

硕士学位论文

利用测井资料研究粘土矿物的演化

论文起止日期：2021年9月至2023年4月

摘要

粘土矿物是地层中最为丰富的矿物，是泥、页岩中的重要组成部分，也是砂岩中重要的胶结物和部分骨架构成，在其他类型的岩石中也均含有不同种类和含量的粘土矿物，粘土矿物在地层中随处可见。岩石中粘土矿物的组成、含量以及其物理、化学性质等与砂岩储层的物性相关，也与泥岩盖层的质量关系密切，研究地层中的粘土矿物对油气资源的保护、勘探与开发都有着十分重要的意义。

首先，归纳总结了各类粘土矿物对测井曲线的影响以及其测井响应特征，并利用交会图版法对研究区多口井进行了粘土矿物的定性识别。其次，利用自然伽马能谱测井资料中的铀、钍、钾三种元素的测井响应值与粘土矿物岩心分析化验资料进行交会拟合得到多元回归数学模型和基于测井解释处理软件的 Quanti. Elan 模块的多矿物反演最优化处理计算模型，从而计算得到了研究区多口井粘土矿物的具体含量，两种数学计算模型均能与岩心分析资料较好地吻合；计算结果较好。最后，对研究区多口井粘土矿物的演化特征进行分析，发现研究区多口井在正常压实段粘土矿物成分含量较为稳定，无明显变化，到了一定深度，发生了蒙脱石向伊利石的转化反应，深水区井蒙伊转化深度范围约为埋深 1500m 左右，浅水区井蒙伊转化深度范围在埋深约 1900~2800m 处，随后深度段，高岭石含量也开始减少，伊利石含量则继续增加，此时粘土矿物的主要成分为伊利石。研究区粘土矿物含量在深度剖面上的纵向变化特征符合地层中粘土矿物蚀变的一般规律。

利用测井信息对研究区地层中粘土矿物的种类、含量和其在泥岩中的成岩演化特征进行研究，可以为研究区进一步的储层预测和测井解释提供一些基本参数和一定的参考意义。

关键词：粘土矿物演化，测井资料应用，定量计算，深水沉积

Abstract

Clay minerals are the most abundant minerals in strata. They are an important component of mud and shale, as well as an important cement and part of skeleton composition in sandstone. Other types of rocks also contain different types and contents of clay minerals, which can be seen everywhere in strata. The composition, content and physical and chemical properties of clay minerals in rocks are closely related to the physical properties of sandstone reservoirs, and also closely related to the quality of mudstone cap. The study of clay minerals in strata is of great significance for the protection, exploration and development of oil and gas resources.

Firstly, the effects of various clay minerals on well logging curves and their well logging response characteristics were summarized, and the clay minerals were qualitatively identified in several Wells in the study area by using the crossplot method. Secondly, the multi-regression mathematical model and the multi-mineral inversion optimization processing calculation model of Quanti. Elan module based on well logging interpretation and processing software are obtained by crossfitting the well logging response values of uranium, thorium and potassium in the logging data and clay mineral core analysis data. Thus, the specific content of clay minerals in multiple wells in the study area is calculated. Both mathematical calculation models are in good agreement with the core analysis data. The result of calculation is good. Finally, the evolution characteristics of clay minerals from several wells in the study area were analyzed, and it was found that the content of clay minerals in the normal compaction section of the study area was relatively stable without significant change. At a certain depth, montmorillonite was transformed into illite, and the depth of montmorillonite transformation was about 1500 meters in the deep water area. In shallow water area, the well of transformation from montmorillonite to illite conversion depth ranges from about 1900 to 2800 meters. In the subsequent depth section, the content of kaolinite also begins to decrease, while the content of illite continues to increase. In this case, illite is the main component of clay minerals. The longitudinal variation of clay mineral content in depth profile in the study area accords with the general rule of clay mineral alteration in strata.

Using well logging information to study the type and content of clay minerals and their diagenetic evolution characteristics in mudstone can provide some basic parameters and certain reference significance for further reservoir prediction and well logging interpretation in the study area.

Key words: Clay mineral evolution, Well logging data application, Quantitative calculation, Deep water deposit

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.3 研究内容	4
1.4 研究思路与技术路线	5
1.5 创新点	5
第 2 章 粘土矿物的成岩演化	6
2.1 粘土矿物基本概念及性质	6
2.2 粘土矿物的成岩作用	6
2.3 粘土矿物成岩演化中的脱水特征	11
2.4 蒙脱石伊利石化的影响因素	13
第 3 章 粘土矿物的测井响应	17
3.1 粘土矿物对测井曲线的影响	17
3.2 粘土矿物成分的定性识别	17
第 4 章 粘土矿物成分测井定量计算方法	22
4.1 多元回归拟合的粘土矿物成分计算方法	22
4.2 多矿物反演的粘土矿物成分计算方法	32
第 5 章 工区粘土矿物演化分析	44
5.1 工区岩心资料分析	44
5.2 测井处理结果粘土矿物演化分析	46
第 6 章 成果与结论	53
致 谢	54
参 考 文 献	55
个 人 简 介	61

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

近年来,随着人们对油气资源的需求量日益增大,油气资源的勘探、开发与生产逐步向深度和广度进军,从陆地走向海洋、从浅水走向深水也成为了必然的发展趋势。大型或特大型深水油气田的发现,使原来被认为以泥质为主的浊流系统也逐渐成为了油气勘探的热点。研究数据资料均来源于南海北部海域珠江口盆地某一研究区深、浅水区内油气勘探与开发的相关研究项目。由于研究区域地质概况复杂,地层中有着粘土矿物含量丰富的巨厚泥岩层,较为特殊的区域环境对研究区域的油气勘探开发有着巨大的阻力,为了更好地预测储层,对储层进行更好地解释,因而对研究区域内地层中的粘土矿物开展了一系列的研究工作。

粘土矿物在我国是一种十分重要且又较为丰富的矿产资源,它不仅是工业、制造业等各个行业所需要的原料和配料,在石油地质学中也可以通过预测地层中粘土矿物的种类与含量,达到有效地勘探到丰富油气资源储集层的目的。通过对粘土矿物进行研究,也可以对油气层起到一定的保护作用,从而进一步提高石油的产量和原油的采收率。分布在泥岩、砂岩等各种岩石中的粘土矿物,几乎对所有的测井响应值都会产生一定的影响,这种影响也是利用测井数据资料预测储层、解释粘土矿物的基础^[1]。砂岩储层中总会存在着粘土矿物,粘土矿物对储层的损害一般发生在钻井液、完井液以及增产液与油层中分布的粘土矿物不相适配时。高岭石遇水冲洗会引发细粒迁移;伊利石被水冲洗时会增加微孔隙,同时也会发生细粒迁移的现象;蒙脱石与淡水作用则会发生膨胀作用。这些物理和化学作用都会降低储层岩石的渗透率,从而对储层造成不可预估的损害。从钻井到采收,任何一个环节措施不当,都会使储层遭受到严重的损害,为了保护储层,也必须首先预测岩石中粘土矿物的种类与含量^[2]。因此,通过对粘土矿物的种类和含量进行研究,对石油天然气资源的勘探、开发以及生产都有着十分重要的意义。

为了解研究区粘土矿物成岩与演化特征,需对粘土矿物的成分进行分析。由于研究区的地质情况较为复杂且伴生粘土矿物,这就需要一个可靠而高效的方法来进行粘土矿物类型的识别和含量的计算,并对粘土矿物的演化做出具体的分析,这样可以使得对研究区粘土矿物的相关研究更加地深入,为研究工区进一步的测井解释和地层评价提供一定的参考依据。

1.2 国内外研究现状

粘土矿物在我国不仅分布广泛,且含量较为丰富,约占地层中岩石矿物的一半以上,对于粘土矿物的研究不仅在石油地质学等学科领域中有着一定的作用,且对于粘土矿物的深入研究也有着较高的经济效益和应用价值。国内外对于粘土

矿物进行过较多的研究，主要是针对粘土矿物的种类、所含各种成分的分析比较以及粘土矿物的性质和应用等方面进行研究分析。对于粘土矿物的应用分析已经成为了油气田钻井、完井、油层保护与开发等油气勘探与开发的各项工程开展时必不可少的基础资料。

1.2.1 粘土矿物国外相关研究现状

对于粘土矿物各方面的研究，国外从上世纪中叶伊始就开始对地层中的粘土矿物重视了起来。Grim (1947)和 Brooks (1952)研究发现酸性粘土矿物对有机质的生烃起到了一定的催化作用^[3-4]。Neasham (1977)通过对自生粘土矿物的不同产状进行研究后分析发现，其不同产状对砂岩物性(孔隙度、渗透率)的影响是不同的，分散质点式产状的自生粘土矿物物性最好，薄膜式产状的自生粘土矿物物性其次，搭桥式产状的自生粘土矿物物性最差^[5]。Franks 等(1984)通过对德克萨斯湾海岸粘土矿物的成岩作用进行研究探讨，得到了该地区次生孔隙度、孔隙流体化学与二氧化碳之间的相互关系^[6]。Surdam 等(1984)通过分析砂岩储层中粘土矿物的成岩作用进而分析得到了砂岩储层中次生孔隙的化学性质^[7]。Pitman 等(1992)对砂岩储层中粘土矿物的起源、成岩作用和岩石物理等方面进行了较为全面的分析研究^[8]。Aase 等(1996)针对粘土矿物中粒状涂层微石英对储层孔隙度保存的影响进行了研究，取得了较好的研究进展^[9]。Berger 等(1999)研究得到了德克萨斯湾海岸页岩成岩作用中蒙脱石伊利石化的作用分析^[10]。Gill 等(1999)研究分析得到了古生代泥炭形成环境中的蒙脱石伊利石化作用是生物中钾元素积累的证据^[11]。Lanson 等(2002)分析研究了砂岩中自生高岭石和伊利石矿物的成岩作用^[12]。Shaw (2006)对英国海岸和近海石炭纪的砂岩储层的粘土矿物种类、产状和各种性质等进行了深入的分析研究^[13]。Bernard 等(2012)对油气储层的粘土矿物的转化进行研究得到了其与有机质丰度的对应关系^[14]。Löhr 等(2015)进一步对页岩气储层中粘土矿物和有机质的成岩演化进行了更加深入的分析研究^[15]。Wilson 等(2016)通过对北美较老地层泥岩中粘土矿物进行研究，对老地层中伊利石是否由蒙脱石转化而来提出了质疑，指出中深层伊利石的增多并不一定是蒙脱石转化而来的^[16]。

1.2.2 粘土矿物国内相关研究现状

相较于国外学者对粘土矿物的研究，我国在油气勘探与开发相关领域对粘土矿物的研究起步较晚，一开始对粘土矿物认识不足，研究设备较差，技术方法不够成熟，对粘土矿物的存在造成的影响未能给予足够的重视。近年来我国在油气勘探等行业对粘土矿物的认知、分析方法以及技术手段已日趋成熟，并且每年都会对地层中的粘土矿物进行研究分析，逐步开展了大量工作，粘土矿物在油气的生成、运移、富集、钻井、油层保护、油田开发、三次采油和成岩作用等研究中产生了至关重要的影响^[17]。从总体上来看，我国在油气勘探开发工作上对粘土矿

