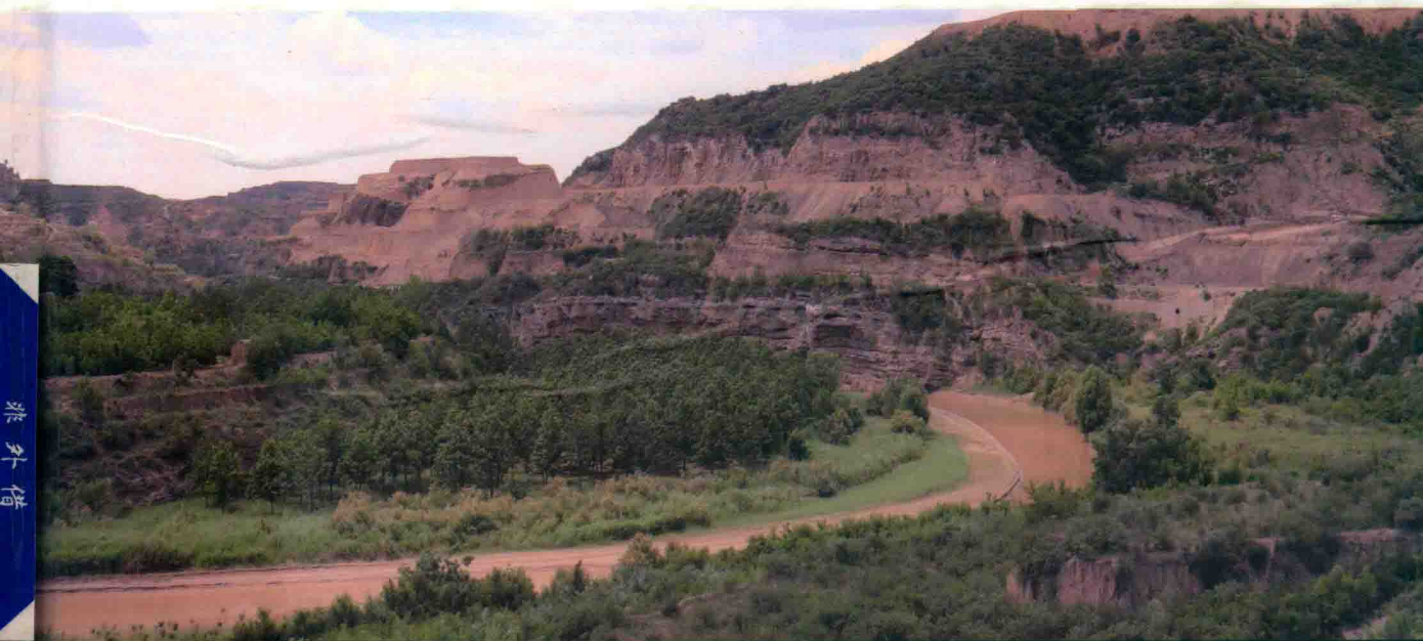


中国煤系矿产资源评价丛书

# 鄂尔多斯盆地煤系矿产 赋存规律与资源评价

曹代勇 魏迎春 等 著

Occurrence Regularity and Resource Evaluation of  
Coal Measures Mineral in Ordos Basin



煤  
外  
借



科学出版社

中国煤系矿产资源评价丛书

# 鄂尔多斯盆地煤系矿产赋存规律 与资源评价

Occurrence Regularity and Resource Evaluation of  
Coal Measures Mineral in Ordos Basin

曹代勇 魏迎春 等 著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书以鄂尔多斯盆地石炭纪—二叠纪煤系和侏罗纪煤系为目标,开展煤系矿产资源(以煤系气和煤中金属元素为主)综合研究,查明了鄂尔多斯盆地煤系矿产发育种类及时空分布特征,划分了煤系矿产共生组合类型。从煤系矿产形成的原生条件和后期构造—热演化控制的角度,揭示了鄂尔多斯盆地煤系矿产资源的赋存规律,建立了煤系矿产耦合成矿模式。评价了鄂尔多斯盆地煤系矿产资源潜力,估算了鄂尔多斯盆地煤系气和煤中金属元素等主要煤系矿产资源量,确定了鄂尔多斯盆地煤系综合矿产资源有利区。

本书内容丰富,资料翔实,体现了煤系矿产资源和鄂尔多斯盆地煤炭地质研究的最新成果。本书可供煤炭地质和矿产地质领域的科技人员和大专院校师生参考、使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

鄂尔多斯盆地煤系矿产赋存规律与资源评价= Occurrence Regularity and Resource Evaluation of Coal Measures Mineral in Ordos Basin/  
曹代勇等著. —北京: 科学出版社, 2019.4

(中国煤系矿产资源评价丛书)

ISBN 978-7-03-060729-4

I. ①鄂… II. ①曹… III. ①鄂尔多斯盆地—煤炭资源—资源预测②  
鄂尔多斯盆地—煤炭资源—资源评价 IV. ①F426.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 042927 号

责任编辑: 吴凡洁 崔元春/责任校对: 王萌萌

责任印制: 师艳茹/封面设计: 蓝正设计

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

**三河市春园印刷有限公司** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 4 月第一次印刷 印张: 20 1/4

字数: 464 000

定价: 278.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## “中国煤系矿产资源评价丛书”编写领导小组

