

戴金星文集



天然气地球化学——卷三

戴金星 / 著

 科学出版社



戴金星文集



天然气地球化学——卷三



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,在天然气地球化学研究方面公开发表的中文论文。内容包括典型煤成气田气源、不同成因类型天然气的鉴别、常规天然气碳氢同位素、轻烃、氮同位素特征、碳同位素倒转成因、泥火山天然气地球化学特征及来源、非常规天然气地球化学特征等,这些研究成果极大的推动了我国天然气地球化学的研究,使我国指导天然气勘探理论从“一元论”走向“二元论”(油型气和煤成气),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.3, 天然气地球化学 / 戴金星著. —北京: 科学出版社, 2015. 11

ISBN 978-7-03-046302-9

I. ①戴… II. ①戴… III. ①戴金星-文集②天然气-地球化学-文集
IV. P5-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 267971 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

字数: 664 000

定价: 398.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



摄于二〇一五年

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	
程海天然气的成因	1
四川盆地阳新统气藏的气源主要是煤成气	6
煤成气的成分及其成因	12
我国高含硫化氢气的成因	22
联邦德国煤成气的甲烷碳同位素研究和对我们的启示	24
鉴别煤成气和油型气若干指标的初步探讨	35
楚雄盆地中东部禄丰-楚雄一带的二氧化碳气及其成因	43
煤成气型生物成因气及其成因的探讨	49
试论不同成因混合气藏及其控制因素	57
我国煤层气组分、碳同位素类型及其成因和意义	66
煤成油的若干有机地球化学特征	77
鉴别煤成气的指标	84
云南省腾冲县硫磺塘天然气的碳同位素组成特征和成因	99
碳、氢同位素组成研究在油气运移上的意义	103
我国煤成烃气的 $\delta^{13}\text{C}-R^\circ$ 关系	108
四川威远气田多源气藏的成因分析	112
从碳、氢同位素组成特征剖析柯克亚油气田的油气成因	119
我国有机烷烃气氢同位素的若干特征	125
概论有机烷烃气碳同位素系列倒转的成因问题	131
各类烷烃气的鉴别	137
各类天然气的成因鉴别	147
五大连池地幔成因的天然气	156
中国生物气中烷烃组分的碳同位素特征及其鉴别标志	160
天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别	169
中国含油气盆地有机烷烃气碳同位素特征	210
利用轻烃鉴别煤成气和油型气	219
中国一些地区温泉中天然气的地球化学特征及碳、氢同位素组成	226
中亚巨型气聚集带东部煤成气的碳同位素特征	235
中国主要含油气盆地天然气的 C_{5-8} 轻烃单体系列碳同位素研究	242

中亚煤成气聚集域东部煤成气的地球化学特征	245
中国煤成气的地球化学进展梗概	251
渤海湾盆地和鄂尔多斯盆地氦同位素组成特征及其对含气性的意义	258
长庆气田奥陶系风化壳气藏气源研究回顾	264
中国碳酸盐岩大型气田的气源(摘要)	274
四川盆地天然气的碳同位素特征	277
中国有机烷烃气碳同位素系列倒转的成因	285
鄂尔多斯盆地大气田的烷烃气碳同位素组成特征及其气源对比	293
中国储量千亿立方米以上大气田天然气的地球化学特征	307
鄂尔多斯盆地氦同位素的特征	320
威远气田的气源以有机成因气为主——与张虎权等同志再商榷	327
塔里木盆地和准噶尔盆地烷烃气碳同位素类型及其意义	332
无机成因和有机成因烷烃气的鉴别	345
四川盆地须家河组煤系烷烃气碳同位素特征及气源对比意义	363
四川盆地黄龙组烷烃气碳同位素倒转成因的探讨	376
天然气中烷烃气碳同位素研究的意义	387
准噶尔盆地南缘泥火山天然气的地球化学特征	395
四川盆地元坝和通南巴地区须家河组致密砂岩气藏气源探讨——兼答印峰等	411
中国致密砂岩大气田的稳定碳氢同位素组成特征	420

程海天然气的成因^{*}

云南省程海地区气苗数目多，分布较广，延续时间久，气量也较大，关于它的成因曾有不同认识。为了探讨程海天然气的成因及其远景，1981年3月，我们对程海一些气苗进行了调查、取样，并向永胜县水利局询查了程海的有关问题。

一、程海概况

程海位于云南省永胜县西南约7km，为呈南北延伸的淡水湖，面积约79km²。由于年蒸发量(2000mm)大于年降水量(平均700mm)，径流不能补偿，湖盆地面积和水体积逐年减少。从第四系沉积物分布状况分析，程海原有水域的面积颇大，其北联永胜县西北侧的金官盆地，南联期纳一带的大平坝，构成南北向的狭长湖盆。据云贵石油勘探处1969年的调查：“从湖岸石灰岩的溶蚀阶地判断，近数十年来湖水已下降约40m。”看来，程海已经老化。

