

2023 届硕士研究生学位论文

黔北地区矿物组分对页岩储层特性
影响研究

2023 年 05 月

黔北地区矿物组分对页岩储层特性影响研究

摘要

黔北地区是贵州省非常规天然气重点勘探开发区域之一，其高效开采对加快我国实现“碳达峰、碳中和”远景目标、能源产业结构调整、优化能源供需战略储备、深化能源供给侧结构性改革、推进国家经济、科学技术、研发创新和民生需求高质量可持续发展具有重大意义。矿物组分在页岩储层中扮演着不可或缺的作用，本文以黔北地区页岩储层为研究对象，以野外实测踏勘、地质与测井资料收集和文献理论整理为出发点，通过地化、物性、物理、数值试验和理论相结合的研究方法获取黔北地区矿物组分等地化参数、孔隙度等物性参数和弹性模量等力学参数，研究黔北地区矿物组分对页岩储层储集特性、力学特性和应力敏感性的影响，得到以下研究成果：

1) FC-1 井、TM-1 井、TMY-1 井、TX-1 井、CY-1 井和露头样品的黏土矿物含量与石英、长石和黄铁矿累计含量呈负相关，其与碳酸盐类矿物相关性不大；黏土矿物成分中以伊利石为主，伊利石含量与混层矿物含量呈负相关；碳酸盐类矿物含量与 R_0 和埋深呈负相关，相关性为 0.6~0.8，与 TOC 相关性不大；脆性矿物含量与 TOC、 R_0 和埋深呈正相关，相关性为 0.2~0.8；黏土矿物含量与 TOC、 R_0 和埋深呈负相关，相关性为 0.5~0.8；埋深与 R_0 呈正相关，相关性为 0.8~1.0，但与 TOC 含量相关性不大；TM-1 井、TX-1 井和 CY-1 井的相关性高，具有共同集合领域，主要受黄铁矿、碳酸盐类和黏土矿物含量影响；FC-1 井与 TM-1、TX-1 和 CY-1 井无共同集合领域，相关性差，主要受石英+长石+黄铁矿、埋深和有机成熟度 R_0 的影响。

2) 当页岩脆性指数低，黏土矿物含量高时，应力—时间变化曲线平缓，抗压强度、抗拉强度和弹性模量小，声发射信号少且强度低；相反，应力—时间变化曲线曲折且斜率大，抗压强度、抗拉强度和弹性模量大，声发射信号多且强度高；巴西劈裂试验下，yy-1、2 和 3 系列裂纹扩展模式可归纳为轴向贯穿型、侧面滑脱型和侧面滑脱+底部破裂型；单轴压缩试验下，yy-1、2 和 3 系列裂纹扩展模式可总体归纳为轴向贯穿型，主破裂伴生次裂纹，次裂纹转向主破裂，主破裂随脆性指数增加而增多；数值模拟试验表明裂纹扩展路径可分为萌生、扩展和完

全破坏三个阶段， 裂纹萌生、扩展和破坏均在页岩基质或石英与页岩基质交界处萌生扩展； 裂纹比例总体随石英含量的增加而增加， 其拟合度为 0.684。

3) 研究区页岩储层渗透损伤率和应力敏感性分别判定为中等偏强和偏强， 渗透损伤率和应力敏感性系数与有效应力分别呈正相关和负相关， 当有效应力为 7MPa 时， 是影响黔北地区页岩储层应力敏感性系数和渗透损伤率的拐点值； 从石英含量角度分析， 65%的石英含量是影响页岩储层应力敏感性系数和渗透损伤率的临界值； 渗透损伤率和应力敏感性系数随石英含量和弹性模量的增加而减小， 随长石和黏土矿物含量的增加而增大， 随方解石和铁白云石含量的增加而先增大后减小， 而黄铁矿含量对渗透损伤率和应力敏感性系数的影响不明显； 当脆性矿物含量较大时， 以弹性变形为主， 裂纹扩展较多， 导致应力敏感性系数较低； 反之， 当黏土矿物含量较高时， 裂纹主要沿着薄弱带扩展， 贯穿整个样品， 从而导致应力敏感性系数越高。

关键词：页岩储层； 矿物组分； 储集特性； 力学特性； 应力敏感性

Study on Influence of Mineral Components on the Properties of Shale Reservoirs in the Northern Guizhou

ABSTRACT

The unconventional natural gas in the northern Guizhou province is one of the key areas for exploration and development, and its efficient exploitation with enormous significance for China's high-quality and sustainable development in accelerating the achievement of "peak carbon and carbon neutrality", restructuring the energy industry, optimizing the strategic reserve of energy supply and demand, deepening the structural reform of the energy supply side, and promoting the national economy, science and technology, R&D innovation, and people's livelihood needs. The mineral components play an indispensable role in shale reservoirs, this paper takes shale reservoirs of northern Guizhou province as the research object and based on the field survey, geological and logging data collection, and theoretical literature as a starting point. The geochemical parameters such as mineral components, physical parameters such as porosity, and mechanical parameters such as elastic modulus are obtained through the combination of geochemical, material property, physical, numerical test, and theoretical research methods to study the influence of mineral components on the reservoir characteristics, mechanical properties, and stress sensitivity of shale reservoirs in northern Guizhou province, and the following research results were obtained

- 1) The clay mineral contents of wells FC-1, TM-1, TMY-1, TX-1, CY-1, and outcrop samples are negatively correlated with the cumulative quartz, feldspar, and pyrite contents, which are not significantly correlated with carbonate minerals. The clay mineral composition is dominated by illite, and the illite content is negatively correlated with the mixed layer mineral content. The carbonate mineral content is negatively correlated with both R_0 and depth of burial, with correlations of 0.6 to 0.8, which is not significantly correlated with TOC. The brittle mineral content is positively correlated

with TOC, R_0 , and depth of burial, with correlations ranging from 0.2 to 0.8. The clay mineral content is negatively correlated with TOC, R_0 , and depth of burial, with correlations ranging from 0.5 to 0.8. The depth of burial is positively correlated with R_0 , with correlations of 0.8 to 1.0, but not with TOC content. The high correlation between wells TM-1, TX-1, and CY-1 with common pooling domains, is mainly influenced by pyrite, carbonates, and clay mineral content. The well FC-1 has no common pool area with wells TM-1, TX-1, and CY-1 is poorly correlated and mainly influenced by the cumulative quartz, feldspar, and pyrite contents, depth of burial, and organic maturity R_0 .

2) When shale has a low brittleness index and a high clay mineral content, the stress-time variation curve is flat, the compressive strength, tensile strength, and modulus of elasticity are small, and the acoustic emission signal is low and of low intensity. Conversely, a large slope of the stress-time variation curve, the compressive strength, tensile strength, and modulus of elasticity are high, and a high number and intensity of acoustic emission signals. Under the Brazilian splitting test, they- 1, 2, and 3 series fracture extension patterns can be categorized as axial penetration, lateral slip, and lateral slip + bottom rupture. Under uniaxial compression testing, the fracture expansion pattern of the yy- 1, 2, and 3 series can be generally summarized as an axial penetration type, with primary rupture accompanied by secondary rupture, secondary rupture shifting to primary rupture, and with primary rupture increasing with increasing brittleness index. Numerical simulations show that the paths of fracture extension are divided into emergence, extension, and destruction, all of which occur at the junction of the shale matrix or quartz and shale matrix. An overall increase in the proportion of fractures with increasing quartz content, with a fit of 0.684.

3) The permeability impairment rate and stress sensitivity of shale reservoirs in the study area is judged to be moderately strong and strong, respectively, and the permeability impairment rate and stress sensitivity factor are positively and negatively correlated with the effective stress, respectively. When the effective stress is 7MPa, it is the inflection point value affecting the stress sensitivity factor and permeability impairment rate of the shale reservoir in northern Guizhou province. Analyzed from the

perspective of quartz content, quartz content of 65% is the critical value affecting the stress sensitivity factor and permeability impairment rate of shale reservoirs. The permeability impairment rate and stress sensitivity factor decrease with increasing quartz content and modulus of elasticity, increase with increasing feldspar and clay mineral content, increase and then decrease with increasing calcite and ankerite content, while the effect of pyrite content on the permeability impairment rate and stress sensitivity coefficient is not significant. The greater the brittle mineral content of shale, the more likely it is to undergo brittle damage and more crack extension during compression with predominantly elastic deformation, resulting in a lower stress sensitivity factor. Conversely, the higher the stress sensitivity factor.

Keywords: Shale reservoirs, Mineral components, Reservoir characteristics, Mechanics characteristics, Stress sensitivity

目 录

第一章 绪论	1
1.1 选题背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 页岩储层储集特性研究现状	3
1.2.2 页岩储层力学特性研究现状	4
1.2.3 页岩储层应力敏感性研究现状	5
1.2.4 研究现状评述	7
1.3 研究内容与技术路线.....	7
1.3.1 研究内容	7
1.3.2 研究目标	8
1.3.3 拟解决关键科学问题	8
1.3.4 研究方案及技术路线	9
第二章 区域地质背景.....	11
2.1 区域地质构造.....	11
2.2 区域沉积环境及地层分布.....	12
2.2.1 区域沉积环境	12
2.2.2 区域地层分布	12
2.3 区域构造演化.....	15
2.3.1 中元古代晚期-志留纪发展阶段.....	15
2.3.2 泥盆纪-晚三叠世中期发展阶段.....	15
2.3.3 中-新生代（自晚三叠世晚期以来）发展阶段	16
2.4 本章小节.....	16
第三章 页岩储层储集特性分析	17
3.1 储层岩矿特征分析.....	17
3.1.1 储层矿物组分分析	17

3.1.2 储层参数相关性分析	18
3.1.3 储层性质差异性分析	20
3.2 储层物性特征分析.....	21
3.2.1 孔隙特征	21
3.2.2 裂缝特征	23
3.2.3 孔渗定量特征	23
3.3 本章小结.....	25
第四章 页岩储层力学特性分析	27
4.1 样品与理论.....	27
4.1.1 样品来源	27
4.1.2 样品试验	28
4.1.3 计算理论	28
4.2 试验结果.....	29
4.2.1 矿物组分	29
4.2.2 巴西劈裂	29
4.2.3 单轴压缩	32
4.3 数值试验.....	35
4.3.1 数值软件	35
4.3.2 试验理论	35
4.3.3 数值建模	39
4.3.4 模拟结果	39
4.4 本章小节.....	42
第五章 页岩储层应力敏感性分析	45
5.1 样品与理论.....	45
5.1.1 样品来源	45
5.1.2 样品试验	45
5.1.3 计算理论	47
5.2 试验结果.....	47

5.2.1 页岩渗透率和孔隙度影响因素	47
5.2.2 应力敏感性系数和渗透损伤率	49
5.2.3 页岩渗透损伤率和应力敏感性系数影响因素.....	52
5.3 讨论.....	54
5.3.1 力学参数对页岩渗透损伤率和应力敏感性系数影响.....	54
5.3.2 初始有效应力下的孔隙度对页岩渗透损伤率和应力敏感性系数影响 ...	57
5.3.3 应力-应变及裂纹扩展对页岩渗透损伤率和应力敏感性系数影响	58
5.4 本章小节.....	59
第六章 结论与展望.....	61
6.1 结论.....	61
6.2 展望.....	62
致 谢.....	65
参考文献	67
附 录.....	77
原 创 性 声 明	79
关于学位论文使用授权的声明	79

第一章 绪论

1.1 选题背景及意义

随着人类对美好生活质量需求和国家能源结构调整的不断深化，世界各国加快了能源勘探开发的脚步。但是，世界能源分布差异化和不均匀化进一步促进各国常规能源勘探开发和产业合作的同时，也加大了经济冲突、常规能源内耗短缺、环境恶化和全球变暖等问题^[106]。我国经济快速发展、美好生活需求日益提升和生态文明建设不断优化，常规油气能源出现短缺和污染严重等问题已无法满足经济高质量可持续发展、战略储备和“碳达峰、碳中和”远景目标^[107]。因此，我国必须加快能源产业结构调整、优化能源供需战略储备、深化能源供给侧结构性改革、推进国家经济、科学技术、研发创新和民生需求高质量可持续发展。

美国页岩气的成功开采和商业化转型，结束了常规油气供需不足的困境，打破了非常规天然气难以开采的寒冬，标志着世界能源迈入页岩气革命时代^[2, 4, 11]。截止 2020 年，世界前五个国家页岩气探明地质资源量依次为美国、阿根廷、阿尔及利亚、中国和加拿大，其探明地质储量依次为 31.6、22.7、20.0、17.7 和 16.2 亿立方米；其中页岩气开采量国家依次为美国、中国、阿根廷和加拿大，开采量分别为 7330.0、200.4、103.0 和 55.0 亿立方米（图 1-1）^[72]。页岩气不仅带动了美国能源储备和财政收入，还创造了大量的就业岗位提高就业率^[41, 67]。预计到 2035 年，美国油气基础设施建设将贡献 $1.50\sim 1.89\times 10^{12}$ 美元，并且在 2017~2035 期间，预计因油气基础设施建设提供 $82.8\sim 104.7\times 10^4$ 个就业岗位（含间接产生的就业岗位）（American Petroleum Institute, 2017）。同时，2010 年美国由天然气进口国转变为出口国，并成功取缔俄罗斯第一大天然气生产国的头衔，扭转了世界能源产业结构和供需分配^[105]。

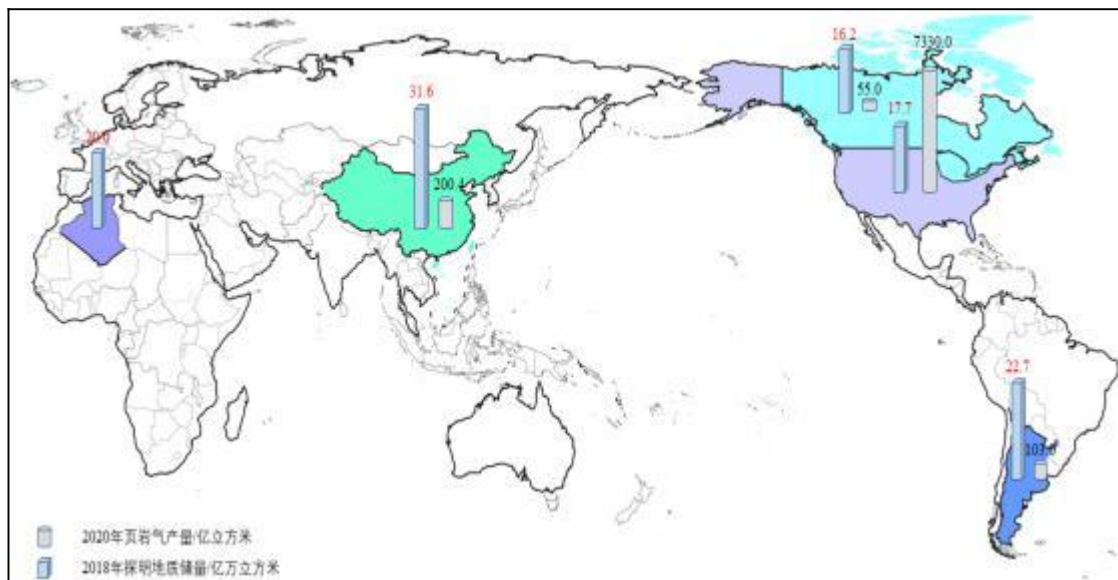


图 1-1 2020 年世界主要国家页岩气探明地质资源量和开采量

我国页岩气地质资源储量预测为 $5.70 \times 10^{13} \sim 2.44 \times 10^{14} \text{m}^3$ ，技术可开采为 $1.03 \times 10^{13} \sim 4.70 \times 10^{13} \text{m}^3$ ，储量探明位居世界第一^[80]。但相较于美国，我国页岩气勘探开发认识基础、理论研究和 technical 实践均起步较晚、且产量低滞后严重（图 1-1）^[102, 109]；并且含气页岩储层地质构造条件复杂程度、埋藏深度和赋存方式与美国截然不同，不能模板化照搬一蹴而就，因此我国页岩气勘探开发仍处于初步探索阶段^[56, 57, 110]。但近年来，中国页岩气勘探开发工作获得重要突破，先后设立了涪陵、长宁—威远和昭通等国家级页岩气示范区，提交探明地质储量 $5.44 \times 10^{11} \text{m}^3$ ，2016 年页岩气产量为 $7.8 \times 10^9 \text{m}^3$ ，跃居世界前三，实现了工业化生产^[46, 47]；2018 年，重庆涪陵焦石坝地区海相页岩气成功规模化开采使得我国成为世界第三个页岩气商业化开采的国家^[108]。通过地质探勘发现海相含气页岩储层主要分布在四川盆地边缘，主要有川南区、川东南区、渝东北区、渝东南区以及贵州省北部黔北地区（图 1-2）。