组 长：孙升林

副组长：吴国强 张家强

成 员：宁树正 曹代勇 刘志逊 杨文光

郑柏平 程爱国 吴军虎 张谷春

## 本书编委会

主 编：曹代勇

副主编：魏迎春

编 委：曹代勇 魏迎春 张 岩 李 勇

徐 浩 刘金城 秦国红 牛鑫磊

聂 敬 刘 亢 王安民 秦荣芳

梁永平 郭爱军 李 靖

煤、油气、砂岩型铀矿等多种沉积矿产同盆共存的事实，日益受到地质学家的关注，沉积盆地多种矿产富集机理和耦合成矿效应已成为当前矿产资源和盆地动力学领域的研究热点之一。含煤岩系(简称煤系)是一套含有煤层及成因联系的沉积岩系。煤系作为多种矿产资源的载体，除煤层发育之外，还共、伴生丰富的能源矿产、金属矿产和非金属矿产。这些煤系矿产资源构成了一个资源丰富、类型多样、相对独立又具有成因联系与耦合关系的成矿环境和矿产赋存系统。早在 20 世纪初，人们便已关注煤和煤系共、伴生矿产种类及其利用技术等问题。近年来，随着矿产资源综合评价的深入和煤系综合矿产资源概念的提出，涉及煤盆地和煤系矿产资源的研究成果日趋增加。

鄂尔多斯盆地是世界级特大型含多种能源的盆地，矿产资源十分丰富，煤、石油、天然气、油页岩、沉积型铀矿俱全，素有“半盆油、满盆气、遍地是煤”的美誉。鄂尔多斯盆地煤系广泛分布，晚古生代克拉通拗陷与中生代陆内拗陷继承性发育，盆地构造-热演化史规律性明显，为煤系多种矿产共生耦合成矿提供了良好的地质条件。近年来，鄂尔多斯盆地与煤系有关的煤层气、致密砂岩气、页岩气、煤中金属元素矿产、砂岩型铀矿等的调查研究取得众多成果，推动了煤系矿产资源综合评价和勘查理论与技术的发展。

由中国矿业大学(北京)承担的“鄂尔多斯盆地煤系矿产资源赋存规律与资源评价”项目，是“煤系矿产资源综合调查与评价”计划项目下属工作项目之一，起止年限为 2014~2016 年。3 年来，项目组在系统收集跟踪国内外研究成果的基础上，通过大量野外地质调查、矿井地质调查、钻孔岩心编录、采样测试分析和专题图件编制工作，以鄂尔多斯盆地石炭纪—二叠纪煤系和侏罗纪煤系为目标，开展煤系矿产资源(以煤系气和煤中金属元素为主)综合研究，从煤系矿产的形成、演化、富集改造等关键问题入手，揭示煤系矿产资源的赋存规律，建立煤系矿产的共生耦合成矿模式，划分鄂尔多斯盆地煤系综合矿产资源区带，初步摸清鄂尔多斯盆地煤系矿产资源潜力。

项目研究取得以下重要成果。

1) 查明了石炭纪—二叠纪煤系和侏罗纪煤系矿产资源的种类及其组合特征

建立了由煤层矿产、煤系矿产、煤盆地矿产构成的层次结构概念模型，深化了煤系矿产资源概念的内涵和外延。查明了鄂尔多斯盆地煤系矿产资源的种类及其共生组合特

征,划分了煤-能源矿产-金属矿产、煤-非金属矿产、煤-能源矿产 3 种组合大类和 8 种主要共生组合类型。其中,石炭纪—二叠纪煤系(太原组和山西组)矿产有 5 种组合类型:鄂尔多斯盆地北部煤-煤系气-油页岩-煤中金属元素组合类型、鄂尔多斯盆地南部煤-煤层气-煤中金属元素组合类型、鄂尔多斯盆地西缘煤-煤系气-煤中金属元素组合类型、鄂尔多斯盆地东缘煤-煤系气-煤灰中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  组合类型、陕北石炭纪—二叠纪煤田煤-煤系气-高岭土-耐火黏土-铝土矿组合类型。侏罗纪煤系(延安组)矿产有 3 种组合类型:鄂尔多斯盆地北部煤-煤层气-砂岩型铀矿组合类型、鄂尔多斯盆地南部煤-煤层气-煤系页岩气-煤系油页岩-砂岩型铀矿-煤中金属元素组合类型、鄂尔多斯盆地西缘煤-煤系气-煤系油页岩-砂岩型铀矿组合类型。

### 2) 揭示了基于层序地层分析的煤系矿产时空分布规律及其控制因素

根据露头 and 钻孔数据,建立了盆地层序地层格架,探讨了古构造、海平面变化、古气候和沉积过程对煤系矿产时空分布规律的控制。晚石炭世—晚二叠世,古亚洲洋向南俯冲导致内蒙古隆起和华北内克拉通盆地的形成,盆地沉降与晚古生代海平面变化相互作用形成 1 个一级大陆进侵(泛滥)旋回和 5 个二级海侵-海退旋回。构造运动与气候共同作用控制沉积物的类型和供给量,基准面(可容纳空间)变化与沉积物供给之间的相互作用又控制了被沉积物充填的可容纳空间,因而本书定义了华北盆地饥饿充填早期、饥饿充填晚期、平衡充填、过饱和充填早期和过饱和充填晚期 5 个盆地充填演化阶段,在华北盆地西部(即鄂尔多斯盆地)对应形成了以喀斯特(层序一)、海岸-浅海(层序二)、开阔陆表海(层序三)、河流-三角洲(层序四)和内陆河流-湖泊(层序五)为主的沉积环境,并形成了鄂尔多斯盆地石炭纪—二叠纪煤系下部铝土矿、铁矿→中部煤、煤系气和高岭岩→上部致密砂岩气的矿产组合形式。

