

院校石油天然气类规划教材

# 油气地球化学

(第二版)

卢双舫 张 敏 © 主编



石油工业出版社  
Petroleum Industry Press

高等院校石油天然气类规划教材

# 油气地球化学

(第二版)

卢双舫 张 敏 主编



石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书首先介绍了油气地球化学的学科发展、演化、意义,油气成因理论的形成、发展,油气地球化学的主要分析方法;之后系统地介绍了有机质的产生、沉积及组成,有机质的演化及其影响因素,油气的生成及成烃模式,生物标志化合物及其地球化学意义,石油、天然气的组成、分类及其影响因素;在此基础上,重点介绍了地球化学原理在烃源岩定性及定量评价、油气源对比、油藏地球化学及开发地球化学中的应用,最后简要论述了非常规油气地球化学。

本书可作为高等院校资源勘查工程、地球化学专业的本科教材,也可供相关专业的研究生和油田研究人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

油气地球化学 / 卢双舫, 张敏主编. — 2 版. — 北京: 石油工业出版社, 2017. 5

高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 978-7-5183-1938-1

I. ①油… II. ①卢… ②张… III. ①石油天然气地质—地球化学—高等学校—教材 IV. ①P618.130.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 129073 号

---

出版发行:石油工业出版社

(北京市朝阳区安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www. petropub. com

编辑部:(010)64523693

图书营销中心:(010)64523633 (010)64523731

经 销:全国新华书店

排 版:北京市密东股份有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

---

2017 年 5 月第 2 版 2017 年 5 月第 6 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:24.5

字数:600 千字

---

定价:50.00 元

(如发现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

# 《油气地球化学(第二版)》

## 编写人员名单

主    编：卢双舫  中国石油大学(华东)

张  敏  长江大学

参编人员(按姓名拼音排序)：

陈忠红  中国石油大学(华东)

黄光辉  长江大学

李洪波  长江大学

李娇娜  东北石油大学

刘洪军  西安石油大学

申家年  东北石油大学

唐友军  长江大学

王春江  中国石油大学(北京)

文志刚  长江大学

向廷生  长江大学

薛海涛  中国石油大学(华东)

赵红静  长江大学

## 第二版前言

由于全体参编教师和责任编辑的共同努力,普通高等教育“十一五”国家级规划教材《油气地球化学》第一版于2008年初出版面世并被石油高校普遍选用,教材质量得到了石油高校师生的认可,先后获得中国石油高等教育优秀教材奖、中国石油和化学工业优秀出版物奖(教材奖)一等奖。

近十年来,随着油气勘探、开发实践的不断深入,油气地球化学学科也得以快速发展,尤其是伴随着美国页岩气革命兴起的非常规油气热潮以及油藏地球化学的推广应用,油气地球化学的应用领域不断拓展,第一版教材需要进行相应的更新和补充。同时,教材使用过程中,也发现一些结构上的不足和文字方面的问题需要完善。

因此,2013年7月底,石油工业出版社和教材主编组织参编教师在青岛召开了教材修订研讨会,讨论决定了教材修订的原则、要点、提纲和分工。按照会议精神,各位参编教师重点进行了以下方面的修改:在修改、完善第一版教材使用过程中细节问题的同时,在各章后面增加了本章小结和思考题,以帮助学生梳理、消化并总体把握全章的内容和重点;将原来的第十三章提前到第十章,将原第十二章并入原第十章中置于第十一章;在烃源岩定性评价中,增加了近年来应用日益广泛的有机质非均质性评价内容;在烃源岩定量评价中,新增了近些年进展较大的排烃研究内容;鉴于录井地球化学技术日臻成熟并得到了广泛应用,增加了地球化学录井一章(第十七章);鉴于近些年来非常规油气的突破性进展,重新撰写了非常规油气(第十八章)。

教材按64学时编写,有关章节和标题前标\*的内容为选学内容,可供学时少的院校选择性教学。

教材各章的执笔修改、编写分工如下:前言和第十四章由卢双舫执笔,第一章由张敏执笔,第二章由薛海涛执笔,第三章由向廷生、张敏执笔,第四、八章由陈忠红执笔,第五章由赵红静执笔,第六、七章由李娇娜执笔,第九章由黄光辉执笔,第十章由王春江执笔,第十一章由唐友军执笔,第十二章由刘洪军执笔,第十三章由申家年、卢双舫执笔,第十五章由文志刚执笔,第十六章由张敏、黄光辉执笔,第十七章由李洪波执笔,第十八章由薛海涛、卢双舫执笔。张敏重点对第一、三、五、九、十一、十五、十六、十七章进行修改和统稿。卢双舫对全部书稿进行了统稿、修改和定稿。