程海外围主要出露上古生界和中生界，见图1。湖盆东缓西陡，东岸有较开阔的第四系分布，西岸主要是大片上二叠统玄武岩陡峭的山崖。从东岸青草湾向西岸，湖底存在一个北东东向3m差的陡坎(图2)，陡坎的南湖底主要分布淤泥；其北湖底主要分布砂子，程海最深36.9m处在此。程海位于近南北向程海大断裂的北部，据地震资料，发现大小断层35条，由此可见，程海是一个断层湖。

因受大断裂的控制，程海两侧地质条件明显不同。西侧自古生代至三叠纪以浅海-滨海相沉积建造为主，但二叠纪有大规模海底基性岩浆喷发，以玄武岩为主，并有凝灰岩、安山岩流等，最厚达2800m，占该区整个沉积建造总厚1/3以上。燕山期有酸-碱性侵入岩，喜马拉雅期又有基性岩喷发。因此，大断裂西侧各地层生油气条件较差或受到破坏；东侧属楚雄盆地的一部分，晚三叠世至晚白垩世陆相地层发育，总厚达6000~7000m，其边缘出露上古生界。白垩系和侏罗系均为紫红色砂、泥岩，不具生油条件，而上三叠统的一平浪群或祥云煤系是一套厚达近1700m的灰绿色泥、页岩、砂岩，夹有碳质页岩、煤层和煤线，具有生油气能力。在程海东面的大厂西南经取煤样作碳同位素分析， $\delta^{13}\text{C}$ 为-20.8‰(文中煤、石灰岩、气样的碳同位素分析成果是由四川石油管理局地质勘探开发研究院以周口店灰岩标准测定，其与PDB标准相差约十万分之一，故可认为两者趋近相等)。阳新统浅灰、灰色块状灰岩夹生物灰岩和鲕状灰岩被认为是有生油气能力的。祥云县城南小山阳新统灰岩碳的同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 为6.8‰。此外，在程海北部金官盆地石炭系灰岩裂缝中有两处气苗不能点燃；在泥盆系顶部有深灰色、黑色的薄层状泥灰岩夹有黑色油页

^{*} 原载于《天然气工业》，1983，第3卷，第2期，作者还有戚厚发、黄自林。

岩,说明石炭系和泥盆系也可能生油。

据程海东南沿岸6口浅井资料,其地腹存在上第三系,厚约284~791m,但程海外围未普遍见到,而第四系普遍存在,说明程海是从晚第三纪至第四纪连续发育的湖盆。程1、3井还存在于下第三系,说明程海在早第三纪已处于幼稚期。