### 3) 探讨了盆地构造-热演化及构造格局对煤系矿产赋存规律的控制

盆地构造-热演化对煤系矿产资源的形成、运(迁)移和聚(富)集具有重要的控制作用。构造演化历程影响煤系的改造程度,在其产生的构造应力场作用下,含煤地层发生变形、变位,形成断裂和褶皱等构造要素,且通常呈现构造格局分区带特征,从而决定了煤系矿产资源的空间分布的规律性。构造演化过程中的构造隆升、沉降和构造-热事件对煤系矿产赋存具有重要的控制作用,鄂尔多斯盆地煤系矿产资源的最终定位受控于现今构造格局。鄂尔多斯盆地主体部分煤系埋藏深度大、构造变形微弱,有利于大面积连续型煤系气藏的形成和保存;鄂尔多斯盆地周缘构造变形强度较大,岩浆热液和地下水流活动性强,并靠近物源区,有利于煤系金属元素、铀元素的迁移和富集。构造运动所形成的不同形态的地质构造,其不同的部位、不同的力学性质和封闭情况对煤系矿产资源赋存或逸散具有不同的影响,封闭性地质构造有利于煤系气赋存,开放性地质构造则有利于煤系金属矿产、砂岩型铀矿形成。

### 4) 查明了鄂尔多斯盆地煤系气赋存特征,揭示了煤中金属元素矿产的分布规律

从有机质丰度、类型、成熟度、储层物性、生储盖组合等方面论证了鄂尔多斯盆地石炭纪—二叠纪煤系和侏罗纪煤系具有良好的煤系非常规气发育条件和资源潜力,受原

生沉积条件、盆地热演化和构造格局的控制,煤系非常规气赋存具有明显的时空差异。煤层气有利区块主要沿盆缘分布,尤其是东缘和南部的石炭纪—二叠纪煤层气和南部侏罗纪煤层气是当前勘探开发的热点;煤系泥页岩在太原组和延安组分布较为局限,在山西组分布广泛,且厚度较大、总有机碳含量(TOC)高、进入大量生气阶段;盆地中北部和东缘的石炭系—二叠系是煤系砂岩气成藏的有利层位。与世界煤中均值比较,鄂尔多斯盆地石炭纪—二叠纪煤中 Li、Ga、REY、 $Al_2O_3$  整体上属于轻度富集状态,侏罗纪煤中元素绝大部分处于正常或亏损状态。由于地下水等流体的淋滤作用,煤层顶底板中金属元素含量通常高于煤层中金属元素含量。受物源、沉积、构造—热演化等因素控制,煤中金属元素矿产具有显著的时空分布差异:垂向上,石炭纪—二叠纪煤中金属元素高于侏罗纪煤,山西组煤中金属元素高于太原组煤;平面上, Li、Ga、REY、 $Al_2O_3$  含量呈北高南低的总体趋势,且主要富集于盆地周缘地带。

#### 5) 建立了煤系矿产耦合成矿模式

盆地的构造热—演化过程是煤系矿产资源耦合成矿的关键,主要体现在成矿时间和空间位置的耦合性。盆地稳定沉降阶段是煤系有机矿产形成的重要时期,无机矿产则主要形成于盆地的构造活动阶段,二者在盆地构造—热演化的地质作用下,成矿母质、成矿环境、成矿期及赋存层位等方面均表现出明显的相关性和耦合性。鄂尔多斯盆地煤系矿产的大规模耦合成矿发生在燕山运动中晚期( $J_3-K_1$ )构造—热变革期,显著的构造—热事件不仅可以提高煤系烃源岩的变质程度,促进生排烃,还是煤系金属矿产形成和富集的重要动力。构造应力、热应力和深源流体压力为煤系气和金属元素的运移提供了驱动力,促使岩石产生大量裂缝,构成煤系矿产资源有利的运移通道。

#### 6) 评价了煤系矿产资源潜力,划分了综合矿产有利区带

以鄂尔多斯盆地石炭纪—二叠纪煤系和侏罗纪煤系地层为对象,依据相关计算规范和标准,初步估算了 2000m 以浅煤系气和部分矿区煤中 Ga 元素等主要煤系矿产资源量。煤层气资源量为 7.1818 万亿  $m^3$ ,煤系页岩气资源量为 7.582 万亿  $m^3$ ,煤系砂岩气资源量为 1.8744 万亿  $m^3$ ,煤中 Ga 元素资源量为 44.97 万 t(只含准格尔和渭北石炭纪—二叠纪煤田)。根据煤系气和煤中元素的资源量分级结果,采用多矿种叠加的方法,以矿区为单元,对鄂尔多斯盆地 53 个矿区进行煤系综合矿产资源有利区优选,优选出了 11 个有利区、18 个较有利区、24 个次有利区,其中 11 个有利区分别为:准格尔 Li- $Al_2O_3$ -Ga-REY 与煤层气有利区、河保偏煤系气与  $Al_2O_3$  有利区、离柳煤系气与  $Al_2O_3$  有利区、石隰煤系气有利区、乡宁煤系气有利区、韩城煤系气有利区、府谷煤系气有利区、古城煤系气有利区、吴堡煤系气有利区、彬长煤系气有利区、韦州煤系气有利区。

本书是在“鄂尔多斯盆地煤系矿产资源赋存规律与资源评价”项目成果的基础上加工凝练而成。曹代勇担任主编,魏迎春担任副主编,各章节撰写分工如下:前言由曹代勇、魏迎春撰写,第一章由李勇、刘金城、秦国红、王安民、曹代勇撰写,第二章由魏迎春、张岩、牛鑫磊、聂敬、梁永平撰写,第三章由曹代勇、秦国红、张岩、牛鑫磊、聂敬、秦荣芳、李靖撰写,第四章由刘金城、张岩、李勇、秦国红、刘亢撰写,第五章

