

中国矿业大学 (北京)
研究生教育学术论坛
论文集
(2008)

Lunwenji

中国矿业大学研究生院 编

煤炭工业出版社

中国矿业大学（北京）
研究生教育学术论坛

论 文 集

（2008）

中国矿业大学研究生院 编

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

中国矿业大学 (北京) 研究生教育学术论坛论文集/中国矿业大学研究生院编. —北京: 煤炭工业出版社, 2009

ISBN 978 - 7 - 5020 - 3544 - 0

I. 中… II. 中… III. ①自然科学 - 文集②社会科学 - 文集 IV. Z427.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 069102 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
北京市联华印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*
开本 $787\text{mm} \times 1092\text{mm}^{1/16}$ 印张 $29\frac{1}{4}$
字数 709 千字 印数 1—1,000
2009 年 6 月第 1 版 2009 年 6 月第 1 次印刷
社内编号 6354 定价 78.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

前 言

中国矿业大学的前身是创办于1909年的焦作路矿学堂,至今已发展成为一所具有矿业特色,以工科为主,理、工、文、管、法、经相结合的全国重点大学。早在20世纪50年代初期,学校就开展了研究生教育,至“文革”前已毕业137名研究生,1978年我校获准在北京成立研究生部,正式恢复研究生教育。我校是首批获得博士学位授予权的高校之一,2003年正式获准建立研究生院,现在拥有50个博士学位授权点,96个硕士学位授权点,10个博士后科研流动站,截至2008年底中国矿业大学(北京)共授予1 258人博士学位,5 675人硕士学位,很多优秀研究生已成长为国家科研、教育、企业及行政管理等行业的栋梁。

近年来,我校积极构建开放式研究生教育体系,深入开展研究生教育“创新工程”建设,坚持以创新为灵魂,以质量为生命,深入开展研究生培养机制改革,支持与鼓励研究生参与学校的各层次科研项目,在导师指导下开展高水平的科学研究,培养质量不断提高。研究生已成为我校科研的一支重要力量,很多研究生在校期间就取得了创新性成果,其中12篇博士学位论文获全国百篇优秀博士学位论文,2人被评为全国做出突出贡献的工程硕士,有多篇论文被SCI、EI、ISTP等检索。

为配合学校恢复研究生教育30周年庆祝活动,我校研究生院举办了“研究生教育学术论坛”,活动期间邀请两院院士及国内外知名学者做学术报告及举办研讨会17场,在全体在校研究生中征集学术论文437篇,在研究生导师及教育管理人员中征集研究生教育管理论文23篇,经各专业学术委员会评审和研究生院审定,共评出研究生论文一等奖55篇,优秀研究生教育管理论文17篇,现集结成册,以利于学术交流,推动研究生培养质量的进一步提高,并为学校百年校庆献礼!

中国矿业大学研究生院

2009年2月

目 录

一等奖论文

济阳坳陷上古生界煤系烃源岩生烃性质的研究	吉 雨 李 森 王 杰(3)
Shuey 和 Verm - Hiltermann AVO 反演方法比较	张 辉 李巧灵 邹冠贵(8)
基于层次分析与模糊概率模型的煤与瓦斯突出危险性评判	曹 涛 周心权 张岱岳 谭国庆(16)
湘中七星街龙潭组沉积相及沉积模式研究	吉丛伟 张超 李志能 邵龙义(22)
似膏体充填料浆管输系统阻力及参数分析	刘士龙 李俊涛 姚峰 栾旭东(29)
急倾斜煤层开采沉陷预计系统的可视化研究	邓伟男 戴华阳 蔡音飞 刘吉波(35)
煤催化热解制备氢气的研究	冉 蓉 舒新前 张 蕾 张 磊 楼科奇(42)
煤系高岭岩基复合硅铝炭黑填充性能研究	王炜芹 杨玉芬 王启宝 盖国胜(47)
重金属铅镉对大豆生长及土壤微生物的影响	 李 勇 黄占斌 王文萍 王诗宇 曹 杨 顾丙磊(54)
超细氧化铝粉体制备方法的试验探究	郭翔宇 舒新前 孙春燕 孙秀君 赵金兰 陈 博(61)
脱硫石膏微观形态特征的研究	罗小红 王栋民 刘晓斌 惠 飞(67)
辽宁中部城市群的产业集聚测度研究	吴爱芝 刘海滨(72)
我国黄金期货价格发现功能的实证研究	王兵亚(79)
一个二维情形的可压流体格子玻尔兹曼模型	陈 锋 许爱国 张广财 李英骏(86)
盾构施工泡沫剂改良土体渗透性试验研究	黄 俐 刘 波 杨丹丹(97)
复合材料静态拉伸实验的研究	谭金彪 周宏伟 严红莲(103)
基于灰度理论对建筑装饰材料污染度集成化预测评价	石 晶 陈金刚 易 成(110)
新旧建筑的共生性	刘志敏(115)
一个超对称 Sawada - Kotera 方程的 Painlevé 可积性	李 莉 张孟霞(119)
分数次 $R-L$ 微分方程多点边值问题解的存在性	靳志同 张宏娟(125)
安全培训在事故预防中的作用	安 宇 李纯贺(132)
地震递推反演预测深部灰岩富水性研究	邹冠贵 彭苏萍 张辉 郝海波 韩毅(139)

