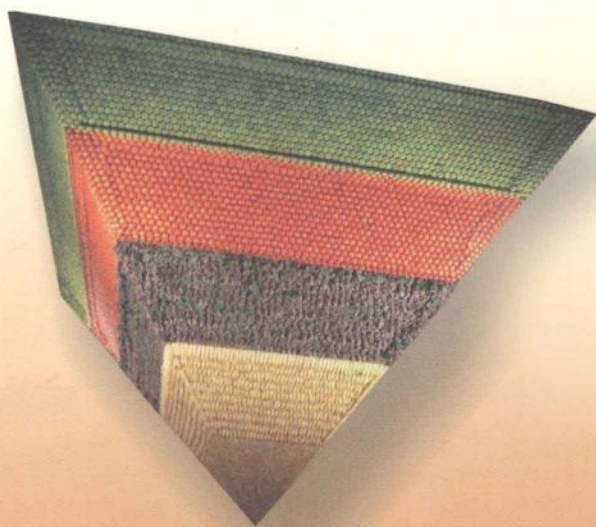


混源油判识及其 油源贡献比例确定

HUNYUANYOU PANSHI JIQI
YOUYUAN GONGXIAN BILI QUEDING

李水福 编著



中国地质大学出版社有限责任公司
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

混源油判识及其油源贡献比例确定

李水福 编著



中国地质大学出版社有限责任公司
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

图书在版编目(CIP)数据

混源油判识及其油源贡献比例确定/李水福编著. —武汉:中国地质大学出版社有限责任公司,2012.10

ISBN 978-7-5625-2900-2

- I. 混…
- II. 李…
- III. 油源对比-研究
- IV. P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 205346 号

混源油判识及其油源贡献比例确定

李水福 编著

责任编辑:王凤林

选题策划:张晓红

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社有限责任公司(武汉市洪山区鲁磨路 388 号) 邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:190 千字 印张:7.25

版次:2012 年 10 月第 1 版

印次:2012 年 10 月第 1 次印刷

印刷:武汉教文印刷厂

印数:1-500 册

ISBN 978-7-5625-2900-2

定价:28.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

油气混源现象在油气成藏过程中普遍存在,开展混源油研究(判识和混合比例确定)是油气成藏机理研究的前提,也是划分油气成藏动力系统的基础。在石油勘探过程中,如果对混源油的存在认识不清,则势必影响对有效烃源岩层位的确认和资源量的评价,甚至对勘探部署等产生误导。因此,混源油研究,尤其是混源油各油源贡献比例的定量研究,对油气勘探实践具有重要的现实意义。

针对目前混源油油源贡献比例确定方法中存在的问题,并考虑到原油族组分特性,采用多组分烃类化合物为研究对象,通过任意调节端元油的混合比例,计算得到一系列模拟混合原油的烃类化合物分布曲线,用灰色关联分析法将它们与实验混合原油(或实际混源油)的烃类化合物分布曲线进行拟合,从而得出相对精确的混源油油源贡献比例。为此,本研究主要开展以下方面工作。

(1)对混源油的分类进行了详细地探讨,认为油气混源可由油气成藏时期、烃源岩分布地区(凹陷)和层位三个主要因素决定。并将油气成藏分成8种情况:①单凹单源供油,单期成藏;②单凹单源供油,多期成藏;③单凹多源供油,单期成藏;④单凹多源供油,多期成藏;⑤多凹单源供油,单期成藏;⑥多凹单源供油,多期成藏;⑦多凹多源供油,单期成藏;⑧多凹多源供油,多期成藏。除①外,其余均为不同形式的混源成藏。同时,详细地介绍了目前几种混源油的判识方法。

(2)通过实验,并结合前人研究资料,详细地说明选择烃类化合物作为混源油油源贡献比例研究的主要载体的原因,结合灰色关联分析方法,提出混源油油源贡献比例确定的新方法,并详细地介绍了这种计算方法的计算过程。通过二元混合和三元混合配比实验,验证上述计算方法的正确性。同时,对内蒙古达尔其油田(二元混合)和新疆彩南油田(三元混合)两个典型的混源油实例开展研究,通过实际原油样品实验和收集前人研究资料,对其中混源油的油源贡献比例进行计算,并对比前人研究结果,两者结果相近,进一步验证方法的正确性。

