

鄂尔多斯盆地高自然伽马异常特征

赵军龙¹, 谭成仟^{2, 1}, 刘池阳², 李庆春¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069)

[摘要] 为了加深对盆地深部和浅部高自然伽马异常特征综合分析研究, 揭示高自然伽马异常地质成因, 从而促进盆地多种能源矿产协同开发研究, 针对收集大量的地球物理测井资料、地质资料及其他相关成果, 绘制并分析了相关成果图。研究中遵循从单孔测井曲线特征分析到典型剖面研究, 并按层对高自然伽马的平面分布特征进行分析研究。化验测试结果和自然伽马能谱测井成果研究表明, 在本区, 自然伽马异常增大主要是由于铀的活化和聚集, 导致铀元素增加而引起。相关研究表明, 盆地深部和浅部的铀异常具有一定的关系, 盆地历来的沉积环境变迁是铀元素富集的主导因素。

[关键词] 鄂尔多斯盆地; 高自然伽马; 异常特征; 铀; 数据分析; 盆地演化

[中图分类号] P631.8; [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2006)03-0082-05

Abnormity Features of Obvious Natural Gamma in Ordos Basin

ZHAO Jun long¹, TAN Cheng qian^{1, 2}, LIU Chi yang², LI Qing chun¹

(1. School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: For the purpose of deepening synthesizing researches on deep and shallow abnormality of natural gamma and its geological genesis in Ordos basin, and in order to advocate co exploitation to multi kinds of energy sources and minerals in Ordos basin, this paper collects rich data in logging, geology and other aspects, production figures are carefully plotted and researched. This paper studied from single well to representative sections, and then analyzed the plane features according to layers. The test results show that the increasing of abnormal natural gamma comes mainly from the increasing of uranium. The activation and accumulation aroused the abnormity of natural gamma. There is a certain correlation in shallow and deep abnormality of uranium. The variance of sediment environment is the leading factor for the uranium accumulation.

Key words: Ordos basin; obvious gamma; abnormal feature; uranium; data analysis; basin development

0 引言

鄂尔多斯盆地位居中国第二大沉积盆地, 位于中国大陆中西部, 构造单元可以划分为伊盟隆起、渭北隆起、西缘逆冲断层构造带、天环坳陷、伊陕斜坡及晋西挠褶带, 面积约为 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[1-3]。

鄂尔多斯盆地是中国陆上油气勘探最早的盆

地。20 世纪初, 王竹泉、袁复礼等在本区进行过地质调查。近几年, 王双明、王金平、杨俊杰、肖新建等阐述了鄂尔多斯盆地二叠纪山西组高自然伽马曲线特征、陕甘宁盆地层间氧化带砂岩型铀矿远景等。以上成果主要体现了对盆地深部部分地层高自然伽马特征初步认识以及对盆地浅部铀富集规律研究, 关于盆地深、浅部高自然伽马特征综合分析研究成果少, 对盆地高自然伽马特征与铀矿

[收稿日期] 2005 10 08
[基金项目] 国家 973 项目(2003CB214607)
[作者简介] 赵军龙(1970-), 男, 陕西西安人, 高级工程师, 博士研究生, 从事能源与矿产地球物理研究。

化关系综合研究缺乏。

笔者在继承吸收前人研究成果基础上, 收集了大量测井资料、地质资料、完井报告、化验资料等, 绘制分析了相关成果图。研究中首先对单井测井曲线特征、异常剖面特征、异常平面特征(按层)进行分析归纳, 其次对送检岩心测试结果进行了数据处理分析、对盆地高自然伽马异常的成因机理及环境进行了初步分析, 对盆地深部、浅部高自然伽马异常关系进行了初步研究。