贵州省非常规天然气地质资源储量丰富，其中页岩气地质资源储量为 8.67 万亿立方米，占全国 12.79%，可采资源量为 1.95 万亿立方米，占省内非常规天然气的 75.4%（贵州省能源局，2021）。关于《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》中把深入推进能源革命，建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系摆在重要位置，并加快推进页岩气勘探开发。贵州省能源局和发展改革委在《贵州省“十四五”油气产业发展规划》中也明确提出，加快省内非常规天然气勘探开发，响应国家“碳达峰、碳中和”重大战略号召，推进能源结构调整和满足市场需求。

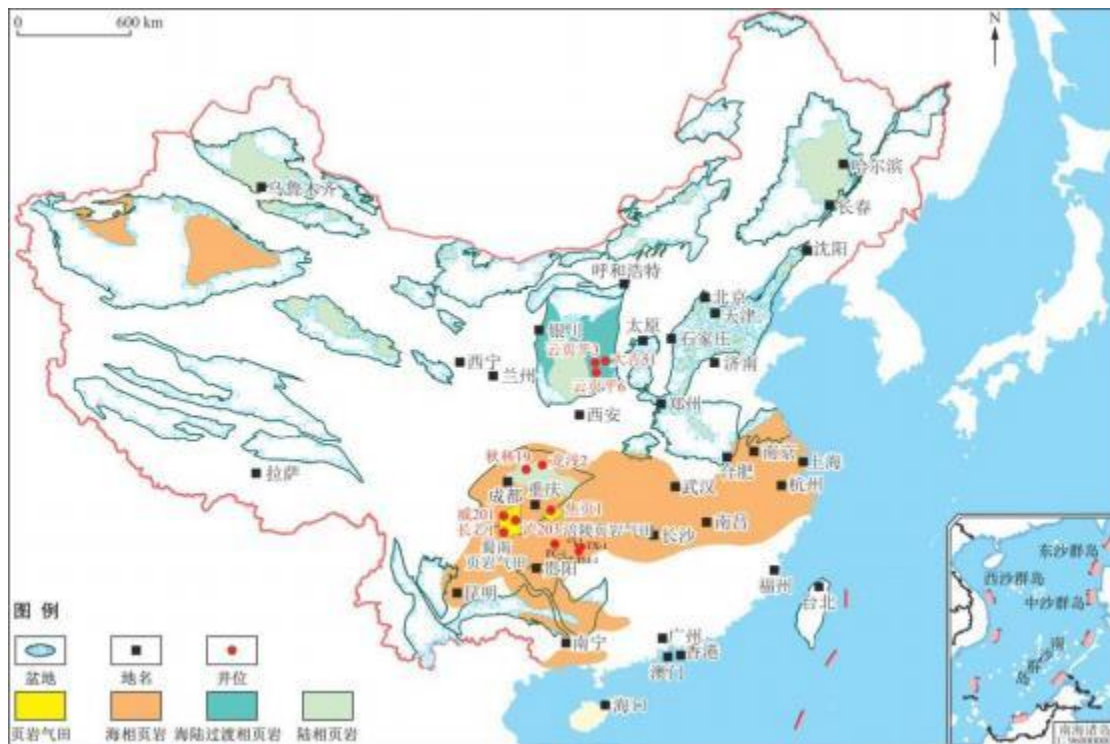


图 1-2 我国页岩储层分布及主要产区（据邹才能等^[108]，2021，有修改）

黔北地区作为页岩气潜在勘探开发的有利区,其页岩气资源丰富,含气页岩储层主要分布在下寒武统牛蹄塘组,具有脆性矿物含量高、热成熟度高、富含有机质和储层厚度大等特点,是海相页岩气勘探开发的有利储层^[86]。但是,由于黔北地区含气页岩储层地质条件复杂、埋深大和超低孔低渗等条件限制,导致页岩气开发成本较高和开采效率低下^[84]。页岩气开采受多因素影响,而矿物组分在其中的意义非凡,矿物组分不仅决定着页岩气的生烃演化,还控制着孔隙、天然裂缝的形成^[19, 62]。黔北地区含气页岩储层中脆性矿物含量相对于美国 Barnett 盆地页岩储层较高,更有利于页岩储层体积压裂改造,增大气体运移和扩散路径,提高开采效益^[86];黏土矿物内部孔隙表面积较大,具有很强的吸附性能,为页岩气提供储集空间,但页岩储层黏土矿物含量增大导致其塑性软化不利于压裂改造,阻碍气体运移,影响开采效率^[62]。因此,通过研究黔北地区矿物组分影响页岩储层特性可以更进一步加深复杂构造区页岩气富集机理及压裂起裂机制的认识。

针对黔北地区页岩储层矿物组分性质和含量差异性,通过野外踏勘、文献搜集、理论研究、数值模拟和物理实验相结合的研究手段,开展黔北地区矿物组分对页岩储层特性影响研究。通过野外踏勘、文献和资料搜集获取黔北地区地质构造特征;通过物理实验和文献资料搜集获取页岩储层物性参数和矿物组分,分析研究区页岩储层储集特性,得到页岩储层岩矿、储层参数、储层性质和物性特征,定量表述孔渗特征,揭示黔北地区下寒武统牛蹄塘组不同区域井矿物组分与储层储集特征的关系;通过物理试验获取页岩储层矿物组分、力学参数和声发射特征,分析研究区页岩储层力学特性和裂隙扩展特征,揭示黔北地区矿物组分与页岩储层力学特性和声发射特征的关系;通过物理试验增加有效应力模拟页岩储层覆压状态,获取覆压下页岩储层孔隙度和渗透率变化特征,分析研究区页岩储层应力敏感性特征,揭示黔北地区矿物组分与下寒武统牛蹄塘组页岩储层应力敏感性的关系,并进一步讨论页岩储层应力敏感性影响因素。研究结果对黔北地区含气页岩储层储集有利区、开发有利区和易压裂改造区具有重要参考价值,因此研究黔北地区矿物组分与页岩储层特性关系对于页岩气勘探开发具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 页岩储层储集特性研究现状

矿物组分是页岩储层岩矿特征中极其重要的部分,是储层研究的基础;矿物组分直接影响页岩气赋存方式、孔隙裂缝发育密度、储层压裂及裂缝扩展路径等^[12, 30]。页岩储层矿物组分除常见的黏土(伊利石、蒙脱石和高岭石)和石英矿物外,还混杂有少量长石、云母、方解

石和黄铁矿等矿物。王濡岳等研究黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩储层得出石英含量与 TOC 含量总体呈正相关, 当 TOC 含量小于 6.5% 时, 石英含量与 TOC 含量呈正相关, 且相关性好, 但当 TOC 含量大于 6.5% 时, TOC 含量对页岩储层塑性贡献率明显大于石英含量对页岩储层脆性贡献速率, 且页岩储层脆性程度随石英含量与 TOC 含量的增加出现降低趋势^[85]; Xi 等和 Ding 等也提出页岩储层中脆性矿物含量越高, 储层脆性越强, 易产生天然裂缝和诱导裂缝, 有利于储层体积压裂改造, 增加页岩气储集空间和渗流通道, 并且脆性矿物含量还控制着页岩储层中-宏孔发育, 但对页岩气吸附能力的贡献可以忽略不计^[5, 38]; 梁峰等研究页岩储层储集特征得出深水棚相黄铁矿含量较高, 且黄铁矿与孔隙体积相关性较好, 黄铁矿发育对页岩孔隙发育具有积极作用^[74]; 而吉利明等认为碳酸盐类矿物容易在页岩成岩和生烃演化过程中被酸性流体溶解形成溶蚀孔隙, 增大孔隙体积提供储集空间; 黏土矿物是页岩矿物组分中的重要成分, 与孔隙体积呈负相关, 但黏土矿物内部的孔隙比表面积较大, 因而具有较强的吸附性能, 为页岩气的赋存提供大量的空间, 有利于页岩气富集, 是决定页岩气吸附赋存形态的一个重要因素^[62]; 熊亮等在页岩含气量方面研究得出其与比表面积、孔隙度和 TOC 含量呈显著的正相关, 但与黏土矿物呈负相关, 页岩储层孔隙度和比表面积对含气量的贡献率大于黏土矿物含量^[92]。同样, 邱振等认为有机质在页岩储层中扮演的角色不可或缺, 是页岩储层评价的重要参数^[77]; 页岩含气储层中含有大量的有机质, 有机质丰度与成熟演化度对页岩气资源量有重要影响^[92]; 有机质热演化度是储层物性的重要评价指标, 热演化度过高和过低均不利于有机质孔隙的发育, 蔡苏阳等研究表明页岩储层中微-纳米孔隙体积随热演化度的增加呈现出先增加后减小的趋势^[49]; 页岩气吸附解析实验结果表明, 有机碳含量与页岩气生产率呈良好的正相关^[84]; Sun 等研究得出: 有机碳含量与石英含量、孔隙体积呈正相关^[27], 说明在相同地质环境条件下, 富有机质页岩比贫有机质页岩具有更多的微孔隙体积, 能吸附储藏更多的页岩气, 影响吸附气含量的关键因素是有机碳含量的高低, 同时也得出脆性矿物含量较大的储层层段不仅有利于压裂改造诱导裂缝形成, 而且还是页岩气藏富集的关键层段, 从而推断出有机质富集层段可作为页岩储层甜点区域或甜点层段划定及后期压裂改造开采提供可行性参考依据^[86], 但谷阳等研究表明在过高 TOC 含量的页岩储层层段脆性程度较低, 储层裂缝发育密度较差, 尤其是当 TOC 含量高于 6.5% 时, 因此也不能说明有机质含量越高的地方越有利于储层体积改造^[55]。

1.2.2 页岩储层力学特性研究现状

页岩储层裂缝发育程度主要体现在不同岩性岩石力学性质和破裂强度的差异, 在同等应力条件下, 高弹模低泊松比的页岩储层脆性大, 抗张拉强度小, 更易形成裂缝^[53]。脆性矿物

含量、黏土矿物含量、TOC 含量和页岩力学性质之间存在密不可分的关系^[86]，王濡岳等从岩性上看，碳质页岩的黏聚力和内摩擦角较小，在水平挤压应力或者拉张应力下容易沿着层理发生剪切破裂，形成低角度滑脱裂缝，而相对于碳质页岩的硅质页岩来说高弹模、低泊松比和低抗压强度的力学特征比较明显，容易在构造应力作用下形成构造裂缝^[87]；而从矿物组分上看，当页岩储层脆性矿物（石英、黄铁矿等）含量越高，储层脆性特征越明显，在外力改造下越容易形成复杂网络诱导裂缝^[88]；相反，黏土矿物含量较大时，储层表现出韧性和低弹模高泊松比的力学特征，压裂改造形成以平面裂缝为主，不利于页岩气高效开采^[89]；弹性模量分别随石英含量和黏土矿物含量的增加而增加和降低，泊松比分别随黏土矿物含量和石英含量和的增加而增加和降低，但研究显示，并非石英含量越高，储层弹性模量越高，当石英含量小于 65%时，弹性模量随石英含量的增加而增加；当石英含量大于 65%时，弹性模量随着石英含量的增加而减小；同样的，针对黏土矿物也是如此，黏土含量为 13%时为弹性模量的拐点^[85]。Sun 等也认为黏土矿物抗压强度低，页岩储层中黏土矿物含量较高的层段缺少抗压矿物颗粒，容易受上覆地层的压实作用和地质构造作用下被压实，导致黏土矿物中的大孔和中孔孔径减小，形成微孔或中孔，造成页岩基质中的孔隙体积急剧减小^[25]；从有机碳含量来看，当 TOC 含量小于 6.5%时，页岩弹性模量与 TOC 含量呈正相关，当 TOC 含量大于 6.5%时，弹性模量与 TOC 含量呈负相关^[83]；Zhang 等从力学性质来看，页岩储层裂缝发育程度主要体现在不同岩性岩石力学性质和破裂强度的差异，在同等应力条件下，高弹模低泊松比的页岩储层脆性大，抗张拉强度小，更易形成裂缝^[43]；并且，Yin 等也认为脆性矿物含量、黏土矿物含量、TOC 含量和页岩力学性质之间存在密不可分的关系^[40, 86]；Geng 等及其他研究者分别从巴西劈裂^[81]、单轴压缩^[63, 65, 94]和三轴压缩^[8, 22]等试验研究层理、围压和渗透压对页岩力学性质的影响得出：单轴压缩下页岩的抗压强度因层理效应存在明显的各向异性特征，在层理为 0° 和 90° 最大，30° 时最小^[93]；考虑层理效应的页岩巴西劈裂及声发射试验研究表明其破裂过程分为压密、弹性和破坏三个阶段，抗拉强度、劈裂模量和峰值强度存在各向异性特征，层理角度为 30° 时最明显，90° 影响最小，声发射和能量特征随层理角度的增加而加强，说明声发射特征能很好地反映岩石抗拉伸破坏程度^[61]；同时，通过三轴压缩试验研究渗透压-应力耦合作用下页岩渗透率变化特征得出相同渗透压差、不同围压下，渗透率和峰值强度随围压的增大而减小，相同围压，不同渗透压下，渗透率和峰值强度分别随渗透压差的增大而增大和减小^[111]。