(3)以泌阳凹陷为例,详细系统地开展未知地区的混源油研究。在对泌阳凹陷的烃源岩和原油充分认识的基础上,综合原油物性特征、饱和烃气相色谱特征和甾烷、萜烷等生物标志化合物特征,将泌阳凹陷原油划分为三大类(未熟—低熟油、正常原油和降解稠油),根据原油成熟度和遭受降解程度又可进一步细分为六类,即高熟正常油、成熟正常油、未熟—低熟正常油以及轻度降解低熟油、中度降解油和重度降解油。并对每一种类型的特征和分布情况进行了详细地研究。

(4)在对泌阳凹陷原油系统研究的基础上,结合烃源岩地球化学特征开展了油源综合对比。由于凹陷内存在不同程度的生物降解油,有些地区原油降解非常严重,部分生物标志化合物受到破坏而导致地球化学参数失真。因此,针对生物降解原油与正常原油以及烃源岩之间的油源对比问题,经过研究,提出用 C_{29} 藿烷替代 C_{30} 藿烷,认为新伽马蜡烷指数(伽马蜡烷/

$2 \times C_{29}$ 藿烷)更能反映生物降解原油的母源水体环境。

(5)在对泌阳凹陷油源有了清晰认识的基础上,开展油气混源现象的判识,提出适合本地区混源油判识的有效图版,即用 C_{30} 伽马蜡烷/ $2 \times C_{29}$ 藿烷和 $2 \times C_{24}$ 四环萜烷/ C_{26} 长链三环萜烷作为判识混源油图版。经过油源综合对比和判识,认为下二门地区油气存在混源现象,其中核二段的油源不能独立成藏,而是与核三上段油源混合成藏。选择具有核二段典型特征的泌 331(Eh_2 , 1 938.7m)烃源岩抽提物作为端元油 A,而选择具有典型的核三上段油源特征的泌 160(Eh_3 IV, 2 561.0~2 577.0m)原油作为端元油 B,并对核二段原油——泌 188(Eh_2 , 1 778.0~1 781.0m)混源油的油源贡献比例进行计算。结果表明,泌 188 原油的核二段油源贡献比例占 35.0%,而核三上段油源贡献比例为 65.0%。饱和烃碳同位素计算结果与饱和烃化合物计算结果最为接近,核二段油源贡献比例为 31.8%。

本研究主要创新点体现在以下几个方面。

(1)混源油油源贡献比例计算:采用多组分烃类化合物代表的特征曲线,用灰色关联分析法拟合理论计算的烃类特征曲线和实际混源油的烃类特征曲线,从而求得最佳混合比例。①体现在计算载体选择上,以烃类化合物为主的多组分含量分布曲线为研究对象,避免单一化合物,避免绝对定量分析;②体现在计算方法上,首次应用跨学科的灰色理论——灰色关联分析法,对烃类特征曲线进行拟合,以求得混合比例。既体现学科交叉性,又避免复杂的数学计算,具有简单、方便和可行性。

(2)混源油判识方面:①生物降解油的对比——针对泌阳凹陷北部斜坡带存在不同程度生物降解原油的特点(部分原油生物标志化合物受到降解影响),通过对国内其他地区 259 个正常原油和烃源岩 C_{29} 藿烷与 C_{30} 藿烷比值研究后,提出以新伽马蜡烷指数(C_{30} 伽马蜡烷/ $2 \times C_{29}$ 藿烷)替代伽马蜡烷指数(C_{30} 伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷)用于生物降解原油与正常原油之间的油源对比。②混源油判识——在油源对比的基础上,提出适合本地区混源油判识的有效图版,即用 C_{30} 伽马蜡烷/ $2 \times C_{29}$ 藿烷和 $2 \times C_{24}$ 四环萜烷/ C_{26} 长链三环萜烷相关性图版对泌阳凹陷混源油进行判识。

本书是在笔者博士学位论文基础上进一步完善的成果,该项研究得到由中国地质大学(武汉)王华教授和何生教授(作者博士生导师)共同负责的中国石油化工股份有限公司(简称“中石化”)河南油田分公司合作项目——“泌阳凹陷不同环境烃源岩成烃差异研究”的资助,在此表示衷心感谢。同时,感谢项目组其他成员——胡守志副教授、甘华军副教授、侯宇光讲师和张冬梅高级工程师;本项研究得到河南油田研究院杨道庆院长、林社卿副院长,勘探一室罗家群主任的支持和帮助,还得到研究院王荣新高级工程师和采油一厂地质所李岩所长的大力帮助,在此一并表示感谢。在研究中,还要特别感谢中石化中原油田分公司的靳广兴高级工程师和中国石油天然气股份有限公司(简称“中石油”)北京勘探开发研究院的陈建平教授,他们为本研究提供了部分原油样品和相关基础资料。感谢《石油学报》熊英编辑对书中部分成果的发表提出了宝贵意见。

笔者在编写过程中力图尽善尽美,以满足读者要求,但由于笔者水平有限,错误和疏漏在所难免,敬请读者批评指正!