1 高自然伽马异常特征分析

1.1 单井高自然伽马异常曲线分析

单井测井曲线表明, 本区浅部和深部均存在显著高自然伽马异常层。文中确定自然伽马幅值超过 150API 为高自然伽马异常标准。浅部高自然伽马异常层岩性主要为砂岩, 异常层主要位于白垩纪、侏罗纪以及三叠纪上部地层; 深部高自然伽马异常层岩性主要为泥岩、炭质泥岩等。

盆地东南浅部高自然伽马异常层主要为直罗组下部中粒砂岩, 电阻率电位值较高, 自然电位呈显著负异常, 自然伽马异常幅度最高达 1 019API;

而盆地深部异常层为二叠纪太原组煤层底部炭质泥岩, 自然伽马异常高达 260 API。

1.2 剖面测井曲线对比

高自然伽马异常剖面对比表明, 本区的高自然伽马异常层在横向上有良好的连续性和可追踪性, 反映了异常规模可观。图 1 为本区西北部上海庙地区延安组高伽马异常对比图(延安组煤层为对比标准层), 高伽马异常层位于煤层上下部。

1.3 平面分布特征分析

这里分别就白垩纪、侏罗纪、三叠纪、二叠纪、石炭纪高伽马异常平面特征进行分析。

(1) 白垩纪高伽马异常层深度范围 200 ~ 800 m, 最大幅值 680API, 最大厚度 70 m。综合分析表明, 早白垩纪盆地面积因裂隙、伸展作用明显扩大, 晚白垩纪的燕山运动 V 幕, 岩浆活动明显, 地温场迅速升高, 随后盆地因挤压作用而整体抬高; 早白垩纪盆地西深东浅, 沉积中心位于镇原附近, 残余沉积厚度达 1 400 m; 白垩纪高伽马异常平面分布特征与该期地层沉积平面特征关系密切, 异常最高处对应沉积中心, 沉积物主要来源为镇原以西、以北地区。该期沉积环境呈现先氧化后还原特点, 有利于放射性元素运移和富集。

