

鄂尔多斯盆地古峰庄地区疑似侵入岩体的发现及其地质意义

杨丽华^{1,2}, 刘池洋^{1,2}, 黄雷^{1,2}, 周义军³, 刘永涛³, 秦阳^{1,2}

(1. 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 西北大学含油气盆地研究所, 陕西 西安 710069;

3. 东方地球物理公司研究院 长庆分院, 陕西 西安 710021)

摘要:鄂尔多斯盆地内部岩浆岩体的发现对于构造-热事件重建、古地温场恢复及油气地质作用解析有重要意义。基于高精度三维地震资料的处理与解释,首次在盆地内部古峰庄地区发现疑似浅层侵入岩体,刻画了其空间展布并探讨了油气地质意义。研究显示,古峰庄地区存在6个疑似侵入岩体,在平面上多呈环状或云朵状,剖面上愈临近岩体核部,地层杂乱反射和丘状构造特征愈明显。据岩体分布形式和地震反射特征,可将其分为“岩浆深分散浅集中上涌型”疑似侵入岩体和“岩浆浅集中上涌型”疑似侵入岩体。前者由深及浅均有杂乱反射现象,与围岩反射特征明显有别,产状近直立,伴生断裂发育。后者仅在1 000 ms等时切片以上的浅部层系呈杂乱丘状反射,其下地层呈正常的层状反射、几乎不见地层扰动现象。分析认为先存断裂的存在及其数量、规模、垂向叠置程度、核部与端部断距以及地层压力,是造成岩浆差异式上涌的主因。结合盆地内其他岩浆岩体发育特征和形成时代,认为古峰庄疑似侵入岩体形成于早白垩世晚期,与古生界-中生界油气规模成烃期和成藏期一致,此阶段的热液活动对该区油气生成、保存和成藏具有重大意义。

关键词:构造-热事件;侵入岩体;古峰庄地区;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Discovery of suspected intrusive rock bodies in Gufengzhuang area, Ordos Basin and its geological significance

YANG LiHua^{1,2}, LIU ChiYang^{1,2}, HUANG Lei^{1,2}, ZHOU Yijun³, LIU Yongtao³, QIN Yang^{1,2}

[1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 2. Institute of Oil and Gas, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China; 3. Changqing Branch of Geophysical Research Institute, BGP Inc., Xi'an, Shaanxi 710021, China]

Abstract: Magmatic rocks within the Ordos Basin are crucial for reconstructing tectono-thermal events, paleogeothermal fields, and petroleum geological processes. Based on the processing and interpretation of high-resolution 3D seismic data, we identify suspected intrusive rock bodies in shallow strata in the Gufengzhuang area, Ordos Basin, marking the first discovery of such geological structures in this area. Furthermore, we characterize their spatial distributions and explore their geological significance. The results reveal six rock bodies interpreted as intrusive rocks in the Gufengzhuang area, most of which are ring- or cloud-shaped in a planar view. As shown on seismic sections, strata closer to the cores exhibit more pronounced chaotic reflections and more significant characteristics of mounded structure. Based on their distribution patterns and seismic reflection characteristics, these intrusive rock bodies as interpreted can be classified into two types: the deep scattered and shallow concentrated type with magma upwelling and the shallow concentrated type with magma upwelling. The geological structures of the former type exhibit chaotic seismic reflections as caused by magma intrusion from deep to shallow, significantly distinct from the seismic reflections of their surrounding rocks. Furthermore, they are characterized by nearly vertical occurrences and associated faults. In contrast, only the shallow strata of the latter type display chaotic mounded seismic reflections (corresponding time slices at 1 000 ms and less),

收稿日期:2023-10-24;修回日期:2023-12-11。

第一作者简介:杨丽华(1996—),女,博士,油气地质勘探与盆地动力学。E-mail:201921119@stumail.nwu.edu.cn。

通信作者简介:刘池洋(1953—),男,教授、博士生导师,油气地质、能源地质、盆地动力学。E-mail:lcy@nwu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41330315, 42230815);西北大学大陆动力学国家重点实验室科学技术部专项(201210142)。

while the deeper strata show normal layered reflections with almost no disturbance. Analyses suggest that the differential magma upwelling is primarily caused by the presence of pre-existing faults and their quantity, scale, degree of vertical superimposition, and throws at cores and ends, as well as formation pressure. By combining the developmental characteristics and formation eras of other magmatic rocks within the Ordos Basin, this study proposes that the intrusive rock bodies as interpreted in the Gufengzhuang area were formed during the late Early Cretaceous, which is consistent with the scale hydrocarbon generation and accumulation period of Paleozoic-Mesozoic oil and gas, and the hydrothermal activity in this stage is of great importance to the generation, preservation and accumulation of hydrocarbons in this area.

Key words: tectono-thermal event, intrusive rock body, Gufengzhuang area, Ordos Basin

引用格式: 杨丽华, 刘池洋, 黄雷, 等. 鄂尔多斯盆地古峰庄地区疑似侵入岩体的发现及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 142–156. DOI: 10. 11743/ogg20240110.

YANG LiHua, LIU ChiYang, HUANG Lei, et al. Discovery of suspected intrusive rock bodies in Gufengzhuang area, Ordos Basin and its geological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 142–156. DOI: 10. 11743/ogg20240110.

岩浆活动和热力作用对盆地形成演化、改造和多种能源矿产的赋存-成藏-定位均具有重大影响^[1-11], 是当前沉积盆地研究的热点, 也是盆地动力学研究的重点和难点。鄂尔多斯盆地处于华北克拉通西部, 具有多演化阶段、多成因机制、多沉积体系和多原型盆地叠加的复合克拉通盆地性质^[12-13], 其周缘后期改造强烈, 盆地构造变形、热力作用均显示出内弱外强的特征^[14-15]。此特性也导致以往研究者对鄂尔多斯盆地周缘岩浆岩体的发现和研究程度高, 而盆内的识别和研究则明显薄弱^[14, 16-22], 侵入岩体的识别、刻画尤甚。

梳理文献可知, 盆地周缘发育大量岩浆岩体, 且绝大多数为早白垩世形成^[5, 14, 17-18, 20-28]。然而, 盆地内部所发现岩浆岩体, 多为侵入岩体, 集中于盆地边部(图1), 形成于早白垩世甚或更早。目前, 盆内已被证实的岩浆岩体, 直接出露地表的有: 北部杭锦旗黑石头沟玄武岩^[16, 19]、西南部崇信铜城岩体^[29]和陇县安沟岩体^[30]; 而被钻井证实的仅有: 西南部龙门岩体群^[30-31]。此外, 尚有未被证实、隐伏在地下、由地球物理资料发现的部分疑似侵入岩体, 如北部伊克乌素和乌海东岩体、西部吴起、马家滩及天池岩体、西南部彭阳岩体及东部佳县岩体等(图1)^[20, 32], 本文以下称之为疑似侵入岩体。显然, 盆地内部岩浆岩体尺度较小、零星分布, 通过野外发现、钻井钻遇的概率较小。这既有地质构造条件的差异, 盆地内可能岩浆岩体确实相对较少的实际, 又与判识隐伏岩浆岩体缺乏有效方法的局限有关。后者亟需关注和加强研究。

近年来, 随着克拉通盆地内部高精度三维地震勘探的广泛进行和资料的大量应用, 资料处理和解释技术的不断进步, 以往未被发现和重视的微幅度构造和地质现象逐渐显现, 并掀起了走滑断裂及其地质作用的研究热潮。盆内古峰庄地区多走向微小断裂发育已

成为共识^[15, 33-36]。三维地震资料因其具有较高的识别精度及可大面积覆盖、采集的优势, 其本身对隐伏岩浆岩体的识别及揭示是不可替代的技术手段。笔者新近通过对古峰庄地区三维地震资料解析及处理, 在三维工区内首次发现了多个规模小、隐蔽性强、具有疑似浅层工侵入岩体特征的环状地质体。结合鄂尔多斯盆地实际地质背景, 盆地西部并不具有发育泥底辟及盐底辟的相关条件, 故此环状地质体应为岩浆成因岩体。由于该地区被黄土所覆盖, 尚未发现岩浆喷发至地表的证据, 且暂无直接钻遇岩体的钻井资料佐证, 故笔者将此类新发现的、地震响应特征明显的岩体归为疑似侵入岩体。尚需提及的是, 此类疑似侵入岩体三维地震资料的揭示, 其本身就极具重要的科学意义及现实意义。本文将系统刻画古峰庄地区疑似侵入岩体的构造特征及其在三维地震资料的表现并建立判识依据; 在此基础上, 结合盆缘、盆内其他岩浆岩体特征及动力学背景, 探讨古峰庄地区疑似侵入岩体的地质意义。

1 古峰庄疑似侵入岩体的判别及类型

古峰庄地区位处鄂尔多斯盆地中西部(图1), 主体位于天环坳陷, 向西延入西缘冲断带, 其内微小走滑断裂发育^[15]。笔者依据“两宽一高”三维地震资料, 采用最负曲率和最大似然属性融合技术, 确定疑似侵入岩体发育部位、空间特征及产出相态, 提高了古峰庄地区面积小、隐蔽强疑似侵入岩体识别的精度。基于钻井标定和盆地区域地震标志层特征, 在研究区地震剖面上识别出TP(上古生界太原组煤层顶)、TT7(三叠系延长组长7段泥页岩底)、TJZ(直罗组煤层底)和TK(白垩系砾岩顶段)4个标志层。