程海地区第四系主要由砾石层、砂层与少量淤泥组成,其颜色以紫红、灰绿色为主。有关单位曾在程海东岸见到较多含植物残体的第四系沉积。

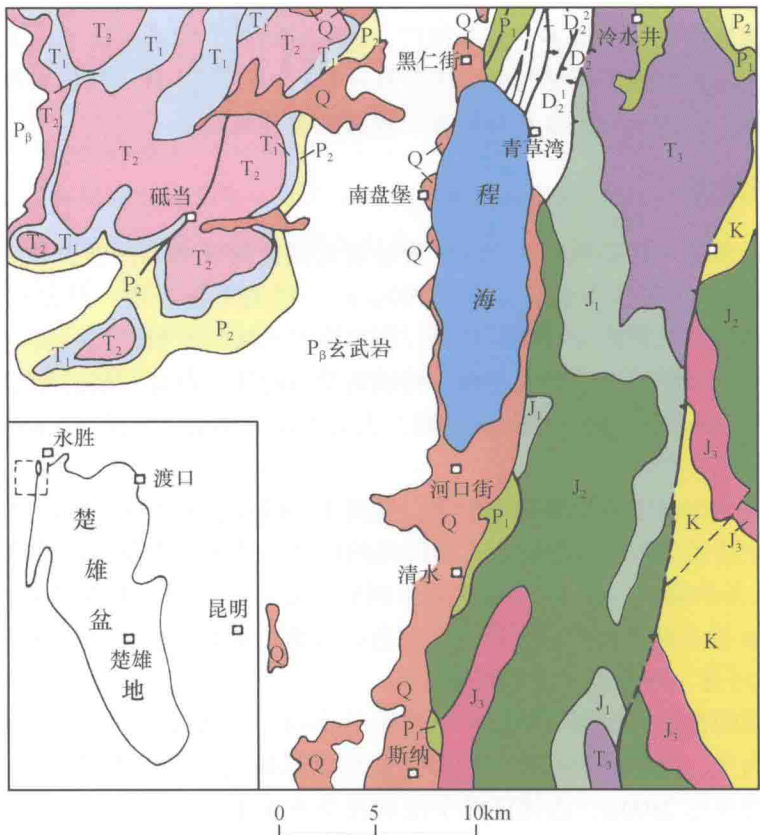


图1 程海的区域位置及其外围地质图

程海地区分布的第三系(主要是上第三系)可以程3井为代表。该井各段多为层状泥岩及含泥砂岩,成岩性差,钻井中造浆力极强。

程1井在第四系和第三系中有气显示。完钻后替清水井涌,火焰最高达5m。在井下垮塌严重和井口漏气情况下,用垫圈流量计测试产气9~106m³/d(未稳定)。据录井及测井的资料分析结果,产气井段主要为121.99~343m和525~735.7m。气的成分中CH₄为97.01%,N₂为2.56%,CO₂+H₂S为0.22%(体积)。

程2井和程3井在钻进湖盆基底的阳新统灰岩古岩溶风化壳均产热水。程2井在井深290.42~309m,水温为57℃,日产水量为2223m³,含有微量气体,H₂S味甚浓,点不燃,气体成分CH₄为18.98%,N₂为78.27%,CO₂+H₂S为2.64%,H₂为0.11%(体积)。程3井在井深644.6m测定水温为56℃,日产水量为857.5m³,含极少量溶解气,其成分

CH_4 为 19.64%, N_2 为 78.62%, $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}$ 为 1.19%, H_2 为 0.35% (体积)。以上分析说明两口井的热水和溶解气是同源的。

二、气苗广泛

1969 年云贵石油勘探处曾对程海地区的大量气苗进行详细调查, 结合这次调查看, 程海气苗具有下述几个特点。

(1) 数量多、分布广 (图 2)。既分布在湖水中, 也分布在陆地上, 但大的气苗在湖中央和东部。

(2) 可燃性。据调查试验, 大小气苗均可点燃, 为以甲烷占绝对优势的干气 (表 1)。

(3) 大气苗稳定、出气持久, 分布具有一定的方向性 (图 2)。我们粗略地统计了 8 (II)、I、III、10 号 4 个气苗 (表 2)。它们一天共能出气 298.6m^3 , 年累计出气量 10.9万 m^3 。访问当地老乡, 气苗长达 100 年历史。14 号气苗位于程海南端湖中心, 是目前程海最大的气苗, 分布面积约为 10 号气苗的 38 倍, 若以 10 号气苗单位时间单位面积出气系数计算 (实际上应当大), 日出气量为 6737m^3 , 年出气量约 246万 m^3 , 按 100 年累计, 已出气 2.46亿 m^3 。

三、程海天然气的成因及其勘探利用

在探讨程海天然气成因或来源时, 笔者认为气苗的以下特征是很有意义的。

(1) I、II、III 号气苗的气 $\delta^{13}\text{C}$ 区间值为 $-62.9\text{‰} \sim -68.7\text{‰}$ (由于气成分中不存在重烃气, 故这里的 $\delta^{13}\text{C}$ 实际上就是 $\delta^{13}\text{C}$)。这些气苗的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与洱海第四系生物成因的天然气 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -67‰ ^[1] 相似。据 D. D. 赖斯等对世界大量生物成因天然气统计, 认为生物成因气的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 在 $-55\text{‰} \sim -75\text{‰}$ 区间内^[3], 但 B. Ф. 拉宾则认为, $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 $-65\text{‰} \sim -75\text{‰}$ 才是生物成因气, 而 $\delta^{13}\text{C}_1$ 在 $-55\text{‰} \sim -64\text{‰}$ 区间内的气是早期深成作用或早期热成熟成因的气^[2]。无论用 D. D. 赖斯等或 B. Ф. 拉宾划分生物成因气的 $\delta^{13}\text{C}$ 标准衡量都可认为程海天然气主要具有生物成因气的性质。

