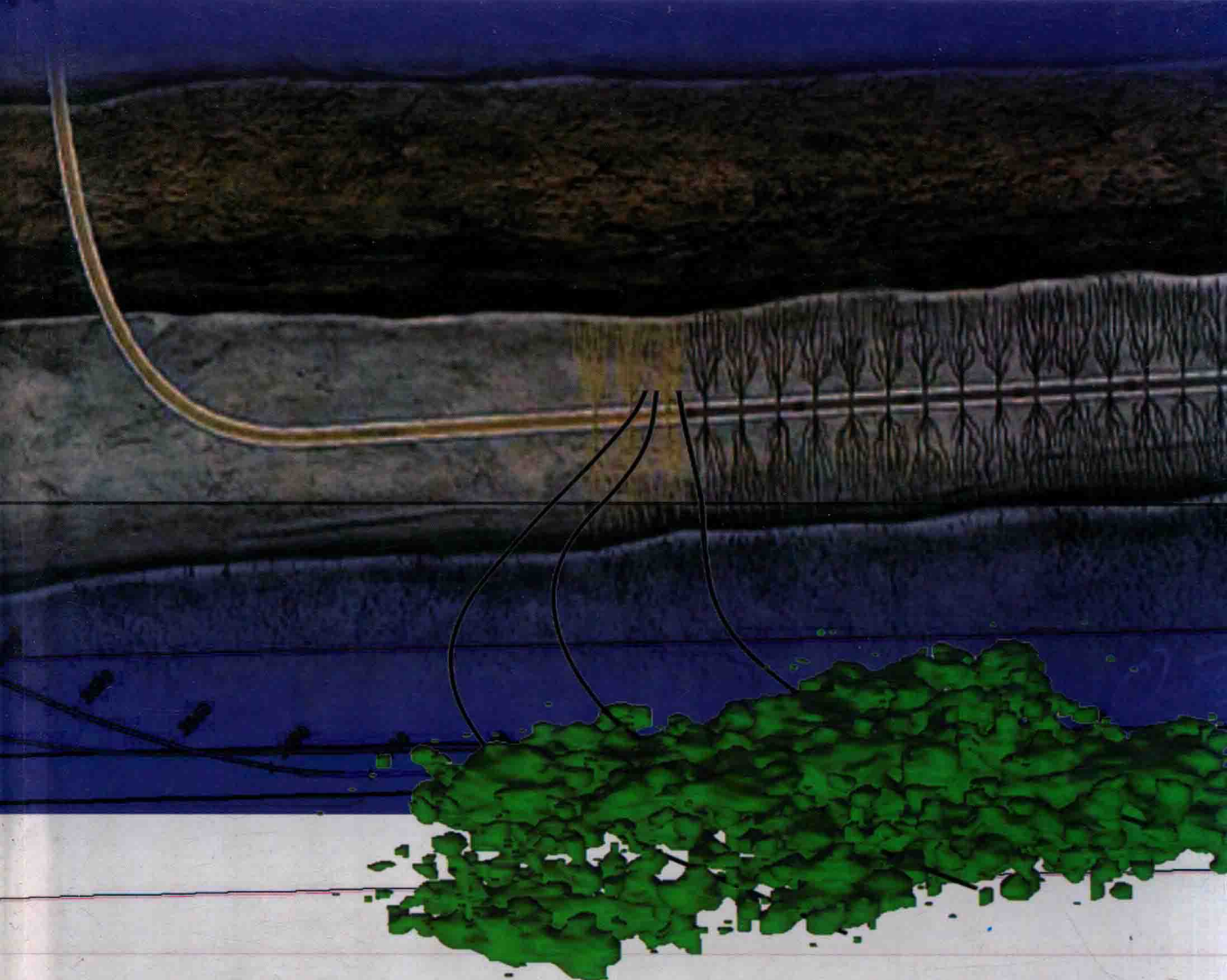




页岩气低成本高效钻完井 基础研究与应用

○ 刘向君 梁利喜 熊 健 著



科学出版社

页岩气低成本高效钻完井 基础研究与应用

刘向君 梁利喜 熊 健 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对页岩气层钻井、完井过程中长水平井段安全钻井以及水平井体积改造等关键核心技术建立和实施过程中所面临的地质及岩石力学共性基础问题,以页岩岩石矿物学特征研究为基础,全面系统深入地揭示页岩气层岩石油水两亲且更亲油的特点、水-岩相互作用过程中页岩水化致裂特征及水-岩相互作用机制,提出水基钻井液钻井过程中,“封堵+抑制”的页岩地层稳定井壁的钻井液性能优化设计思路及方法,并建立适用于该类地层钻井液性能评价的新方法;同时室内实验与数值仿真模拟相结合,对多因素作用下页岩气层水平井缝网形成力学机制进行详细分析。衷心希望本书能够对读者有所帮助,为页岩气层水平井钻井和体积改造提供理论借鉴,促进页岩气更加科学、安全和低成本、环境友好化开发;希望本书所体现的以地质认识为基础,多学科联合攻关的研究思路能够对大家有所启示。

本书可供油气田开发工程、地质工程、钻完井工程等领域的工程技术人员和研究人员参考,也可供相关专业的研究生和高年级本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

页岩气低成本高效钻完井基础研究与应 用 / 刘向君, 梁利喜, 熊健著.
— 北京: 科学出版社, 2018.9

ISBN 978-7-03-052989-3

I. ①页… II. ①刘… ②梁… ③熊… III. ①油页岩-油气钻井-完井 IV. ①TE257

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 116335 号

责任编辑: 罗 莉 / 责任校对: 彭 映

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 陈 敬

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年9月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018年9月第一次印刷 印张: 21 1/2

字数: 510 千字

定价: 258.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

天然气具有高效、清洁和环保的优势,是当今世界的理想能源,大力发展天然气产业,是缓解环境压力的重要途径之一。美国对页岩气的成功开发使页岩气逐渐成为全球非常规油气资源勘探开发的热点,世界各国陆续在页岩气领域加大科技投入,目前大约有 30 个国家开展了页岩气的勘探开发工作。我国也加入了页岩气开发热潮中,渴望依靠页岩气缓解天然气资源的紧缺。根据 2013 年美国能源信息署页岩气储量调查报告,世界页岩气地质储量约为 $1013 \times 10^{12} \text{m}^3$,可开采资源量约为 $207 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。我国页岩气储量全球第一,约占全球页岩气储量的 15%,页岩气技术可采资源量约为 $31.6 \times 10^{12} \text{m}^3$,巨大的开采潜力使页岩气成为中国能源未来发展的重点方向。近几年来,我国对页岩气的开发越来越重视,为加速页岩气商业化开发进程,中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团公司等大型国企在页岩气勘探开发及工程技术等方面都投入了大量人力、物力和财力。通过大力引进国外页岩气工程技术和我国页岩气工程技术的自主研发与应用,我国页岩气探明储量快速增长,已经形成涪陵、长宁、威远、延长四大页岩气产区。虽然目前我国页岩气勘探开发取得了一定成果,但在整体发展过程中,钻完井周期长、压裂改造效果不理想、开发成本高等问题普遍存在,还未达到全面经济有效开发的效果,因此,我国页岩气勘探开发仍处在初步阶段。