古峰庄三维工区内疑似侵入岩体在地震剖面浅层

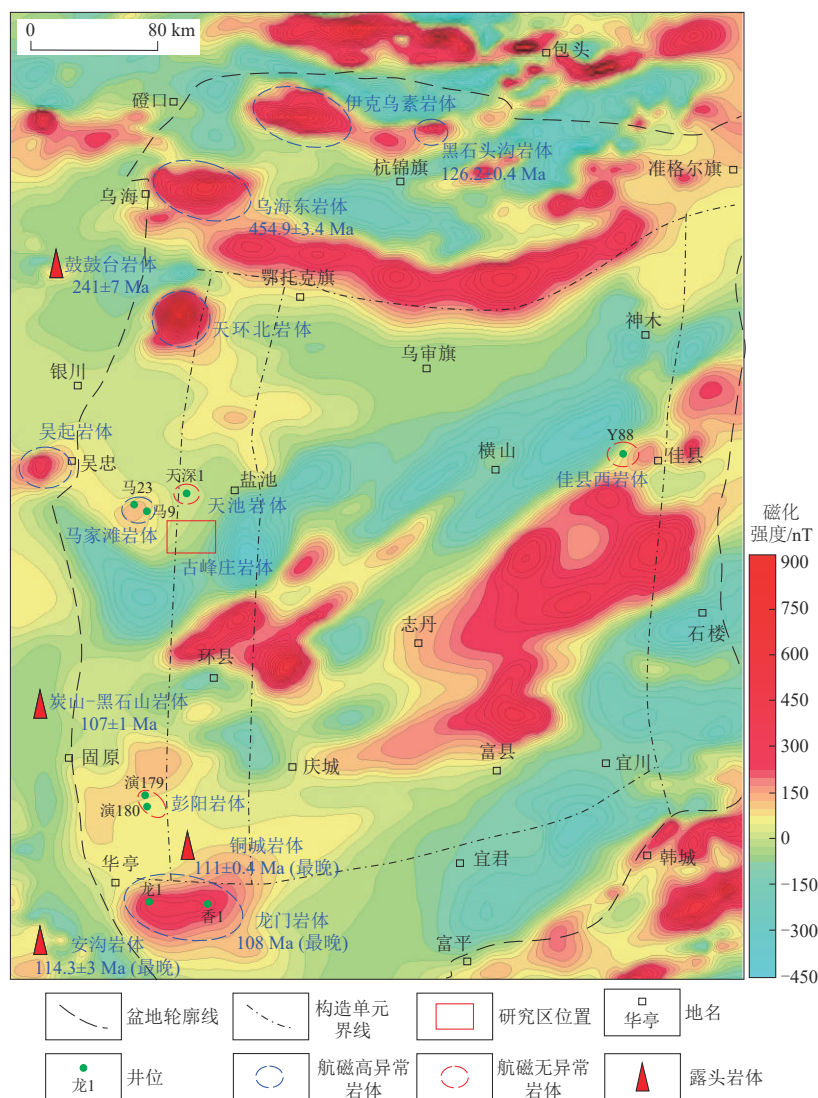


图1 鄂尔多斯盆地化极磁力异常及盆内岩浆岩体分布(据文献[37],有修改)

Fig. 1 Map showing the reduction-to-the-pole magnetic anomaly of the Ordos Basin and the distribution of magmatic rock bodies within (modified after reference [37])

表现清晰,而深层模糊、难以辨别。所发现的疑似侵入岩体分布在三维工区的不同部位,本文以岩体平面特征最清晰的500 ms等时切片为标志层,将其编为1—6号(N1—N6)以便描述(图2a)。三维工区内,这6个呈环状或椭圆状展布的疑似侵入岩体,规模较小且未连片,暗示在本区并未发生大规模的岩浆热事件。为了解剖疑似岩浆岩体的空间发育特点,以下对其平、剖面特征及垂向演变特点进行描述、总结。

在平面上,6个疑似侵入岩体呈环状、云朵状、絮状等构型,具有密集、杂乱反射的特征,明显有别于围岩地震反射特征,二者界限清晰。由不同层段水平时间切片可看出,单个疑似侵入岩体本身、多个疑似侵入岩体之间平面形态和影响范围有别。其中,仅N3和N6疑似侵入岩体轮廓由500~1 000 ms逐渐模糊,

1 000 ms以下基本消失,可暗示二者多呈浅部集中式侵位,而其余岩体在浅(1 000 ms以上)、中(1 000~2 000 ms)、深(2 000 ms以下)层系均有行迹,且深部较浅部岩浆活动影响面积大,岩浆具有深部分散式上涌、浅部集中式侵入的特性(图2)。

从剖面特征来看,各疑似侵入岩体形态完整,与两侧地层反射特征差异较大、界限清晰,其深部往往存在基底断裂。在岩体发育部位或影响区域,地层产状多变,相位排列规律性差,多表现为不同幅度的正向凸起结构。地震反射界面发生扰动,同相轴呈较窄的杂乱反射模糊条带,具有穿时地层特征,这与两侧未受岩体影响的地层形成鲜明对比(图3),成为疑似侵入岩体判识的依据。相应地,反映N1、N2、N4和N5疑似侵入岩体的剖面,浅、深部层段地层扰动明显,呈深宽浅窄、

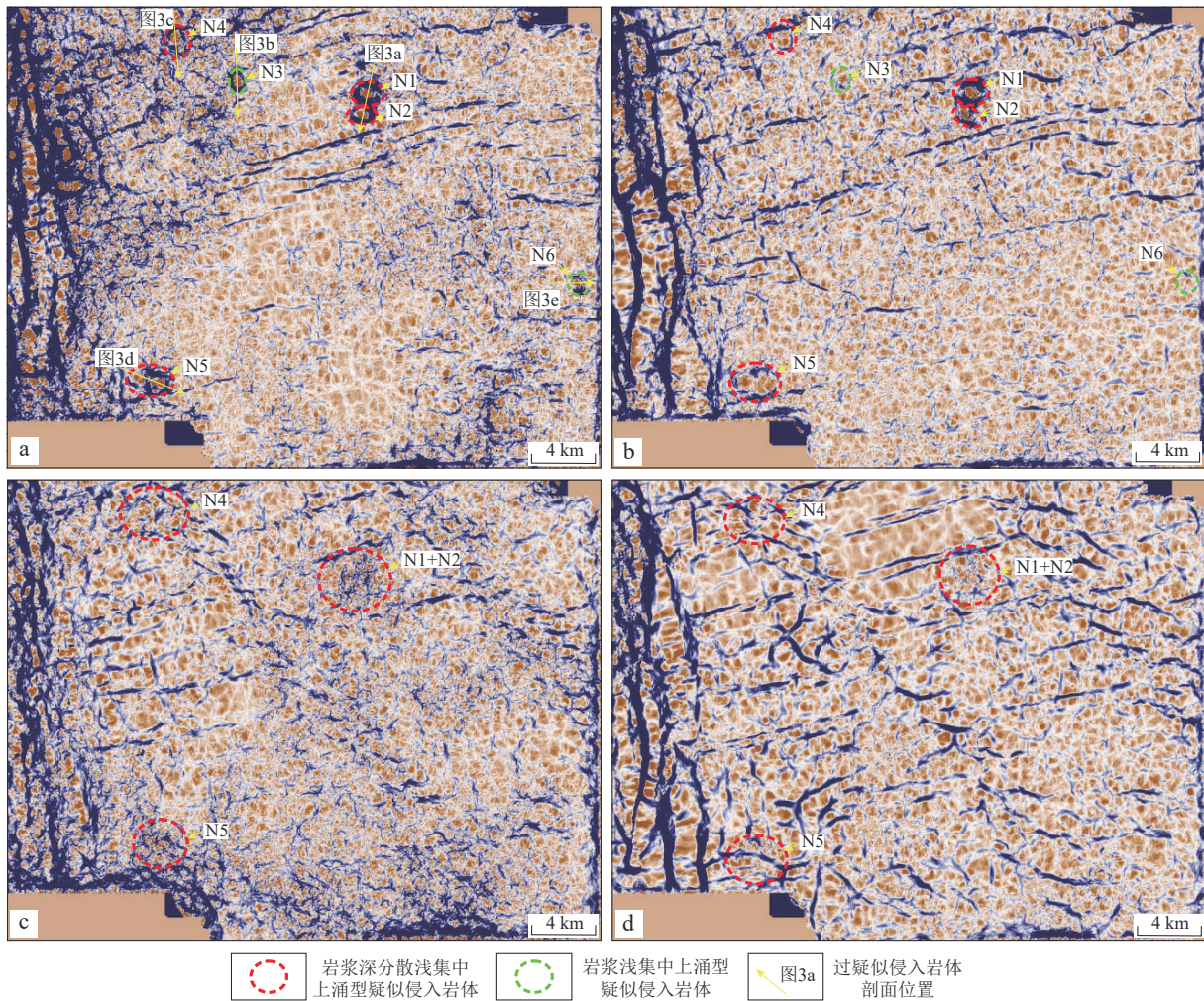


图2 古峰庄地区不同深度层系(水平时间切片)疑似侵入岩体平面分布变化

Fig. 2 Horizontal time slices showing changes in the planar distribution of suspected intrusive rock bodies at different depths in the Gufengzhuang area

a. 500 ms; b. 1 000 ms; c. 1 500 ms; d. 2 000 ms

(N1—N6分别为1—6号疑似侵入岩体。)

岩浆侵位垂向连续的杂乱反射模糊带(图3a, c, d),属于“岩浆深分散浅集中上涌型”疑似侵入岩体。N3和N6疑似侵入岩体仅在其上浅部地层具有清晰的杂乱反射特征,其下中、深部地层扰动现象微弱,多呈紧邻断裂的窄反射模糊带,故造成地层宏观上具有正常的层状反射特点(图3b, e),为“岩浆浅集中上涌型”疑似侵入岩体。整体来看,疑似侵入岩体的平面、剖面特征吻合性较好,佐证了研究区所识别出的6个疑似侵入岩体依据充分。

2 不同类型疑似侵入岩体特征

由上述可知,根据三维工区内的岩浆上涌活动及其影响形式,可将古峰庄疑似侵入岩体分为“岩浆深分

散浅集中上涌型”和“岩浆浅集中上涌型”2类。由于同一类型疑似侵入岩体特征基本相似,本文优选地震反射特征清晰的N1和N2(岩浆深分散浅集中上涌型)、N3(岩浆浅集中上涌型)疑似侵入岩体为代表,刻画其几何学特征,进而剖析其成因。由于在岩浆上涌活动过程中,受先存断裂影响明显,同时也会新生一系列伴生断裂,将二者区分开来是重要且必要的。平面上,在疑似侵入岩体之外仍有一定规模延伸、与不受疑似侵入岩体活动影响的优势断裂方向相同或相近的断裂,一般应属岩浆活动之前形成的先存断裂。在剖面上,岩体内部地震反射波同相轴杂乱、有一定垂直断距的断裂构造,多为岩浆伴生断裂;而垂直断距大、分割岩体与围岩的断裂多为先存断裂,包括基底断裂和盖层断裂。