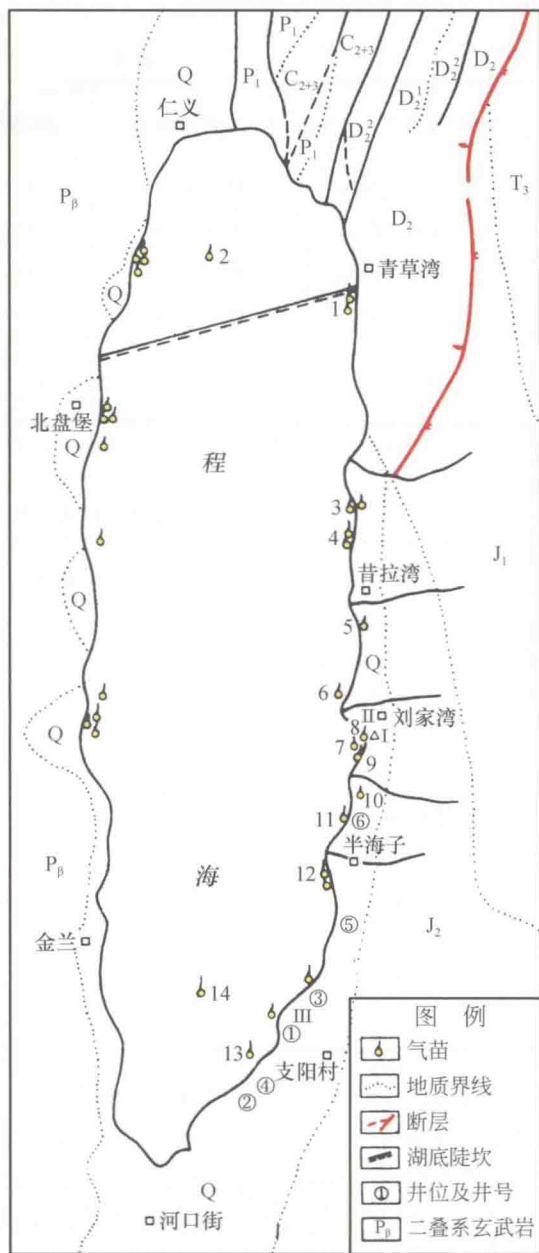


图 2 程海气苗分布图

(2) 程海气苗的成分仅有甲烷，没有重烃气（表2），是生物成因气的另一标志。如吉林红岗明水组浅气层、上海川沙县和浙江省余杭县九堡长江式浅气层和柴达木盆地第四系七个泉组气藏的生物成因气^[1]，都具有甲烷占绝大部分，而重烃气极微或没有的特征。

表1 程海一些气苗成分分析表

取样地点	取样日期	分析日期	气体含量/%，体积		
			甲烷	氮	氢
刘家湾西南约300m	1978.5.28	1978.9.19	94.33	5.67	
耐石岗西南约180m	1978.5.28	1978.9.18	90.53	0	
半海子西南约100m	1978.5.28	1978.9.19	93.98	6.02	微
团山南西约800m	1978.5.28	1978.9.18	97.45	2.53	微
团山北北西约500m	1978.5.28	1978.9.16	98.05	1.95	微
程1井井口	1978.5.19	1978.9.16	99.46	0.54	微

注：本表由四川石油管理局地质勘探开发研究院试验室提供。

表2 程海一些气苗出气量情况表

项目 \ 气苗号	8号（Ⅱ号）		10号	I号	Ⅲ号
取样时间（年代）	1969	1981	1969	1981	1981
取气样时间与气量/mL	3min	75s	1min	100s	30s
	3000	700	3000	700	550
取样漏斗直径/cm	10	15	10	15	15
单位时间单位面积出气量/[mL/（cm ² /min）]	12.73	3.17	31.19	2.37	6.24
气苗总出气面积/cm ²	2120.6	2000	3927	706.9	8000
每天出气量/m ³	38.87	9.13	176.38	2.41	71.88
每年出气量/m ³	14187.55	3332.45	64378.70	879.65	26236.20
δ ¹³ C/‰	/	-62.9	/	-66.2	-68.7

过去，一些同志根据程海大气苗分布具有一定方向性，即沿程海断裂带分布、出气时间长、气量大、出气口位置相当稳定与钻井中揭露的第四系、第三系缺乏生油气岩等现象，认为程海气苗可能通过断裂来自地腹老地层，甚至可能源于地壳深处的无机成因气。但综上所述：①气的碳同位素值具生物成因特征，且与上三叠统煤及下二叠统灰岩的碳同位素的同源对比性差，亦不具无机成因气特点；②气苗成分（表1）和程1井第四系和第三系中气的成分相似，又具有可燃性，而和程2井、程3井阳新统石灰岩热水中不可燃的（金官盆地石炭系灰岩的气苗亦不能燃）溶解气成分完全不同（气苗气以甲烷占绝对优势、而热水溶解气则以氮为主），都说明程海气苗的气源不可能来自下伏前新生代的老地层或无机成因。尽管从钻井资料看，似乎第四系和第三系不具生油条件，但必须指出这些钻井仅集中于程海的东南边缘部分，不代表湖盆的现在与地史上沉积（拗陷）中心（从湖盆外断裂展布特征及其延伸趋势、东岸与西岸地貌结构、东岸陆地逐年扩大等情况