物资料应用研究的水平相对来说还存在着一定的不规范、不够完善, 缺乏较为更加深入且细致规范的研究探索。王行信(1991)通过对松辽盆地砂岩储层的粘土矿物组成、产状以及其纵向变化特征等方面进行了全面的分析研究, 并进而分析了粘土矿物在成岩作用等方面对储层产能的影响^[18]。郭余峰等(1996)在松辽盆地多块岩石样品的自然伽马能谱测井数据与岩心分析数据建立交会图, 得到对应的数学关系, 为利用自然伽马能谱测井值确定粘土矿物各成分含量具体值提供了一定的参考价值^[19]。石强(1998)通过结合理论计算结果和实际经验资料, 得到了粘土矿物各成分含量值和自然伽马能谱测井值之间的相互对应关系, 初步探索了更进一步地对粘土矿物准确计算方法的研究, 指出计算模型也需要考虑环境和井眼等外在干扰因素的影响^[20]。孙建孟等(1999)通过优化斯伦贝谢粘土识别图版建立了西部地区某油田的钍、钾交会关系图, 并进而分析了大量的测井数据资料, 进一步优化了利用自然伽马能谱数据资料计算粘土矿物含量的数学模型^[21]。伏万军(2000)在系统地研究了西北部分油气田后得出粘土矿物能够进一步影响砂岩储层的储集性能, 储层成熟度较低时, 储集性能与粘土矿物相关性较弱; 储层成熟度较高时, 储集性能与粘土矿物含量呈现出负相关^[22]。刘宝珺(2002)研究了吐哈盆地粘土矿物随埋深的变化规律, 发现粘土矿物组分、沉积水介质等因素都是影响粘土矿物异常成岩的重要原因^[23]。黄思静等(2004)研究了中国中、新生代砂岩储层中绿泥石产生的主要原理以及其与次生孔隙发育的关联性, 发现砂岩储层中因胶结作用形成的绿泥石包膜在很大程度上降低了机械压实作用对孔隙造成的负面影响, 并且随着不断地胶结作用使得包膜增厚, 更大程度上减低了压实作用的影响, 从而使地层中的孔隙得到了较好的发育^[24]。张惠良等(2006)通过对塔里木盆地砂岩储层中粘土矿物原生式包膜和自生式包膜的成因进行了分析, 发现包膜随孔隙的增加会更薄, 也证明包膜的发育与面孔率成正相关关系, 且发现粘土包膜能够较好地影响砂岩储层的性质^[25]。黄茜等(2007)分析了利用自然伽马能谱测井值来计算粘土矿物具体含量的依据, 建立了计算地层粘土矿物含量的回归数学模型, 并且在研究区域取得了很好的结果^[26]。邢培俊等(2008)在缺少自然伽马能谱测井资料的同时利用补偿中子测井、补偿密度测井、声波时差测井等测井曲线建立多元线性回归模型准确的计算了粘土矿物含量, 结果发现该方法简单、可操作性强且结果较好, 也发现在该区利用这三种测井曲线计算粘土矿物含量要优于利用自然伽马能谱测井曲线计算粘土矿物的含量^[27]。黄思静等(2009)通过对鄂尔多斯盆地的高岭石和伊利石进行研究, 发现了它们对钾长石、斜长石类矿物的溶解有一定的促进作用, 且还能进一步影响储层的发育以及保存, 蒙脱石伊利石化的反应也是影响钾长石溶解形成次生孔隙的重要原因^[28]。孙繁凡等(2013)利用 X 射线分析计算岩心的粘土矿物含量, 利用无内标权重等策略优化了该地区粘土矿物的分析方法^[29]。王燕(2013)利用自然伽马能谱测井数据, 进一步优化了粘土矿物

含量的多元回归计算模型，将数学模型应用在页岩油气井上实地计算粘土矿物，并取得了较好的效果^[30]。于景维等(2015)通过对某地区砂岩储层的敏感性进行分析研究，发现该区的储层敏感性主要与粘土矿物的具体含量有一定的关联性^[31]。任增莹等(2016)通过对粘土矿物的组成、含量以及相关指数等信息进行综合将研究区剖面划为4个阶段，其中3个为干湿冷暖大循环^[32]。杜佳宗等(2018)通过对泥岩埋藏过程中高岭石、蒙脱石和伊利石等向绿泥石演化过程进行了深入研究，得到了研究区粘土矿物纵向上的演化特征^[33]。刘菲等(2019)通过对泥岩的成岩粘土矿物种类及含量进行了有效地识别并对成岩体系进行了恰当的划分^[34]。宁波等(2020)通过利用自然伽马能谱测井资料来确定粘土矿物，并在交会图版法的基础上进行一定的改进，从而为识别地层岩石岩性特别是粘土矿物的识别提供了新的研究思路，同时也为延安地区的油气勘探开发工作提供了较为可靠的理论参考依据^[35]。李超等(2020)以研究地区的地层温度为界限，将地层中泥岩的压实作用划分为了三个阶段，其中粘土矿物的转化反应主要控制了泥岩的化学压实过程^[36]。赵建华等(2021)对粘土矿物的成岩以及其与有机质的相互作用进行了研究，取得了较好的研究进展^[37]。李鑫羽等(2021)基于BP神经网络建立了粘土矿物预测模型^[38]。余威等(2023)研究发现长石类铝硅酸盐矿物发生溶蚀作用后可以使得粘土矿物中高岭石的含量更高，粘土矿物的成岩作用发生的流体滞留效应从而抑制了蒙脱石向伊利石转化反应的程度^[39]。蔡来星等(2023)对致密砂岩储层中粘土矿物的发育特征及其生长机理进行了研究并取得了不错的进展^[40]。

1.3 研究内容

研究内容主要有以下几点：

(1) 粘土矿物的测井响应

针对粘土矿物种类以及含量的差异对测井曲线响应值的影响，利用交会图版法定性识别研究工区数口井粘土矿物的主要成分。

(2) 粘土矿物成分测井定量计算方法

采用两种数学模型计算得到研究工区粘土矿物的具体含量。一种是利用自然伽马能谱测井资料中的铀、钍、钾三种元素的测井响应值与粘土矿物岩心分析资料进行交会得到多元回归拟合数学模型计算研究区域粘土矿物的含量；另一种是利用测井解释软件多矿物反演最优化处理模块，调节输入合适的参数，从而得到研究工区粘土矿物的具体含量。

(3) 工区粘土矿物演化分析

利用两种数学模型得到的粘土矿物计算结果，并结合岩心分析资料等，分析得到研究工区蒙脱石、伊利石等粘土矿物在纵向埋深上的变化规律，从而进一步得到研究工区粘土矿物的演化特征。

1.4 研究思路与技术路线

本文的研究思路为利用已有图版对粘土矿物进行定性识别，采用多元回归和最优化反演两种数学模型来准确计算粘土矿物具体含量，最后利用计算得到的结果对粘土矿物演化特征进行分析。研究技术路线如图 1-1 所示：

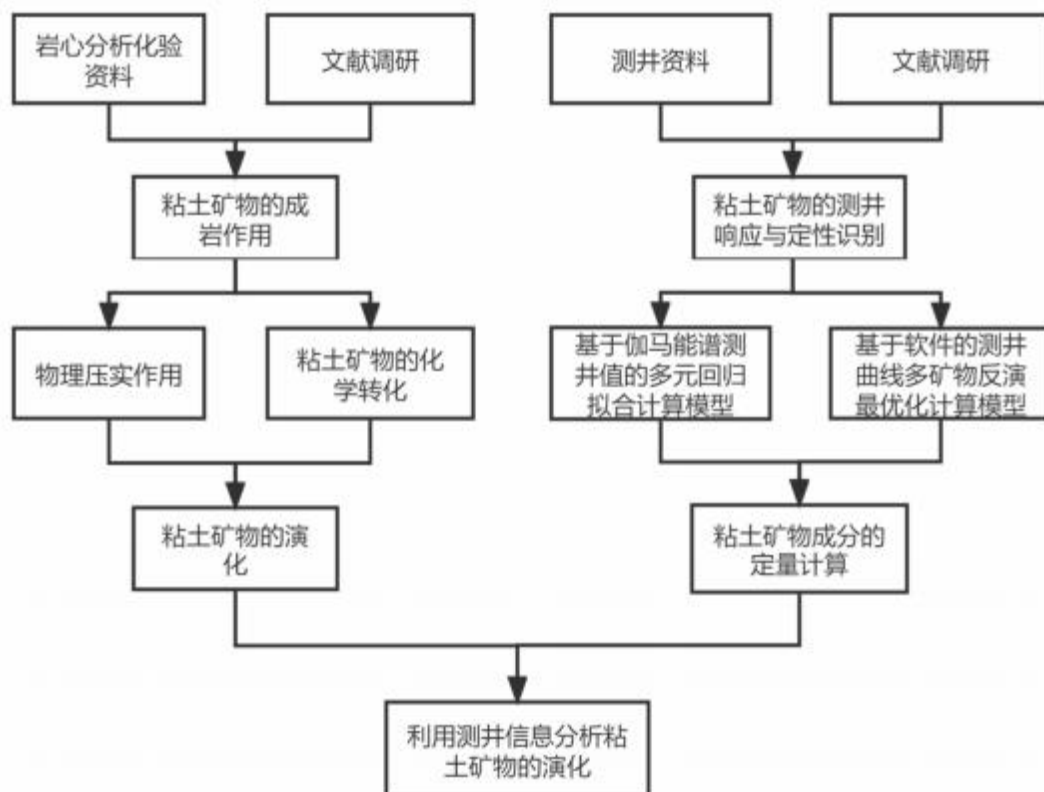


图 1-1 研究技术路线图

Figure 1-1 Research technology roadmap

1.5 创新点

以往对粘土矿物演化特征的相关研究主要为实验室岩心、薄片分析等，成本较高，且研究困难，分析精度的提升往往需要更多的取心分析资料来进行支撑。相较于岩心分析等资料，测井曲线的使用不仅可以使得研究过程更加方便，且测井曲线具有连续性的特点，对于测井信息的合理应用能够更好地去分析研究粘土矿物的演化特征，因而本文通过利用测井信息资料从而对研究工区的粘土矿物演化特征进行研究。

第 2 章 粘土矿物的成岩演化

2.1 粘土矿物基本概念及性质

粘土矿物是颗粒较细的($<2\mu\text{m}$)、较为分散的、具无序过渡结构的、含水的层状构造铝硅酸盐矿物以及层链状构造的铝硅酸盐矿物。通常我们在地层中见到的粘土矿物结构主要是具有层状构造的铝硅酸盐矿物,只有极少数结构为层链状构造铝硅酸盐矿物。粘土矿物其基本结构主要为硅氧多面体结构的四面体或者八面体,且四面体构造是粘土矿物中最基本、最稳定的基本结构单元。粘土矿物一般都吸附有正负电荷,且存在着较大的比表面积,这决定了粘土矿物具有较强的吸附性、离子交换性、膨胀性、分散性、凝聚性和可塑性等特点^[41]。在石油地质学中,粘土矿物的主要成分为蒙脱石、伊利石、高岭石、绿泥石以及其他的混层粘土矿物等^[42]。

蒙脱石(montmorillonite),又名胶岭石,属于 2:1 层型结构具膨胀性的含水铝硅酸盐类矿物。通常呈块状或呈细小鳞片状集合体状,在电子显微镜下常见为片状晶体的形态。蒙脱石的化学结构式为: $(1/2\text{Ca}, \text{Na})_{0.66} (\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_4 [(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}] (\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 。蒙脱石矿物本身并不具有放射性元素,对具有放射性元素的矿物显示出较强的吸附能力,蒙脱石吸附了较多的氧化铀因而具有最为强烈的放射性,因而在粘土矿物中,它对岩石的放射性做出的贡献最大。蒙脱石由于矿物层与层间含有层间水,单元层间具有可交换性的钙、镁、钾、钠等阳离子,因而其阳离子交换能力较强,这些阳离子可被有机阳离子所取代,显示出较为独特的膨胀性、收缩性等性质。蒙脱石的比表面积较大。

伊利石(illite),又名水白云母,为不可膨胀的、具有二八面体结构、含铝的、钾质的、细颗粒的($<4\mu\text{m}$)的 2:1 型层状类云母类矿物。在电子显微镜下可以看见呈现出显微或者超显微的鳞片状不规则集合体,个别鳞片呈六边形伊利石的化学结构式为: $\text{K}_{1-1.5}\text{Al}_4 (\text{Si}_{7-6.5}\text{Al}_{1-1.5}\text{O}_{20}) (\text{OH})_4$ 。伊利石本身含有放射性钾元素,因而具有一定的放射性,且对氧化铀也具有一定的吸附能力,在粘土矿物中,对岩石的放射性做出贡献仅次于蒙脱石。

高岭石(kaolinite),为重矿物,存在于酸性环境中。多为隐晶质致密块状和土状集合体,在显微镜下可发现单体形态多呈现出六角形板状、书本状集合体。高岭石的化学结构式为: $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10} (\text{OH})_8$,相应的化学成分为: SiO_2 占比约 46%, Al_2O_3 占比约 40%, H_2O 占比约 14%。高岭石和蒙脱石一样,其矿物本身并不具有放射性矿物元素,高岭石阳离子交换量为 3~15mmol/100g,其阳离子的交换能力远远不如蒙脱石强,其对放射性矿物的吸附能力相比较于蒙脱石和伊利石来说较差,因而在粘土矿物中,对岩石的放射性做出的贡献相对较小。高岭石的矿物结构中只含有结构水,不像蒙脱石一样有着层间水和吸附水的存在。

