

戴金星文集



天然气地质学——卷一



戴金星 / 著

 科学出版社

戴金星文集



天然气地质学——卷一

戴金星/著

科学出版社

北京

内 容 简 介

专著收录了戴金星院士从事天然气研究和勘探工作 50 多年来,在天然气地质研究方面公开发表的中文论文。内容包括煤成气含义、煤系生烃特征、煤成气资源评价、煤成气藏类型以及远景区预测、中国天然气地质理论进展、大中型气田形成主控因素、煤成气聚集域、无机成因气田及特征、非常规天然气及其勘探开发意义、世界典型煤成气田富集规律等,这些论述是戴金星院士从事天然气地质研究的结晶,为我国天然气工业的迅速发展做出了重要贡献。

本书可供从事石油天然气地球科学工作者、石油院校师生、油田现场生产部门的技术和管理人员阅读参考!

图书在版编目(CIP)数据

戴金星文集. 1, 天然气地质学 / 戴金星著. —北京: 科学出版社, 2015. 11

ISBN 978-7-03-046304-3

I. ①戴… II. ①戴… III. ①戴金星-文集②石油天然气地质-文集
IV. ①P5-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 267625 号

责任编辑: 韦 沁 韩 鹏 / 责任校对: 陈玉凤

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 黄华斌

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>

北京利丰雅高长城印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 11 月第一次印刷 印张: 28 1/4

字数: 658 000

定价: 398.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



摄于一九九五年

前 言

《戴金星文集》在八旬耄耋之年筹备出版，初拟出六卷。今年交稿四卷，出版三卷，争取 2016 年出完六卷。今后若还有足量的论文发表，可望将出七卷或更多。

《戴金星文集》是至 2015 年底我与合作者共正式发表的 289 篇论文中，仅以我为第一作者或是执笔者的论文入选。前四卷均以油气论文，特别是天然气地质和地球化学的相关论文，一至三卷为中文，四卷为英文。

《戴金星文集》和 23 部专著，是我半个世纪科研工作的结晶。论文的主要研究方向是天然气地质和地球化学，核心是煤成气地质和地球化学，20 世纪 70 年代末，“煤成作用中形成的天然气和石油”（1979），“我国煤系地层含气性的初步研究”（1980）的论文开启了中国煤成气理论，被认为是“中国开始系统研究煤成烃的标志”，是“第一次系统阐述了中国煤成气理论的核心要点，是中国煤成气理论研究的里程碑”，“一般作为中国天然气地质学的开端”。煤成气理论强调煤系是全天候的良好气源岩，煤系成烃以气为主，以油为辅，使中国勘探天然气指导理论从油型气“一元论”，发展为油型气和煤成气“二元论”，开辟了煤成气勘探新领域，从而推进了中国天然气工业发生重大进展，使中国从贫气国迈进产气大国之列。1978 年煤成气理论产生之前，中国天然气探明地质储量仅为 2246 亿 m^3 ，其中煤成气储量占 9%；年产气量 137.4 亿 m^3 ，国人均享有天然气储量 235.8 m^3 ，国人年均用国产气 14.3 m^3 ，中国是贫气国。从 1979 年以“二元论”指导天然气勘探至 2014 年底，中国天然气探明地质储量总计 106430.7 亿 m^3 ，其中煤成气储量占 71%；年产量为 1345 亿 m^3 ，中国成为世界第六大产气国。国人均享有天然气地质储量 7768.6 m^3 ，国人年均用国产气 98.2 m^3 。由此可见：从“一元论”转化为“二元论”指导天然气勘探，中国天然气工业主要指标发生了重大变化：“二元论”比“一元论”时天然气探明地质储量中，煤成气比例提高了 62%；国人均有天然气探明地质储量多了 7532.8 m^3 ，国人年均享有国产气多了 83.9 m^3 。因此，煤成气是中国天然气工业近期大发展的主角。

鄂尔多斯盆地自 1907 年在中国大陆首先开始机械化油气勘探至 20 世纪 80 年代初，以“一元论”指导勘探，未将广泛分布的石炭-二叠系含煤地层作为气源岩，天然气勘探几乎无进展，盆地内只发现两个小气田（刘家庄和直罗），探明天然气地质储量仅为 11.7 亿 m^3 。1980 年我指出该盆地“是煤成天然气聚集区，可能找到成群成带的煤成气田”，1983 年我国第一批国家重大科技攻关项目“煤成气的开发研究”启动后，长期在鄂尔多斯盆地勘探油气的杨俊杰、裴锡古、王少昌和张文正等对该盆地煤成气生气量、资源量、生气强度、成藏和有利地区作了大量研究，促使盆地从仅勘探油方向在 20 世纪 90 年以来转为油气兼探，从而使鄂尔多斯盆地天然气勘探开发迅速发展。至 2014 年底，发现天然气地质储量 34764 亿 m^3 ，为“一元论”时 2971 倍；年产气 425.8 亿 m^3 ，成为今天中国天

然气最大储量、最大产量的盆地,储量和产量中90%以上为煤成气。

1983~1998年我4次参加国家天然气科技攻关项目并任项目长或副项目长,领导天然气研究、勘探评价和预测,取得丰硕研究成果,为推进我国天然气工业迅速发展添砖加瓦。由此,1987年“中国煤成气的开发研究”、1997年“大中型气田形成条件、分布规律和勘探技术研究”先后两次获国家科技进步一等奖,2010年“中国天然气成因及鉴别”获国家自然科学二等奖,以上三项奖我均为第一贡献者。2001年获何梁何利科学与技术进步奖。