辽河东部凹陷驾掌寺-小龙湾地区东营组沉积古

地理	蔡国刚 汪 浩 邵龙义 陈振岩 李晓光 郭立君(148)
煤层厚度稳定程度定量评价研究	魏迎春 曹代勇 邓觉梅(159)
数值模拟技术在丘陵油田三间房油藏剩余油研究中的应用	翟雨阳 刘钦甫 魏小东 朱秀峰(165)
塔巴庙区块上古生界砂岩储层质量主控因素分析	王延斌 朱春俊(171)
基于网络模拟的地铁火灾时期控风有效性研究	王素锋 周心权(178)
我国地面沉降防治现状及对策研究	张开军 武强 张作辰(185)
矿业开发对周边农业生态环境影响的评价模型	
研究	杨淑婷 唐跃刚 吴明远 高原 姜铁明 董永师(194)
煤矿安全生产与经济社会发展水平关系研究	魏书祥 门洪云 潘仁飞 张磊 侯运炳(199)
GPS 信号小波去噪方法及其在 MATLAB 中的实现	袁德宝 崔希民 梁克隆 李春意 胡青峰(205)
新型玻璃钢锚杆结构设计及成型工艺研究	陈 刚 朱岩坤 袁田 刘占春(214)
煤矿矿井水中污染物去除机理和技术研究	邵立南 何绪文 何咏(221)
臭氧与二级出水中典型细菌作用规律初探	张中华 朱晓军 文湘华 朱洪涛 徐东耀(232)
可降解地膜对土壤水温和作物生长效应的影响	刘 敏 黄占斌 杨玉姣 赵晨宇(238)
硅灰石表面复合改性及其填充尼龙 6 性能	
研究	王彩丽 郑水林 刘桂花 王丽晶 高如琴 黄 朋 王兆华(246)
地下水抽排对矿业城市生态环境影响及对策研究	王 鑫 张志龙(254)
国产直径 32 mm PcBN 复合片微观结构研究	刘瑞平 彭凌洲 邓福铭 曾苏民(260)
无线射频识别技术(RFID)在煤矿设备租赁管理中的	
应用	孙保敬 赵四海 骆铁楠 刘兴龙 李海宁(267)
一种基于网站正常访问的恶意 HTTP 请求检测方法	陈文放 王 璞 钱旭(273)
一种煤矿通风系统方案的属性依赖规则的概念格构建	
方法	李晓瑞 钱 旭 钟 锋 余 远 刘 攀(279)
顾客期望价值探测模型研究	谭荔丹 朱 承(285)
基于尾部条件期望的再保险定价研究	陈 宁(292)
城市群经济空间相互作用力研究	刘振灵 柴杨(297)
冲击倾向性煤体裂纹扩展的实验与数值研究	韩志茹 姜耀东 赵毅鑫 王 丽 赵 毅(304)
建筑围护结构换热过程试验研究	曹秀玲 张毅 何满潮(310)
关于三阶谱问题的可积系统及方程族的对合解	陈兰新(317)

异形桁架结构施工技术基础研究	张鹏 高全臣 高树梁(323)
岩体裂隙尺度律及裂隙网络的生成与模拟	桂乐乐 周宏伟 严红莲 杜盛浩 刘艳(329)
杜威的实用主义德育理论及其启示	张春颖 尹 娟(338)
法治理论与法治社会构建	李纪增(342)
翻译研究的文化视角与思考	马 进(346)
基于语义脚本理论的言语幽默的分析	王一竹(352)
新大学英语四级考试对大学英语教学反拨效应的研究	刘莹莹(356)
用社会主义核心价值体系引导大学生思想政治教育	杨海宽(362)

