

火山灰对富有机质页岩形成的影响

——以西西伯利亚盆地中生界巴热诺夫组为例

梁新平^{1,2,3}, 金之钧^{1,2,3}, 刘全有^{2,3}, Shpilman Alexander⁴, 李 鹏^{2,3}, Morozov Vladimir⁵, Uspensky Boris⁵

(1. 北京大学 能源研究院, 北京 100871; 2. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083;

3. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 俄罗斯汉特-曼西斯克州国有地下资源合理利用分析研究中心, 俄罗斯 秋明 625026; 5. 俄罗斯喀山联邦大学 地质与石油技术研究院, 俄罗斯 喀山 420008)

摘要: 西西伯利亚盆地上侏罗统-下白垩统巴热诺夫组硅质-钙质富有机质泥页岩总有机碳(TOC)含量高且有机质成熟度适中, 是俄罗斯目前页岩油的勘探首选目的层系。近年研究表明, 该套富有机质页岩层段发育数厘米-毫米级的火山灰夹层, 具黄色荧光, 岩心薄片见大量沸石等火山灰蚀变矿物, 使该区火山灰与富有机质形成的相互关系引起关注。以该盆地的巴热诺夫组为例, 介绍了火山灰对该区富有机质页岩形成的影响。巴热诺夫组的地质-地球化学分析表明, 在火山灰发育同期沉积的富有机质层段中不仅硅、磷等营养元素含量高, 而且钡、锰、钼、铀等藻类繁殖催化元素含量也高, 推测火山灰携带物质促进了巴热诺夫页岩沉积时期古生物的大量繁殖甚至爆发, 为富有机质的形成奠定了物质基础; 同时, 在火山灰发育层段之上的富有机质泥页岩中大量发育草莓状黄铁矿, 且呈层状分布, Co/Ni 比值小于 1, S/Fe 比值偏高, 指示火山灰喷发之后形成缺氧的强还原环境, 有利于泥页岩中有机质的保存; 火山灰发育井区 TOC 含量高(多>7%), 有机质成熟度与邻近火山灰不发育区相比偏高($R_o=0.7\% \sim 1.1\%$), 生烃潜力高且已达到生油高峰, 推测可能火山灰携带的钼、镍等元素促进了热催化生油阶段干酪根的成烃演化; 火山灰发育的富有机质页岩层段常见藻类纹层与碳酸盐岩纹层互层, 多见层间孔缝, 利于页岩油气的运移。因此, 火山灰与巴热诺夫组富有机质页岩的形成具有一定的内在联系, 火山灰不仅能够提高沉积时期的古生产力和保存条件, 促进有机质的成烃演化, 而且利于形成富有机质交互纹层, 易于后期压裂开发。

关键词: 藻类勃发; 还原环境; 成烃演化; 富有机质形成; 火山灰; 页岩; 巴热诺夫组; 中生界; 西西伯利亚盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Impact of volcanic ash on the formation of organic-rich shale:

A case study on the Mesozoic Bazhenov Formation, West Siberian Basin

Liang Xinping^{1,2,3}, Jin Zhijun^{1,2,3}, Liu Quanyou^{2,3}, Shpilman Alexander⁴, Li Peng^{2,3}, Morozov Vladimir⁵, Uspensky Boris⁵

[1. Energy Research Institute, Peking University, Beijing 100871, China; 2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 4. V. I. Shpilman Research and Analytical Center for the Rational Use of the Subsoil, Autonomous Institution of Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra, Tumen 625026, Russia; 5. Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University, Kazan 420008, Russia]

Abstract: The siliceous and calcareous organic-rich shale in the Upper Jurassic-Lower Cretaceous Bazhenov Formation in West Siberian Basin is characterized by high TOC and organic matters of moderate maturity and therefore has been the preferred shale oil exploration target in Russia. Recent study reveals several sets of centimeter to millimeter thick volcanic ash interlayers with yellow fluorescence in this organic-rich shale interval. A large number of volcanic ash-altered minerals such as zeolite are also detected through thin section observation, thus triggering an interest in the investigation of the relationship between volcanic ash and organic matter in this area. This study takes the Bazhenov Formation in the basin as an example to illustrate the influence of volcanic ash on the formation of the organic-rich shale. The composite

