



上扬子地区 下古生界页岩气地质评价

The Lower Paleozoic Shale Gas
Geological Evaluation of Upper Yangtze Area

张金川 韩双彪 唐玄 杨超 陈前/著



科学出版社

“十三五”国家科技重大专项(2016ZX05034-002-001)
国家自然科学基金项目(41802156)

联合资助

上 扬 子 地 区 下 古 生 界 页 岩 气 地 质 评 价

**The Lower Paleozoic Shale Gas Geological
Evaluation of Upper Yangtze Area**

张金川 韩双彪 唐玄 杨超 陈前 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

上扬子是我国最早开始页岩气研究并首次取得商业开发突破的地区,下古生界海相页岩气形成条件优越,但有机质热演化程度高且后期改造强,为勘探开发带来了挑战。全书对下寒武统牛蹄塘组和下志留统龙马溪组页岩气发育地质背景、成藏主控因素及富集规律进行了评价分析,并开展了有利选区及资源评价。

本书可为从事页岩气勘探开发的专家、学者提供科研参考,也可作为高等院校油气相关专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

上扬子地区下古生界页岩气地质评价 = The Lower Paleozoic Shale Gas Geological Evaluation of Upper Yangtze Area / 张金川等著. —北京: 科学出版社, 2019.5

ISBN 978-7-03-061119-2

I. ①上… II. ①张… III. ①扬子板块—早古生代—油页岩—油气资源评价 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第079810号

责任编辑: 李 雪 李久进 / 责任校对: 杜子昂
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

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>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年5月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2019年5月第一次印刷 印张: 13 1/4

字数: 265 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

天然气在我国一次能源消费结构中的比例远远低于北美及欧洲国家的平均值，巨大的反差促使我们必须加快天然气勘探开发进程。在天然气能源领域中，页岩气具有明显优势，目前是非常规天然气中影响作用大、发展速度快的新能源类型。我国天然气需求旺盛，仅靠常规天然气的生产远远不能满足需求，而发展页岩气等非常规天然气产业是缓解供需矛盾的有效途径，也将成为我国天然气消费的重要补充，将对我国的能源产出和消费比例结构的改变产生重大影响。

我国拥有大面积、广泛分布的页岩层系，造就了页岩气可能发育的广泛空间和开发生产的巨大潜力。我国各时代地层中的页岩分布表现出受沉积环境和板块控制的显著特征。北方地区富有机质页岩以陆相为主兼有偏陆性海陆交互发育，发育时代相对较晚。与此对应，南方地区页岩以海相为主兼有偏海性海陆交互发育，发育时代相对较早。按时代划分，早古生代主要为海相页岩，晚古生代以海陆交互页岩沉积为特色，中生代、新生代则以陆相页岩发育为基本特征。

美国页岩气研究程度较高，地质规律和认识相对清楚，是我国页岩气研究的重要参考。与美国的地质变化规律相比，我国页岩气地质特点变化的规律性更加隐蔽，也更加复杂。美国的页岩气主力层系集中于上古生界的泥盆系—石炭系和中生界，而我国目前开展研究的页岩层系较多，影响较大的层系主要包括下寒武统、下志留统、上二叠统、上三叠统以及始新统等层系。我国页岩及页岩气地质条件特殊，既有“层厚、面广、规模大”之喜，也有“下老、上小、中间薄”之虞（即下寒武统海相页岩成熟度过高、古近系陆相页岩成岩作用弱、二叠系海陆交互页岩单层厚度偏小），页岩气地质条件的优劣既受控于构造和沉积条件，又取决于不同地质作用之间的过程匹配。寒武系页岩厚度大、分布广、有机碳含量高，优点突出，但有机质热演化程度高、后期改造作用强烈，不足也较明显。下志留统粉砂质含量明显增加，既没有下寒武统的突出优点，也没有下寒武统的明显不足，但从渝页1井页岩气的发现到焦石坝气田的高产，无不说明该层系的优越性。下志留统优质页岩主要分布在黔北、川东、渝东南、鄂西及湘西北一带，总有效面积有限。石炭系—二叠系在华南和华北的大部分区域内均有发育，页岩连续分布面积和累计总厚度大，有机质热演化程度较为适中，后期改造破坏弱，唯页岩单层厚度有限，若与其中含气的致密砂岩同时考虑，则该套层系应为更好的选择。中生界、新生界页岩发育受控于陆相湖盆，分布面积有限但总厚度大，有机质类型、成熟度和页岩油气分布服从构造和沉积共同控制原理。