目 录

第一部分 混源油研究理论、方法与实验

1 混源油研究意义及研究现状	(3)
1.1 研究目的与意义	(3)
1.2 国内外研究现状	(4)
2 油气混源类别与判识方法	(7)
2.1 混源油定义及其分类	(7)
2.2 混源油判识方法	(9)
2.2.1 全油稳定碳同位素法	(9)
2.2.2 特殊生物标志化合物法	(11)
2.2.3 油气分段成熟度法	(13)
2.2.4 储层沥青砂连续抽提法	(15)
3 灰色关联分析与混源油油源贡献比例计算方法	(18)
3.1 灰色关联分析方法简述	(18)
3.1.1 灰色理论简介	(18)
3.1.2 灰色系统研究内容	(18)
3.1.3 灰色关联分析	(18)
3.2 计算载体的选择	(19)
3.3 混源油油源贡献比例计算方法	(21)
4 混源油配比实验与结果分析	(23)
4.1 二元混合原油实验	(23)
4.2 三元混合原油实验	(27)

第二部分 典型实例验证研究


5 稠油与稀油混源实例——内蒙古二连盆地达尔其油田原油	(33)
5.1 达尔其油田石油地质特征	(33)

5.1.1	区域构造特征	(33)
5.1.2	烃源岩地球化学特征	(35)
5.1.3	原油类型与特征	(36)
5.2	混源油油源贡献比例计算	(37)
6	三元混源油的典型实例——准噶尔盆地彩南油田原油	(40)
6.1	彩南油田石油地质特征	(40)
6.2	准东地区各类原油特征	(41)
6.2.1	原油基本特征	(41)
6.2.2	原油类型与特征	(42)
6.3	混源油油源贡献比例计算	(45)

第三部分 未知地区应用研究——泌阳凹陷混源油研究

7	泌阳凹陷地质概况	(49)
7.1	区域地质概况	(49)
7.2	构造沉积特征	(50)
7.2.1	区域构造背景	(50)
7.2.2	构造单元划分	(50)
7.2.3	沉积序列与特征	(51)
7.3	石油地质特征	(52)
7.3.1	生储盖组合特点	(52)
7.3.2	油气分布规律	(53)
8	核桃园组烃源岩地球化学特征	(54)
8.1	核桃园组烃源岩基本特征	(54)
8.1.1	有机质数量特征	(54)
8.1.2	有机质类型特征	(57)
8.1.3	有机质成熟度特征	(58)
8.2	烃源岩生物标志化合物特征	(62)
9	原油地球化学特征及成因类型	(67)
9.1	原油物性特征	(67)
9.2	原油族组成及饱和烃色谱特征	(71)
9.3	原油生物标志化合物特征	(73)
9.3.1	高熟正常油特征	(73)
9.3.2	成熟正常油特征	(74)
9.3.3	未熟—低熟正常油特征	(74)
9.3.4	轻度降解的低熟油特征	(77)
9.3.5	重度降解原油特征	(78)

9.4	原油成因类型	(80)
9.5	油源对比	(81)
9.5.1	双河地区油源对比	(81)
9.5.2	安棚地区油源对比	(82)
9.5.3	下二门-梨树凹地区油源对比	(86)
9.5.4	降解原油油源对比指标选择	(88)
9.5.5	北部斜坡带油源对比	(88)
9.5.6	原油和源岩碳稳定同位素对比	(92)
10	混源油判识及油源贡献比例计算	(96)
10.1	泌阳凹陷混源油判识	(96)
10.1.1	井楼-古城地区	(99)
10.1.2	赵凹-安棚地区	(99)
10.1.3	王集-新庄-杨楼地区	(99)
10.1.4	下二门-梨树凹地区	(99)
10.2	混源油油源贡献比例计算	(100)
10.2.1	饱和烃化合物计算	(100)
10.2.2	稳定碳同位素计算	(102)
	参考文献	(104)



第一部分 混源油研究理论、方法与实验

1 混源油研究意义及研究现状

1.1 研究目的与意义

油气混源现象在油气成藏过程中普遍存在,开展混源油研究(判识和混合比例确定)是深化含油气系统和油气成藏机理研究的前提,也是划分油气成藏动力系统的基础。在石油勘探过程中,如果对混源油的存在认识不清,则势必影响对有效烃源岩层位的确认和资源量的评价,甚至对勘探部署等产生误导。因此,混源油研究,尤其是混源油各油源贡献比例的定量研究,对油气勘探实践具有重要的现实意义。