收稿日期: 2019-08-26; 修订日期: 2020-12-29。

第一作者简介: 梁新平(1987—), 女, 博士, 页岩油气地质。E-mail: xinpingleiang@pku.edu.cn。

通讯作者简介: 金之钧(1957—), 男, 中国科学院院士, 石油地质学与战略选区评价。E-mail: jinzhijun@pku.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金委重大项目(42090025, 42090020); 国家重点研发计划项目(2019YFA0708504); 国家自然科学基金项目(41811530094, 41625009)。

geological-geochemical analysis on the volcanic ash in the formation shows that the organic-rich shale deposited synchronously with volcanic ash is rich in both nutrients such as silicon and phosphorus and catalytic elements for algae multiplication such as barium, manganese, molybdenum and uranium. It is therefore speculated that materials carried by volcanic ash promoted the mass reproduction or even facilitated a boom of palaeobios during the deposition of the Bazhenov, laying a material foundation for the formation of organic-rich matters. At the same time, a large number of strawberry-like pyrite layers were also developed in the shale overlying the volcanic ash interval, against a strong reducing environment of oxygen deficiency after volcanic ash eruption with Co/Ni ratio less than 1 and high S/Fe ratio. The fact that samples from the area with well-developed volcanic ash layers were measured to have higher TOC (over 7%) and maturity (R_o ranging between 0.7% and 1.1%) as well as higher hydrocarbon-generation potentials (almost reaching the peak) than those from adjacent areas without the layers indicates that the elements such as molybdenum and nickel carried by the volcanic ash served to promote the hydrocarbon generation of kerogens during thermocatalysis. The algal laminae interbedded with carbonate laminae in the shale could create plenty of interlayer pores for the migration of oil and gas. The formation of organic-rich shale in the Bazhenov Formation is, to some extent, inherently related to volcanic ash, which probably served to improve the paleo-productivity and preservation conditions for organic matter during the deposition period, promote the early hydrocarbon generation of organic matters, and facilitate the formation of organic-rich interlayers that respond quickly to stimulation operations.

Key words: algae boom, reducing environment, hydrocarbon generation, formation of organic-rich matters, volcanic ash, Bazhenov Formation, Mesozoic, West Siberian Basin

火山灰是岩浆喷出过程中的细粒碎屑物,直径小于 2 mm,由岩石、矿物和火山玻璃碎片组成,分布于相应火山锥体周边或者飘散至距离火山口数千公里的沉降区^[1-2]。距离火山口较远的沉降火山灰层,通常为毫米或厘米级,肉眼不可见的多由玻屑和晶屑组成,粒径通常小于 125 μm ^[3-4]。火山灰沉积对富有机质页岩形成的控制作用主要表现在火山灰沉降过程前后在烃源岩形成过程中的影响^[5-13]。首先,火山灰本身可为沉积盆地提供物源^[5-7];其次,火山灰喷出过程中携带大量碳源(CO_2 , CH_4)以及其他营养物质(N, Si, P)和微量金属元素(Fe, Zn, Mn, Ni, V)等,这些外源物质进入水体引起藻类及细菌大量繁殖,为海洋和湖泊初级生产力的提高提供物质基础^[14-18];同时,藻类和细菌的大量勃发消耗水体中氧含量,使得水体由火山喷发时期的弱氧化环境向强还原环境转变,减少有机质氧化和降解,促进了有机质的有效保存^[19-20]。尽管火山灰未喷出之前尚未对沉积盆地输入物质,但其酝酿过程中的热能提高了烃源岩发育地区的地温梯度,改变了局部的温度场和压力场,加速了烃源岩热成熟^[21]。另外,火山灰引起藻类勃发消耗透光层中 CO_2 使水中 CaCO_3 达到过饱和析出,有利于碳酸盐岩纹层和藻类有机质纹层交互沉积,形成层间裂缝,易于后期页岩油气运移。同时,富硅、富钙质纹层的存在增强了地层的脆性,有利于页岩油气层的压裂改造^[8,22]。