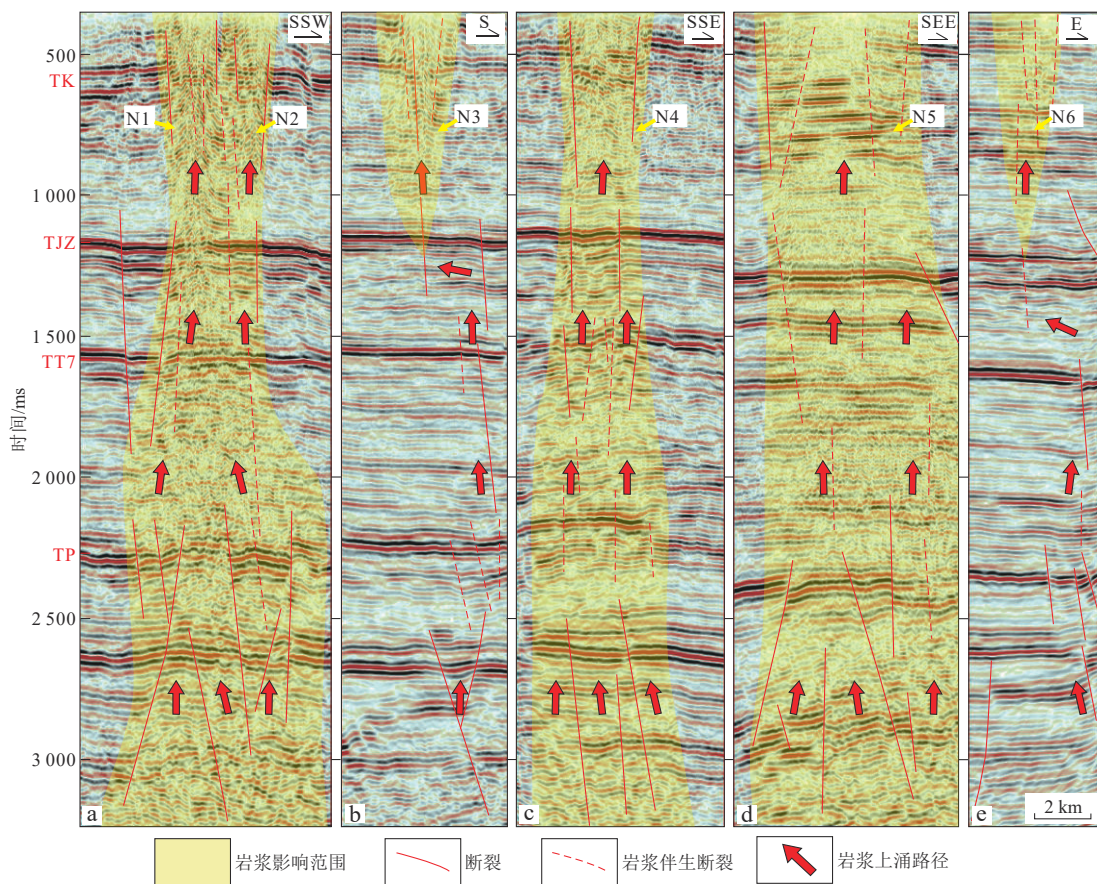


图3 古峰庄地区疑似侵入岩体剖面特征(剖面位置见图2a)

Fig. 3 Sections showing the characteristics of suspected intrusive rock bodies in the Gufengzhuang area (see Fig. 2a for section locations)
(N1—N6分别为1—6号疑似侵入岩体。)

2.1 岩浆深分散浅集中上涌型疑似侵入岩体

N1和N2疑似侵入岩体在不同深度等时切片上的平面特征存在差异。以1 000 ms为界,其上部岩体的环状结构明显,其下部环状结构基本消失,但仍可观察到岩体发育部位地层反射杂乱(图4)。测量统计发现,不同层系N1和N2疑似侵入岩体的影响范围有别,在500 ms等时切片上,二者影响的面积分别为2.65 km²、2.43 km²(图4a)。随埋深的增加,N1疑似侵入岩体的面积不断变大,N2疑似侵入岩体与之相反,在1 500 ms等时水平切片上两岩体连为一体,已不易区分(图4e)。在更深部层系,两疑似侵入岩体与围岩的边界模糊,但仍可见呈絮状展布、反射特征杂乱的岩浆扰动现象(图3a,图4f—i)。

由过N1和N2疑似侵入岩体的5条地震剖面可知(图5),二者的岩浆上侵路径和活动影响范围被地震剖面充分记录。岩浆由深部层系分散上涌至浅部层系集中侵位,纵向跨度可达5.5 km,整体上构成下宽上窄、产状近直立的疑似侵入岩体,且岩体核部地层扰动

强度大于岩体边部。疑似侵入岩体在三叠系内部(约1 400 ms等时切片)平面和剖面形态均发生明显变化,由下部宽而散的区带向上归并为2个相对较窄的准圆形集中带(图4,图5)。整体来看,N1和N2疑似侵入岩体在深部层系呈弱杂乱反射,地层受扰动范围大;而在浅部层系,构造-热变形复杂,断裂、裂缝发育,地层呈强杂乱反射和似丘状结构。

综合N1和N2疑似侵入岩体平、剖面特征可知(图4,图5),深浅部疑似侵入岩体构型、地层扰动强度及伴生断裂缝数量等特征存在差异。此现象与不同埋深先存断裂的存在及其优势走向、垂向叠置程度、数量、规模和地层压力大小等因素有关。①先存断裂作为构造薄弱带为岩浆上涌提供通道,深、浅层系断裂的垂向叠置性会对岩浆上涌路径有一定的控制作用。N1和N2疑似侵入岩体发育部位,尽管不同深度层系先存断裂的优势走向有别,即深部以近NS向断裂为主、浅部以NEE向断裂为主,但二者的垂向投影大致重叠,可构成垂向连续性强的构造薄弱带,岩浆先沿深部多条近NS向基底断裂分散上涌至中部

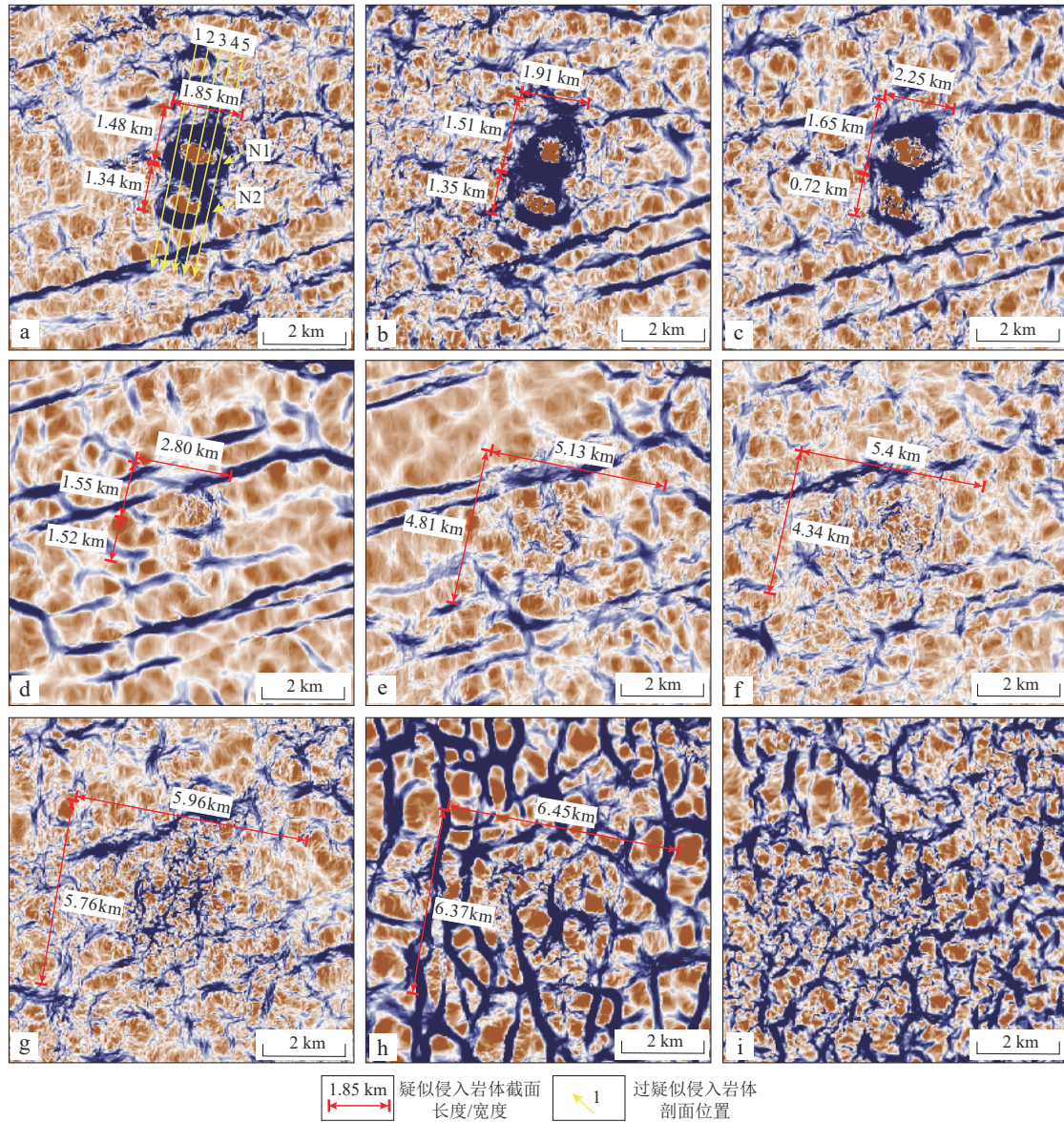


图4 古峰庄地区N1和N2疑似侵入岩体不同深度层系(水平时间切片)平面分布特征变化

Fig. 4 Horizontal time slices showing changes in the planar distribution of suspected intrusive rock bodies N1 and N2 at different depths in the Gufengzhuang area

a. 500 ms; b. 750 ms; c. 1 000 ms; d. 1 250 ms; e. 1 500 ms; f. 1 750 ms; g. 2 000 ms; h. 2 250 ms; i. 2 500 ms