自1989年开始,国内外许多学者开展了混源油的研究,主要集中在混源油的判识和油源贡献比例定量确定两个方面。定量确定混源油油源贡献比例的方法,分为碳同位素法和生物标志化合物法,其中,生物标志化合物法归纳起来有3种:①运用绝对定量法,即通过测定原油中某一个或几个化合物的绝对含量来求解混源油的混合比例;②端元油配比实验法,通过典型端元油配比成一系列不同混合比例的原油,再对这些混合原油系列解剖,得到端元油混入比例与某些特定化合物绝对含量或地球化学参数之间关系图版,从而求得混源油的大致比例;③数学公式求解法,即在混合原油实验基础上,根据化学上浓度计算基本原理,应用数学方法推导出混合原油油源定量计算的理论模型,再根据这些理论模型求解混源油的混合比例。其实,上述三种方法都建立在对原油中个别化合物的绝对定量基础上。然而,原油化学分析流程复杂,中间环节多,生物标志化合物含量较低,要对其中某一个生物标志化合物准确定量有一定困难,并且其误差也较大;利用端元油配比实验,其配比数量有限,得到的只能是大致的比例值;而利用推导的数学方程求解,一般会得出双曲线或双曲面,甚至更复杂的关系,其求解过程较为复杂。

因此,针对目前混源油油源贡献比例确定方法中存在的问题,并考虑到原油族组分特性(烃类组分极性相对较小),本研究采用多个化合物为研究对象(避免了单一化合物绝对定量难度大和误差大的弊端),通过任意调节端元油的混合比例,得到一系列模拟混合原油的烃类化合物分布曲线(避免配比实验中混合比例受限的弊端),用灰色关联分析法与实验混合原油(或实际混源油)的烃类化合物分布曲线进行拟合(避免求解较为复杂的双曲线或双曲面等高次数方程),从而得出相对精确的混源油油源贡献比例。

1.2 国内外研究现状

不同成因(指母源性质,或形成环境,或热演化成熟度不同)的油气,其地球化学参数或指标存在一定差异,人们根据这种差异可以确定油气成因,进行油源对比,为油气勘探服务。对于成因单一的油气,其地球化学指标具有相对一致性,且可相互印证,如姥鲛烷与植烷比值、伽马蜡烷指数等。然而,地下油气藏中的油气是盆地成烃成藏作用的综合产物,它往往由不同母质来源、或形成于不同沉积环境,或处于不同热演化阶段的多套源岩所产生的油气混合而成(此类油气称作混源油)。有关油气混源现象,国内外均有相关报道,如:我国东部断陷盆地和西部叠合盆地(Li Maowen *et al.*, 1995、1999、2000; Pang Xiongqi, 2003),哥伦比亚 Central Lanos 盆地(Dzou *et al.*, 1999)、苏格兰 Brora 地区(Peters *et al.*, 1999)、英国 Inner Moray Firth(Peters *et al.*, 1989),等。正因如此,在油气地球化学研究中,尤其是在原油的成因分类和油源对比中,常常会出现不同地球化学参数或指标互相矛盾的现象,这些都给油源对比带来一定困难。

侯读杰(2000)将油气混源现象按照其来源分为多期次混源或单期次混源,按照类别将其分为油油混源、油气混源和气气混源。其中,油油混源又可进一步分为:①降解原油和正常原油的混合;②未熟原油与成熟原油的混合;③不同层系生油岩或不同地区相同层系生油岩形成原油的混合。本研究仅涉正构烷烃序列完整的非生物降解原油以不同成熟度、或不同层系的混合,对生物降解严重的原油,以及天然气混合有待进一步研究。常象春等(2007)按照形成条件分为4种不同的混合类型:不同有机相原油的混合、生物降解原油与正常原油的混合、未熟-低熟原油与成熟原油的混合、高成熟天然气与原油的混合。