绿泥石(chlorite), 为具有特殊 2:1:1 层型结构的含水的层状铝硅酸盐矿物。其化学结构式为: $(\text{Mg, Fe, Al})_{12} [(\text{Si, Al})_8\text{O}_{20}] (\text{OH})_{16}$ 。绿泥石一般为沉积作用、中、低温热液作用以及浅变质作用等作用的产物。其结构单元层的层间域被带有正电荷的八面体片所充填, 中国含油气盆地主要为三八面体铁镁过渡型偏富铁绿泥石(简称为富铁绿泥石), 偏富镁者在少数样品中存在。绿泥石通常存在于碱性环境中, 因而也适合在碱性环境中进行保存, 绿泥石的酸敏性对储层往往会造成巨大的危害。常呈鳞片状和隐晶质, 单晶结构呈假六方片状或板状, 比较少见。和大多数粘土矿物一样, 其本身也并不具有放射性元素, 相对于蒙脱石、伊利石和高岭石来说, 其阳离子交换能力最弱, 对放射性核素的吸附能力也最差, 因而在粘土矿物中, 对岩石的放射性做出的贡献最小。

2.2 粘土矿物的成岩作用

成岩作用指的是发生在沉积物有效埋藏(与上覆水体脱离)之后至变质作用之前的所有变化和作用。成岩作用的类型主要有胶结作用、交代作用、溶蚀作用、重结晶作用、矿物的多型转变、压实作用、压溶作用、差异溶解作用、沉积后的矿物形成及转变作用等。由于泥页岩和砂岩矿物的成分、结构等特征均不相同, 所以泥页岩和砂岩具有不同的成岩作用方式和特征。概括来说, 压实作用和化学转化作用是泥页岩的主要成岩作用方式; 胶结作用、压实作用、压溶作用和重结晶作用是砂岩的主要成岩作用方式。

对于粘土矿物来说, 泥岩粘土矿物成岩作用主要是粘土矿物的成岩演化。泥岩粘土矿物成岩演化是成岩阶段划分、油气生成和运移研究的重要内容。在泥页岩成岩作用过程中, 主要的物理变化就是粘土矿物的压实作用, 蒙脱石向伊利石转化是泥岩中最主要的成岩化学作用, 因而本节内容主要是分析粘土矿物在泥岩中的物理压实作用和化学转化作用。

2.2.1 粘土矿物的压实作用

根据地层深度以及同深度地层温度的变化, 以泥岩中的主要粘土矿物转化为标识, 泥岩的主要成岩过程一般划分为物理压实和粘土矿物的化学转化两个阶段^[37]。压实作用是随着地层深度和所受压力的增加以及其他因素(时间、温度等)的影响, 泥岩孔隙度减小、密度增大以及孔隙内流体排出的过程。泥岩的物理压实作用主要受到压力的影响, 即上覆地层对其施加的压力; 相比于其他成岩作用, 压实作用也是泥岩中最主要的成岩作用, 主要控制了泥岩在不同温度和压力的作用下孔隙度的演化, 进一步影响了泥岩岩石物理特征的变化等^[43-46]。所有较为重要的压实作用都发生在孔隙度较高的沉积物中, 矿物颗粒以及存在孔隙中的液体和气体都参与了这些作用。孔隙度随深度的减小是压实作用最主要特点, 压实作用的另一个特点就是液体和气体在孔隙中缓慢地进行移动。图 2-1 为何炳骏对华北

地区的泥岩压实情况进行研究得到的泥岩孔隙度随深度变化的压实曲线图^[47]，这也是国内的第一条压实曲线，该图可用作研究泥岩在压实作用下孔隙度的一般变化情况。

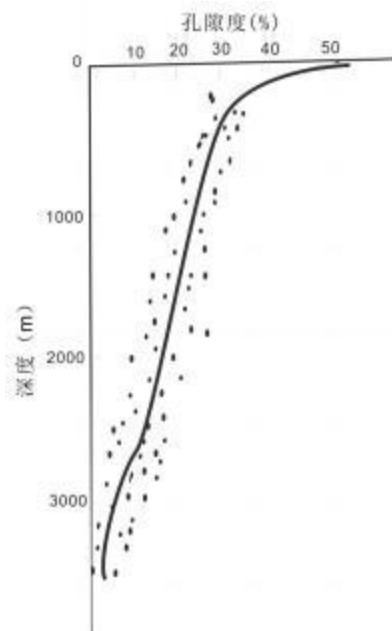


图 2-1 华北地区泥岩孔隙度与深度关系图^[47]

Figure 2-1 Relationship between mudstone porosity and depth in North China ^[47]

根据泥岩孔隙度的变化特征国内学者将泥岩的压实过程主要划分为四个阶段，表 2-1 分别为四个压实阶段所对应的压实脱水特征。在压实的后三个阶段，粘土矿物的成分会发生一定的变化^[46]，这也就涉及到了粘土矿物的相关化学转化反应。

表 2-1 泥岩不同压实阶段脱水特征简表

Table 2-1 Dehydration characteristics of mudstone at different compaction stages

压实阶段划分	脱水特征
初期压实阶段	孔隙度急剧减小，孔隙水大量排出
稳定压实阶段	孔隙水继续排出，并开始出现粘土矿物脱水的特征
压实剧变阶段	再次大量排水，排出的水主要是粘土矿物脱出的水
紧密压实阶段	继续脱出少量水，主要排出少量的粘土矿物晶间水

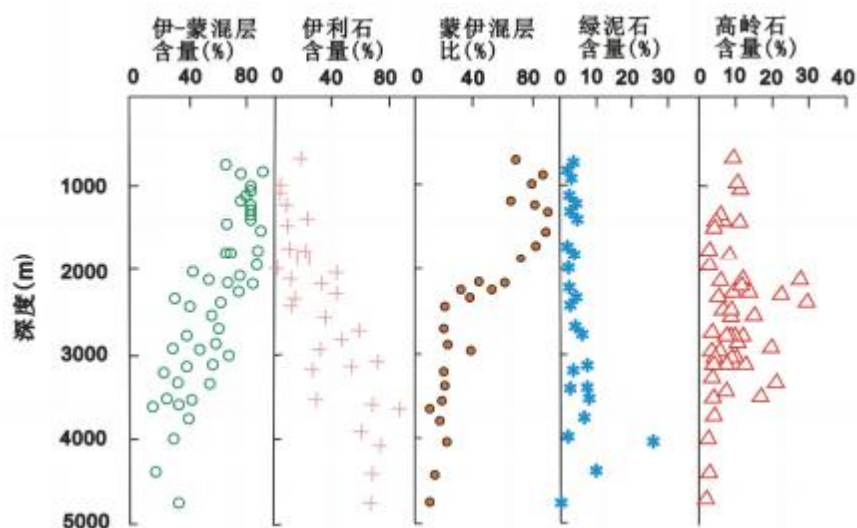
2.2.2 粘土矿物的转化反应

泥岩的化学转化反应过程则主要受到地层温度的影响，在地温达到一定的临界温度点时主要发生泥岩的化学转化，即粘土矿物的成分转化^[48-49]。蒙脱石是粘土矿物中最丰富的原始矿物组分，在粘土矿物的化学转化过程中，由于受到地层孔隙流体环境和地层温度等方面因素的影响，在地层中粘土矿物的转化反应主要是蒙脱石向伊利石进行转化^[50-53]。Braide 等通过研究总结得到了蒙脱石向伊利石转化的基本公式，如式(2-1)所示。其转化的过程是蒙脱石与 K^+ 和 Al^{3+} 发生反应，脱去硅质矿物，从而转化生成伊利石。其中 K^+ 和 Al^{3+} 的存在是蒙脱石向伊利石转化不可或缺的流体环境^[54]。



蒙脱石向伊利石进行转化是粘土矿物在泥岩等沉积岩中最为重要的一种矿物化学反应，蒙脱石、伊利石以及蒙脱石伊利石化的中间产物伊蒙混层粘土矿物三者之和就占了沉积岩中粘土矿物的绝大部分，伊蒙混层粘土矿物是蒙脱石向伊利石进行转化的中间产物，并且蒙脱石向伊利石进行转化所需的 K^+ 绝大部分的来源均是来自于岩石内部中富 K^+ 矿物的溶蚀，其中钾长石等含钾矿物溶解在空隙流体中的 K^+ 是蒙脱石向伊利石转化提供 K^+ 的重要来源。并且蒙脱石向伊利石的每一步转化都与油气的生成、运移以及聚集有着较为密切的关系。此外蒙脱石伊利石化的研究还有助于成岩历史的恢复、热液蚀变的研究、传统结晶学理论的发展等。可见蒙脱石伊利石化的研究具有非常重要的地质理论意义和实际应用意义。

粘土矿物本身的层状晶体结构特点决定了这类矿物对沉积成岩环境的变化非常敏感。隋风贵等利用济阳凹陷地区泥岩中粘土矿物 X 衍射化验分析资料，建立了粘土矿物的纵向变化关系图(图 2-2)^[55]。在该区域中泥岩中粘土矿物主要以伊利石、蒙伊无序粘土矿物和伊蒙有序粘土矿物为主，这三者之和就已经占据了粘土矿物绝大部分的含量，相对来说，高岭石和绿泥石的相对含量就显得较少了。随着地层深度的增加，伊蒙混层和蒙伊混层粘土矿物相对含量都逐渐减小，逐步向伊利石进行转化，伊利石相对含量则相应地进行增加，高岭石相对含量在深度约 3000m 处地层上半段没有较为明显的变化，而在约 3000m 以下地层深度范围内其相对含量则迅速减小，并且在一个很小的深度范围内降到了一个极小值，而绿泥石的含量在整个深度剖面上随深度的变化就没有那么明显了。因而可以发现，粘土矿物在深度剖面上的变化，是具有一定的复杂性的。

图 2-2 济阳凹陷泥岩中粘土矿物含量随深度变化关系图^[55]Figure 2-2 Relationship of clay mineral content with depth in mudstone in Jiyang Depression area^[55]

粘土矿物的转化反应并不仅仅是蒙脱石向伊利石的转化，粘土矿物中还存在着其他粘土类型的各种转化反应，各种反应之间也有着较为复杂的影响因素。在埋藏深度较浅时，物理的压实作用为主要的因素，主要还是受到上覆应力的影响，由于深度较浅，地层温度也较低，因而也使得各类粘土矿物之间互相转化的反应程度也较弱，各类粘土矿物成分则处于相对较为稳定的阶段^[56-58]。随着埋藏深度的增加，粘土矿物的化学转化反应取代了粘土矿物的压实作用逐渐占据着主导地位，随着地层上覆压力和温度的增大，粘土矿物的组合将会在一定的温度压力条件下向着更加稳定的热力学平衡方向进行移动，从而使得粘土矿物成分的组合变得更加稳定^[59]。随着埋深的增加，地层温度在约 70~90°C 时，蒙脱石可转化为混层粘土矿物和伊利石^[60]。在不同的化学环境中，蒙脱石向粘土矿物的转化反应也有着一定的复杂性，可以向不同的粘土矿物发生转化反应，在 K^+ 含量较高的环境中蒙脱石会朝着向伊利石转化的方向进行，然而在 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 含量较为丰富的环境中则会朝着绿泥石进行转化^[61-62]。高岭石在地层温度约 70~100°C 和 PH 值约 5.3~6.0 的酸性环境中能够保持稳定，且只有孔隙流体中的 K^+ 和 H^+ 较低时才是形成高岭石的必要条件，这是因为高岭石可与钾长石溶解的 K^+ 或其他含钾矿物发生反应从而转化生成伊利石，在没有 K^+ 或者 K^+ 含量较低的环境中，高岭石能够在更高的地温条件下保持稳定，而且在有酸性流体来源和能持续保持酸性的孔隙流体环境也是高岭石存在的必要条件^[63-65]。但随着埋藏深度和地温的增大以及粘土矿物所处孔隙流体环境由酸性向碱性的变化，高岭石在碱性环境中则会逐步向绿泥石和伊利石发生转化^[59,66]。