研究生教育管理论文

新形势下培养研究生综合创新素质的对策探讨	高全臣 马靖华(369)
煤炭企业研究生培养的问题与措施	李邦三(375)
矿业类优秀博士学位论文的创新属性及影响因素分析	马新宏(380)
工程硕士教育的实践与思考	岳庆军(387)
从研究生就业角度深思研究生的培养	杨小平(391)
从能力培养谈导师对研究生学位论文质量的作用	于彩虹(397)
博士研究生招生改革的对策与思考	张鸿莹 刘卉忻(402)
研究生自主学习研究型课程教学研究与实践	李德建 武鸿雁 何满潮(406)
知识、技能和素养是研究生综合能力培养的核心	黄占斌(412)
做好公派留学工作的几点思考	朱春俊(415)
加强和改进研究生思想政治教育刍议	邓国军(421)
强化研究生招生录取过程管理的措施和体会	曹代勇 魏迎春 杨淑婷 赵立华(426)
引入 EDA 技术实现电工学的研究型教学	郭惠玲 叶季旺 张丽(430)
对保障硕士论文质量四个环节的思考	李超英(435)
对工程硕士培养阶段增设知识产权课的重要性分析	张鸿莹 安 宇(437)
利用“211”平台开展研究生现代工程分析方法教学	曾 钢 范 迅(441)
研究型大学实施战略管理的理论浅析	赵 莉(445)
附录一 二等奖论文目录	(450)
附录二 优秀奖论文目录	(453)

一等奖论文

济阳坳陷上古生界煤系烃源岩生烃性质的研究

吉 雨 李 森 王 杰

中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院

摘 要 济阳坳陷石炭-二叠系烃源岩主要为煤和暗色泥岩。本文从有机质丰度、有机质类型及成熟度三方面对烃源岩有机地球化学特征作了详细分析。分析结果如下:有机质丰度普遍较高,煤的 TOC 含量在 50% 以上,暗色泥岩 TOC 含量在 0.6%~1.5% 之间;有机质母质类型较差,属以Ⅲ型干酪根为主的气源岩;整个济阳坳陷的石炭-二叠系地层处于成熟—高成熟阶段, R_o 值在 0.6%~1% 的范围内。分析表明,区内石炭-二叠系煤岩总体上为较好—好的烃源岩,暗色泥岩基本上为中等—较好烃源岩,这对正确评价本区石炭-二叠系油气资源具有十分重要的意义。

关键词 石炭-二叠系 烃源岩 有机质丰度

1 引言

华北石炭-二叠系分布广泛而稳定,但从现有的勘探结果看,油气资源(不包括煤层气)主要分布在东部渤海湾盆地及鄂尔多斯盆地。

笔者以济阳坳陷为重点进行解剖,在分析济阳坳陷地质概况的基础上,通过对该区烃源岩有机岩石学特征和有机地球化学特征的分析,重点研究济阳坳陷石炭-二叠系煤系烃源岩的物质组成、有机质丰度和类型、生烃特点及性质;同时动态分析了济阳坳陷石炭-二叠系煤系烃源岩在不同时期构造作用影响下的生烃演化过程,从生烃演化的角度预测了该区有利的煤成烃生成区,为济阳坳陷石炭-二叠系煤成烃的开发与勘探提供科学依据。

2 区域地质概况

济阳坳陷位于渤海湾的西南部,是渤海湾盆地内为埕宁隆起和鲁西隆起所挟持的向西收敛向东撒开的、近东西走向的一个一级负向构造单元,为一典型的“北断南超”箕状断陷盆地。

济阳坳陷由于地处渤海湾盆地、华北板块,在形成过程中受到中国东部多期变化、极不稳定的深大断裂——郯庐断裂的影响,所以,济阳坳陷的形成是复杂而受多种因素影响的^[1]。

3 烃源岩有机岩石学特征

3.1 主要烃源岩及分布

济阳坳陷的石炭-二叠系煤系烃源岩主要分布在太原组、山西组及下石盒子组下部,包括暗色泥岩(含炭质泥岩)、煤层等,其中区内煤系地层残余厚度表现出南北分区性,同时由于受后期构造运动的影响,残余厚度的分布并无一定的规律。残留厚度一般在120~200 m,钻井最厚可达900 m。南部的分布情况为,判参1井和高参1井附近残余地层厚度较大,最厚可达600 m以上,一般残余地层厚度为100~300 m。由于受新生代断裂的影响,北部残余地层厚度分块性表现得更为明显,石炭-二叠系残余厚度并不按现今的构造形态分布,总的来说,车镇凹陷中残余厚度少于沾化凹陷,一般小于200 m,最厚可达641 m,同时还有局部的凹陷区未打穿石炭-二叠系(如大105、车27等)。