对混源油的研究包括混源油的判识和定量确定油源贡献比例两个方面内容。

对油气混源现象的判识可以直接从原油着手,也可以间接地从储层包裹体或油砂等载体入手(王培荣等,2002),一般根据原油稳定碳同位素值和特殊生物标志化合物来判识。有学者研究认为,通过生物标志化合物指纹对比,以及它们的绝对定量,可以有效判别油气混源现象(Bissada, 1996; Moldowan, 2004)。Dzou 等(1999)和 Peters 等(1999)利用一些特殊的生物标志化合物,如奥利烷、25-降藿烷、 β -胡萝卜烷、24-降胆甾烷或 27-降胆甾烷等组成特征,确定哥伦比亚 Central Lanos 盆地一些原油为生物降解原油与正常原油的混合原油,苏格兰 Brora 地区原油为湖相源岩生成的原油和海相源岩生成原油的混合原油。国内学者应用其他一些生物标志化合物组成特征或比值变化规律对油气混源现象进行判识,如 C_{19} -三环萜烷、 C_{24} -四环萜烷、 C_{30} 重排藿烷、 C_{27} - C_{29} 甾烷、伽马蜡烷(梁宏斌等,2004;张敏等,2004);伽马蜡烷/ C_{31} 升藿烷(S+R)、4-甲基甾烷/ C_{29} 规则甾烷、三芳甾烷/三芳甲藻甾烷(王培荣等,2004)。另外,油藏储层包裹体中生物标志物特征也可以判识油气的混源现象(George *et al.*, 2004; Ahmed *et al.*, 2004)。

有学者根据成因单一的油气的“轻中重”烃分段成熟度应该“大体一致”原理判识是否存在油气混源现象。王培荣等(2002)通过原油的“轻中重”烃类化合物全面剖析,认为一般原油的“轻中重”三段烃类化合物所反映的原油成熟度应该相近。当它们出现明显差异时,不能随意

对分析结果取舍,这可能就是混源油引起的结果。此时,应对原油、源岩的地质、地球化学等多方面进行分析,以求得矛盾的统一。作者通过莺歌海、江汉、塔里木盆地和珠江口珠三坳陷 4 个混源油的实例说明了这点。

储层沥青砂连续抽提法也是判识油气混源现象有效方法之一。油砂连续抽提实验基于这样一个假设:早期注入到储层的油气组分,优先吸附在矿物的表面,束缚在矿物表面的油气组分(束缚态组分)较储层孔隙中的油气组分(自由组态分)具有更多的早期注入原油的地球化学特征(潘长春、杨志强,1997)。因此,对油砂进行连续抽提,可以得到一系列不同富集状态的油气组分,剖析这些组分特征,可以有效地判识油气藏充注过程中的混源现象。谈玉明等(2003)对白音查干凹陷达尔其油田的油砂进行连续抽提后发现,孔隙中自由态油气组分具有更多的未熟油气特征,而束缚态油气组分则具有成熟油特征,由此表明,该地区的油气具有混源现象,即早期注入成熟油气,晚期注入低熟油气。

常象春等(2007)将混源油的油源贡献比例定量研究归纳为特殊化合物绝对浓度定量法、生物标志化合物参数法、碳同位素法和拟合图版法 4 种。其中,特殊化合物绝对浓度定量法、生物标志化合物参数法和拟合图版法都与生物标志化合物有关,可以归为一类。因此,混源油的油源贡献比例定量研究方法分为两类,即全油稳定碳同位素法和生物标志化合物法(王培荣等,2002)。Peters 等早在 1989 年根据碳同位素组成的差异,首次成功地计算了英国 Inner Moray Firth 中侏罗统和泥盆系两套烃源岩对原油的大致贡献比例(40:60)。我国学者也应用该方法定量计算了吐哈盆地(李巧梅,2000)、准噶尔盆地彩南油田(陈建平等,2004)等不同地区混源油的混合比例。

生物标志化合物法,归纳起来大致有 3 种。

一是运用直接定量法,测定原油中某一个或几个化合物的绝对含量,以求解混源油的混合比例。如,加拿大 Williston 盆地中 Bakken 组和 Lodgepole 组对某些混合原油的贡献(Jiang, 2002),冀中坳陷苏桥-文安地区混源油定量识别(梁宏斌等,2004;张敏等,2004)等,都是通过该方法计算得出。郑亚斌等(2007)在绝对定量基础上,通过伽马蜡烷含量/ C_{30} 藿烷与藿烷/甾烷交会图,重排单芳甾/ $C_{27}\beta S$ 单芳甾烷比值和芳香甾烷绝对含量交会图等方法,计算了牛庄-八面河地区原油的混合比例。