1.2.3 页岩储层应力敏感性研究现状

页岩储层应力敏感程度为固定有效应力下的页岩渗透率与初始渗透率的比值或者各类

岩石压缩系数指标^[3, 23], 郝海彦和何金钢等提出页岩储层应力敏感性定量评价是当前油气勘探开发公认关键工程难题, 且其影响因素主要有储层温度、初始渗透率、储层流体类型、矿物组分和渗流通道类型^[58, 60], 董文强研究得出页岩渗透率与温度呈指数关系, 渗透率损害率随温度升高而降低^[51]; 赵立翠等认为初始渗透率越高, 页岩储层应力敏感性越强, 温度对应力敏感性影响越大^[101]; 而李晶晶等认为储层流体类型表现为在水-岩作用后, 页岩储层应力敏感程度从高到低依次为碱敏、矿化度降低的盐敏和水敏, 黏土矿物在矿化度降低的盐敏和水敏过程中水化膨胀^[71], 并在裂缝中发生微粒运移, 使得裂缝表面更加光滑, 而碱敏过程流体不仅与裂缝表面发生水化作用, 还造成碱液侵蚀, 加剧了页岩储层应力敏感程度, 同时王巧智提出页岩裂缝中支撑剂的嵌入和破碎是页岩储层应力敏感性程度减弱的主要原因, 说明裂缝中支撑剂的优选和合理布置是降低页岩储层应力敏感程度的关键^[82]; 杜书恒等考虑变应力条件下页岩孔缝尺寸及渗透率下降规律等问题定量评价页岩储层应力敏感性得知: 在相同有效应力下, 储渗空间初始长短轴比值、杨氏模量及泊松比共同控制页岩储层应力敏感程度, 裂缝发育型页岩长短轴的应力敏感程度高于裂缝不发育型, 且弹性模量越小, 两者敏感性程度差异性越大^[54]; 张骞和岳晓晶通过增加净围压的方式模拟覆压下页岩孔渗变化规律定量评价页岩储层应力敏感性可知: 页岩孔隙度和渗透率随有效应力增加服从负指数函数规律降低, 且孔隙的孔径随有效应力的增加而减小, 反映孔径对孔隙度的协同效应, 当有效应力小于 5MPa 时, 页岩储层应力敏感性系数变化较大, 应力敏感性较强, 反之当有效应力大于 5MPa 时, 页岩储层应力敏感性系数变化较小, 应力敏感性较弱, 渗透率损害率随有效应力增加而增加缓慢, 说明有效应力为 5MPa 是页岩储层应力敏感性变化的拐点^[97], 而 Wu 等研究得出黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩储层应力敏感性变化的有效应力拐点为 7MPa^[36]; 张烨等通过层理效应研究页岩储层敏感性可知: 页岩渗透率随层理角度的增加而明显降低, 平行页岩层理渗透率是垂直层理渗透率的三倍, 平行层理的应力敏感性更强, 且相对高于垂直层理^[98]; 朱维耀等在矿物组分对页岩储层应力敏感性研究方面可知: 黏土矿物含量较高的页岩在外力作用下更容易发生应力敏感性且不容易恢复呈不可逆性^[104], 张烨等也认为方解石填充页岩天然裂缝可整体提高页岩渗透率 2~3 个数量级, 且天然裂缝闭合型页岩应力敏感性高于张开型, 页岩储层中泥质含量越高, 弹性模量越低, 应力敏感性系数越大^[98], 并且游利军等研究得出页岩初始裂缝越宽, 储层应力敏感性越强, 同时氧化液也会加剧页岩中有机质和黄铁矿等还原矿物氧化溶蚀, 使得页岩中孔缝溶扩, 增大渗透率^[95], 而且曹杰等认为裂缝表面矿物选择性氧化溶蚀诱发孔缝溶扩, 使得裂缝在外力施压闭合过程中仍保持相对较高的渗流能力, 降低了页岩储层应力敏感性损伤程度^[50]。

1.2.4 研究现状评述

综上所述,学者们在研究页岩储层储集特性、力学特性和应力敏感性方面做了大量工作,并奠定了坚实的理论基础和技术指导。矿物组分在页岩储层中扮演者不可或缺的角色,前人主要集中于矿物组分与页岩储层孔隙、裂缝和层理之间的关系,但鲜有提及矿物组分与不同井位相同地质年代分组的页岩储层储集特性、矿物组分与页岩储层力学特性和矿物组分与页岩储层应力敏感性相关方面的研究报道。因此,以黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩储层为对象,研究黔北地区矿物组分对页岩储层特性的作用机理,厘清矿物组分与页岩储层储集特性、力学特性和应力敏感性的关系,进一步分析对其产生的影响。

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 研究内容

1) 黔北地区矿物组分对下寒武统牛蹄塘组页岩储层储集特性影响研究

获取黔北地区不同井和井位的下寒武统牛蹄塘组页岩样品,采用孔隙度和渗透率测定仪测定其孔隙度和渗透率物性参数,定量分析页岩储层孔渗特征;利用氩离子抛光扫描电镜观察页岩孔隙结构和微裂缝特征,定性分析页岩储层物性特征;运用 X 射线衍射全岩分析(XRD)测试等获取矿物组分等地化参数;结合 Pearson 相关系数定量分析页岩储层矿物组分与热演化成熟度等参数的相关性;基于主成分分析(PCA)理论探讨相同地质年代分组的页岩储层间的性质、相关性和影响因素。

2) 黔北地区矿物组分对下寒武统牛蹄塘组页岩储层力学特性影响研究

通过野外勘查获取黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩储层露头样品进行物理试验,采用单轴压缩、巴西劈裂和声发射信号采集仪测定页岩力学参数、声发射特征和能量特征;利用 X 射线衍射全岩分析(XRD)获取黔北页岩储层矿物组分地化参数,定量分析矿物组分与页岩力学特性和声发射、能量演化特征的关系;运用 *RFP*A 数值模拟软件研究矿物组分与页岩裂纹扩展模式的关系,基于分形理论量化裂纹扩展路径。

3) 黔北地区矿物组分对下寒武统牛蹄塘组页岩储层应力敏感性影响研究

采用含 N_2 的 FYKS-2 高温覆压孔渗测定仪测量黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩的渗透率和孔隙度,通过增加净围压的方式模拟页岩储层覆压下页岩孔渗变化规律,探讨页岩储层孔渗影响因素;利用 X 射线衍射全岩分析(XRD)获取黔北页岩储层矿物组分地化参数,定量分析矿物组分与页岩储层孔渗特征、应力敏感性和渗透损伤率的关系;运用 INSTRON 1346 电液伺服控制材料试验机(200T)对页岩进行单轴压缩试验,讨论页岩储层应力敏感

性的影响因素。

1.3.2 研究目标

本课题选择黔北地区页岩储层作为研究对象，围绕黔北地区矿物组分影响页岩储层特性进行研究，研究目标主要分为以下几点：

1) 揭示黔北地区矿物组分与不同井位相同地质年代分组页岩储层储集特性的关系

采用孔渗测定、氩离子抛光扫描、热演化成熟度测试、有机碳含量测试、X 射线衍射全岩分析 (XRD) 和黏土矿物含量测试仪测定黔北地区不同井位相同地质年代分组页岩储层孔渗等物性参数和矿物组分等地化参数，结合 Pearson 相关系数和主成分分析 (PCA) 理论分析页岩储层储集影响因素，进一步揭示黔北地区矿物组分与不同井位相同地质年代分组页岩储层储集特性的关系。

2) 阐明黔北地区矿物组分与页岩储层力学特性的关系

利用单轴压缩、巴西劈裂、声发射信号采集仪和 X 射线衍射全岩分析 (XRD) 测定黔北地区页岩力学性质和矿物组分，深入分析黔北地区矿物组分对页岩储层力学特性的影响，阐明黔北地区矿物组分与页岩储层力学特性的关系。

3) 厘清并讨论黔北地区矿物组分与页岩储层应力敏感性的关系和影响因素

运用含 N₂ 的 FYKS-2 高温覆压孔渗测定仪、INSTRON 1346 电液伺服控制材料试验机 (200T) 和 X 射线衍射全岩分析 (XRD) 获取黔北页岩储层孔渗、力学和矿物组分等参数，探讨页岩储层孔渗影响因素，厘清并讨论黔北地区矿物组分与页岩储层应力敏感性的关系和影响因素。

1.3.3 拟解决关键科学问题

本课题拟解决三个主要关键科学问题：

1) 黔北地区矿物组分对页岩储层储集特性的影响

运用地化、物性等参数，结合 Pearson 相关系数，基于主成分分析 (PCA)，揭示并阐明黔北地区矿物组分对不同井位相同地质年代分组页岩储层储集特性的影响。

2) 黔北地区矿物组分对页岩储层力学特性的影响

通过野外踏勘、物理实验研究黔北地区矿物组分对页岩储层力学性质、声发射和能量演化特征的影响，结合数值模拟和分形理论，分析矿物组分与页岩储层压裂改造裂纹扩展的关系，并量化不同矿物组分下页岩储层裂纹扩展规律。

3) 黔北地区矿物组分对页岩储层应力敏感性的影响

为厘清黔北地区矿物组分与页岩储层应力敏感性的关系和影响因素，通过文献资料收集、

物理试验和理论相结合的研究方法，模拟黔北地区页岩储层覆压下页岩孔渗变化规律，分析黔北地区页岩储层孔渗影响因素，探讨黔北地区矿物组分与页岩储层应力敏感性和渗透损伤率的影响因素，揭示黔北地区矿物组分与页岩储层应力敏感性的关系。

1.3.4 研究方案及技术路线

研究课题拟打算从野外实测踏勘、地质与测井资料收集和文献理论整理三个出发点展开研究，详细研究技术路线如图 1-3 所示。通过地化、物性、物理实验和理论研究相结合的方法获取矿物组分等地化参数、孔隙度等物性参数和弹性模量等力学参数，研究黔北地区矿物组分对页岩储层储集特性、力学特性和应力敏感性的影响，研究成果将进一步深化页岩储层特性的认识，为储层体积压裂改造、提升页岩气开采效益提供理论参考。

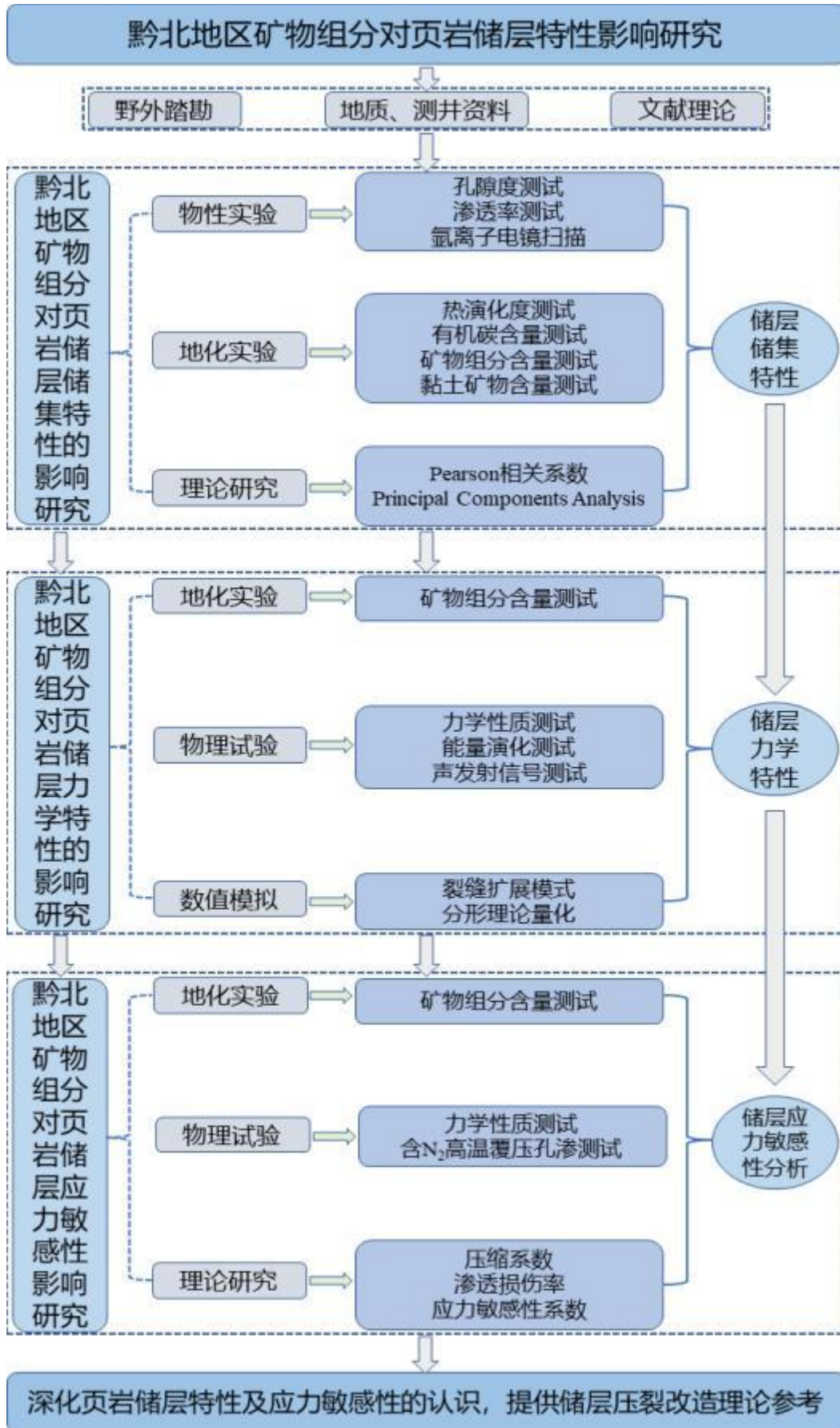


图 1-3 技术路线

第二章 区域地质背景

2.1 区域地质构造

行政区域上, 黔北地区包括湄潭县东北部大部分地区、凤冈县西南部和铜仁市思南县少量地区; 断层分布上, 黔北地区是指贵州省界内遵义断层以东和贵阳-镇远断层以北区域, 面积约 $4.9 \times 10^4 \text{km}^2$; 基底性质上, 黔北地区按基底性质差异可将其划分为扬子陆块和华南褶皱系两个一级构造单元, 扬子陆块占据了贵州大部, 其基底为前南华震旦系, 华南褶皱系则是以下古生界为基底; 区域构造单元划分上, 黔北地区隶属于扬子地块构造单元, 构造演化与扬子地台构造演化的区域构造演化具有一致性, 区内构造发育且分布密集, 页岩储层岩心较为破碎, 但由于离板块活动边缘较远, 因此黔北地区整体上滞后于扬子地台的构造演化阶段(图 2-1a) [26, 68]。

黔北地区构造发育, 构造体系可分为近 SN 向构造带、NNE 向构造带和 NE 向构造带, 构造形态以 SN 向、NNE 向和 NE 向的褶皱和断裂为主, 研究区遭受三个构造带影响, 受到 EW 向和 NW-SE 向应力挤压, 形成近 SN 向和 NNE 向断裂。褶皱整体上展布为 NE 向和 NNE 向, 形成“隔槽式”结构形态展布, 其他方向褶皱展布也有发育, 但单个褶皱呈“S”型或者反“S”型, 反映黔北地区构造变形以挤压为主, 具有走滑的性质; 断裂主要展布为 NNE 向和 NE 向的压扭性断裂, 以多个走向断裂相互切割联合作用而成(图 2-1b) [35]。

以凤冈三区块 FC-1 井为例, 区内构造特征以褶皱群和冲断带为主, 发育一系列 NE 向和 SN 向的复背斜和复向斜构造, 形成以“隔槽式”结构为主的褶皱形态, 褶皱构造形态有歪斜、倒转和扇形, 以琊川复向斜和湄潭复背斜为主; 断裂由多个走向断裂相互切割联合作用形成, 其中以 SN 向构造形成最早, NNE 向构造次之, NE 向构造形成最晚; 区内断层主要发育为压扭性特征的挤压性逆断层, 表现为大断层上陡下缓和小断层断面较平直且陡峭的形态特征, 整体来看, FC-1 井附近构造条件和形态比较复杂, 处于构造应力较为集中的构造变形区(图 2-1c) [78]。

TM-1 井、CY-1 井和 TX-1 井属于岑巩区块, 区内发育以隔槽式褶皱构造和逆冲断层为主, 褶皱主要构造特征表现为东西低、南北高和中部平缓, 整体平缓开阔, 而断层则与向斜和背斜伴生发育; TM-1 井东侧发育有 NE 向和 NNE 向的逆冲断层, 从 TM-1 井页岩储层提取岩心来看, 岩心较为破碎, 说明页岩储层被深大断裂切割, 构造条件较为复杂。相对 FC-1 井和 TM-1 井来说, TX-1 井和 CY-1 井处于向斜构造带中, 地层稳定, 位于岑巩区块中部, TX-1 井西北部和 CY-1 井北部发育有逆断层, 断层走向分别为 NNE 向和 NE 向, 且产状平