炭质泥岩分布则无规律可寻,与暗色泥岩、煤层、地层厚度均无相关性,如曲古2井炭质泥岩厚19.5 m,而泥岩厚91.5 m,煤厚17 m;判参1井炭质泥岩厚6.5 m,而泥岩厚168 m,煤厚29 m。总体来说,炭质泥岩最厚可达133 m(如沾13井厚97 m、大古90井91.5 m、义古40井100 m、埋111井133 m)。

3.2 有机显微组分特征

济阳坳陷石炭-二叠系煤系烃源岩镜质组以均质镜质体和基质镜质体为主,结构镜质体少见,半镜质组以结构半镜质体为主,均质半镜质体次之。济阳坳陷煤以微镜煤为主,惰煤次之。反映了较还原到强还原的成煤环境。

3.3 有机显微组分组成特征

济阳坳陷烃源岩有机质以Ⅲ型的干酪根为主,惠民坳陷为最好的Ⅲ型干酪根,其次为沾化坳陷、东营坳陷。济阳坳陷惠民南坡石炭-二叠系煤岩显微组分组成以镜质组为主,占70%以上。济阳坳陷石炭-二叠系煤岩北部地区腐泥组+壳质组含量大于惠民南坡地区,平均为7.31%,镜质组平均为48.75%,惰质组平均为43.72%,济阳坳陷惠民南坡腐泥组和壳质组含量较济阳坳陷北部偏少,平均为2.81%,但镜质组含量很高,平均达到71.65%,惰质组含量较低为26.94%。

4 烃源岩有机地球化学特征

济阳坳陷石炭-二叠系同渤海湾其他地区基本一致,均为海陆交互相的含煤地层沉积,煤系在沉积、埋藏和演化过程中伴有油气的生成。济阳地区的义133井、曲古1井天然气属煤型气,但至今还没有较大规模的煤型气田发现,而同为渤海湾盆地的华北苏桥气田、大港乌马营构造和中原文留气田均为煤型气或与煤型气有关的气田。济阳坳陷地质背景与之相似,具有形成煤型气的条件。

4.1 烃源岩有机质丰度特征

济阳坳陷石炭-二叠系的主要烃源岩为煤和暗色泥岩。分析表明,其有机质丰度普遍较高,煤的有机碳含量在50%以上,氯仿沥青“A”含量在0.6%以上,总烃在40%以

上, $S_1 + S_2$ 一般大于 60 mg/g 。暗色泥岩有机碳含量主要在 $0.6\% \sim 1.5\%$ 之间, 氯仿沥青“ A ”含量在 0.02% 以上, 平均为 0.028% , 总烃为 $(30 \sim 50) \times 10^{-6}$, $S_1 + S_2$ 在 $0.5 \sim 6 \text{ mg/g}$ 之间 (图 1)。

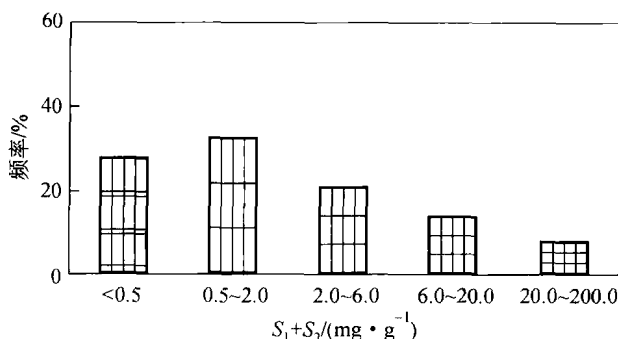


图 1 济阳拗陷含煤地层生烃潜量频率分布图

济阳拗陷煤岩有机碳含量高, 一般大于 50% 。而且, 随着成熟度增高, 煤岩有机碳变化不大。有机碳的这一特性, 限制了利用有机碳进行煤岩生烃潜力评价的有效性。对济阳拗陷实际分析资料整理发现, 当有机碳含量较低时 (TOC 含量小于 40%), 有机碳与生烃潜力呈良好的正相关关系, 但当 TOC 含量大于 40% 时, 有机碳与生烃潜力则没有相关关系 (图 2)。因此不能利用有机碳对煤岩进行评价, 但可利用生烃潜力对煤岩进行评价^[2]。