常规油气藏研究表明,西西伯利亚“南油北气”的

分布特征主要由烃源岩有机质的类型和成熟度控制,沉积旋回形成了最佳的生储盖组合,披覆背斜是主要的含油气圈闭^[23-26];对巴热诺夫组的研究多以烃源岩特征及地球化学评价为主,认为该段有机质含量丰富的主要原因是形成于缺乏陆源碎屑供应的深水缺氧盆地,由构造的快速沉降及海平面的快速上升引起^[23-26],而对该套烃源岩中是否发育火山灰关注不多。近年来,全球范围内富有机质发育的泥页岩中多见火山灰夹层,如美国的 Eagle Ford, Macellus 页岩、中国鄂尔多斯盆地延长组 7 段、准噶尔盆地芦草沟组等^[6-8],因此,该区火山灰如何影响富有机质形成引起关注。巴热诺夫组泥页岩的岩心观察发现其富有机质页岩段广泛发育火山灰沉积^[27-31],岩心薄片中也见大量沸石等火山灰蚀变矿物。本文结合前期在俄罗斯西西伯利亚盆地汉特-曼西斯克地区巴热诺夫组的岩心。镜下薄片观察,描述了该地层中火山灰发育层段富有机质页岩层段剖面及在平面的分布特征;通过对巴热诺夫组富有机质页岩样品的地质-地球化学分析,阐明了火山灰发育层段及其上下的生物发育与岩石地球化学特征,探讨了该区火山灰对富有机质页岩形成的影响,为火山活动下富有机质层系页岩油气的勘探开发提供参考和借鉴作用。

1 巴热诺夫组简介

西西伯利亚含油气盆地是目前俄罗斯联邦油气储

量最大和产量最高的地台型盆地,其地理位置大体在东经 60°以东,90°以西及北纬 73°以南,54°以北的范围内。盆地西缘以乌拉尔山脉为界,东缘以叶尼塞河为界,与东西伯利亚山地相邻,南方邻接阿尔泰山系和萨彦岭及哈萨克丘陵地带,北缘为喀拉海,濒临北冰洋。如把盆地向北部海区延伸大陆架部分也包括在内,西西伯利亚盆地总面积可达 $(4.0 \sim 4.2) \times 10^6 \text{ km}^2$,其中沉积盖层厚度超过 1 500 m 的陆上部分面积超过 $2.2 \times 10^6 \text{ km}^2$ [23]。

在西西伯利亚盆地提塘期—早贝利阿斯期(侏罗纪末—白垩纪初),整个盆地发生大规模的海侵,西西伯利亚地区快速沉降,碎屑物质供应相对缺乏,使深水缺氧的欠补偿沉积盆地形成于西西伯利亚地台中部,海水深度超过 300 m 的深水区面积达 $1.0 \times 10^6 \text{ km}^2$,盆地最深可达 7 00 m [24]。盆地中部地区深水缺氧盆地沉积了巴热诺夫组富有机质的黑色硅质/钙质泥页岩,富含伏尔加期及部分贝利阿斯期动物化石;盆地边缘带则沉积了厚度较大的不含砂岩的近岸相贫有机质

页岩,厚度在 20 ~ 50 m(图 1)。尽管巴热诺夫组沉积厚度不大,却是西西伯利亚盆地的主要生油岩,其成熟度主要介于 0.5% ~ 1.3%,大部分地区迄今为止仍处于生烃阶段 [25-26]。西西伯利亚盆地上侏罗统大量干酪根碳同位素丰度研究表明, $\delta^{13}\text{C}$ 介于 -28‰ ~ -25‰,说明为混源成因。

根据俄罗斯国有地下资源分析研究中心—秋明施比利曼分院岩心测试的分析结果,该套地层共有 4 种组分:干酪根、粘土、硅质和碳酸盐岩,整体有机质含量高,水平层理常见细粒度的层状成分,如硅质、炭质和黄铁矿。全岩 XRD—衍射实验表明,石英为主要成岩矿物,硅质含量平均为 42% ~ 43%,最高可达到 80%;其次为钠长石、似云母矿物(伊蒙混层)和黄铁矿,其他粘土矿物(高岭石和绿泥石)偶见,通常含量不多,平均值为 21% ~ 22%;而碳酸盐矿物(方解石和白云石)也偶尔可见,平均为 10% [27]。岩相上,巴热诺夫组划分为泥灰岩、碳酸盐岩、硅质泥页岩、钙质—硅质泥页岩、泥质—钙质硅岩以及低粘土质硅岩 6 类。据 Kontrovich

