

# 我国有机地球化学的发展与瞻望

郝石生<sup>①</sup>

(石油大学,北京 100083)

有机地球化学自 1934~1936年 Alfred Tteibs 首次鉴定和研究石油沉积物中的金属卟啉色素开始已经历了 60年的历史,现已发展为一门新兴的、成熟的、边缘交叉学科,并且拥有众多分支学科和不同的研究方向,不仅对国际性地球学、化学、生物学的基础科学研究作出了贡献,而且对全球的经济生活,特别是在油气勘探开发和环境监测保护方面,发挥着重要作用,已成为一个活跃的科学研究领域。1962年开始,两年一度在欧洲召开的国际有机地球化学会议已连续进行了 17届;80年代后期开始,拉丁美洲、亚非和澳洲也分别定期召开各自的区域性有机地球化学会议,标志着这一年轻学科萌芽于 50年代,发展于 80年代。自 1982年以来,由于相关的各大学会的大力支持与扶植,有关科研院所和高校的周密组织以及全国同行专家们热情参加,迄今已举办六届全国性的有机地球化学学术会议,促进了国内的学术交流与发展。

从当前国际上学科发展的趋势来看,有机地球化学及其各学科正处在一个与相关学科相互渗透结合、向相关领域扩散的发展阶段,这不仅拓宽了有机地球化学的研究范畴与应用领域,而且使新的学科生长点层出不穷,如有机地球化学向沉积学、海洋学、生物学、微生物学、古生物学、大气科学以及人文科学的渗透发展,派生出了古海洋学、环境有机地球化学、古生物有机地球化学、古气候学、大分子生物地球化学以及考古有机地球化学等一系列的研究领域。又如有机地球化学的两个重要分支学科分子地球化学与同位素地球化学的结合,在生物地球化学和石油地球化学中开拓出了特定化合物同位素分析的新方向(CSIA,即 Compound-Specific Isotope Analysis,国内惯称单体化合物同位素分析)再者,由于全球范围内,未经油气勘探开发的沉积盆地日趋缩

小,如何保持下一世纪的油气产能就被提到议事日程,这就面临着在勘探成熟盆地中的增储上产问题。这一形势一方面促进有机地球化学与油气地质学、地球物理学、信息科学和盆地模拟技术的紧密结合,使当代石油地球化学已发展到覆盖从分子级层次到沉积盆地规模的含油气系统划分研究,以减少勘探风险,提高钻探成功率;另一方面正在实现有机地球化学与无机地球化学、油藏工程学、石油工程学相结合,派生出一门崭新的油藏地球化学,采用一切有效的地球学分析测试手段,结合各项工程数据资料,服务于老油田的滚动勘探开发,指导寻找卫星油田,直接进行生产动态监测,提高油藏的最终采收率。

面对有机地球化学学科的这样一个深刻变革和发展形势,我国有机地球化学工作者在“八五”阶段取得了很大的进展<sup>②</sup>。也相信在世纪交替的年代中,一定会作出应有的重要贡献。现仅就有机地球化学的有关领域的发展情况,作一简要的回顾和瞻望。

## 1 石油地球化学

陆相生油理论是我国石油工业赖以发展的石油地质理论基础,陆相生油理论的形成、完善和发展过程中,广泛采用了有机地球化学的现代理论和先进方法。目前已形成较系统的陆相生油有机地球化学理论和评价方法<sup>[1,2]</sup>。近年来陆相生油理论的重大进展主要表现在未熟-低熟油和煤成油二个领域。自从史继扬等(1982)根据分子地球化学研究确认胜利油田存在未熟油<sup>[3]</sup>,我国学者逐渐认识到未熟-低熟油在我国分布相当广泛。许多学者对胜利、大港、辽河、江汉、泌阳、百色等油田未熟-低熟油的地球化学特征、成油母质、形成条件和成因机理进行了广泛研究。傅家谟等(1985)年研究膏盐沉积盆地中的未熟油时指出“膏盐沉积环境为强还原环境,有利于有机

① 第六届全国有机地球化学会议主席团主任

② 中国石油学会主编,第六届全国有机地球化学学术会议论文摘要汇编,1996,289.