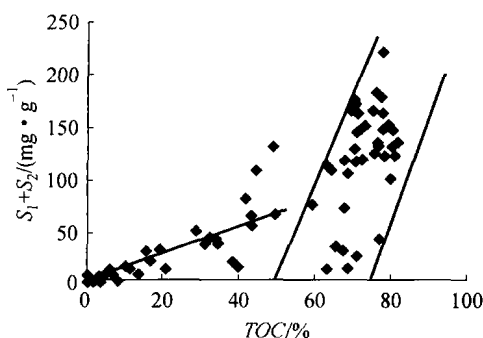


图 2 济阳拗陷生烃潜力与有机碳关系

4.2 烃源岩有机质类型特征

沉积环境决定烃源岩的显微组成。各地区的镜质组含量大部分大于 60% , 惰质组含量小于 30% 。济阳拗陷各个地区的 H/C 原子比分布于 $0.45 \sim 0.9$, 少数大于 1 , O/C 原子比主要分布在 $0.05 \sim 0.14$ 范围内, 主要表现为Ⅲ型有机质的特点, 说明该地区的烃源岩是以Ⅲ型为主的气源岩^[3]。

4.3 烃源岩有机质成熟度特征

经过分析发现, 整个济阳拗陷的石炭-二叠系地层处于成熟—高成熟阶段 (表 1)。

在济阳拗陷北部和南部地区石炭-二叠系地层最低成熟度 R_0 为 0.6% 左右, 一般在 $0.6\% \sim 1\%$ 的范围内。可以看出, 石炭-二叠系含煤地层在一定深度范围内 R_0 值比较稳定, 埋深超过这个范围时, R_0 值会随着埋深增加而增大。造成这种现象的原因可能是因为印支-燕山期前因变质作用已使石炭-二叠系含煤地层成熟度达到现今 3000 m 或 4000 m 深度的成熟度, 后期地层抬升剥蚀, 而后又开始沉降, 但再次沉降未使源岩进一步热演化。现今渤海湾盆地中凸起部位成熟度以及地区中现今石炭-二叠系源岩成熟度较低, 可以认为是其抬升后源岩未继续演化的结果。结合渤海湾盆地其他地区的成熟度, 济阳拗陷印支-燕山期前石炭-二叠系含煤地层成熟度 R_0 可能为 0.6% 左右, 即第一次抬升

时的成熟度 R_0 可能为 0.6% 左右^[4]。

表 1 济阳坳陷石炭-二叠系源岩成熟度

井号	井深/m	层位	$R_0/\%$
大 51	3 890	C-P	0.66
大 51	4 020	C-P	0.71
义古 56	2 310	C-P	0.62
义古 56	2 000	C-P	0.71
桩古 16	3 920	C-P	0.84
桩古 25	3 630	C-P	0.78
孤古 14	3 110	C-P	0.87
判参 1	2 100	C-P	0.88
判参 1	2 700	C-P	1.05
曲古 1	2 900	C-P	0.85
曲古 2	3 400	C-P	1.0

5 烃源岩综合评价

影响烃源岩质量的因素是多方面的、复杂的,特别是济阳地区石炭-二叠系地层经历了多次的构造运动,烃源岩的生烃过程历经多次的生烃和停滞的历史。根据实验提出煤系源岩作为有效气源岩的下限值,也根据对目前成熟度较低(R_0 为 0.52%~0.82%)地区(主要分布在坳陷边缘及坳陷内隆起区)上古生界煤系烃源岩的研究,太原组暗色泥岩的 TOC 含量为 0.1%~2.5%,平均 1.3%,氯仿沥青“A”含量为 0.02%~0.14%,平均为 0.03%, S_1+S_2 一般为 0.69~3.6 mg/g,平均为 1.39 mg/g;太原组煤的氯仿沥青“A”产率一般为 0.07%~0.34%,平均仅 0.22%。山西组暗色泥岩 TOC 含量为 1.2%~5.14%,平均 3.11%,氯仿沥青“A”产率为 0.02%~0.05%,平均为 0.04%, S_1+S_2 一般 0.2~5.02 mg/g,平均 2.4 mg/g;山西组煤的氯仿沥青“A”含量平均仅为 0.16%。还根据有机碳与热解关系求取有机碳边界值,同时考虑到气源岩的标准可以比油源岩低一级别,并参考其他专家标准,提出济阳坳陷煤系源岩评价标准见表 2。在本阶段煤岩主要应用 S_1+S_2 、HI 及生气潜力进行评价,而煤系泥岩和灰岩则主要通过 TOC、 S_1+S_2 、HI 进行评价^[5]。