由于我国页岩气储层埋藏深、地质及地质力学条件的特殊性和复杂性,低成本钻成长井段规则水平井及体积改造技术是页岩气开发至今未能很好解决的核心关键技术及重大技术难点,成为严重制约我国页岩气规模化开发的技术瓶颈。针对页岩气地层钻井完井过程中的技术难点,须客观、系统认识页岩地层的复杂性与特殊性,深入机理,从页岩组构及理化特性、岩石物理响应特征、力学特性及破坏模式等钻完井工程地质基础问题出发,提出切实可行的应对措施和优化方法。页岩气储层微层理、微裂隙等弱结构面十分发育,导致页岩力学特性存在显著的各向异性特征。尤其与钻井液接触后,页岩力学特性及破坏特征变化复杂,从而导致稳定井壁难度较大。鉴于页岩地层对水敏感性和钻井过程中水平井存在严重井壁垮塌问题,油基钻井液被大量应用于钻井,试图弱化钻井液对地层岩石强度的影响,提高井壁的稳定性的。然而油基钻井液目前不仅未能完全解决长井段水平井钻井井壁稳定问题,还带来了高钻井成本和严重的环保问题。因此,为了实现页岩气高效低成本、环保开发,采用水基钻井液钻成长水平段规则井眼是必须探索的重要方向。尽管通过近几年的攻关,现阶段水基钻井液在长宁、礁石坝等页岩工区都不同程度地取得了巨大成功,但更多的不成功案例和深层油气资源开发中遇到的越来越多的硬脆性页岩地层也使水基钻井液钻井页岩地层的相关基础研究具有了必要性。

当井眼形成后,由于页岩气储层岩石基质骨架极低的渗透性及其中天然气赋存状态的特殊性,如何沿水平段形成复杂裂缝网络,最大限度地提高页岩气的解吸、扩散及渗

流通道,已成为有效实施页岩气藏体积改造技术必须首先解决的基础问题,对页岩气井建井生产十分关键。对比传统体积压裂改造,页岩地层井周压裂缝形成更为复杂。页岩地层发育层理、天然裂缝等弱结构面,使得压裂缝延伸过程中会出现分叉、沿结构面延伸、穿过结构面延伸等情况,同时压裂缝延伸过程易与天然裂缝相交、贯通。因此,如何有效控制裂缝形态,使之形成有效缝网是页岩地层体积改造技术关键问题。地质参数(岩石结构及强度非均质性、地应力状态等)和工程参数(井眼轨迹、钻井卸载作用、完井参数与水平段分段数等)如何影响水平井井周网状裂缝的萌生、扩展、规模、转向等系统研究都亟待开展。

2012 年以来,本书作者及研究团队在国家自然科学基金石化联合基金重点基金项目“页岩气低成本高效钻完井技术基础研究”(U1262209)、国家自然科学基金面上项目“硬脆性页岩地层井周裂缝形成与形态调控基础研究”(51274172),以及一批油田科研项目的支持下,针对目前影响我国页岩气高效、低成本开发的重大技术瓶颈问题,针对页岩气藏地层水平井井壁失稳机理及地层坍塌压力调控方法、页岩气储层压裂缝萌生、成网机制及调控方法等基础理论问题开展了系统深入的研究与实践。本书内容就是在分析与总结这些研究与实践成果的基础上编写而成。全书共分为 7 章,第 1 章详细描述页岩组构及理化特性、基础岩石物理特征;第 2 章叙述页岩岩石变形破坏模式及其影响因素;第 3 章研究页岩-工作液相互作用对其结构和强度的影响;第 4 章介绍井壁稳定性化学调控方法;第 5 章叙述力学与化学协同作用下的页岩地层井壁稳定性评价方法;第 6 章阐述页岩结构、强度、地应力、水平井眼轨迹等多因素作用下的井周压裂缝形态,介绍井周裂缝形态形成机制及调控方法;第 7 章介绍硬脆性页岩钻完井技术的应用实例。希望本书关于页岩地层岩石与水基钻井液的作用方式、作用时间、作用程度、作用机理对页岩地层岩石结构和井壁稳定性的影响,裂缝形成、扩展等的研究成果,本书所贯穿的以地质及地质力学研究为基础和依据,地质工程一体化实现钻井、完井等工程技术,钻前一体化优化设计的思路对页岩地层井壁垮塌等失稳事故的控制、解决,低成本水基钻井液技术的研发和体积改造优化等能起到一定借鉴和指导作用,推动我国页岩气开发。

本书主要由西南石油大学刘向君教授团队共同完成,梁利喜、熊健两位副教授完成统稿,全书由刘向君教授定稿、审稿。特别感谢团队刘琨、黄静、曾韦、丁乙、庄大琳、王光兵、蒋文超、吴涛、李德远、何顺平、雷梦等历届博士、硕士研究生,正是团队每个人的辛勤付出和努力工作使得研究取得丰硕成果和本书能够顺利完成。6.8 节由西南石油大学杨兆中教授团队完成。特别感谢中国石油天然气集团公司川庆钻探工程有限公司陈俊斌等专家在相关研究过程中的大力支持。

在本书的撰写过程中,参阅了国内外相关专业的大量文献,在此向所有论著的作者表示由衷的感谢!