我国南方下古生界海相页岩气发育的地质条件优越,但有机质热演化程度高且后期改造强,其中下寒武统页岩保存条件差、总体含气量低,为勘探研究带来了巨大困难,在进行页岩气勘探时,宜主动避让断裂及破碎带(逆掩区除外)并在风化/氧化带之下的构造稳定区开展重点工作。海陆过渡相页岩常与砂岩、煤系及灰岩频繁互层,有机质热演化程度较为适中,在我国南方、北方及西部地区均有规模性发育,分布范围广、累积厚度大,是我国页岩气进一步勘探开发的重要目标层系,但页岩单层厚度偏小,易于粉化,特别是二叠系等页岩常与煤系和致密砂岩交互,宜将页岩、煤和致密砂岩同时研究,并对页岩气和致密砂岩气等进行同步勘探。我国北方地区典型的陆相页岩厚度大,有机质类型多但热演化程度普遍偏低,页岩油和页岩气均可作为勘探目标,勘探过程中宜将两者同等考虑,侧重寻找裂缝型页岩油气,特别关注并发现以溶解方式存在的页岩气或页岩油。

中国页岩气勘探开发仅刚刚开始,目前尚处于探索阶段,进行大规模勘探开发利用仍然存在一系列困难和挑战,其中很多的科学问题还有待解决。复杂的地质条件决定了我国页岩气勘探开发不能简单照搬国外经验,必须从国内页岩气地质特征出发,进一步开展页岩气资源潜力调查评价。针对遇到的技术瓶颈,在引进、吸收国外先进技术的基础上,通过国家科技重大专项等支持,开展联合攻关,形成适合于我国地质条件的页岩气勘探开发核心技术,探索页岩气勘探开发新模式。

本书第1章由韩双彪、张金川撰写,第2章由杨超、韩双彪撰写,第3章由刘飏、刘子驿编写,第4章由陈前、杨超编写,第5章由党伟、韩双彪编写,第6章由唐玄、尉鹏飞编写,第7章由张金川、韩双彪、林腊梅、姜生玲编写。全书由张金川、韩双彪统稿。郭睿波、黄璜、陈莉、陶佳、董哲、王胜、陈维龙、杨雪、张照耀、黄颖、李兴起、于晓菲、韩美玲、许龙飞、苏泽昕、马广鑫、茹意承担了图件清绘任务。

本书撰写时间有限,但质量追求无限。难免存在不尽如人意之处,还望读者不吝批评斧正。

作者

2019年1月

目 录

前言

1 页岩气发育地质背景	1
1.1 地层发育.....	1
1.1.1 区域地层.....	1
1.1.2 富有机质页岩层系.....	4
1.2 沉积环境.....	10
1.2.1 牛蹄塘组.....	10
1.2.2 五峰组—龙马溪组.....	12
1.3 构造区划.....	14
1.4 页岩分布.....	16
1.4.1 牛蹄塘组.....	16
1.4.2 五峰组—龙马溪组.....	17
2 页岩有机地球化学	19
2.1 有机质类型.....	19
2.1.1 牛蹄塘组.....	19
2.1.2 龙马溪组.....	20
2.2 有机质丰度.....	21
2.2.1 牛蹄塘组.....	21
2.2.2 龙马溪组.....	24
2.3 有机质成熟度.....	29
2.3.1 牛蹄塘组.....	29
2.3.2 龙马溪组.....	31
2.4 有机质微观赋存状态.....	33
2.4.1 牛蹄塘组.....	34
2.4.2 龙马溪组.....	35
3 页岩矿物	36
3.1 矿物组成.....	36
3.1.1 牛蹄塘组.....	36
3.1.2 龙马溪组.....	42
3.1.3 矿物组成与岩相划分.....	47

3.2	矿物成因与转化	53
3.2.1	矿物成因	53
3.2.2	矿物转化	61
3.3	矿物在页岩气地质研究中的意义	66
4	页岩储集物性	68
4.1	储集空间类型	68
4.1.1	孔隙类型与成因	68
4.1.2	裂缝类型与成因	72
4.2	储集空间表征	74
4.2.1	孔隙特征	74
4.2.2	裂缝特征	81
4.3	储集物性参数	87
4.3.1	孔隙几何形态	87
4.3.2	比表面积与孔径分布	90
4.3.3	孔隙度与渗透率	92
4.4	孔缝发育主控因素及分布模式	94
4.4.1	孔缝发育主控因素	94
4.4.2	孔缝分布模式	98
5	页岩含气性	100
5.1	页岩含气显示	100
5.2	页岩含气量测试	104
5.2.1	等温吸附模拟	104
5.2.2	含气量测井解释	108
5.2.3	页岩现场解吸	113
5.3	含气饱和度和含气组分	121
5.3.1	含气饱和度	121
5.3.2	含气组分	122
5.4	含气量变化及影响因素	124
5.4.1	含气量变化	124
5.4.2	影响因素	128
5.4.3	含气量预测	138
6	页岩气富集及有利选区	142
6.1	页岩气富集机理及主控因素	142
6.1.1	页岩气形成条件	142
6.1.2	页岩气富集机理	144