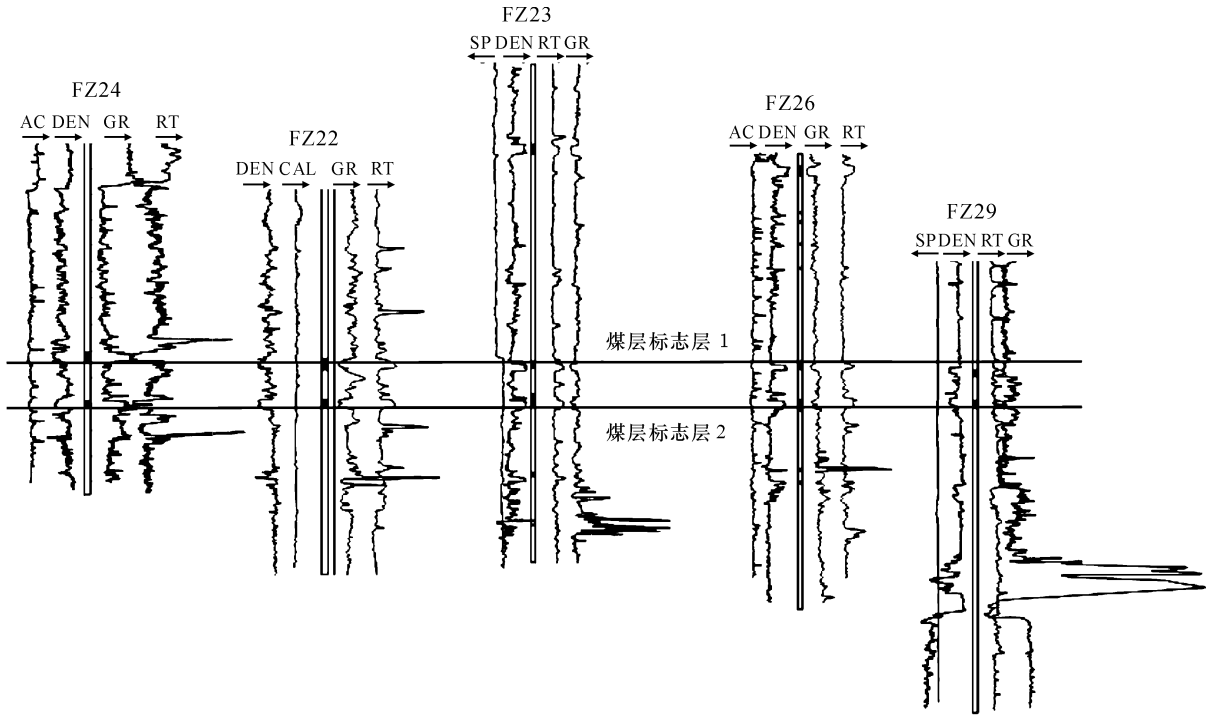


图 1 FZ24 FZ22 FZ23 FZ26 FZ29 测井剖面对比
Fig. 1 Correlation Chart of Logging Section of FZ24 FZ22 FZ23 FZ26 FZ29

(2) 侏罗纪高伽马异常层深度范围 900 ~ 1 500 m, 最大幅值 680API, 最大厚度 18 m。侏罗纪中期, 构造面貌呈现东西分异格局, 研究区位于盆地西部, 为南北向展布沉降带, 该期沉积中心位于环县、吴旗连线附近, 高伽马异常平面特征与该期地层沉积特征关系密切, 沉积物主要来源为环县、吴旗东北地区。中侏罗统, 该区为河流相沉积, 沉积环境为还原环境, 这有利于放射性元素的富集。

(3) 三叠纪高伽马异常层深度范围 1 600 ~ 2 300 m, 最大幅值 650API, 最大厚度 50 m(图 2)。综合分析表明, 晚三叠纪时期盆地沉积体系丰富, 北部主要发育冲积平原, 辫状河流相, 中部以分流河道亚相为主, 南部以浅湖深湖亚相为主, 是该期盆地沉积中心。图 2 中高伽马异常平面特征与该期地层沉积特征关系密切, 异常最高处对应沉积中心, 沉积物主要来源于研究区西北部。

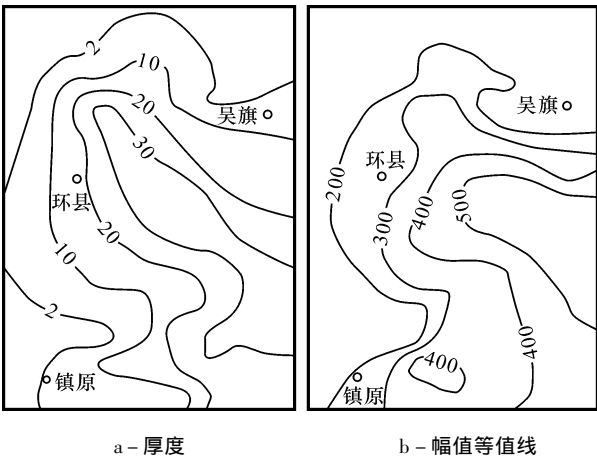


图 2 三叠纪伽马异常层

Fig. 2 Thickness and Range Chart of Triassic High GR Layer

(4) 早二叠纪太原组高伽马异常主要位于盆地北部榆林地区和巴音米登、巴拉素地区, 异常层深度 2 200 ~ 3 300 m, 最大值 300API, 厚度最大 4 m。太原期, 地壳继续下沉, 海侵范围进一步扩大, 来自东西两侧的海水分别向盆地中央古隆起漫漫。该区域太原期地层沉积厚度 30 ~ 40 m, 沉积环境为还原环境, 有利于放射性元素富集。