由徐浩、曹代勇、王安民、聂敬、郭爱军、魏迎春撰写，第六章由魏迎春、张岩、秦国红、牛鑫磊、聂敬、刘亢、秦荣芳、曹代勇撰写，全书由曹代勇和魏迎春统稿。研究生刘志飞、张强、孙雨晴、贾煦、闵洛平、李超，本科生叶蕾、宋钰、刘祥宇、李雅楠、邓丽君、王晨、信延儒、王宇恒、巫肇锦、肖志伟、杨帅、常东亮、陈坤、陈一凡、邓东明、邓宇等参加了研究工作和资料整理。

“鄂尔多斯盆地煤系矿产资源赋存规律与资源评价”项目研究得到了中国地质调查局油气资源调查中心和中国煤炭地质总局的支持，中国煤炭地质总局的孙升林教授级高级工程师、吴国强教授级高级工程师、二级项目负责人宁树正教授级高级工程师给予了具体指导。与其他5个二级项目工作项目——“青藏高原煤系矿产资源综合调查与评价”“华北赋煤区煤系矿产资源综合调查与评价”“东北赋煤区煤系矿产资源综合调查与评价”“华南赋煤区煤系矿产资源综合调查与评价”和“西北赋煤区煤系矿产资源综合调查与评价”之间的密切配合和经常性的研讨，对研究工作的顺利开展起到了至关重要的促进作用。现场调查工作得到了内蒙古、宁夏、陕西和山西等省区煤炭、煤层气、地矿、石油系统有关单位领导和技术人员的大力支持和帮助，宁夏回族自治区煤田地质局协助开展了鄂尔多斯盆地西缘煤系矿产资源调查评价工作。

感谢中国地质调查局油气资源调查中心张家强研究员，中国地质调查局发展研究中心谭永杰研究员、刘志逊研究员，中国地质学会郝梓国研究员，中国煤炭地质总局王佟教授级高级工程师、袁同星教授级高级工程师，中国煤炭地质总局勘查研究总院程爱国教授级高级工程师、刘天绩教授级高级工程师和陈美英教授级高级工程师，中联煤层气有限责任公司吴建光教授级高级工程师、张守仁高级工程师，中国科学院大学侯泉林教授和琚宜文教授，中国地质大学(北京)唐书恒教授、黄文辉教授和汤达祯教授，中国矿业大学秦勇教授，华北科技学院李小明教授，中国矿业大学(北京)彭苏萍院士、武强院士、邵龙义教授、唐跃刚教授、刘钦甫教授、孟召平教授、赵峰华教授、胡社荣教授、马施民副教授、方家虎副教授、罗红玲副教授、鲁静副教授、王绍清教授等专家学者在项目研究、人才培养、评审验收过程中给予的指导和帮助。

借本书出版之际，作者感谢对本书的撰写工作给予过支持和帮助的所有单位和个人！

作者

2018年5月

# 目录

## 前言

<b>第一章 研究现状与发展趋势</b> .....	1
第一节 鄂尔多斯盆地煤地质学研究进展 .....	1
第二节 含煤岩系多种矿产资源研究 .....	4
第三节 煤系矿产资源赋存控制因素 .....	7
<b>第二章 区域地质和煤田地质</b> .....	14
第一节 研究区概况 .....	14
第二节 区域地层和含煤地层 .....	17
第三节 区域构造特征 .....	24
第四节 煤炭资源概况 .....	27
<b>第三章 鄂尔多斯盆地煤系矿产资源综述</b> .....	32
第一节 煤系矿产资源的概念 .....	32
第二节 鄂尔多斯盆地煤系矿产资源类型及其时空分布 .....	39
第三节 煤层气 .....	42
第四节 煤系页岩气 .....	56
第五节 煤系砂岩气 .....	75
第六节 煤中金属元素矿产 .....	88
<b>第四章 煤系矿产资源形成的原生条件分析</b> .....	116
第一节 相组合和沉积体系 .....	116
第二节 含煤岩系层序地层 .....	132
第三节 盆地充填演化 .....	152
第四节 煤系(有机)能源矿产发育的原生控制因素 .....	160
第五节 煤中无机矿产的原生成矿条件 .....	164
第六节 煤系矿产形成的时空分布规律 .....	175
<b>第五章 盆地构造-热演化与煤系矿产赋存</b> .....	178
第一节 鄂尔多斯盆地构造-热演化历程 .....	178
第二节 构造-热演化对煤系矿产资源赋存的控制 .....	204

第三节	鄂尔多斯盆地赋煤构造单元划分 .....	214
第四节	各构造单元煤系矿产赋存特征 .....	221
<b>第六章</b>	<b>煤系矿产资源评价 .....</b>	<b>232</b>
第一节	煤系矿产组合与耦合成矿模式 .....	232
第二节	煤系矿产资源评价与资源量估算 .....	250
第三节	煤系综合矿产资源评价 .....	283
<b>参考文献</b>	.....	<b>303</b>

## 第一章

# 研究现状与发展趋势

鄂尔多斯盆地煤地质学研究已有近百年的历史，取得了丰硕的研究成果，尤其是近年来鄂尔多斯盆地煤层气勘查开发取得了显著进展，以及煤系矿产综合评价、综合勘查受到了广泛重视，为鄂尔多斯盆地煤系矿产赋存规律研究奠定了坚实的基础。