层系,后沿浅部NEE向断裂继续上侵至浅部。②先存断裂的数量决定岩浆上涌形式。在N1和N2疑似侵入岩体所处位置上,深部层系近NS向断裂的数量明显多于浅部层系NEE向断裂,深部较浅部构造薄弱带宽,导致岩浆于深部分散上涌、浅部集中侵位。③先存断裂的规模决定岩浆上涌过程的快慢。断裂延伸长度与其核部的垂直断距呈正相关关系,延伸距离长则核部断距大。破碎强烈的NEE向断裂相较于延伸距离短、核部断距小、伴生裂缝少的近NS向断裂,更有利于热流体向上运移。④不同深度层系地层

压力大小不同。浅部层系,埋深浅、上覆地层压力小,地层受岩浆影响易上拱形成丘状变形,并新生大量岩浆伴生断裂(缝)。而深部层系,则与之相反,地层变形程度小、岩浆伴生断裂少,整体表现出深、浅部层系扰动弱、强不同的特点(图4—图6)。

2.2 岩浆浅集中上涌型疑似侵入岩体

N3疑似侵入岩体由500~1 000 ms等时切片环状结构渐趋模糊,岩浆活动影响程度减弱、范围变小,而1 000 ms以下几乎不见其行迹(图7)。在500 ms等时

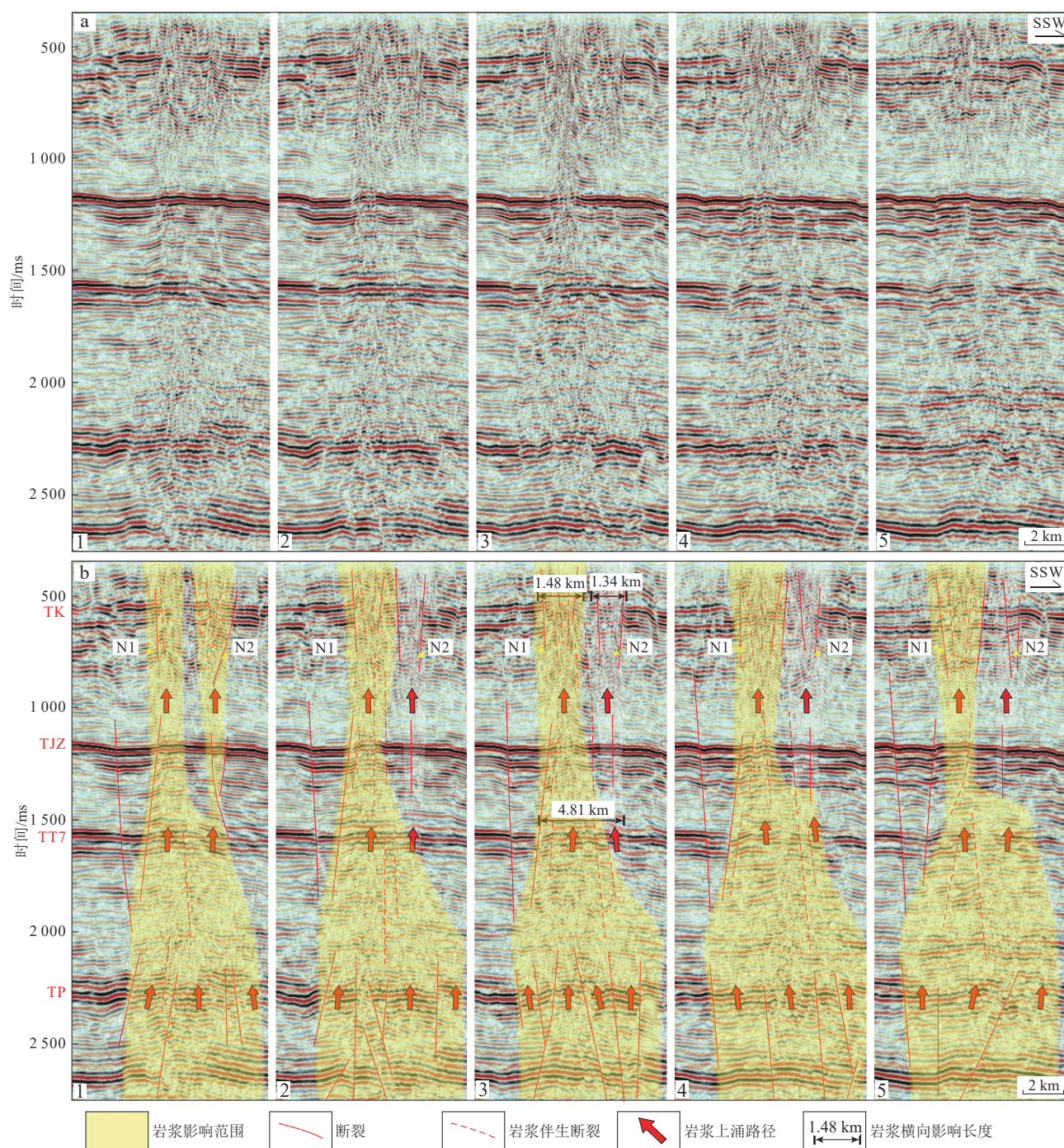


图5 古峰庄地区N1和N2疑似侵入岩体原始剖面(a)及解释剖面(b)(剖面位置见图4a)

Fig. 5 Original (a) and interpreted (b) seismic sections of suspected intrusive rock bodies N1 and N2 in the Gufengzhuang area (see Fig. 4a for section locations)

切片上,N3疑似侵入岩体分布面积可达 2.17 km^2 (图7a)。从剖面特征来看,N3疑似侵入岩体主要记录于1 000 ms等时切片以上地层,此层段地层受扰动强,岩体呈向下收敛的倒圆锥体结构,其内部具丘状杂乱反射特点;此层段以下,地层呈正常的层状结构,无明显岩浆上涌记录(图8)。

对比过N3疑似侵入岩体的5条地震剖面可知,愈

靠近岩体核部,地层杂乱反射特征和丘状构造愈明显,而岩体边部,地震反射波同相轴相对稳定(图8)。N3疑似侵入岩体内部丘状构造幅度、地层破碎程度明显小于N1和N2疑似侵入岩体,且其发育部位深部基底断裂数量少(图3),与浅部盖层断裂的垂向叠置性差。

与N1和N2疑似侵入岩体不同,N3疑似侵入岩体发育特征较为特殊,在地震剖面上难以识别出纵向连

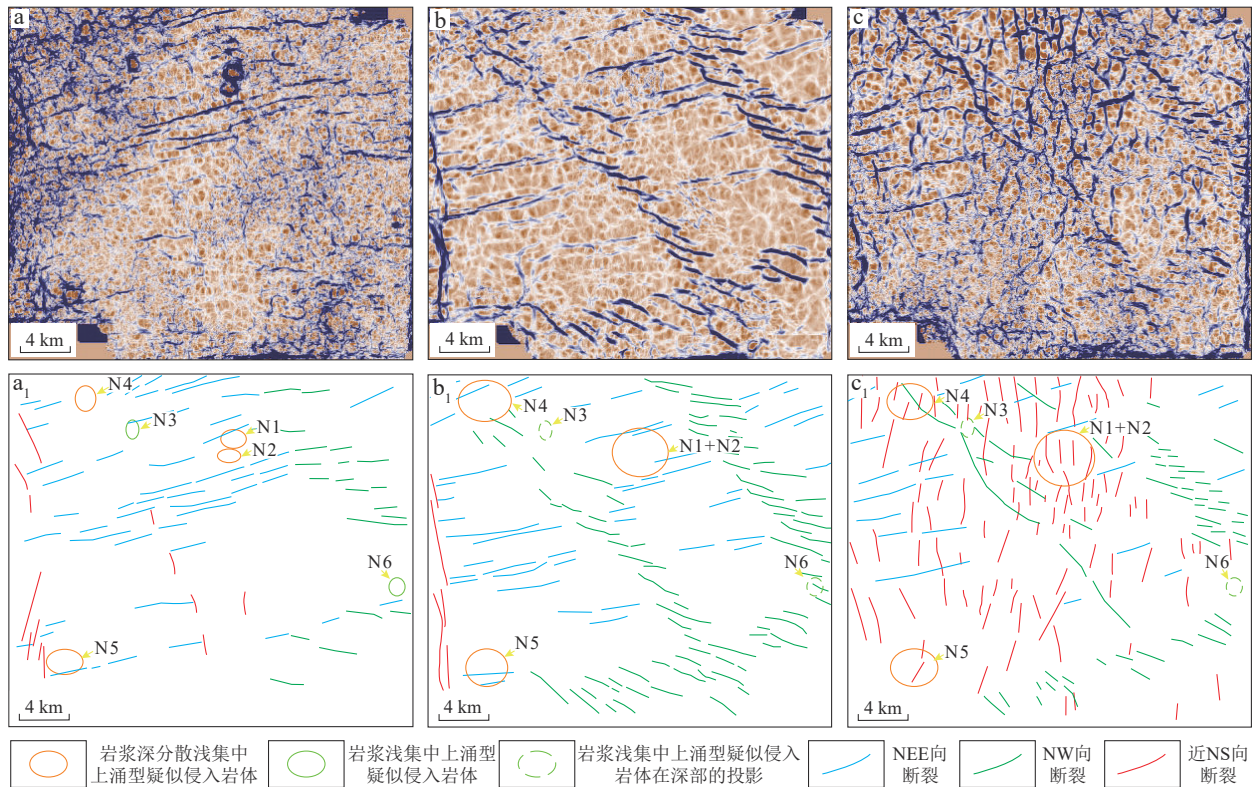


图6 古峰庄地区疑似侵入岩体与不同深度层系(水平时间切片)多走向断裂叠合图

Fig. 6 Images of suspected intrusive rock bodies superimposed with multi-strike faults at different depths in the Gufengzhuang area
a. 520 ms; a₁. 520 ms 疑似侵入岩体和各走向断裂解释结果; b. 1 650 ms; b₁. 1 650 ms 疑似侵入岩体和各走向断裂解释结果; c. 2 200 ms; c₁. 2 200 ms 疑似侵入岩体和各走向断裂解释结果
(a₁, b₁ 和 c₁ 中实线圈代表侵入岩体真实存在, 虚线圈代表浅部岩体发育位置在深部的投影。)