6.1.3	页岩气富集主控因素	147
6.2	页岩气发育地质模式	154
6.2.1	古构造突起模式	155
6.2.2	断背斜模式	156
6.2.3	逆冲褶皱模式	157
6.2.4	富氮页岩气聚集模式	159
6.3	页岩气选区方法及标准	162
6.3.1	选区方法	162
6.3.2	选区标准	165
6.4	调查井选取及有利区优选	167
6.4.1	调查井选取	167
6.4.2	有利区优选	168
7	页岩气资源潜力	172
7.1	评价方法优选	172
7.1.1	页岩气资源评价方法影响因素	172
7.1.2	页岩气资源评价方法优选	177
7.1.3	概率体积法	178
7.2	评价结果	187
7.2.1	单元分布	187
7.2.2	层系分布	188
7.2.3	深度分布	190
7.2.4	地表条件分布	192
7.2.5	省际分布	193
7.3	合理性分析	195
7.3.1	方法和参数的合理性分析	195
7.3.2	资源量评价结果合理性分析	195
	参考文献	197

1 页岩气发育地质背景

上扬子是我国最早开始页岩气研究并首次取得商业开发突破的地区(张金川等, 2006)。地理位置上, 主要包括四川东部、重庆及贵州北部地区, 也包含湖南西北部、湖北西南部及云南东北角等部分地区, 总面积约 45 万 km²。构造位置上, 研究区涵盖了上扬子地区的大部、滇黔桂北部、中扬子西北及秦岭南缘部分地区(图 1.1)。