(5) 晚石炭纪本溪组高伽马异常主要位于盆地北部的榆林和巴拉素地区。异常层深度范围 2 250 ~ 3 340 m, 最大幅值 400API, 厚度最大 19 m。晚石炭世早期, 盆地基本继承早、中石炭纪的构造格局, 该期研究区为海陆交互相沉积。高伽马异常高值区位于泻湖与潮坪过渡带, 本溪期该区域地层沉积厚度 30 ~ 50 m。本溪期该区沉积环境为还原环

境, 有利于放射性元素富集。

2 高自然伽马异常形成机理

2.1 岩心测试数据分析

研究中送样 45 件, 测试项目主要包括 U、Th、K、Ra、Fe³⁺、Fe²⁺, 部分测试数据见表 1。运用一元和多元线性回归分析技术对测试数据进行了处理, 绘制了成果图。

表 1 岩心测试分析数据

Tab. 1 Data of Testing and Analysis of Drill Core

| 序号 | 编号 | 层位 | 伽玛值 | w _B /10 ⁻⁶ | | w _B /% | | | a(Ra) / (Bq·g ⁻¹) |
|----|------|-------|-----|----------------------------------|-------|-------------------|------------------|------------------|----------------------------------|
| | | | | U | Th | K | Fe ³⁺ | Fe ²⁺ | |
| 1 | ze3 | 长 7 | 400 | 30.0 | 10.30 | 1.43 | 4.78 | 1.01 | 0.774 987 200 |
| 2 | ze4 | 长 7 | 320 | 18.6 | 10.50 | 1.96 | 3.17 | 1.32 | 0.214 583 720 |
| 3 | c2 | 延 1+2 | 150 | 3.0 | 8.60 | 1.52 | 1.00 | 1.84 | 0.046 791 680 |
| 4 | c3 | 延 1+2 | 280 | 10.0 | 12.10 | 0.97 | 0.51 | 0.68 | 0.122 462 600 |
| 5 | c8 | 延 3 | 180 | 5.1 | 8.30 | 1.39 | 0.50 | 2.14 | 0.088 465 520 |
| 6 | c9 | 延 3 | 480 | 20.0 | 4.80 | 1.32 | 0.38 | 2.92 | 0.356 055 440 |
| 7 | ce12 | 长 7 | 460 | 109.0 | 8.70 | 1.22 | 9.53 | 1.29 | 1.429 339 600 |
| 8 | x2 | 长 8 | 230 | 10.9 | 12.60 | 1.93 | 1.05 | 2.07 | 0.171 447 640 |

(1) 测试结果表明, 测试样中钍元素质量分数最小为 4.3×10^{-6} , 最大为 19.8×10^{-6} , 平均为 11.17×10^{-6} , 标准偏差 3.36×10^{-6} , 这说明钍元素含量比较稳定。而钾元素质量分数最小为 0.97%, 最大为 3.92%, 平均为 1.86%, 标准偏差 0.568%, 这说明钾元素含量也较稳定。而铀元素质量分数最小为 1.4×10^{-6} , 最大为 109×10^{-6} , 平均为 15.56×10^{-6} , 标准偏差 20.64×10^{-6} , 标准方差 426.124×10^{-6} , 这说明铀元素含量变化大, 与测试样自然伽马幅值变化显著呈现良好的相关性。

(2) 一元回归分析表明, 铀、钍、钾与自然伽马值之间的单元素相关关系为 $GR = 4.3457a(U) + 149.34$, $R^2 = 0.5767$; $GR = -9.7089w(Th) + 325.50$, $R^2 = 0.0766$; $GR = -46.05w(K) + 302.66$, $R^2 = 0.0491$ 。

这进一步说明了本区自然伽马异常显著增加主要是由于铀元素含量增加直接引起的。

(3) 多元线性回归分析结果为 $GR = 204.273 + 4.24406a(U) - 8.44671w(Th) + 22.0684w(K)$ 。回归偏差平方和 $Q = 1.75751 \times 10^5$, 平均标准偏差 $S = 729.780$, 复相关系数 $R = 0.778703$, 回归比较好; 铀、钍、钾的偏相关系数分别为 0.830135、