2.3 粘土矿物成岩演化中的脱水特征

通过对海相环境中粘土矿物的埋藏成岩史以及含水量随深度变化的相关关系进行研究分析(图 2-3)^[67-68], 发现在浅表层, 泥岩的含水量随着埋藏深度的增加而急剧地减小, 这是由于在此阶段泥岩主要成分为蒙脱石, 通过压实作用释放出大部分的孔隙水和过剩的层间水; 随后泥岩含水量的大小随深度的增加则开始缓慢地减小, 主要是因为在该深度范围泥岩成分稳定, 压实效果较好, 粘土间的层间水和晶间水则相对稳定, 没有较多的水可以排出, 因而在该阶段含水量随深度的增加而减少的量则没有那么的明显, 到了第二脱水阶段, 在此深度范围内, 蒙脱石向伊利石的转化反应相对于压实作用占据了主导地位, 由于蒙脱石向伊利石蚀变, 层与层之间的氢键会发生断裂, 会排出很大部分的层间水, 从而导致在此阶段泥岩中可供运移的自由水含量又会明显的增大, 随着埋深的继续增加, 粘土矿物的晶间水也会开始析出, 自由水的含量随着压实将会进一步地继续减少, 直至可供运移的自由水含量趋近于 0, 而此时的泥岩中也已经几乎没有了孔隙的存在。泥岩孔隙度以及含水量的迅速减小主要是在浅埋深的初期压实阶段进行的。

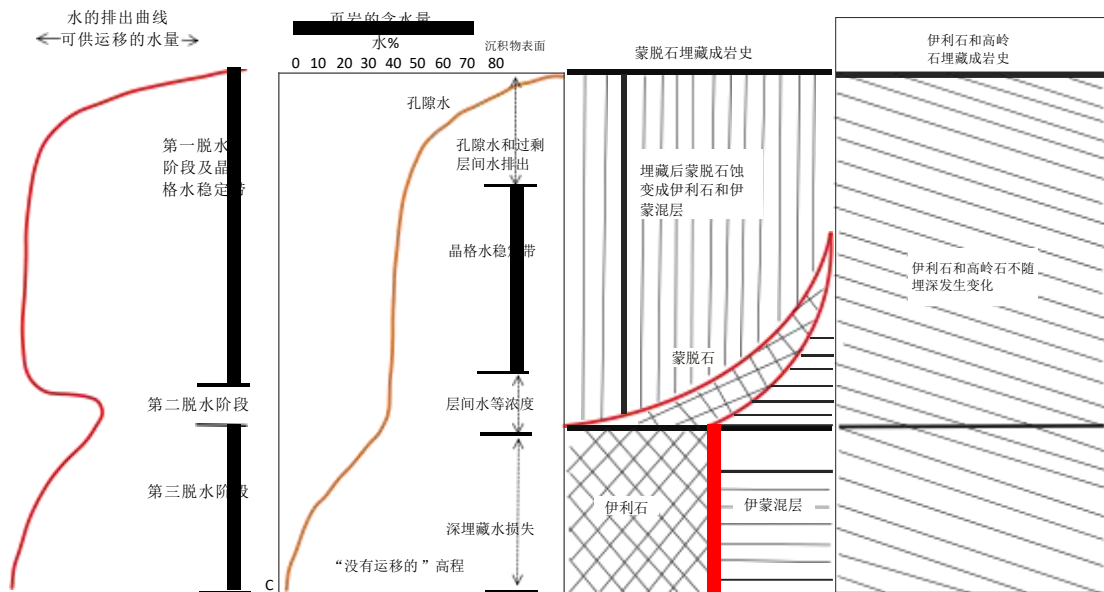


图 2-3 粘土矿物类型和含水量纵向变化关系图^[67-68]

Figure 2-3 Graph of vertical variation of clay mineral type and water content^[67-68]

利用了研究工区 7 口井共 37 块绝对含量大于 20% 的粘土样品的 X 衍射化验分析结果得到蒙脱石和伊利石的相对含量与埋深的对应关系(图 2-4)。从图中可以看见, 在研究工区内, 蒙脱石的相对百分含量随着埋深的增加而逐渐减小, 从 15% 左右减小到趋近于 0, 而伊利石的相对百分含量随着埋深的增加而逐渐增加, 从

40%增加至 90%左右，到埋深 3500m 左右时伊利石的相对含量则达到了极大值，此时的粘土矿物成分也主要为伊利石。在埋深约 2000~3500m 范围内，主要是此深度范围内伊利石相对含量增加地较为明显，此深度范围是处于第二脱水阶段及以下阶段的深度范围的。

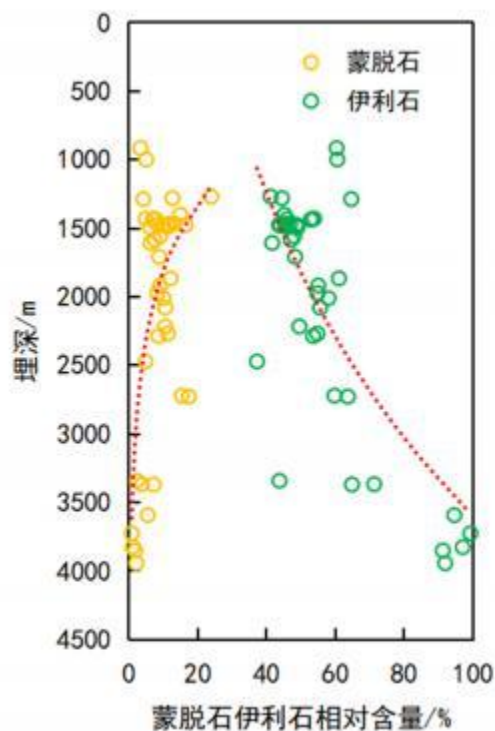


图 2-4 工区岩心分析蒙脱石、伊利石相对含量与埋深关系图

Figure 2-4 Relationship between relative content of montmorillonite and illite and burial depth through core analysis in the work area

Burst 依据三阶段脱水次序提出了一种压实脱水模型(图 2-5)^[69]。从图中可以知道海相泥岩在压实过程中各个压实阶段泥岩中矿物和流体组分的体积构成，泥岩在沉积的初期含有大量的孔隙水，加上一定量的层间水和晶间水，因而泥岩在沉积的初期阶段的含水量几乎达到了 80%左右，占据了大部分的体积空间，而固体的颗粒成分相对来说则较少。泥岩在整个压实过程中，孔隙水的含量减少是很明显的，膨胀性粘土矿物体积分数的减小与粘土矿物的转化有关，而非膨胀性粘土矿物体积分数则相对应地进行增大。

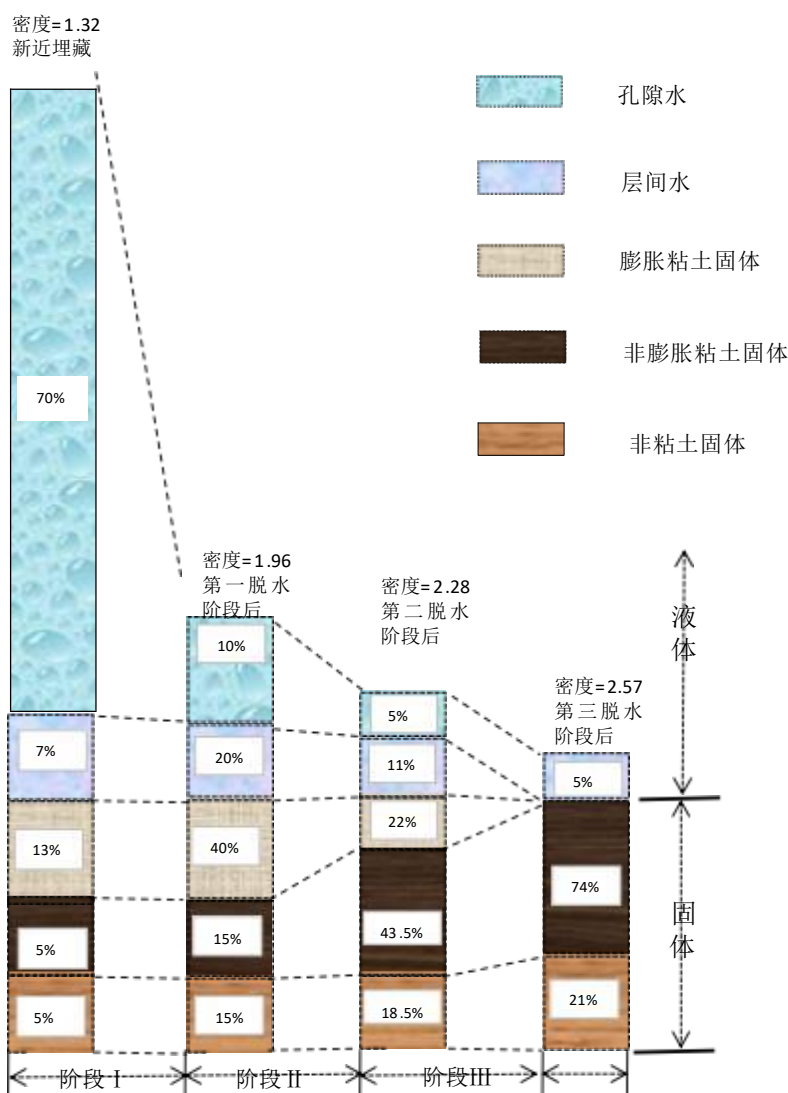
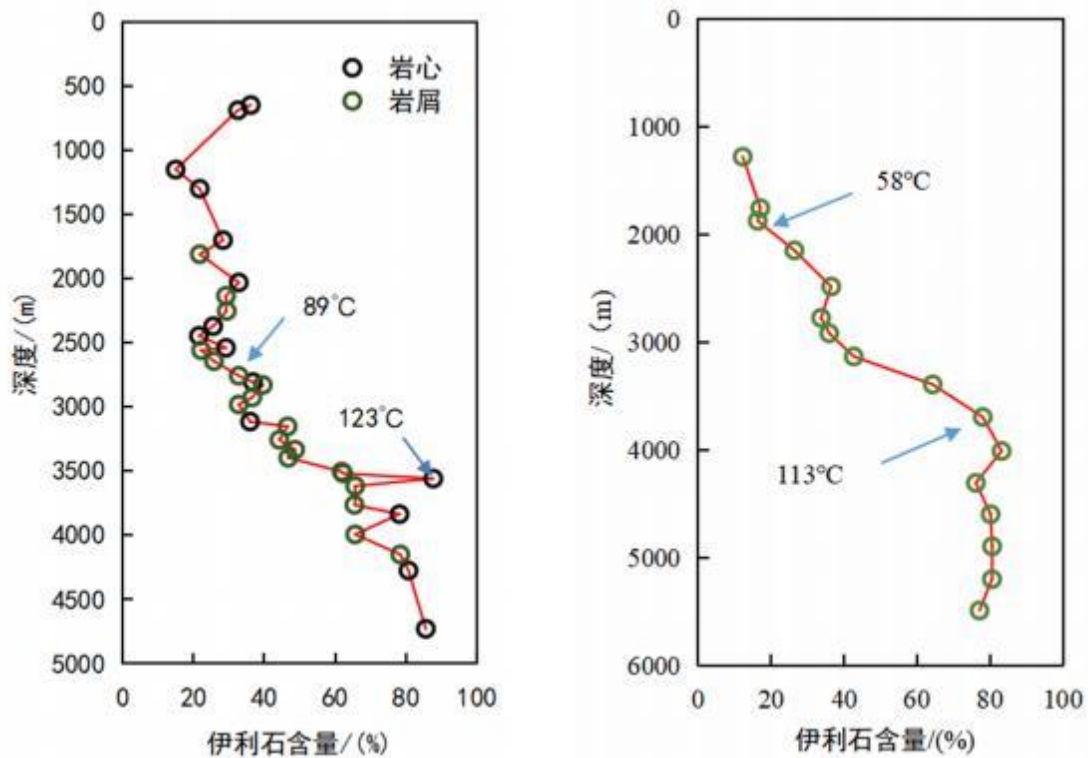


图 2-5 海相泥岩压实过程的体积构成^[69]

Figure 2-5 Volume composition of Marine mudstone during compaction process^[69]