由于作者水平和知识面的限制,书中如有不妥之处,敬请读者批评指正。

刘向君

2018 年 3 月

目 录

第1章 页岩气层岩石组分、结构及理化特征	1
1.1 矿物组分特征	1
1.2 有机碳含量	7
1.3 孔隙结构特征	9
1.3.1 低压氮气吸附-脱附等温线	11
1.3.2 比表面积和总孔容	14
1.3.3 孔径分布曲线	16
1.4 阳离子交换容量	17
1.5 润湿性特征	19
1.6 微观结构特征	23
第2章 页岩气层岩石变形破坏特征及其影响因素	29
2.1 页岩气层岩石强度特性及破坏模式分析	29
2.2 页岩气层岩石脆性评价	36
2.2.1 基于强度的岩石脆性评价方法	36
2.2.2 基于硬度和断裂韧性的岩石脆性评价方法	39
2.2.3 基于峰后应力脆性跌落的岩石脆性评价方法	40
2.2.4 页岩脆性的影响因素	47
2.3 孔隙压力传递对页岩气层岩石破坏的影响	55
2.3.1 压力传递对页岩气层岩石破坏影响的物理模拟试验	56
2.3.2 压力传递对页岩气层岩石破坏影响的数值模拟试验	59
2.4 结构面发育对页岩气层岩石力学特性的影响	63
2.4.1 结构面对页岩力学强度影响的岩石力学试验研究	64
2.4.2 结构面对岩石力学强度影响的数值模拟研究	65
2.4.3 结构面对页岩脆性指数的影响	74
2.4.4 结构面对页岩气层岩石声学特性的影响	79
2.5 卸荷作用对页岩力学特性及破坏特征的影响	82
2.5.1 围压对页岩卸载破坏的影响	83
2.5.2 卸载速率对页岩破坏特征的影响	88
2.5.3 卸载幅度对页岩破坏特征的影响	106
2.6 页岩层理面力学特征	114
2.6.1 层理面力学特性测试方法及原理	114
2.6.2 层理面力学强度特性	115

第3章 工作液对页岩结构和强度的影响	119
3.1 工作液对页岩气层岩石宏观和微观结构的影响	119
3.2 工作液对页岩水化应力应变的影响	128
3.3 工作液对页岩气层岩石抗压强度的影响	129
3.4 工作液对页岩气层岩石抗张强度的影响	135
3.5 工作液对页岩气层岩石硬度的影响	136
3.6 工作液-页岩气层岩石相互作用机理研究	141
3.6.1 伊利石水化行为特征及水化机理	141
3.6.2 蒙脱石晶层间距膨胀规律及影响因素	149
3.6.3 页岩自吸效应及对页岩水化的影响	155
3.6.4 页岩水化过程中物理化学作用和力学作用	158
3.7 自吸作用、水化作用对页岩地层内部裂纹扩展的影响	161
3.7.1 裂纹扩展模型	161
3.7.2 水化作用对页岩地层内部裂纹扩展的影响	163
3.7.3 毛细管效应对页岩地层内部裂纹扩展的影响	164
3.8 水化作用程度、强度的表征与评价	166
3.8.1 页岩水化对声波时差的影响	166
3.8.2 页岩水化对声波衰减特性的影响	167
3.8.3 页岩水化对声波频谱特性的影响	168
第4章 页岩气层井壁稳定性化学调控技术	172
4.1 聚合物水化抑制剂的合成方法	173
4.1.1 阳离子单体氯化 1-甲基-1 烯丙基咪唑 (MAC) 的合成	173
4.1.2 聚合物水化抑制剂的合成	173
4.2 聚合物水化抑制剂合成条件	174
4.2.1 防膨率的测定方法	174
4.2.2 poly (AM/APEG/MAC) 合成条件	175
4.2.3 poly (AM/APEG/MAC/AMPS) 合成条件	176
4.3 聚合物水化抑制剂结构的表征	177
4.3.1 聚合物水化抑制剂分子结构的红外表征	177
4.3.2 聚合物水化抑制剂分子结构的核磁表征	178
4.4 聚合物水化抑制剂特性黏数及分子量确定	180
4.4.1 聚合物特性黏数及分子量的确定方法	180
4.4.2 poly (AM/APEG/MAC) 特性黏数及分子量测定	180
4.4.3 poly (AM/APEG/MAC/AMPS) 特性黏数及分子量测定	182
4.5 聚合物水化抑制剂抑制性能	183
4.5.1 浓度对聚合物抑制性能的影响	183
4.5.2 聚合物水化抑制剂的抗温性能	184
4.5.3 聚合物水化抑制剂的抗盐性能	184

4.5.4	聚合物水化抑制剂对伊利石水化的抑制性能	185
4.5.5	聚合物水化抑制剂对页岩的水化控制性能	187
第5章	页岩地层水平井井壁稳定性评价	191
5.1	页岩气层岩石强度准则	191
5.1.1	弱面强度理论	191
5.1.2	Hoek-Brown 强度准则	193
5.2	页岩气井井周应力场分析	200
5.2.1	井周应力分析坐标系建立及坐标系变换	200
5.2.2	页岩气井井周应力分布	202
5.3	页岩地层水平井井壁稳定性及钻井液影响分析	208
5.4	页岩气层坍塌压力构成及轨迹对井眼稳定的影响	210
5.4.1	页岩气储层水平井井壁失稳机理	210
5.4.2	钻井液-页岩相互作用引起的地层坍塌压力增量	210
5.4.3	龙马溪页岩气层岩石强度矿场预测方法	212
5.4.4	井眼轨迹对页岩地层井壁稳定性的影响	215
第6章	页岩气藏水平井井周网状裂缝形成机制及主控因素	222
6.1	页岩气层岩石断裂韧性及诱导裂缝前缘形态岩心实验分析	222
6.1.1	页岩断裂韧性测试	222
6.1.2	层理面对页岩断裂韧性影响的数值模拟分析	225
6.1.3	诱导缝前缘形态岩心实验分析	232
6.1.4	诱导缝前缘形态岩心数值模拟分析	236
6.2	井壁天然裂缝对诱导缝起裂和延伸影响的数值模拟分析	239
6.2.1	不考虑结构面发育条件下的诱导缝起裂与扩展	239
6.2.2	井壁天然裂缝与最大主应力夹角的影响	241
6.2.3	井壁天然裂缝长度的影响	243
6.2.4	井壁天然裂缝力学性质的影响	248
6.3	井周地层天然裂缝对诱导缝扩展的影响	249
6.3.1	井周裂缝与最大主应力夹角的影响	249
6.3.2	井周裂缝长度的影响	250
6.3.3	井周裂缝位置的影响	251
6.4	诱导缝起裂方位对诱导缝延伸的影响	253
6.4.1	不同起裂方位下井周裂缝的影响	254
6.4.2	不同起裂方位下井周裂缝位置的影响	256
6.5	地应力对诱导缝起裂和延伸的影响	261
6.5.1	地应力对诱导缝起裂的影响	261
6.5.2	地应力对诱导缝延伸的影响	264
6.6	层理及复杂裂缝分布对诱导缝形成的影响研究	267
6.6.1	层理与最大主应力夹角的影响	267