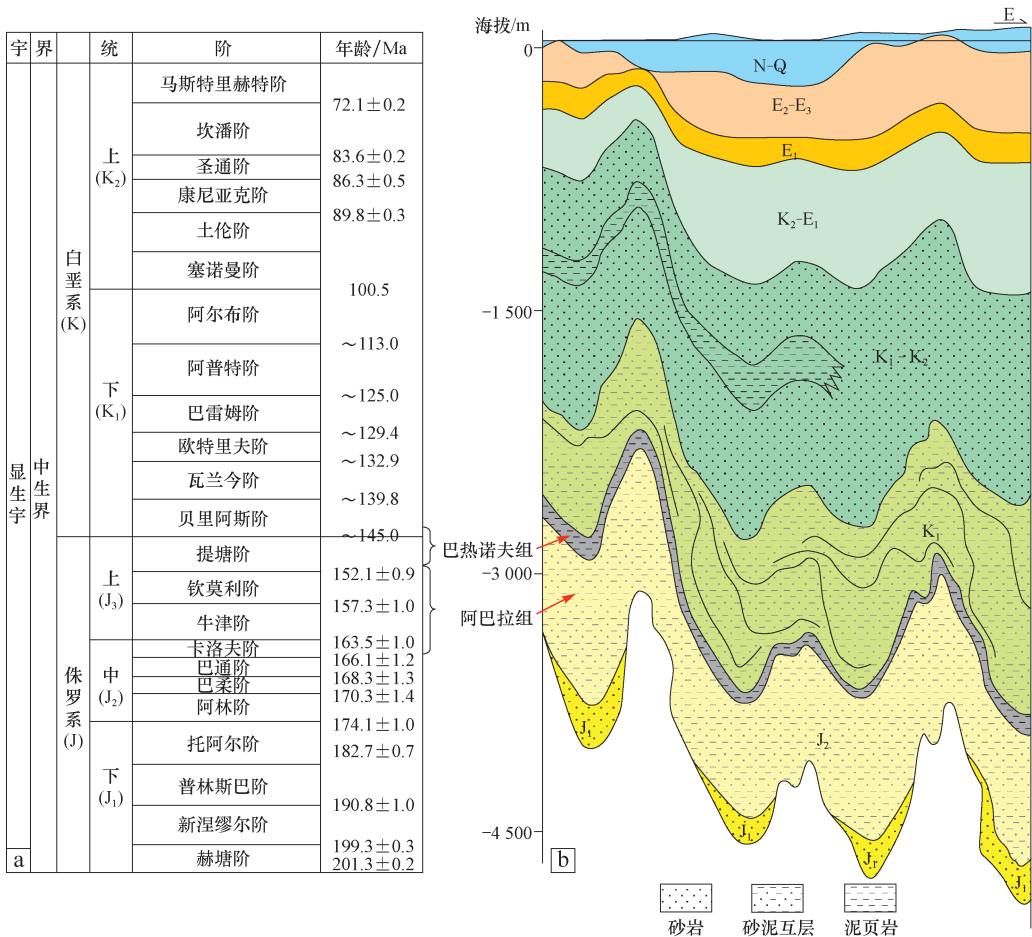


图 1 西西伯利亚盆地巴热诺夫组—阿巴拉组地质特征

Fig. 1 Geological characteristics of the Bazhenov-Abala Formation in the West Siberian Basin

a. 巴热诺夫组沉积期对应的地质历史时间; b. 盆地中部巴热诺夫组的剖面特征

J. 侏罗系; K. 白垩系; E. 古近系; N. 新近系; Q. 第四系

(2016)统计,泥灰岩在全区分布不多,其中泥质含量不高,约占55%左右,硅质占30%左右,其他为碳酸盐岩、钠长石、磷灰石、黄铁矿和干酪根等;碳酸盐岩可分为纯碳酸盐岩(占8.8%)和富有机质碳酸盐岩(占1%),富有机质碳酸盐岩中碳酸盐岩占比50.7%~57.7%,硅质含量可达20%,干酪根含量平均为11.9%;硅质泥页岩中硅质含量在25.7%~47.4%,平均37.6%,泥质含量在25.2%~49.7%,平均为37.6%;钙质-硅质泥页岩中硅质含量平均为37.7%,粘土含量达28.9%;泥质-钙质硅岩中硅质含量平均为41.4%,干酪根含量平均为16.2%,粘土矿物含量平均为20.6%;低粘土质硅岩中粘土含量平均为23.3%,硅质含量平均为43.4%。除此之外,还有一些混合岩相,例如粉砂质泥岩和泥质-硅质碳酸盐岩等。所有岩性中以钙质-硅质泥页岩和泥质-钙质硅岩分布最为广泛,部分岩相中干酪根含量可达27.8%。