续的岩浆上涌路径,且其在深部层系受岩浆扰动现象不明显。分析认为,此现象很可能与疑似侵入岩体发育部位深部层系先存断裂的数量、核部与端部断距大小及垂向叠置程度密切相关。①深部层系,N3疑似侵入岩体垂向投影处无先存断裂,但在其附近有1条近NS向和2条NW向基底断裂,且其更临近这些先存断裂的端部,垂直断距小。相比之下,N1和N2疑似侵入岩体,紧邻多条近NS向和NEE向基底断裂的核部,断距较大。因此,在先存断裂的数量和垂直断距存在明显差异的情况下,N3疑似侵入岩体的岩浆上涌缓慢。②N3疑似侵入岩体发育部位,深、浅层系先存断裂的垂向投影之间多存在一定距离,多具有横向不重叠、纵向不连续的断裂发育特点,故岩浆由深及浅依次利用其内部紧邻断裂,产生疑似侵入岩体上涌路径并不直立的现象(图6—图8)。值得关注的是,中部层系,N3疑似侵入岩体发育部位断裂不发育(无构造薄弱带),当岩浆上涌至该层段时,岩浆可沿连通的孔、洞、缝或低压区多向优势运移,呈弥漫式穿地层上涌。由于此上涌通道尺度微小,在地震剖面上不易识别。

综上所述,“岩浆深分散浅集中上涌型”和“岩浆浅集中上涌型”2类疑似侵入岩体空间几何学特征差异显著,表现为岩浆上涌方式和形成演化模式的明显不同(图9)。分析认为造成此差异的原因包括先存断裂的存在及其优势走向、垂向叠置程度数量、规模、核部与端部断距大小,以及不同埋深地层压力大小等。当深部地层先存基底断裂与中浅部地层先存盖层断裂数量多、规模大、垂向叠置性好时,岩浆将由深及浅依次通过各深度层段先存断裂或诱导裂缝带垂直向上侵位,形成产状近直立的“岩浆深分散浅集中上涌型”疑似侵入岩体,如N1和N2(图9a);当深浅部先存断裂数量少、规模小且垂向叠置性差时,岩浆上涌通道狭窄且不连续,在此构造地质背景下岩浆纵向侵位难度大,将优选其紧邻的构造变形带(断裂带或裂缝带)、储层连通性良好部位或低压区多方向优势运移,直至浅部构造薄弱带形成“岩浆浅集中上涌型”疑似侵入岩体,如N3(图9b)。先存断裂不仅是岩浆上侵的构造薄弱带,还可作为边界断裂控制岩浆活动的影响范围,尤以错断地层多的NEE向断裂最为显著。

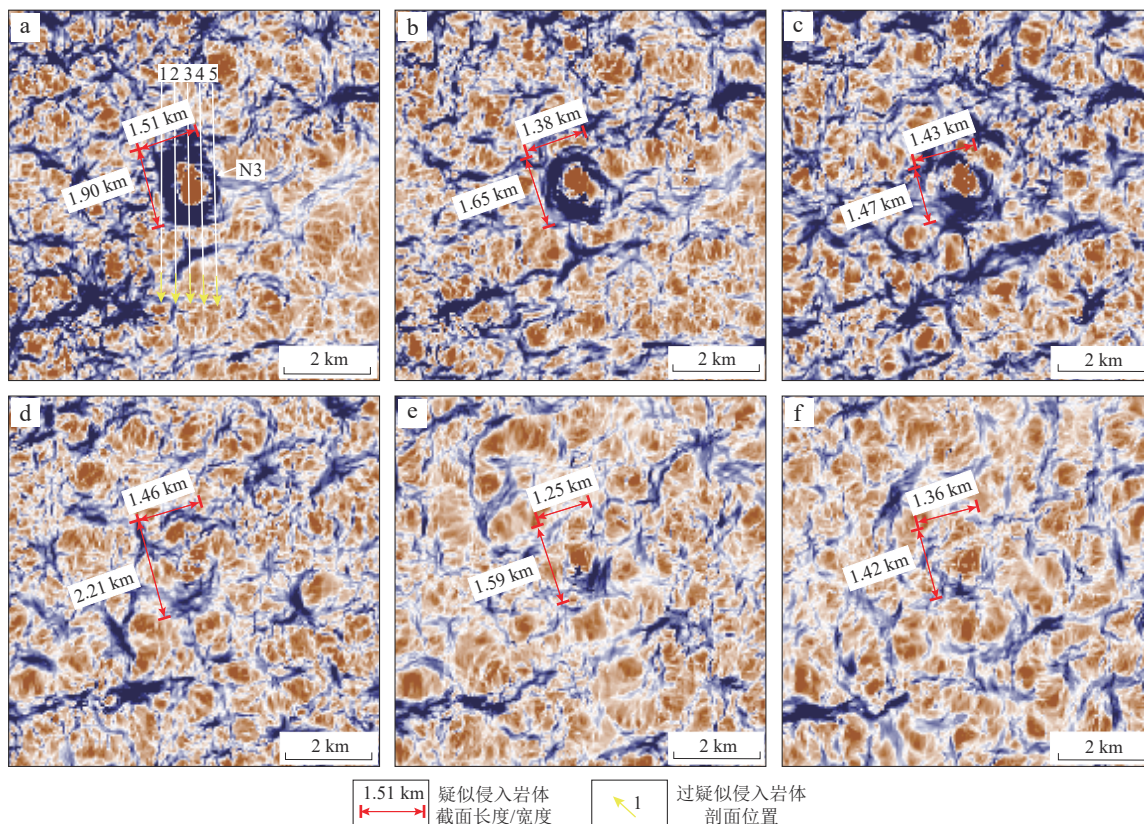


图7 古峰庄地区N3疑似侵入岩体不同深度层系(水平时间切片)平面分布特征变化

Fig. 7 Horizontal time slices showing changes in the planar distribution of suspected intrusive rock body N3 at different depths in the Gufengzhuang area

a. 500 ms; b. 600 ms; c. 700 ms; d. 800 ms; e. 900 ms; f. 1150 ms

3 古峰庄疑似侵入岩体的地质意义

3.1 构造-热作用背景

基于上述讨论并结合前人研究成果揭示^[3,14,16-22,38],盆地周缘构造热事件活跃,岩浆岩体广泛出露且跨越时代长,火山活动发生于晚白垩世之前。盆缘已证实的岩浆岩体或热力作用主要包括:①盆地北缘阴山造山带系列早白垩世岩浆岩体和新元古界、早古生界侵入岩体^[39];②盆地南缘及其紧邻的秦岭地区火山活动剧烈,如132.2 Ma±9.2 Ma的孤峰山岩体^[40]、139~125 Ma的孤偃山岩体^[41],且渭河盆地具有丰富的地热和氦气资源^[18,24];③盆地西北缘贺兰山地区发现的汝箕沟-鼓鼓台玄武岩岩体(~229 Ma)^[23,42];④盆地西南缘炭山-黑石山岩体(107 Ma±1 Ma)^[3];⑤盆地东缘临县地区的紫金山基性杂岩体(136.7~125.3 Ma)^[14,17,22,25],且在盆地东北部区域范围存在多期或同期多阶段的中侏罗一早白垩世中-酸性和碱性侵入岩活动。此类

地质现象均揭示了鄂尔多斯盆地周缘于早白垩世存在地幔隆升和岩石圈减薄^[14]。

但尚需注意的是,盆内出露的岩浆岩体数量和规模远小于盆缘,仅有零星分布。诸如,杭锦旗黑石头沟玄武岩岩体(~126 Ma)^[17,19]、崇信铜城岩体(130~111 Ma)^[29]、陇县安沟岩体(114 Ma±3 Ma)^[30]及龙门岩体(~108 Ma)^[30-31]。其中,野外露头发现的黑石头沟玄武岩岩体,位于下白垩统含砾砂岩之上^[16,19];由龙1和龙2井在三叠系中所钻遇的龙门岩体,对三叠系及其上覆各套地层均有不同程度的岩浆加热改造作用,且由过龙2井的地震剖面可见岩浆上侵或影响至下白垩统地层的现象^[30]。现今已被地震资料所证实的盆内岩浆岩体包括铜城岩体^[26]、龙门岩体^[26]、渭北隆起岩体^[20]和紫金山岩体^[5,26-27]。整体来看,盆地内部绝大多数岩浆岩体的主要发育时间介于108~130 Ma,进一步指示盆内热力作用主要发生在白垩纪及之前。目前,仅在盆地东北缘(和林格尔地区)发现了晚中新世(6.4 Ma)橄榄拉斑玄武岩^[43]。古峰庄地区受地层差异剥蚀和黄土塬干扰的影响,三维地震剖面可识别的