由于参编教师都是利用教学、科研之余的时间加班从事教材的修改、编写工作,交稿时间不一,更由于主编统稿过程中需要兼顾各章内容的衔接、避免交叉重复而需要比较完整的时间,导致教材交付出版社的时间一再推迟。所以,尽管参编教师已经竭尽全力,但由于多方面的原因,修订统稿过程偏长,难免顾此失彼。不当之处,敬请专家、读者指正,以便今后修改完善。

编者

2017年2月17日

# 第一版前言

在 1977 年我国恢复高考后的最初十多年间,石油和地质高校许多著名的专家将相当多的时间和精力投入到了教材的编写工作中,产生了一批有影响的精品教材,为百废待兴的石油行业培养急需人才做出了重要贡献。在油气地球化学领域,最有代表性的教材有两本,一本是由曾国寿、徐孟虹主编的《石油地球化学》(石油工业出版社 1990 年出版),另一本是王启军、陈建渝主编的《油气地球化学》(中国地质大学出版社 1984 年出版、1988 年修订再版)。

作为一门新兴的边缘学科,油气地球化学与其他发展历史更长、更为成型稳定的地学学科相比,发展、更新更为迅速。这体现在新技术、新方法、新领域、新理论不断涌现,如天然气地球化学分析技术的发展和评价体系的建立和完善、油藏地球化学理论与技术的形成和发展、未成熟—低成熟油气理论、煤成烃理论与煤源岩评价技术、非烃的地球化学技术等等。这些方面的快速进展,使承担油气地球化学教学任务的教师深感已有的教材难以满足现今教学的需要,迫切需要一本新的统编教材。但十多年来,由于各方面的原因,一直没有这样一本教材面世。各石油高校不得不自编内部教材以解燃眉之急。但受制于时间和精力,这些内部教材更多反映的是各校的特长和优势研究领域,缺乏全面的统筹。

值此供需脱节的时刻,由中国石油教育学会和石油工业出版社牵头,于 2004 年 10 月在北京怀柔举行了石油勘探专业教学与教材规划研讨会,得到了 6 所石油高校的积极响应。会议形成了石油高校共同参与编写,博采众长以提高教材质量,同时共同选用以降低教材成本的共识。会上确定了 16 种教材的重编计划和分工,其中,《油气地球化学》由大庆石油学院和长江大学牵头主编,中国石油大学钟宁宁教授主审。

会后,经过对国内外有关教材和参考书的考察和比较,主编拟订了较为详细的教材编写大纲,并发往主审和有关石油院校征求意见。同时,教材大纲也呈送王铁冠院士征求意见。参编老师审阅之后提出了具体的修改意见。王铁冠院士和钟宁宁教授对大纲初稿进行了非常认真的审阅,提出了从教材结构调整到具体内容的取舍、增删方面的指导性意见。主编汇总意见后进行了慎重斟酌,并多次向王院士和钟教授请教,就主要问题进行了深入的讨论,最终确定了编写大纲。教材初稿出来之后,主编统稿的过程中,依据入编内容的逻辑关系和篇幅,又对部分章节进行了合并及顺序调整。

教材分 18 章。前两章简介了油气地球化学的定义、学科发展演化、意义和油气成因理论的形成、发展,第三章重点介绍了油气地球化学的主要分析方法。这是与过去教材在结构上的不同之处,主要是接受主审的意见,考虑到地球化学是一门实验性很强的学科,学生具备了有关实验的基本知识之后,更容易接受相关的概念和理论。对另外开设仪器分析课的院校,第三章的内容只作参考,授课过程中,也可将本章的内容分解到相关的章节讲授,但为便于参考、查阅,本书将实验部分集中编写。第四~七章为有机质的地球化学,主要介绍有机质的产生、沉积及组成,是为后面打基础的内容。第八、九章为油气生成的地球化学,重点阐述有机质的演