《戴金星文集》以专业学科分卷,除卷一前几篇论文外,各卷论文均以发表年次先后排序。论文先后跨越近半个世纪,由于出版时间不同、杂志不同,参考文献仍保持原文格式,但所有图件力争改为彩图。有的论文中有少许排印错字,甚至个别丢段、图号错误,均作改正。

秦胜飞、胡国艺、米敬奎、杨春、倪云燕、陶小晚、黄士鹏、廖凤蓉、龚德瑜、于聪、房忱琛、刘丹、冯子齐、彭威龙、韩文学博士后、博士参与了文字和彩图校对,在此深表感谢。

我的夫人夏映荷,在文集编辑和出版中,在工作上积极支持和生活上无微不至的照顾,非常感谢。

中国石油勘探开发研究院赵文智院长在出版经费上予以大力支持,十分感谢。

著 者

2015年11月22日

目 录

前言

成煤作用中形成的天然气和石油	1
我国煤系地层含气性的初步研究	9
关于埋藏基岩古风化壳的含油气性	20
加强我国南方生物礁的油气勘探	29
生物礁的含油气性及其勘探	34
我国台湾油气地质梗概	53
从油气形成探讨煤变质的温度	63
关于煤系生成天然气量的计算	72
从煤成气观点评价沁水盆地含气远景	78
我国煤中发现的气孔及其在天然气勘探上的意义	94
煤成气涵义及其划分	98
国外的煤成气和主要的聚煤气盆地	101
我国天然气藏的分布特征	120
我国天然气藏类型的划分	128
煤成气和世界聚煤气盆地概述	137
向斜中的油、气藏	149
西西伯利亚盆地的煤成气及其控制富集的规律	153
中国含硫化氢天然气分布特征、分类及其成因探讨	164
苏联气田和天然气储量分布的若干特征	173
我国煤成气藏的类型和有利的煤成气远景区	198
煤成气的研究、勘探与前景展望	212
中国东部奥陶系气藏类型、气源及其意义	215
中国气藏形成与富集的主要控制因素初探	221
关于冀中拗陷煤成气的探讨	228
东濮凹陷石炭-二叠系煤中气孔的特征及其意义	234
天然气在我国未来的能源中占有重要地位	240
广东平远鹧鸪窿二氧化碳气苗	244
中国煤成气的开发研究	247
近十年来我国天然气勘探取得重大进展	250

近 40 年来世界天然气工业发展的若干特征	254
气聚集带和气聚集区的分类及其在天然气勘探上的意义	261
古构造在气藏形成中的重大作用	270
大中型气田发育的气聚集带特征	273
我国煤成气资源勘探开发和研究的重大意义	281
吐鲁番-哈密盆地的煤成气	287
中国东部无机成因的二氧化碳气藏及其特征	292
中国含油气盆地中无机成因烷烃气及其气藏初探	300
中亚煤成气聚集域形成及其源岩	310
中亚煤成气聚集域东部气聚集带特征	317
中国大中型气田有利勘探区带	325
国家“八五”天然气科技攻关丰硕成果梗概	330
中国东部和大陆架二氧化碳气田 (藏) 及其气的类型	337
中国大中型气田形成的主要控制因素	340
中国气藏 (田) 的若干特征	347
论中国东部和大陆架二氧化碳气田 (藏) 及其气的成因类型	354
我国天然气资源及其前景	373
中国煤成气研究二十年的重大进展	379
中国煤成大中型气田形成的主要控制因素	395
中国煤成气田分布规律初探	405
中国天然气工业的开发前景	418
无机成因油气论和无机成因的气田 (藏)	420
世界聚煤气盆地梗概	441

成煤作用中形成的天然气和石油*

煤不仅本身是目前世界上蕴藏最丰富的燃料，而且在成煤作用过程中形成大量的天然气，在其低、中级变质阶段还产生一定数量的石油。20 世纪 60 年代以来在西西伯利亚盆地北部、北海南部盆地及其南岸发现了储量巨大（17 万亿 m^3 ）、气田众多、煤变质作用生成的天然气，其储量占世界天然气总储量五分之一以上。苏联有大约 65% 探明的天然气资源在含煤地层中，世界上的大气田及其天然气储量 70% ~ 80% 来自含煤地层。世界特大气田苏联的乌廉戈伊气田和荷兰的格鲁宁根气田都是煤系形成的气。我国含煤盆地分布极其广泛，已有很多资料证明，在成煤作用中也形成大量的天然气与一定数量的石油。在四川盆地和鄂尔多斯盆地及台湾盆地业已发现了与煤成因有关的天然气藏，如中坝气田的须二气藏、八角场的香二气藏和刘家庄气藏。所以，研究成煤作用中生成的气、油不仅具有理论意义，而且具有现实意义，是在含煤盆地开展天然气勘探的基础。