分析, 沉积中心应处于目前湖盆中轴线一带) 最好生油带情况。1969 年云贵石油勘探处根据昔拉湾第四系剖面下部出现 10 多层腐殖层, 并向湖中加厚、在东岸尖灭, 尖灭线以东发现气苗等情况, 指出第四系沉积能生成天然气。笔者认为程海第四系腐殖层 (包括第三系, 如程 3 井的第一、二段含极少碳质碎片泥岩) 向湖中油气条件变好, 是因为控制湖盆发育与沉积 (拗陷) 中心的断裂主要在现代湖盆轴线附近通过所造成。好的生油气地带受断裂控制, 是我国东部断陷 (箕状) 盆地重要特点, 当然程海也不例外, 也可能是程海大气苗分布具有一定方向性原因。从程 3 井第三系第一、二段含碳质碎片迹象, 和云南第三纪沉积盆地普遍发育含煤建造特征^[4], 推测向湖盆中腐殖型有机物丰度增大是完全可能的。由此可见, 程海地区沉积中心一带新生代地层是生物成因气的母岩。

程海地区的气苗多、分布广、出气时间长、出气量大, 说明它气源较丰富, 不能因 6 口浅探井钻在不利相带而作出定论。据程海地区地质条件, 寻找较大的气田可能性甚小。但因地制宜加以勘探, 寻找一些就近利用、有一定经济效益的小气藏还是可能的。尤应注意在泥质岩发育的有利相带地层中找透镜体气藏, 特别在东岸滨湖地带、湖上与湖盆南延至期纳一带陆上。这种生物成因气藏在我国长江式浅气层中和美国北部大平原都有发现。

参 考 文 献

- [1] 戚厚发, 戴金星. 浅谈我国生物成因的天然气. 天然气工业, 1982, (2)
- [2] Раабен В. Ф. Размещение Нефти и газа в Регионах Мира. Москва: Наука, 1978
- [3] Rice D D, *et al.* Generation accumulation and resource potential of biogenic gas. AAPG, 1981, 65 (1)
- [4] 胡友恒. 云南第三纪含煤盆地沉积特征及成因类型划分. 煤田地质与勘探, 1980, (1)

四川盆地阳新统气藏的气源主要是煤成气*

关于阳新统气藏中天然气的成因与来源，迄今主要有两种意见：一种认为天然气主要是由上覆层龙潭组煤系的煤成气运移来的^[1~3]；另一种认为是阳新统中腐泥型有机质生成石油后，又经过热作用裂解成为干气的。黄籍中等所著“四川盆地阳新统天然气的成因”一文（载于《石油勘探与开发》，1982年，第1期）（下简称“黄文”）^[4]，是后一种观点的代表。

“黄文”较系统地研究、总结了四川盆地阳新统各项有关生油的地球化学指标，从而得出阳新统一些层段是生油层，这无疑是有益的、正确的。但“黄文”认为阳新统气藏的气源是该统的油经裂解成为干气的观点却值得商榷。

从以下地质事实，可认为四川盆地阳新统气藏的天然气主要是龙潭组的煤成气，少部分才是阳新统腐泥型有机物生成油后又经裂解形成的干气。

一、阳新统碳酸盐岩中气藏的硫化氢含量特征具有煤成气为主的性质

四川盆地在震旦系、二叠系（阳新统和长兴灰岩）与三叠系（飞仙关组、嘉陵江组和雷口坡组）碳酸盐岩中都发现了气藏。其中在碳酸盐岩为储层并伴有硫酸盐沉积组合的嘉陵江组（主要是 T_1J^5 ）和雷口坡组的气藏中， H_2S 含量最高，一般在 3% ~ 10%（体积），这种气藏中 H_2S 主要成因是硫酸盐经有机物作用还原的产物。震旦系和阳新统中气藏储层也都是碳酸盐岩；气藏所在地层（或上覆地层）都处于过成熟演化阶段（表1）；气藏中的烃气组甲烷占绝对优势，是干气型的，这些都是相似之处。但是如果分析对比震旦系与阳新统气藏中 H_2S 含量，就有明显的差别。在分别统计了阳新统和震旦系气藏中截至 1980 年年底取得 H_2S 含量分析的井次资料，作出图 1。从图 1 一目了然，震旦系气藏中 H_2S 含量一般是在 0.9% ~ 1.5%（体积），个别高达 2.7% ~ 3.0%，少数为 0.5% ~ 0.9%，