缓，延伸度较小（图 2-1d）[25]。

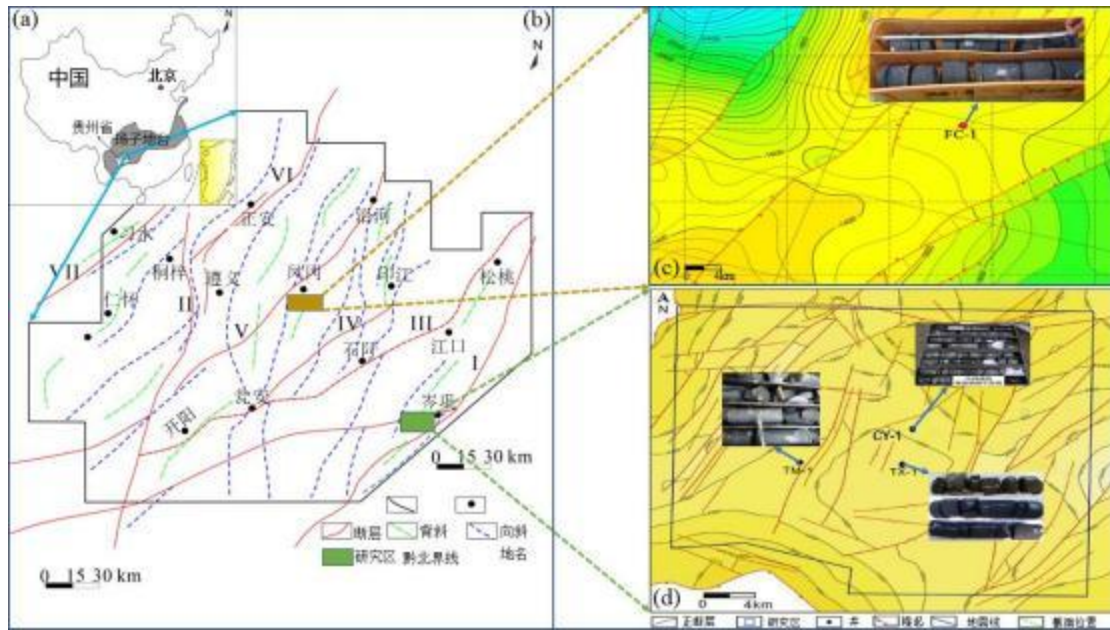


图 2-1 黔北区域地质构造

2.2 区域沉积环境及地层分布

2.2.1 区域沉积环境

黔北地区页岩储层沉积以寒武系和志留系为代表，其中寒武系牛蹄塘组页岩储层厚度大分布广、有机质和热成熟度高。在早寒武系牛蹄塘期，扬子地台北部为活动大陆边缘，南部为被动大陆边缘；早寒武系初期，黔北地区及其周缘地区整体下沉，大部分地区演变为陆棚沉积环境，此时沉积古地貌格局是北西高、南东低，自北西向东南分别由古陆、滨岸、浅水陆棚、深水陆棚、斜坡相组成；早寒武系总体沉积背景为早期短暂快速海进和晚期缓慢海退，由早期的深水陆棚到后期水体逐渐变浅，向浅水陆棚及潮坪演化，形成一个以快速加深为特征的泥页岩沉积建造。从平面上看，黔北地区寒武系牛蹄塘组总体沉积环境自西北向东南的展布为浅水陆棚亚相（粉砂质泥岩与粉砂岩微相、粉砂质泥岩与粉砂质碳质泥岩微相、粉砂质碳质泥岩与含粉砂质泥岩微相）过渡到深水陆棚亚相（含粉砂质泥岩微相、粉砂质碳质泥岩与含粉砂质泥岩微相）；其中凤冈三区块 FC-1 井处于浅水陆棚向深水陆棚过渡阶段，岑巩区块 TM-1 井、CY-1 井和 TX-1 井处于深水陆棚，这就导致相同年代分组的页岩储层具有不同的物性特征，同时加上不同构造复杂程度，也导致含气页岩储层差异性较大[59]。

2.2.2 区域地层分布

黔北地区隶属上扬子地台，沉积地层年代范围为自元古界至第四系，根据区域地质调查

与钻探结果表明，黔北地区下志留统龙马溪组和下寒武统牛蹄塘组是海相下古生界黑色页岩主要富集层（图 2-2），其次为上奥陶统五峰组，因此本节重点介绍下志留统龙马溪组和下寒武统牛蹄塘组地层。

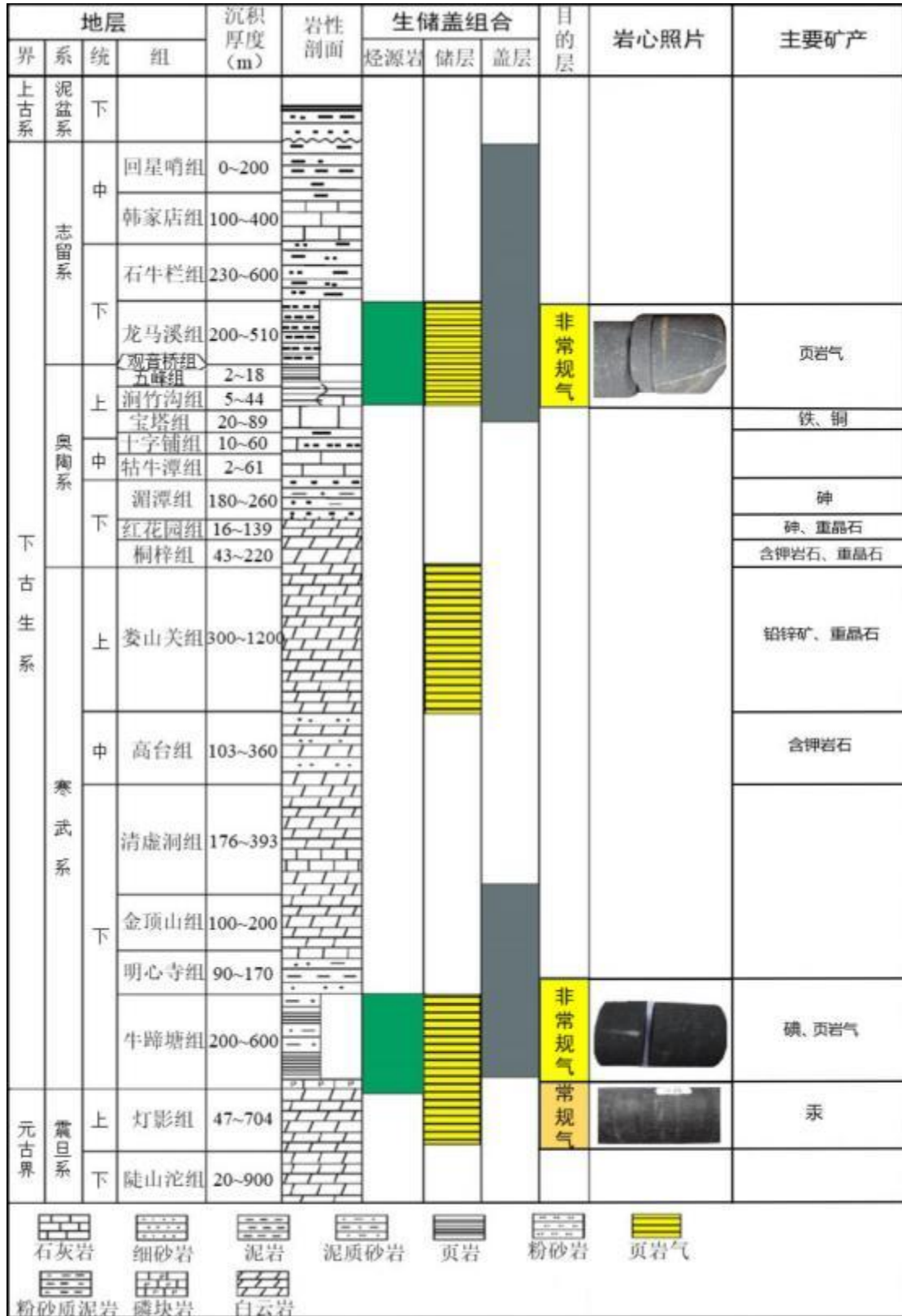


图 2-2 黔北地区地层分布

震旦系

- 1) 陡山沱组: 黑色、深灰色泥岩夹白云岩、磷质岩, 厚约 20~900m;
- 2) 灯影组: 以灰色白云岩为主, 厚约 47~704m, 主要矿产为汞。

寒武系

- 1) 牛蹄塘组: 底部含少量磷块岩, 下部主要为黑色碳质泥岩、页岩和砂质泥岩, 上部为黄绿色泥页岩、砂质泥岩和灰质泥岩夹粉砂岩, 厚约 200~600m, 主要矿产为碘和页岩气, 也是黔北地区主要含气页岩储层;
- 2) 明心寺组: 下部以灰绿、黄绿色砂、页岩为主, 上部夹灰-深灰色灰岩、生物灰岩和瘤状灰岩夹古杯类点礁, 厚约 90~170m;
- 3) 金顶山组: 灰绿、黄绿色砂、泥岩夹豆(鲕)状灰岩和生物灰岩, 厚约 100~200m;
- 4) 清虚洞组: 下部为灰色-深灰色灰岩、豹皮状灰岩和条带状灰岩, 上部或中上部位为灰色白云岩、泥云岩、含泥质白云岩夹少量砂、云质泥岩和泥质粉砂岩, 总厚度约 176~393m;
- 5) 高台组: 灰色含云质砂和泥岩夹泥质白云岩, 厚约 103~360m, 主要矿产为含钾岩石;
- 6) 娄山关组: 岩性主要以灰色与灰黑色薄至厚层白云岩为主, 顶部含碎石团块及透镜体, 底部为灰白色薄至厚层石英砂岩, 厚度较大, 厚约 300~1200m, 主要矿产为铅锌矿和重晶石。

奥陶系

- 1) 桐梓组: 灰-深灰色白云岩、灰质云岩夹泥质云岩、生屑灰岩和泥页岩组成, 底部含硅或泥质(或夹泥页岩)或为生屑灰岩, 厚约 43~220m, 主要矿产为含钾岩石和重晶石;
- 2) 红花园组: 岩性以灰色生物灰岩和生屑灰岩为主, 富含海绵和苔藓虫等生物化石, 常富集成小点礁, 厚约 16~139m, 主要矿产为砷和重晶石;
- 3) 湄潭组: 上部为灰绿色粉砂质泥页岩和砂岩互层夹生物灰岩, 下部为灰绿色泥、页岩夹生物灰岩和粉砂岩, 厚约 180~260m, 主要矿产为砷;
- 4) 十字铺组: 岩性为主要为深灰、灰色泥质灰岩夹灰岩、瘤状灰岩和页岩, 底部为灰岩含铁质及鲕粒, 厚约 10~60m;
- 5) 宝塔组: 具有“马蹄纹”的灰夹红红色含泥灰岩, 厚 20~89m, 主要矿产为铁、铜;
- 6) 涧竹沟组: 岩性为灰、灰黄色泥质瘤状灰岩夹页岩, 厚约 5~44m;
- 7) 五峰组: 黑色碳质页岩, 顶为黄绿色、灰黑色泥质灰岩, 厚 2~18m, 主要矿产为页岩气。

志留系

1) 龙马溪组: 下段为黑色碳质页岩、灰绿色页岩, 上段灰色灰质页岩, 粉砂岩夹薄层灰岩及灰质结核, 厚约 200~510m, 主要矿产为页岩气;

2) 石牛栏组: 灰色灰岩、瘤状灰岩夹灰质页岩, 上部为灰色灰岩与黄绿色页岩互层夹瘤状灰岩, 厚约 230~600m;

3) 韩家店组: 灰绿色泥、页岩和砂质泥岩夹粉砂岩组成, 上部为夹砂质灰岩和石灰岩薄层, 厚约 100~400m。

2.3 区域构造演化

黔北地区隶属于扬子地台, 其构造演化与扬子地台的构造演化具有一致性。研究区主要遭受加里东早-中-晚期运动、海西早-中-晚-末期运动、印支早-晚期运动、燕山早-中-晚期运动和喜山早-中-晚期运动等多期构造运动叠加, 从而导致黔北地区构造形态及其复杂(图 2-3a)。从中元古代以来, 研究区经历了中元古代晚期-志留纪发展阶段(1000~450Ma)、泥盆纪-晚三叠世中期发展阶段(405~210Ma)和中-新生代(自晚三叠世晚期以来)发展阶段(210Ma~至今)三个构造演化阶段^[91]。

2.3.1 中元古代晚期-志留纪发展阶段

中元古代晚期至志留纪发展阶段是黔北地区由大洋地壳转变为大陆地壳的地质时期, 经过武陵运动和雪峰运动(1000~800Ma), 大陆地壳从活动性缘类型转化为稳定的地台类型; 又经澄江运动、铜湾运动(加里东运动早期)、郁南运动(加里东运动中期 I 幕)和都匀运动(加里东运动中期 II 幕)(700~440Ma), 加里东期以来的岛弧型造山作用黔北地区逐步转化为稳定的地台型大陆壳过渡, 抬升的大陆型地壳经风化剥蚀, 形成黔中隆起; 直至志留纪末, 广西运动(加里东运动晚期)(405Ma), 黔北地区才全部转化为稳定的大陆性地壳(图 2-3b)。

2.3.2 泥盆纪-晚三叠世中期发展阶段

泥盆纪-晚三叠世中期发展阶段为大陆扩张阶段, 经过红山运动(海西运动早期)(355Ma)黔北地区持续抬升, 但抬升速度较缓, 构造强度较低, 由于陆地基底沉降和构造拉伸造成海平面上升, 黔北地区隆升为不连续沉积和陆地风化侵蚀, 同时东北和西北方向断裂开始伸展, 形成西北高东南低的构造格局; 又经黔桂运动(海西运动中期)、东吴运动(海西运动晚期)和苏皖运动(海西运动末期)(280~230Ma), 黔北地区内以差异隆起为主, 裂隙活动强烈, 保持着深水盆地和浅水台地并存的断块构造环境。

2.3.3 中-新生代（自晚三叠世晚期以来）发展阶段

该阶段为太平洋板块俯冲和印度板块碰撞，受安源运动（印支运动早期）和印支运动晚期的挤压（205~150Ma），结束了黔北海相地层沉积历史，沿寒武系地层底部出现多条逆冲断层，逐步形成叠瓦状、倒转构造；后期又遭受燕山早-中-晚期强烈构造运动（137~65Ma），黔北地区发生强烈的褶皱变形，并伴随多层滑移变形和低角度逆冲断层，形成了大量的褶皱和断层，贯穿牛蹄塘组地层；在燕山早期研究区主要受东西向构造挤压，形成近 SN 向的褶皱和挤压断层，燕山晚期构造应力转变为 WN 方向和 ES 方向，使 SN 向褶皱和断层转变为 NE 向和 NNE 向；最后遭受喜山早期运动和晚期运动（36.5~23.3Ma），太平洋板块俯冲方向转变为 NWW 方向，与印度洋板块和亚洲大陆板块碰撞，造成黔北地区近东西向挤压，导致褶皱隆升（图 2-3c）。

