

沉积盆地动力学与能源矿产研究进展丛书



丛书主编 刘池洋

盆地多种能源矿产 共存富集成藏(矿) 研究进展

主编 刘池洋



科学出版社

www.sciencep.com

沉积盆地动力学与能源矿产研究进展丛书

丛书主编 刘池洋

盆地多种能源矿产 共存富集成藏(矿)研究进展

主编 刘池洋

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书为国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“多种能源矿产共存成藏(矿)机理与富集分布规律”的阶段性研究成果,是在对与项目相关领域的国内外研究现状、前沿进展及存在问题等广泛调研的基础上,结合项目学术骨干的学科专长和前期科研积累而完成的。书中共收录论文25篇,内容涵盖油、气、煤、铀等主要能源矿产的共存成藏(矿)机理与富集分布规律、盆地热演化、流体动力、成岩作用、有机与无机相互作用、微生物作用及其能源矿产成藏(矿)效应、烃类成藏年代、煤成油、煤岩学、沥青、煤层自燃与围岩烧变、砂岩漂白现象、砂岩铀矿床分类和形成环境、中亚及邻区砂岩型铀矿特征与成矿地质条件、鄂尔多斯盆地新生代后期改造等。各篇论文自成体系,便于不同专业读者选读。

本书可供油、气、煤、铀能源地质勘探与开发领域及相关交叉学科的科研、技术人员,以及大专院校相关专业师生阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

盆地多种能源矿产共存富集成藏(矿)研究进展/刘池洋主编. —北京:科学出版社,2005

(沉积盆地动力学与能源矿产研究进展丛书)

ISBN 7-03-015947-0

I. 盆… II. 刘… III. 盆地-共生矿物-矿床成因论-文集 IV. P571-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第080629号

责任编辑:胡晓春/责任校对:赵桂芬

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100017

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2005年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2005年9月第一次印刷 印张:17 1/4

印数:1—4 500 字数:394 000

定价:55.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

沉积盆地动力学与能源矿产

——代丛书前言

1. 沉积盆地在地学研究中的重要地位

地球表面可分为大陆和大洋两大地貌-构造单元,其中海洋总面积约占地球表面总面积的 71%。从地貌形态和正在接受沉积等方面考虑,大洋似可看作一种特殊的巨型沉积盆地或由若干个沉积盆地组成的超级沉积盆地域(群),故又常被称作大洋盆(地)。

大陆由沉积盆地、造山带和地盾三种属性不同的构造单元所构成。其中沉积盆地所占面积最大。据统计,海拔在 500m 以下的平原和丘陵,约占陆地总面积的 52.2%,大部为沉积盆地;其中海拔低于 200m 的平原面积约占一半,几乎全为正在沉降、接受沉积的冲积平原或三角洲和湖盆,即正在发展的沉积盆地。在海拔 500m 以上的山地和高原,仍有较大面积为沉积盆地所占据。若将经后期改造但仍有沉积矿产勘探远景的残留沉积盆地(体)计算在内,盆地的面积约占大陆总面积的 4/5。

因而,无论在世界地质和地球动力学,还是在大陆地质和大陆动力学研究中,沉积盆地均处于极为重要的地位。

盆地沉积翔实地记录了地球最外圈层的演化历史和地质作用、气候与环境演变,此记录时间连续、信息丰富。其中大多数盆地仍较好地留存有其形成演化的深部结构特征,从而可弥补诸多造山带深部已“脱胎换骨”而难以反映其形成的深部动力环境之不足。

沉积盆地是一个聚宝盆,蕴藏着丰富的、人类必需的多种矿产资源:如水、油、气、煤、膏盐等非金属矿产,铀矿、铅锌矿等金属矿产;同时也是人类衣食原料的主要生产地。沉积盆地为沉积矿产赋存的基本单元和成藏(矿)的大系统。在盆地形成、演化和后期改造过程中,这些矿产同盆成生共存、聚散、成藏(矿)和定位。

沉积盆地是人类生息、活动的主要场所。目前世界人口的 90% 集中居住在海拔 400m 以下的平原、大河中下流域、环湖和沿海附近盆地分布的地域。在海拔 400m 以上的地区,人类主要居住在山间盆地和高原洼地。这些地区通常又是地震、滑坡、泥石流、地裂缝和海啸等自然灾害多发区。人类的活动和集中居住,也影响局部及区域气候和环境的变化,同时带来地表和地下不同程度、多种形式的环境污染。这一切对人类生存环境形成威胁的自然现象和人为行为,其威胁的特点和程度又因盆地地质特征的不同而有别。

所以,近三十多年来,地球科学从基础理论研究,矿产及水资源勘探利用、保护,改善人类生存环境三方面,不约而同地将关注的焦点和研究的热点转向沉积盆地。集地球科学研究和应用的这三大领域(科学研究、物质需求、生存环境)为一体、且均居重要地位者,惟有盆地。沉积盆地从来没有像今天这样得到学术界、工业界和政府部门的广泛重视。在世界和美国等发达国家的地质研究计划中,沉积盆地均处于极为重要的位置。

2. 能源矿产赋存与沉积盆地动力学

随着砂岩型铀矿在铀矿资源中地位和重要性的迅速提高,油、气、煤、铀等重要能源矿产主要赋存在沉积盆地中已成为不争的事实。油、气、煤和铀在世界各国的能源结构、政治、军事、经济发展、社会进步和国家安全等方面均处于十分重要的地位。世界各国均对其高度重视。

我国现已成为全球第二大石油消费国。2004年净进口原油和成品油 1.4365×10^8 t (其中原油 1.1723×10^8 t),原油进口依存度超过国际石油安全警戒线(40%)。我国目前探明的煤炭、天然气和铀矿储量的规模和质量,也难以适应经济快速发展的需求。“开源节流”和多种能源之间的互补和替代,是缓解我国短缺能源供求矛盾、减少石油进口的有效途径。否则,将会直接威胁到国家的安全,也势必影响我国经济的持续发展。