## 第一节 鄂尔多斯盆地煤地质学研究进展

我国在鄂尔多斯盆地及其周缘地区的地质调查工作始于 20 世纪初。王竹泉(1921~1937 年)、袁复礼(1925 年)、潘钟祥(1933~1941 年)、孙建初(1934 年)、尹赞勋(1937 年)、王恭睦(1946 年)、李庆远、卢衍豪(1947 年)、何春逊(1948 年)等先后在该区进行过地质调查，对地层、构造、古生物、石油地质及煤田地质等进行了详细论述(中国煤炭地质总局，1996；张泓等，2005)。尽管上述工作比较零星，但这些开拓性的地质工作对该区的深入研究具有极其深远的影响。

鄂尔多斯盆地大量系统的地质调查工作始于中华人民共和国成立以后。从中华人民共和国成立到 1996 年这 40 多年，陕西、甘肃、宁夏、内蒙古、山西等省区的区域地质测量队相继完成了 1:20 万区域地质测量，地质矿产部华北石油地质局第三普查勘查大队和长庆石油勘探局开展了大规模的油气普查与勘探。与此同时，陕西、甘肃、宁夏、内蒙古及山西省煤炭地质局(公司)进行了一系列煤田普查勘探工作。工作过程可大体划分为两个阶段：第一阶段，自中华人民共和国成立至 20 世纪 60 年代中期，对石炭纪一二叠纪煤田进行勘探，完成了陕西铜川、蒲白、澄合、韩城，宁夏石炭井、石嘴山，内蒙古乌达、海勃湾 8 个矿区的精查勘探工作；第二阶段，60~90 年代，主要对侏罗纪煤田进行勘探，完成了陕西焦坪、店头、神北，甘肃华亭、安口，宁夏汝箕沟，内蒙古东胜 7 个矿区的勘探工作。与此同时，诸多部门和单位还进行了人工地震、重力、地面磁

测、航磁、大地电流等地球物理勘探和遥感地质调查。这些工作，不仅为国家提供了可观的矿产资源储量，也积累了大量的地质资料。90年代，地质科研院所和大专院校出版了许多有关鄂尔多斯盆地煤地质的研究成果(何锡麟等, 1990; 刘焕杰等, 1991; 李思田, 1992; 张泓等, 1995; 中国煤炭地质总局, 1996; 王双明和张玉平, 1999), 从不同的专业领域对鄂尔多斯盆地的沉积类型、构造演化背景进行了论述, 并开展了有关盆地形成与演化的整体研究。

鄂尔多斯盆地以稳定的克拉通发育而著称, 盆地的构造属性及区域构造格局一直是地质学家研究的焦点。针对鄂尔多斯盆地构造属性的归属问题取得了丰富的研究成果, 分别从地质力学、地洼学、波浪状镶嵌构造、板块构造等不同的角度探讨了盆地的范围、区域构造位置及构造属性(黄汲清, 1955; 李四光, 1955; 陈国达, 1960; 张伯声和汤锡元, 1975; 汤锡元和郭忠铭, 1992), 围绕煤地质与盆地构造的关系开展了一系列卓有成效的研究(张泓等, 2005; 王桂梁等, 2007; 王双明, 2011)。上述成果在论述鄂尔多斯盆地煤田构造发育特征和演化规律的基础上, 也对多种能源矿产的富集组合进行了研究。

针对鄂尔多斯盆地的煤系沉积, 许多学者结合沉积学的最新理论开展了一系列工作, 提出了鄂尔多斯盆地晚古生代含煤层序地层与海侵成煤模式(李增学等, 2006, 2008; 邵龙义等, 2014), 剖析了鄂尔多斯盆地侏罗系的沉积体系和层序地层学研究, 并进一步总结整理了其构造演化和构造控煤作用(王双明, 2011), 刻画了可容纳空间变化控制下的石炭系—二叠系的煤层沉积特征(李勇等, 2017)。上述研究基本建立起该区含煤地层石炭系—二叠系、三叠系和侏罗系的层序地层格架, 为后续煤田地质的研究工作奠定了良好的基础。

鄂尔多斯盆地发育石炭系—二叠系、三叠系和侏罗系三套含煤地层。石炭纪—二叠纪的气煤、肥煤、焦煤、瘦煤等经过洗选, 可用于炼焦; 贺兰山煤田等的无烟煤可用于气化; 三叠纪瓦窑堡组的中灰、低磷、特低硫、高油和中-强黏结性煤可用于低温干馏或配焦等; 侏罗系延安组煤主要为低灰、低硫、中高发热量的不黏煤和长焰煤, 可用于气化、液化、低温干馏和制作活性炭等(中国煤炭地质总局, 1996)。针对该区的煤岩煤质特征, 代表性的论著有吴传荣(1995)的《西北早—中侏罗世煤岩煤质与煤变质研究》和黄文辉等(2010)的“鄂尔多斯盆地侏罗纪煤的煤岩特征及成因分析”等。

围绕鄂尔多斯盆地晚古生代煤的生烃过程及煤成气运移规律, 众多学者在2000年左右开展了大量研究, 主要探讨鄂尔多斯盆地东缘煤的生烃动力学特征和煤成气的富集特点(汤达祯等, 2000; 汪正江等, 2002), 提出晚古生代深盆气藏的特征(张金亮等, 2000), 详细刻画了晚古生代天然气的运移、聚集规律(闵琪等, 2000)。目前对晚古生代煤成气气藏的勘探已取得重大突破, 相继在榆林、乌审旗、大牛地、苏里格、子洲、神木等地发现千亿立方米储量的大型气田。综合鄂尔多斯盆地煤成气资源分布和勘探现状分析, 其煤成气勘探前景仍然十分广阔。