一、成煤作用的地球化学梗概

生油气层和生气层的有机物质相——成因类型往往是不同的。腐泥型有机物既能生油、也能生气，然而腐殖型有机物在煤化过程中主要生成气态烃。煤通常是由腐殖类为主要有机物（腐泥煤较少见）和无机物组成的复杂混合物，后者一般含量不大。腐殖型有机物在煤系与亚煤系中含量最高，其特征是富含芳烃结构的油母质和 ^{13}C 同位素，氢组分含量小于 6%，O/C 值高。煤有机物的基本结构单元（图 1）主要是带有许多侧链和官能团，如羧基（ $-\text{COOH}$ ）、羟基（ $-\text{OH}$ ）、甲氧基（ $-\text{OCH}_3$ ）的缩合芳香核体系，亦即芳香族稠环。煤中碳元素主要集中在稠环里，稠环因有坚固的键，故具有较大的稳定性。侧链和官能团间的及其与稠环之间的结合力与稠环相比较相对为弱，热稳定性较小，故在高温作用下易于发生侧链脱落。从植物到泥炭并转变为褐煤、烟煤至无烟煤的过程，有机物或煤的物理结构与化学特征有一个统一递变进程。这是从大气圈—水圈—岩石圈地球化学环境变更的过程。当植物纤维质被埋藏覆盖后，随着地壳不断下沉，上覆岩层不断增加，地温和压力不断升高，伴之有有机物结构发生变化。由于侧链和官能团结合力较弱，在煤化过程中进行缩合作用，数目不断减少，一部分碳元素转入并集中

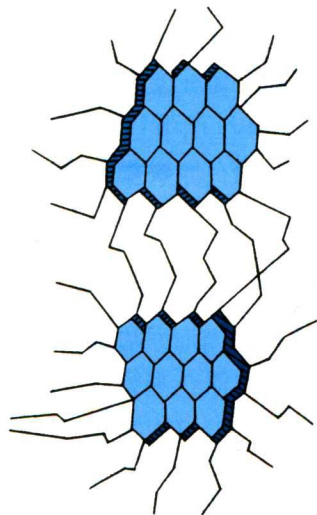
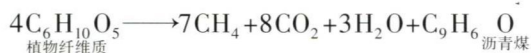


图 1 煤的基本结构单元

* 原载于《石油勘探与开发》，1979，第 3 期。

在稠环中,一部分分解成为挥发性产物,如 CO_2 、 H_2O 、 CH_4 及其同系物。植物纤维质成煤作用前期阶段演化及其主要产物可用以下化学反应式表示



总之,在成煤作用演化过程中形成的副产物主要是气体,用电子显微镜观察在镜煤中有许多大小相同,分布非常规律,并连接成小沟的小孔结构,就是气体缓慢而均匀逸出的迹象^[1]。

二、成煤作用中生成的气、油演化特征

所谓成煤作用包括泥炭化作用和煤化作用。

从植物纤维质演变至褐煤开始出现过程是泛泥炭化作用。与此演化相伴随形成主要气体有 CH_4 、 CO_2 及少量的氮、硫化氢和氨。由于此阶段盖层几乎没有或较薄,并未或正开始成岩,无可靠的盖层,所以形成的气体大部分丧失殆尽,К. И. Багринцева 认为损耗系数达 0.8^[2]。

煤化作用包括从褐煤→长焰煤→气煤→肥煤→焦煤→瘦煤→贫煤→无烟煤各煤阶演化变质逐渐加深过程,在不同煤阶形成烃类成分与状态是不同的。研究不同煤阶形成的烃类组分及其特征,就可认识成煤作用中生成气、油演化规律。

辽宁煤炭研究所对我国一些煤田煤层的气体组分作了较系统气相色谱分析,获得了烃类 (C_1 — C_8) 组分资料 (表 1)。分析表 1,不难看出煤层里烃类以甲烷占绝对优势;不同牌号的煤,重烃气含量不同,气煤、肥煤、焦煤阶段重烃气含量较多,即约占 5%~18%,因之生成气体应属湿气,而无烟煤阶段重烃气含量大大减少,仅为 1.4%~2.6% 左右,生成的气体应属干气。值得注意的是在气煤、肥煤阶段,尚形成一定数量液态烃 (C_{5-8}),也就是说在煤化作用低、中级阶段,有一定量液态烃形成,而这些液态烃随着煤变质程度的加深而至贫煤、无烟煤阶段几乎消失了。四川盆地香溪群 (须家河组) 普遍发育有煤层,在川中与川西北广大地区有着良好的保存条件。目前在此已发现中坝、八角场有关煤成气藏。近年来又先后在界石场、金华镇、瓦市、九龙山、大兴等构造上获得工业性气井,并在遂宁-磨溪一带陆续获得气井。对川中与川西北埋藏的香溪群煤层虽未作牌号分析,但根据四川省石油管理局地质勘探开发研究院测得不同井 11 个煤样沥青的红外和紫外光谱特征,与已知不同牌号煤的沥青标准图谱对比,则和气煤、肥煤相似。川中与川西北香溪群里发现的气井中烃类组分与特征 (表 2) 与表 1、表 3 气煤、肥煤的烃类组分十分相似。即各井发现的天然气中,甲烷含量通常为 85%~90%,重烃气总含量一般为 8%~15%。特别是乙烷含量较高 (6%~10%),并在天然气中含有相当量的凝析油与轻质油。如在蓬莱桂花一带以南至遂宁-磨溪、安岳通贤地区,香二段含凝析油高达 $100\text{g}/\text{m}^3$,有的高达 $200\text{g}/\text{m}^3$ 以上。川西亦有相仿的特征。以上烃类组分的相似性并非偶然,只能解释这些气井的气是由煤层生成较为合适。