6.6.2 层理间距的影响	269
6.6.3 层理力学性质的影响	269
6.6.4 层理及复杂裂缝共存对诱导缝形成的影响	271
6.7 钻井完井参数对井周裂缝起裂扩展的影响	279
6.7.1 钻井方位对井周裂缝形态影响	279
6.7.2 射孔参数井周裂缝形态影响	285
6.8 不同压裂施工参数对页岩地层水平井压裂裂缝萌生与扩展的影响	297
6.8.1 水平井段内多簇压裂裂缝延伸模型	297
6.8.2 布缝参数及射孔参数对水平井段内多簇压裂裂缝延伸的影响	300
6.8.3 页岩地层水平井段内多簇压裂裂缝的调控方法	306
6.9 页岩地层水平井井周裂缝形态影响因素及调控方法分析	309
第7章 应用分析	311
7.1 某硬脆性页岩地层的井壁稳定实例分析	311
7.1.1 基础地质特征	312
7.1.2 结构面发育对井壁稳定性的影响分析	313
7.1.3 钻井液对井壁稳定性的影响	314
7.1.4 区块页岩地层坍塌压力剖面	317
7.2 某页岩气层的井壁稳定实例分析	317
7.2.1 地层岩性特征	317
7.2.2 已钻井的井壁失稳状况	317
7.2.3 地层“三压力”剖面构建及稳定性分析	322
7.3 页岩气水平井压裂实例分析	326
7.3.1 基本井况	326
7.3.2 压裂缝分析结果	328
参考文献	330

第 1 章 页岩气层岩石组分、结构及理化特征

地层岩石矿物组分、结构及理化特征是钻井、完井、储层改造等工程技术设计、建立与优化的基础。本章较为系统地对比分析、总结四川盆地多个地区的龙马溪组、五峰组，以及鄂尔多斯盆地延长组长 7 段等海相和陆相页岩气层岩石的组分、结构及理化性质，数据来源于新鲜露头样品、井下样品以及文献资料。

1.1 矿物组分特征

页岩矿物组分分析常采用 X 射线衍射方法。依照行业标准《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 衍射分析方法》SY/T 5163—2010，采用 PANalytical 公司生产的 X-射线衍射仪，对取自多个页岩气层的 220 个试样进行了 XRD 矿物组分测试分析，包括四川盆地地下志留系龙马溪组、四川盆地上奥陶统五峰组、鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长 7 段页岩。

根据页岩矿物的分类原则(Loucks and Ruppel, 2007)，将页岩中矿物分为三大类：①黏土矿物，②碳酸盐(包括方解石、白云石)和③石英、黄铁矿、长石。四川盆地龙马溪组、五峰组以及鄂尔多斯盆地延长组长 7 段等页岩样品的矿物组成及其含量可见图 1-1、图 1-2 和表 1-1。从图 1-1、图 1-2 和表 1-1 中可看出，所研究页岩的矿物组成以石英和黏土矿物为主，且石英和黏土矿物含量的变化范围大，其中不同地区龙马溪组页岩中石英平均含量分布范围为 30.19%~42.17%，武隆地区五峰组页岩中石英平均含量为 61.07%，鄂