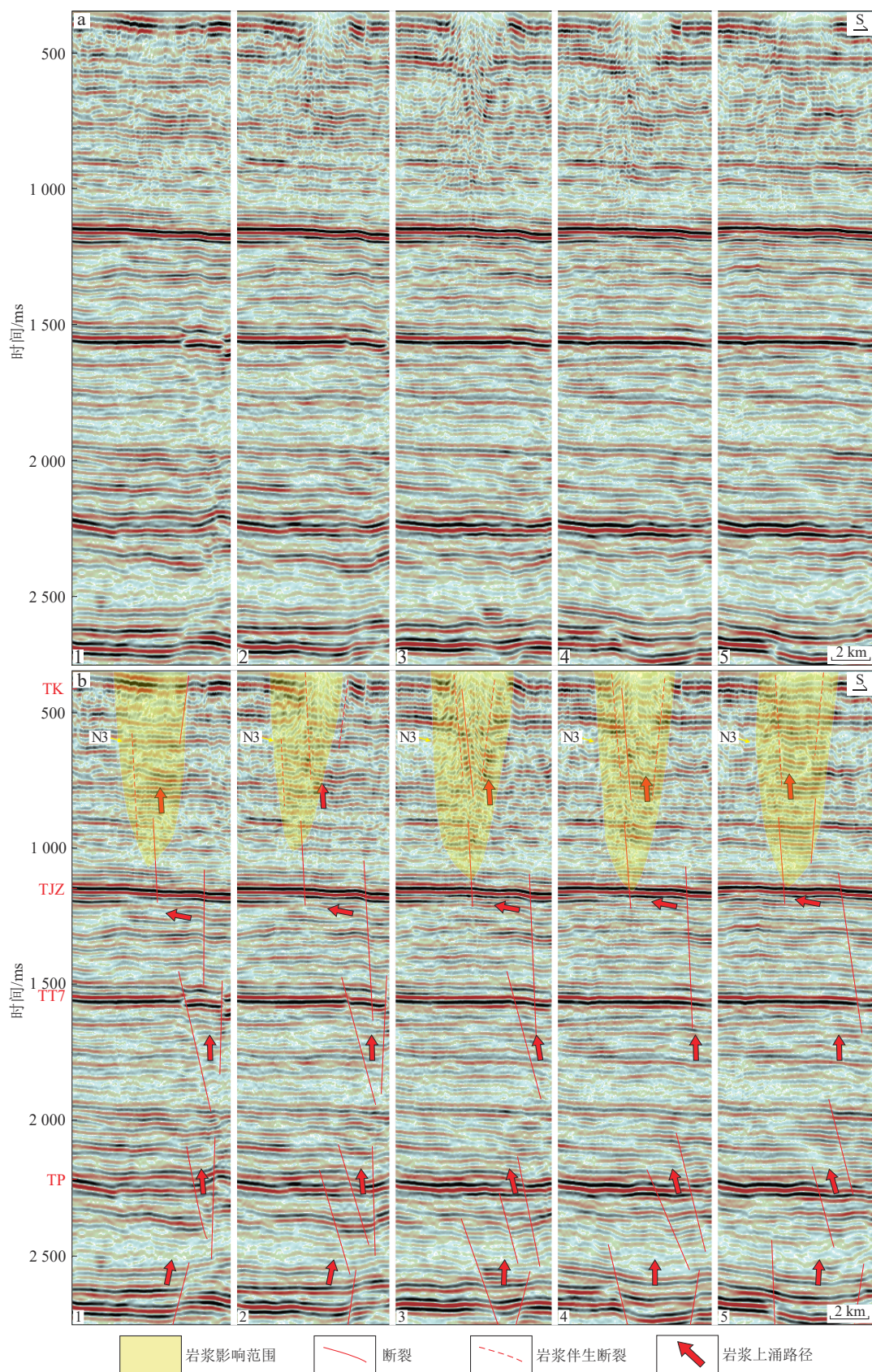


图 8 古峰庄地区 N3 疑似侵入岩体原始剖面(a)和解释剖面(b)(剖面位置见图 7a)

Fig. 8 Original (a) and interpreted (b) seismic sections of suspected intrusive rock body N3 in the Gufengzhuang area (see Fig. 7a for section locations)

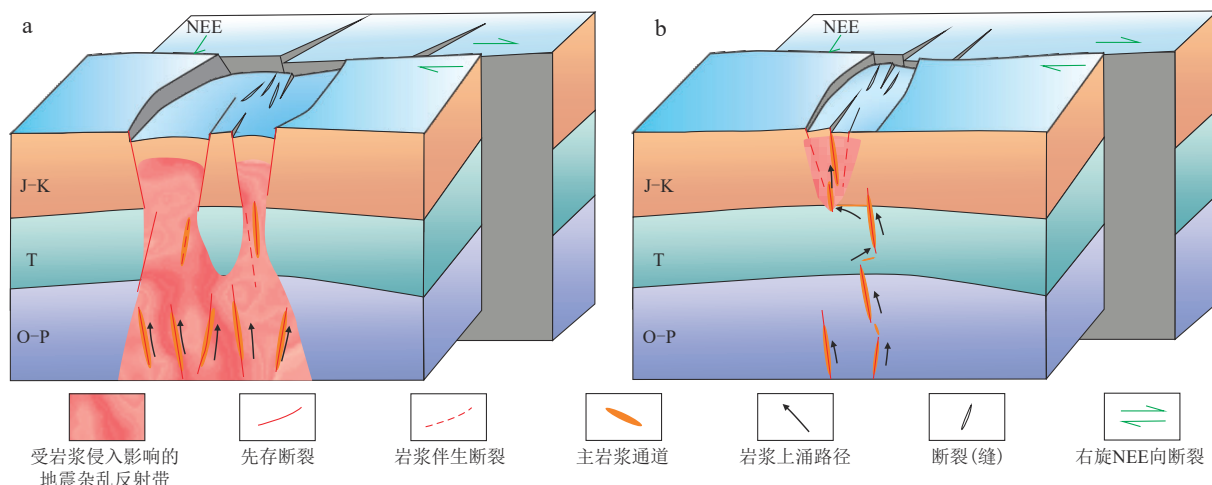


图9 古峰庄地区N1和N2(a)、N3(b)疑似侵入岩体形成演化模式

Fig. 9 Diagrams showing the formation and evolutionary patterns of suspected intrusive rock bodies N1 and N2 (a) and intrusive rock body N3 (b) in the Gufengzhuang area

J-K. 侏罗系-白垩系; T. 三叠系; O-P. 奥陶系-二叠系

浅部地层多为早白垩世早期地层,其上部地层难以识别。疑似侵入体发育部位,下白垩统的下部层段呈杂乱反射或似丘状结构,与正常地层层状反射特征明显有别(图3,图5b,图8b),显示岩浆侵入了下白垩统的下部层段。基于上述证据,且结合古峰庄地区NEE向线性伸展走滑断裂带主要错断二叠纪-白垩纪地层^[15],本文认为古峰庄三维工区内疑似浅层侵入岩体于早白垩世晚期形成,向上侵入至早白垩世早期地层。

从区域构造热背景来看,早白垩世华北克拉通东部破坏最强烈、热力作用最强^[44-45],鄂尔多斯盆地内部尽管构造相对稳定,但也存在诸多岩浆火山事件^[14,16,20,29]。结合盆地研究可知,早白垩世为盆地最热的阶段^[3,18],古峰庄地区较明显的岩浆活动与之相呼应。古峰庄三维地震资料不仅清晰记录了深部岩浆沿构造薄弱带上涌至中、浅部地层的整个过程,还提供了盆内构造热力作用和疑似侵入岩体特征研究的直接证据。已有研究认为,华北克拉通西部岩石圈减薄仅限于北部边缘(对应鄂尔多斯盆地北缘),至今已发现了四子王旗、固阳、乌拉特后旗等早白垩世岩浆岩体露头,共同组成东西向展布的岩浆岩带^[46-48]。盆地内部(特别是西部)早白垩世岩浆岩体的陆续发现,说明该时期华北克拉通东部岩石圈破坏和岩石圈减薄已影响到克拉通西部,可达鄂尔多斯盆地西部。古峰庄地区疑似浅层侵入岩体就是此构造热事件在盆内的记录之一。

3.2 油气地质意义

区域构造-岩浆热液活动对于盆地烃源岩层系具有不同程度的热改造,改造强度受控于岩浆的侵入机

制、作用深度及面积的差异,具体表现在与烃源岩的空间接触关系^[27,30]、岩浆冷侵入或热侵入、从深部缓慢侵入或快速上升侵入、岩体发育集中地带或周临区域等方面。以岩浆侵入对盆地油气生成、保存产生的影响为例,岩浆岩体携带的热物质或深部热液一方面促使烃源岩成熟,开始规模生烃;另一方面可能使已成熟的烃源岩过成熟而以生气为主,并使原来生成的石油发生裂解成气。此外,岩体的侵入上拱和冷却塌陷,对油气储-盖组合构建和成藏亦有建设和改造双重作用。

简言之,早白垩世的区域构造-热事件,是导致早白垩世鄂尔多斯盆地中-古生界油气规模成烃和成藏的根本原因,油气藏多于此时期及之后成藏-定位^[2-4,7-8,19,49-56]。对于中生界烃源岩和油藏而言,此次构造热事件会使得干酪根成熟度增加,开始进入成熟生油、过成熟大量生气阶段,已存在的油藏则逐渐发生裂解生气。由于上、下古生界煤成气及油型气的干酪根随温度增加,相应的生气速率逐渐加速,煤成气和油型气的干燥系数亦会增加。显然,构造热事件会明显加速干酪根的成熟及排烃速率,控制干酪根的成熟度以及气藏的干燥度^[3-4,57]。这也是当下鄂尔多斯盆地煤成气次生型负碳同位素系列仅分布于延安气田和靖边气田南缘的根本原因,成熟或者高温(>200℃)是次生型负碳同位素系列的主要控制因素^[57]。因此,鄂尔多斯盆地不同层位烃源岩在早白垩世大规模生油、生气及成藏均可能受到早白垩世区域构造-热事件的控制和影响^[4]。

对古峰庄地区已钻井试油情况的分析显示,油气藏勘探纵向目标层系多,发现有高产工业油流井。鉴

于本区疑似侵入岩体的形成时代与古生界-中生界油气规模成烃期和成藏期一致,二者联系密切,故此阶段的热液活动对该区油气生成、保存和成藏影响重大,具有极其重要现实意义。因此,古峰庄地区后续的深入勘探和研究工作,应重视岩浆侵入活动对不同时代烃源岩层或储层可能产生的影响,是油气精细勘探和评价过程中不可或缺的一环。

4 结 论

1) 鄂尔多斯盆地古峰庄地区岩浆活动发育,共发现6个环状疑似侵入岩体,可分为“岩浆深分散浅集中上涌型”和“岩浆浅集中上涌型”2类,二者空间几何学特征差异明显。前者(包含N1,N2,N4和N5)岩体发育部位由深及浅地层均呈杂乱反射、岩浆上涌通道明显,深部层系地层扰动强度和岩浆伴生裂缝数量大于浅部层系;后者(包括N3和N6)以1 000 ms等时切片为界,其上地层受岩浆影响明显,其下地层一般呈正常层状结构。

2) 受先存断裂的存在及其优势走向、数量、规模、垂向叠置程度、核部与端部断距大小,以及不同埋深地层压力大小等因素影响,古峰庄地区岩浆上涌方式不同,进而导致疑似侵入岩体的空间结构特征存在差异。对于深浅层系先存断裂发育且其规模大、数量多、垂向叠置性好的构造部位,岩浆由深及浅依次通过各层段先存断裂(缝)垂向上涌,形成产状直立的“岩浆深分散浅集中上涌型”疑似侵入岩体,如N1和N2;反之,岩浆则将优选紧邻的构造变形带、储层连通性良好部位或低压区多向优势运移,最终在浅部构造薄弱带形成“岩浆浅集中上涌型”疑似侵入岩体,如N3。