正处于气煤与气肥煤为主阶段的北票煤田,在钻孔喷出天然气中除丁烷以前组分的烷烃气之外,较多情况下有异戊烷及正戊烷,少量样品还有微量更重烷烃。在该煤田某些地段煤层底板围岩或煤层中发现星散状石油沥青或油滴;有些地段虽不见石油沥青,但有明显的石油气味。在铜川市下石节煤矿石窑沟采区,在开采侏罗系长焰煤打眼放炮时,有大量天然气和石油涌出,日产原油曾达 100 余立方米。

表 1 我国一些煤田煤层的天然气组分表

名 称	煤系名称	煤层	煤牌号	分析样 品数 /个	平均烷烃气组分/%，体积						
					CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₂ —C ₈	C ₂ —C ₄	C ₅ —C ₈
焦作煤田李封矿、朱村矿、田门矿	山西组	大煤为主	无烟煤	10	48.26400	1.31855	0.00845	0.00133	1.39742	1.32833	0.06909
白沙煤田红卫煤矿、新生龙潭煤矿	龙潭煤系	Ⅵ煤层	无烟煤	11	51.11800	2.41372	0.02548	0.00519	2.46509	2.44439	0.00207
松藻煤矿	龙潭煤系	K ₃ 层为主	无烟煤	8	68.80825	2.59993	0.01157	0.00121	2.63244	2.61271	0.01973
南桐煤矿直属一井、直属二井	龙潭煤系	六号层为主	瘦煤	13	55.85076	7.19476	0.41986	0.00766	7.63251	7.62228	0.01023
中梁山煤矿南井、北井	龙潭煤系	K ₁ 层为主	焦煤	14	45.66400	3.98510	0.72966	0.08246	4.87471	4.79722	0.07749
天府煤矿南井	龙潭煤系	大连子层	焦煤	16	35.38437	14.72383	3.14863	0.10100	18.05131	17.97346	0.07785
鸡西煤矿滴道一井、四井、大通沟一井	鸡西组	28层、24层为主	焦煤	9	42.91888	17.05770	1.60491	0.07548	18.84493	18.73809	0.10684
北票煤矿冠山一井、二井、台吉井三宝矿	北票含煤组	4、8、9、10层为主	气煤、气肥煤为主	94	47.84472	7.91351	2.52881	0.76571	11.87550	11.20803	0.66747

表 2 四川盆地川中、川西北须家河组（香溪群）天然气组分表

井号	层位	天然气组分/%								
		甲烷	乙烷	丙烷	丁烷	戊烷	二氧化碳	氢	氮	重烃总量
桂 52	香六段	91.68	4.52	1.63	0.54		0.65		0.70	6.69
角 43	香五段	87.99	5.48	2.92	0.96	0.51	0.70		0.05	9.87
大参		85.40	9.59	2.66	1.06	0.09	0.35	0.01	0.72	13.40
遂 10	香四段	73.72	15.48	7.17	1.97	0.52	0.50		0.70	25.14
花 3		89.35	5.46	2.41	1.12	0.62	0.15			9.61
广 19	香二—四段	90.24	6.12	1.78	0.46	0.23	0.50		0.50	8.59
遂 7	香三段	86.16	7.10	2.99	0.87	0.38	1.1		0.55	11.34
通 6	香二段	89.15	7.31	1.99	0.52		0.25		0.57	9.82
遂 8		87.24	8.38	2.43	0.67	0.25	0.30		0.51	11.73
女 106		91.27	5.38	1.29	1.18		0.08	0.09	0.47	7.85
角 23		93.14	3.22	1.85	0.39	0.12	0.30		0.52	5.48
蓬 33		85.98	6.69	3.09	1.19	0.68	0.65		1.58	11.6
遂 5	须二段	588.44	6.68	2.51	0.71	0.30	0.30		0.86	10.20
中 2		90.80	5.81	1.53	0.64		0.62	0.11	0.68	7.98
中 11		83.26	9.45	4.19	1.87	0.20	0.05	0.04	0.69	15.71
中 18		88.34	6.48	2.05	0.95	0.28	0.76	0.04	0.90	9.76

我国南方龙潭组煤系中广泛见到油气显示。江西萍乐拗陷龙潭组官山段下部,在乐平鸣山煤矿见较好油显示,在该组老山段中上部也见有含油显示,在此煤种为气肥煤。在安庆、广德独山燕子岭煤井砂岩中有液体原油;苏南句容东昌街青山煤矿有沥青一层,厚3~4cm;句容茅山、宜兴湖汶、张渚、宁国灰山、宣城水东、高淳等地龙潭组煤系的砂岩具有油味;镇江之南的小力山、东风煤矿与丹徒伏牛山地区的一些煤田钻孔中见砂岩裂隙、孔隙含油。在东风煤矿801等四个工作面发生过天然气燃烧,并于矿井内一处龙潭组顶板,即大隆组底页岩裂隙内流出原油2.6t,这些石油是通过一个正断层从龙潭组砂岩中运移来的。