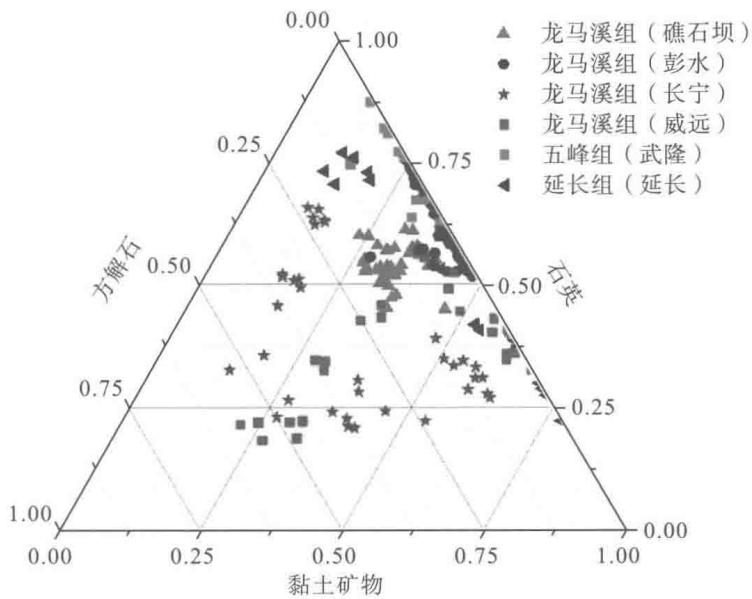


图 1-1 页岩气层岩石矿物组成三元图

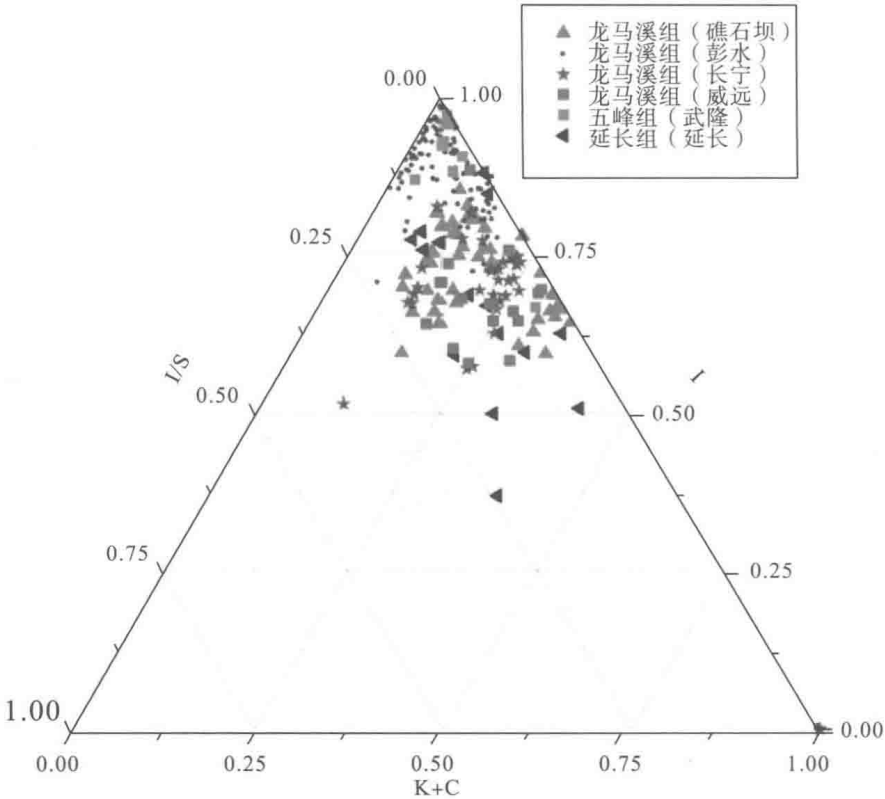


图 1-2 页岩气层岩石黏土矿物三元图

注：I. 伊利石 (Illite)；K. 高岭石 (Kaolinite)；C. 绿泥石 (Chlorite)；S. 蒙脱石 (Smectite)。

表 1-1 不同地层的页岩气层岩石的矿物组成对比

取样点	地层	石英/%			黏土矿物/%			碳酸盐岩/%		
		Min	Max	Ave	Min	Max	Ave	Min	Max	Ave
长宁	龙马溪组	19.89	62.71	38.85	11.1	59.34	33.29	8.76	52.59	22.42
威远	龙马溪组	15.48	40.25	30.19	20.02	64.66	39.55	0.00	52.75	20.74
礁石坝	龙马溪组	25.12	51.04	37.39	21.45	65.94	38.27	0.38	19.04	10.61
彭水	龙马溪组	27.67	56.29	42.17	21.29	59.92	39.09	0.23	16.25	1.26
武隆	五峰组	48.88	72.53	61.07	14.91	38.58	25.52	0.45	10.68	5.38
下寺湾	延长组长 7 段	17.10	72.33	37.54	12.37	61.55	40.57	0.00	14.34	5.84

注：Min 为最小值，Max 为最大值，Ave 为平均值。

鄂尔多斯盆地延长组长 7 段页岩中石英平均含量为 37.54%；不同地区龙马溪组页岩中黏土矿物平均含量分布范围为 33.29%~39.55%，武隆地区五峰组页岩中黏土矿物平均含量为 25.52%，鄂尔多斯盆地延长组长 7 段页岩中黏土矿物平均含量为 40.57%。同时，从图 1-2 中还可看出，黏土矿物以伊利石含量最高，平均含量都大于 60%，伊/蒙混层相对含量大都小于 25%，不含有蒙脱石等膨胀性矿物。

从图 1-1、图 1-2 和表 1-1 中可以看出，不同地区龙马溪组页岩样品矿物组成存在一定的差异，反映出龙马溪组页岩横向分布差异。陈尚斌等(2011)研究结果表明，四川盆地长

宁—兴文地区龙马溪组页岩的黏土矿物含量范围分布为 16.8%~70.1%，平均 53.4%，石英含量范围分布为 16.2%~75.2%，平均 29.2%及碳酸盐岩含量范围分布为 0~20.1%，平均 6.98%；陈文玲等(2013)研究结果表明长芯 1 井龙马溪组页岩的黏土矿物含量范围分布为 15%~75%，平均 40%，石英含量范围分布为 30%~70%，平均 34%，碳酸盐岩含量范围分布为 5%~30%，平均 18%；Guo 等(2014)研究结果表明礁石坝地区焦页 1 井龙马溪组页岩的黏土矿物平均含量为 34.6%，石英平均含量为 37.39%，碳酸盐岩平均含量为 9.71%。由于取样点的差异，本团队研究获得的不同地区龙马溪组页岩矿物组分数据与陈尚斌等(2011)、陈文玲等(2013)、Guo 等(2014)得到的矿物组分尽管具体数值存在差异，但都指示了四川盆地龙马溪组页岩矿物组成是以石英和黏土矿物为主，且黏土矿物含量变化大，总体不高的特点，也反映出龙马溪组地层的横向变化性，这种矿物组分的变化，尤其黏土矿物含量的变化，必然会给工程技术的建立带来更多的不确定性。

从表 1-1 中还可看出，无论海相页岩气层岩石(龙马溪组、五峰组)还是陆相页岩气层岩石(延长组长 7 段)，矿物组成的范围变化大，且矿物组成的差别也大，这种差异将造成页岩理化性能特征的差异，对页岩地层钻井过程中的井壁稳定产生不同的影响。

同时，北美地区的主要海相页岩和所研究页岩矿物组成含量的最小值和最大值可见图 1-3，包括巴尼特(Barnett)页岩 (Bowker, 2003; Bruner and Smosna, 2011)、伍德福德(Woodford)页岩 (Abousleiman et al., 2008)、马塞卢斯(Marcellus)页岩 (Bruner and Smosna, 2011)和新奥尔巴尼(New Albany)页岩 (Strapoć et al., 2010)。从图 1-3 中可看出，北美地区的主要海相页岩和所研究页岩的矿物组成含量既有相似性也有差异性，其中龙马溪组页岩和延长组页岩的石英含量与北美地区的主要海相页岩的石英含量相近，而五峰组页岩的石英含量相对较低；与北美地区的主要海相页岩相比，所研究页岩的黏土矿物含量相对较高；北美地区的主要海相页岩和所研究页岩的碳酸盐岩含量的差异较明显，其中伍德福德(Woodford)、龙马溪组、五峰组和延长组的碳酸盐岩含量相对较低；所研究页岩的长石

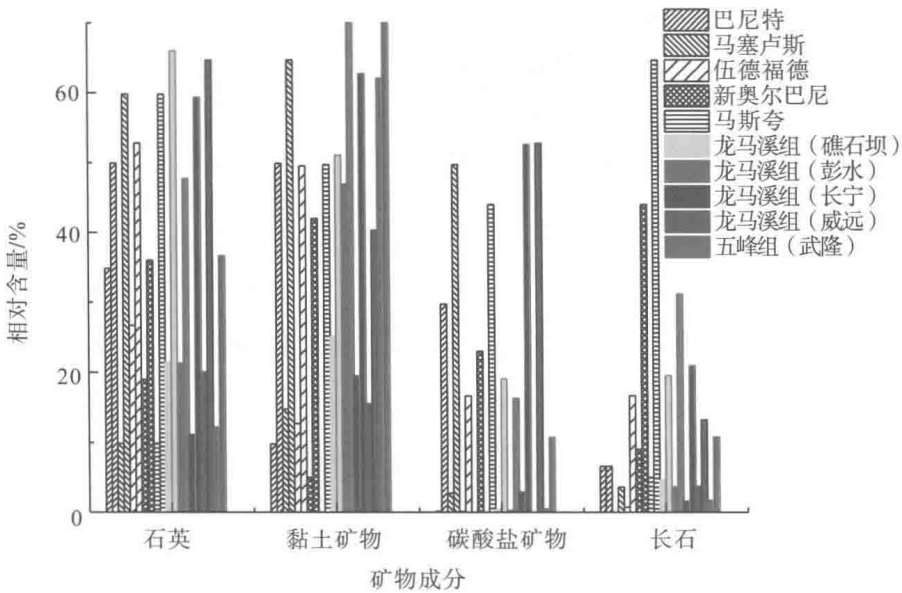


图 1-3 页岩矿物组成含量对比图

含量比北美地区的主要海相页岩中巴尼特 (Barnett) 页岩、伍德福德 (Woodford) 页岩和马塞卢斯 (Marcellus) 页岩的长石含量高, 而低于北美地区的主要海相页岩中新奥尔巴尼 (New Albany) 页岩和马斯夸 (Muskwa) 页岩的长石含量。总体来看, 北美地区的主要海相页岩和所研究页岩矿物组成也是以石英和黏土矿物为主。