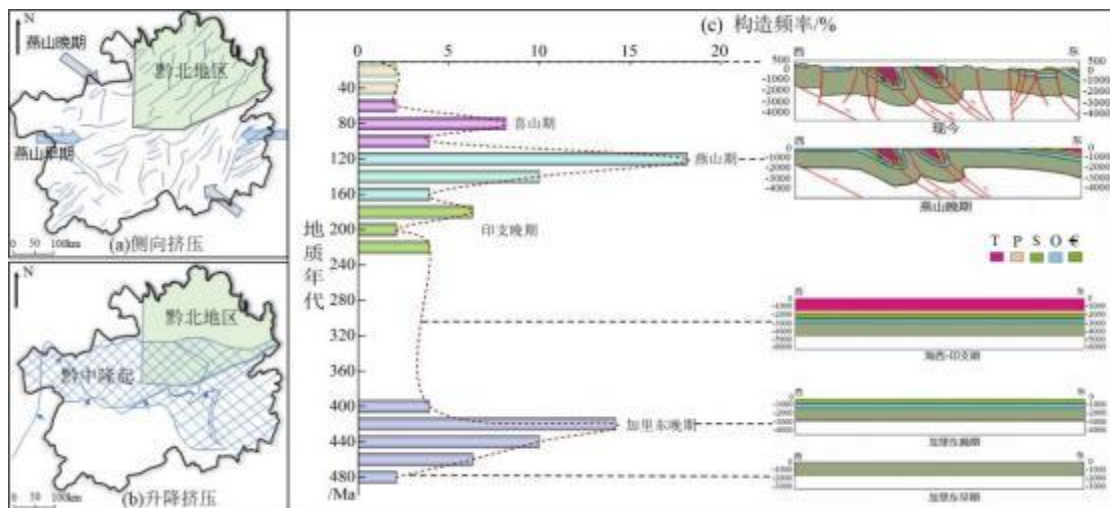


图 2-3 黔北地区构造演化

2.4 本章小节

本章以区域地质构造、沉积环境及地层和构造演化三个方面对黔北地区地质背景进行介绍，主要取得如下认识：

1) 黔北地区构造发育，构造体系可分为近 SN 向构造带、NNE 向构造带和 NE 向构造带，构造形态以 SN 向、NNE 向和 NE 向的褶皱和断裂为主；黔北地区总体沉积环境自西北向东南的展布为浅水陆棚亚相过渡到深水陆棚亚相；黔北地区下志留统龙马溪组和下寒武统牛蹄塘组是海相下古生界黑色页岩主要富集层，其次为上奥陶统五峰组。

2) 黔北地区隶属于扬子地台，其构造演化与扬子地台的构造演化具有一致性，主要遭受加里东运动、海西运动、印支运动、燕山运动和喜山运动等多期构造运动叠加而成。

第三章 页岩储层储集特性分析

3.1 储层岩矿特征分析

岩矿特征直接影响着页岩储层储集特征，矿物组分分析是研究页岩储层的关键部分，关系到页岩储层压裂改造、含气储层赋存方式和开采手段选取。页岩储层矿物组分主要包括脆性矿物、铝硅酸盐类矿物、碳酸盐类矿物和黏土矿物；脆性矿物如石英、黄铁矿等；铝硅酸盐类矿物如长石、白云石和方解石等；黏土矿物如伊利石、蒙脱石等^[90, 100]。前人致力于矿物组分与储层物性特征领域的研究，但矿物组分与不同井位相同地质年代分组页岩储层储集特性的关系方面提及较少。因此，本章选取黔北地区下寒武统牛蹄塘组 FC-1 井、TM-1 井、TMY-1 井、TX-1 井、CY-1 井^[25, 27]和露头的页岩样品做岩矿特征对比研究，分析矿物性质和含量对页岩储层压裂改造、含气储层赋存方式和开采手段选取的影响，并为提高页岩气开采效益提供理论参考。

3.1.1 储层矿物组分分析

从岩矿分析测试数据整体来看（图 3-1），FC-1 井、TM-1 井、TMY-1 井、TX-1 井、CY-1 井和露头样品的黏土矿物含量与石英、长石和黄铁矿累计含量呈负相关；黏土矿物含量为 0.0~44.0%，平均为 16.69%，黏土矿物含量较高的以 TMY-1 井、CY-1 井和露头样品为主，说明该井不利于储存体积改造和裂缝扩展，但黏土矿物内部孔隙表面积较大，具有很强的吸附性能，对页岩气赋存状态产生重要影响，因此并不能说明黏土矿物含量低越有利于页岩气开采^[62]；石英、长石和黄铁矿累计含量为 21.0~94.0%，平均为 73.75%，含量较高的以 FC-1 井和 TX-1 井为主，脆性矿物占比高，属脆性易压裂储层，有利于压裂改造形成复杂裂缝网络；但黏土矿物和脆性矿物与碳酸盐类矿物相关性不大，碳酸盐类矿物含量基本维持在 0.0~20.0%，平均为 9.23%，个别样品中碳酸盐类矿物超过 20.0%，以露头样品为主（图 3-1a）。

黏土矿物主要来自母岩风化产物，经沉积、成岩作用、直至地表风化再次改造，牛蹄塘组潜质页岩段富含有机质和脆性矿物，分摊了黏土矿物含量，因此高碳质富集与相对低的黏土矿物含量呈现出相互对应关系^[42]。黏土矿物成分中以伊利石为主，并含有高岭土、绿泥石和蒙脱石；混层矿物有伊/蒙混层和绿/蒙混层，其中以伊/蒙混层为主，范围为 0.0~68.0%，平均为 35.74%。伊利石含量与混层矿物含量呈负相关，伊利石含量为 27.0~100.0%，平均为 67.39%，含量较高的以 FC-1 井、TM-1 井和 CY-1 井为主，伊利石是页岩储层成岩晚期阶段的产物，伊利石含量越高，间接反映出牛蹄塘组演化程度越高；高岭土、绿泥石和蒙脱石含

量基本维持在 0.0~20.0%，平均为 6.91%，个别样品中超过 20.0%，以 FC-1 井样品为主（图 3-1b）。

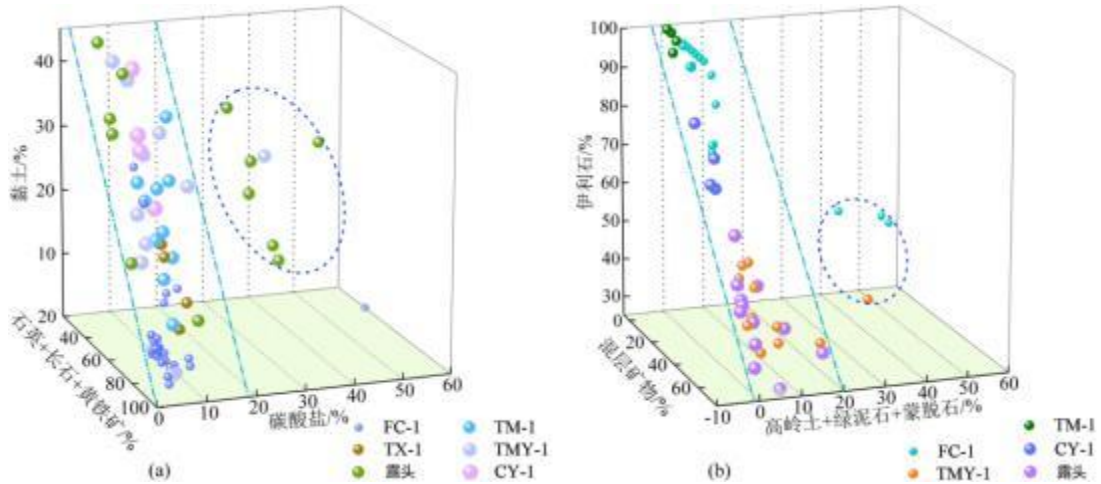


图 3-1 黔北地区页岩储层岩矿特征

3.1.2 储层参数相关性分析

上述分析了各页岩储层中岩矿特征，但仅针对于矿物组分这一影响因素，因此运用 Correlation Plot 软件中的 Pearson 相关系数进一步阐述页岩储层矿物组分、埋深和有机碳含量 TOC 等参数之间的相关性。Pearson 相关系数是用于衡量数据集间是否在同一条线上，考虑的是数据集间定距变量的线性关系，相关性 R^2 范围为 0~1，值越趋近于 1，说明数据集间相关性越好。本节选取黔北地区下寒武统牛蹄塘组 FC-1 井、TM-1 井、TX-1 井和 CY-1 井的页岩样品为研究对象，分析页岩储层矿物组分、埋深、有机碳含量 TOC 和有机成熟度 R_0 之间的相关性（图 3-2）。

图 3-2A 为所有参数之间的相关性概念图，反映的是各参数之间的相关性大小；浅绿色为正相关，浅红色为负相关；图中圆的直径为 1.0，直径越大相关性越强。从矿物组分角度来看，碳酸盐类矿物含量与 R_0 和埋深均呈较好的负相关（图 3-2g），相关性为 0.6~0.8，与 TOC 相关性不大（图 3-2a），含量占比以 TM-1 井为主；脆性矿物含量与 TOC、 R_0 和埋深呈正相关，相关性为 0.2~0.8，如石英等（图 3-2c 和 f），含量占比以 FC-1 井为主；黏土矿物含量与 TOC、 R_0 和埋深呈负相关，相关性为 0.5~0.8，含量占比以 CY-1 井为主（图 3-2b 和 e）；埋深与长石、石英和 R_0 呈正相关，相关性为 0.2~1.0，但与 TOC 含量相关性不大；并且， R_0 与 TOC 含量相关性也不大（图 3-2d）。页岩储层含气量大小影响因素众多，但以有机碳含量 TOC、压力和有机质成熟度 R_0 影响最大，有机质是生烃的物质基础，根据含气页岩储层勘探开采经验可知，有利开发区域的有机碳含量不低于 1.5%，核心甜点区域不低于 2.0%；

同时，有机碳含量与脆性矿物含量呈正相关，因此在脆性含量高的页岩储层中更有利于裂缝延伸扩展，提高开采量。

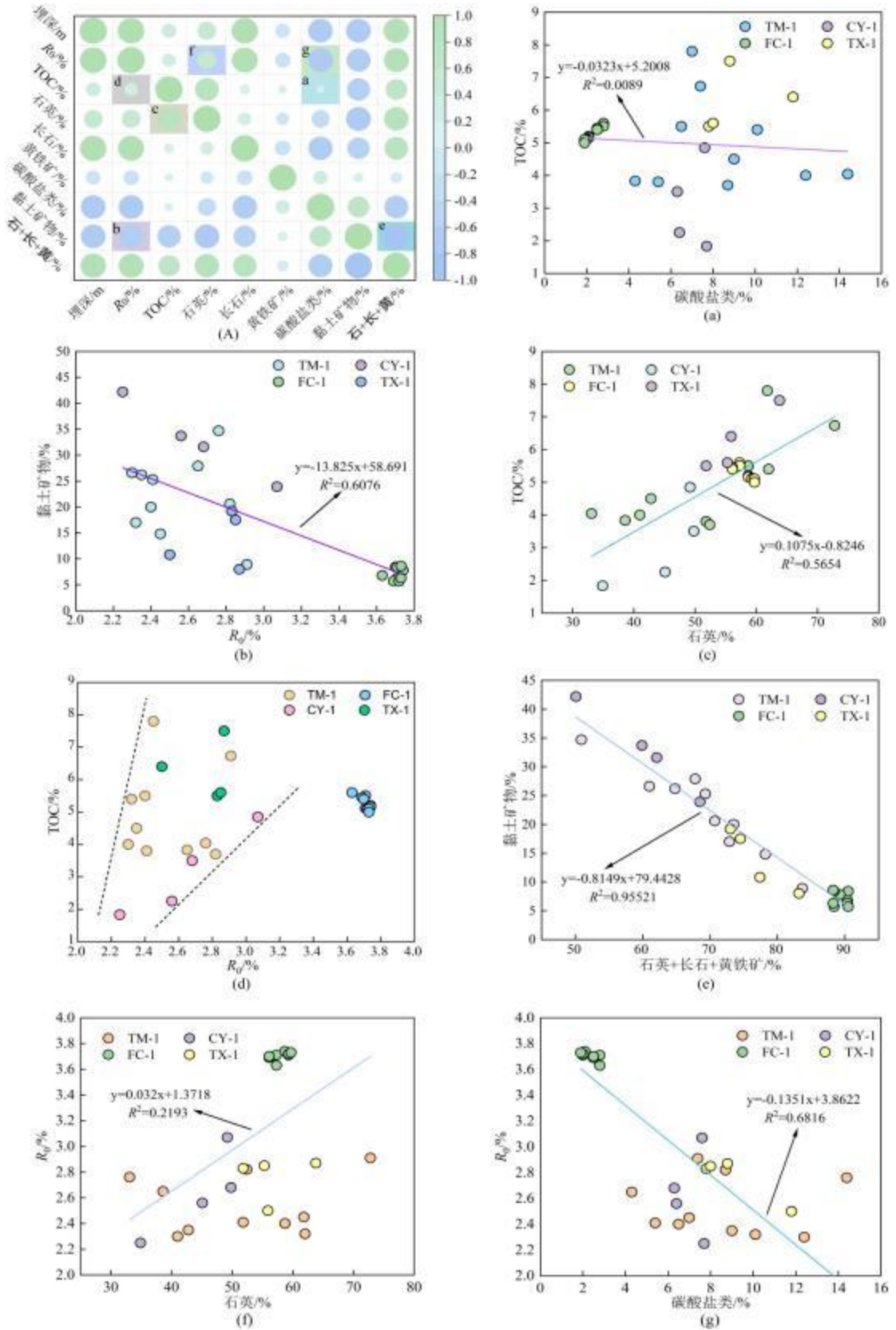


图 3-2 页岩储层参数分析

3.1.3 储层性质差异性分析

虽然上述已经分析了页岩储层矿物组分与有机碳含量等参数之间的相关性，得出脆性矿物含量高的区域，有机碳含量高，有利于储层压裂提高开采质量，但相同地质年代分组的页岩储层间的性质、相关性和影响因素并未可知。因此，本节依旧选取黔北地区下寒武统牛蹄塘组 FC-1 井、TM-1 井、TX-1 井和 CY-1 井的页岩样品为研究对象，探讨相同地质年代分组的页岩储层间的性质、相关性和影响因素。

主成分分析（Principal Components Analysis，PCA）又称主成分回归分析，旨在利用降维的理念，把多指标（变量）转化为少数几个综合指标，在线性代数上指借助正交变换将原随机变量的协方差矩阵转化成对角矩阵，求出特征值；在几何上表现为将多维原坐标系降为低维新正交坐标系，即将 n 维坐标系转换为三维立体图、二维平面或者一维线性坐标系。主成分是所有原始变量的线性组合，所有样本点在某个坐标轴（主成分）上的方差等于该主成分对应的特征值，表现为距离越近的样本点相似度越高。因此，根据特征值 $\lambda > 1$ 选取主成分分数（碎石图），选取的主成分（累计贡献率）达到 60%即可接受，达到 80%说明样本间的相关性效果良好，而主成分数（PC）个数 ≤ 3 的时候才能实现可视化，最常见的是二维得分图；载荷为变量间线性组合的系数，越靠近的变量间正相关性越强，反之则负相关越强或相关性越差^[64,96]。

表 3-1 主成分分析数据

主成分数量	特征值	方差百分比/%	累积百分比/%	主成分荷载			
				变量	PC1	PC2	PC3
1	5.82505	64.72276	64.72276	埋深	0.39	-0.19	0.13
2	1.70197	18.91076	83.63352	R_0	0.38	-0.22	0.09
3	0.89523	9.94704	93.58056	TOC	0.21	0.61	-0.05
4	0.35552	3.95022	97.53078	石英	0.30	0.43	-0.33
5	0.11986	1.33175	98.86253	长石	0.35	-0.34	0.17
6	0.06678	0.74195	99.60448	黄铁矿	-0.13	0.31	0.90
7	0.03234	0.35935	99.96383	碳酸盐类	-0.34	0.27	-0.10
8	0.00326	0.03617	100.0000	黏土矿物	-0.39	-0.24	-0.04
9	9.50328E-32	1.05592E-30	100.0000	石+长+黄	0.41	0.14	0.06