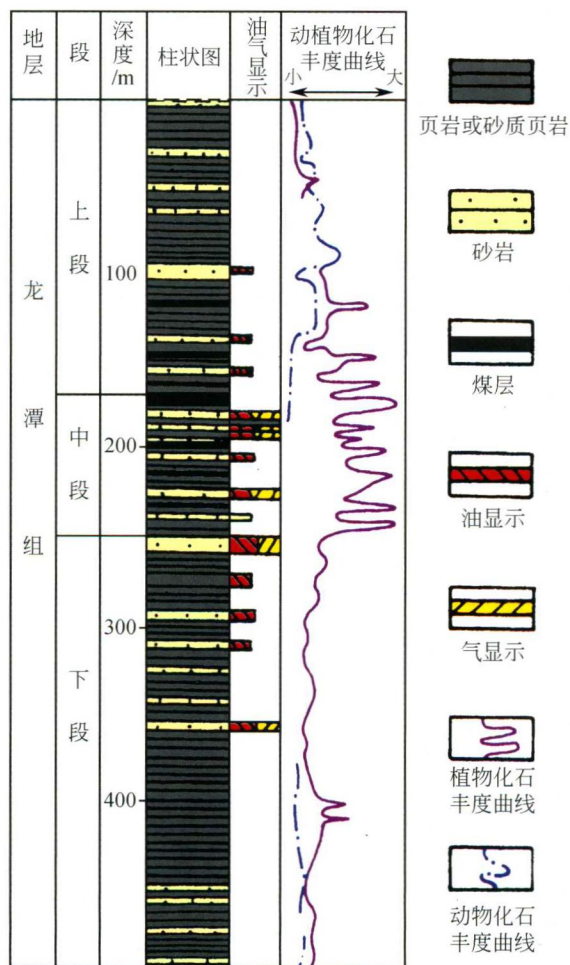


图2 长兴煤山盆地龙潭组煤层与油气显示关系图

浙江长兴煤山盆地龙潭组有普遍的油气显示,其中以油显示为甚,煤种为气肥煤。发现油气显示至少有14层(其中有6层既有油的,又有气的显示)(图2),主要油气显示集中于龙潭组中部,在稳定的C煤层(厚0.3~3m,一般2m左右)之下,有显示层多为透镜状或透镜层状砂岩,储油物性差,特别是渗透率很低,一般小于 $10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度一般为5%~9%,少数为10%~15%。由于在此煤层埋藏较浅,又为向斜构造,断裂较多,构造复杂,故大部分气与油逸散。然而由于储层具有透镜状和物性差,这里的油气还部分保存迄今,甚至部分天然气也保存下来,如大西边村见火焰为蓝色的天然气;葆青煤井-300m石门砂岩含油含气,并沿一些裂隙有天然气喷出;煤山2号孔,当岩心取出时,原油即从裂隙中流出,而且还冒气达数十小时之久;此外,多处还见油砂冒气现象。一般刚打开一些透镜状储层时,一些孔隙气、油、水同出。上述现象表明这里曾普遍生成天然气,一些储层目前仅见油显示,是由于埋藏浅,断裂发育,天然气易于逸散之故。

关于这里油气来源问题,传统看法有:首先认为主要由龙潭组上、下段浅海相与潟湖相富含有机物,具有分散状黄铁矿和菱铁矿泥质岩生成;其次也可能部分来自下伏地层,如栖霞组的臭灰岩等。根据煤山盆地油气显示特征,与其说由上述因素形成,不如说主要是由龙潭组中部煤层生成较为妥(当然,也应部分包括龙潭组上、下段泥质岩),其根据为:①C煤层瓦斯含量为 $15 \sim 25 \text{m}^3/\text{t}$,本盆地煤种为气肥煤,若以气煤计算,气煤的视气发生率为 $144 \sim 174 \text{m}^3/\text{t}$,故从煤中运移出的气为 $119 \sim 149 \text{m}^3/\text{t}$ 。煤山盆地面积约 45km^2 ,C煤层厚

约2m, 气煤容重以 $1.4\text{g}/\text{cm}^3$ 计, 那么 C 煤层储量为 1.26 亿 t, 故从 C 煤层运移出来的天然气 (Q) 可达

$$Q = (119 \sim 149) \text{m}^3/\text{t} \times 126 \times 10^6 \text{t} = (149.9 \sim 187.7) \text{亿 m}^3$$

这些从煤层里运移出来的天然气, 一部分被围岩吸附和逸散了; 一部分则“近水楼台先得月”, 优先聚集在煤层邻近有圈闭条件的储层中, 因为气肥煤阶段在形成大量天然气的同时, 还形成一定数量的石油, 如采用下述试油成果, 即石油仅占 0.04%, 那么上述数量的天然气能形成石油 599.7 万 ~ 750.9 万 m^3 , 这就能合理解释图 2 中为什么龙潭组油气显示主要集中在中段, 而上、下段许多泥质岩类集中部分夹的砂岩未见油气显示。此外, C 煤层中天然气组分为: CH_4 为 75.57%、 C_2H_6 为 16.18%、 C_3H_8 为 1.21%, 与表 2 天然气组分大致相似。② 浙江省第五地质大队对此油气作过详细工作, 并指出在含油层中油、气、水各占百分数 (体积): 气占绝对优势, 其次是水, 油则很少。例如, 千井湾煤矿西大巷 -200m 坑道, 对一层厚 7.37m 储层进行了试油, 从 1971 年 5 月 23 日打开至 1972 年 1 月 4 日结束试油, 在测试过程中天然气不断地从砂岩孔隙和裂隙中冒出, 气量约占 92%, 水和油量约占 8%; 以 1971 年 6 月 9 日为例, 气占 98.4%, 水为 1.47%, 油仅占 0.04%。这种以生气为主, 生油为辅的含量函数关系 (表 1), 是煤化作用演变中气油生成的固有特点。③ 龙潭组以下层位也有过生油过程, 如煤山盆地千井湾西北白岷公社西山界小井栖霞灰岩裂隙中的溶洞含油, 其原油具有狐臭味, 与龙潭组原油显然不同。由此可见, 龙潭组原油是本身产物, 不是下伏地层运移来的。