能源盆地是沉积盆地的主要组成部分,它以其展布面积大、发育时间长而在地球动力学的研究中占有更为重要的地位。大中型沉积盆地的形成、发展、演化和改造,总体受地球深部系统内动力地质作用的控制;而盆地内沉积物的充填、埋藏和成岩,则是在盆地形成的统一动力学背景下,总体受地球表层系统(岩石圈浅表层、水圈、大气圈和生物圈)外动力地质作用(风化、生物、剥蚀、搬运、沉积、成岩等)的制约。沉积矿产在此过程中于盆地内成生、共存、聚散、成藏(矿)和定位。所以,沉积盆地将地球深部系统的内动力地质作用和地球表层系统的外动力地质作用有机耦合,自然构成了一个各圈层内、外地质动力相互作用的统一盆地动力学系统;此系统的活动虽有其相对独立性,但总体属地球动力学大系统的重要组成部分——此即为笔者理解的盆地动力学内涵。

沉积盆地动力学系统就是诸多沉积矿产同盆成生、赋存、成藏(矿)的统一动力学背景和成藏(矿)大环境。只有将多种能源矿产置于盆地形成、演化和改造的统一动力学背景之中,才可能揭示其同盆共存富集的基本规律和成藏(矿)机理及其主控因素。

中国大陆活动性强,地球动力学环境因地而异、复杂多变,造就了中国盆地类型多样,地质构造特征复杂,矿产资源丰富而特色显明。这虽增加了研究的难度,但却为我国学者提供了产生具中国盆地和矿产资源特色的前沿创新成果、实现科学重大突破的良好条件和机遇;从而为丰富和发展世界盆地动力学和能源地质相关科学理论做出贡献。

为了推动沉积盆地动力学研究的深化并与我国能源矿产实际密切结合,及时交流研究进展,笔者主编和组织撰写了《沉积盆地动力学与能源矿产研究进展丛书》。丛书以国家973项目和其他相关重要项目的研究成果和理论总结为主体;分析实例涉及国内外,重点解剖中国盆地;研究内容涵盖大地学,突出盆地和能源矿产;选题力求反映该领域的研究现状、进展和发展趋势;并触及其薄弱环节、存在问题及可能解决的途径。

本丛书以西北大学含油气盆地研究所提出的盆地动力学研究系统和倡导的“整体、动态、综合”研究原则为指导思想。对各作者的具体研究思路、学术观点、撰稿特色和文笔风格不求统一,且尽可能保留原貌;体现科学民主、学术自由。

预祝丛书顺利出版和各部著作相继问世,为繁荣和发展盆地与能源研究做出贡献。

在此,谨向帮助、关心和支持本丛书出版的所有人士致以诚挚的谢意。

刘池洋

2005年盛夏于西北大学

前 言

国家重点基础研究发展计划(亦称 973 计划)项目是对国家发展和科学技术进步具有全局性和带动性、需要国家大力组织和实施的重大基础性研究项目;为技术创新提供动力和源泉,为经济、社会的可持续发展提供科技支撑;强调国家重大需求与重大前沿科学问题的有机结合,原则要求为:①围绕我国社会、经济和科技自身发展的重大需要,解决国家中长期发展中面临的重大关键问题;②瞄准科学前沿重大问题,体现学科交叉、综合,探索科学基本规律;③发挥我国的优势与特色,体现我国自然、地理与人文资源特点,能在国际科学前沿占有一席之地等以上三方面的基础性研究。^①

我国已成为全球第二大石油消费国;自 1993 年又成为石油净进口国以来,石油进口量增长快速。2004 年净进口原油和成品油 1.4365×10^8 t;原油进口依存度达 42%,超过国际石油安全警戒线(40%)。从国家经济持续发展和安全战略等实际考虑,加强研究和开发多种能源矿产,进行和实现多种能源之间的互补与替代,是改变我国能源矿产短缺、缓解供求矛盾、减少石油进口的有效途径和必由之路。在多年对中国及世界能源盆地和资源研究的基础上,西北大学组织申报了“973”计划项目“多种能源矿产共存成藏(矿)机理与富集分布规律”。该项目 2003 年 11 月由国家科技部批准立项,于 12 月正式启动。项目依托单位为国家教育部和陕西省科技厅,首席科学家为西北大学刘池洋教授。

该 973 项目主要研究赋存于沉积盆地中的石油、天然气、煤炭和铀矿等重要的不可再生能源;属多学科交叉、融合,多行业联合、渗透的综合性研究项目。根据项目交叉综合的特点,首席科学家组织了跨学科、跨行业的研究队伍和专家组。项目专家组由赵鹏大院士、陈毓川院士、张国伟院士、贾承造院士、金之钧教授、张泓教授、孟自芳研究员、徐高中研究员和刘池洋教授组成。跟踪专家组由刘文汇研究员(组长)、彭平安研究员(副组长)、赵凤民研究员(副组长)、赵重远教授、贝丰教授、彭苏萍教授、高山教授、杨华教授组成。研究队伍由来自油气、煤炭、核工业、地矿等多个相关部门与 10 所高等院校和中国科学院下属 3 个地学研究所等优势单位的学术骨干组成。

为了加强项目的过程管理,国家科技部指派能源领域咨询专家周凤起研究员和夏道止教授对项目实施的全过程进行跟踪,及时了解项目的组织实施和进展情况,向科技部提出咨询意见。

在 2004 年 2 月 22~23 日召开的本项目课题论证会上,经各参加单位协商,为了项目的顺利实施,成立了项目协调领导小组;组长为西北大学校长孙勇教授、陕西省科技厅副厅长党禹洲研究员、陕西省教育厅副厅长张炜教授(现西北大学党委书记);常务副组长为西北大学副校长朱恪孝研究员;成员有中国石化勘探开发研究院院长金之钧教授,中国核工业集团公司地质局副局长陈跃辉教授,煤炭科学研究总院西安分院副院长张群教授,中国科学院兰州地质研究所所长孟自芳研究员,长安大学副校长马建教授,西北大学科研处