化及其影响因素和油气的生成及成烃模式,这是烃源岩地球化学的核心内容和指导油气勘探的理论基础。第十~第十二章介绍石油、天然气的组成、分类及其影响因素和蚀变,可以视为是**油气蚀变的地球化学**。生物标志化合物作为油气地球化学中非常重要的评价和应用指标,它在许多章节都可能涉及,故在教材结构中的位置难以把握,为简明起见,将它集中置于第十三章中。第十四~十七章为**地球化学原理在油气勘探、开发中的应用**,不仅介绍了烃源岩评价、油源对比等经典的烃源岩地球化学的内容,也介绍了目前正在快速兴起和发展的油藏及开发地球化学内容。与以往相比,这一部分是本教材重点加强的内容。这一方面与十多年来应用方面的进展丰富有关,同时也是考虑到油气地球化学作为一门应用型的学科,其生命力应该体现在应用效果上。最后的第十八章简介非常规油(煤成油、重质油、油页岩)的地球化学。上述的黑体字部分,即有机质的地球化学、油气生成的地球化学、油气蚀变的地球化学和地球化学原理的应用体现了本教材的结构主线和基本内容。油气地球化学中还应该包括的“**油气运移的地球化学**”部分,由于内容有限,没有单独成章,而是将相关的内容分散置于生物标志化合物(第十三章)和油藏地球化学(第十七章)中。

教材各章分工如下:前言和第十五章由卢双舫执笔,第一章由张敏执笔,第二、十八章由薛海涛执笔,第三章由向廷生、张敏执笔,第四、八章由王顺玉执笔,第五章由赵红静执笔,第六章由李娇娜执笔,第七章由李娇娜、刘晓艳执笔,第九章由黄光辉、张敏执笔,第十、十二章由唐友军执笔,第十一章由赵靖舟执笔,第十三章由王春江执笔,第十四章由申家年执笔,第十六章由文志刚执笔,第十七章由张敏、黄光辉执笔。张敏重点对第一、三、九~十二、十六、十七章进行修改和统稿。卢双舫对全部书稿进行了统稿和修改,其中有6章的修改量在20%~45%,有8章的修改、重组、重写幅度达到50%~90%。薛海涛完成了全部参考文献的整理,并协助完成了清样的一校。

在教材大纲拟定和具体编写的过程中,编者深感教材的全面与精练、基础与前沿、介绍创新的理论和技术与成熟理论等几个方面的矛盾难以处理、分寸难以把握。作为一本间隔多年后编写的新教材,除了在结构和逻辑关系上要更为合理、明晰之外,还应该比较全面地反映本学科近年来的前沿进展、观点更新、理论和技术上的创新;从教材的图文并茂、生动以利于学生理解出发,应该增加实例及相应的图表;但这一方面将导致篇幅难以控制,而与目前高等教育压缩学时的总体趋势相背离,同时,创新的观点和技术又不一定成熟、成型或者能得到广泛认可;一些在目前学术界还存在分歧的观点是否介绍、介绍到什么程度,部分内容是应该在这里编入本科生教材还是将来放在研究生教材中等等,在编者之间,以及编者与主审之间都有不完全相同的分寸感。从各位参编教师提供的初稿来看,不少编者在撰写过程中花费了相当的时间和精力,查阅了大量的近期文献,写出了有关领域的新进展。但是,一方面篇幅太长,另一方面,有些内容过于深入或专业。主编不得忍痛对有关内容进行了大幅压缩和调整,但又唯恐反映不了参编者的原意。教材初稿完成之后,主审在百忙之中抽空审阅了部分章节并提出了宝贵的修改意见,对其他部分提出了指导性的意见。按照主审提出的意见,编者再次进行了修改。

由于编者水平和经验有限,同时,编者都为各校的教学、科研骨干,承担着繁重的教学、科研和管理任务,加上多方面的原因,编、审过程偏长,难免顾此失彼。因此,遗憾、不当之处,当俯拾皆是,恳请专家、读者不吝珠玉,以便今后修改完善。