收稿日期:1996-09-12

质的早期保存和早期转化,未成熟油的存在是对干酪根成油理论的一个挑战”<sup>[4]</sup>。黄第藩等(1987)提出“未成熟石油是从油源岩中可溶有机质在较低温度下直接降解而来的”<sup>[5]</sup>。王铁冠等(1995)提出低熟油气低温早熟成因的五种主要机制和相应生烃模式<sup>[6]</sup>。我国学者在未熟油研究领域取得了可喜的成果,突破了干酪根热降解成烃的理论模式,但目前对未熟、低熟油生烃母质和生烃机理、未熟、低熟油气资源评价方法等问题仍未有深入一致的认识。

煤成油系指煤和煤系地层中集中和分散的陆源有机质,在煤化作用过程中生成的液态烃。“六五”以来煤成烃地球化学的研究成果<sup>[7]</sup>,为80年代末期吐哈盆地台北弧形带侏罗系煤系地层找油的突破提供了理论基础。90年代以来,相继在准噶尔盆地东部、塔里木盆地北部、酒泉东部盆地、三塘湖盆地、焉耆盆地侏罗系煤系地层中石油勘探的成功,促进了我国煤成油研究领域的进一步发展。程克明等<sup>[8]</sup>系统总结了吐哈盆地侏罗系煤系地层生烃特征,提出煤系地层多阶段生烃和早生早排的成烃模式。黄第藩等<sup>[9]</sup>采用各种先进的有机地球化学和有机岩石学的分析测试手段,采用模拟实验与煤-油共生点的地质地球化学研究相结合的方法,对煤成油的形成及其机理作了深入研究。煤成油生烃母质、生油阶段、生排油机理、油源对比、煤系地层生油岩评价方法等理论和现实问题是目前煤成油研究领域的重点。

我国古生界海相地层作为烃源岩的重要性已为塔里木、鄂尔多斯等盆地油气勘探实践所证实。古生界海相烃源岩的显著特点:一是有机成熟度高,二是有机质丰度低。对我国古生界海相烃源岩的评价不仅不宜采用国内已有的陆相烃源岩标准,也不能照搬国外较低成熟度碳酸盐烃源岩的评价方法。“八五”期间,郝石生、黄第藩、程克明等学者,针对我国海相烃源岩评价存在的问题,建立了有机成熟度评价方法,对有机质丰度、生烃潜力进行了恢复并确定生油层有机质丰度下限,在碳酸盐岩中有机质赋存形式、成烃阶段和生烃机理等方面取得一系列新的认识<sup>[10, 11, 12]</sup>。

## 2 天然气地球化学

以天然气成因理论为主导的天然气地球化学现已成为相对独立的学科分支,其研究重点主要体现在天然气同位素地球化学、天然气成因机理、天然气成因类型判识和气源对比等方面<sup>[13, 14]</sup>。

天然气稳定同位素地球化学中以天然气各组分(甲烷、C<sub>2</sub>~C<sub>6</sub>烃类、轻烃、二氧化碳)的碳同位素组成和稀有气体(主要是氦和氩)同位素比值研究进展最快,氢同位素组成进展次之。这一领域的研究不仅为解决天然气成因提供重要的依据,而且对解决气源对比和天然气运移等问题起着重要作用。

天然气成因理论的研究,已从一元成气论(油气理论)发展成为二元或多元(油型气和煤型气、无机和有机成气理论)。徐永昌等(1994)从成油与成气的地质地球化学特征对比入手,提出天气形成演化上完全有别于石油的演化,它具有多源复合、多阶连续的特点<sup>[14]</sup>。目前在生物-热催化过渡带气、非烃天然气、无机成因气成因上已取得较大进展,如徐永昌等(1990)首次在中国东部沉积壳层中发现了幔源氦的工业储集<sup>[15]</sup>;戴金星等(1995)对中国东部非烃天然气地球化学特征和成因所作的综合研究;王先彬等(1994)讨论了我国某些地区存在无机成因气的依据,并对无机成因气的理论进行了探索<sup>[16, 17, 18]</sup>。

天然气成因类型判识和气源综合对比是天然气地球化学中重要的应用研究领域,以戴金星、徐永昌、沈平为代表的学者们从天然气组分特征、同位素组成特点、伴生轻质(凝析)油特点、含油性多个方面,提出了天然气成因类型判识和气源对比综合指标<sup>[13, 14]</sup>。蒋助生应用先进的浓缩富集技术和色谱/质谱分析,检测出天然气中各类生物标志物,直接进行气源对比,取得良好效果。稳定同位素地球化学、生物标志物等现代技术的广泛应用,改变了过去主要研究气体常规组分的局面,推动了天然气成因类型判识和气源对比研究的蓬勃发展。