鄂尔多斯盆地煤层气的勘探在20世纪90年代左右展开, 国内外一些公司和研究机构在该盆地进行了煤田和少量的煤层气勘探开发工作。系统的煤层气勘探开发试验是联

联合国开发计划署(UNDP)在柳林地区开展的,于1992年4月24日开始对煤柳1井进行压裂后排水采气作业,先后有7口煤层气井(井深450~480m)相继投入试生产。鄂尔多斯盆地东缘作为“十一五”期间和“十二五”期间煤层气勘探开发的重点区域,先后在柳林、韩城、保德等地区开展了煤层气开发先导试验区建设。诸多学者做了相关研究,包括资源和开发状况(接铭训,2010;杨智等,2010)、含气量的控制因素(李贵红和张泓,2013;李勇等,2014)、储层物性特征(张松航,2008;晋香兰等,2012)等。

随着煤系非常规天然气(简称煤系气)勘探开发的不断深入,从节约勘探成本和提高开发效益的角度,提出了煤系“三气”(煤层气、页岩气、致密气)合探共采的概念,鄂尔多斯盆地是当前煤系气勘探开发的热点地区。通过对鄂尔多斯盆地西缘煤系气成藏地质条件的研究,以典型钻孔的岩性组合、沉积序列和测试数据分析为例,确定了煤系气的有利层段,建立了煤系气共生组合模式,探讨了煤系气的共生耦合机制,为盆地煤系“三气”合探共采提供了基础理论指导(曹代勇等,2016a)。秦勇等(2016)从地层岩性分布、成藏机理、不同类型储层含气特征等方面分析煤系“三气”共采的可能性及难点;傅雪海等(2016)提出煤系气分隔合采技术,为煤系“三气”合探共采提供了技术支持;孟尚志等(2018)基于盆地东缘临兴地区现场试验井数据,分析得出单井筒煤系“三气”合探共采是可行的,各产气层类似江河支流流向干流的形式进入井筒协同产出。目前,煤系“三气”合探共采处于理论研究和现场试验阶段,还存在许多理论认识上的不足以及许多技术难题需要人们进一步研究。

鄂尔多斯盆地是众所周知的“聚宝盆”,不仅含煤,还含油、气、铀等。许多学者对盆地内多种能源矿产富集进行了研究(陈刚等,2005;邓军等,2006;刘池洋等,2006a,2006b),发现盆地内含煤地层,既是早、晚古生代天然气的主力烃源岩,又是晚古生代煤成气的主力储集层,为油气提供非常有利的生、储、盖空间配置体系,在纵向上呈现“下煤上气”的能源共存组合形式。其中,对煤和煤系共、伴生矿产也开展了不同程度的专题研究,代表性论文有:魏永佩和王毅(2004)的“鄂尔多斯盆地多种能源矿产富集规律的比较”,李增学等(2006)的“鄂尔多斯盆地多种能源矿产共存富集形式及沉积控制”,代世峰等(2006a)的“鄂尔多斯盆地东北缘准格尔煤田煤中超常富集勃姆石的发现”等。

鄂尔多斯盆地煤炭资源量丰富,优秀的研究成果不断涌现。从20世纪90年代对鄂尔多斯盆地的沉积类型、构造演化背景的研究,到21世纪初对煤成气和含煤地层层序格架的研究,以及近年来煤层气和煤系气的系列研究工作,使鄂尔多斯盆地这个稳定的克拉通盆地展现出日新月异的风采。煤系矿产资源研究依然是近些年及未来一段时期鄂尔多斯盆地煤地质学的热点,其相关成果也将进一步丰富煤地质学基础理论和实践认识。

## 第二节 含煤岩系多种矿产资源研究

### 一、概念的形成与发展

#### (一) 从煤系共、伴生矿产到煤系矿产资源

从 20 世纪 50 年代至今,煤系矿产资源概念和类型的形成经历了逐步发展和完善的过程。

李星学(1955)提出,整个含煤地层缓慢沉积的长远过程中,在某一阶段如有适合于它种矿产聚集的特殊自然条件时,就将有它种矿产的造就,如油页岩、铝土矿、耐火黏土、铁、锰和黄铁矿等。

全国矿产储量委员会 1986 年颁布的《煤炭资源地质勘探规范》规定,煤系中有益矿产是指在含煤地层中与煤伴生或共生的各种有工业利用价值的矿产和伴生元素,也包括勘探工作范围内含煤地层的上覆或下伏地层中所含的有用矿产。

吴道蓉和吴殿虎(1994)指出,共生矿产指同一矿区(矿床)内存在着两种以上符合工业指标,具有一定规模的矿产;伴生矿产则指在矿床(矿体)中与主要矿产一道产出,无单独开采价值,但在采掘、加工主要矿产时,可以同时被采出、提取和利用的矿产。

1996 年出版的《中国煤炭工业百科全书:地质·测量卷》(杨锡禄和周国铨,1996)收录了“煤系共伴生矿产资源”条目,将其定义为:含煤岩系中与煤共、伴生的所有金属和非金属矿产及煤中赋存的有工业价值的稀有分散元素、放射性元素和某些金属元素。近些年的研究证实,煤成气和煤成油具有重要的经济价值。

袁国泰和黄凯芬(1998)认为,煤系共生矿产是指在煤系中与煤具成因上共生、共同出现的其他矿产;煤系伴生矿产是指在煤系中与煤不一定具成因联系的其他矿产。

满建康等(2011)提出,煤系共生矿产资源是指含煤岩系中除煤层以外可开发利用的矿产及煤中的有用微量元素。煤系伴生矿产资源是指与煤系共生矿产一起产出但在技术和经济上不具备单独开采价值,但在开采和加工煤炭时能同时合理地开采、提取和利用的矿石、矿物或元素。