煤山盆地龙潭煤系油气来源问题不过是我国南方龙潭组煤系油气来源的缩影, 所以南方龙潭组中广泛的油气显示是由煤层为主生成的。目前所见一些地区龙潭组油显示多, 气显示少, 这是由于后期破坏作用而成的。

煤化作用处于高级阶段的龙潭组地层中, 发现的仅为气显示。湖南省红卫煤矿龙潭组煤层主要为无烟煤, 煤层瓦斯突出是我国著名的, 如坦家冲井 -50m 水平北-石门一次突出煤、矸量达 4500t, 天然气 138.5 万 m^3 。该矿的坦家冲井与里王庙井钻孔中发生八次煤和天然气喷出。里王庙井第一号钻孔, 在钻进过程中发生气顶钻杆, 并在起钻中发生气、煤喷出, 喷出的煤泥淹没 50m 长的双轨巷道, 平均厚达 0.2m。四川盆地石油钻井与采煤实践说明, 龙潭组煤系中天然气显示是极其普遍的, 从而说明了煤层是生气母岩。重庆地区南桐、中梁山、天府和松藻 4 个煤矿, 从 1951 ~ 1971 年共发生 621 次瓦斯和煤突出。南桐煤矿直属一井一次突出天然气 350 万 m^3 、煤 5000t。这里煤矿中突出的普遍存在, 不仅说明煤层能生成大量天然气, 而且在煤层中有某种程度的聚集, 如果煤生成的天然气运移出来, 在一定的地质条件下, 就可以聚集成气藏。在四川盆地龙潭组与下伏茅口灰岩为假整合, 在煤系沉积之前, 茅口灰岩经历了古岩溶化作用, 往往形成复杂的岩溶地貌, 其后被龙潭组覆盖, 煤系在煤化作用形成的气, 常常向着此古岩溶化“虚弱面”运移, 而储集在“千疮百孔”的岩溶化茅口灰岩中, 如中梁山煤矿茅口灰岩的溶洞有与煤层同压力的天然气, 当巷道挖进接近溶洞时, 天然气常向巷道喷出; 川南泸州古隆起上茅口灰岩有一个岩溶化的古风化壳面, 从该面到深度 175m 之上普遍有岩溶化作用, 一些溶洞规模相当大, 如长 8 井溶洞直径至少达 4.88m, 在此天然气大量聚集, 故获“气老虎井”之称。泸州古隆起茅口灰岩中的气田, 气源是由上覆煤层生成运移来的。在此目前当地水平面下 1500m 深度, 龙潭组煤层绝大多数为无烟煤^[3], 故其形成天然气主要是干气。实际上茅口灰岩中

的气田 CH_4 一般为 96% ~ 97%，而重烃气含量则很少（0.4% ~ 1.4%）（图 3），大量钻井均未发现油显示。烃类此种组合特征完全与无烟煤阶段形成烃类组分相吻合。

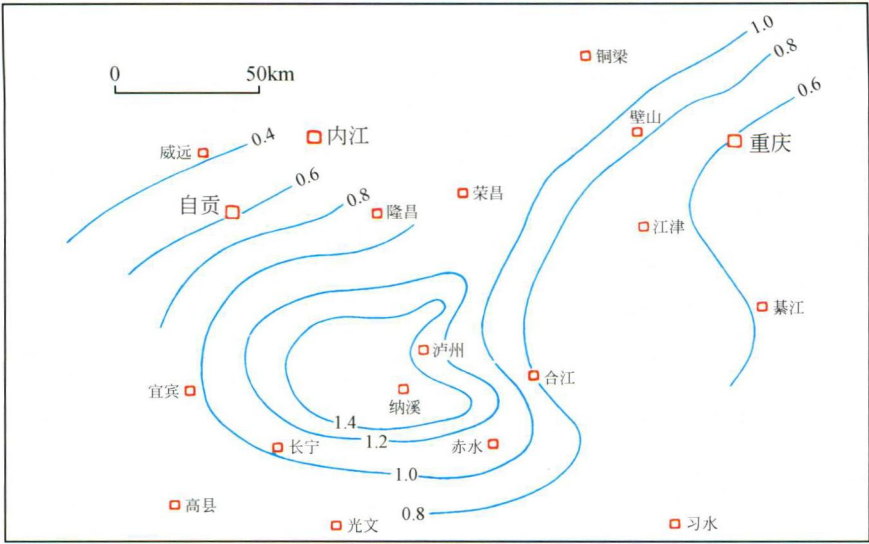


图 3 川南二叠系阳三天然气中重烃气百分含量变化图（据秦成明图简化）

类似我国各煤阶中生成烃类的演化特征，国外曾有报道：季马科夫测定伯朝拉煤田中等变质煤层（约相当肥煤）形成的天然气组分指出，重烃气含量一般从 7% ~ 15%（表 3），个别高达 20%，并在那里发现与煤系成气有关的油气田^[2]。类似的规律也在库兹涅茨煤田出现，那里煤成气中重烃气含量最大在长焰煤、气煤和肥煤中，而在贫煤和无烟煤中一般不存在重烃气。众所周知，欧洲北海南部盆地及荷兰、德国北海沿岸二叠系（个别三叠系）气田的气源是由下伏石炭系维士法阶无烟煤生成的气运移而来的^[4~6]，这些气田几乎皆为干气。有人认为褐煤、瘦煤、无烟煤阶段生成干气，而长焰煤、气煤、肥煤、焦煤阶段生成半干气，还含有相当量的石油。