## 3 油气藏地球化学

油气藏地球化学是应用化学原理研究储集流体(油、气、水)在地质体中生成、演化、运移和聚集成藏过程中所发生一切地球化学反应的机理及其在油气勘探和开发中应用的一门科学。它与基础油气地球化学的本质差异在于:前者研究的对象是油藏与油气储层有关的地球化学问题;而后者研究的主要对象是烃源岩及相关问题。油气藏有机地球化学中将油藏工程参数(气油比、泡点压力、油藏流体密度等)、储层参数(孔隙度、渗透率、地层压力和温度等)和地球化学参数(原油总体组成和分子组成)作为一个统一的地球化学体系<sup>[19]</sup>。

梅博文等(1992)率先比较系统地在国内同行引

荐了该领域的早期研究成果,并将其译著取名为《储层地球化学》,该书荟萃了有关烃源岩在干酪根演化过程中排释的有机酸在石油储层孔隙发育过程中有机-无机反应,储层中有机酸的物化分析技术以及储层孔隙早期预测的理论和方法等方面论文。最近,林壬子等<sup>[20]</sup>汇编了国外油气藏地球化学近年来主要研究论文,提出油气藏地球化学主要包括以下4个研究领域:(1)储层孔隙形成的有机-无机反应及储层孔隙分析预测;(2)油藏地球化学描述与油藏注入史研究;(3)油气田动态的地球化学监测技术;(4)油田开发中油-岩润湿性的地球化学机制及其应用。我国油气藏地球化学研究目前仍处于起步阶段,江汉石油学院、胜利石油管理局研究院等单位作了一些探索性研究,他们运用油气藏地球化学的理论,结合储层和流体分析手段,综合分析了塔里木盆地库车油气系统、胜利油田埕岛油气系统和曲堤镇油气系统中油气藏形成史。油藏地球化学突破了单一学科的界限,将石油地球化学研究的重点由烃源岩及其相关问题,转移到油藏及其流体化学组成在空间上的变化规律,大大拓宽石油地球化学的研究范畴。

## 4 有机岩石学

有机岩石学在油气勘探,特别是烃源岩评价中的作用已从仅是研究的工具发展为常规的手段,其最大特色在于从显微层次认识和分析非均质性的沉积有机质特征、成因和演化与烃类形成的关系。由于地质体中有机质明显的非均质性,有机岩石学和有机地球化学紧密结合和相互补充成为目前沉积有机质研究的一个趋势<sup>[21,22]</sup>。近年来我国未熟-低熟油和煤成油二个领域所取得的重要进展与广泛应用有机岩石学分析理论和方法紧密相关。

有机岩石学的基础研究主要分为有机显微组分和有机成熟度两个方面。其研究核心是分析地质体中有机质的显微组成特征及其在地质历史中的演化。显微组分的特征、成因和分类是有机岩石学的基础内容。目前对全岩和干酪根中颗粒有机质或形态有机质已有明确一致的认识,但对全岩中亚显微状态赋存的有机质或干酪根中无定形有机质尚未有深入明确认识。烃源岩有机成熟度有机岩石学评价方法,如显微组分反射率和类脂组显微组分荧光光度学参数测试技术业已标准化,近年来,在镜质体反射率抑制和校正、泥盆系前无镜质体的地层和碳酸盐岩成熟度评价方法取得新的进展。有机显微组分一

方面具有特征性的显微岩石学特征,另一方面也具有有一定的有机地球化学组成特征,即有机显微组分具有岩石学和地球化学双重属性。从显微组分、亚显微组分和超微组分层次认识有机质演化和成烃作用是烃源岩评价的趋势,这使得单显微组分研究成为有机地球化学和有机岩石学共同关心的热点。

随着油气藏地球化学的发展,有机岩石学的研究对象已从烃源岩中的有机质,拓宽到储层中流体包裹体(特别是有机包裹体)和固体烃类(沥青),储层有机岩石学分析有助于解决油气运移和油气藏形成和阶段、时间、物理化学条件(温度、压力等),运移相态等问题。