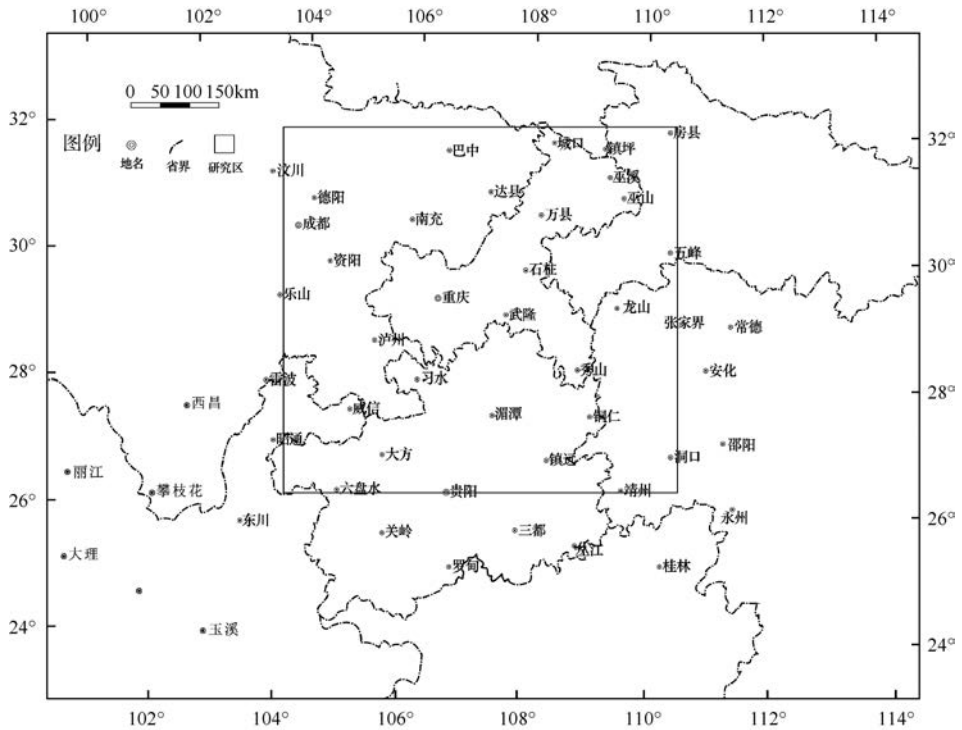


图 1.1 上扬子地区位置示意图

1.1 地层发育

1.1.1 区域地层

地层上看, 上扬子地区除上古生界泥盆系—石炭系遭遇剥蚀外, 其他各套地层发育齐全, 分布广泛(图 1.2)。下面对该区地层发育情况做简要介绍。

地层		最大厚度/m	岩性剖面	岩性描述		
界	系 统 群/组					
中生	侏罗	下	自流井	900	紫红色泥岩、钙质泥岩、页岩及石英砂岩，下部夹煤层	
		珍珠冲	1500	紫红色、灰绿色页岩夹砂岩		
	三叠	上	须家河	3000	粉砂岩、页岩、砂页岩互层夹煤层	
		中	巴东		灰色薄—厚层状灰岩、白云岩夹岩溶角砾岩及砂质页岩	
		下	嘉陵江	1700	灰岩、白云岩、泥页岩夹砂岩、岩溶角砾岩等，底部含凝灰质砂岩，向上含石膏和盐岩	
			飞仙关		紫灰色、紫红色页岩为主夹少量泥质、介屑灰岩	
	古生	二叠	上	长兴	500	主要为灰岩，上部夹燧石条带及团块、页岩及煤层
			龙潭		灰黑色页岩、碳质页岩、砂质页岩，夹煤和细砂岩，夹硅质石灰岩	
			中	茅口	500	上部浅灰色厚层灰岩，中部深灰色燧石灰岩，下部灰岩及白云质灰岩
				栖霞		深灰色灰岩、透镜状泥质灰岩互层夹白云质灰岩、燧石结核灰岩
梁山				主要为灰岩		
志留		下	韩家店	1500	灰绿色页岩、粉砂质页岩，夹粉砂岩、生物灰岩透镜体，局部富含有机质页岩	
		石牛栏		下部为灰色石灰岩、瘤状灰岩夹灰质页岩，上部为生物碎屑灰岩、黄绿色页岩互层夹瘤状灰岩		
		龙马溪		下部为黑色富含笔石页岩、粉砂质页岩及钙质页岩，上部为深灰色页岩		
奥陶		上	五峰	600	黑色页岩	
		中	临湘		灰色含生物碎屑灰岩、泥质灰岩，偶夹页岩	
			宝塔		灰色含生物碎屑灰岩、泥质灰岩，偶夹页岩	
			十字铺		杂色砂岩、粉砂岩、页岩、白云岩、生物碎屑及鲕状灰岩	
		下	大湾		页岩夹粉砂岩	
			红花园		灰色生物碎屑灰岩	
			桐梓		上部为深灰色厚层白云岩，中部为灰黄色页岩，下部为灰色白云岩夹泥质白云岩	
娄山关				以白云岩为主，底部为细粒石英砂岩，夹云质页岩		
寒武		中	石冷水	2500	发育白云岩、灰岩，夹石膏	
	陡坡寺		含泥石英粉砂岩			
	清虚洞		灰岩、白云岩，夹泥质云岩			
	下	金顶山		页岩、泥质粉砂岩与粉砂岩，夹灰岩		
		明心寺		以页岩、砂岩为主，下部含较多灰岩		
		牛蹄塘		以页岩、含粉砂质页岩为主，夹粉砂岩		
新元古	震旦	上	灯影	1100	白云岩，夹硅质岩	
	下	陡山沱	400	碳酸盐岩、页岩、粉砂岩、砂岩及局部砾岩		

图 1.2 上扬子地区综合地层柱状图

1. 震旦系

下震旦统陡山沱组以页岩为主,底部为白云岩,顶部为含胶磷矿结核砂质页岩。上震旦统灯影组发育白云岩,夹硅质岩。震旦系厚度中心在四川东南宜宾、泸州一带,厚度逾千米,向南东方向迅速变薄,瓮安、秀山、大庸一带减至百米左右(徐国盛等,2007)。

2. 寒武系

下寒武统牛蹄塘组以页岩、含粉砂质页岩为主,夹粉砂岩,与下伏地层假整合接触(文玲等,2001)。下寒武统明心寺组以页岩、砂岩为主,下部有较多的灰岩。下寒武统金顶山组发育页岩、泥质粉砂岩与粉砂岩,夹灰岩。下寒武统清虚洞组下段以灰岩为主,上段为白云岩,夹泥质云岩。中寒武统陡坡寺组含泥石英粉砂岩。中寒武统石冷水组发育白云岩及灰岩,夹石膏。上寒武统娄山关群以白云岩为主,底部为细粒石英砂岩,夹云质页岩。寒武系基本上遍布整个上扬子地区。

3. 奥陶系

下奥陶统桐梓组下部为灰色白云质灰岩、灰质白云岩、泥质白云岩夹页岩、生物碎屑灰岩、砂屑灰岩及鲕状灰岩,上部为灰色、灰黄色页岩,深灰色生物碎屑灰岩、鲕状灰岩。下奥陶统红花园组为灰色、深灰色生物碎屑灰岩,夹少量页岩、白云质灰岩和砂屑灰岩,普含硅质条带(结核)。下奥陶统大湾组下部为黄绿色页岩、粉砂质页岩,夹生物碎屑灰岩透镜体;中部为黄绿色粉砂岩与深灰色含泥质灰岩互层;上部发育灰色、灰绿色页岩、粉砂质页岩夹灰岩。中奥陶统十字铺组发育灰色、深灰色含生物碎屑灰岩、泥质灰岩,偶夹页岩;宝塔组为浅灰色、灰色含生物碎屑马蹄纹灰岩。上奥陶统临湘组为灰色、浅灰色瘤状泥灰岩;五峰组发育黑色含硅质灰质页岩,顶部常见深灰色泥灰岩(李双建等,2009)。与寒武系相比,由于古隆起影响,奥陶系分布范围略有缩小。