^① 国家重点基础研究发展计划简介. 科技部 973 网站(<http://www.973.gov.cn>)

处长郭鹏江教授、财务处处长赵明扬研究员、地质学系主任张云翔教授。

该项目遴选富集多种能源矿产于一体的鄂尔多斯盆地为重点研究地区,以油、气、煤、铀等能源矿产为主要研究对象,以盆地内多种能源矿产共存的各种关系为线索,以其同盆共存的内在联系和成藏(矿)机理及分布规律为核心,以盆地动力学和动态演化-改造过程为主线,多学科交叉综合研究和重点聚焦的关键科学问题是:多种能源矿产同盆共存富集的①物质基础与地球动力学背景、②共存富集环境和成藏(矿)机理、③时空分布与主控因素,及其④判识体系、预测理论和协同勘探模式等。

项目从申报到正式启动实施,研究人员对国内外多种能源矿产同盆共存富集等相关领域的研究现状、进展和存在问题等进行了广泛调研,取得了诸多新成果和新认识,奠定了本项目研究的基础,自然也是本项目研究的重要组成部分。与本项目交叉综合的特点相适应,项目组学术骨干从事各种能源矿产和不同学科的研究。各人学有专长、颇有建树,在所研究领域积累甚丰,但对其他学科的了解却因人而异,差别较大。要高质量圆满完成本项目的研究计划和任务,个人补短和学科交叉渗透已成必然。及时反映和交流本项目的调研成果和各相关领域的研究进展,无疑是促使和实现此“必然”的重要方面和具体行动;同时对广大同仁的科学研究和能源学科的进步也不无裨益。鉴此,本项目组织和编撰了与多种能源矿产研究进展有关的综述类研究论著。

本书为笔者计划撰写和主编的《沉积盆地动力学与能源矿产研究进展丛书》的第一部。后续还将有由本 973 项目研究成果和其他相关成果构成的丛书其他著作陆续问世。

本专辑从撰稿到定稿,凝结了作者和审稿人(主要为本项目专家和张复新教授)的汗水和心血。各作者根据专家的修改意见和稿件要求对论文进行了认真修改,大多几易其稿。根据组稿的初衷、要求和审稿意见,有 12 篇论文没有录用,其中主要为论及鄂尔多斯盆地地质或能源地质及已(即)发表的论文,在此特作说明并请作者理解。

对作者、审稿人的辛勤劳动谨致敬意!

在本 973 项目申报和实施过程中,始终得到国家科技部和教育部,陕西省科技厅和教育厅,西北大学主管领导和科研处、地质学系、财务处、校办等,煤炭科学研究总院西安分院,中国科学院兰州地质研究所,核工业 203 研究所等;孙卫教授、谭成仟教授和西北大学地质学系参与申报各项活动的全体同仁,以及本项目各位专家等的大力支持、多方帮助和悉心指导,借此谨表示衷心感谢!

刘池洋

2005 年 6 月 30 日于西安高新苦乐斋



项目徽标简介:上部象征盆地和位于其中的钻塔;下部自左而右分别为油(oil)、铀(uranium)、气(gas)和煤(coal) 4 种能源矿产英文字母的缩写,排序纯系设计者按造型需要编排。此徽标由西北大学艺术系邓益民画师设计。

目 录

沉积盆地动力学与能源矿产——代丛书前言	刘池洋 (i)
前言	刘池洋 (iii)
多种能源矿产共存成藏(矿)机理与富集分布规律研究	
..... 刘池洋 谭成仟 孙 卫 徐高中 张 泓 (1)	
鄂尔多斯盆地热演化史研究现状及进展	任战利 张 盛 高胜利 崔军平 (17)
沉积盆地流体研究的现状与前沿问题	王震亮 张立宽 (26)
盆地深部流体及其成藏(矿)效应研究现状评述	
..... 赫 英 潘爱芳 刘养杰 李洪英 李荣西 (43)	
盆地流体与砂岩型铀矿成矿作用研究现状	欧光习 赵宏刚 张建锋 李林强 (50)
碎屑岩成岩作用阶段与石油、天然气、煤、铀成藏成矿阶段划分	
..... 柳益群 邢秀娟 韩作振 樊爱萍 杨仁超 (59)	
含油气盆地烃类聚集历史、成藏年代研究进展及思考	
..... 王 琪 孟自芳 妥进才 李相博 王先彬 (67)	
多种能源矿产共存富集的组合形式、地质条件及区划	王明镇 李增学 常象春 (76)
煤成油研究现状及存在的问题	
..... 代世峰 钟宁宁 刘池洋 孙玉壮 秦胜飞 李 丹 (83)	
煤岩学研究现状及应用	李小彦 (96)
煤层自燃与围岩烧变研究进展	赵俊峰 刘池洋 马艳萍 房建军 (105)
有机质作用与砂岩型铀矿床赋存	妥进才 王先彬 孟自芳 (114)
有机质和微生物在铀成矿过程中的作用	
..... 张维海 赵建社 张荣兰 高 新 张 改 梁永庆 苗建宇 (134)	
砂岩漂白现象的形成及其启示	马艳萍 刘池洋 吴伯林 赵俊峰 房建军 (141)
沥青的研究现状及其在多种能源矿产共存研究中的意义	
..... 潘爱芳 赫 英 马润勇 (152)	
砂岩型铀矿与浅成低温热液矿床	张复新 (164)
砂岩铀矿床分类及产铀盆地演化模式	秦明宽 (172)
铀的水溶液化学	赵建社 张荣兰 张维海 苏碧云 苗建宇 刘池洋 (188)
有机地球化学在重建砂岩型铀矿形成环境中的应用	熊永强 王彦美 (195)
能源矿产形成过程中的有机与无机相互作用	林明月 刘景委 秦 鹏 (205)
中亚及邻区砂岩型铀矿基本特征与成矿作用演化	吴伯林 刘池洋 (215)
层间氧化带砂岩型铀矿床成矿地质条件分析	
..... 乔海明 张复新 徐高中 徐纯红 王伟涛 (229)	
晚中生代—新生代构造体制转换与鄂尔多斯盆地的改造	张岳桥 (238)
鄂尔多斯盆地新生代抬升运动研究进展	郑国璋 武力超 李建星 岳乐平 (247)
鄂尔多斯地块及邻区晚新生代构造运动及其表现	桂小军 刘池洋 (257)