巴热诺夫组各层段镜下均可见明显的沥青质放射虫。放射虫为具有轴伪足的海生单细胞浮游生物,是现今海洋浮游生物的重要组成部分。放射虫死亡之后,其骨架聚集在海洋底部,形成放射虫软泥。地层记录中放射虫的有无和含量高低主要取决于局部的生产率和沉积物的堆积速率。一般情况下,浅层海水对硅质生物有较高的溶解速率,放射虫稳定保存的几率较小,因此浅水放射虫形态一般不多^[33]。从奥陶纪开始,它们的骨架被证实促成海洋沉积物和硅质岩沉积^[32]。

2 巴热诺夫组火山灰发育特征

巴热诺夫组整合覆盖在格奥尔吉耶夫组或阿巴拉组的泥岩之上,分布非常广泛,为全盆地地震识别标志层,在区域和局部的地震剖面中均有显示,盆地中心发育有深大断裂^[23-24],可为地层深部火山喷发创造客观的地质条件。一般认为,西西伯利亚盆地巴热诺夫组富有机质页岩中火山喷出物多以火山玻璃形成赋存,沉积成岩作用促进矿物的转化,使得火山玻璃被次生矿物(蒙脱石、绿泥石和钠长石等)取代,从而导致火山灰层蚀变成粘土、钠长石和更复杂的岩石。这些岩石已经失去了它们的初始外观,难以确定它们的火山起源。部分研究学者认为该期火山灰多形成于水底不间断的火山喷发活动,而部分研究认为可能与盆地边缘强烈的构造运动造成的火山喷发相关,为空降成因^[30-31]。据俄罗斯油气地质研究院和秋明地下资源合理利用分析研究中心统计,目前巴热诺夫组火山灰岩心发现的井有30口(图2),钻井的不同小层均有火

山灰发现,平面分布广,单井剖面上以中上段居多,层数多但厚度不大,夹层主体表现为与碳酸盐岩、泥页岩和硅质岩同期沉积,且测井曲线特征明显,易于识别。

平面上,巴热诺夫组火山灰井分布集中于盆地沉积中心的深水陆棚区,以中部的汉特-曼西斯克州苏尔古特地区为主,该区TOC含量普遍大于7%,部分地区超过11%(图2),在提塘-早贝利阿斯期西西伯利亚海深水区有机质含量超过15%~20%,有机质的演化程度与邻近区不发育火山灰的井区相比,成熟度(R_o)偏高,多介于0.7%~1.1%(图2),但生烃潜力高且已达到生油高峰^[26],推测火山灰携带的钼、镍等催化元素,促进了有机质的成烃演化。

单井剖面上,巴热诺夫组可划分为6个小层,巴热诺夫组上段的硅质放射岩层岩性由均质向非均质过渡时期发育有多套火山灰夹层,并在火山灰层沉积之后出现泥质页岩(图3)。已有井的资料表明,火山灰夹层最常见于巴热诺夫组4层和5层底部^[31],夹层厚度多为厘米级,单层厚度一般小于5 cm,部分粘土化或方沸石化,颜色多为黄褐色或浅灰色(图4),凝灰状但不成层,具黄色荧光,与邻近的黑色硅质泥页岩颜色有