2.4 蒙脱石伊利石化的影响因素

由于蒙脱石伊利石化是泥岩成岩演化中最主要的化学转化反应，因而主要针对蒙脱石伊利石化这一转化反应的影响因素进行相关探讨。蒙脱石向伊利石的转化反应主要是受到地层温度的控制，不同地区不同地质年代的地层中蒙脱石开始向伊利石的转化反应的温度界线是不同的，蒙脱石向伊利石的转化程度与温度的关系具有很大的地区差异性。Robert 等通过对美国湾岸四个地区的粘土资料进行研究也证实了上述观点^[70]，图 2-6 为 Robert 等的研究成果，由图可见在不同地区蒙脱石向伊利石转化的温度界限和深度转化界限是有差别的，其温度和深度开始转化的区间大约在 58°C~89°C和 1800m~2800m 处范围内。

图 2-6 美国湾岸地区蒙脱石伊利石化的温度深度变化^[70]Figure 2-6 Temperature and depth variation of montmorillonite to illite transformation in the Gulf Coast of the United States^[70]

通过对大量实际资料的进行研究，总结得到了蒙脱石向伊利石转化的温度界限与以下因素有关：

(1) 压力和时间的影响

Perry 等列出了美国湾岸地区不同地温梯度的两口井中蒙脱石伊利石化的温度与深度的关系(图 2-7)^[71]。由图可见，1 号井随着深度的增加蒙脱石向伊利石转化的速率明显高于 2 号井，1 号井的地温梯度高于 2 号井，相同的温度，在正常压力梯度下，1 号井的孔隙流体压力是低于 2 号井的，然而蒙脱石伊利石化的速率 1 号井却高于 2 号井，这能够说明孔隙流体超压反而对蒙脱石向伊利石的转化起到一定的抑制作用，较大的埋深需要更高的温度去进行补偿，因而在超压的地层中，相同埋深的情况下，其地层压力是高于静水压力的，因而在超压的地层中，粘土矿物转化速率更慢，转化速率会受到地层超压的抑制。地层超压对蒙脱石转化的抑制可以用勒夏特列原理来进行解释，流体压力的逐渐增加，反而会反过来阻止蒙脱石进一步脱水蚀变，从而抑制蒙脱石的转化。

关于两口井成岩演化的温度差异除了压力的影响外，还存在时间的因素。图中 1 号井的大部分粘土取样样品的地质年代为始新世，2 号井的粘土取样样品多为上新世到更新世之间，1 号井的地层年代是要远早于 2 号井的。随后，Mccubbin

等通过对美国湾岸地区第三系地层多口井进行研究发现，蒙脱石伊利石化的反应速率确实与埋藏时间地质年代有着密切的关系^[72]。相同的条件下，较年轻的地层中岩石中的蒙脱石伊利石化程度是明显低于古老地层的，成岩演化反应所经历的时间对反应的速率有着较为显著的影响，足够长的反应时间是可以弥补反应温度的不足的，这能够表明时间也是控制蒙脱石向伊利石转化程度的又一十分重要的因素。一般来说，始新世以前的地层泥岩中蒙脱石开始向伊利石转化的起始温度大约在 55~80°C 之间，而始新世之后的地层泥岩中蒙脱石开始向伊利石转化的温度界限大约在 85~115°C 之间。

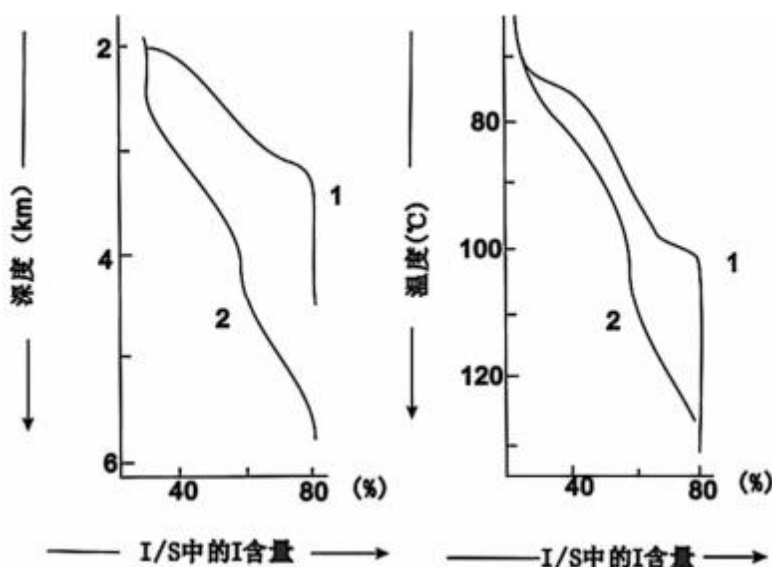


图 2-7 蒙脱石伊利石化深度温度影响关系图^[71]

Figure 2-7 Effect of temperature and depth on the transformation of montmorillonite to illite^[71]

(2) 孔隙流体的化学成分及含水量的影响

孔隙流体中富 K^+ 是蒙脱石向伊利石转化所必须的条件。Turner 等通过对科罗拉多高原东部莫里森组的一套没有被深埋和遭受热水蚀变的地层中的蒙脱石和伊利石进行研究发现，当温度对其的作用不那么明显时，孔隙流体中的化学成分，尤其是 K^+ 含量的多少就起到了至关重要的作用^[73]。水作为一种介质条件，在溶解、运移、重结晶等作用中都是十分重要的，实验表明蒙脱石伊利石化的反应速率会随孔隙水的增多而明显地加快^[74-75]。

(3) 岩石矿物化学成分的影响

由于岩石中粘土矿物的成岩演化所需要的化学组分主要都是来自岩石内部的成分，因而泥岩的矿物和化学组成对粘土矿物的成岩演化有着明显的影响。由前文可知，富 K^+ 是蒙脱石向伊利石发生转化反应的必要条件。钾元素的来源一种是

孔隙流体中本身含有的 K^+ ，另一种则是诸如钾长石这种的含钾矿物溶蚀反应产生的 K^+ 。岩石组分中的钾长石含量和孔隙水中 K^+ 含量的多少可以明显地影响到蒙脱石向伊利石转化的进程，当地层中泥岩层内的蒙脱石都已全部转化成了伊蒙混层矿物和分散型伊利石后时，这种膨胀类粘土固体会因为缺失足够的 K^+ 仍然会留有较为明显的蒙脱石矿物特征，这种情况在较多的含油气盆地是较为常见的现象，这也能够说明岩石组分能够是否持续地给蒙脱石向伊利石转化的反应提供足够的 K^+ 也决定了蒙脱石伊利石化的反应速率和程度。

(4) 蒙脱石原始组分的影响

蒙脱石的原始组分能够决定它在向伊利石转化的过程中释放出组分的种类和含量，因而也会间接地影响到蒙脱石伊利石化的进程。Eberl 等研究发现富 Al^{3+} 的蒙脱石相比贫 Al^{3+} 的蒙脱石会更为容易地转化成伊利石， Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的存在将会减缓蒙脱石伊利石化的反应速率^[76]。这些实验结果均能够表明蒙脱石的原始组分是能够影响其向伊利石转化反应速率和程度的一个较为重要的因素。

由此可见，地层压力、地质年代(时间)、孔隙流体的化学成分及含水量、蒙脱石及其他矿物的化学组分等都是能够影响蒙脱石向伊利石转化反应速率和反应程度的十分重要的因素。

第3章 粘土矿物的测井响应

3.1 粘土矿物对测井曲线的影响

粘土矿物对测井曲线的影响常常体现在以下几个方面：（1）一般来说富含粘土矿物的电阻率测井曲线(RT、RXO)常常表现为低电阻率的特征；（2）粘土矿物含量更为丰富的地层声波测井曲线(AC)往往呈现出声波速度减慢、声波时差增大的特征；（3）当粘土矿物含量只有伊利石而不并含有高岭石时，将会对利用自然伽马测井曲线(GR)计算泥质含量以及孔隙度产生一定的误差影响；（4）仅仅是利用密度测井(DEN)一般来说并不能得到粘土矿物中是否含有高岭石的存在，因为其密度值与石英相近，而且蒙脱石的密度值一般又低于石英的密度值，伊利石和绿泥石的密度比砂岩更高，因而粘土矿物的类别和含量对密度测井值都会造成一定的影响；（5）粘土矿物由于吸附作用和毛细管作用，因而粘土矿物中会存在束缚水，所以通过中子测井(CNL)测得的含氢指数会偏大，因而受到粘土矿物影响的中子孔隙度测井值会偏大；（6）自然伽马能谱测井(NGS)可以较为准确地鉴定出伊利石的存在，因为伊利石钾元素的占比高于铀和钍，且其他的粘土矿物钾元素含量也相对伊利石较少。

3.2 粘土矿物成分的定性识别

3.2.1 常见粘土矿物的测井响应值

不同的粘土矿物其化学组分和物理性质均有着一定的差异，因而也会进一步影响它们的各种地球物理测井响应值^[77]。表 3-1 是测井解释中常见的四种粘土矿物的铀(U)、钍(Th)、钾(K)、钍和钾的比值(Th/K)以及密度、中子等相关参数的测井响应值^[78]。

表 3-1 常见粘土矿物的测井响应值

	蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石
补偿中子测井值(pu)	44	30	37	52
补偿密度测井值(g/cm ³)	2.12	2.79	2.65	2.77
光电吸收截面指数(b/e)	2.04	3.45	1.83	6.3
钾测井值(%)	0~1.5	3.5~8.3	0~0.5	0~0.3
钍测井值(ppm)	0.8~2	10~25	6~19	0~8
铀测井值(ppm)	2~7.7	8.7~12.4	1.5~7	17.4~38.2
Th/K	3.7~8.7	1.7~3.5	11~30	10~30

由表 3-1 可见, 蒙脱石具有低 Th 低 K 的特征; 伊利石 K 的含量要远高于其他粘土矿物, 一般可用 K 含量区别伊利石和其他粘土矿物; 蒙脱石 Th 含量高, K 含量低; 绿泥石 Th 和 K 含量都很低。此外还可以发现, Th/K 对于蒙脱石、伊利石和高岭石差别较大, 可以用来作为区分它们的特征参数。然而绿泥石与高岭石具有相似的 Th/K 特征, 高岭石和绿泥石之间不好根据 Th/K 比值来很好地区分。不同种类粘土矿物测井响应特征值的差异, 是利用测井资料解释地层中不同粘土矿物种类的依据, 此外也能充分说明在进行地层测井解释时必须考虑不同的粘土矿物对测井结果产生的影响, 粘土矿物的种类、含量以及其他特征等是影响地层测井分析和地层评价十分重要的因素。

3.2.2 粘土矿物定性识别图版的运用

由表 3-1 可知, Th/K 能够较好地用来作为区分蒙脱石、伊利石和高岭石的特征参数。根据不同粘土矿物分析的放射性元素含量、Th/K 参数与粘土矿物的对应关系, 斯仑贝谢公司制作出了粘土矿物类型的识别图版(图 3-1)^[79], 一般称之为传统图板。

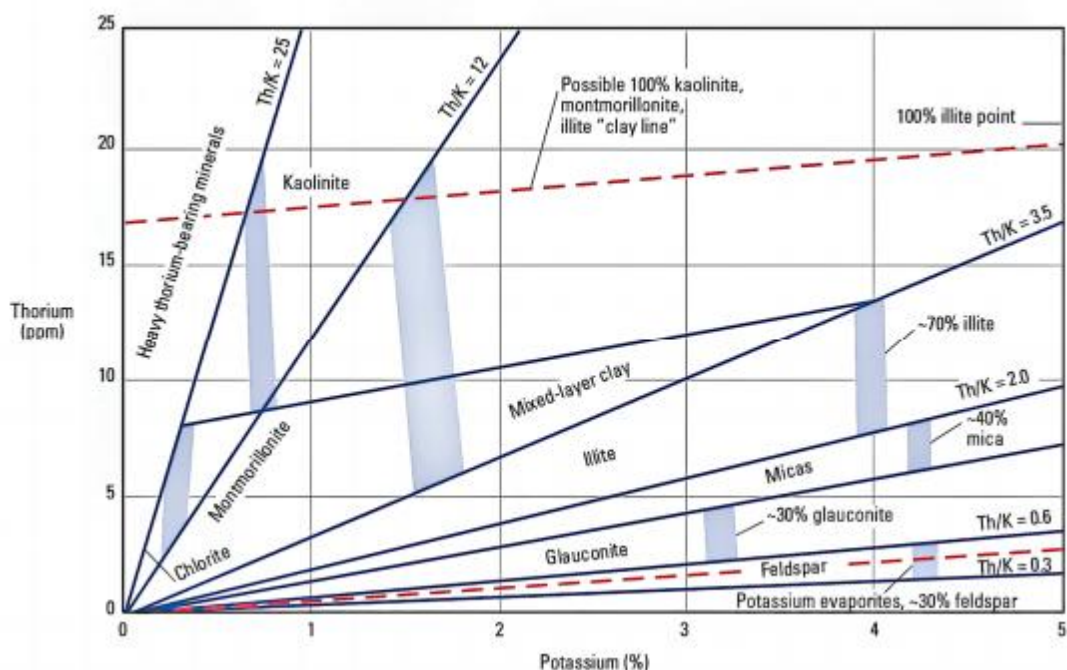


图 3-1 Th、K 含量识别粘土矿物类型传统图版

Figure 3-1 Thorium and potassium content identification clay mineral type traditional plate