4. 志留系

下志留统龙马溪组下部为黑色页岩,富含笔石;上部为深灰色泥岩夹粉砂质泥页岩(刘树根等,2004)。下志留统石牛栏组为深灰色、黑灰色泥页岩、含粉砂质泥岩夹薄层生物碎屑灰岩、泥质粉砂岩、砂质泥灰岩、瘤状泥灰岩及钙质泥岩。下志留统韩家店组发育灰绿色、灰黄色页岩、粉砂质页岩夹粉砂岩、生物灰岩透镜体,局部含富有机质页岩(王社教等,2009)。中上志留统仅局部分布。

5. 二叠系

下二叠统大部分地区缺失。中二叠统梁山组底部发育灰绿色鲕状绿泥石铁矿

透透镜体及黏土岩,中部为白灰色—深灰色含高岭石水云母黏土岩或铝土岩,上部为灰黑色碳质页岩夹煤线,含黄铁矿。中二叠统栖霞组为深灰色、灰色厚层状灰岩、生物碎屑灰岩,含燧石团块。中二叠统茅口组下部为深灰色厚层状生物碎屑灰岩、有机质页岩,中部为灰色—浅灰色厚层状灰岩、生物碎屑灰岩、含燧石结核灰岩,上部为浅灰色厚层灰岩,顶部含燧石结核或薄层硅质岩。上二叠统龙潭组发育灰黑色、黑色碳质、砂质泥页岩夹煤,夹粉细砂岩,局部地区夹硅质石灰岩。上二叠统长兴组下部为灰色、深灰色厚层灰岩、骨屑灰岩夹少量黑色钙质页岩,中、上部为灰色、灰白色中厚层含燧石结核、条带灰岩与白云质灰岩。

6. 三叠系

下三叠统飞仙关组以紫灰色、紫红色页岩为主夹少量泥质、介屑灰岩。下三叠统嘉陵江组为灰色—浅灰色薄—中厚层状灰岩、生物碎屑灰岩,夹白云质灰岩。中三叠统巴东组为灰色薄—厚层状灰岩、白云岩夹岩溶角砾岩及砂质泥岩,含石膏、岩盐。上三叠统须家河组一段、三段、五段为灰黑色—黑色页岩、碳质页岩夹煤(邹才能等, 2009)。

7. 侏罗系

下侏罗统珍珠冲组为紫红色、灰绿色、黄灰色等杂色页岩、砂质页岩,夹少量浅灰色、黄灰色薄至中厚层状细至中粒石英砂岩及石英粉砂岩、粉砂岩、页岩。下侏罗统自流井组为深灰色—灰黑色页岩、碳质页岩夹煤,夹介壳灰岩和生物碎屑灰岩。中上侏罗统缺失。

1.1.2 富有机质页岩层系

区内主要发育下震旦统陡山沱组、下寒武统牛蹄塘组、下寒武统明心寺组、下寒武统金顶山组、上奥陶统五峰组、下志留统龙马溪组、下志留统石牛栏组、上二叠统龙潭组、上三叠统须家河组、下侏罗统自流井组等 10 余套富有机质页岩层系(刘树根等, 2008)。其中,下寒武统牛蹄塘组和下志留统龙马溪组富有机质页岩分布广、厚度大、连续性好、区域稳定性强,是目前上扬子地区页岩气研究的最主要目的层系(张大伟等, 2012)。

1. 牛蹄塘组

牛蹄塘组是区内重要的区域性富有机质页岩层系,厚度一般为 120~500m,岩性以灰绿色页岩或黑色碳质页岩为主,包括黑色碳质页岩、碳硅质页岩、黑色结核状磷块岩、黑色粉砂质页岩和石煤等(图 1.3)。底部为硅质岩夹少量碳质页岩,普遍含磷矿,产软舌螺类化石;下部以碳质页岩为主,厚度 30~300m,是主要的

页岩气勘探目的层段(韩双彪等, 2013a); 上部为深灰绿色页岩, 夹粉砂岩条带, 产三叶虫、海绵骨针、软舌螺类化石。牛蹄塘组页岩常含钙质、铁质、泥质结核, 伴生锰矿, 含黄铁矿、重晶石等矿物, 局部可见残留的沥青质(图 1.4)。