选取矿物组分、TOC 和埋深等变量对 FC-1 井、TM-1 井、TX-1 井和 CY-1 井做主成分

分析，根据特征值 $\lambda > 1$ 取主成分分数（图 3-3a）可知：主成分有 PC 和 PC2，其特征值分别为 5.83 和 1.70，方差百分比分别为 64.72%和 18.91%，累计 83.63%，超过主成分分析 80.00%，说明两个主成分累计贡献率良好。由主成分得分图（图 3-3b）可知：TM-1 井、TX-1 井和 CY-1 井的相关性高，且具有共同集合领域，主要受黄铁矿、碳酸盐类和黏土矿物含量影响；其中，TM-1 井和 TX-1 井受黄铁矿含量影响最大，TM-1 井和 CY-1 井主要受黏土矿物含量控制，其次为碳酸盐类含量，而导致 TX-1 井和 CY-1 井差异较大的主要原因为黄铁矿和黏土矿物含量；FC-1 井与 TM-1、TX-1 和 CY-1 井没有共同集合领域，说明相关性差，其原因为主要受石英+长石+黄铁矿、埋深和有机成熟度 R_0 的影响，其次为长石、石英和 TOC 含量。因此，从以上数据分析可知 FC-1 井所处牛蹄塘组页岩储层脆性程度高、有机碳含量和成熟度高、有利于含气页岩储层压裂开采，但埋深大增加开采成本和技术难度；相对 FC-1 井的 TM-1、TX-1 和 CY-1 井来说，虽然埋深浅难度低利于开采，但储层韧性程度高，不利于储层体积改造，增产效果难，尤其是 CY-1 井。

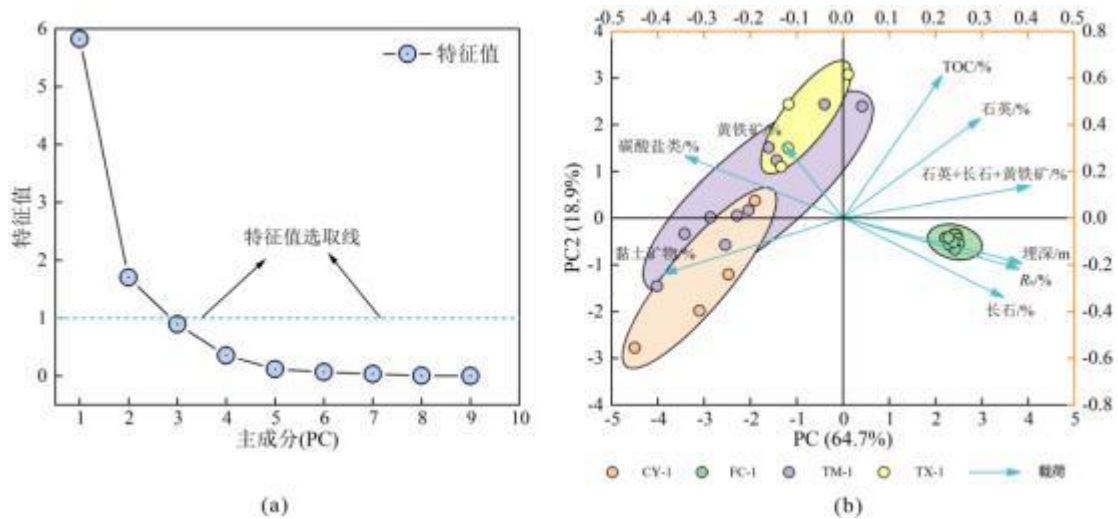


图 3-3 页岩储层性质、相关性和影响因素分析（a 为碎石图，b 为得分图）

3.2 储层物性特征分析

页岩储层物性包括渗透率、孔隙度、孔隙结构和孔隙类型等，其特性不仅影响着页岩气赋存和吸附能力，而且还控制着气体运移，页岩孔隙分类主要基于孔隙结构特征和成因等因素，根据 Loucks 提出的页岩微观孔隙分类法可将孔隙分为粒间孔隙、粒内孔隙、有机孔隙和微裂缝^[52, 66]。

3.2.1 孔隙特征

粒间孔隙是在经过成岩和压实作用发生在页岩基质矿物颗粒边缘，以矿物颗粒之间为主，

少量分布在有机质周围；常发育在刚性颗粒周围， 易经压实和构造作用而减小或被破坏， 或者是生烃演化过程中碳酸盐类矿物剥蚀溶解而成的粒间溶蚀孔隙； 又或者是成岩演化过程中分布在伊利石和蒙脱石矿物颗粒周围（图 3-4b）。粒内孔隙是页岩成岩和生烃演化过程中酸性流体溶解脆性矿物颗粒，并在颗粒内形成模孔， 如常见于长石和黄铁矿（图 3-4a、 b、 d 和 f）。黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩储层有机质含量高，容易形成纳米级有机质孔，呈蜂窝状、球状和裂缝状等，且在有机质周围分布有微裂缝； 当有机成熟度 $R_o > 0.6\%$ ，页岩基质开始演化生烃，有机质容易消耗成有机孔隙，增大比表面积，从而有利于页岩气吸附（图 3-4c） [69]。

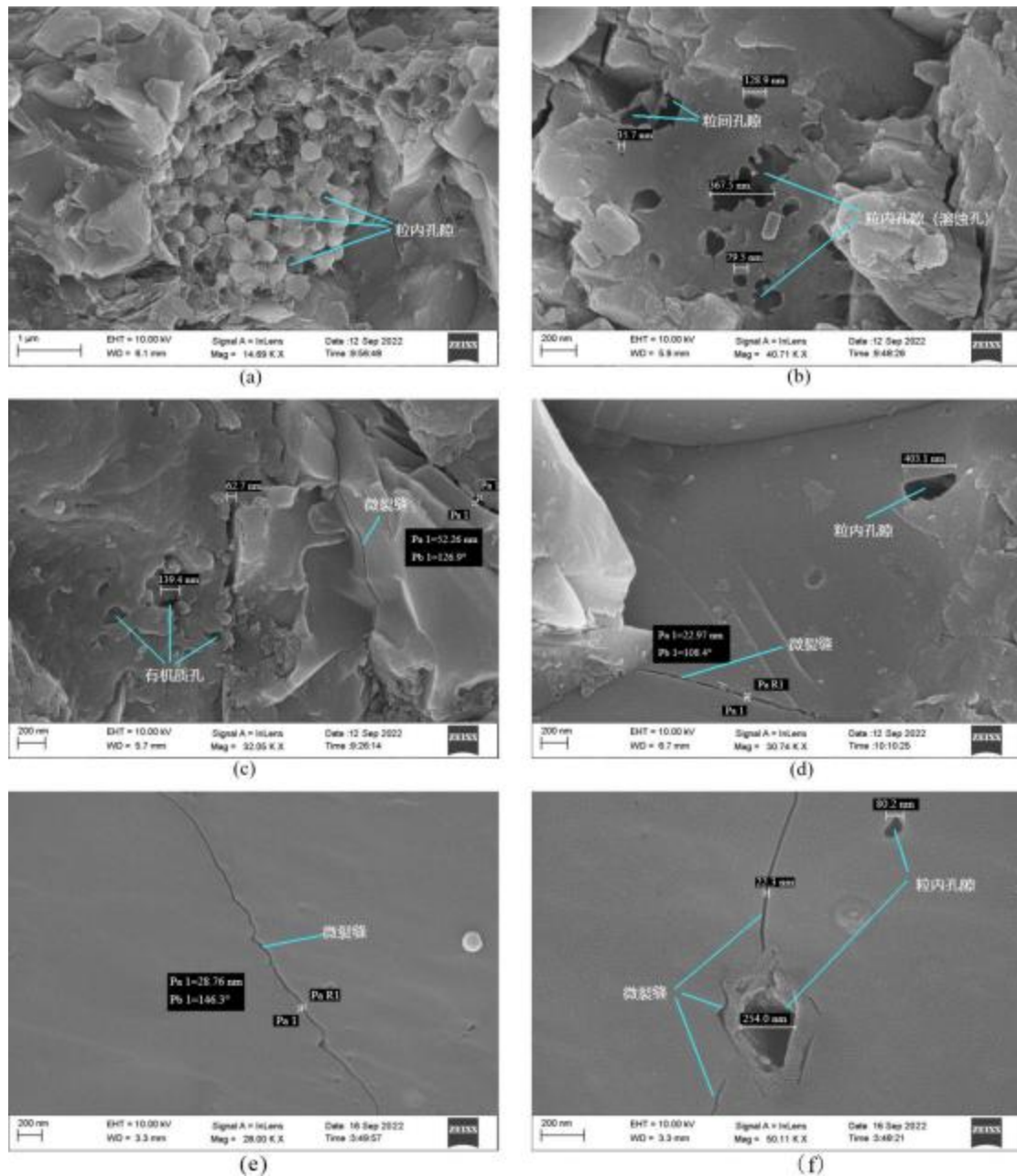


图 3-4 扫描电镜下页岩储层样品特征（PaR1 为标注点， Pa 1 为裂缝宽度， Pb 1 为裂缝倾角）

3.2.2 裂缝特征

页岩中微裂缝分为构造和非构造裂缝^[24, 32]，扫描电镜观察到的主要以非构造裂缝为主，通过扫描电镜观察可知，样品中的裂缝为纳米级裂缝，裂缝宽度在 22.3~62.7nm，角度在 108.4~146.3°，属于未被填充的高角度有效裂缝（图 3-4c, d 和 e）。裂缝发育程度作为油气开发的重要指标，不仅是页岩气的储集空间和渗流通道，还可以有效提高游离气和吸附气的比例，影响页岩气开采效益。当页岩储层中裂缝系统发育时，可作为有效储层，尤其是当裂缝与孔隙相连接时，组成“孔-缝-孔”结构，有效增大吸附面积、储集空间和运移通道，对页岩气增产具有重要意义（图 3-4c 和 f）；从细观角度来看，通过对黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩岩心和露头样品进行裂缝分析可知，天然裂缝主要以高角度构造裂缝为主，其中裂缝被填充程度可达 95.2%，这些被填充的天然裂缝中又接近 80%为碳酸盐类方解石脆性矿物，而黏土矿物填充比例不足 6%，说明天然裂缝和其填充程度、填充物性质对减弱页岩的脆性性质影响很小；从宏观角度分析，裂缝发育密度随石英含量的增加而增加（图 3-5a），随黏土矿物含量的增加而减小（图 3-5b），说明天然裂缝发育密度与矿物组分性质和含量密不可分，也进一步揭示脆性程度高的页岩储层更有利于储层压裂体积改造，增加渗流运输通道和扩散路径，韧性程度越高越阻碍储层裂缝空间扩展，不利于规模化压裂，制约开采效能^[33]。

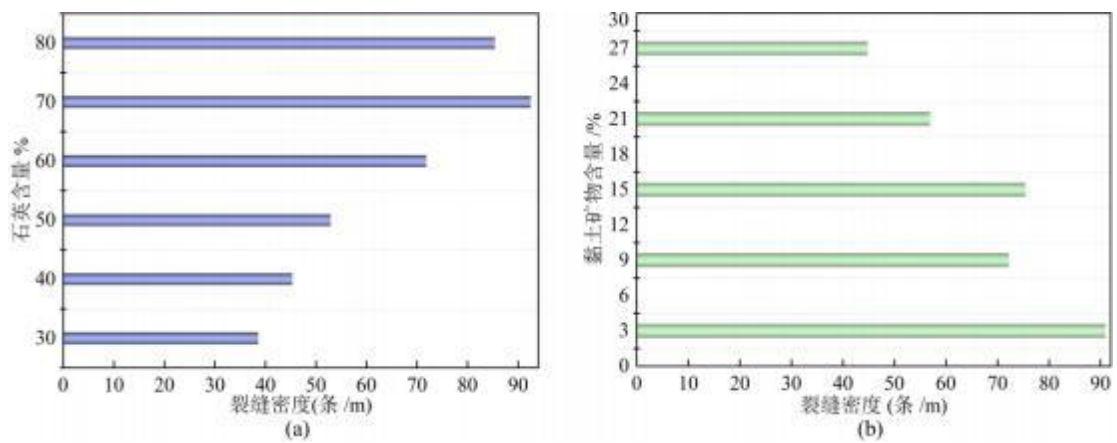


图 3-5 矿物组分性质和含量与裂缝密度的关系

3.2.3 孔渗定量特征

选取黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩储层七个井的样品测定其孔隙度和渗透率，定量分析页岩储层孔渗特征。从整个区域上看，有效孔隙度范围为 0.31~3.03%，平均为 0.889%；渗透率范围为 0.0006~0.0452mD，平均为 0.0067mD；从单个储层来看，ZY-1 井有效孔隙度范围为 0.48~3.03%，最大值和平均值分别为 3.03%和 1.32%，在变化范围、最大值和平均有

效孔隙上，ZY-1 井均为最大，但其渗透率变化范围和平均值分别为 0.0007~0.0068mD 和 0.0022mD，相对其它井来说均较低；而 ZK211 井平均渗透率为 0.02mD，是所有井中平均渗透率最大的，但平均孔隙度很小，说明孔隙度与渗透率之间并没有太大的相关关系；但整体上看，黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩储层孔渗低，属于特低孔特低渗储层（表 3-2）。为定量表征页岩储层中孔隙度与渗透率之间的关系，根据等效渗流阻力理论得出单条裂缝等效渗透率与裂缝开度的关系^[76]

$$K_f = \frac{\Phi^2 \sqrt{10^3}}{12} \quad (3-1)$$

式中： K_f 为单条裂缝等效渗透率，mD； Φ 为单条裂缝开度， μm 。但实际页岩储层中裂缝为无规则和错综复杂性，测量裂缝渗透率难度较大，因此通过优化裂缝渗透率模型，得出孔隙度与渗透率的关系

$$\frac{K}{K_i} = \left(\frac{Q}{Q_i} \right)^3 \quad (3-2)$$

式中： K 和 Q 分别为渗透率和孔隙度， K_i 和 Q_i 分别为初始有效应力下的渗透率和孔隙度。

表 3-2 牛蹄塘组钻井储层物性表

井编号	层位	样品数/个	有效孔隙度/%	平均孔隙度/%	渗透率/mD	平均渗透率/mD
ZY-1	∈ _{in}	16	0.48~3.03	1.32	0.0007~0.0068	0.0022
MY-1	∈ _{in}	14	0.62~2.37	1.31	0.0013~0.0452	0.0092
SY-1	∈ _{in}	16	0.31~1.54	0.93	0.0007~0.0078	0.0034
DY-1	∈ _{in}	14	0.11~1.22	0.42	0.0006~0.0037	0.0016
ZHY-1	∈ _{in}	9	0.11~1.37	0.75	0.0007~0.0015	0.001
FC-1	∈ _{in}	20	0.26~1.39	1.00	0.0076~0.0107	0.0096
ZK211	∈ _{in}	16	0.20~1.00	0.49	—	0.0200

为进一步阐述孔隙度、渗透率、埋深和矿物组分之间的关系，以 FC-1 井牛蹄塘组页岩样品为例，取自纵向埋深 2409.76~2551.14m，孔隙度主要分布在 0.26~1.39%之间，平均为 1.00%，渗透率主要分布在 0.0076~0.0107mD 之间，平均为 0.0096mD（表 3-2），根据储层评价标准可知，FC-1 井牛蹄塘组页岩属于超低孔超低渗储层，储集性能相对较好，有利于气体保存，但超低孔低渗不利于自然开采，需压裂人工改造扩大储层渗透性。从图 3-6a 可

知，随着埋深增加，孔隙度和渗透率并无趋势性变化，说明与埋深并无相关性，埋深不是决定孔隙度和渗透率的因素；随着埋深增加，石英和黏土矿物分别呈现出增大和减小的变化，但与孔隙度和渗透率也无明显相关性，也说明石英和黏土矿物含量对孔隙度和渗透率的影响较小（图 3-6b），第 5.2.1 部分对此有详细说明。