此外, Chen 等(2011)、白志强等(2013)等研究发现龙马溪组页岩的岩性具有明显的二分性, 即龙马溪组上段页岩和龙马溪组下段页岩, 龙马溪组页岩的二分性分布特点将导致页岩矿物组成特征、有机碳含量等的差异。长宁地区和礁石坝地区的龙马溪组页岩的矿物组成特征也说明了龙马溪组页岩具有二分性的特点, 可分别见图 1-4 和图 1-5, 图中 (a) 代表龙马溪组上段页岩, (b) 代表龙马溪组下段页岩。长宁地区和礁石坝地区龙马溪组上段页岩和下段页岩的石英含量、黏土矿物含量和碳酸盐岩含量的对比见表 1-2。从表 1-2 中可看出, 长宁地区和礁石坝地区龙马溪组上段页岩和龙马溪组下段页岩的矿物组成差别较大, 龙马溪组上段页岩的石英含量比下段石英含量低, 其中长宁地区龙马溪组上段页岩石英平均含量为 27.6%, 礁石坝地区龙马溪组上段页岩石英平均含量为 29.02%, 而长宁地区龙马溪组下段页岩石英平均含量为 52.19%, 礁石坝地区龙马溪组下段页岩石英平均含量为 43.10%; 龙马溪组上段页岩的黏土矿物含量比下段黏土矿物含量高, 其中长宁地区龙马溪组上段页岩黏土矿物平均含量为 47.09%, 礁石坝地区龙马溪组上段页岩黏土矿物平均含量为 58.70%, 而长宁地区龙马溪组下段页岩黏土矿物平均含量为 14.52%, 礁石坝地区龙马溪组下段页岩黏土矿物平均含量为 25.71%; 龙马溪组页岩上段的碳酸盐岩含量比下段碳酸盐岩含量低, 其中长宁地区龙马溪组上段页岩碳酸盐岩平均含量为 18.57%, 礁石坝地区龙马溪组上段页岩碳酸盐岩平均含量为 2.72%, 而长宁地区龙马溪组下段页岩碳酸盐岩平均含量为 29.86%, 礁石坝地区龙马溪组下段页岩碳酸盐岩平均含量为 13.74%。因此, 龙马溪组上段和下段页岩的矿物组成差异将造成龙马溪组上段和下段页岩的理化性能差异, 对龙马溪组上段和下段页岩地层钻井过程中的井壁稳定产生不同的影响。

表 1-2 长宁地区和礁石坝地区龙马溪组上段和下段页岩的矿物组成对比

取样点	地层	石英/%			黏土矿物/%			碳酸盐岩/%		
		Min	Max	Ave	Min	Max	Ave	Min	Max	Ave
长宁	龙马溪组上段	20.08	35.9	27.6	34.56	63.6	47.09	8.76	37.51	18.57
	龙马溪组下段	43.46	62.66	52.19	11.1	18.79	14.52	22.4	39.59	29.86
礁石坝	龙马溪组上段	25.12	35.27	29.02	39.68	65.94	58.7	0.38	9.06	2.72
	龙马溪组下段	32.25	51.04	43.10	21.45	39.08	25.71	5.97	18.63	13.74

注: Min 为最小值, Max 为最大值, Ave 为平均值。

根据页岩气层岩石的 XRD 测试结果, 无论是海相页岩(龙马溪组、五峰组)还是陆相页岩(延长组长 7 段), 矿物组分主要以石英和黏土矿物为主, 其次为长石(正长石、斜长石、钾长石)、碳酸盐岩(方解石、白云石)等, 同时含有少量黄铁矿等矿物。黏土矿物主要以伊利石为主, 其次为绿泥石、伊/蒙混层, 部分岩样中可见少量的高岭石, 基本不含蒙脱石等膨胀性矿物。

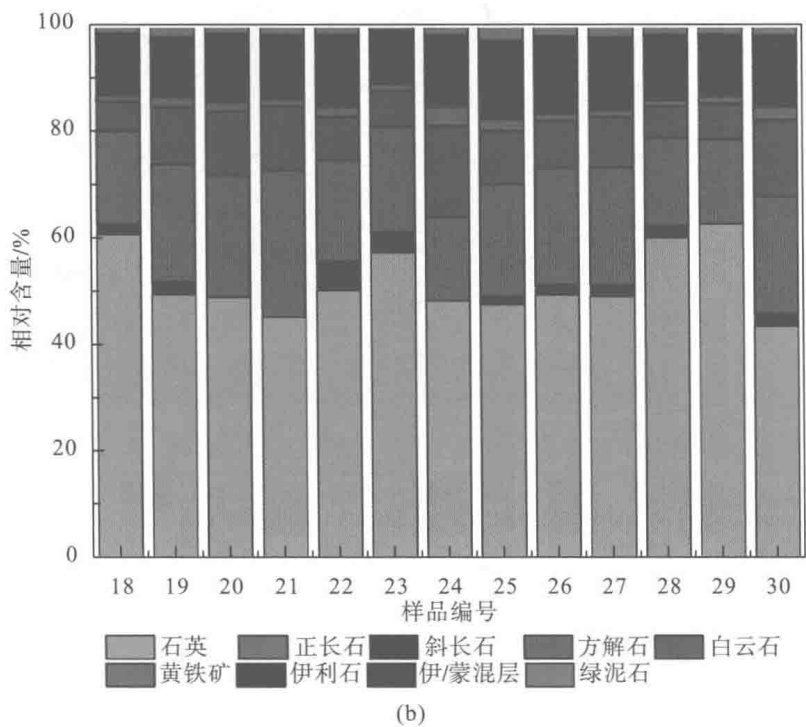
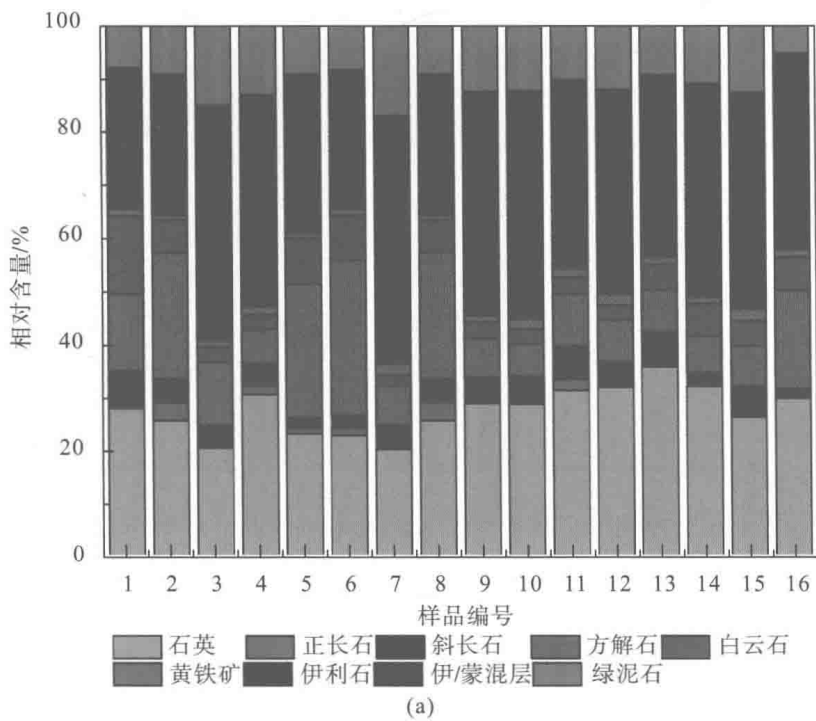