表 2 济阳坳陷煤系泥岩有机质丰度评价标准^[6]

评价标准	好	较好	中	差	非
有机质丰度					
C/%	>8.0	4.0~8.0	4.0~1.5	1.5~0.6	<0.6
$S_1+S_2/(mg \cdot g^{-1})$ (岩石)	>6.0	3.0~6.0	3.0~1.0	1.0~0.4	<0.4
$H/10^{-6}$	>400	150~400	50~150	<50	
每吨岩石的最大吸附量/L					400

通过本次论文的研究以及依据表 2 所提供的评价标准,我们可以看出:整个济阳坳陷区内地层最低成熟度 R_0 为 0.6% 左右,一般在 0.6%~1% 的范围内。煤的有机碳含量在

50%以上, 氯仿沥青“A”含量在0.6%以上, 总烃在40%以上, $S_1 + S_2$ 一般大于60 mg/g; 暗色泥岩有机碳含量主要在0.6%~1.5%之间, 氯仿沥青“A”含量在0.02%以上, 平均为0.028%, 总烃为 $(30 \sim 50) \times 10^{-6}$, $S_1 + S_2$ 在0.5~6 mg/g之间。有机质的H/C原子比分布于0.45~0.9, O/C原子比主要分布在0.05~0.14范围内, 主要表现为Ⅲ型有机质的特点, 说明该地区的烃源岩是以Ⅲ型为主的气源岩。

6 结论

(1) 整个济阳坳陷的石炭-二叠系地层处于成熟—高成熟阶段。地层最低成熟度 R_0 为0.6%左右, 一般在0.6%~1%的范围内。依据烃源岩的显微组分特征、有机元素特征分析石炭-二叠系煤系烃源岩的类型以Ⅲ型为主, 即腐殖型。

(2) 利用新标准对济阳坳陷石炭-二叠系泥岩、煤岩分别进行了评价, 结果为煤岩总体特征为较好气源岩, 局部达到好的气源岩, 惠民凹陷南坡石炭-二叠系泥岩为较差源岩, 北部泥岩属较差—中等烃源岩。在济阳坳陷车镇地区、惠民坳陷南坡是煤成气勘探的最有利区带。济阳坳陷石炭-二叠系煤系地层生烃能力总体在全国处于中等水平。

参 考 文 献

- [1] 王延斌, 韩德馨. 渤海湾盆地C-P煤中主要有机组分NMR研究. 中国矿业大学学报, 1999, 28 (1)
- [2] 王延斌, 曹代勇. 渤海湾盆地深层烃源岩生烃条件研究. 北京: 地质出版社, 2001. 128~140
- [3] 李荣西, 廖永胜. 济阳坳陷石炭-二叠系热演化与生烃阶段. 地球学报, 2001, 22 (1): 85~90
- [4] 傅家谟, 刘德汉, 盛国英, 等. 煤成烃地球化学. 北京: 科学出版社, 1992. 256~257
- [5] 姜亮. 东海陆架盆地第三系煤系烃源岩生成与聚集. 北京: 石油工业出版社, 2002. 31~40
- [6] 戴金星. 煤成气含义及其划分. 地质论评, 1982, 28 (2)

Shuey 和 Verm - Hiltermann AVO 反演方法比较

张 辉 李巧灵 邹冠贵

中国矿业大学（北京）煤炭资源与安全开采国家重点实验室

摘 要 本文通过对 Shuey 和 Verm - Hiltermann 近似公式的反演算法之间的关系在数学上进行推导证明，建立了三种典型的地质模型来分析两种 AVO 反演算法以及 AVO 交会图分析方法的优缺点。研究结果表明，Shuey 和 Verm - Hiltermann 的两参数 AVO 反演算法在最小二乘法意义下是等价的，在三种典型地质模型下 $P - (P + G)$ 的 AVO 交会图分析方法要优于 $P - G$ 的 AVO 交会图分析方法，可为实际使用提供参考。

关键词 AVO 近似公式 AVO 反演 最小二乘法 交会图分析

1 引言

AVO 技术的核心思想是利用在不同的介质中，反射系数随入射角的变化规律来寻找油气层。因此，必须建立一个具有普遍意义的方程，将反射系数表示成入射角和地层参数的函数。Knott (1899) 和 Zoeppritz (1919) 分别给出了势和位移形式的反射和透射公式。精确的 Zoeppritz 方程满足了以上要求，但其方程组解析解的表达式十分复杂，很难直接分析介质参数对振幅系数的影响。为了明确地表达反射系数与弹性常数的关系，不同的专家利用近似解的方式导出不同的简化 Zoeppritz 方程。近似公式是进行 AVO 反演、AVO 交会图分析、岩性预测和烃类检测的基础。