## 5 干酪根地球化学

国外 Durand<sup>[23]</sup>主编出版了第一本干酪根地球化学专著《干酪根》,这也是目前国外这一领域唯一的专著。近十余年来,干酪根地球化学研究中广泛应用热解色谱质谱、固体核磁共振波谱、富里叶红外光谱、化学降解、透射电镜、各种热分析、热模拟与热解反应动力学等新技术,使得干酪根无定形有机质和显微组分的超微结构、不同类型干酪根和显微组分化学结构和演化等方面的研究已取得了十分重要的进展,提出了干酪根结构的化学模式和三维模型等新概念。干酪根成因理论上已突破了传统的“降解-缩聚作用”模式,提出“生物聚合物选择性保存作用”是干酪根形成的另一重要途径,这些进展使得干酪根地球化学呈现出了崭新的面貌。傅家谟和秦匡宗主编<sup>[24]</sup>的《干酪根地球化学》反映了我国学者在这一领域的研究成果和工作特色,以及国际上前沿研究的最新成果,具体包括干酪根的有机岩石学研究,核磁共振技术、红外光谱、X射线衍射和化学降解在干酪根结构研究中的应用,干酪根的碳氢同位素组成,干酪根的热解-色谱-热解-色谱-质谱研究与生物标志物,干酪根的热分析和热解动力学,干酪根结构、干酪根成烃人工模拟技术以及干酪根热演化成烃模式及其应用等方面的研究内容和进展。

## 6 分子地球化学

80年代以来,国内许多单位都引进了色谱-质谱仪和色谱-质谱-质谱仪,分子地球化学的研究及其在油气勘探中的应用得到广泛发展,生物标志物被应用于原油对比和油源对比,探讨有机成熟度、生源输入、有机质类型以及有机相和沉积环境,我国分

子有机地球化学研究在短短十年内发展成为有机地球化学一个极其活跃的分支领域,不仅在新的标志物,如各种陆源萜类烃、含硫化合物的检出,生物标志物的定性定量技术等基础研究,而且在应用生物标志物进行陆相油气勘探评价方面积累了大量有价值的资料,取得了长足的进展,受到国际同行的重视和赞赏<sup>[25,26]</sup>。

## 7 油气运移地球化学

油气运移是目前油气地质研究的难点和焦点,也是油气资源定量评价和预测研究中最薄弱的环节。目前油气运移地球化学领域的研究主要是根据有机地球化学指标分析油气运移。在初次运移方面,根据生油岩在纵向剖面上地球化学指标的突然变化,来确定生油岩排油的深度和时期;通过对砂泥岩层系密集取样的有机地球化学分析,观察排烃现象,计算排烃效率,研究排烃机理。在二次运移方面,主要是建立能反映二次运移的分子地球化学指标,并应用评价实践<sup>[27]</sup>。近年来,在天然气运移和聚集方面已有一些新的进展,如长庆石油勘探局陈安定等(1993)根据天然气运移、水溶、散失模拟实验,从天然气成分和稳定同位素两个方面特征,提出天然气运移的地球化学指标。郝石生等(1994)建立了天然气运聚平衡模式<sup>[28]</sup>。

烃类排出、运移和聚集研究的一个趋势是重视有机地化过程(烃类的生成、排出和运移)与无机地化过程(主要是固态矿物的溶解、沉淀、蚀变,自生矿物的形成等)之间的成因联系,将显微尺度的直接观察和测量与同位素年代分析数值模拟相结合,进行综合的流体历史分析。

现代石油地质勘探评价包括了盆地、含油气系统、区带和圈闭四个层次。含油气系统的概念和模式已成为更好地了解油气藏形成条件和成藏规律,降低油气勘探风险的重要手段<sup>[29]</sup>。油气藏形成过程是烃类流体从源岩到圈闭运聚过程,成藏过程属于动态的历史过程。含油气系统研究的核心正是揭示烃类流体从源岩到圈闭的地质过程和历史。随着我国含油气系统工作的广泛开展,含油气系统地球化学将是今后工作的重要方向。