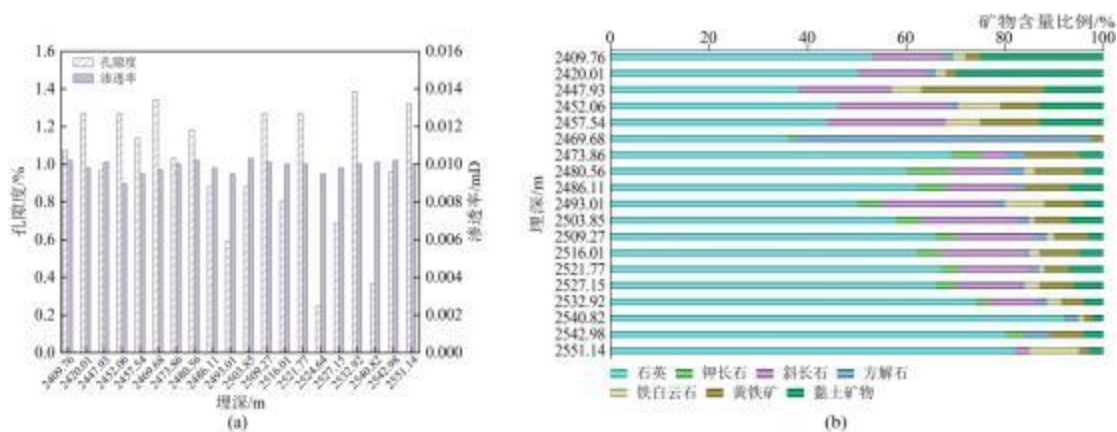


图 3-6 牛蹄塘组 FC-1 井孔渗及矿物含量数据

3.3 本章小结

本章重点研究了黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩储层中矿物组分对页岩储集特征的影响，得出以下结论：

1) FC-1 井、TM-1 井、TMY-1 井、TX-1 井、CY-1 井和露头样品的黏土矿物含量与石英、长石和黄铁矿累计含量呈负相关；黏土矿物含量为 0.0~44.0%，平均为 16.69%，较高的以 TMY-1 井、CY-1 井和露头样品为主；石英、长石和黄铁矿累计含量为 21.0~94.0%，平均为 73.75%，含量较高的以 FC-1 井和 TX-1 井为主；但黏土矿物与碳酸盐类矿物相关性不大，碳酸盐类矿物含量维持在 0.0~20.0%，平均为 9.23%，个别样品中碳酸盐类矿物超过 20.0%，以露头为主；黏土矿物成分中以伊利石为主，伊利石含量与混层矿物含量呈负相关，伊利石含量为 27.0~100.0%，平均为 67.39%，含量较高的以 FC-1 井、TM-1 井和 CY-1 井为主；高岭土、绿泥石和蒙脱石含量基本维持在 0.0~20.0%，平均为 6.91%，个别样品中超过 20.0%，以 FC-1 井为主。

2) 运用 Pearson 相关系数分析页岩储层矿物组分、埋深和有机碳含量 TOC 等参数之间的相关性可知：碳酸盐类矿物含量与 R_0 和埋深均呈负相关，相关性为 0.6~0.8，与 TOC 相关性不大，含量占比以 TM-1 井为主；脆性矿物含量与 TOC、 R_0 和埋深呈正相关，相关性为 0.2~0.8，含量占比以 FC-1 井为主；黏土矿物含量与 TOC、 R_0 和埋深呈负相关，相关性为

0.5~0.8, 含量占比以 CY-1 井为主; 埋深与 R_0 呈正相关, 相关性为 0.8~1.0, 但与 TOC 含量相关性不大; 并且, R_0 与 TOC 含量相关性也不大。

3) 选取矿物组分、TOC 和埋深等变量对 FC-1 井、TM-1 井、TX-1 井和 CY-1 井做主成分分析 (Principal Components Analysis, PCA) 可知: 主成分有 PC 和 PC2, 其特征值分别为 5.83 和 1.70, 方差百分比分别为 64.72%和 18.91%, 累计 83.63%; TM-1 井、TX-1 井和 CY-1 井的相关性高, 具有共同集合领域, 主要受黄铁矿、碳酸盐类和黏土矿物含量影响; FC-1 井与 TM-1、TX-1 和 CY-1 井无共同集合领域, 相关性差, 主要受石英+长石+黄铁矿、埋深和有机成熟度 R_0 的影响, 其次为长石、石英和 TOC 含量。分析得出 FC-1 井所处牛蹄塘组页岩储层脆性程度高、有机碳含量和成熟度高、有利于含气页岩储层压裂开采; 但 CY-1 井所处储层韧性程度高, 不利于储层体积改造。

4) 扫描电镜下黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩储层微观物性可分为粒间孔隙、粒内孔隙、有机孔隙和微裂缝; 孔隙均为纳米尺度, 范围为几纳米到几百纳米不等, 属未被填充的有效孔隙; 裂缝为纳米级裂缝, 裂缝宽度在 22.3~62.7nm, 角度在 108.4~146.3°, 属于未被填充的高角度有效裂缝; 裂缝发育密度分别随石英和黏土矿物含量的增加而增加和减小。

5) 定量分析黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩储层孔渗特征可知: 整体区域上, 有效孔隙度范围为 0.31~3.03%, 平均为 0.889%; 渗透率范围为 0.0006~0.0452mD, 平均为 0.0067mD, 属于特低孔特低渗储层; 单个储层上, ZY-1 井有效孔隙度范围、最大值和平均值分别为 0.48~3.03%、3.03%和 1.32%, 均为所有井中最大, 但其渗透率变化范围和平均值分别为 0.0007~0.0068mD 和 0.0022mD, 相对其它井来说均较低; 而 ZK211 井平均渗透率为 0.02mD, 是所有井中平均渗透率最大的, 但平均孔隙度很小。

第四章 页岩储层力学特性分析

当页岩储层脆性矿物含量越高，储层脆性特征越明显，在外力改造下越容易形成复杂网络诱导裂缝；相反，韧性矿物含量较大时，储层表现出塑性和低弹模高泊松比的力学特征，压裂改造形成以平面裂缝为主，不利于储层体积裂缝改造。相关学者致力于层理效应与页岩力学特性和声发射的关系研究^[7,44]，从而判定页岩受压过程中的破裂特征，但矿物组分与页岩力学特性和声发射的关系研究相对较少。因此，本章以黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩露头为对象，研究矿物组分与页岩储层力学特性和声发射的关系，从而分析页岩受压过程中的破裂特征，进一步阐明黔北地区矿物组分对页岩储层力学特性的影响。

4.1 样品与理论

4.1.1 样品来源

样品取自黔北地区湄潭县梅子湾下寒武统牛蹄塘组页岩露头^[91]，岩层出露佳，上部为青灰色页岩，含黄铁矿（图 4-1a），产状显著，其中走向为 SE141°，倾角为 50~67°；下部为黑色碳质页岩，含黄铁矿晶体及结核（图 4-1b），走向为 SE127°，倾角为 29~34°，页岩总层厚约 24m。将采取的露头样品按照《工程岩体试验方法标准》（GB/T 50266—2013）和《煤和岩石物理力学性质测定方法》（GB/T 23561.10—2010）分别制作成标准圆盘和圆柱体；其中圆盘直径和高度分别为 50 和 25mm，尺寸允许变化范围不超过 5%，直径和高度误差不超过 0.1mm，两端不平行度误差不超过 0.1mm，垂直轴线的端面最大偏差不超过 0.25°，样品分为 3 组，每组 3 个为平行试验，共 9 个样品；圆柱体直径为 25mm，高径比为 2:1~2.5:1，直径误差不超过 0.3mm，两端面不平行度误差不超过 0.05mm，垂直轴线的端面最大偏差不超过 0.25°，样品分为 3 组，每组 3 个为平行试验，共 9 个样品。

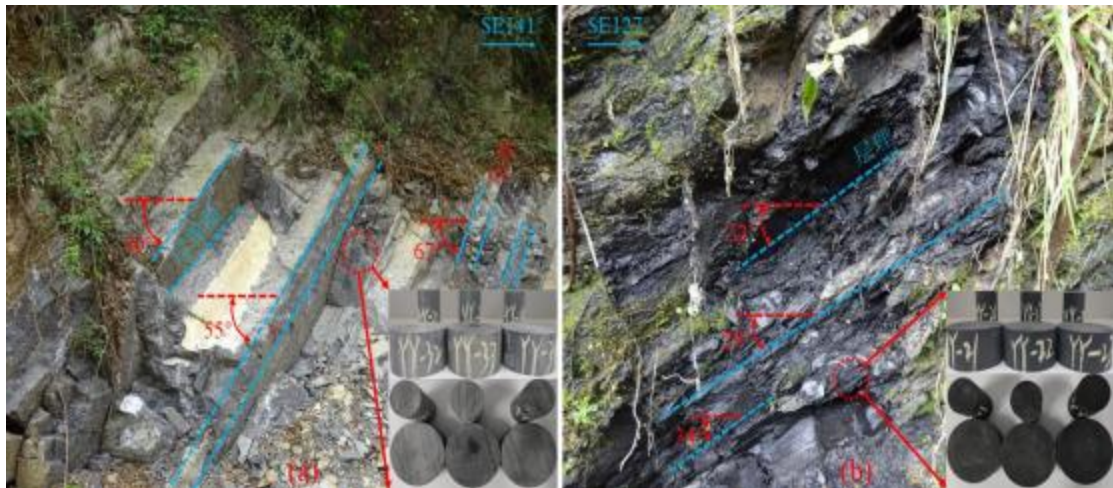


图 4-1 野外露头采样

4.1.2 样品试验

1) XRD 试验

将黔北地区湄潭县梅子湾下寒武统牛蹄塘组 18 块页岩露头样品参照石油天然气行业标准《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》(SY/T 5163—2010) 进行 X 射线全岩分析, 仪器型号为 X'Pert PRO MPD。

2) 巴西劈裂及声发射试验

利用 WAW-3000kN 伺服万能液压试验机和美国 PCI-2E5.40 声发射设备对页岩样品进行巴西劈裂和声发射试验, 其中每组 2 个样品做巴西劈裂试验, 共 6 个; 每组 1 个样品做巴西劈裂+声发射试验, 共 3 个, 样品表面贴 2 组声发射探头, 确保声发射采集数据正确性和参照性; 加载速率为 0.2mm/min, 轴向压缩方向均垂直样品层理面, 避免层理效应影响。

3) 单轴压缩及声发射试验

采用 WAW-3000kN 伺服万能液压试验机和美国 PCI-2E5.40 声发射设备对页岩样品进行单轴压缩和声发射试验, 其中每组 2 个样品做单轴压缩试验, 共 6 个; 每组 1 个样品做单轴压缩+声发射试验, 共 3 个, 样品表面依据贴 2 声发射探头, 确保声发射采集数据正确性和参照性; 加载速率也为 0.2mm/min, 但轴向压缩方向平行于样品的层理面, 避免多组层理角度影响试验结果。

4.1.3 计算理论

1) 抗拉强度

$$\sigma_t = 2P_t / \pi Dh \quad (4-1)$$

式中: σ_t 为单轴抗拉强度, MPa; P 为页岩破坏时的最大抗拉荷载, N; D 和 h 分别为页岩样品直径和高度, mm。

2) 抗压强度及弹性模量

$$\sigma_c = P_c / A \quad (4-2)$$

$$E_c = \sigma_{c(50)} / \epsilon_{c(50)} \quad (4-3)$$

式中: σ_c 为单轴抗压强度, MPa; E_c 为弹性模量, GPa; P_c 为页岩破坏时的最大抗压荷载, N; A 为页岩样品截面积, mm²; $\sigma_{c(50)}$ 和 $\epsilon_{c(50)}$ 分别为抗压强度的 50%和抗压应变的 50%。

4.2 试验结果

4.2.1 矿物组分

样品分为 yy-1、2 和 3 系列，其中单轴压缩样品分别有 1、2 和 3 组，巴西劈裂样品有 11、12 和 13 组。样品矿物组分主要有石英、长石、铁白云石和黏土矿物，含少量的黄铁矿和方解石，yy-1、2 和 3 系列石英含量范围分别为 34.1~49.4%、40.6~46.1%和 78.3~85.1%，平均分别为 42.03%、44.45%和 81.18%；铁白云石含量范围分别为 1.4~14.8%、11.0~12.4%和 0.0%，平均分别为 6.38%、11.47%和 0.0%；黏土矿物含量范围分别为 20.3~38.3%、15.2~18.7%和 11.0~18.5%，平均分别为 30.75%、16.53%和 15.93%（图 4-2a）。yy-1 和 2 系列石英含量相对 yy-3 系列来说较小，但 yy-1 系列黏土矿物含量最大，说明矿物组分性质和含量对页岩性质差异影响较大，在此引入脆性指数作为页岩脆性程度评价指标^[53]，其表达式为

$$B_r = \frac{(W_{qtz} + W_{dol})}{W_T} \times 100\% \quad (4-4)$$

式中： B_r 为脆性指数； W_{qtz} 、 W_{dol} 和 W_T 分别为石英含量、铁白云石含量和矿物总含量。yy-1、2 和 3 系列平均脆性指数分别为 48.42%、55.92%和 81.18%，脆性指数越大，页岩脆性程度越高，越有利裂纹扩展和体积压裂改造。图 4-2b 为石英含量与脆性指数拟合，拟合度为 0.943，说明石英含量与脆性指数呈正相关；根据以上研究可知页岩中石英含量与黏土矿物含量呈负相关，也可间接得出黏土矿物含量与脆性指数呈负相关。

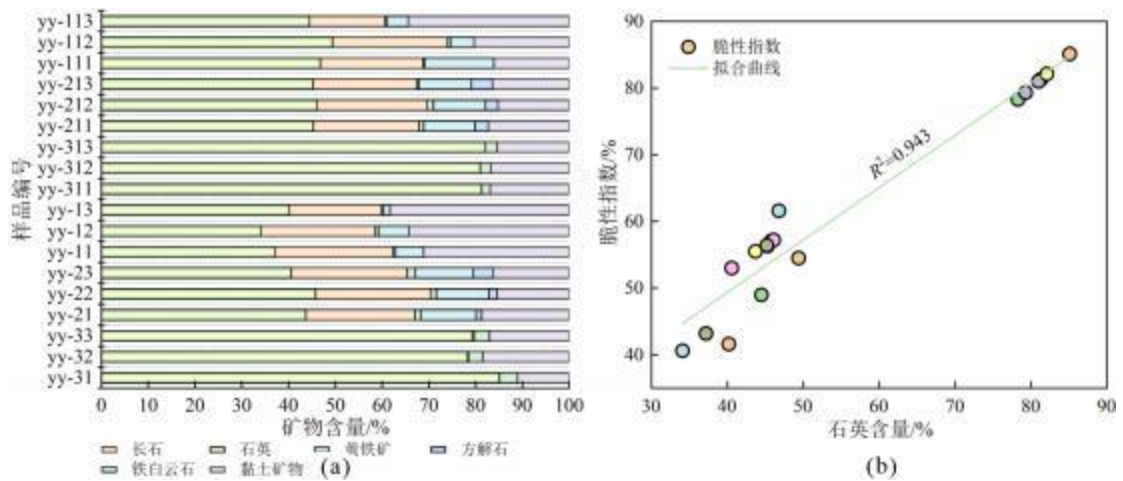


图 4-2 样品矿物组分 (a) 和脆性指数 (b)

4.2.2 巴西劈裂

1) 力学性质

采用巴西圆盘劈裂试验研究矿物组分影响页岩抗拉性质。以 yy-113、yy-213 和 yy-312

为例，各自应力—时间变化曲线差异较大，具体表现为：yy-113 应力—时间变化曲线平缓，峰值应力最低，抗拉时间持续最短；yy-213 应力—时间变化曲线为平缓-陡增两个阶段，平缓阶段处于微裂隙和微孔洞压密过程，样品被压密之后变为似连续介质呈现出弹性变形阶段，该阶段较短，并且发生破坏，相对于 yy-113 而言，加载时间和峰值应力均有所增加；yy-312 应力—时间变化曲线与 yy-213 类似，但压密阶段相对较短，弹性变形阶段相对较长，并且出现了破裂发展阶段，加载时间和峰值应力也是最大的。总的来看，yy-113、yy-213 和 yy-312 的应力—时间变化趋势线依次增加，但斜率增速有所放缓（图 4-3b）；yy-113 脆性指数低（49.0%），黏土矿物含量占比高（34.4%），而 yy-312 脆性指数高（81.0%），黏土矿物含量占比低（16.8%）；从抗拉强度来看，yy-1、2 和 3 系列抗拉强度平均值呈近线性增加（图 4-6c），说明矿物组分性质及含量对页岩力学性质影响较大。