不同的 AVO 近似公式从不同的侧面描述反射系数随入射角的变化特征，目的是为了突出不同的岩性参数。1961 年 Bortfeld^[1] 第一个给出了物理意义比较明确的反射振幅近似公式，1980 年 Aki - Richard^[2] 第一次给出了能够满足大多数地球物理介质中的近似反射系数，1983 年 Hiltermann^[3] 对 Bortfeld 近似进行了修改，得到了反射振幅的另一近似表达式，1985 年 Shuey^[4] 第一个对这类近似式进行重组，提出一种抛物线形式的表达，用于 AVO 研究，1987 年 Smith 和 Gidlow^[5] 提出了一种加权叠加的近似公式，1989 年 Hiltermann^[6] 为了进一步证实泊松比对反射系数的决定作用，在 Shuey 近似方程的基础上给出了基于 $\Delta\sigma$ 的另一种近似公式，1993 年 Mallick^[7] 在 Aki - Richards 基础上提出了另一种近似公式，1994 年 Fatti^[8] 给出了以相对波阻抗表示的近似方程，1997 年 Goodway^[9] 提出了体现拉梅常数的近似表示式，1997 年 Xu 和 Bancroft^[10] 利用拉梅常数和体积模量等给出了另一近似方程，1999 年 Yanghua Wang^[11] 利用射线参数和慢度给出了另一种近似形式，1999 年 Gray^[12] 将 Aki - Richards 近似表达为拉梅常数的显式形式。

基于不同的近似公式，人们发展了多种反演算法。常被使用的 AVO 反演方法是 Shuey

(1985) 的两参数法 (P 、 G)，其次是 Verm - Hiltermann 的两参数法 (NI 、 PR)，在实际应用中，人们经常利用反演得到的 P 和 G 或者 NI 和 PR ，做 P - G 交会图或 NI - PR 交会图分析，结合正演模型对油气藏进行定性和 (或) 定量评价。从形式上看，Shuey 和 Verm - Hiltermann 的两参数近似公式是不同的，而在油气检测上都有成功的范例。显然，Shuey 和 Verm - Hiltermann 这两种反演方法的比较是一个值得关注的问题。实际上 Verm 和 Hiltermann^[13] 在 1995 年的文章里已经注意了这个问题，但 Verm 和 Hiltermann 仅仅提到，孙鹏远等 (2002)^[14,15] 从定性和定量分析了两种近似公式和 Zoeppritz 方程之间的误差关系，程冰洁等 (2003)^[16] 只讨论了两种近似公式的物理意义及对地震记录的贡献。本文主要对下述两种反演方法进行讨论比较。

2 Shuey 和 Verm - Hiltermann 反演算法比较

2.1 Shuey 和 Verm - Hiltermann 反演方法

基于 Aki - Richards (1980) 近似公式：

$$R_{pp} = \frac{1}{2} \left(1 - 4 \left(\frac{v_s}{v_p} \right)^2 \sin^2 \theta \right) \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\sec^2 \theta}{2} \frac{\Delta v_p}{v_p} - 4 \left(\frac{v_s}{v_p} \right)^2 \sin^2 \theta \frac{\Delta v_s}{v_s} \quad (1)$$

Shuey (1985) 提出了一种 Zoeppritz 近似公式：

$$R_{pp} \approx R_{p0} + \left[A_0 R_{p0} + \frac{\Delta \sigma}{(1 - \sigma)^2} \right] \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta v_p}{v_p} (\tan^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (2)$$

其中

$$R_{p0} \approx \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta v_p}{v_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right], \quad \Delta \sigma = \sigma_2 - \sigma_1, \quad \sigma = \frac{\sigma_2 + \sigma_1}{2},$$

$$A_0 = B - 2(1 + B) \frac{1 - 2\sigma}{1 - \sigma}, \quad B = \frac{\Delta v_p/v_p}{\Delta v_p/v_p + \Delta \rho/\rho}.$$

σ_1 、 σ_2 分别为上下两层介质的泊松比。

该近似方程的假设条件是两边介质的弹性性质的百分比变化 $\Delta v_p/v_p$ ， $\Delta v_s/v_s$ 和 $\Delta \rho/\rho$ 以及其他值很小。