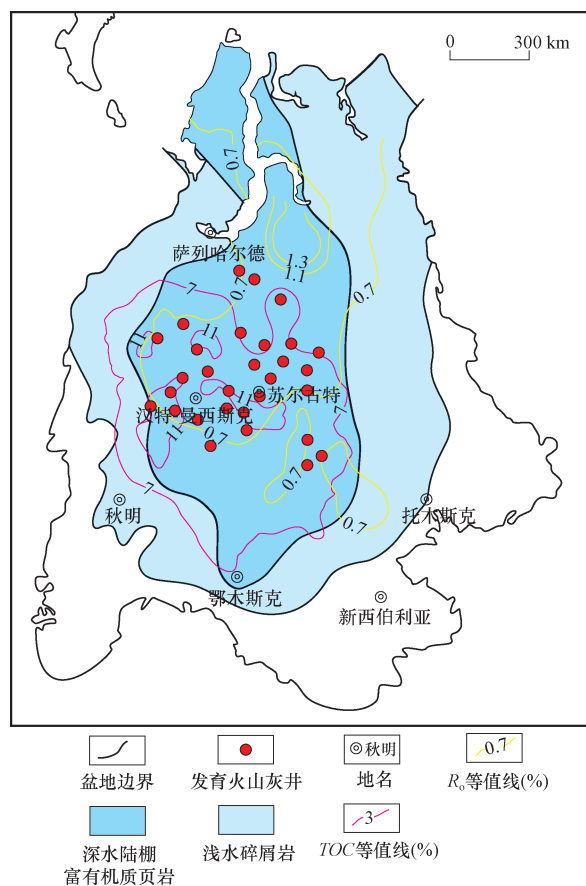


图2 西西伯利亚盆地巴热诺夫组火山灰分布区^[24,31,44]

Fig. 2 Distribution of volcanic ash in the Bazhenov Formation in the West Siberian Basin^[24,31,44]