表 1 四川盆地震旦系和阳新统气藏所在地层热成熟程度表

气藏	井号	层位	井深/m	样品名称	$R_{max}^o/\%$
震旦系气藏	威基井	S	1477 ~ 1498.96	白云岩（岩样）	3.21
	威 28 井	Є		碳质页岩（岩样）	3.136
	威 64 井	Z_4^2	2865 ~ 2875	白云岩晶洞中碳沥青（干酪根样）	>4.64
	威 12 井	Z_4	2797.75 ~ 2820 2830 ~ 2851	变质沥青 ^①	

* 原载于《石油勘探与开发》，1983，第4期。

续表

气藏	井号	层位	井深/m	样品名称	$R_{\max}^o/\%$
阳新统气藏	张2井	P ₂	4000~4020	煤	1.975
		P ₁ ¹	4455	煤	2.10
	鹿7井	P ₂	2905~2906	煤	1.970
	付深1井	P ₂	2182	煤	1.829
	坝23井	P ₂	3010~3049	煤	2.109
	女基井	P ₂		碳质页岩夹煤	2.748
	纳16井	P ₁₋₂ ³	2593.51~2598.66	白云岩(干酪根样)	2.084
	相18井	P ₁₋₂ ³	1958~1960	石灰岩(干酪根样)	2.23
	潭1井	P ₁₋₁ ³	4143~4179	石灰岩(干酪根样)	2.12
	卧49井	P ₁ ¹	4087.65~4094.98	泥岩(干酪根样)	2.27

注：本表除①资料外，均据丰国秀内部资料（干酪根反射率在四川石油地质中的初步应用，1980）。

这种 H₂S 成因，主要是由腐泥型有机物形成的原油和 I 型干酪根在裂解成为干气过程中的副产物。由石油和凝析油过热气化形成的气体成分是：4CO₂、46CH₄、N₂、H₂S 和痕量氢^[5]，由此组合气体分子式换算可得过热形成气组合中 H₂S 含量约为 1.9%（体积），与震旦系气藏中 H₂S 含量值接近。B. P. 蒂索等也曾指出原油与（I 型）干酪根裂解能生成少量 H₂S^[6]。但由于在此情况下硫来源有限，不像碳酸盐岩和硫酸盐岩组合的嘉陵江组上部、雷口坡组中的气藏有丰富 S 的来源，而形成 H₂S 含量比原油与 I 型干酪根裂解的高得多。

“黄文”指出：“阳新统的天然气不是外源的煤成气，而是阳新统本身的油源岩（即 I 型干酪根的——笔者）的油热解成的干气”。若事实真是如此，那么阳新统气藏中 H₂S 含量值也应与震旦系气藏中大致相似。但事实不是这样，阳新统气藏中 90% 多井次的 H₂S 含量在 0~0.25%（其中绝大部分含量在 0~0.05%），与震旦系气藏中 H₂S 含量差别甚大（图 1），这说明阳新统气藏的气源绝大部分不是阳新统本身油源岩产物，主要是通过东吴运动形成的古岩溶洞缝由上覆龙潭组煤系成煤作用中生成的煤成气运移而来