表 3 伯朝拉煤盆地一些煤田和气田的重烃组分

名称 气体组分	重烃组分/%，体积					备注
	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	总和	
沃尔库塔斯克煤田	5.30	1.20	0.60	0.01	7.11	未破碎样品
	8.40	2.70	0.70	0.40	12.20	破碎样品
切耳巴斯克凝析气田	4.30	1.40	0.40	0.50	6.60	
亚历山大罗夫斯克凝析气田	5.09	1.70	0.70	0.30	7.79	
钦古琴斯克油气田	7.90	4.50	1.74	0.38	14.52	

为了阐明地层深处煤的有机物在煤化作用不同阶段形成天然气和部分石油的机理与成分，以及确定原煤物质不同成因类型对气体生成强度、成分与相态的关系，许多人进行了煤化作用过程的模拟试验^[7~9]。全苏天然气科学研究所曾对含有腐殖类、腐泥类和混合类有机物质的岩层中气体生成过程进行试验，将预先经解吸的岩样置于真空箱中经受长时间

加热（由 100℃ 到 300℃）和加压（200MPa），自由析出的气相成分显示出与有机物质的类型、变质程度和作用温度有明显的关系。在所有情况下，当温度达 100℃ 时，便发生强烈的气体生成作用。在以腐殖煤进行的试验中，烃气生成量始终是随着原煤样品变质作用增强而不断增加，并在肥煤和主焦煤阶段每公斤煤形成烃气量可达 2L，C₆ 的重烃分出大量可达 35%，这说明含煤层在一定地质条件下有可能形成相当量的石油。B. Л. Соколов 等进行相仿试验后指出：贫煤、半无烟煤和无烟煤阶段分析出烃类主要是甲烷，重烃气量已是微不足道^[8,10]。J. D. Brook 等在研究吉普斯兰盆地第三系褐煤时，将亚洛恩花粉煤进行加热裂解实验：以 210℃ 加热五天，C₁₇—C₂₉ 正烷烃增加，产率增至 200%，正烷烃奇数碳优势降低；330℃ 加热三天后，分离出的正烷烃混合物的平均分子量变小，C₂₄ 烃含量最高，达 13.5%。正烷烃奇数碳优势进一步减弱，正烷烃总产率达原煤产率的 2.8%。各次实验都有烃气生成，主要是甲烷至己烷及少量烯烃和 C₂₄ 以上烷烃异构物。在该盆地远海岸部分发现油气井，而近岸部分则有亚洛恩和莫威尔煤。经分析对比，煤样和原油中正烷烃分布的特征很相似，故 J. D. Brook 等认为原油是由含蜡树叶、花粉和孢子膜组成的陆地植物生成的。煤样分析表明，成油时期相当煤的低变质阶段^[9]。

绝大部分的煤属腐殖煤，所以煤是很好的一种生气母岩。实践与实验证明，虽然腐殖煤以生气为主，但在煤化作用的中、低变质阶段还可以形成一定数量的液态烃—凝析油和石油。如果一个含煤盆地除大部分为腐殖煤，还有少部分腐泥煤，在煤化作用一定阶段更能形成相当量液态烃。液态烃多少或存在与否受煤的有机物类型及其配置关系与变质阶段的制约。

三、结论

综合我国与国外有关资料，可以把煤的变质作用过程中形成烃类演变特征概括在图 4 中，并大概分出两大阶段。第一阶段为湿气期或气油兼生期，煤的变质处于中、低级阶段，即从长焰煤到焦煤，除形成大量甲烷外，还有两个显著的特点：其一，生成相当多的重烃气，一般含量在 5% ~ 20%，甚至更高；其二，在长焰煤到肥煤阶段，还产生一定数量的液态烃。由此可见，以往有种认为煤变质形成的天然气都是干气说法是欠准确的。第二阶段为干气期，煤变质处于高级阶段，主要是贫煤至无烟煤，这个阶段产生的几乎全是甲烷，重烃气所占比例大为减少，其含量小于 5%，常为 2% ~ 3% 或更少，这些重烃气相当大的部分属其前牌号煤变质遗留物。