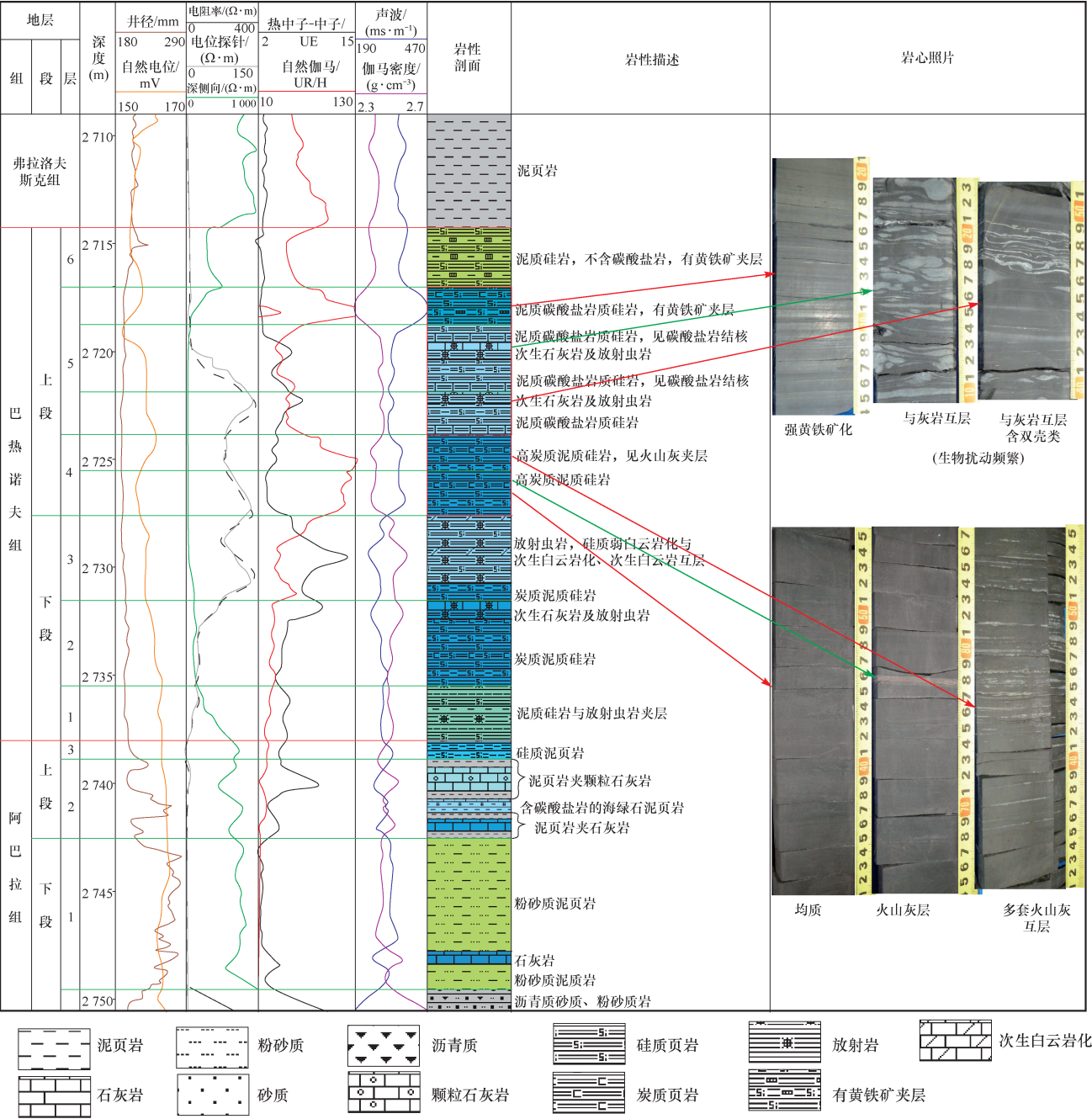


图 3 西西伯利亚盆地巴热诺夫组页岩上、下层段岩性及火山灰发育特征 (Nazeim 中部地区 219 井, 据 VNIGNI, 2016)

Fig. 3 Lithology and development characteristics of the upper and lower volcanic ash layers in the Bazhenov Formation, West Siberian Basin (Well 219 in central Nazeim, according to VNIGNI, 2016)

明显差异;显微薄片下火山灰夹层矿物成分可见明显的斜长石沸石颗粒,沸石化的斜长石和火山碎屑颗粒共存,自形且形状尖锐的石英颗粒与粘土矿物(一般为伊利石-蒙脱石)共存,偶见高岭石和白云母,黄铁矿颗粒常见精细分散状态。火山灰层段发育之下的1—3层岩性为均质的泥页岩,炭质-泥质硅岩与放射虫夹层、弱白云岩化与次生白云岩化,体现出气候变暖的特征;而在火山灰层段发育之上5层顶部和6层表现为高炭质泥质硅岩,见碳酸盐岩和次生石灰岩(图3)。

次生石灰岩一般由交代过程形成,发生去白云石化作用(Ca^{2+} 替代 Mg^{2+})。

测井曲线特征对比研究认为,巴热诺夫组火山灰密集发育的层段GR曲线整体特征基本相似,伽马正异常值的泥页岩层段值异常高,同时具有泥岩的自然电位低值、电阻率高值、声波时差高值等的特征(图3),且在火山灰发育层段之上富有机质页岩TOC高,且优质储层发育,多以叠层或互层显示,测试段产能高,可作为“甜点层”的指示标志。