教材按 64 学时编写,有关章节和标题前标 \* 的内容为选学内容,可供学时少的院校选择性教学。

编 者

2007 年 3 月 16 日

# 目 录

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第一章 绪论               | 1  |
| 第一节 油气地球化学及其主要内容     | 1  |
| 第二节 油气地球化学的发展概况      | 2  |
| 第三节 油气地球化学的发展趋势      | 4  |
| 第二章 油气成因理论综述         | 6  |
| 第一节 油气的无机成因说         | 6  |
| 第二节 油气的早期有机成因说       | 7  |
| 第三节 油气的晚期有机成因说       | 9  |
| 第四节 现代油气成因理论         | 10 |
| 思考题                  | 10 |
| 第三章* 油气地球化学的主要分析方法   | 11 |
| 第一节 有机质的分离           | 11 |
| 第二节 色谱法              | 13 |
| 第三节 红外光谱法            | 21 |
| 第四节 色谱—质谱法           | 21 |
| 第五节 稳定同位素法           | 25 |
| 第六节 油藏地球化学关键性技术      | 27 |
| 本章小结                 | 30 |
| 思考题                  | 31 |
| 第四章 有机质的产生、聚集及生物圈的演化 | 32 |
| 第一节 有机质产生的主要作用——光合作用 | 32 |
| 第二节 生物圈的演化           | 33 |
| 第三节 有机碳的循环           | 36 |
| 第四节 不同环境的生物产率        | 38 |
| 本章小结                 | 40 |
| 思考题                  | 41 |
| 第五章 生物体的化学组成及其意义     | 42 |
| 第一节 糖类               | 42 |
| 第二节 蛋白质              | 43 |
| 第三节 脂类               | 44 |
| 第四节 木质素和丹宁           | 47 |
| 第五节 各种有机质的平均组成及其意义   | 47 |
| 本章小结                 | 49 |
| 思考题                  | 50 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第六章 有机质的沉积分布特征 .....         | 51  |
| 第一节 有机质沉积的一般特征 .....         | 51  |
| 第二节 沉积环境及其对有机质沉积的影响 .....    | 52  |
| 第三节 不同沉积环境(相)有机质的沉积特征 .....  | 56  |
| 本章小结 .....                   | 59  |
| 思考题 .....                    | 60  |
| 第七章 沉积有机质的组成 .....           | 61  |
| 第一节* 腐殖质 .....               | 61  |
| 第二节 可溶有机质 .....              | 64  |
| 第三节 干酪根 .....                | 66  |
| 第四节 各种有机质之间的关系与干酪根的形成 .....  | 78  |
| 本章小结 .....                   | 79  |
| 思考题 .....                    | 79  |
| 第八章 有机质的演化及其影响因素 .....       | 80  |
| 第一节 有机质的成岩作用、深成作用和变质作用 ..... | 80  |
| 第二节 干酪根的演化 .....             | 83  |
| 第三节 可溶有机质的演化 .....           | 90  |
| 第四节 影响有机质演化的地球化学因素 .....     | 97  |
| 本章小结 .....                   | 104 |
| 思考题 .....                    | 105 |
| 第九章 有机质的成烃模式及阶段划分 .....      | 106 |
| 第一节 有机质成烃的一般模式 .....         | 106 |
| 第二节* 有机质成烃模式的改进和发展 .....     | 110 |
| 第三节* 碳酸盐岩有机质的成烃模式 .....      | 115 |
| 本章小结 .....                   | 116 |
| 思考题 .....                    | 117 |
| 第十章 生物标志化合物及其地球化学意义 .....    | 118 |
| 第一节 生物标志化合物的概念及立体化学基础 .....  | 118 |
| 第二节 生物标志化合物的分析与鉴定 .....      | 119 |
| 第三节 主要的生物标志化合物 .....         | 121 |
| 第四节 生物标志化合物在油气地球化学中的应用 ..... | 139 |
| 本章小结 .....                   | 147 |
| 思考题 .....                    | 148 |
| 第十一章 原油的组成、分类及影响因素 .....     | 149 |
| 第一节 石油的元素组成及馏分组成 .....       | 149 |
| 第二节 石油的族组成 .....             | 150 |
| 第三节 石油的分类 .....              | 156 |
| 第四节 影响原油类型的地质因素 .....        | 158 |
| 本章小结 .....                   | 170 |
| 思考题 .....                    | 170 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| <b>第十二章 天然气的组成、分类及地球化学特征</b> | 171 |
| 第一节 天然气成因类型                  | 171 |
| 第二节 有机成因气的主要类型及其特征           | 174 |
| 第三节 碳、氢、氮和氩同位素地球化学特征         | 183 |
| 第四节 轻烃地球化学                   | 192 |
| 第五节 各类天然气的鉴别                 | 197 |
| 本章小结                         | 206 |
| 思考题                          | 206 |
| <b>第十三章 烃源岩定性评价</b>          | 207 |
| 第一节 有机质的丰度                   | 209 |
| 第二节 有机质的类型                   | 215 |
| 第三节 有机质的成熟度                  | 222 |
| 第四节 有机质非均质性评价及预测             | 229 |
| 第五节 有机质原始丰度和原始生烃潜力的恢复        | 237 |
| 本章小结                         | 240 |
| 思考题                          | 241 |
| <b>第十四章 烃源岩的定量评价</b>         | 242 |
| 第一节 烃源岩生烃的定量评价               | 242 |
| 第二节 烃源岩排烃的定量评价               | 251 |
| 第三节* 沉积埋藏史和热史的重建             | 266 |
| 本章小结                         | 270 |
| 思考题                          | 270 |
| <b>第十五章 油气源对比</b>            | 271 |
| 第一节 油气源对比原理                  | 271 |
| 第二节 油气源对比参数                  | 274 |
| 第三节 油气源对比实例                  | 286 |
| 本章小结                         | 292 |
| 思考题                          | 292 |
| <b>第十六章* 油藏地球化学基础</b>        | 293 |
| 第一节 油藏地球化学的理论基础              | 293 |
| 第二节 油藏地球化学技术的主要应用领域及方法       | 302 |
| 本章小结                         | 311 |
| 思考题                          | 311 |
| <b>第十七章 地球化学录井</b>           | 312 |
| 第一节 技术原理与方法                  | 312 |
| 第二节 地球化学录井技术应用与实例分析          | 318 |
| 本章小结                         | 330 |
| 思考题                          | 330 |
| <b>第十八章* 非常规油气地球化学</b>       | 331 |
| 第一节 非常规油气概述                  | 331 |