CONTENTS

The Dynamics of Sedimentary Basins and Energy Minerals	Liu Chiyang (i)
Preface	Liu Chiyang (iii)
The Formational Mechanism, Accumulation and Distribution Patterns for Multi-energy Mineral Deposits Coexisting in the Same Basin	 Liu Chiyang, Tan Chengqian, Sun Wei, Xu Gaozhong, and Zhang Hong (1)
Present Situation and Progress on Thermal History Research of Ordos Basin	 Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, and Cui Junping (17)
The Development and Frontier of Research on Fluid in Sedimentary Basin	 Wang Zhenliang and Zhang Likuan (26)
Current Research on Deep Fluid and Its Effect of Reservoir Formation and Mineraliza- tion in Basin ...	He Ying, Pan Aifang, Liu Yangjie, Li Hongying, and Li Rongxi (43)
Present Research Status of Basin Fluids and Sandstone-type Uranium Ore Formation	Ou Guangxi, Zhao Honggang, Zhang Jianfeng, and Li Linqiang (50)
The Comparison Between Diagenetic Stage of Clastic Rock and Hydrocarbon Accumula- tion-Mineralization Stage of Oil, Gas, Coal and Uranium	 Liu Yiqun, Xing Xiujuan, Han Zuozhen, Fan Aiping, and Yang Renchao (59)
Advances of the Study on Hydrocarbon Accumulation History and Pool-forming Dating in the Petroliferous Basin and Discussions	 Wang Qi, Meng Zifang, Tuo Jincai, Li Xiangbo, and Wang Xianbin (67)
Coexistence and Enrichment of Multiple Energy Resources: Assemblage, Geological Conditions and Regionalization	 Wang Mingzhen, Li Zengxue, and Chang Xiangchun (76)
Petroleum Generation from Coal: Advances and Problems	Dai Shifeng, Zhong Ningning, Liu Chiyang, Sun Yuzhuang, Qin Shengfei, and Li Dan (83)
Present Status and Its Application of Research on Coal Petrography	Li Xiaoyan (96)
Advance in Research on Spontaneous Combusted Coal Seam and Burnt Rocks	 Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Ma Yanping, and Fang Jianjun (105)
The Roles of Organic Matter and the Sedimentary Uranium Ore Deposits	 Tuo Jincai, Wang Xianbin, and Meng Zifang (114)
The Role of Organic Matter and Microbe in the Process of Uranium Deposits.....	 Zhang Weihai, Zhao Jianshe, Zhang Ronglan, Gao Xin, Zhang Gai, Liang Yongqing, and Miao Jianyu (134)
Formation of Bleaching of Sandstone and Its Revelation	 Ma Yanping, Liu Chiyang, Wu Bolin, Zhao Junfeng, and Fang Jianjun (141)

Current Research on Asphalt and Its Significance in Studying Coexistent Mechanism of Various Energy Minerals	Pan Aifang, He Ying, and Ma Runyong (152)
Sandstone-type Uranium Deposit and Epithermal Deposit	Zhang Fuxin (164)
The Classifications of Sandstone Type Uranium Deposits and Evolution Models of Uranium-producing Basins	Qin Mingkuan (172)
The Aqueous Solution Chemistry of Uranium	Zhao Jianshe, Zhang Ronglan, Zhang Weihai, Su Biyun, Miao Jianyu and Liu Chiyang (188)
Application of Organic Geochemistry on Reconstructing Environment of Sandstone-type Uranium Deposits Formation	Xiong Yongqiang and Wang Yanmei (195)
Organic and Inorganic Matter Interaction During Energy Ore Deposits	Lin Mingyue, Liu Jingwei, and Qin Peng (205)
Basic Mineralizing Feature and Metallogenic Interactions Evolution of Sandstone-type Uranium in Middle-Asia and Its Adjacent Areas	Wu Bolin and Liu Chiyang (215)
Study on Metallogenic Geological Conditions of Interlayer Oxidation Zone Sandstone-type Uranium Deposits	Qiao Haiming, Zhang Fuxin, Xu Gaozhong, Xu Chunhong, and Wang Weitao (229)
Changes in Late Mesozoic – Cenozoic Tectonic Regimes and Reformation of the Ordos Basin	Zhang Yueqiao (238)
Progression of Research on Cenozoic Uplift Movement in Ordos Basin	Zheng Guozhang, Wu Lichao, Li Jianxing, and Yue Leping (247)
Late Cenozoic Tectonic Movement and Its Behavior in Ordos Block and Its Adjacent Areas	Gui Xiaojun and Liu Chiyang (257)

多种能源矿产共存成藏(矿)机理与富集分布规律研究

刘池洋¹ 谭成仟² 孙 卫¹ 徐高中³ 张 泓⁴

(1. 西北大学, 陕西西安 710069; 2. 西安石油大学, 陕西西安 710065;

3. 核工业 203 研究所, 陕西咸阳 712000; 4. 煤炭科学研究总院西安分院, 陕西西安 710054)

摘 要 目前国内外的矿产勘查、开采利用和研究现状揭示, 油、气、煤和铀主要赋存在沉积盆地中。这四种重要能源矿产同盆共存富集存在普遍, 含矿层位联系密切、空间分布复杂有序、赋存环境和成藏(矿)作用有机相关、成藏(矿)-定位时期相同或相近, 其中蕴含着深刻的科学内涵。