## 8 环境与近代沉积有机地球化学

环境有机地球化学研究地表环境中有机物质(含有机污染物)的来源、迁移、转化与归宿,以及有

关的全球性和区域局部性环境问题。它是环境地质学和有机地球化学的一个重要分支领域。环境有机地球化学研究有机污染物,尤其是有毒、有害、难降解有机化合物在表生作用带的机制,它们与无机矿物、金属元素和大分子有机物的相互作用等。同时也要研究探讨古气候、古环境与全球变化。分子有机地球化学的发展为环境有机地球化学研究提供了重要的追踪手段。环境标志化合物。近年来,傅家谟和盛国英等积极开拓我国环境有机地球化学领域的研究,一方面,应用分子标志物方法研究了北京、贵阳和广州三个城市大气飘尘可溶有机质组成的成因;另一方面在广州市大气飘尘、水和底泥样品中鉴定出属于美国EPA优先控制的有毒有害有机污染物,并探讨了这些毒害有机物在环境中气-液-固界面间可能存在的表生地球化学过程<sup>[30]</sup>。环境问题是全球最为关注的问题,保护地球环境及其资源是中国经济可持续发展至关重要的问题,环境有机地球化学将是我国有机地球化学的重要发展方向。

近年来我国学者对云南断陷湖、冲滢海、东海、南海、黄海等近代沉积物中有机质的特征进行了研究,并探讨其古气候和古环境意义。

## 9 有机-无机相互作用金属矿床地球化学

有机质在成矿元素的迁移和富集过程中,特别是在金属矿床的形成中起着重要的作用,因而有机-无机相互作用与沉积金属矿床有机地球化学研究长期以来受到矿床学家和有机地球化学家的重视。近年来国内外发展较快的一个新领域仍是层控矿床有机地球化学研究。尤其是层控矿床成因与油气生成、演化关系的研究。涂光炽(1987)在论述活泼元素改造矿床的油气矿床关系时指出,在成矿机制方面,油气矿床和改造矿床是十分相似的,油气矿床的生油层(岩)相当于改造矿床的矿层(源岩),储油层相当于储矿层。对一些改造矿床来说,基底常是提供大量成矿物质的矿源岩,而对油气矿床而言,基底一般不起此作用,其基底也不是生油岩。油气矿床与改造矿床一样,都是层控矿床,沉积阶段提供了一定的成矿物质基础,但较分散,富集成矿是在后期地质作用过程中发生的。所谓活泼元素改造矿床系指汞、砷、锑、铀、钼、铅、锌等元素行为比较活泼的元素富集形成矿床。针对我国南方一些金、汞、铜等层控矿床与氧气的关系,近年来发表了一些有意义的论文和著作。

## 10 盆地模拟及资源评价

盆地模拟及资源评价现已发展为勘探决策不可缺少的一个环节。盆地模拟不仅能够对油气勘探的全局战略布局提供科学依据,同时还能够为不同勘探阶段的战术方案其中包括对钻探并位的选择作出指导。对盆地进行地质、地球物理、地球化学综合研究和动态模拟,作出油气资源的评价已成为当代的前沿性热门课题。

盆地模拟过程从石油地质的物理化学机理出发,首先建立地质模型,然后建立其数学模型,最后编制相应的软件,从而在时空概念下由计算机定量地模拟油气盆地的形成和演化、烃类的生成、运移和聚集。我国的盆地模拟系统研究目前已进入世界先进水平行列,如北京石油勘探院研制的盆地综合模拟系统 BASIMS,在现代油气地球化学和石油地质学理论上,建立地史、热史、生烃史、排烃史和运移聚集史五大模块,综合评价油气资源量和潜在油气藏分布规律<sup>[31]</sup>。

## 11 地球化学勘探技术

近十年来,油气化探迅速发展的主要原因——是用直接找油方法寻找非构造圈闭的重要性日益受到重视;二是作为常规石油勘探技术的地震法成本不断上涨;三是近代仪器分析技术的发展,如气相色谱、色质联机等,为超微量多组分烃类的测定提供了手段。现代地球化学勘探方法直接寻找石油和天然气的理论基础是埋藏在地下的烃类向上运移(微渗漏作用和扩散作用)在地表引起的种种化学现象和各种地球化学晕,造成气体组分、烃类组分、各种元素和同位素组成的异常。目前我国采用的油气化探方法包括烃气测量法、水化学法、沥青法和 KV 技术、汞蒸气法、土壤热解碳酸盐( $\Delta C$ )和甲烷稳定碳同位素法等<sup>[32]</sup>。油气化探在油气勘探的各个阶段均可发挥独特的作用。油气化探方法多,种类杂,必须结合区域地质、地理、地貌条件优化精选方法。由于油气化探的基础理论不太完善,解释异常的随机性大,因此,必须加强油气化探的基础理论的研究,建立去粗存精、去伪存真的甄别方法。

### 参 考 文 献

[1] 黄第藩主编. 中国陆相油气生成. 石油工业出版社, 1982, 355.