图 1-4 长宁地区龙马溪组页岩的矿物组成

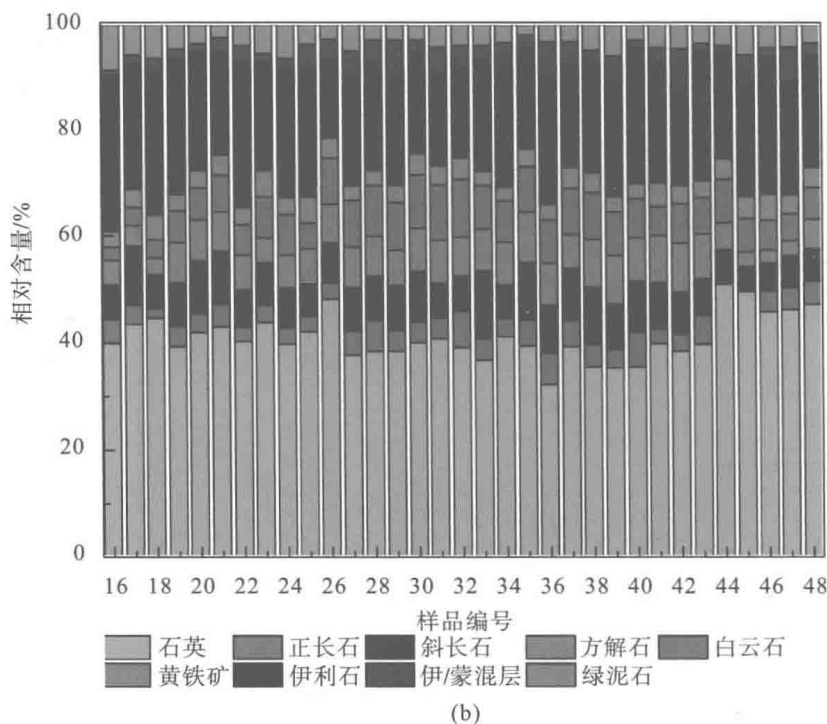
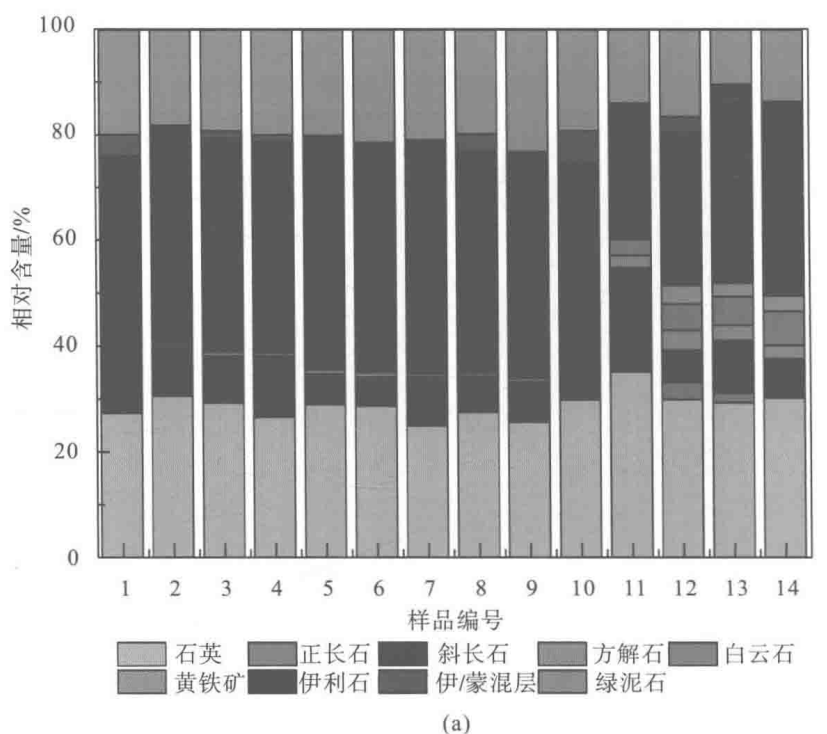


图 1-5 礁石坝地区龙马溪组页岩的矿物组成

由此可见，页岩气层岩石的矿物组成和钻井工程界长期以来关注的传统水化膨胀性泥岩的矿物组分存在较大差异，其中页岩气层岩石的黏土矿物主要为伊利石和较低含量的伊/蒙混层，且不含蒙脱石，而水化膨胀性泥岩一般含有较高含量的蒙脱石。

1.2 有机碳含量

为了研究页岩气层岩石的有机碳(total organic carbon, TOC)含量,利用 LECO CS230 C/S 测试仪器开展了页岩有机碳含量测试。页岩气层岩石的有机碳含量测试结果见图 1-6 和表 1-3。从图 1-6 和表 1-3 中可看出,龙马溪组上段页岩的 TOC 含量明显低于龙马溪组下段页岩的 TOC 含量,其中长宁地区的龙马溪组上段页岩的 TOC 平均含量为 1.25%,礁石坝地区的龙马溪组上段页岩的 TOC 平均含量为 1.01%;而长宁地区的龙马溪组下段页岩的 TOC 平均含量为 4.12%,礁石坝地区的龙马溪组下段页岩的 TOC 平均含量为 3.83%。同时陈文玲等(2013)研究结果表明,长芯 1 井龙马溪组上段页岩的 TOC 含量平均值 1.4%(1.04%~2.05%)低于下段 TOC 含量平均值 5.33%(3.95%~6.7%)。这些结果说明龙马溪组下段页岩比龙马溪组上段页岩更富含有机质。同时,从图 1-6 中可看出,武隆地区五峰组页岩的 TOC 含量分布为 0.621%~5.33%,平均含量为 2.80%;鄂尔多斯盆地延长组长 7 段页岩的 TOC 含量分布为 3.89%~5.11%,平均含量为 4.38%。以上结果说明了研究的龙马溪组、五峰组和延长组页岩都富含有机质。