沉积盆地为油、气、煤、铀等沉积矿产赋存的基本单元和成藏(矿)的大系统。在盆地形成、演化和后期改造过程中, 这些矿产同盆共生共存、聚散、成藏(矿)和定位; 其形成和分布相互关联, 时空匹配和动态消长彼此影响, 总体受盆地动态演化-改造过程和内外动力地质作用的控制。而后者又明显受统一地球动力学环境及其演变的制约。这自然形成一个地球动力学环境演变—各圈层内、外地质动力相互作用(盆地沉降、充填及其演化和改造)—多种能源矿产同盆共存富集成藏(矿)的相关链。所以, 应以盆地为主要研究对象和联系纽带, 将多种能源矿产形成-富集-成藏置于盆地形成、演化和改造的统一动力学背景之中, 揭示多种能源矿产同盆共存富集的内在联系、成藏(矿)机理及其主控因素。

由于受各类矿种各自独立勘探和其相关学科分门研究的限制, 以往对油、气、煤和铀同盆共存、富集成藏(矿)现象的研究极为薄弱。对其加强和深入研究, 可望在多种重要能源矿产共存富集的内在联系和成藏机理等重大科学问题以及与能源地质相关的科学前沿领域有所突破, 取得创新成果; 为油气等多种能源矿产的科学评价预测和协同综合勘探等提供理论基础和科学依据。

鄂尔多斯盆地集多种能源矿产于一盆, 资源十分丰富, 体现了我国的自然优势和地质特点, 是研究多种能源矿产共存富集和成藏(矿)的天然实验室。

关键词 多种能源 油-气-煤-砂岩铀矿 同盆共存 成藏(矿)机理 分布规律 协同勘探 鄂尔多斯盆地

本文中的多种能源矿产, 主要是指赋存于沉积盆地中的石油、天然气、煤炭和铀矿等重要的不可再生能源。这些能源矿产在世界各国的能源结构、政治、军事、经济发展、社会进步和国家安全等方面均处于十分重要的地位。世界各国均对其高度重视。

一、多种能源矿产赋存分布及其联系

1. 多种不可再生能源矿产主要赋存在沉积盆地中

油、气、煤几乎完全赋存在沉积盆地中早已成为人们的共识, 也业已被百余年的勘探

和生产实践所证明。随着砂岩型铀矿在铀矿资源中地位和重要性的迅速提高,多种能源矿产主要赋存在沉积盆地中已成为不争的事实。

在 20 世纪 70 年代之前,主要分布在山区和露头区的花岗岩型和火山岩型铀矿床,在各类铀矿床中占主导地位。目前,产在中新生代盆地中的沉积型铀矿,特别是其中的砂岩型铀矿,已是世界上分布最广和主要勘查的铀矿床类型。

根据国际原子能机构(LAEA)统计,1996 年全球成型铀矿床 582 个,有 250 个属砂岩型,占 43%,其中 4/5 以上在中新生代盆地;截至 1999 年,世界已知成本低于 130 美元/kg U 的常规铀资源量总计 448.6430×10^4 t,其中砂岩型铀矿名列第二。位居第一的是元古界的不整合面型和石英卵石砾岩型。若剔除元古界这两类分别仅在澳大利亚和加拿大两国发现、世界其他各地罕见的超大型铀矿床,在 2000 年,砂岩型铀矿的生产量占铀生产总量的 76%。随着地浸开采技术的进一步发展和推广,砂岩型铀矿的产量占铀生产总量的比例将会更大。

可地浸砂岩型铀矿开采成本低、环境污染小,已成为当前全世界可经济利用铀矿的主要类型。砂岩型铀矿的资源量占铀矿资源总量的比值,在哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦等中亚各国为 87%~100%;在美国达 95%。在澳大利亚和加拿大等铀资源大国,砂岩型铀矿也仍在正常生产。

我国铀矿勘查在 20 世纪 80 年代之前以岩浆岩型为主,目前几乎已全部转入砂岩型。在北方中生代盆地的铀矿勘查已取得了一系列重大成果。目前,已在伊犁、吐哈、鄂尔多斯等盆地发现(特)大型可地浸砂岩型铀矿;在二连、松辽、准噶尔、塔里木和柴达木等盆地和河西走廊-阿拉善地区诸盆地的砂岩型铀矿勘查,也都有重要发现或突破性进展。

2. 多种能源矿产同盆共存富集存在普遍

盆地内砂岩型铀矿的分布遍布全球,但无论其矿床数量,还是总资源量,北半球(北纬 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$)均占主导地位,其中以中-东亚巨型成矿域(带)^①分布最为集中。该带东起我国松辽盆地,西止里海,东西连绵逾 6000km。

值得注意的是,砂岩型铀矿常常与油、气、煤产在同一盆地中,在空间上它们具有比较密切的关系。这在国内外均有较多实例,在中-东亚成矿域尤为典型。在该成矿域分布有数十个(特)大型油田、气田、煤田和砂岩型铀矿;其中多数盆地这四种能源矿产共存富集(图 1)。故称其为中-东亚巨型能源矿产成矿域(带)。

在我国境内,该成矿域自东而西分别有松辽、二连、鄂尔多斯、酒泉、吐哈、准噶尔、塔里木和柴达木等大中型盆地,其中云集了大庆、吉林、二连、长庆、玉门、吐哈、青海、新疆、塔里木、西北石油分公司等重要石油生产单位和国家及相关省区大中型煤炭企业,同时并分布有已探明的东胜、吐哈、伊犁、二连等大型-特大型可地浸砂岩型铀矿床,已成为我国重要的多种不可再生能源矿产的生产基地。

在该成矿域西部的哈萨克斯坦,探明的可地浸砂岩铀矿储量占世界的 1/4,该区也是世界重要的油气生产区。

① 戴金星院士(1995)的“中亚煤成气聚集域”和涂光炽院士(1999)的“中亚成矿域”的东界,分别大致在我国新疆东部和内蒙古西部。我国的两连、松辽盆地已处亚洲东部,故称中-东亚成矿域(带)。