从图 3-1 中可以看出, $Th/K > 25$ 时为高钍含量矿物区域; $12 < Th/K < 25$ 时为高岭石和绿泥石区域; $3.5 < Th/K < 12$ 为蒙脱石和混层粘土矿物区域; $2 < Th/K < 3.5$ 为伊利石区域; $0.6 < Th/K < 2$ 为云母类和海绿石矿物区域; $Th/K < 0.6$ 为长石类矿物区

域。 $2 < Th/K < 25$ 区域则为各类粘土矿物主要分布区间。使用此图版可以对地层中所含有的粘土矿物类型作定性判别,例如,选取研究区某口井某个层段的测试点,若测试点 Th/K 值落在 $2 < Th/K < 3.5$ 这个区间内,就可得知该层粘土矿物类型是伊利石。

依据斯伦贝谢公司的传统图版解释方法,得到了研究工区 L1 井全井不同地质层段的钍含量测井值与钾含量测井值的交会关系(图 3-2)。

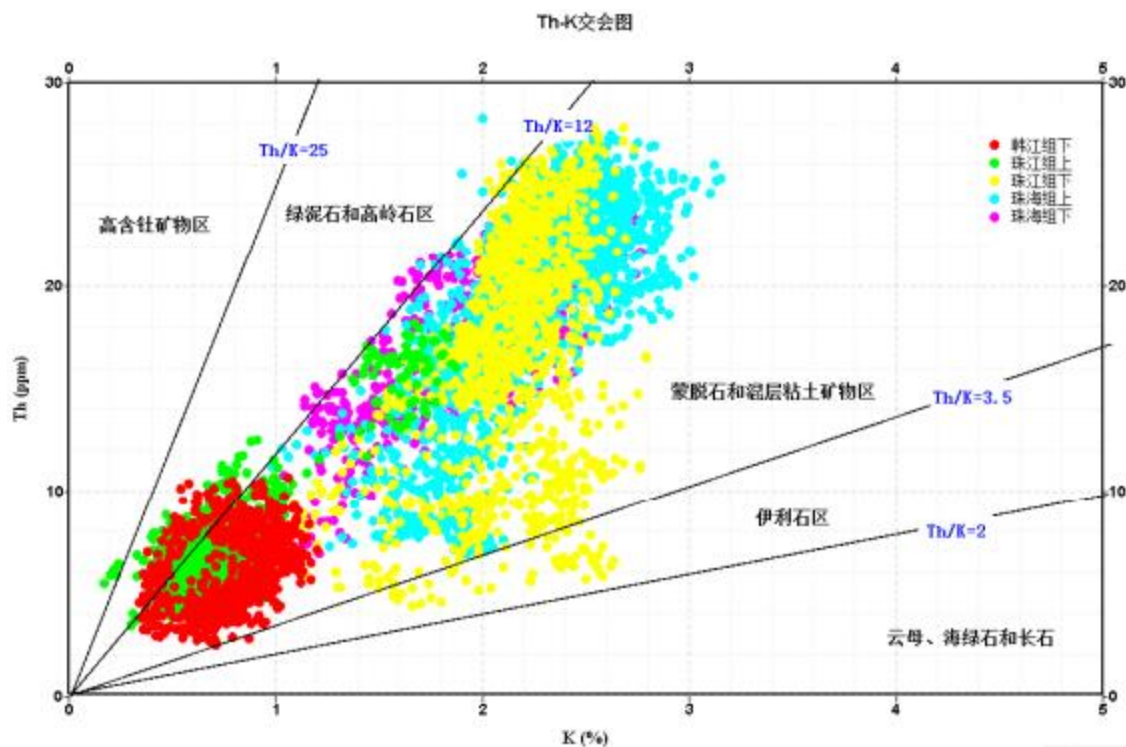


图 3-2 研究工区 L1 井不同地质层段钍、钾交会图

Figure 3-2 Thorium and potassium intersection diagram of different geologic intervals of Well L1 in the research area

由图 3-2 可知,研究工区 L1 井 Th/K 值绝大多数点均位于 $2 < Th/K < 25$ 这个区间内,由此可以知道该井的矿物组分主要是粘土矿物,且绝大多数点位都落在蒙脱石和混层粘土矿物的区域,因此可以得到该口井在整个深度剖面上粘土矿物的类型主要为蒙脱石和粘土矿物混层。韩江组下段的粘土矿物表现为低 Th 、低 K 的特征,该段粘土矿物类型主要为蒙脱石和绿泥石;珠江组上段图中落点大多数点与韩江组重合,可以得知该段粘土矿物类型主要也为蒙脱石和绿泥石;珠江组下段 Th 含量和 K 含量都有一定的增加,该段主要为粘土矿物混层,蒙脱石含量减少,伊利石含量增加,在该地质层段主要开始了蒙脱石向伊利石的转化;在地层埋藏深度更深的珠海组,粘土矿物类型主要为混层粘土矿物,粘土矿物成分趋于稳定。

深度剖面上，在相对较低深度的韩江组，该层段含有较低含量的钍和钾，该段符合蒙脱石 Th、K 的特征，在深度更深的珠江组和珠海组，钍元素和钾元素含量都稳步提升，该层段已经几乎没有了蒙脱石的存在，含有少量的蒙脱石以混层粘土矿物的形式存在。因而通过利用传统图版，能大致地得到粘土矿物的主要类型，从而能对分析粘土矿物的随深度的演化特征提供一定的参考价值。表 3-2 为研究区 L1 井不同的地质层段对应的深度。

表 3-2 研究区 L1 井不同地质层段与深度的对应关系表

Table 3-2 Corresponding relationship between different geologic intervals and depths of well L1 in the study area

层组	深度(m)
韩江组	1481~2746
珠江组	2746~3378
珠海组	3378~4071

图 3-3 为研究工区 P4 井同一地质层段砂、泥岩 Th-K 交会图。由图可见，在该层组，砂、泥岩段的粘土矿物类型均为混层粘土矿物，砂岩段 Th、K 测井值都明显低于泥岩段的 Th、K 测井值，这是因为砂岩段粘土矿物的含量要远远低于泥岩段，因而对放射性核素的吸附能力要弱于泥岩段。

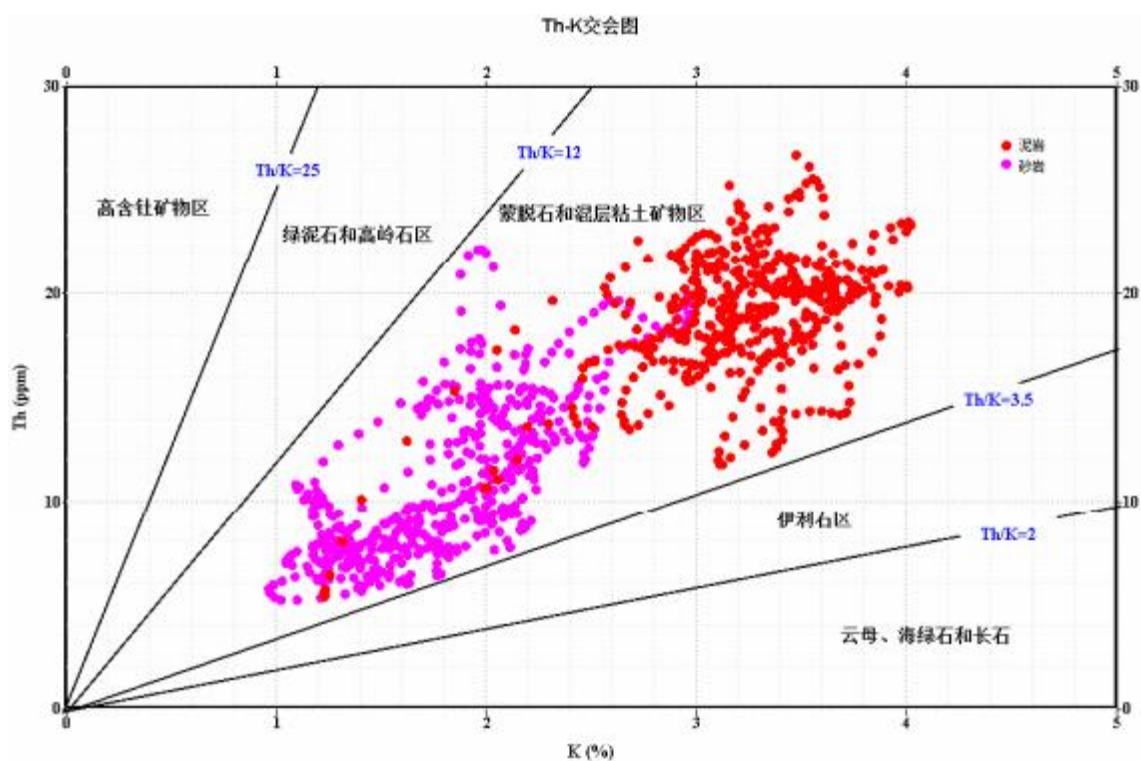


图 3-3 研究工区 P4 井相同地质层段砂、泥岩钍、钾交会图

Figure 3-3 Thorium and potassium intersection diagram of sand and mudstone in the same geological interval of well P4 in the research area

由此可见，斯伦贝谢公司传统图版的主要优点就是能够简单、直观、快速了解研究区域地层中粘土矿物成分的大致组成，但是此图版也具有一定的局限性，不能够准确识别粘土矿物的类别、提供粘土矿物各成分的具体含量和 Th/K 值的具体对应关系。因此，即使能确定地层中有高岭石、伊利石和蒙脱石等粘土矿物的存在，也难以较为精确地得出粘土矿物的种类和粘土矿物的具体含量。然而在实际的生产实践中，对粘土矿物各成分含量的确定就显得非常重要。

第4章 粘土矿物成分测井定量计算方法

针对粘土矿物成分的定量计算方法，本章节主要采用了两种方法，一种方法是利用自然伽马能谱测井资料中的铀、钍、钾三种元素的测井响应值与粘土矿物岩心分析化验资料进行交会得到多元回归拟合数学模型计算研究工区粘土矿物的含量；另一种方法是利用测井处理软件中的 Quanti. Elan 模块，利用多矿物反演最优优化处理模型，得到研究工区粘土矿物的具体含量。

4.1 多元回归拟合的粘土矿物成分计算方法

4.1.1 自然伽马能谱测井基本原理

自然伽马能谱测井(NGS)的原理是根据地层中铀(U)、钍(Th)和钾(K)三种放射性元素能谱的特征，用能谱分析的方法，将测量到的铀、钍、钾三种元素的伽马放射性混合谱，进行能谱的分析、然后解谱，最后输出自然伽马总计数率(GRCL)、无铀伽马(KTH)、铀含量(URAN)、钍含量(THOR)和钾含量(POTA)总共五条曲线，得到铀、钍、钾三种放射性元素各自在地层中的含量，从而确定地层中所含的岩石矿物的种类及其相关特性^[80]。

4.1.2 自然伽马能谱测井值与粘土矿物的相关性

由自然伽马能谱测井的原理以及各粘土矿物的基本性质可知，铀、钍、钾三种放射性元素的测井响应值与粘土矿物的种类和含量有着一定的对应关系，可能是线性的，也可能是非线性的关系。由于研究工区岩心资料较少，且单口井数据样本较少，因而选取了研究工区5口井共76块岩心的X衍射化验分析资料放在一起进行分析，分别建立了蒙脱石含量、伊利石含量、高岭石含量、绿泥石含量和粘土含量与自然伽马能谱测井值的交会关系图(图4-1~4-20)。