刘建强等(2015)认为煤的共生矿产主要是指多种矿产与煤具有成因和时间上的联系,其形成、赋存则与煤具有一定的时间序列,且能够作为单一矿种进行赋存与开采,煤与其他任何一种矿种可以在宏观上有所体现;煤的伴生矿产是指其他矿产与煤具有成因上的关系,其形成时间与煤的形成时间几乎相同,煤的伴生矿产则表现为开采上的差异性。

综上所述,不同学者从各自的研究角度出发,对于煤系矿产资源的定义有不同的理解。大体上可以划分为成因角度定义(袁国泰和黄凯芬,1998;刘建强等,2015)和经济性角度定义(吴道蓉和吴殿虎,1994;满建康等,2011;孙升林等,2014)两大类。长期

以来,人们用“共、伴生矿产”表征煤系中除煤之外的其他矿产种类。实际上,根据《矿产资源综合勘查评价规范》(GB/T 25283—2010)中关于共、伴生矿产的定义(杨强等,2011),煤系中其他矿产可能具有与煤同等重要的经济价值,特定情况下甚至超过煤矿产,如内蒙古乌兰图嘎煤系锆矿床。另外,从成因角度分析,煤系中多种矿产可能形成于统一的成矿环境,经历相同的演化过程,具有密切的空间组合关系。因此,本书建议用“煤系(综合)矿产资源”术语取代煤系共、伴生矿产,用以拓宽煤炭资源的概念。

## (二)煤系矿产资源类型划分的发展过程

煤系矿产资源类型也是值得关注的问题。1994年3月26日国务院发布的《中华人民共和国矿产资源法实施细则》(国务院令第152号)的附件“矿产资源分类细目”,按工业分类将矿产资源分为能源矿产、金属矿产、非金属矿产与水气矿产四大类。多年来的勘查实践和开发利用技术发展发现煤系矿产种类繁多,上述四大类矿产资源类型中不少矿种在煤系中均有不同程度的分布。对于煤系矿产资源类型划分,先后从工业角度、物理性能及加工利用方向、赋存状态等角度进行了讨论。袁国泰和黄凯芬(1998)等依据其物质成分、物理性能及加工利用方向,将煤系矿产资源分为三大类:固体共、伴生矿产,液态共、伴生矿产及气态共、伴生矿产。孙升林等(2014)将煤系矿产资源划分为煤系能源矿产、煤系金属矿产和煤系非金属矿产,煤系能源矿产主要包括煤炭、煤系气(煤层气、致密砂岩气、页岩气等)、铀矿、油页岩等;煤系金属矿产勘查开发研究多集中在我国紧缺的铝、铁等大宗矿产及新兴产业急需的锂、锆、镓等战略性资源;煤系非金属矿产中常见的有高岭土、耐火黏土、硅藻土、膨润土、叶蜡石、石墨等。刘建强等(2015)根据矿产在煤层中的赋存状态、存在位置及与煤的关系,认为煤的伴生矿产包括煤层气、煤成气、镓、铀、锆、钒等,共生矿产包括页岩气等,而油页岩、黏土与高岭土则既是伴生矿产也是共生矿产。

## 二、煤系矿产资源共生组合研究

含煤盆地作为多种矿产的赋存场所,其内部多种矿产资源共存的事实一直受到国内外地质学家的关注和重视。但是前人多是对单一矿种的生成、赋存、成藏机制等方面进行研究,却很少将煤系多种矿产资源纳入盆地这个整体的系统当中进行研究。无论在国内还是国外,目前针对煤系矿产资源同盆共存的研究程度总体上较低。

20世纪40~50年代,人们开始认识到煤和含煤地层可形成具工业价值的天然气资源。从60年代开始,我国煤炭地质勘查工作初步发现了某些伴生元素的含量范围,确定了Ge、Ga、U、Sc、Y、Zr、La、Ce等元素在一些矿区煤层中富集的情况。60年代后期,煤成气的研究得到许多地质学家所重视。80年代以来,煤成油成为研究和讨论的热点,相关理论也得以快速发展(程克明和张朝富,1994)。

21世纪初,越来越多的学者已经注意到了煤、油、气、铀矿等多种矿产相互之间的共生关系和相互影响,并且在一定程度上进行了初步探索。2003~2008年的973项目“多

种能源矿产共存成藏(矿)机理与富集分布规律”联合煤炭、地矿、油气、核工业等多个工业部门及多所高校、研究所,对鄂尔多斯盆地煤、气、油、铀等多种矿产资源同盆共存富集、地球动力学背景等进行了研究。潘爱芳等(2004)以鄂尔多斯盆地为例,指出元素地球化学场与能源矿产关系密切,铁族元素和亲铜元素的低背景叠合分布区为煤和天然气藏的主要赋存区;钨、钼族元素的低背景与铁族元素、亲铜元素的低背景之间的过渡带为铀矿床的有利富集地带;钨、钼族元素低背景区为油气藏和煤矿远景富集区。邓军等(2006)研究发现有机和无机流体的活动过程中存在相互作用,有机流体的存在形成氧化-还原障,在氧化-还原界面处突变成矿和界面成矿是多种能源矿产成矿过程的重要机制。常象春等(2006)进一步强调从认识同一盆地中这些有机与无机矿产的分布规律入手,剖析其来源、形成机理和内在联系,对于探讨多种能源的共存富集机理有着重要意义。这些研究成果进一步证实了含煤盆地内多种矿产资源有着密切的联系。