|               |     |
|---------------|-----|
| 第二节 页岩油气..... | 336 |
| 第三节 致密油气..... | 346 |
| 第四节 煤层气.....  | 351 |
| 本章小结.....     | 357 |
| 思考题.....      | 357 |
| 参考文献.....     | 358 |

# 第一章 绪 论

## 第一节 油气地球化学及其主要研究内容

地球化学是用化学原理研究地壳、地球的化学成分和化学元素在其中分布、集中、分散、共生组合与迁移规律以及演化历史的学科。有机地球化学是地球化学的重要组成部分,是用有机化学理论研究地壳内各种碳质物体的分布情况,探讨它们的运移、富集规律,鉴别它们的成因和起源,研究范围包括大气圈、水圈和岩石圈以及宇宙空间的天体。而油气地球化学是有机地球化学的重要分支,研究范围主要集中于岩石圈中的沉积岩石圈(包括沉积物)和水圈。从深度上看,大约集中在从地表到埋深 10km 的范围内。

油气地球化学是应用化学原理尤其是有机化学的理论和观点来研究地质体中与油气有关的有机质的来源、时空分布、化学组成、结构、性质及演化,探讨有机质向油气转化的过程和机理,研究油气的初次运移和二次运移、油气的次生改造和蚀变、油气藏聚集特征、油气藏形成过程及油气田开发过程中的有机—无机相互作用、油气组分的变化及其规律和意义,以及运用这些知识来指导油气的勘探和开发的一门科学。

油气地球化学是一门新兴的交叉学科。它突破了单一学科的界限,将地质类学科(沉积学、地质学、矿物学等)与化学类学科(有机化学、无机化学、物理化学、分析化学)和生物类学科(生物学、古生物学、微生物学等)及石油工程等的理论和方法融为统一的科学体系,并在油气勘探和开发实践中逐渐形成一门独立的学科,其基本理论和方法在目前油气勘探和开发中正发挥着越来越重要的作用。油气地球化学在 20 世纪七八十年代已经与石油地质学、地球物理学并列,成为石油勘探三大理论基础之一,并于 90 年代逐步、快速渗入油气开发领域。该学科的基本原理和基本方法是地球化学专业、资源勘查工程专业学生以及从事油气勘探与开发的地质人员所必备的。

油气地球化学的主要内容包括油气地球化学的理论基础、油气地球化学应用和油气地球化学的分析方法。其中,理论基础由以下 4 方面组成:

(1) 有机质的地球化学:主要讨论作为油气先质的有机质的起源、演化、组成、分布特征及其与油气的关系,对应教材的第四章至第七章。

(2) 油气生成的地球化学:主要讨论有机质转化成为油气的过程、机理及影响因素和成烃模式,对应教材的第八章、第九章。

(3) 油气运移和聚集的地球化学:主要讨论油气是如何、什么时候运移并聚集到油藏中的,有关内容含在第十、十四、十六章中。

(4) 油气蚀变的地球化学:主要介绍聚集到油气藏中的油气的组成是如何发生变化的,发生了哪些变化。当然,讨论的基础是油气的基本组成和分类。对应本书的第十一、十二章。