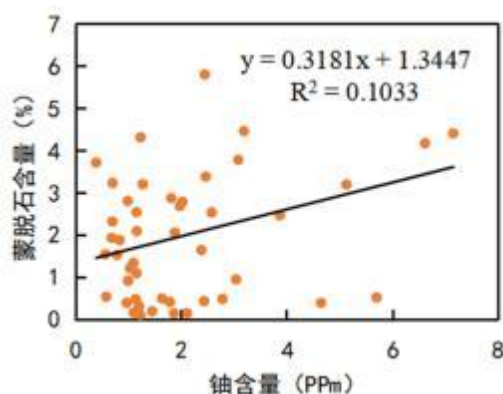


图 4-1 蒙脱石含量与铀含量关系图

Figure 4-1 Relationship diagram between montmorillonite content and uranium content

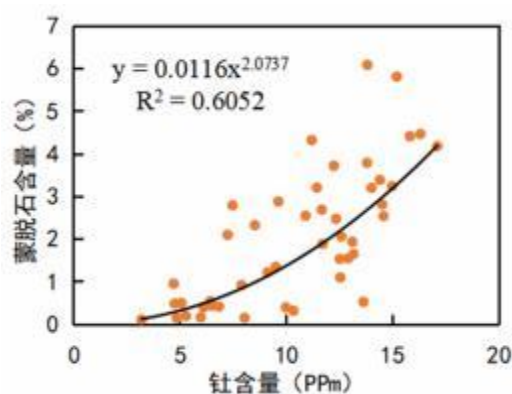


图 4-2 蒙脱石含量与钍含量关系图

Figure 4-2 Relationship diagram between montmorillonite content and thorium content

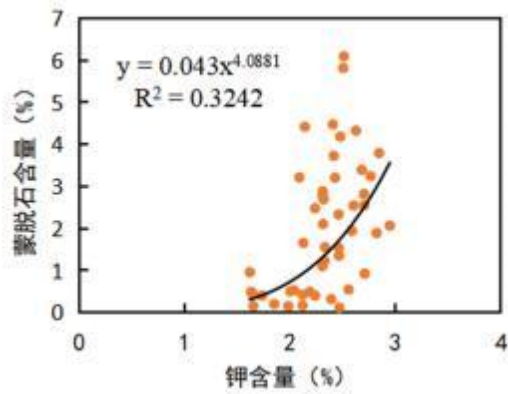


图 4-3 蒙脱石含量与钾含量关系图

Figure 4-3 Relationship diagram between montmorillonite content and potassium content

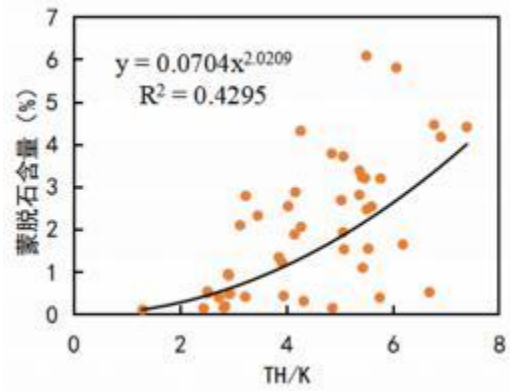


图 4-4 蒙脱石含量与钍钾比关系图

Figure 4-4 Relationship diagram between montmorillonite content and thorium potassium ratio

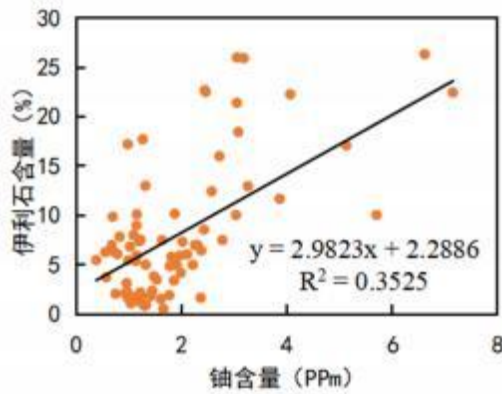


图 4-5 伊利石含量与铀含量关系图

Figure 4-5 Relationship diagram between illite content and uranium content

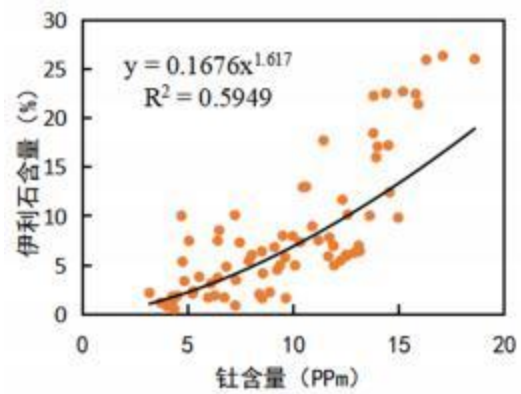


图 4-6 伊利石含量与钍含量关系图

Figure 4-6 Relationship diagram between illite content and thorium content

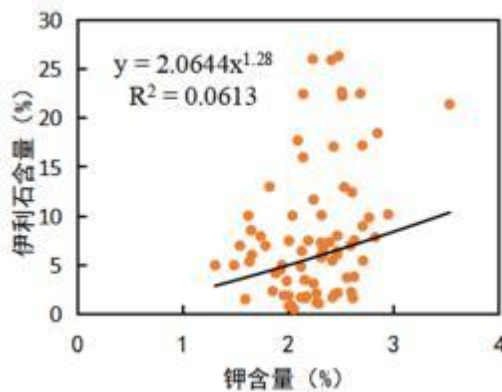


图 4-7 伊利石含量与钾含量关系图

Figure 4-7 Relationship diagram between illite content and potassium content

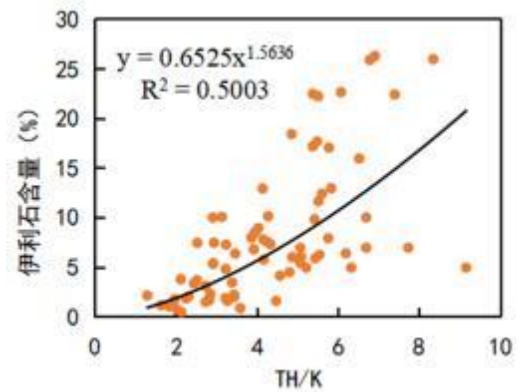


图 4-8 伊利石含量与钍钾比关系图

Figure 4-8 Relationship diagram between illite content and thorium potassium ratio

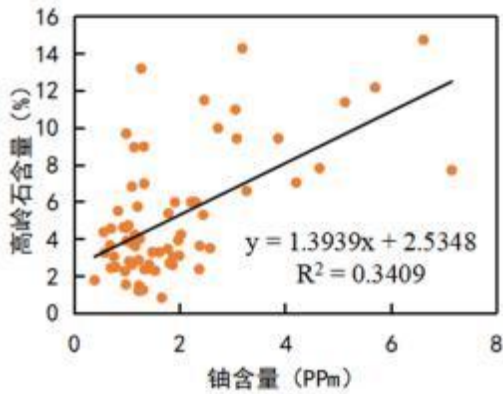


图 4-9 高岭石含量与铀含量关系图

Figure 4-9 Relationship diagram between kaolinite content and uranium content

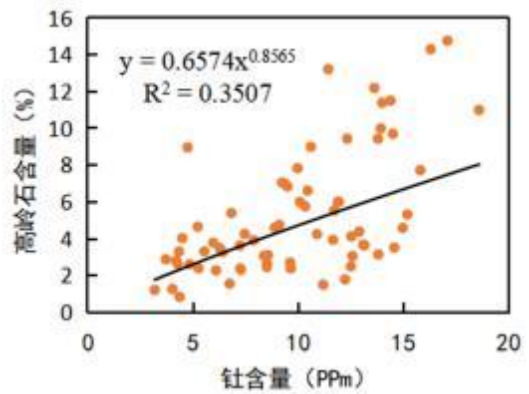


图 4-10 高岭石含量与钍含量关系图

Figure 4-10 Relationship diagram between kaolinite content and thorium content

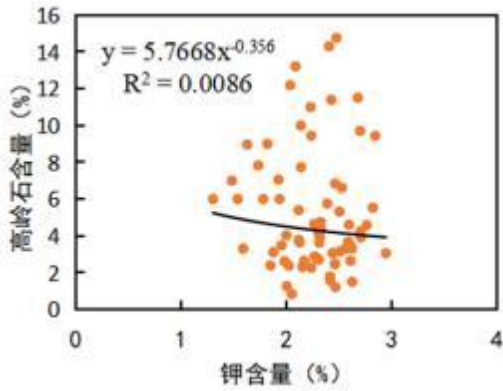


图 4-11 高岭石含量与钾含量关系图

Figure 4-11 Relationship diagram between kaolinite content and potassium content

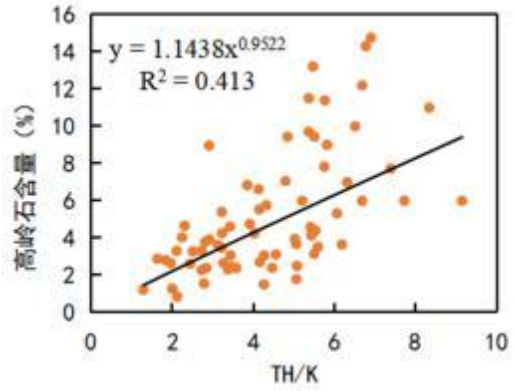


图 4-12 高岭石含量与钍钾比关系图

Figure 4-12 Relationship diagram between kaolinite content and thorium potassium ratio

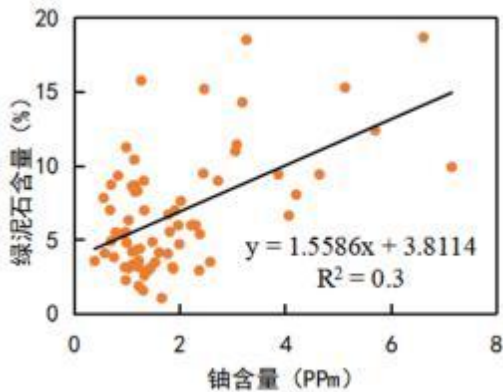


图 4-13 绿泥石含量与铀含量关系图

Figure 4-13 Relationship diagram between chlorite content and uranium content

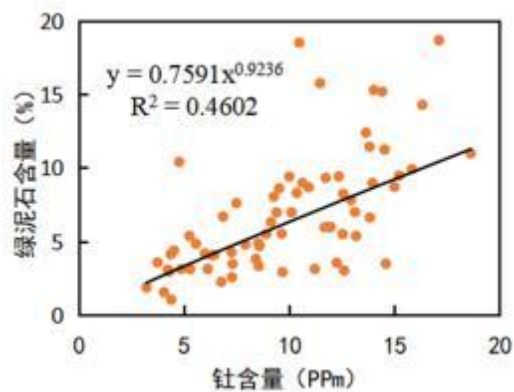


图 4-14 绿泥石含量与钍含量关系图

Figure 4-14 Relationship diagram between chlorite content and thorium content

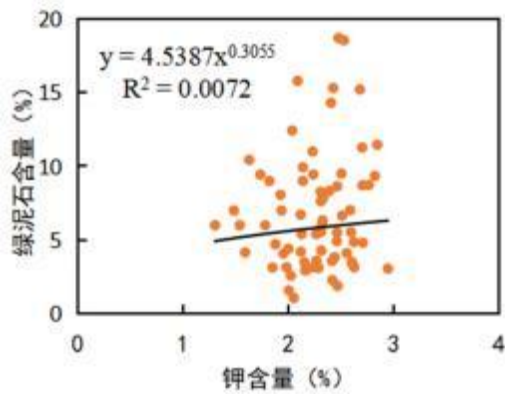


图 4-15 绿泥石含量与钾含量关系图

Figure 4-15 Relationship diagram between chlorite content and potassium content

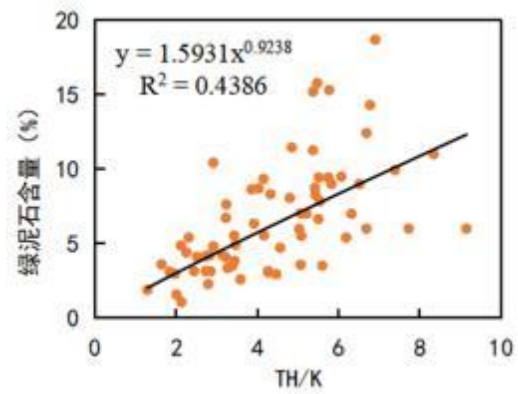


图 4-16 绿泥石含量与钍钾比关系图

Figure 4-16 Relationship diagram between chlorite content and thorium potassium ratio