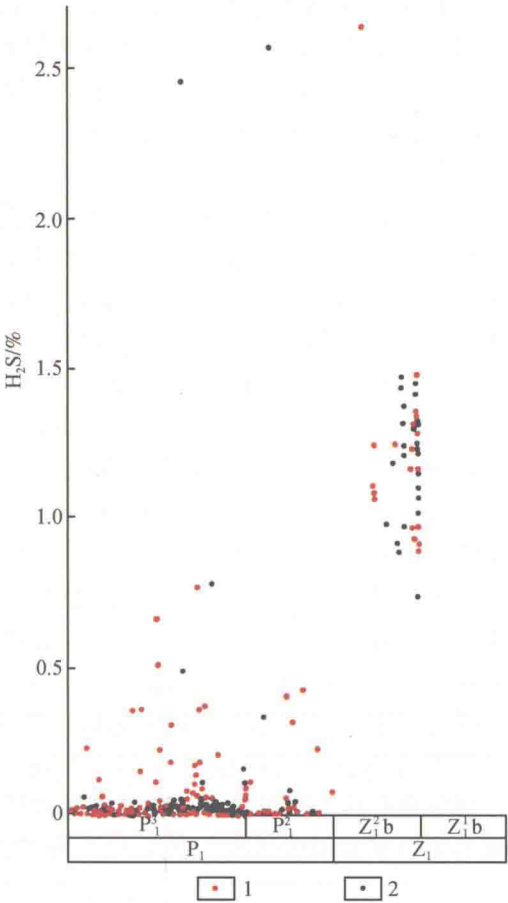


图1 四川盆地震旦系和阳新统气藏中硫化氢含量对比图

1. 同层位一次测定值；2. 同层位几次测定中最大值

的,因为煤成气一般 H_2S 含量极低。从 O. A. 拉德钦科等在研究了成煤作用各阶段中析出的挥发物含量成果图(图2)可见^[5],除褐煤早期阶段和气煤阶段外,成煤作用其他阶段生成的煤成气中 H_2S 含量是极低的。目前发现四川盆地阳新统气藏区龙潭组煤层煤种都比气煤阶段高(表1),因此,阳新统气藏中 H_2S 一般为 $0 \sim 0.25\%$,具有煤成气的特征。图1中阳新统气藏中 H_2S 含量个别点高达 2.55% (仅1个点),似乎具有油裂解气副产物的特征,此外,还有少部分 H_2S 含量点在 $0.3\% \sim 0.8\%$,这可能是煤成气和油裂解气混合配置的结果。由阳新统气藏中 H_2S 含量大小不同和井次所占比例对比综合分析,可以说明阳新统气藏的气源主要是煤成气^[6](从表1可知,这里大部分龙潭组煤层属贫煤或更高煤种,处于煤成气后干气期,故产干气),小部分才是阳新统油源岩的油裂解成的干气。

二、龙潭组煤系地层压力高阳新统地层压力低而有利于煤成气向阳新统灰岩运移

中梁山煤矿就是一例。该矿位于华蓥山褶皱带南端一个线型梳状局部构造上,断层裂缝发育,构造轴部已出露龙潭组上部地层。煤系厚度为 $105 \sim 130\text{m}$,共有煤层10层($\text{K}_1 - \text{K}_{10}$),最下一层 K_{10} 煤层距阳新统茅口灰岩仅为 $3 \sim 4\text{m}$ 厚的页岩所隔,含煤系数为 $7\% \sim 9\%$,有丰富煤成气母岩。它是四川盆地以至我国著名的超级瓦斯煤矿,瓦斯含量与涌出量分别为 $13.2\text{m}^3/\text{t}$ 和 $35 \sim 56\text{m}^3/(\text{t} \cdot \text{d})$ 。这里在采煤过程中多次发生煤与瓦斯的突出,如1959年2月24日 K_{10} 煤层突出煤 600t ,瓦斯 11.6万 m^3 ,气浪穿过 2580m 长的坑道冲出洞口把树干折断。但在煤系上覆长兴灰岩和下伏茅口灰岩中亦见众多气显示,尤以后者为甚。在茅口灰岩溶洞发育处普遍见到气显示,甚至形成线型古岩溶风化壳气藏^[7];1960年8月底在南井+390m水平北巷口大巷掘进接近一号溶洞处,发现岩石变软,马牙状方解石增多,有气涌出。9月4日放炮炸开了一号溶洞后,喷出大量天然气,数米外可将人吹倒,两小时后测得气量 $63.6\text{万 m}^3/\text{d}$,之后迅速递减,至9月18日产气量降为 $3\text{万 m}^3/\text{d}$,迄1965年6月止仍产气 $0.1\text{万 m}^3/\text{d}$ 。之后施工证实其为一个直径 $1 \sim 2\text{m}$ 倾斜大洞(或大缝),向上延伸 7m ,向下延伸很深^①,经测算其溶洞体积为 12000m^3 ,涌出和抽出煤成气为 6000万 m^3 ^②。与大洞毗连的小缝小溶洞和溶孔的斑点有气徐徐涌出、缓缓外冒。由主溶洞与小溶洞、小缝、溶孔的组合配置、主溶洞产状与水平巷道之间关系、主溶洞的规模分析,一号溶洞是个典型的发育于茅口灰岩中线型古岩溶风化壳,是东吴运动的产物。

中梁山煤矿煤中含大量瓦斯(达 25亿 m^3 以上^[8])和突出大量天然气,无可争辩是成煤作用产物。那么茅口灰岩中主要储存于溶洞中的天然气是自生自储,或是有其他来源,有不同的意见。但以下地质事实对解决茅口灰岩中气源颇有帮助:①中梁山煤矿测定推算茅口灰岩实际地层压力只有 $5.5\text{kg}/\text{cm}^2$,远低于其折算水柱压力 $26\text{kg}/\text{cm}^2$,而龙潭组煤层在与其相应的海拔(280m)地层压力为 $25 \sim 28\text{kg}/\text{cm}^2$;在海拔 390m 为 $15 \sim 16\text{kg}/\text{cm}^2$ ^③。由此可见,煤层地层压力明显高于茅口灰岩的地层压力,为由压力高的煤层里的煤成气向地层压力低的茅口灰岩运移创造了条件。②龙潭组煤系底部茅口灰岩中虽溶洞、裂隙甚多,但