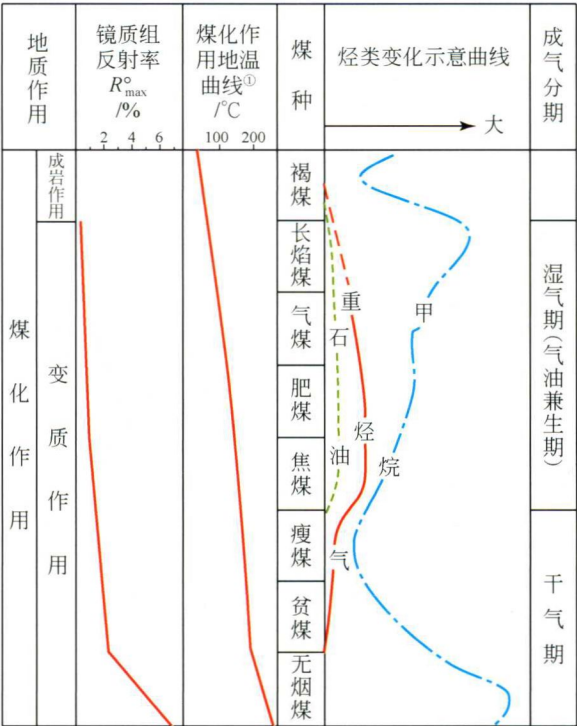


图 4 煤的变质作用中形成烃类演变示意图

①采用低温煤变质说综合地温值

参 考 文 献

- [1] Касаточкин В П, Шляцников В Ф, Непомнящий Л Л. Осубмикроскопической структуре каменных углей. ДАН СССР, 1954, 96 (3): 547 ~ 548
- [2] Багринцева К Н, Орел В Е, Ермаков В И. Роль угленосных толщ в процессах генерации природного газа. Геология нефти и газа, 1968, 6: 7 ~ 11
- [3] 四川省石油管理局地质勘探开发研究院. 国外天然气成因的研究及对四川勘探实践的意义. 石油勘探与开发, 1978, 5: 15 ~ 28
- [4] Kew P. Geological origins of natural gas. Gas World, 1977, 182 (4700): 152 ~ 160
- [5] Ziegler P A. Petroleum geology and geology of the North Sea and northeast Atlantic continental margin. Universitetsforlaget, 1975. 1 ~ 27
- [6] Lutz M, Kaasschieter J P H, van Wijhe D H. Geological factors controlling Rotliegend gas accumulations in the Mid-European Basin. Proceedings of the ninth world petroleum congress, 1975. 2: 93 ~ 103
- [7] Жабров И П, Ермаков В И, Соколов В Л и др. Генезис Углеводородных Газов и Формирование Месторождения. Наука; 1977. 6 ~ 19
- [8] Соколов В Л и др. Условия Одрозования Нефти и газа в Осадочных Бассейнах. Наука, 1977. 80 ~ 90
- [9] Brook J D, Smith S W. The diagenesis of plant lipids during the formation of coal, petroleum and natural gas- II Coalification and the formation of oil and gas in the Gippsland Basin. Geochim Cosmochim Acta, 1969, 33: 1183 ~ 1194
- [10] Соколов В Л и др. Газообразование на высоких стадиях углификации. Геология Нефти и Яза, 1978, 10: 34 ~ 38

我国煤系地层含气性的初步研究*

一、概论

我国是发现煤层中有天然气很早的国家。宋代鲁应龙记载：“嘉禾志：顾亭林庵中，有忠烈公祠，近岁忽地裂数尺，中有风涛声，以物探之，应手火起，至今尚然”^[1]，嘉禾可能是湖南嘉禾县，是出煤的地方，王嘉阴教授指出它可能是煤里放出的一些天然气^[2]。20 世纪 60 年代以来，国外在西西伯利亚盆地北部、北海南部盆地及其南岸发现了储量巨大、气田众多、由成煤作用生成的天然气，其储量（17 万亿 m^3 ）占世界探明天然气总储量的五分之一以上。美国煤矿每年排到大气中的天然气约 60 亿 m^3 ，含在煤层中的气达 8.778 万亿 m^3 ，比天然气可采储量（7.532 万亿 m^3 ）还大^[3]。苏联有大约 65% 探明的天然气资源均在含煤地层中^[4]。世界上的大气田和天然气储量 70% ~ 80% 来自含煤地层，世界特大气田苏联的乌连戈伊气田和荷兰的格鲁宁根气田都被认为是煤系形成的气^①。

1. 煤层的瓦斯含量

我国一些煤矿瓦斯涌出量很大，如抚顺煤田龙凤矿 1957 年瓦斯涌出量达 1.08 亿 m^3 ；中梁山煤矿从茅口灰岩巷道中，七年内共涌出天然气 4700 万 m^3 ^[5]。从表 1 可知：不同地区、不同煤种与不同时代的煤，均赋存着数量不等的天然气。瓦斯含量和瓦斯涌出量的多少，与煤层所处的深度、变质程度、围岩性质、构造及断裂发育特征、煤层结构等因素有关。一般煤层埋藏浅、变质程度低、围岩孔渗较好、开启性断裂发育，含量就少。越向地下深部，煤层的瓦斯压力就越大，含量就越高，直到一定的极限值（大约 $30\text{m}^3/\text{t}$ ）^[6]；当煤层顶、底板致密，煤层瓦斯含量与涌出量就大，如抚顺煤田顶板为油页岩，其瓦斯含量与涌出量大（表 1）。当煤层顶、底板岩石孔隙度大、渗透性好时，煤层中瓦斯量就少，如大同煤田石炭-二叠系煤层顶板为粗砂岩，故瓦斯涌出量大部分为 $1 \sim 4\text{m}^3/\text{t}$ 。煤层在向斜轴部瓦斯常较少，而在背斜轴部则较多，如中梁山煤矿乐平煤系之下是与之成假整合接触的茅口灰岩，由于处在背斜轴部，断裂与溶洞发育，瓦斯含量与瓦斯涌出量分别为 $13.2\text{m}^3/\text{t}$ 与 $35 \sim 56\text{m}^3/\text{t}$ 。若断层切割煤层并与孔隙度大的岩层相通，则断层附近煤层与围岩内瓦斯含量降低；如果断层被上覆致密岩层覆盖或是封闭性的，断层带附近就较富集瓦斯。研究煤层瓦斯多少的控制因素，掌握煤成天然气生成后运移动向、富集特点，是勘探煤成天然气的一个重要课题。

* 原载于《石油学报》，1980，第 1 卷，第 4 期。

① 胡见义，1978，我国和世界石油勘探开发科技现状。