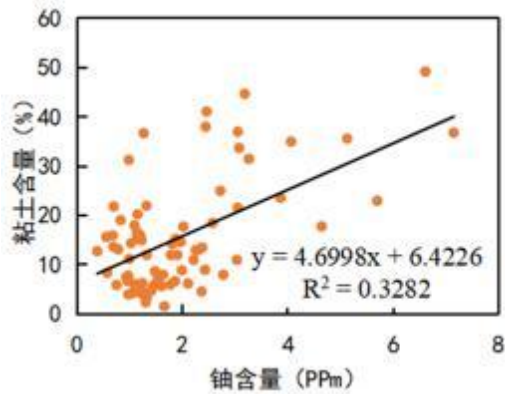


图 4-17 粘土含量与铀含量关系图

Figure 4-17 Relationship diagram between clay content and uranium content

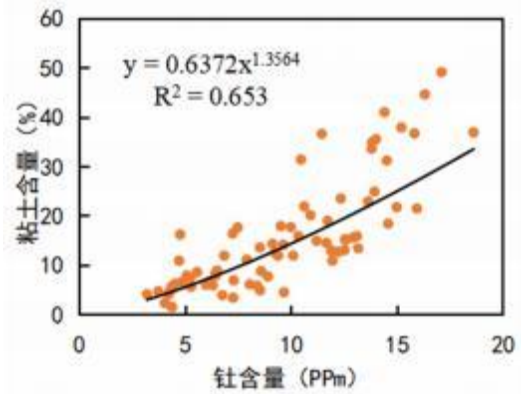


图 4-18 粘土含量与钍含量关系图

Figure 4-18 Relationship diagram between clay content and thorium content

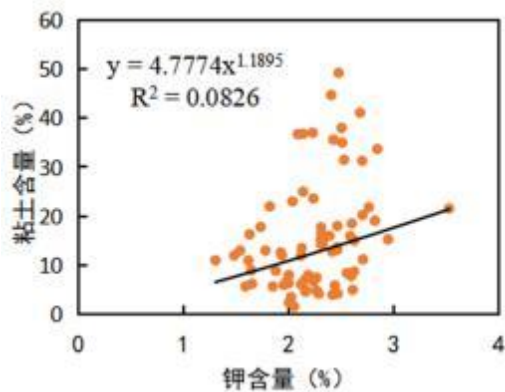


图 4-19 粘土含量与钾含量关系图

Figure 4-19 Relationship diagram between clay content and potassium content

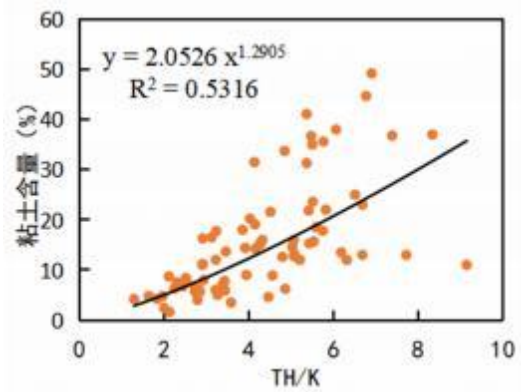


图 4-20 粘土含量与钍钾比关系图

Figure 4-20 Relationship diagram between clay content and thorium potassium ratio

图 4-1~4-4 分别为研究工区蒙脱石含量与铀、钍、钾含量和钍钾比值关系交会图。工区铀元素测井值与蒙脱石含量具有较差的线性正相关关系，这是因为铀元素测井曲线受沉积环境等相关因素影响从而导致与粘土矿物含量的相关性较差，并且由于蒙脱石不同层段的层间水结构以及含量的差异，对氧化铀的吸附性也会产生一定的影响，因而蒙脱石与铀元素的相关性不好(图 4-1)；钍元素含量相较于铀元素，则与与蒙脱石之间具有较好的正相关关系；钾元素含量与蒙脱石含量具有一定的正相关性；钍钾比值也与蒙脱石含量具有一定的正相关性。

图 4-5~4-8 分别为研究工区伊利石含量与铀、钍、钾含量和钍钾比值关系交会图。如图所示，该区铀元素含量与伊利石含量具有较弱的线性正相关；钍元素含量与伊利石含量具有较好的正相关性；钾元素含量与伊利石含量的相关性较差，钍钾比值也与伊利石含量具有一定的正相关性。

图 4-9~4-12 为研究工区高岭石含量与铀、钍、钾含量和钍钾比值关系交会图。如图所示，该区铀元素含量与高岭石含量具有一定的线性正相关；钍元素含量与高岭石含量也具有一定的正相关性；通过对比钾元素含量与高岭石含量，可以看出表现为负相关性，但相关性不好，钾含量越高，高岭石含量越少(图 4-11)；钍钾比值则与高岭石含量之间表现出一定的正相关关系。

图 4-13~4-16 为研究工区绿泥石含量与铀、钍、钾含量和钍钾比值关系交会图。如图所示，该区铀元素含量与绿泥石含量具有一定的线性正相关性；钍元素含量与绿泥石含量也具有一定的正相关性；钾元素含量与绿泥石含量的相关性不明显；钍钾比值则与绿泥石含量具有一定的正相关性。

图 4-17~4-20 为研究工区岩心化验粘土含量与铀、钍、钾含量和钍钾比值关系交会图。如图所示，该区铀元素含量与粘土含量具有一定的线性正相关性，这是因为粘土含量越高，对铀核素的吸附能力越强；钍元素含量与粘土含量具有较好的正相关性；钾元素含量与粘土含量的相关性也是不那么明显，这是因为岩心分析样本数量太少，而且钾元素含量区间过于集中；钍钾比值则与粘土含量具有较好的正相关关系。

4.1.3 基于伽马能谱测井的多元回归计算模型

由图 4-1~4-20 可见，在研究工区中，粘土含量与粘土中各主要矿物成分含量与伽马能谱测井响应值的相关性有的不那么明显，有的相关性则较好，因而从中选择出更为合适的拟合数据曲线，由此得到利用自然伽马能谱测井计算的蒙脱石、伊利石和粘土含量的多元回归计算模型公式：

$$\begin{cases} MT = 0.065 * TH^{1.685} - 0.000006123 * (TH/K)^{2.19} + 0.323 \\ YI = 0.002 * TH^{3.357} - 0.0000001409 * (TH/K)^{7.939} + 2.805 \\ YN = 0.018 * TH^{2.69} - 0.000003186 * (TH/K)^{6.848} + 5.092 \end{cases} \quad (4-1)$$

式中 TH ——钪测井值, ppm;
 K ——钾测井值, %;
 MT ——计算的蒙脱石绝对含量, %;
 YI ——计算的伊利石绝对含量, %;
 YN ——计算的粘土绝对含量, %。

4.1.4 计算模型应用效果分析

图 4-21~4-23 为利用建立的模型计算得出的结果与岩心化验分析结果的对比关系图。由对比结果可知, 利用多元回归拟合计算得到的蒙脱石含量、伊利石含量和总粘土矿物含量与岩心分析的结果吻合的较好, 因而可以利用该数学模型来定量计算研究工区的各粘土矿物含量。

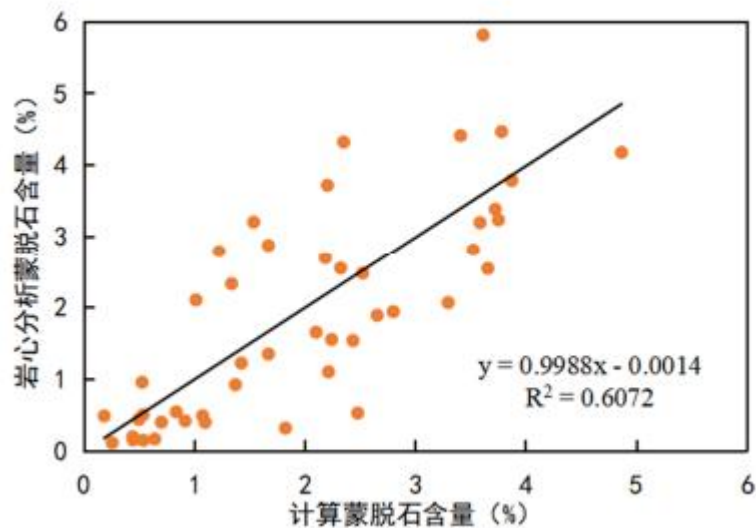


图 4-21 模型计算蒙脱石含量与岩心分析结果对比图

Figure 4-21 Comparison of montmorillonite content calculated by model and core analysis results

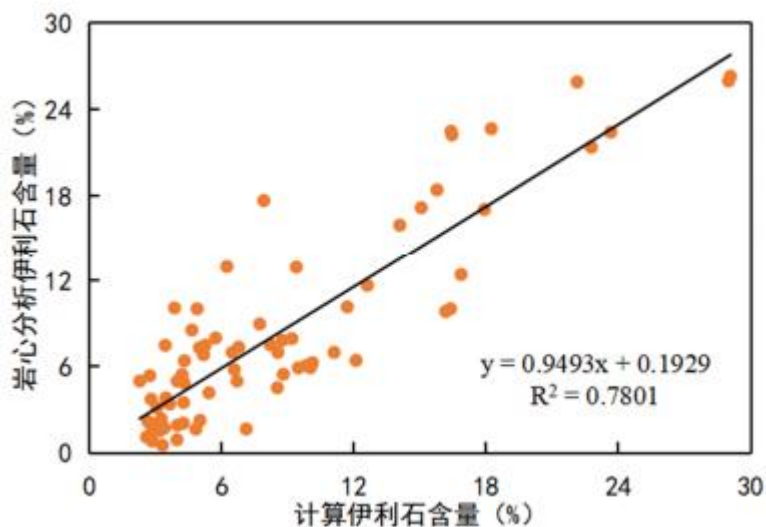


图 4-22 模型计算伊利石含量与岩心分析结果对比图

Figure 4-22 Comparison between model calculation of illite content and core analysis results

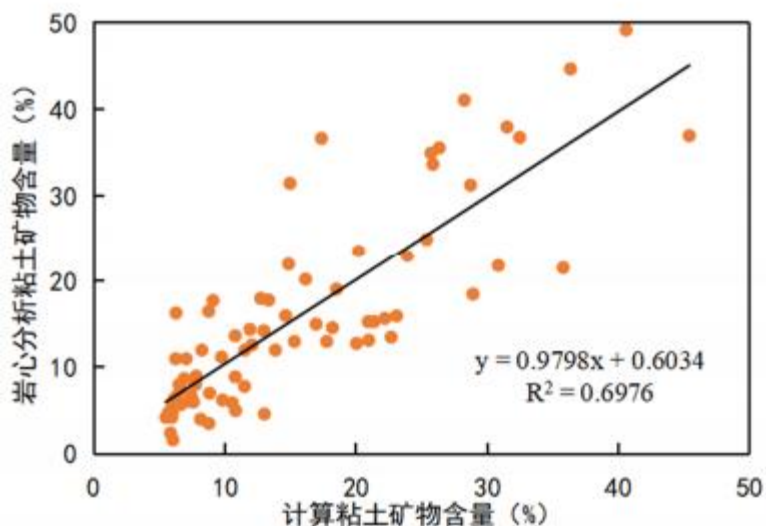


图 4-23 模型计算粘土含量与岩心分析结果对比图

Figure 4-23 Comparison of clay content calculated by model and core analysis results

为了进一步将模型计算结果与岩心分析资料进行更直观地比较对照，因而将以上计算结果数据应用于部分井绘制成测井成果图(图 4-24~4-26)。表 4-1 为研究工区 L2 井岩心分析粘土矿物相对含量表。从表中可以看到，由于研究工区绿泥石含量几乎可以忽略不计，且绿泥石和高岭石 Th/K 特征相近，主要是分析蒙脱石和伊利石含量的变化特征，所以将绿泥石和高岭石合并在一起进行分析，计算处理的井中得到的高岭石含量包含绿泥石。

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/226005003214010032>