油气地球化学在解决实际问题中的效果是其生命力之所在,它主要应用于以下方面:

(1) 烃源岩评价:回答一个研究区烃源岩的有无、优劣及生油气量的大小、时期及强度,为勘探选区和投资力度的决策服务。对应教材的第十三、十四章。

(2) 油源对比:主要回答烃源岩所生成油气的去向或油气藏油气的来源,为勘探方向的选择服务,对应教材的第十五章。

(3) 油藏和开发地球化学中,主要研究油气藏中流体的非均质性及其形成机制、分布规律、油藏中流体与矿物的相互作用、采油过程中组分的变化规律与机制,探索油气的充注、聚集历史与定位成藏机制,评价采油过程中储层及流体组成的变化、合采层单层产能贡献的变化,为油田的勘探、开发和提高采收率服务,对应教材的第十六章。近年来为满足勘探开发生产的技术需求,将一些能够快速检测储层中油气含量及性质、确定油气水层界面、计算储量及预测产能的技术应用于随钻录井工作,形成了气测录井、岩石热解录井和色谱录井等实用、配套的技术系列,使地球化学录井技术得到了快速发展。虽然它们可以视为油藏及开发地球化学的一部分,但由于自成分析测试、解释的体系,单独列于第十七章中。

(4) 近些年来受到高度重视并得到快速发展非常规油气,包括致密油气、页岩油气、煤层气等,其评价和研究中所涉及的主要地球化学问题,在教材的第十八章中讨论。

作为一门高度依赖于分析技术的学科,油气地球化学的每一步发展和创新都离不开分析技术的进步,有关的主要内容在教材第三章中介绍。

此外,生物标志化合物的地球化学作为油气地球化学进入分子级水平的标志,在整个学科理论和应用的发展中有着特殊的意义,这一部分的内容集中在教材的第十章介绍。

从考察和研究的对象和目标来说,油气地球化学可分为烃源岩地球化学和油藏(及开发)地球化学。其中,烃源岩地球化学是经典的油气地球化学的主要研究内容,它以烃源岩为主要研究对象,主要服务于油气的勘探;油藏(及开发)地球化学是油气地球化学近年来的学科生长点和重要进展,它以油藏流体为主要研究对象,所获得的信息既可以服务于勘探,又可以服务于开发。

## 第二节 油气地球化学的发展概况

回顾油气地球化学的演化历程,可以说油气地球化学是有机地球化学理论和技术最重要的应用领域之一,同时它也是有机地球化学新理论和新技术最为重要的生长点之一。甚至可以这样说,油气地球化学体现了现代有机地球化学的进展,正是这种基础理论研究、应用基础研究与地质应用相得益彰,油气地球化学被誉为现代基础科学与应用科学结合的典范(钟宁宁、张枝焕,1998)。

可以说,油气地球化学与有机地球化学是同步诞生和发展的,因为最早的有机地球化学工作以及它的发展与石油和煤等能源的研究密切相关。早在20世纪20年代,苏联学者B. H. 维尔纳茨基就开始研究地质体中有机质的地质作用,他曾着重研究过石油的有机组成和石油有机成因等问题,因此,在他的主要著作如《地球化学概念》和《生物圈》等书中,详细论述了石油的有机组成和石油成因的主要依据,论述了生物和有机质(如腐殖质)在沉积锰矿以及其他金属元素表生富集过程中的重要意义。当时维尔纳茨基工作的实验室即是1927年苏联建立的活性炭研究室是世界上第一个与有机地球化学有关的实验室的前身,后来该实验室又改名为

生物地球化学研究室。

20 世纪 30 年代, A. 特莱布斯( Alfred Triebs, 1933) 首次从石油中分离并鉴定出卟啉化合物, 从而被认为是真正现代意义上的有机地球化学概念诞生的标志。他首次发现并证实了卟啉化合物广泛存在于不同时代、不同成因的石油、沥青等地质体中, 认为这些卟啉化合物来源于植物叶绿素, 从而为石油有机成因理论提出了一个极其重要的证据。对各种地质体进行了广泛深入研究之后, A. 特莱布斯认为这种石油卟啉就是植物叶绿素和动物血红素降解的产物, 进而提出了从叶绿素 a 向石油卟啉转化途径的假说。这样就开创了一种新的有机地球化学研究方法, 即直接对比生物先质体中的生物化学组分和原油中的有机组分。迄今为止, 关于其他许多生物标志化合物的成因研究仍然基于这一基本思想, 即地质历史时期中生物的生物化学转化机理可以用现代沉积的事实来解释, 这也是有机地球化学最重要的基础学科——分子地球化学诞生的标志。