二是通过典型的端元油配比一系列混合原油,再对这些混合油系统解剖,与端元油的生物标志化合物组成和地球化学指标对比,从而得到混合原油中各端元油的比例,再应用到实际混源油中。人工配比实验可以较好地计算出混合油中每个油源的相对贡献(Bissada,1996)。王文军等(1999)、李素梅等(2000)、庞雄奇等(2004)先后对未熟油与成熟油的混合,从实验和地质-地球化学等方面开展了详细地研究,得出混源油的理论计算图版,并在苏北盆地和渤海湾盆地得到应用。杜宏宇等(2006)针对吐哈盆地台北凹陷西部原油生物标志化合物组成具“多样性”特点,推断该区原油存在混源现象,并通过混合实验推测原油中多数以煤系源岩贡献为主,少数原油中煤系源岩、湖相源岩贡献相当,典型湖相原油极少。谈玉明等(2003)和靳广兴等(2005)先后对二连盆地达尔其油田烃源岩和原油的地球化学特征进行了详细研究,发现存在一系列成熟度高低不同的原油,即以达 2 井为代表的成熟稀油和以达 12 井为代表的未熟稠油以及两者不同比例混合的混源油(如达 14 井原油)。并用原油混合试验和油砂连续抽提试验证实了这种推测,大致估算达 14 井原油的混合比例(达 2 井成熟稀油贡献率大于 68.7%)。同样,张水昌等(2004)应用人工混合原油中 C_{30} -甲基甾烷和杜松烷含量的变化大致计算了中

国珠江口盆地东部珠三凹陷部分原油中第三系文昌组海相源岩和恩平组煤系源岩的贡献。张敏等(2007)最近在配比实验基础上,提出了利用 C_{28} 规则甾烷/ $(C_{27} + C_{28} + C_{29})$ 规则甾烷和伽马蜡烷/ C_{31} 藿烷的图版作为塔里木盆地海相混源油定量识别模式,成功地研究了塔里木盆地原油的混合程度,即 80%~90% 源于中上奥陶统的烃源岩的原油。张振英等(2005)根据原油的生物标志物和碳同位素等特征,按照物质平衡法原理,利用配比实验研究了两类端元油(煤系油和湖相油)的 $\alpha\alpha RC_{27}$ 百分含量在混合原油中的变化规律,建立了混源原油混合比例数学模型,计算了吐哈盆地台北凹陷西部弧形构造带两种原油的混合比例。

三是在混合原油配比实验基础上,根据化学浓度计算基本原理,应用数学方法推导出混合原油油源定量计算的理论模型,再根据这些理论模型求解实际混源油的油源贡献比例。陈建平等(2003)对准噶尔盆地彩南油田的油气混源作用进行过系统研究,作者综合运用人工混合模拟实验和全油碳同位素值、生物标志物绝对定量等方法,确定了准噶尔盆地彩南油田原油属于侏罗系、三叠系和二叠系的混合原油,并用图解法确定了各类原油的贡献。在此研究基础上,应用数学方法推导,得出二元混源油的地球化学参数与混入比例呈双曲线关系,三元混源油的地球化学参数与混入比例呈双曲面关系(2007)。

然而,对原油分析的流程复杂,中间环节多,生物标志化合物含量低,要对其中某一个化合物准确定量较困难,误差较大,而且一般实验室很难达到要求。利用端元配比实验,要想得到较为准确的混合比例,必需配比一系列混合原油进行试验,这样需要花费较大的人力和财力。尽管如此,也只能配比数量有限的混合比例,得到大致的比例值,其精确度不会太高。数学方程求解,同样是建立在对生物标志化合物的绝对定量基础上的,即用生物标志化合物的比值(参数或指标)经数学推导得出的求解方程。尽管它具有其他方法所没有的优点(经济、方便、准确性好),但都是双曲线或双曲面,或更复杂的多元方程组,其求解过程显然比灰色关联法要复杂得多。

2 油气混源类别与判识方法

2.1 混源油定义及其分类

由不同母质来源、或形成于不同沉积环境、或处于不同热演化阶段的多套源岩所产生的油气混合而成,也可以是由同一套源岩处在不同演化阶段所产生的油气经过多期充注混合成藏,此类油气称作混源油。混源油气“顾名思义”是指不同种类原油之间、原油和天然气之间以及天然气与天然气之间按一定比例混合所致。油气混源现象在地质体中非常普遍,一般指不同源岩区形成的油气在运移过程中相遇,这种情况又被国内的学者称为成藏动力学的叠置,即由不同的成藏动力学系统形成的油气相遇混合(张敏等,2007)。

侯读杰(2000)最早对油气混源现象进行分类,他将油气混源现象按照其来源分为多期次混源或单期次混源,又按照类别将其分为油油混源、油气混源和气气混源。其中,油油混源又可进一步分为:①降解原油和正常原油的混合;②未熟原油与成熟原油的混合;③不同层系生油岩或不同地区相同层系生油岩形成原油的混合。常象春等(2007)按照形成条件分为4种不同的混合类型:①不同有机相原油的混合;②生物降解原油与正常原油的混合;③未熟—低熟原油与成熟原油的混合;④高成熟天然气与原油的混合。其实,侯读杰的第三类“不同层系生油岩或不同地区相同层系生油岩形成原油的混合”和常象春的第一类“不同有机相原油的混合”都有可能包含“未熟原油与成熟原油的混合”。