0.803 472、0.506 636, 回归平方和为 $2.707\ 46 \times 10^5$ 。

(4) 测试结果数据处理中主要计算了 $w(\text{Th})/a(\text{U})$ 、 $w(\text{Fe}^{3+})/w(\text{Fe}^{2+})$ 。 $w(\text{Th})/a(\text{U})$ 主要反映了铀的迁移活化性能, 本区 $w(\text{Th})/a(\text{U})$ 一般为 $0.4 \sim 3.5$, 说明本区自然伽马异常主要是由于铀活化和聚集引起的。 $w(\text{Fe}^{3+})/w(\text{Fe}^{2+})$ 具有良好的环境意义, $w(\text{Fe}^{3+})/w(\text{Fe}^{2+}) \gg 1$ 表明是氧化环境, 反之是还原环境。计算表明, 本区延安组铀元素富集主要是在还原条件下进行的, 延长组铀富集主要是在氧化条件下形成的。由于构造、岩性变化等因素, 本区铀的活化和聚集呈现一定的地区差异。

另外, 深部自然伽马能谱测井成果表明, 二叠纪太原组煤层底部炭质泥岩的高自然伽马异常主要是由于铀元素的相对富集而引起的, 但深部的异常幅值似乎不如浅部的高。

2.2 高自然伽马异常(铀富集)形成机理分析

铀在自然环境中呈四价和六价两种价态存在, 四价铀在富含游离氧的表生带里极不稳定, 很容易形成六价铀, 六价铀在表生环境里一般不单独存在, 它同氧结合成非常稳定的铀酰络阳离子 UO_2^{2+} , 在氧化-还原过渡带内 UO_2^{2+} 常被还原成四价铀而沉淀下来^[3]。铀及其化合物在水溶液中溶解度和存在形式对于表生环境里 pH 值和 Eh 值的变化极为敏感。奥陶纪时期鄂尔多斯盆地海侵处于高潮, 富足的碳酸溶液使得海水中铀溶解度显著增大, 这个时期铀溶解和运移是自由和充分的。奥陶纪末期形成的马家沟组铝土质泥岩对铀吸附性很强, 加上环境从原生氧化到原生还原的变迁, 促使风化壳中富集了相当的铀元素。

使铀在有机质中富集的主要因素是还原作用、吸附作用等。有机质中聚集铀最强的是腐殖质, 其次是腐泥质^[4]。泥炭及褐煤吸附铀及其他金属元素能力最强。本溪期, 盆地西部接受祁连海海侵、东部接受华北海海侵, 榆林和延安一带为泻湖沉积, 泻湖相主要为一套灰黑色铁铝土质泥岩、铝土岩、含凝灰岩。从区域而言, 本溪组为一套海相-海陆交互地层, 可细分为两段, 下段为铁铝土岩, 上段为暗色泥岩、砂岩、石灰岩和煤层互层, 铁铝土质泥岩和煤层对铀元素有很好的吸附作用, 凝灰岩中铀元素丰度相对高, 可以提高本溪组地层铀元素富集, 前述铀分布特征印证了这点。

石炭纪太原期、二叠纪山西期形成海陆交互相

煤系油源岩过程中, 多期的慢速海进和快速海退加速了对盆地台地的淋滤, 促进了铀元素的溶解, 海水中丰富的腐殖质吸附了丰富的铀元素, 这个时期, 气候为原生还原条件, 有利于铀沉淀和富集。

溶于水中的 H_2S 、 HS^- 、 H_2 、 CH_4 和其他碳氢化合物是铀的还原剂^[3]。延长组形成盆地中生界湖相生油岩(延长组)和较好的成煤地层(延长组)过程中, 有机质吸附作用和还原剂的充分提供促进了铀元素富集。这个时期, 深部上古生界进入生气阶段, 作为铀还原剂的天然气继续促进着深部铀的富集。