20 世纪 50 年代初, P. V. 史密斯( Smith, 1952, 1954) 等人成功地从现代海洋沉积物中分离鉴定出微量类似于原油的烃类化合物, 从而使石油直接起源于类似现代沉积物有机质的观点得以广泛流传。50 年代中期至 60 年代中期, 随着气相色谱技术的广泛使用, 人们可以从现代沉积物、土壤、沉积岩和石油天然气中抽提分离鉴定出大量的有机化合物, 使研究工作大大深入。1959 年 11 月美国匹兹堡成立了第一个国际性的有机地球化学协会。1962 年首先于意大利米兰召开了第一届国际有机地球化学会议, 出版了《有机地球化学进展》论文集, 并定每两年召开一次学术会议。随着研究工作的深入、大量资料的积累, 1963 年 I. A. 布雷格( Breger, 1963) 主编了《有机地球化学》, 分章论述了色素、氨基酸、碳水化合物、脂类、干酪根、煤、石油等地球化学。1964 年苏联学者亦出版了《有机质的地球化学》, 重点论述了沉积金属矿产的有机地球化学。这标志着有机地球化学学科以完善独立的体系立于百科之林。

20 世纪 70 年代至 80 年代, 是油气地球化学学科发展最重要的时期。随着气相色谱—质谱仪和同位素质谱仪等一批先进的分析技术相继问世, 人们不仅能够从复杂混合物中分离和鉴别出单个有机化合物, 而且该学科的理论和方法逐渐形成。N. B. 瓦索耶维索( Vassoyevich) 等( 1969) 和 A. A. 卡尔泽夫( Kartzev) 等( 1972) 首先提出, 石油生成有一主要阶段和主要相, W. C. 普西三世( Pusey III, 1973) 提出“地温窗”和“液体窗”概念, 即原油在地下的分布具有一定的温度范围和深度范围。P. 奥尔布雷克特( Albrecht) 等( 1976) 和 B. 杜兰德( Durand) 等( 1976) 对其可溶有机质和干酪根的组成、结构和数量变化进行了深入细致地研究, 这是迄今最好的有机质演化研究实例之一。

20 世纪 70 年代末, 以 Tissot 为代表的地球化学家在归纳综合前人研究成果的基础上, 提出“干酪根晚期热降解生烃”理论模式。至此, 石油生成和蚀变的现代成因理论( 或称石油演化理论) 已完整地建立起来, 它不仅符合客观地质事实, 特别是符合沉积岩有机质演化的基本规律, 逐渐为广大石油地质工作者所接受, 而且更重要的是已在指导油气勘探中发挥了重大作用。

20 世纪 90 年代, 油藏地球化学成为油气地球化学学科新的生长点, 它不仅将研究重点从烃源岩转向储集层( 简称储层) 和油藏, 而且将油藏油、气、水和矿物骨架作为统一的地球化学体系。利用有机—无机相互反应、静态—动态的辩证观点来剖析油藏流体化学组成的非均质性及其地质—地球化学意义, 真正实现了油气地球化学学科从烃源岩评价到储层描述、从油气藏形成规律到油田开采过程中的动态监测全方位地服务于石油工业, 同时丰富和促进了油气地球化学学科的发展。

我国油气地球化学的研究工作始于 20 世纪 50 年代,发展于 80 年代,并形成了具有特色的陆相生油理论和源控论。我国各油区烃源层系形成的环境条件及其成烃演化史的查明,一系列指导油气勘探的主要地球化学指标的确定,油气运移、聚集成藏史的地球化学研究,以及生油气量和资源量评价,为我国油气资源的勘探决策提供了重要的科学依据。从 70 年代后期开始,随着现代分析技术的不断进步,油气地球化学进入了分子级的研究水平,确立了干酪根热降解生油理论的主导地位,建立了我国各油区烃源岩的成烃演化剖面,使油气地球化学从技术、理论到应用,已发展成为一门成熟的学科,并在油气勘探开发中发挥着日益重要的作用。