3) 古峰庄地区疑似侵入岩体于早白垩世晚期形成,是燕山期华北克拉通中西部区域构造-热事件在盆地内部表现的缩影,其发生与华北克拉通岩石圈减薄的峰期年龄同时期,对盆地中生界-古生界3套主要烃源岩生烃、储层改造和成藏等有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 王梓毅,付金华,刘显阳,等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组7段埋藏期热液活动对页岩油储层的影响[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 899-909.
WANG Ziyi, FU Jinhua, LIU Xianyang, et al. The influence of hydrothermal activities on shale oil reservoirs during the burial period of the Upper Triassic Chang 7 Member, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 899-909.
- [2] 袁静,周涛,乔俊,等. 深层砂砾岩中的深部热流体作用及其地质意义——以渤海湾盆地东营凹陷民丰—盐家地区古近系沙河街组四段为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 929-942.
YUAN Jing, ZHOU Tao, QIAO Jun, et al. Deep hydrothermalism of deep coarse-grained siliciclastic rocks and its geological significance: A case study of the 4th member of the Paleogene Shahejie Formation in Minfeng-Yanjia area, Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 929-942.
- [3] 任战利,祁凯,刘润川,等. 鄂尔多斯盆地早白垩世构造热事件形成动力学背景及其对油气等多种矿产成藏(矿)期的控制作用[J]. 岩石学报, 2020, 36(4): 1213-1234.
REN Zhanli, QI Kai, LIU Runchuan, et al. Dynamic background of Early Cretaceous tectonic thermal events and its control on various mineral accumulations such as oil and gas in the Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(4): 1213-1234.
- [4] 任战利,祁凯,李进步,等. 鄂尔多斯盆地热动力演化史及其对油气成藏与富集的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1030-1042.
REN Zhanli, QI Kai, LI Jinbu, et al. Thermodynamic evolution and hydrocarbon accumulation in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1030-1042.
- [5] 曹代勇,聂敬,王安民,等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区煤系气富集的构造-热作用控制[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1526-1532.
CAO Daiyong, NIE Jing, WANG Anmin, et al. Structural and thermal control of enrichment conditions of coal measure gases in Linxing block of eastern Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1526-1532.
- [6] 李林涛,吴克强,梁建设,等. 紫金山热事件对鄂尔多斯盆地东缘B区块致密气成藏控制作用[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(10): 1430-1438.
LI Lintao, WU Keqiang, LIANG Jianshe, et al. The domination of tight sand gas accumulation by the Zijinshan thermal event in the block B, eastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(10): 1430-1438.
- [7] 刘池洋,王建强,张东东,等. 鄂尔多斯盆地油气资源丰富的成因与赋存-成藏特点[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1011-1029.
LIU Chiyang, WANG Jianqiang, ZHANG Dongdong, et al. Genesis of rich hydrocarbon resources and their occurrence and accumulation characteristics in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1011-1029.
- [8] 刘池洋,黄雷,赵俊峰,等. 改造型盆地油气赋存-成藏理论体系纲要[J]. 地学前缘, 2022, 29(6): 84-108.
LIU Chiyang, HUANG Lei, ZHAO Junfeng, et al. Hydrocarbon occurrence and accumulation processes in reformed basins—theories outline[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(6): 84-108.
- [9] 韩美芝,李子颖,邱林飞,等. 鄂尔多斯盆地早白垩世构造-热事件与铀成矿的关系——来自玄武岩锆石U-Pb年代学的约束[J]. 铀矿地质, 2022, 38(1): 13-24.
HAN Meizhi, LI Ziyang, QIU Linfei, et al. The relationship between Early Cretaceous tectonic-thermal event and Uranium mineralization in the Ordos Basin: Constraint from U-Pb

- geochronology of basalt zircon[J]. *Uranium Geology*, 2022, 38(1): 13–24.
- [10] 高嘉洪, 金之钧, 梁新平, 等. 火山活动对鄂尔多斯盆地三叠系长7段淡水湖盆富营养化与沉积水体介质环境的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(4): 887–898.
- GAO Jiahong, JIN Zhijun, LIANG Xinping, et al. The impact of volcanism on eutrophication and water column in a freshwater lacustrine basin: A case study of Triassic Chang 7 Member in Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(4): 887–898.
- [11] 刘雨晴, 邓尚, 张荣, 等. 深层火成岩侵入体和相关构造发育特征及其石油地质意义——以塔里木盆地顺北地区为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 105–117.
- LIU Yuqing, DENG Shang, ZHANG Rong, et al. Characterization and petroleum geological significance of deep igneous intrusions and related structures in the Shunbei area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 105–117.
- [12] 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. *地质学报*, 2006, 80(5): 617–638.
- LIU Chiyang, ZHAO Hongge, GUI Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(5): 617–638.
- [13] 周雁, 付斯一, 张涛, 等. 鄂尔多斯盆地地下古生界构造-沉积演化、古地理重建及有利成藏区带划分[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 264–275.
- ZHOU Yan, FU Siyi, ZHANG Tao, et al. Tectono-sedimentary evolution, paleo-geographic reconstruction and play fairway delineation of the Lower Paleozoic, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 264–275.
- [14] 陈刚, 丁超, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地东缘紫金山侵入岩热演化史与隆升过程分析[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(11): 3731–3741.
- CHEN Gang, DING Chao, XU Liming, et al. Analysis on the thermal history and uplift process of Zijinshan intrusive complex in the eastern Ordos basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(11): 3731–3741.
- [15] 杨丽华, 刘池洋, 代双和, 等. 鄂尔多斯盆地古峰庄地区断裂特征及油气地质意义[J]. *地球科学进展*, 2021, 36(10): 1039–1051.
- YANG Lihua, LIU Chiyang, DAI Shuanghe, et al. Fault characteristics and petroleum geological significance in the Gufengzhuang area, Ordos Basin[J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(10): 1039–1051.
- [16] 邹和平, 张珂, 李刚. 鄂尔多斯地块早白垩世构造-热事件: 杭锦旗玄武岩的 Ar-Ar 年代学证据[J]. *大地构造与成矿学*, 2008, 32(3): 360–364.
- ZOU Heping, ZHANG Ke, LI Gang. Cretaceous tectono-thermal event in the Ordos Block: An Ar-Ar chronological evidence from basalt at Hangjin banner, Inner Mongolia, north China Craton [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2008, 32(3): 360–364.
- [17] 杨兴科, 晁会霞, 郑孟林, 等. 鄂尔多斯盆地东部紫金山岩体 SHRIMP 测年地质意义[J]. *矿物岩石*, 2008, 28(1): 54–63.
- YANG Xingke, CHAO Huixia, ZHENG Menglin, et al. Geological significance of SHRIMP dating of Zijinshan alkali complex in the eastern Ordos Basin, China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2008, 28(1): 54–63.
- [18] 任战利, 崔军平, 李进步, 等. 鄂尔多斯盆地渭北隆起奥陶系构造-热演化史恢复[J]. *地质学报*, 2014, 88(11): 2044–2056.
- REN Zhanli, CUI Junping, LI Jinbu, et al. Tectonic-Thermal history reconstruction of Ordovician in the Weibei uplift of Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(11): 2044–2056.
- [19] 罗开平, 杨帆, 陆永德, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区关键构造期与二叠系致密气成藏响应[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(4): 557–568.
- LUO Kaiping, YANG Fan, LU Yongde, et al. Key structural periods and Permian tight gas accumulation response in Hangjinqi area, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2021, 43(4): 557–568.
- [20] 何登发, 包洪平, 开百泽, 等. 鄂尔多斯盆地及其邻区关键构造变革期次及其特征[J]. *石油学报*, 2021, 42(10): 1255–1269.
- HE Dengfa, BAO Hongping, KAI Baize, et al. Critical tectonic modification periods and its geologic features of Ordos Basin and adjacent area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(10): 1255–1269.
- [21] 何登发, 包洪平, 开百泽, 等. 鄂尔多斯克拉通地块活化了吗? [J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1271–1291.
- HE Dengfa, BAO Hongping, KAI Baize, et al. Has the Ordos Block, a cratonic block been reactivated? [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1271–1291.
- [22] 杨永恒, 杨兴科. 紫金山岩体的热力构造类型、期次及其对鄂尔多斯盆地东缘多种能源矿产的影响作用[J]. *地球学报*, 2007, 28(6): 620–626.
- YANG Yongheng, YANG Xingke. Thermal structure types and stages of Zijinshan rock body and their influence upon several energy resources and minerals in eastern Ordos Basin [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2007, 28(6): 620–626.
- [23] 杨华, 付金华, 欧阳征健, 等. 鄂尔多斯盆地西缘汝箕沟大岭-鼓鼓台玄武岩锆石 U-Pb 定年及其构造意义[J]. *地球学报*, 2010, 31(2): 229–236.
- YANG Hua, FU Jinhua, OUYANG Zhengjian, et al. U-Pb zircon dating of the Daling-Gugutai basalt in Rujigou on the western margin of Ordos Basin [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, 31(2): 229–236.
- [24] 徐小刚. 渭北隆起构造-热演化与晚期差异隆升过程研究[D]. 西安: 西北大学, 2017.
- XU Xiaogang. Analysis on tectonic-thermal evolution and differential uplift history of Weibei uplift [D]. Xi'an: Northwest University, 2017.
- [25] 马静辉, 何登发. 贺兰山构造带及邻区中-新生代构造事件: 来自不整合面和裂变径迹的约束[J]. *岩石学报*, 2019, 35(4): 1121–1142.
- MA Jinghui, HE Dengfa. Meso-Cenozoic tectonic events in the Helanshan tectonic belt and its adjacent areas: Constraints from unconformity and fission track data [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(4): 1121–1142.