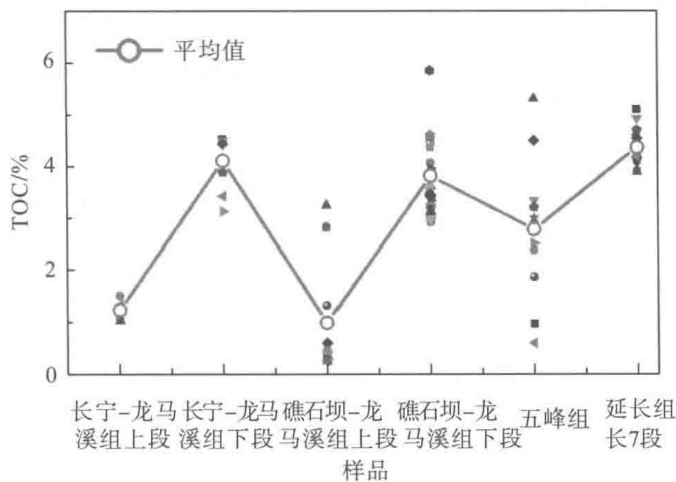


图 1-6 页岩气层岩石的有机碳含量对比图

表 1-3 长宁地区和礁石坝地区龙马溪组上段页岩和下段页岩的 TOC 和 CEC^①对比

取样地区	地层	TOC/%			CEC / (mmol·kg ⁻¹)		
		最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
长宁	龙马溪组上段	1.06	1.53	1.25	70	120	94.69
	龙马溪组下段	3.44	4.53	4.12	30	55	38.93
礁石坝	龙马溪组上段	0.274	3.26	1.01	—	—	—
	龙马溪组下段	2.04	5.87	3.83	40	65	45.58

① CEC: cation exchange capacity, 阳离子换量。

长宁地区和礁石坝地区龙马溪组上段页岩和下段页岩的石英含量和有机碳含量之间的关系分别见图 1-7 和图 1-8。从图 1-7 中可看出，长宁地区龙马溪组上段页岩的石英含量与有机碳含量存在较弱的正线性关系($R^2=0.0793$)，而下段页岩的石英含量和有机碳含量之间存在良好的正线性关系($R^2=0.538$)；同时从图 1-8 中可看出，礁石坝地区龙马溪组上段页岩的石英含量与有机碳含量存在较弱的正线性关系($R^2=0.0481$)，而下段页岩的石英含量和有机碳含量之间存在良好的正线性关系($R^2=0.603$)。鄂尔多斯盆地延长组长 7 段页岩的石英含量和有机碳含量之间的关系可见图 1-9。从图 1-9 中可看出，延长组长 7 段页岩的石英含量和有机质含量之间存在良好的负线性关系，相关系数为 0.7203。

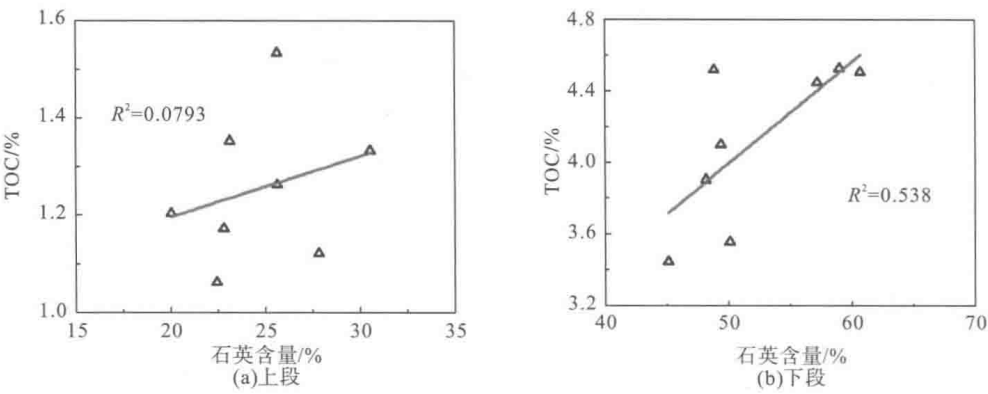


图 1-7 长宁地区龙马溪组页岩石英含量和有机碳含量之间的关系

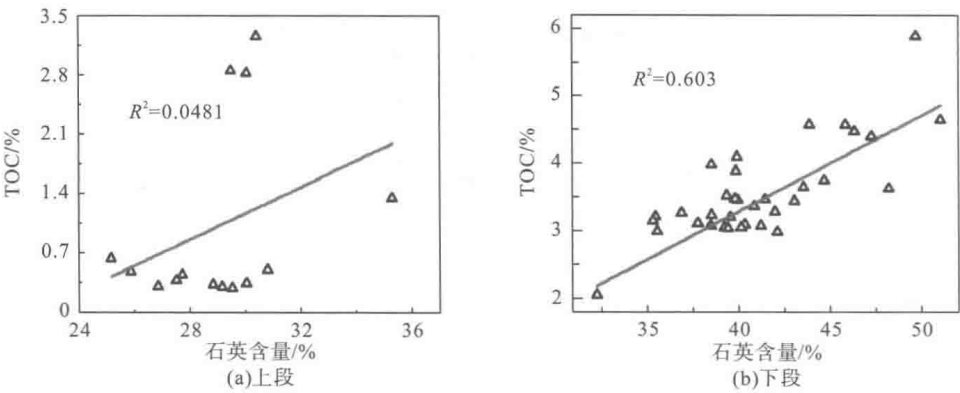


图 1-8 礁石坝地区龙马溪组页岩石英含量和有机碳含量之间的关系

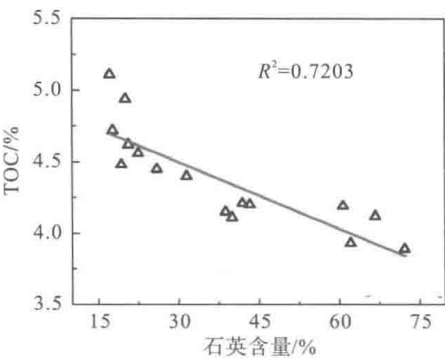


图 1-9 延长组页岩样品石英含量和有机碳含量之间的关系