侏罗纪延安组时期, 尽管成煤过程和石炭二叠纪成煤相似, 但延安组是一个从水进到水退的过程, 环境呈氧化性, 不利于铀沉淀和富集。化验结果表明, 延安组局部富铀地层呈强还原环境, 这反映了该期盆地内铀的富集呈现明显的地区差异。

白垩纪大部分时间气候干旱炎热、剥蚀作用很强。从晚三叠世直至现代, 盆地地下水的渗入作用越来越大, 这为白垩纪的层间氧化带型铀矿的形成提供了先决条件。同时, 华池-环河组的沉积物富含有机质, 其底部层位夹多层的凝灰岩、沉凝灰岩, 也为铀成矿提供了一定的铀源。这个阶段, 在盆地的北部以及西缘、西南缘形成了砂岩型铀矿。

2.3 深部、浅部高自然伽马异常关系研究

长期以来, 多数研究者认为鄂尔多斯盆地为稳定克拉通盆地, 古生代以来一直随着华北地台起伏, 盆地内部不发育断裂, 但新近采集处理的地震剖面上陆续发现了盆地北部存在着断距 $40 \sim 240\text{ m}$ 的断层^[9], 最新研究表明, 新近纪以来盆地的构造运动很活跃^[9], 围绕盆地形成了银川、呼和浩特、太原等一系列不同方向的断裂, 中部吴堡—绥德—靖边—中宁—一线断裂仍在活动, 断裂活动改善了低渗透和特低渗透层的储集性能。

研究表明, 盆地内断裂构造的存在不仅对油、气、煤的成矿发挥了重要作用, 而且是下部还原性物质上移和富铀流体上升的有利通道, 使得深部的部分铀元素可以顺利实现二次迁移和成矿。

东胜砂岩型铀矿成矿作用虽与氧化还原过渡带有关, 但具外生和深源双重性质的微量元素组合^[7]。盆地直罗组发育大规模绿色蚀变带, 它可能是热液还原作用的蚀变产物, 与铀矿化关系密切。铀成矿可能是渗入水与上升热液混合作用的结果, 具有鄂尔多斯盆地自身的特色^[8]。鄂尔多斯盆地

在中晚侏罗世—白垩纪发生过显著构造热事件,造成砂岩型铀矿含矿层之下产生大量微裂隙与裂隙带出现,导致下部热液流体向上运移,低温热液流体的成矿作用是形成东胜铀矿床的重要因素^[9]。上述研究成果表明^[10-12],鄂尔多斯盆地浅部铀成矿与氧化还原过渡带有一定关系,但也呈现外生和深源双重性质的重要成矿特征,铀成矿过程有深部物质和含煤层气或油气流体参与,而铀矿含矿层之下大量微裂隙与裂隙带出现是深部物质影响浅部铀成矿的主要通道。盆地铀成矿的过程不仅需要充分铀源的供给,而且需要满足成矿环境条件。

3 结语

研究中收集了大量的地球物理测井资料、地质资料、完井报告、化验资料及相关研究成果,绘制并分析了相关成果图。研究中,首先对单井的测井曲线特征进行分析归纳,然后从典型剖面出发,分析高自然伽马异常的横向特征,并按层对高自然伽马的平面分布特征进行分析研究。化验测试结果和自然伽马能谱测井成果分析研究表明,本区自然伽马异常增大主要是由于铀元素增加而引起,自然伽马异常主要是由于铀的活化和聚集引起。相关研究表明,盆地深部和浅部的铀异常具有一定的关系,这有待于更深入研究。盆地历来的沉积环境变

迁是铀元素富集的主导因素,沉积环境的变迁决定了铀的时空分布特征。

[参 考 文 献]

[1] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.

[2] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.

[3] 张祖还, 赵懿英. 铀地球化学[M]. 北京: 原子能出版社, 1984.