当 $0^\circ < \theta < 30^\circ$ 时，近似有 $\tan \theta \approx \sin \theta$ ，(2) 式变为

$$R_{pp} \approx R_{p0} + \left[A_0 R_{p0} + \frac{\Delta \sigma}{(1 - \sigma)^2} \right] \sin^2 \theta$$

采用简单的记法：

$$R_{pp} \approx P + G \sin^2 \theta \quad (3)$$

其中

$$P \approx R_{p0}$$

$$G \approx \left[A_0 R_{p0} + \frac{\Delta \sigma}{(1 - \sigma)^2} \right]$$

该方程表明，在 $0^\circ < \theta < 30^\circ$ 时，反射系数与 $\sin^2 \theta$ 呈线性关系。基于 (3) 式，我们可以反演出属性 P ， G ，并通过做 P - G 交会图来检测烃类异常。

Hiltermann (1989) 提出了一种 Zoeppritz 近似公式，Verm - Hiltermann (1995) 基于这种近似公式进行反演：

$$R_{pp} \approx NI \cos^2 \theta + PR \sin^2 \theta \quad (4)$$

其中

$$NI \approx R_{p0} = \frac{\rho_2 v_{p2} - \rho_1 v_{p1}}{\rho_2 v_{p2} + \rho_1 v_{p1}}$$

$$PR \approx \frac{\Delta \sigma}{(1 - \sigma)^2}$$

该近似公式的假设条件是: 两边介质的弹性性质的百分比变化 $\Delta v_p/v_p$, $\Delta v_s/v_s$ 和 $\Delta \rho/\rho$ 以及其他值很小, $0^\circ < \theta < 30^\circ$ 。

通过(4)式, 我们可以反演出属性 NI , PR , 并通过做 $NI - PR$ 交会图来检测烃类异常。

2.2 Shuey 和 Verm - Hilterman AVO 反演在最小二乘意义下的比较

实际应用中, 人们通常采用最小二乘法对 Shuey 和 Hilterman 近似公式反演出 P 和 G 及 NI 和 PR 。本文将在最小二乘意义下推导出这些参数, 并对其进行比较(图1)

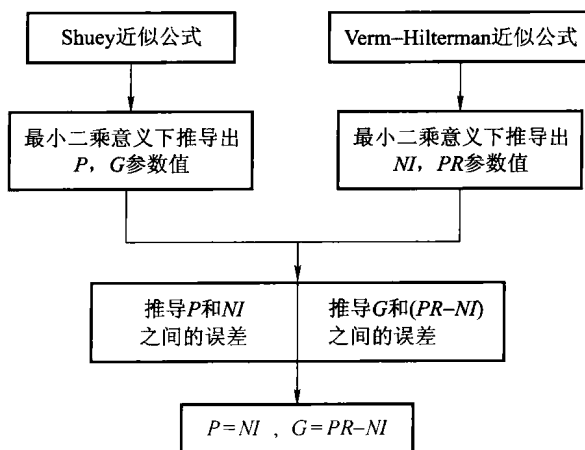


图1 两种近似公式推导对比流程图

根据最小二乘法^[17], 对 Hilterman 近似公式 $R(\theta_i) = NI \cos^2 \theta_i + PR \sin^2 \theta_i$ 进行反演, 影响因变量真实值 $R(\theta_i)$ 的变量有两个: $\cos^2 \theta_i$, $\sin^2 \theta_i$, 我们已知了一组观测值 $(\cos^2 \theta_i, \sin^2 \theta_i; R(\theta_i))$ $i=1, 2, \dots, N$ (在给出了具体的模型下, 这组数据可以由较精确的(1)式给出)。

根据最小二乘法, 要选择这样的 NI , PR 使(5)式达到极小。

$$\sum (R(\theta_i) - R(\theta_i))^2 = \sum [R(\theta_i) - (NI \cos^2 \theta_i + PR \sin^2 \theta_i)]^2 \quad (5)$$

为此将(5)式分别对 NI , PR 求偏导数, 令其等于0, 经化简整理最后可得 NI , PR 必须满足的正规方程组, 求解方程组, 可得

$$NI = \frac{(\sum (\cos^2 \theta_i R(\theta_i)))(\sum (\sin^4 \theta_i)) - (\sum (\sin^2 \theta_i R(\theta_i)))(\sum (\cos^2 \theta_i \sin^2 (\theta_i)))}{(\sum \cos^4 \theta_i)(\sum \sin^4 \theta_i) - (\sum (\cos^2 \theta_i \sin^2 (\theta_i)))^2}$$