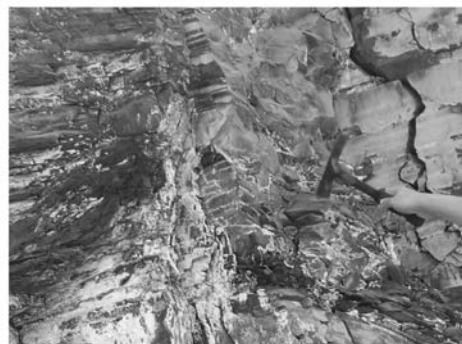
湖北宜昌下寒武统牛蹄塘组黑色页岩地表露头



云南昆阳下寒武统牛蹄塘组黑色页岩地表露头



湘西花垣下寒武统筲竹寺组黑色页岩地表露头



浙江江山下寒武统筲竹寺组黑色页岩地表露头

图 1.3 不同地区下寒武统黑色页岩露头照片

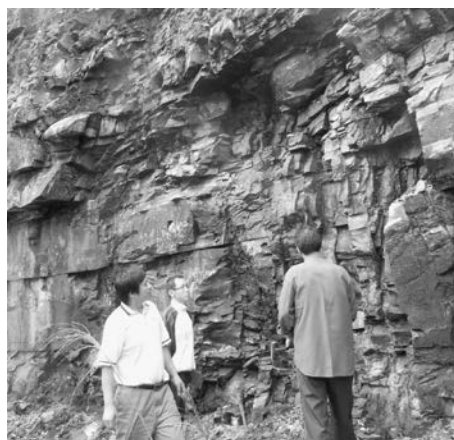


图 1.4 重庆酉阳页岩结核

重庆城口牛蹄塘组剖面揭示页岩厚度 365m, 底为震旦系灰色粉砂质灰岩, 顶为寒武系深灰色粉砂质页岩, 砂质灰岩结核(图 1.5)。从剖面结构上看, 牛蹄塘组下部以黑色碳质粉砂岩为主, 夹黑色灰质泥岩, 黄铁矿发育, 发育水平层理及块状层理, 厚度 175m, 以碳质粉砂岩与碳质泥岩组成的正粒序为特征, 反映了海平面上升, 为深水滞留陆棚沉积。牛蹄塘组上部岩性为黑色碳质页岩及粉砂质页岩, 厚度 50m, 水平层理发育, 见结核, 黄铁矿发育, 反映了一种浅水砂质陆棚沉积环境。贵州瓮安剖面为下寒武统牛蹄塘组, 剖面底部为震旦系灯影组白云岩, 顶部为下寒武统明心寺组灰岩(陈兰, 2005)。目的层露头出露 165m, 真厚度约 105m(图 1.5)。寒武系牛蹄塘组与震旦系分界线以白云岩向硅质岩的转换为界, 这是由于震旦纪末期—寒武纪早期大规模快速海侵导致了牛蹄塘组底部的深水相岩石直接覆盖在灯影组白云岩之上形成一个以快速加深为特征的“淹没不整合面”。105~50m 层段, 岩性以黑色泥岩为主, 黑色薄层碳质泥岩夹少量薄层粉砂质泥岩, 发育块状层理和水平层理, 底部为一套硅质岩沉积。剖面中的薄层粉砂质泥岩和泥质粉砂岩, 可能是由海平面的波动造成的。10~50m 层段, 底部以黑色泥岩为主, 往上逐渐过渡为深灰色泥岩, 同时粉砂岩和泥质粉砂岩含量逐渐增多, 颜色变浅, 在地层剖面上可以看到明显的进积序列, 反映了水体深度变浅的过程, 即海平面的相对下降过程。灯影组发育浅灰—灰色白云岩, 可见明显的风化作用导致的“刀砍纹”现象; 牛蹄塘组底部发育了灰色—深灰色硅质岩, 硬度较大。

2. 五峰组—龙马溪组

五峰组—龙马溪组在上扬子大部分地区均有分布。其中, 五峰组为黑色泥页岩、硅质泥页岩, 局部夹硅质岩, 厚度 5~30m; 下志留统龙马溪组主要为灰黑—黑色页岩、硅质页岩、钙质页岩、含粉砂质页岩、碳质页岩及含碳泥质页岩(图 1.6), 其中下部为灰至灰黑色钙质泥页岩、灰质粉砂质泥页岩、粉砂质碳质泥页岩, 厚度 10~150m; 龙马溪组上部为黄绿色、灰绿色页岩夹粉砂质页岩或粉砂岩, 厚度 100~180m。龙马溪组页岩具有自下而上颜色逐渐变浅、砂质钙质增加的变化特征, 普遍含砂质、粉砂质, 底部多含硅质, 星散状黄铁矿较丰富(郭旭升, 2014)。该套地层以产浮游生物笔石为特征, 可富集成黑色笔石页岩, 局部见放射虫、骨针等硅质生物碎屑(刘树根等, 2011)。