其实,油气混源现象可从油气成藏期次和烃源岩差异两个主要因素考虑,即“源”和“期”。“期”是指油气藏的充注期次。一个油气藏的形成可以是单期充注,也可以多期充注;“源”的含义比较广,包含平面上和剖面上,平面上是指烃源岩平面展布区域,即具有沉积环境差异的不同生烃凹陷,可以是一套源岩,也可以是多套源岩;剖面上是指不同时代形成的,具有不同沉积环境,有机质来源明显差异的不同烃源层,它可以分布在同一个凹陷,也可以分布在多个凹陷。因此,把“源”分成“凹陷”和“层位”两个次要因素,由此将油气混源情况分为8大类。

(1)单凹单源供油,单期成藏:即单个凹陷一套源岩,单期成藏。其物源、环境、成熟度都很单一,不存在混源问题。

(2)单凹单源供油,多期成藏:即单个凹陷一套源岩,多期成藏。其物源、环境虽然单一,但成熟度有差异。可能从未熟阶段开始供油,一直延续到成熟,甚至到高熟—过熟阶段,这种油气藏由一系列不同成熟度的油气混源而成,可以通过分段成熟度法或油砂连续抽提法判识它。然而,要确定这类混源油不同期次成藏贡献比例,关键是要找到它们不同期次独立成藏的原油,即端元油。而这种不同期次独立成藏的原油在实际中很难找到,因此,要完成该项工作相

当困难。

(3)单凹多源供油,单期成藏:即同一个凹陷多套源岩在同一时期供油。其物源和环境肯定有差异,其成熟度应有一定差异。判识这类混源油的最有效方法就是特殊生物标志法,即找到特殊生物标志化合物。要确定不同套源岩的贡献比例,必须找到由单一源供油成藏的端元油。

(4)单凹多源供油,多期成藏:即同一个凹陷多套源岩在不同时期供油。其物源、环境肯定有差异,成熟度可能有差异,也可能相近。判识该类混源油,如果成熟度有差异,则既可以用特殊生物标志法,也可以用油砂连续抽提法;如果成熟度相近,只有用特殊生物标志法。

(5)多凹单源供油,单期成藏:即两个或以上凹陷同一时期形成的单套源岩,单期供油成藏。其物源、环境相近,但成熟度可能相近,也可能有差异。这类混源油的判识,分两种情况,如果是成熟度有差异,说明同一套源岩在不同凹陷所处深度不同,或相近埋藏深度,但不同凹陷受热史不同造成,这种情况可以用分段成熟度法判识;如果成熟度相近,则很难判识。成熟度有差异时,要确定不同凹陷油源的贡献比例,则必须先要找到每个凹陷单独供油成藏的端元油(注:当同一套源岩在不同凹陷的物源和环境有差异时,应归为多源,属于下一种情况)。

(6)多凹单源供油,多期成藏:即两个或以上凹陷同一时期形成的单套源岩,多期供油成藏。这种情况比较复杂,其物源与环境虽然相近,但成熟度可能有差异,也可能相近。它们可以是两个凹陷源岩在不同时期单期次供油,即前后错开时间供油,而对油藏来说,也属于多期成藏。这种虽然是多期成藏,但成熟度可能相近,也可能有差异。与上述类似,成熟度有差异的,用分段成熟度法判识。找出每个凹陷单独供油成藏的端元油来确定不同凹陷油源的贡献比例。同样,成熟度相近,则很难判识。另一种情况,两个凹陷源岩都是多期供油成藏,这样会造成一系列成熟度差异,其判识和确定油源贡献比例则是相当复杂。

(7)多凹多源供油,单期成藏:即两个或以上凹陷不同时期形成的多套源岩,在同一时期供油成藏。这种情况则更为复杂,可能是每个凹陷只有一套源岩供油,只是不同凹陷供油的源岩,其物源、环境都有差异,在同一时期供油,同样成熟度可能有差异,也可能相近。成熟度相近的,可以用特殊生标法来判识混源油。成熟度有差异者,用分段成熟度法或特殊生标法判识。也可能每个凹陷都有两套或两套以上的源岩供油。这种情况虽然是同时供油,但由于不用凹陷源岩所处的成熟度不同,同一凹陷不同套源岩之间也存在成熟度差异,它们供油成藏的油气,其成熟度也会变化多端。所以很难判识这类混源油,更不用说确定它们的油源贡献比例。