## 第三节 油气地球化学的发展趋势

随着现代分析技术不断改进和完善,研究成果层出不穷,21 世纪将是油气地球化学蓬勃发展的大好时光,学科的相互交叉渗透促使许多新的生长点和研究方向不断涌现,油气勘探和开发的实际需求迫切要求油气地球化学的发展也应该以社会、经济效益为中心,把应用研究和应用基础研究紧密结合起来,在密切为油气勘探开发服务的同时,促进油气地球化学学科的发展和壮大。在 21 世纪油气地球化学发展前景中,以下几个方面值得重视。

### 一、天然气地球化学研究

天然气是一种优质、清洁、高效能源。从世界天然气产量在油气产量和能源结构中所占比重的增长趋势来看,21 世纪将是一个天然气的时代,天然气工业将面临快速发展的历史机遇,而天然气的成因机理和成因类型判识、气源综合对比及富集规律等方面的研究仍需加强。例如,天然气和稀有气体同位素地球化学将继续成为一个活跃的研究领域。其中,天然气生成、运移、聚集和散失过程中的 C、H 同位素分馏效应是目前地球化学一个前沿和活跃的研究领域,还有许多问题有待深入探讨,其研究成果将影响天然气的气源、成因类型和成熟度判识。同时,在天然气成藏、煤成气、煤层气、深盆气和天然气水合物资源的研究方面,还有许多问题将有待进一步探讨。

### 二、油藏地球化学研究

油藏地球化学是有机地球化学一个新兴的研究方向,它是研究油藏流体(油、气、水)的非均质性形成机制、分布规律及与油藏中有机与无机岩石矿物的作用,探索油气充注、聚集历史与定位成藏机制,评价采油过程中储层及流体组成的变化、合采层单层产能贡献的变化,为油田的勘探、开发和提高采收率服务。自 20 世纪 80 年代中后期以来,世界各国主要油气区尤其是西欧北海油区都开展了油气地球化学研究,并取得了成功的经验。但是,随着油气勘探和开发工作的深入,21 世纪油气地球化学还面临一些重大课题需要解决。例如油—水—岩之间有机—无机相互作用机制及其应用、油田开发和动态监测中屏障边界的厘定、油气运输过程中的管道漏失评定、注水过程中水的前缘判识等问题还需要进一步深入研究。依托快速分析技术发展起来的录井地球化学还将是地球化学理论、技术与应用相结合的一个重要且有生命力的发展方向。

### 三、非常规油气地球化学发展趋势

近年来,由于常规油气资源的逐步消耗,致密油气、页岩油气、煤层气、重油沥青(油砂)、油页岩、天然气水合物等非常规油气资源日益受到人们的重视,尤其是美国、加拿大、中国等国成功实现了致密油气、页岩油气、煤层气、油砂、油页岩等资源的商业开采,更极大地增加了人们对利用这些非常规油气资源的期待。

由于非常规油气资源勘探开发多处于刚刚起步或探索性研究阶段,很多关键的地球化学问题尚未得到圆满解决,例如,致密油气与页岩油气“甜点”识别及预测中地球化学问题,致密储层内油—气—水—岩相互作用,页岩地层条件下的含气量及吸附/游离气的比例问题及其与页岩气产量和生产期的关系,油在致密、页岩储层孔隙内的赋存状态及吸附态与游离态的比例关系与相互转化条件,致密油充注、运移的启动条件(阻力与动力的关系),致密、页岩储层中原油的可流动性问题等等。

煤炭资源在世界上和中国都非常丰富,已开采的煤矿中普遍见到油气显示,但煤成油的商业价值还有待落实。在业已发现的具有商业性油气聚集的含煤盆地中,煤层与煤系泥岩对成烃成藏的贡献孰主孰次还有争论。原生和次生的生物成因气(简称生物气)在煤层气富集高产中的作用,煤层甲烷碳氢同位素组成与变化规律及其控制因素与地质背景的关系,天然气水合物的形成条件与分布规律等等,这些涉及机理的科学问题的解决是未来非常规油气地球化学的重要研究课题和发展方向。

此外,碳酸盐岩的地球化学、未成熟—低成熟油的地球化学、非烃的地球化学、生物标志化合物的地球化学、同位素地球化学也是油气地球化学中值得关注或有许多分歧、争论有待厘清的研究领域。