- [26] 宋平, 郭明强, 赵靖舟, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区上古生界烃源岩特征及其对天然气成藏的控制作用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2019, 34(1): 22-28.
- SONG Ping, GUO Mingqiang, ZHAO Jingzhou, et al. Characteristics of Upper Paleozoic source rocks in Linxing area, eastern margin of Ordos Basin and their controlling effect on accumulation of natural gas[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2019, 34(1): 22-28.
- [27] 郭广山, 柳迎红, 李林涛. 鄂尔多斯盆地东缘北段煤层含气量变化规律及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(3): 416-422.
- GUO Guangshan, LIU Yinghong, LI Lintao. Study on variation law and controlling factors of coal gas content in North section of east margin of Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(3): 416-422.
- [28] 祁凯. 华北克拉通中西部中~新生代岩石圈热-流变结构及深部岩浆-热力作用过程[D]. 西安: 西北大学, 2021.
- QI Kai. Meso-Cenozoic lithospheric thermal-rheological structure and deep magmatic-thermal process in the WNCC [D]. Xi'an: Northwest University, 2021.
- [29] 董会. 鄂尔多斯盆地西南缘烃源岩分布特征及评价[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- DONG Hui. Distribution and evaluation of hydrocarbon source rocks in the southwest margin of Ordos Basin [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [30] 于强, 李荣西, 任战利, 等. 鄂尔多斯盆地西南地区蓟县系古地温演化历史及岩浆热事件的影响[J]. 地质学报, 2023, 97(3): 922-937.
- YU Qiang, LI Rongxi, REN Zhanli, et al. Paleo-temperature evolution history of the Jixian System and the influence of magma thermal event of the southwestern Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(3): 922-937.
- [31] 侯云东, 蒋子文, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地西南部早中生代侵入岩脉的形成时代及成因[J]. 地质通报, 2023, 42(7): 1098-1117.
- HOU Yundong, JIANG Ziwen, LIU Xinshe, et al. Age and petrogenetic implication of the Early Mesozoic dykes in the southwestern Ordos Basin [J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(7): 1098-1117.
- [32] 刘永涛, 周义军, 郭亚斌, 等. 鄂尔多斯盆地岩浆活动特征、形成背景及其油气地质意义[J]. 地质论评, 2020, 66(增刊1): 193-194.
- LIU Yongtao, ZHOU Yijun, GUO Yabin, et al. The activity characteristics, formation background and petroleum geological significance of magma in Ordos Basin [J]. Geological Review, 2020, 66(S1): 193-194.
- [33] 姚泾利, 周新平, 惠潇, 等. 鄂尔多斯盆地西缘古峰庄地区低级序断层封闭性及其控藏作用[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(1): 72-81.
- YAO Jingli, ZHOU Xinping, HUI Xiao, et al. Sealing capabilities and reservoir controlling effects of low-grade faults in Gufengzhuang area, western margin of the Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 72-81.
- [34] 刘永涛, 周义军, 刘池洋, 等. 鄂尔多斯盆地隐蔽型走滑断裂带构造特征及其油气地质意义[J]. 地质论评, 2020, 66(增刊1): 90-92.
- LIU Yongtao, ZHOU Yijun, LIU Chiyang, et al. Structural characteristics and its oil and gas geological significance of hidden strike-slip fault zone in Ordos Basin [J]. Geological Review, 2020, 66(S1): 90-92.
- [35] 邵晓州, 王苗苗, 齐亚林, 等. 鄂尔多斯盆地盐池地区中生界断裂特征及其石油地质意义[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(5): 83-95.
- SHAO Xiaozhou, WANG Miaomiao, QI Yalin, et al. Characteristics of the Mesozoic faults in Yanchi area and the petroleum geological significance, Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(5): 83-95.
- [36] 郭惠, 赵红格, 李莹, 等. 鄂尔多斯盆地西部古峰庄地区三叠系延长组长7—长9段裂缝特征及油气意义[J]. 石油实验地质, 2023, 45(1): 109-121.
- GUO Hui, ZHAO Hongge, LI Ying, et al. Fracture characteristics and hydrocarbon significance in the Chang 7 to Chang 9 members of Triassic Yanchang Formation of Gufengzhuang area, western Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(1): 109-121.
- [37] 田刚, 杨明慧, 宋立军, 等. 鄂尔多斯盆地基底结构特征及演化过程新认识[J]. 地球科学, 2024, 49(1): 123-139.
- TIAN Gang, YANG Minghui, SONG Lijun, et al. New understanding of basement structural characteristics and its evolution process in Ordos Basin [J]. Earth Science, 2024, 49(1): 123-139.
- [38] YING Jifeng, ZHANG Hongfu, TANG Yanjie. Crust-mantle interaction in the central North China Craton during the Mesozoic: Evidence from zircon U-Pb chronology, Hf isotope and geochemistry of syenitic-monzonitic intrusions from Shanxi Province [J]. Lithos, 2011, 125(1/2): 449-462.
- [39] 李振宏. 鄂尔多斯盆地对秦岭造山过程的构造沉积响应[D]. 北京: 中国地质科学院, 2011.
- LI Zhenhong. Response to Qinling orogenic with the tectonic and sedimentary evolution of Ordos Basin [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2011.
- [40] 齐羽, 徐鸿博, 张竞雄, 等. 临汾断陷盆地孤峰山花岗岩闪长岩的地球化学和年代学及其地质意义[J]. 地质论评, 2011, 57(4): 565-573.
- QI Yue, XU Hongbo, ZHANG Jingxiong, et al. Geochemistry, geochronology and geological significance of Gufengshan granodiorite in Linfen grabben basin [J]. Geological Review, 2011, 57(4): 565-573.
- [41] 杨浩. 吕梁隆起带中段孤狐山碱性偏碱性杂岩群年代学及周邻构造特征研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- YANG Hao. Geochronology of Huyanshan alkaline complex in the middle segment of the Luliang uplift belt and its tectonic characteristics around [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [42] 张孙玄琦. 贺兰山北部中生代岩浆—热液活动及其油气意义

- [D]. 西安: 西北大学, 2016.
- ZHANG Sunxuanqi. The northern section of Helan Mountain Mesozoic magmatic hydrothermal activities and its oil and gas significance[D]. Xi'an: Northwest University, 2016.
- [43] 邹和平, 张珂, 刘玉亮, 等. 鄂尔多斯地块北部中、新生代玄武岩地球化学特征及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(1): 92-104.
- ZOU Heping, ZHANG Ke, LIU Yuliang, et al. Geochemical characteristics and their geological implications of Meso-Cenozoic basalts in the northern Ordos Block, North China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2010, 34(1): 92-104.
- [44] 牛耀龄. 玄武岩浆起源和演化的一些基本概念以及对中国东部中-新生代基性火山岩成因的新思路(英文)[J]. 高校地质学报, 2005, 11(1): 9-46.
- NIU Yaoling. Generation and evolution of basaltic magmas: Some basic concepts and a new view on the origin of Mesozoic-Cenozoic basaltic volcanism in eastern China[J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(1): 9-46.
- [45] ZHU Rixiang, CHEN Ling, WU Fuyuan, et al. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J]. Science China Earth Sciences, 2011, 54(6): 789-797.
- [46] CHEN Ling, CHENG Cheng, WEI Zigen. Seismic evidence for significant lateral variations in lithospheric thickness beneath the central and western North China Craton[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 286(1/2): 171-183.
- [47] GUO Pengyuan, NIU Yaoling, YE Lei, et al. Lithosphere thinning beneath west North China Craton: Evidence from geochemical and Sr-Nd-Hf isotope compositions of Jining basalts[J]. Lithos, 2014, 202/203: 37-54.
- [48] ZHANG Junjie, GUO Pengyuan, SUN Pu, et al. Petrogenesis of the early Cretaceous intra-plate basalts from the Western North China Craton: Implications for the origin of the metasomatized cratonic lithospheric mantle[J]. Lithos, 2021, 380/381: 105887.
- [49] 高山林, 韩庆军, 杨华, 等. 鄂尔多斯盆地燕山运动及其与油气关系[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(4): 353-358.
- GAO Shanlin, HAN Qingjun, YANG Hua, et al. Yanshanian movement in Ordos Basin and its relationship with distribution of oil and gas[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2000, 30(4): 353-358.
- [50] 李士祥, 邓秀芹, 庞锦莲, 等. 鄂尔多斯盆地中生界油气成藏与构造运动的关系[J]. 沉积学报, 2010, 28(4): 798-807.
- LI Shixiang, DENG Xiuqin, PANG Jinlian, et al. Relationship between petroleum accumulation of Mesozoic and tectonic movement in Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(4): 798-807.
- [51] 王爱国, 李春雨, 井向辉, 等. 鄂尔多斯盆地长7烃源岩三环萜烷的差异性、成因及其油源意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(4): 48-59.
- WANG Aiguo, LI Chunyu, JING Xianghui, et al. Difference, origin and oil source significance of tricyclic terpenes in Chang 7 source rocks in Ordos Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(4): 48-59.
- [52] 徐延勇, 申建, 张兵, 等. 鄂尔多斯盆地中东部上古生界致密气成藏条件差异性分析[J]. 断块油气田, 2022, 29(5): 577-583.
- XU Yanyong, SHEN Jian, ZHANG Bing, et al. Analysis on differences of tight gas accumulation conditions of Upper Paleozoic in central and eastern Ordos Basin[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(5): 577-583.
- [53] 赵永强, 许锦, 倪春华, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界原油成因及勘探前景[J]. 石油实验地质, 2022, 44(3): 487-496.
- ZHAO Yongqiang, XU Jin, NI Chunhua, et al. Origin and exploration prospect of Upper Paleozoic crude oil from Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(3): 487-496.
- [54] 李芙蓉, 刘文汇, 王晓锋, 等. 鄂尔多斯盆地古生界天然气地球化学特征与成因[J]. 石油实验地质, 2023, 45(4): 809-820.
- LI Furong, LIU Wenhui, WANG Xiaofeng, et al. Geochemical characteristics and genesis of Paleozoic natural gas in the Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(4): 809-820.
- [55] 罗安湘, 喻建, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地中生界石油勘探实践及主要认识[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(3): 253-260.
- LUO Anxiang, YU Jian, LIU Xianyang, et al. Practices and cognitions of petroleum exploration in Mesozoic, Ordos basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(3): 253-260.
- [56] 李慧敏, 赵振宇, 高建荣, 等. 鄂尔多斯盆地西部奥陶系成藏主控因素分析[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(2): 161-166.
- LI Huimin, ZHAO Zhenyu, GAO Jianrong, et al. Main controlling factors of Ordovician reservoir formation in western Ordos Basin[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(2): 161-166.
- [57] 戴金星, 倪云燕, 黄士鹏, 等. 次生型负碳同位素系列成因[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(1): 1-7.
- DAI Jinxing, NI Yunyan, HUANG Shipeng, et al. Origins of secondary negative carbon isotopic series in natural gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(1): 1-7.

(编辑 张亚雄)