此后,众多学者基于含煤盆地内矿产资源的时空分布特征,对多种矿产资源同盆共存的类型和富集模式进行了初步探讨(李增学等,2006;朱志敏等,2007;王毅等,2014)。刘池洋等(2006a,2006b)提出多种能源矿产成藏成矿系统的理论,认为虽然矿产资源同盆共存富集成矿机理有一定的差异性,但普遍具有含矿层位联系、空间分布复杂有序的特征,是相互关联的矿产。张云峰(2013)建立了鄂尔多斯盆地煤-石油-天然气-铀矿4种能源矿产同盆共生的成矿(藏)模式。代世峰等(2014)论述了煤-锆、煤-镓、煤-铀、煤-铋、煤-稀土元素等煤型稀有金属矿床的富集机理。曹代勇等(2014a)提出了煤系气共生赋存模式及其研究方向。王毅等(2014)以鄂尔多斯盆地为例,指出在整个盆地演化过程中,共存系统中有机和无机矿产的形成过程相互关联,就位空间按照一定的规律分布,通常流体有机矿产分布于盆地内部,无机矿产则分布于盆地边缘或盆-山转换部位,但它们同属一个盆地的自然成矿(藏)系统。

前人对于含煤盆地内多种矿产资源的综合勘查也开展了相关研究。魏永佩和王毅(2004)通过对鄂尔多斯盆地多种能源矿产的富集规律进行比较,指出天环拗陷、西缘逆冲带可开展油-气-煤-铀矿的联合勘探;伊盟隆起、渭北挠褶带和晋西挠褶带可进行煤炭、煤层气和铀矿的协同勘探。杨伟利等(2010)结合多能源矿产的成矿背景、成藏(矿)机理、赋存规律、勘探理论与实践等,基于经济效益最大化和勘探方法最优化原则,建立了鄂尔多斯盆地多种能源矿产的协同勘探模式。王毅等(2014)以鄂尔多斯盆地为例,在盆地构造演化、各种能源矿产的时空分布及相互联系等方面分析的基础上,探讨了盆地演化进程中多种能源矿产同盆共存富集的成藏(矿)体系及其分布规律,试图建立多种能源矿产协同勘探模式。王步清等(2015)在对鄂尔多斯盆地煤-铀、油-铀空间共生关系及矿业权叠置现状研究的基础上,对各类规划区块提出了具体的勘查开采政策建议。

综上所述,可以看出研究者已经注意到了盆地内煤系矿产资源的相互关系和相互影响,并且在一定程度上进行了初步探索。但是我们也应意识到,将含煤盆地多种矿产资源放到盆地这个整体的系统中进行成因机制和耦合成藏研究,仅仅才刚刚开始,还没有形成较系统的理论体系和综合勘探方法,而这一工作的开展也成为当前煤地质学领域的

关注热点和前沿方向。

### 第三节 煤系矿产资源赋存控制因素

煤系是一套含有煤层并有成因联系的沉积岩系，其特点是沉积旋回明显、岩性种类多样、有机质含量高，从而成为多种矿产资源的载体，构成一个类型众多、资源丰富、相对独立又具有成因联系与耦合关系的成矿环境和赋矿系统(曹代勇等, 2014a)。煤系矿产的成矿过程一般涉及盆地充填(矿产沉积)时期的古地理、地球化学和沉积过程及沉积后盆地的热流和成岩作用。煤系矿产资源成矿事件的时间、范围、强度和保存必须在盆地演化的格架中来分析，矿产的形成是盆地演化史的一部分。因此，对于煤系矿产资源来说，赋存控制因素研究需要从两个方面入手：一方面是从煤盆地形成的原生条件分析；另一方面是从煤盆地后期构造-热演化分析。

#### 一、原生条件分析

Weller(1930)引入了“旋回层(cyclothem)”的概念，即一个沉积旋回期间沉积的一套岩层。多种矿产能够共存于同一煤系中在很大程度上是由煤系岩性的旋回性决定的，因此，讨论煤系矿产资源形成的原生条件其实就是讨论煤系矿产资源的载体——含煤旋回层形成的控制机理。根据前人的研究(Klein and Willard, 1989; Cecil et al., 2003)，含煤旋回层的控制因素主要包括古构造、海平面变化、古气候和沉积过程。

##### (一) 古构造控制

地壳运动控制的想法在 Weller(1930)提出旋回层概念之初就已被提出，后来又有所更新(Weller, 1956)。地壳变动说假定沉积盆地及源区存在周期性交替的上升和沉降运动，砂岩底部的不整合面被看成上升期广泛侵蚀作用的信号，而沉降期从块状砂岩到页岩、煤及海相层的沉积则被看作是一个侵蚀旋回完成期间河流梯度变小的反映。

构造控制的概念可分为两类：①将旋回层与沿断层崖局限的周期性运动相联系的构造控制；②同期克拉通范围或全球性构造运动的构造控制。Klein 和 Willard(1989)提出了把含煤旋回层的成因与全球构造运动相联系的独特见解，他们对比了北美石炭系 3 种不同类型旋回层：①以海相为主的堪萨斯型旋回层；②海相和陆相混合的伊利诺伊型旋回层；③以陆相为主的阿巴拉契亚型旋回层。根据区域构造史分析认为，中部大陆西部端元堪萨斯型旋回层受构造影响最小，实质上是受冰川性全球海平面变化的控制，另一端元的阿巴拉契亚型旋回层是在前陆盆地受幕式逆冲负载影响下形成的。在他们的解释中参考了 Tankard(1986)提出的由逆冲负载引起的挠曲变形与松弛期的黏弹性响应周期性交替模式，其中，褶皱带的逆冲负载作用伴随前陆盆地的变浅并引起沉积进积及盆地充填，而松弛作用则导致向下翘曲和盆地变深，每次新的逆冲负载作用都因此能与旋回