[4] 王剑峰. 铀地球化学教程[M]. 北京: 原子能出版社, 1986.

[5] 姚宗惠, 张明山, 曾令邦, 等. 鄂尔多斯盆地北部断裂分析[J]. 石油勘探与开发, 2004, 30(2): 20 - 23.

[6] 王庭斌. 新近纪以来中国构造演化特征与天然气田的分布格局[J]. 地质前缘, 2004, 11(4): 403 - 416.

[7] 朱西养. 东胜砂岩型铀矿微量元素地球化学特征初探[J]. 地质地球化学, 2003, 31(2): 39 - 44.

[8] 丁万烈. 绿色蚀变带的地球化学性质及其找矿意义探讨[J]. 铀矿地质, 2003, 19(5): 277 - 282.

[9] 肖新建, 李子颖. 东胜砂岩型铀矿床低温热液流体的证据及意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(4): 301 - 304.

[10] 钱 锋, 艾永峰. 鄂尔多斯南部地区早古生代主动大陆边缘演化特征[J]. 西安工程学院学报, 2002, 24(1): 18 - 21.

[11] 张学例, 王代国, 陈淑惠. 鄂尔多斯盆地南部旬邑—宜君地区中生界储层特征[J]. 西安工程学院学报, 2000, 22(4): 17 - 21.

[12] 赵军龙, 李新胜, 胡建平. 浅析陕北安塞郝家坪油区地球物理测井方法的选取及应用[J]. 长安大学学报: 地球科学版, 2003, 25(2): 54 - 58.

(上接第 81 页)

[参 考 文 献]

[1] 张泽明, 许志琴, 刘福来, 等. 中国大陆科学钻探工程主孔(100 ~ 2 150 m) 榴辉岩岩石化学研究[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 27 - 42.

[2] 杨文采, 杨午阳, 程振炎. 中国大陆科学钻探孔区三维地震资料的初步解释[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 127 - 138.

[3] 杨文采, 程振炎, 张春贺. 中国科学深钻选址地球物理调查与大别 2 苏鲁岩石圈[J]. 地球学报, 2003, 24(5): 391 - 404.

[4] 杨文采. 后板块地球内部物理学导论[M]. 北京: 地质出版社, 1999.

[5] 杨文采, 张春贺, 朱光明. 标定大陆科学钻探孔区地震反射体[J]. 地球物理学报, 2002, 45(3): 370 - 384.

[6] 赵志新, 徐纪人, 杨文采, 等. 中国大陆科学钻探孔区反射地震剖面的数值模拟与分析[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 139 - 148.

[7] 余钦范, 郭友钊, 孟小红, 等. 苏北大陆科学钻探靶区岩石物理性质[J]. 地球物理学报, 2002, 45(1): 93 - 100.

[8] 杨文采. 大别苏鲁地区层状地幔反射体及其解释[J]. 地球物理学报, 2003, 46(2): 191 - 196.

[9] 杨文采, 余长青. 根据地球物理资料分析大别—苏鲁超高压变质带演化的运动学与动力学[J]. 地球物理学报, 2001, 44(3): 343 - 358.

[10] 杨文采, 胡振远, 程振炎, 等. 郯城—涟水综合地球物理剖面[J]. 地球物理学报, 1999, 42(2): 206 - 217.

[11] 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 中国大陆科学钻探主孔 1200 米构造柱及变形构造解析[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 53 - 72.

[12] Yang Wencai. Deep Structures of the East Dabie Ultrahigh pressure Metamorphic Belt, East China[J]. Science in China: Series D, 2003, 46(6): 612 - 624.

[13] 姜修道, 朱光明. 变质岩区地震波速度的特点及其影响因素——以中国大陆科学钻探孔区为例[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(2): 331 - 335.

[14] 姜修道, 朱光明, 朱龙生, 等. 中国大陆科学钻探主孔零偏 VSP 资料解释[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(1): 55 - 60.