① 四川石油管理局,1966,中梁山煤矿坑道缝洞洞调查研究初步总结。

② 刘祚友,1982,重庆中梁山煤矿瓦斯赋存规律。

③ 段仲雄等,1981,晋、冀、京、津石炭-二叠系煤成气藏的探讨。

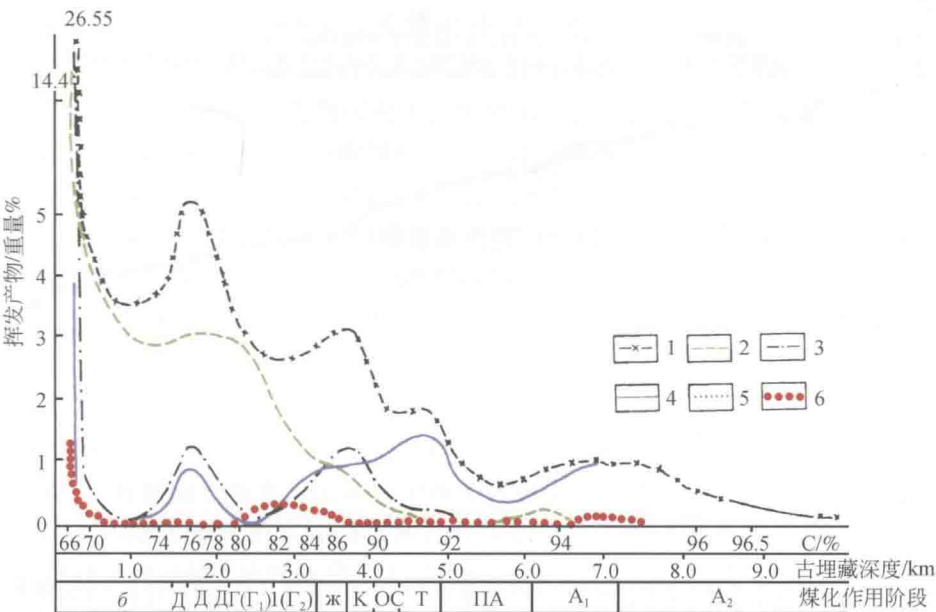


图2 在煤化作用各阶段中析出挥发物含量占泥煤阶段末有机物百分比 (C=58.87%)
(据 O. A. Радченко, 1975)

1. 煤化作用挥发物总量; 2. CO₂; 3. H₂O; 4. CH₄; 5. NH₃; 6. H₂S

据中梁山煤矿生产统计资料表明，溶洞、裂隙瓦斯涌出量仅占矿井瓦斯涌出量的约 20%^① 由此数量对比可见，溶洞与裂隙中的气具有次生性。

三、东吴期古岩溶作用降低了阳新统实际生油能力，为龙潭组煤成气提供了良好的运移和聚集空间

东吴运动使四川盆地阳新统沉积作用停止，并上升发生古岩溶作用，而被大量的钻井发现许多规模不等、距阳新统顶面深度不一的放空点所证明（图 3、图 4）。一些溶洞或溶斗规模大，如长 8 井钻入阳新统灰岩 21m 放空 4.88m；纳 64 井钻入阳三³ 层（茅口组二段）6.5m 发生恶性井漏，经 7 个月 10 天堵漏，用水泥 148.6t、钻井液 506m³、清水 1996.09m³、石子及泥球 2775kg 和锯木粉 6000kg 等堵漏不成功，被迫完井。此漏层与之相距 1.1km 之纳 21 井，采气已枯竭之阳三²A 产层（初产气 135.56 万 m³/d）相连通，在纵向层位上此漏、产两层相距 49m，它明显是一组延伸远的大溶洞层；洞 7 井在距阳新统顶面 50m 的阳三²A 层和 69m 的阳三²B 层中发现有龙潭组煤系充填。宋文海等指出东吴期古岩溶作用在南充至泸州一带形成一个受岩溶最强烈的“中央岩溶高地”，在此早期张性节理发育，古地下潜水面一般大于 200m，并在局部地区形成地下潜水面深于 300m 的“岩溶漏斗”^②。川南地区勘探证明：在阳新统顶侵蚀面以下 80m 范围内岩溶最发育（即浅层岩溶带）。由此可见，东吴期形成的溶洞、岩溶漏斗、溶道和溶孔规模相当大、相当深（如塘 12 井距阳新统顶约 260m 处放空 4.7m 左右）、分布相当广，使阳新统灰岩“千疮百孔”。溶

① 刘祚友，1982，重庆中梁山煤矿瓦斯赋存规律。
② 宋文海等，1979，四川盆地阳新统沉积相及其含油气条件研究报告。