- [2] 胡见义等. 中国陆相石油地质理论基础. 北京: 石油工业出版社, 1991, 322.
- [3] Shi Ji-Yang *et al.* A biological marker investigation of petroleum and shales from the Shengli oilfield, the people's Republic of China, *Chin. Geol.*, 1992, 35: 1-31.
- [4] 傅家谟等. 膏盐沉积盆地形成的未熟石油. *石油与天然气地质*, 1983, 6(2): 150150.
- [5] 黄第藩, 李晋超. 陆相沉积中的未熟石油及其意义. *石油学报*, 1987, 8(1): 1-9.
- [6] 王铁冠等. 低熟油气形成机理与分布. 北京: 石油工业出版社, 1995, 235.
- [7] 傅家谟等主编. 煤成烃地球化学. 科学出版社, 1990, 371.
- [8] 程克明等. 吐哈盆地油气生成. 北京: 石油工业出版社, 1994, 199.
- [9] 黄第藩. 煤成油的形成和成烃机理. 北京: 石油工业出版社, 1995, 425.
- [10] 郝石生等. 碳酸盐岩油气生成. 北京: 石油工业出版社, 1994, 117.
- [11] 黄第藩, 梁狄刚主编. 塔里木盆地油气生成和演化. 北京: 科学出版社(出版中).
- [12] 程克明等. 碳酸盐岩油气生成理论与实践. 北京: 石油工业出版社, 1996, 317.
- [13] 戴金星等主编. 中国天然气地质学(卷一). 北京: 石油工业出版社, 1992, 218.
- [14] 徐永昌等. 天然气成因理论及应用. 北京: 科学出版社, 1994, 414.
- [15] 徐永昌, 沈平, 陶明信等. 郯庐断裂带与幔源氦的工业聚集. *科学通报*, 1990b, (12): 932-935.
- [16] 王先彬. 非生物成因天然气探索. *地球科学信息*, 1987, (3): 14-15.
- [17] 郭占谦, 王先彬. 松辽盆地非生物成因气探讨. *中国科学(B辑)*, 1994, 24(3): 303-309.
- [18] 王先彬等. 非生物成因天然气. 见: 徐永昌等著. 天然气成因理论及应用. 北京: 科学出版社, 1994, 317-342.
- [19] Cubitt. n& England W. A. (eds). *The geochemistry of reservoirs*. Geological Society Special Publication, 1995, (86): 321.
- [20] 林壬子等主编. 油藏地球化学进展. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996, 302.
- [21] Teichmuller M. *Organic petrology of source rocks, history and state of art*. *Org Geochem*, 1996, 10: 581-599.
- [22] 肖贤明. 有机岩石学及其在油气评价中的应用. 广州: 广东科技出版社, 1992, 198.
- [23] Engiand W A & Fleet A J(eds). *Petroleum migration*. Geological society special publication, 1991, (59): , 275.
- [24] 傅家谟, 秦匡宗主编. 干酪根地球化学. 广州: 广东科技出版社, 1995, 637.
- [25] 傅家谟, 盛国英. 分子地球化学进展. *自然科学进展*, 1995, 5(6).
- [26] 程克明等. 烃源岩地球化学. 北京: 科学出版社, 1995, 274.
- [27] England W A & Fleet A J(eds). *Petroleum migration*. Geological society special publication, 1991, (59): 275.
- [28] 郝石生等. 天然气运聚动平衡. 北京: 石油工业出版社, 1994, 112.
- [29] Magoon I B. & Dow W G(eds). *The petroleum system—From source to trap*, AAPG Memoir60, 1994.
- [30] 傅家谟, 盛国英. 环境有机地球化学初探. *地质前缘*, 1996, 3(1-2): 127-132.
- [31] 石广仁等. 盆地综合模拟系统 BASIMS. *石油学报*, 1996, 17(1): 1-9.
- [32] 郝石生等. 油气地球化学勘探方法与应用. 北京: 石油工业出版社, 1994, 116.