重庆彭水鹿角剖面龙马溪组出露完整, 顶底均可见[图 1.7(a)], 下段以黑色页岩、黑色粉砂质页岩为主, 中部以深灰色页岩、深灰色粉砂质页岩和灰色泥质粉砂岩为主, 上部以灰色页岩、浅黄色泥质粉砂岩和粉砂岩为主。剖面向上粉砂质含量明显增多, 黑色粉砂质页岩中含极薄层的浅灰色粉砂岩, 且从宏观上看岩石多为中、厚层状, 与底部薄层状页岩形成了鲜明的对比, 粗粒物质的增多和岩石

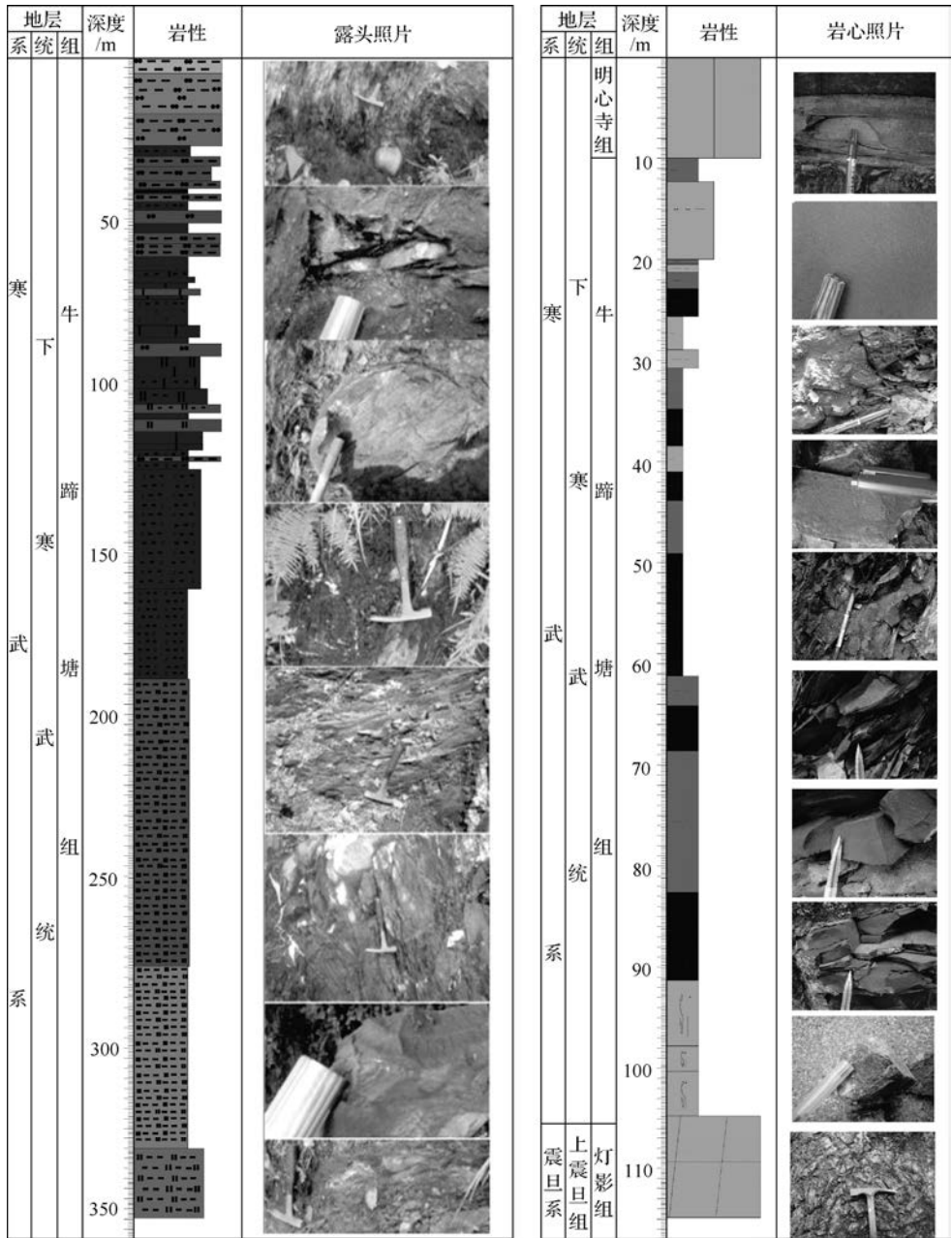


图 1.5 重庆城口—贵州瓮安牛蹄塘组剖面综合柱状图



重庆彭水龙马溪组黑色页岩地表露头



四川长宁龙马溪组黑色页岩地表露头



湖北宜昌龙马溪组黑色页岩地表露头



贵州道真龙马溪组黑色页岩地表露头



湖南张家界龙马溪组黑色页岩地表露头

图 1.6 不同地区龙马溪组黑色页岩露头照片

颜色的变浅,反映了沉积水动力条件的增强和水体还原性的减弱(张琴等,2013)。在剖面的上部,岩石粉砂质的含量进一步增多,且粉砂岩的纹层厚度进一步增大,沉积层理由水平层理向波状层理和平行层理过渡,岩石颜色同下部地层相比进一步变浅,变为灰色和浅灰色。在剖面的顶部即龙马溪组下段和上段的分界处,主