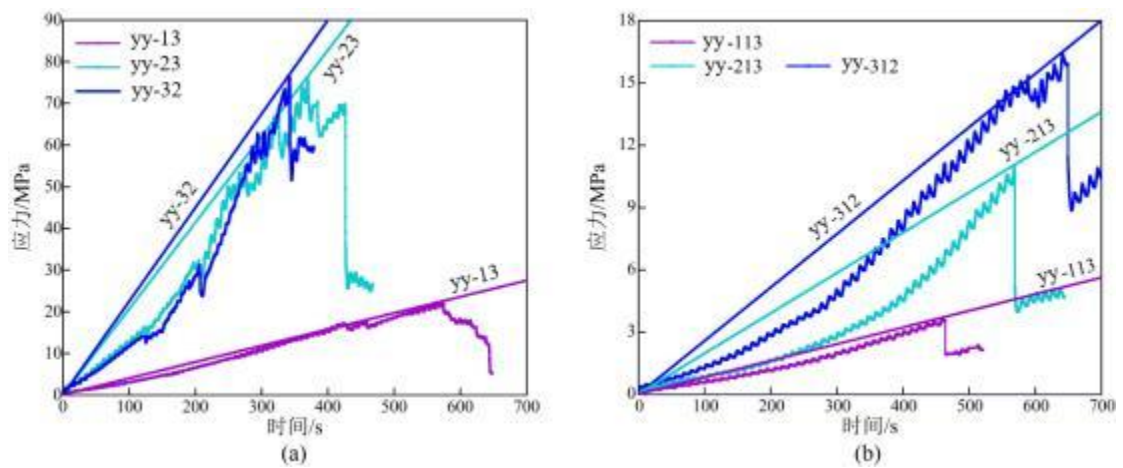


图 4-3 应力时间变化曲线（a 为单轴压缩， b 为巴西劈裂）

2) 裂纹扩展模式

巴西圆盘劈裂试验采用垂直层理加载方式，避免层理效应对裂纹扩展的影响（图 4-4）。yy-1、2 和 3 系列裂纹扩展模式可归纳为轴向贯穿型、侧面滑脱型和侧面滑脱+底部破裂型，具体为：当脆性指数较小，黏土矿物含量较高时，yy-1 系列裂纹扩展模式为轴向贯穿型，主破裂伴生次裂纹，次裂纹转向主破裂，说明 yy-1 系列样品强度低，层理效应对裂纹扩展影响较小；当脆性指数增加，黏土矿物含量减小时，yy-2 系列裂纹扩展模式为侧面滑脱型，一是由于样品本身强度增加，弹性变形持续较长，不易破坏，其次受层理效应影响，层理面垂直加载方向，导致裂纹扩展受阻，形成与层理呈夹角式劈裂路径；当脆性指数较大，黏土矿物含量较小时，yy-3 系列裂纹扩展模式为侧面滑脱+底部破裂型，影响因素与 yy-2 系列类似，但由于脆性指数较大，导致样品底部次薄弱带首先发生破坏。

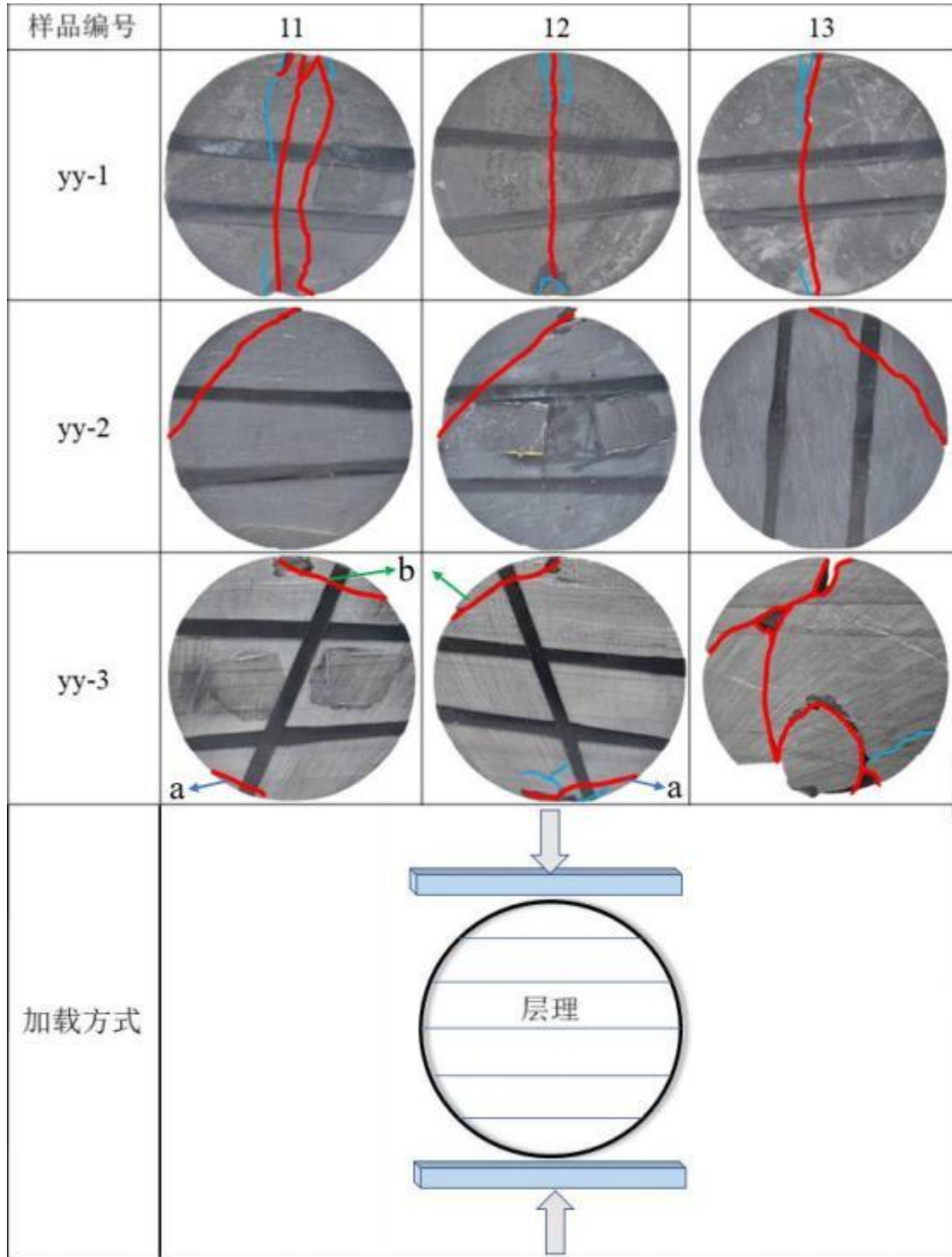


图 4-4 巴西圆盘劈裂试验下页岩裂纹扩展模式 (a 和 b 分别为第一、二次破裂, 红和蓝色分别为主、次裂纹)

3) 声发射特征

不同矿物组分下, 页岩巴西劈裂试验的应力、声发射振铃计数、累计声发射振铃计数、能量、累计能量与时间的关系如图 4-5 所示。不同矿物组分页岩样品的应力—时间曲线、声

发射—时间曲线和能量—时间曲线具有很好的一致性，应力—时间曲线大致可分为 3 个阶段，但 yy-3 系列样品有所区别。当样品脆性指数较低、黏土矿物含量较高时（yy-111），应力—时间曲线可分为压密、破裂发展和完全破坏 3 个阶段，压密阶段声发射信号非常弱，这是因为荷载加载初期应力较小，微裂纹和微孔洞被压密，无明显裂纹产生；破裂发展阶段声发射信号和能量较少，累计声发射振铃计数和累计能量呈小阶梯式增长，这是因为应力增加，样品内部出现破裂；当应力增加到样品抗拉强度时，裂纹迅速扩展，振铃计数和能量激增，导致累计振铃计数和累计能量陡增（图 4-5，yy-111a 和 b）。当样品脆性指数增加，黏土矿物含量降低时，压密阶段有所变长，但破裂发展阶段裂纹破裂较明显，导致声发射信号显著增加，累计声发射振铃计数和累计能量呈中阶梯式增长，当应力增加到样品抗拉强度时，累计振铃计数和累计能量依旧陡增（图 4-5，yy-211a 和 b）。当样品脆性指数较高，黏土矿物含量较低时，应力—时间曲线可分为压密、弹性变形、破裂发展和完全破坏 4 个阶段，压密阶段与上述类似，持续时间相对于 yy-111 较长，无明显声发射信号；弹性变形阶段声发射信号少且强度低，但持续时间较长；进入破裂发展阶段后声发射信号出现首次激增（图 4-4，yy-311a 和 312a），但持续时间较短，很快迎来声发射信号二次激增（图 4-4，yy-311b 和 312b），直至样品完全破坏，脆性破坏特征明显（图 4-5，yy-311a 和 b）。因此，矿物组分性质及含量影响着页岩受压过程中声发射信号及能量变化，反过来说明声发射信号可以很好的诠释不同矿物组分对页岩变形破坏特征及抗拉性质的影响。

4.2.3 单轴压缩

1) 力学性质

采用单轴压缩试验研究矿物组分影响页岩抗压性质。以样品 yy-13、yy-23 和 yy-32 为例，yy-13 与 yy-23、yy-32 应力—时间变化曲线差异较大，具体表现为：yy-13 应力—时间变化曲线持续时间长，曲线平缓，斜率较小，抗压强度低；相较于 yy-13，yy-23 和 yy-32 应力—时间变化曲线持续时间短，曲线陡直，斜率较大，抗压强度高（图 4-3a）；值得注意的是，yy-23 和 yy-32 的脆性指数、黏土矿物含量差距较大，其脆性指数分别为 53.0%和 78.3%，黏土矿物含量分别为 16.2%和 18.5%，但是应力—时间变化曲线斜率和抗压强度相差不大，说明页岩的抗压强度并不是随脆性指数增加而增加。总体上看，yy-1 系列到 yy-2 系列的平均抗压强度增加明显，但 yy-2 系列到 yy-3 系列的平均抗压强度却有小幅度降低的现象（图 4-6a）；平均弹性模量变化规律也有类似规律，yy-1 系列到 yy-2 系列的平均弹性模量显著增加，但 yy-2 系列到 yy-3 系列的平均弹性模量增速明显放缓（图 4-6b），该研究现象王濡岳等^[85]也曾得出过类似的结论，结论为弹性模量等力学参数并不是随脆性矿物含量的增加而

增加，而是存在某一临界值，当脆性矿物含量小于这一临界值时，弹性模量随脆性矿物含量的增加而增加，但超过临界值时，弹性模量随脆性矿物含量的增加而减小，也再一次说明矿物性质及含量对页岩力学性质影响较大。

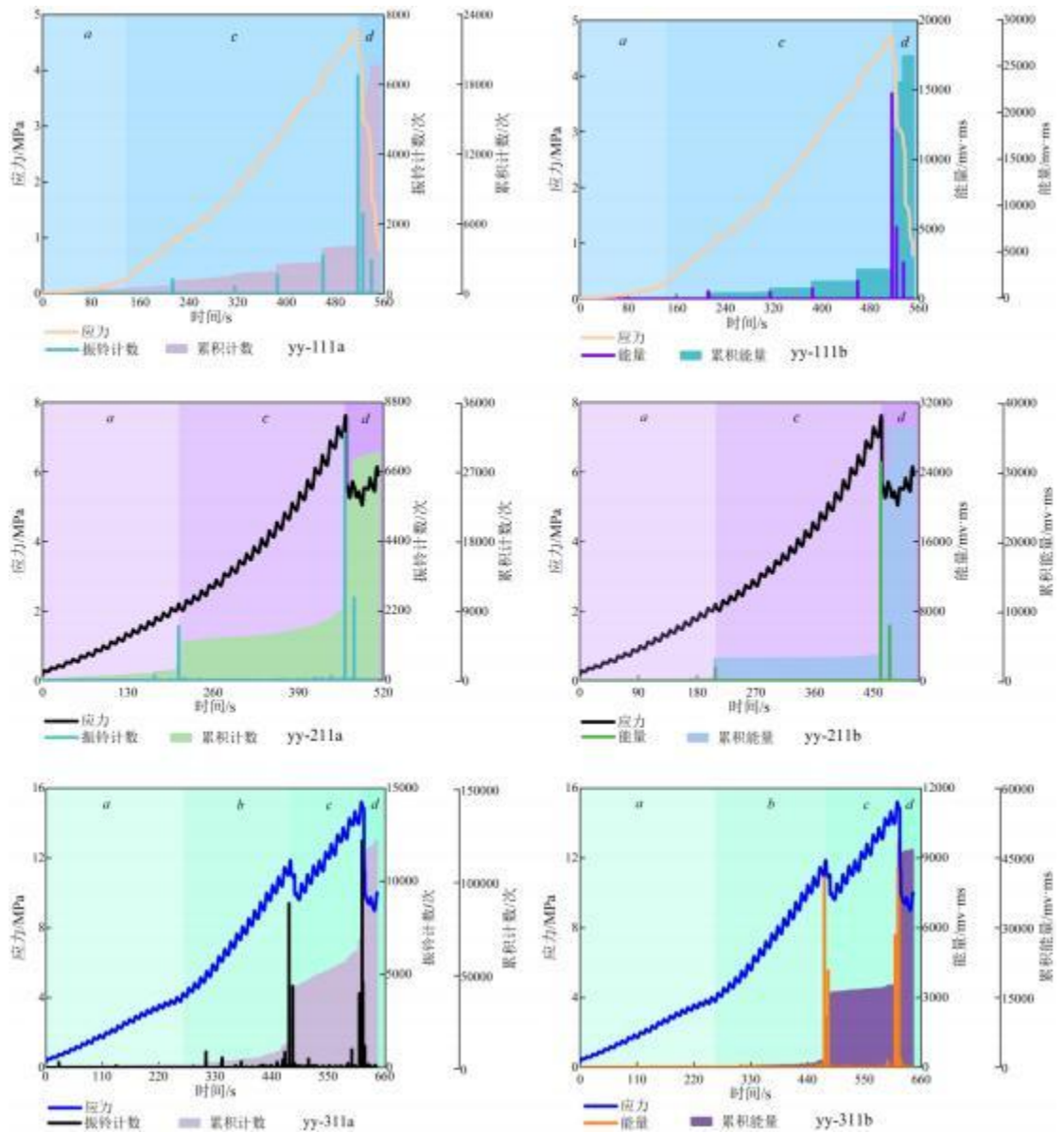


图 4-5 巴西劈裂试验下页岩声发射特征 (a, b, c 和 d 分别为压密阶段、弹性变形阶段、破裂发展阶段和完全破坏阶段)

2) 裂纹扩展模式

单轴压缩试验采用平行层理加载方式，避免层理效应对裂纹扩展的影响 (图 4-7)。yy-1、2 和 3 系列裂纹扩展模式可总体归纳为轴向贯穿型，具体为：当脆性指数较小，黏土矿物含量较高时，yy-1 系列裂纹扩展模式单一，主破裂伴生次裂纹，次裂纹转向主破裂，说明 yy-1 系列样品强度和脆性程度低，裂纹扩展路径少；当脆性指数增加，黏土矿物含量减小

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/196035003015010033>