3. 多种能源矿产含矿层位联系密切

多种能源矿产不仅同盆共存富集,而且砂岩铀矿与油、气、煤的赋存层位联系也十分密切。美国得克萨斯和中亚东土仑矿集区等诸多矿床均位于重要的产油气或产煤盆地之中,铀矿层位或与主要产油气层、产煤层基本一致,或位于其上、下。

综合研究和对比我国北方同一能源盆地共存的多种能源矿产的赋存层位可知,从东北松辽盆地,经二连、鄂尔多斯盆地和河西走廊-阿拉善中小盆地群,到西北新疆诸盆地,在同一盆地中四种能源矿产赋存的层位大体相同,或彼此相间,或相邻、相近(图 1)。

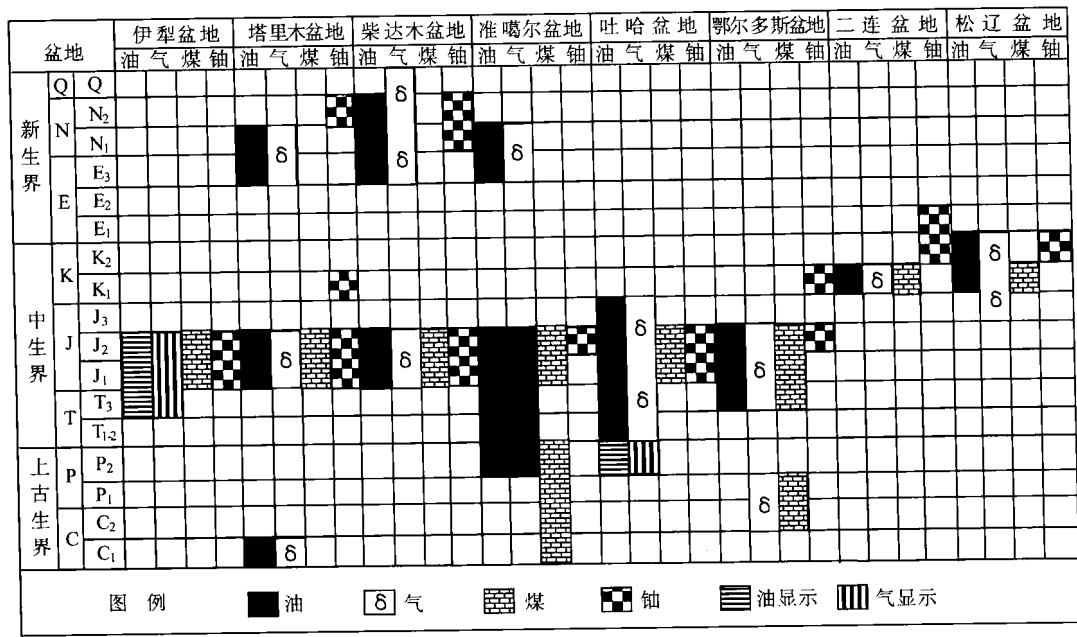


图 1 中国北方主要盆地多种能源矿产同盆共存含矿层位对比图

根据初步研究,在多种能源共存盆地的各含矿层内,甚至可不同程度地直接见到其他能源矿产,或发现其存在的相关踪迹。油和气、气和煤彼此同层或上下分布已屡见不鲜;油和煤、油气煤同层也常有发现。在二连盆地,铀矿床的形成与油气田的改造密切相关,甚至在油气层含有富铀矿体。在伊犁等盆地,铀矿直接赋存在煤层之间或上下。在吐哈盆地的砂岩型铀矿床中见到与石油成生有关的沥青。在鄂尔多斯盆地北部东胜大型砂岩型铀矿的矿层(J_{2z})中,可见有沥青脉。对铀矿层的包裹体成分测试,气体组分为成熟度较高的煤成气。表明对该矿床形成有重要意义的后生还原性蚀变,很可能与天然气的逸散有关。可见,砂岩型铀矿的形成与有机矿产的聚散联系密切。

4. 多种能源矿产成藏(矿)-定位时期相同或相近

砂岩型铀矿以含矿主岩时代新和成矿时代新为特点。目前全世界发现的砂岩型铀矿绝大多数产在中新生代盆地的沉积盖层中:主要含矿层有侏罗系(美国科罗拉多高原区、中亚下伊犁成矿省)、白垩系(中亚近天山巨成矿省)、下第三系(美国怀俄明盆地和得克

萨斯沿海平原区、中亚的近天山巨成矿省),次要的含矿层位还有石炭系、三叠系、上第三系和第四系;其成矿时代绝大多数集中在新生代,特别是渐新世以来。

北半球砂岩型铀矿在数量和总资源量上均占主导地位,与北半球新生代发生的拉拉米构造运动、阿尔卑斯-喜马拉雅构造运动有着密切的成因联系。中亚地区为世界上最大的砂岩型铀矿集区,几十年的铀矿勘查和研究表明,该区集中分布的数十个大型、超大型砂岩型铀矿床,全部产在喜马拉雅运动期发育起来的天山造山带和年青的土仑地块夹持的次造山带内及附近。其形成与印度板块碰撞产生的远程效应有关,即所谓的次造山带控矿理论。

对我国北方主要产铀盆地砂岩型铀矿成矿年代学的研究表明(夏毓亮等,2003),砂岩型铀矿的成矿作用主要发生在早白垩世晚期以来,可细分为3~5期,以新生代为主。各盆地的主成矿期和成矿期次虽不尽相同,但各成矿期与所在盆地油气的成藏-定位期却大多相同或基本一致(刘池洋等,2003);显示出油、气、铀三种能源矿产的成藏(矿)过程及矿藏-定位时期有着密切的联系和统一的地球动力学背景。

5. 反例佐证

由上述可知,油、气、煤、铀同盆共存、富集成藏密切相关。这是偶然的巧合,还是有必然的联系,必须综合研究、多方论证。除上述直接的诸多现象和特征外,以下反例也佐证各能源矿产同盆赋存成藏似有内在联系。