要以发育波状层理、交错层理和平行层理的浅黄色粉砂岩为主，反映了沉积环境由深水到浅水的变化。湖南龙山红岩溪剖面龙马溪组地层出露完整，底部为五峰组硅质泥岩和宝塔组、临湘组灰岩，出露长度约 200m，真厚度约 70m[图 1.7(b)]。

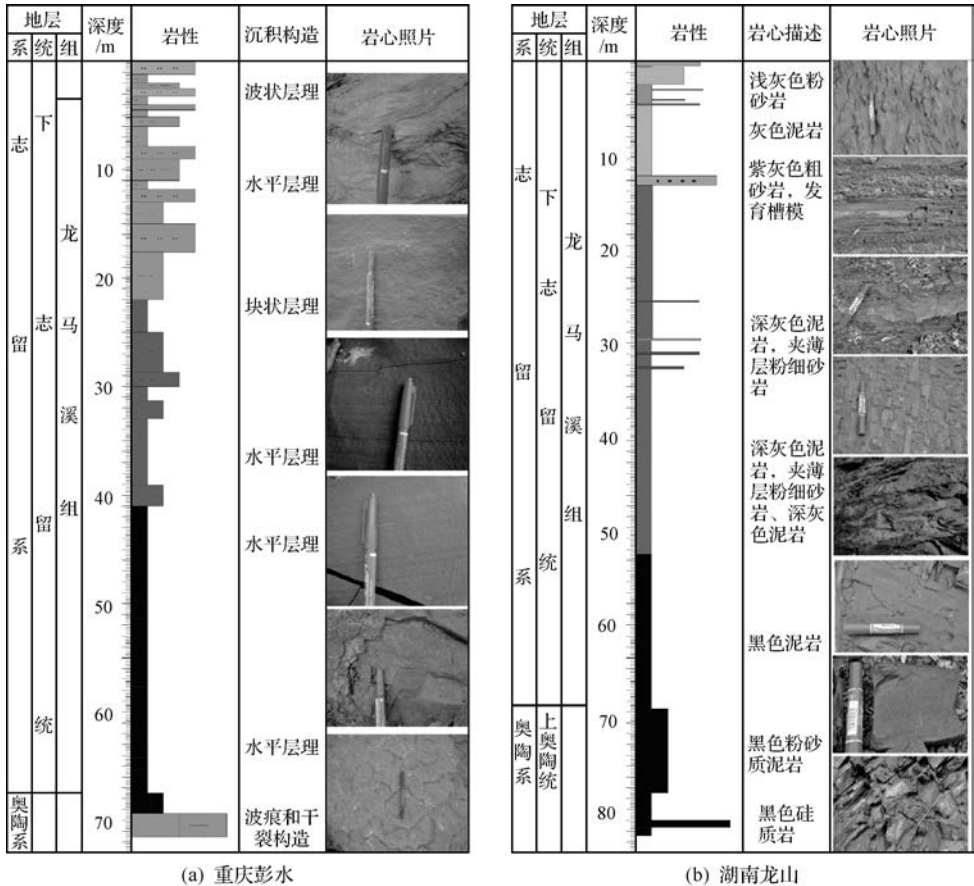


图 1.7 重庆彭水和湖南龙山龙马溪组剖面柱状图

根据区域地质资料和露头岩性等资料，确定下志留统龙马溪组底部以奥陶系的黑色硅质泥岩和瘤状灰岩为界，顶部以出现黄绿色的粉砂岩(岩性、岩石的转变面)为界。54~70m 层段，岩性以黑色泥岩、黑色碳质泥岩为主，夹少量薄层粉砂质泥岩，发育块状层理和水平层理，页理也非常发育，底部黑色泥岩中含有大量笔石[图 1.7(b)]。0~54m 层段，底部以灰色泥岩为主，往上逐渐变化为深灰色泥岩，与此同时粉砂岩和泥质粉砂岩含量逐渐增多，同时泥岩及粉砂岩的颜色由深灰色逐渐变为浅，值得一提的是，该剖面中上部暗色泥岩中发育了厚度 0.05~2m 的粉砂岩，发育槽模构造，这与渝页 1 井岩心中所见到的变形构造共同证明这套粉砂岩为浊积成因，宏观的泥岩与粉砂岩混杂接触在微观下也有很好的体现。