(8)多凹多源供油,多期成藏:即两个或以上凹陷不同时期形成的多套源岩,多期供油成藏。同样其物源、环境肯定有差异,但成熟度可能有差异,也可能相近,这种情况最为复杂。既可以每个凹陷只有相互不同的单套源岩在不同时期供油成藏,也可以有的凹陷单套源岩,有的凹陷多套源岩在不同时期供油成藏;还可以每个凹陷都有多套源岩,既可以每个凹陷不同期供油,也可以同一凹陷同套源岩或不同套源岩多期供油;等等。总之,这种情况可以衍生出许多子情况,但在实际工作中,往往油气混源情况需要简化。

上述油气混源情况,仅仅是从烃源灶形成的环境、有机质来源以及成藏期次等方面分析,也就是从产生油气的源头进行分析,划分混源的类别。还可以从油气藏的终端考虑,是油-油混源,还是油-气混源,或是气-气混源;是成熟油与未熟低熟油混源,还是正常原油与降解原油混合,等等。

其实,油气混源的实际情况远比这里列举的要复杂得多,即使是同一凹陷同一时期形成的烃源岩,位于不同区域,如深湖相沉积与浅湖相或滨湖相沉积,其有机质来源和性质也有较大的差异。同一层位烃源岩,即使其形成原始环境大致相近,但在不同地区所处的埋深不同,其有机质成熟度差异必然存在,等等,这些都是引起油气性质差异的地质-地球化学因素。

2.2 混源油判识方法

混源油油源贡献比例定量计算的准确度取决于端元油的选择,而端元油选择正确与否又主要取决于对混源油的判识。因此,混源油的判识,找出典型的端元油是混源油油源贡献比例计算的前提和基础。判识混源油是一项综合性研究工作,需要从多个方面着手,进行综合判定。目前对油气混源现象的判识主要以原油和储层包裹体或油砂为载体(王培荣等,2002),根据稳定碳同位素值和特殊生物标志化合物来进行判识。因此,归纳起来,对混源油的判识方法有4种:全油稳定碳同位素法、特殊生物标志化合物法(包括包裹体中的生物标志化合物)、油气分段成熟度法和储层沥青砂连续抽提法。

2.2.1 全油稳定碳同位素法

早在1989年Peters等根据碳同位素组成的差异,计算了英国Inner Moray Firth中侏罗统和泥盆系两套烃源岩对原油的大致贡献比例。

李巧梅(2000)在对吐哈盆地油源地球化学研究基础上,应用稳定碳同位素定量计算混源油的比例,并回归出不同层位湖相油与煤型油形成混源油的混合比例与其稳定碳同位素之间的关系式[式(2-1)~式(2-6)]。从而,求解出该盆地不同地区混源油中煤型油和湖相油的混合比例。

$$\text{煤系与 P 混源: } Y = -30.2 + 3.67X \quad (2-1)$$

$$\text{煤系与 T 混源: } Y = -31.788 + 5.168X; R = 0.99 \quad (2-2)$$

$$\text{煤系与 } J_2q \text{ 混源: } Y = -30.746 + 4.288X; R = 0.99 \quad (2-3)$$

$$\text{P 与 T 原油混源: } Y = -30.2 + 1.43X \quad (2-4)$$

$$\text{T 与 } J_2q \text{ 原油混源: } Y = -30.97 + 0.66X \quad (2-5)$$

$$\text{J}_2q \text{ 与 P 原油混源: } Y = -30.2 + 0.77X \quad (2-6)$$

吐哈盆地原油从成因上大致可以分为来源于湖相泥岩的湖相油、来源于河湖-沼泽相交替沉积的煤系油及湖相泥岩与煤系共同贡献的“混源型”油。不同成因类型的原油具有相对独特的地球化学特征,煤系油具有油质轻、饱和烃含量高、姥/植比高(大于3)、富含 C_{27} 甾烷(>70%)、贫三环萜烷、重碳同位素($\delta^{13}C > -27\text{‰}$)之特征;湖相油具有油质较重、饱和烃含量低、姥/植比低(<2),富含 C_{27} 甾烷及三环萜烷、轻碳同位素($\delta^{13}C < -30\text{‰}$)之特征;混源型原油的地球化学特征总体上介于上述两类原油之间。由于不同沉积环境母质的影响,混源油中反映沉积环境、母质性质的生物标志化合物含量较典型煤系油或湖相油而言均有明显的变化,并且以类异戊二烯烃、碳同位素($\delta^{13}C$)及规则甾烷化合物的变化为特征(李巧梅,2000)(表2-1)。