铀矿的成矿物质来源多样、分布广泛。若不考虑变质作用对铀矿床的改造,世界上铀矿床按成因可分为内生岩浆岩型和外生沉积岩型两大类。根据目前我国铀矿的勘查现状和对已探明铀资源量的统计,岩浆岩(花岗岩、火山岩)型铀矿主要分布在南方,集中在江西、湖南、广东、广西、浙江等省区,约占该类型已探明资源量的80%。这与该区印支-燕山期岩浆活动强烈有关。这类铀矿床几乎全分布在山区或露头区,故与这些内生岩浆岩型铀矿床相邻的中新生代盆地,具有丰富的成铀矿物质来源。但是,迄今为止,除西南隅滇西个别盆地外,在我国南方众多的中新生代陆相盆地中,尚未发现砂岩型铀矿床,良好的铀矿化异常也较少见。但对北方诸多中新生代陆相盆地的勘探却多有突破性进展,现已探明的砂岩型铀矿资源量的95%以上在北方盆地。

这启示我们,成铀矿物质的贫富是能否形成矿床的重要因素和必要条件,但不是决定因素和唯一条件;铀矿物质只有在特定的环境和条件下,才可能富集成矿床。我国大陆主体在全球砂岩型铀矿集中分布的纬度(北纬 $20^{\circ}\sim 50^{\circ}$)带内。但为什么我国的砂岩型铀矿却青睐北纬 35° 之北的北方盆地,且常与油、气、煤等能源矿产同盆共存富集。这与已经查明和证实的我国中新生代陆相盆地的油气北富南贫、煤炭北多南少惊人地一致,表明其间有着密切的深层次内在联系。

综上所述,多种能源矿产同盆共存存在普遍,含矿层位联系密切,空间分布复杂有序,表明其间有着密切的内在联系和统一的地球动力学背景,蕴含着深刻的科学内涵,值得进一步深入研究和探讨。

二、研究、勘探及利用现状和发展趋势

(一) 能源地质科学研究

1. 单种能源科学研究:渐趋成熟

在世界现代能源工业百余年的发展历史中,已相继建立了各类矿种本身相对独立、较为完整的学科理论体系及其成藏(矿)理论系统,如石油地质学、天然气地质学、煤田地质学、铀矿地质学或铀矿床学等。这些理论有效地指导了各类矿产的勘探开发,并在生产实践中得到进一步的发展。

单种能源科学主要内容的研究程度较高或很高,其理论体系已渐趋成熟。虽然随科技的日益进步、理论的持续发展、新矿藏类型和新问题的不断发现,各能源科学仍会有一定甚或较大发展,但可以预言,已渐趋成熟的单种能源科学本身的进一步发展,将大多来自相关学科的交叉、启迪和多种学科的渗透、融合。

2. 多种能源科学交叉综合研究:探索甚少

由于多年来受各类矿种各自独立勘探开发和其相关学科分门别类研究的限制,加之对砂岩型铀矿的规模勘探和系统研究主要是近 20 多年来才逐步重视和渐处主导地位的,故将多种能源科学渗透、融合,进行交叉、综合研究均十分薄弱;对各类能源矿产的内在成因联系,特别是与砂岩型铀矿的联系总体探索甚少;也很少将多种主要能源矿产共存富集置入盆地形成演化的统一时空中进行整体研究。

多种能源科学之间的交叉、渗透和综合研究,必然会对各能源科学的研究和已有认识产生新的思考和启迪,从而既推动多种能源科学理论体系的建立,同时又促进单能源学科的进一步发展、完善。

(二) 多种能源矿产内在关系研究:总体薄弱

1. 油、气、煤内在关系研究:相对较多

(1) 油与气

油与气的关系十分密切,其中与油型气有亲缘关系。因而在学科研究和勘探开发中一直将油、气密切地结合在一起,总体研究程度较高、关系较为清楚。油和油型气二者的转化关系和转化程度,主要受控于热演化程度和烃源岩母质类型等。

(2) 煤与气

煤层开采中“瓦斯气”的存在和危害,使人类从利用煤炭之初就意识到煤层与可燃有机气体的共生。但煤和煤系地层可形成具工业价值的天然气资源,并在煤层之外储集成藏的认识和研究始于 20 世纪 40~50 年代。原苏联和欧洲学者通过对煤化学、煤岩学的

研究,揭示了煤化作用过程伴生的气体有巨大的资源潜力。1959年,北海盆地南部荷兰境内格罗宁根大气田的发现,揭示和证明了煤成气不仅可以成藏,而且可形成大气田。随后即掀起了煤成气的勘探热潮,在亚洲、澳大利亚和北美洲相继发现了许多类似的大气田(钟宁宁、陈恭洋,2002)。天然气第一生产大国俄罗斯,煤成气占超特大型气田原始可采总储量的80.6%。世界大气田和天然气储量的70%~80%来自含煤岩系(戴金星等,2002)。

国外对煤的元素组成变化、在煤化作用过程中不同煤岩组分的产气率等煤化学的研究,奠定了煤成气研究的理论基础。20世纪60年代以来,以已发现的煤成气田为解剖实例,从煤化作用过程及其特征等方面探讨了煤与气两类有机成矿体系的转化条件,其成果被广泛用于指导煤成气勘探并取得明显效果。70年代至80年代初期,研究的重点为对典型盆地或聚集区带煤成气形成和聚集成藏的地质特征、煤岩显微组分组成与生气潜力的关系以及地球化学特征进行全面的综合研究,产生了在烃源岩评价和气聚集带形成规律方面有较大影响的理论和方法(戴金星等,2000;钟宁宁、陈恭洋,2002)。

我国的煤成气研究工作起步较晚,1983年国家“六五”重点科技攻关项目“煤成气的开发和研究”的启动,标志我国煤成气的研究全面开始。经过20多年的科技攻关,已初步建立了与我国煤系特点相适应的成因理论和勘探方法。在煤成气聚集带研究、气体同位素判识煤成气、煤系烃源岩成烃模拟及演化实验和二次生烃等方面达到了国际先进水平(钟宁宁、陈恭洋,2002)。到2000年底,我国发现的21个大气田中有煤成大气田16个,探明煤成气储量 $14347 \times 10^8 \text{ m}^3$,占大气田储量的85.7%,占全国探明天然气储量的56.1%。我国最大的5个储量在 $1000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上的大气田均为煤成气(戴金星等,2002)。

在20世纪70年代,受能源危机的冲击,美国率先关注煤层气的勘探;于80年代初步实现了工业性开发和商业利用;此后发展迅猛,到2002年煤层气年产量达 $450 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占美国当年天然气产量的7.9%(戴金星等,2005)。随后,澳大利亚、加拿大、波兰等国引进美国成功的经验和技術,进行煤层气地质研究和勘探开发试验。

从20世纪80年代以来,我国陆续开展了煤层气地质研究和开发试验工作,并在沁水盆地、淮南煤矿等地获得进展,但迄今在开采和利用方面尚未取得实质性突破。

(3) 煤与油

以前认为煤和含煤岩系不大可能形成具有商业价值的油(藏)田。20世纪60年代后期以来,含煤岩系与油气藏的关系一直为能源地质学家和有机地球化学家所关注。随着澳大利亚的吉普斯兰、库珀和印度尼西亚的马哈坎三角洲以及加拿大的马更些-波弗特三角洲等油气田的发现及相关煤成油地球化学研究的深入,煤-油-气三种不同相态的有机矿产同盆共存富集和其成因联系备受关注。自20世纪80年代以来,煤成油(即煤系作为液态烃源岩层)已成为研究和讨论的热点,相关理论发展快速(钟宁宁、陈恭洋,2002)。

我国吐哈盆地侏罗系油气藏的发现,曾被认为是陆相盆地煤系地层煤成油藏的重大突破。但对此认识尚有异议,问题主要集中在对源于不同类型干酪根的生油母质在液态烃生成中贡献的大小及源岩的时代等方面。总之,仍有许多问题有待进一步深化和解决。

煤系总体以III型有机质为主,故一般以成油为辅、生气为主(钟宁宁、陈恭洋,2002;

戴金星等,2005)。具体盆地或地区的煤系成烃过程的气/油值,与煤系有机质的组成有关。从煤岩学角度看,煤系显微组分的组成和分布适当地体现了煤系有机质组成上非均质的生烃物质基础和其转化环境及成熟演化历程。总体而言,显微组分的气/油值按壳质组<镜质组<惰质组的顺序增长;其实质取决于显微组分本身的富氢程度及成熟度。随着H/C(原子比)的增加,气/油值明显下降。在煤系成烃过程中,油气共生和以气体为主是必然的,任何纯粹的油藏或气藏都是后期地质地球化学作用造成的气、油比再分配的结果(钟宁宁、陈恭洋,2002)。

2. 铀矿与油、气、煤内在关系研究:十分薄弱

主要产在中新生代盆地中的沉积型铀矿,按含矿主岩的不同可以分为砂岩型、煤岩型、泥岩型及碳酸盐岩型等类型。其中砂岩型铀矿便于开采、成本低、污染少,是目前主要的勘查类型。

“铀属典型的亲氧元素”(刘英俊等,1984)。在地壳中,铀矿床成矿物质的来源和分布均十分广泛,其化学性质很活跃。在表生作用中易氧化为 U^{6+} ,以较易溶解的铀酰离子形式存在于流体中被搬运。

在自然界中,铀总是以四价或六价离子与其他元素化合。其主要地球化学特点是 U^{6+} 与 U^{4+} 相互转化,即由氧化环境中活跃的 U^{6+} ,在还原环境中转化为 U^{4+} ,或者相反。这两个转化分别反映了砂岩型铀矿的形成和砂岩型铀矿的地浸开采过程。值得注意的是,在铀矿床中常有比例不等的 U^{6+} 存在,其分布有一定规律,大多在矿体的边部。固态 U^{6+} 应是处于向 U^{4+} 转化的临界状态(时期或环境)的产物,探究其形成和分布具有重要意义。

外生沉积型铀矿的富集理论已从最初的沉积成岩成矿说,逐步演变为外生后成富集学说,后来又发展为自流水盆地含氧承压水活动形成层间氧化带控矿理论。近年一些学者根据对自流水盆地水动力学和水文地球化学环境时空变化的研究,划分出盆地中层间水的渗出和渗入两种不同的运动方式,指出铀矿床赋存于水动力的渗入时期。其形成过程是:富氧地下水的渗入和渗流途中铀的氧化浸出,由于氢、硫化氢等造成的还原环境引起 Eh 值急剧降低或其他类型地球化学障的存在和形成,导致成矿物质沉淀,形成铀及其他元素的矿化。外生后成渗入有潜水、层间、裂隙等形式。

一般认为,砂岩型铀矿床为低温成岩-后生成因。携铀流体必须富含氧,使得铀氧化为 U^{6+} 状态大量溶解于溶液中而便于搬运。溶液中的 U^{6+} 必须还原成 U^{4+} 状态才会沉淀,从而形成还原砂岩矿床中的大部分主要铀矿物:沥青铀矿或铀石。要使 U^{6+} 还原必须有还原剂或还原环境。已证明可作为铀酰还原剂的物质甚多,如有机质、黄铁矿等自生硫化物等,其中以有机质和其产物最为常见和重要。

因而,“在各类沉积岩中,铀的主要地球化学特征和有机质有着密切的关系”。“有机物质的络合作用对铀的地球化学行为有着重大影响。”在“砂岩沉积的还原环境中,有机质起了铀的吸附剂及还原浓缩剂的作用”。“许多实验证明,有机质中聚铀能力最强的是腐殖质,其次是腐泥质”(刘英俊等,1984)。可见,(强)还原环境下形成的油、气、煤类有机矿产,为铀的富集成矿提供了必需的还原环境。特别是油、气类流体有机质,易于流动、迁移和聚散的性能,可使其远离形成时的还原环境而进入浅表层其他环境中。从而为油气