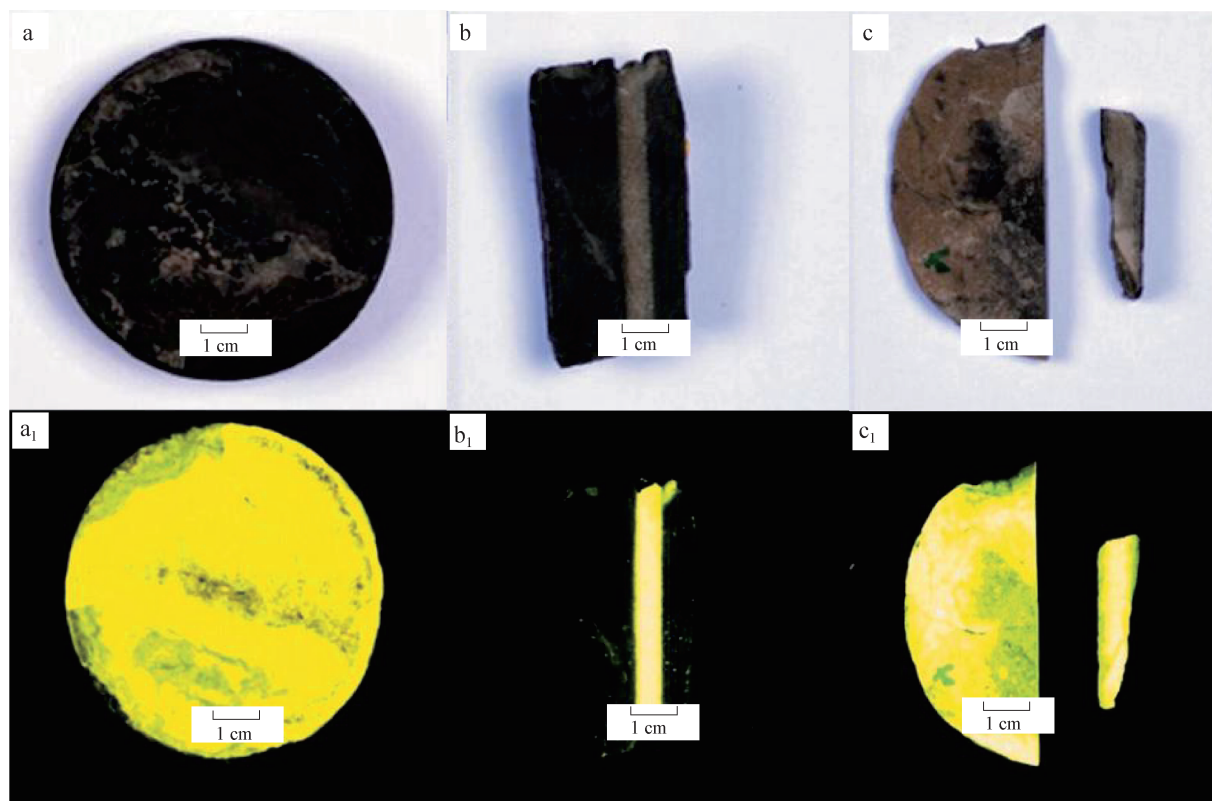


图4 西西伯利亚盆地中部汉特-曼西斯克地区巴热诺夫组火山灰岩心特征^[29]

Fig. 4 Core features of the volcanic ash in the Bazhenov Formation shale in the Khant-Mansique region of central West Siberia^[29]

a—c. 凝灰岩岩心照片; a₁—c₁. 凝灰岩岩心荧光下照片; a, a₁. Leklorsk 油田 L12 井, 埋深 3 186.52 m;

b, b₁. Toreshk 油田 T709 井, 埋深 2 726.93 m; c, c₁. Pokamasovsk 南部 UP66 井, 埋深 2 918.29 m

3 火山灰对巴热诺夫组优质页岩形成的作用机制

3.1 促进古生物的大量繁殖, 提高古生产力

藻类大量繁殖和勃发是富有机质页岩形成的物质基础。近年来, 火山灰促进生物繁殖甚至爆发已被多家机构论证, 如 Frogner 等 (2001)、Zhang 等 (2017) 和 Zeng (2018) 均论证了海洋中火山灰携带的铁、钼等营养元素有施肥的作用, 促进了自养和异养生物的生长以及大量繁殖, 提高了海洋的初级生产力^[34-36]。西西伯利亚盆地巴热诺夫组有机质全部由无定型的浮游和细菌类、胶状藻类物质组成, 干酪根占岩石总质量的 7%~8.5%^[23]。在岩心观察中, 巴热诺夫组普遍大量发育双壳类软体动物和其他底栖动物, 中部层段的硅质放射岩层富含放射虫, 与双壳介形虫互层, 海底生物扰动作用明显, 表现出强黄铁矿化 (图 3); 一般火山灰层段之下放射虫相对较少, 而在火山灰发育层段之上放射虫丰度高, 类型丰富多样, 多以 *Parvicingula cf. rosstrata*-*P. cf. seria* 为主, 壳饰发育, 放射针、刺大多为三片

形, 具海绵壳体, 部分放射虫岩或放射虫硅质岩中呈富集条带状保存或聚集式分布, 含量高达 90% (图 5)。另外, 富有机质页岩矿物成分测试表明, 磷灰质成分与其他海相火山灰发育地区的富有机质层段页岩中 (如东欧地台多玛尼克组、美国 Eagle-Ford 页岩等) 的含量具有一致性^[37], 达 417.85 g/t。磷是细胞膜和遗传物质的重要组成, 对水体植物生命代谢具有重要作用, 是生态系统初级生产力的重要限制因子。还原环境可以促进活性磷的活化、再生与循环^[38], 对沉积盆地生物的繁盛和有机质的富集具有积极的意义。巴热诺夫组火山灰发育层段的富有机质中营养元素浓度通常高于其他元素, 说明火山灰携带硅和磷等营养元素, 促进了海底生物的勃发。

另外, 巴热诺夫组富有机质页岩中也检测出异常浓度的 Ni, V, Mo, Cu, Zr, Cd, Ba, Sr, U 等指示深部流体的微量元素, 因此认为西西伯利亚盆地巴热诺夫组页岩形成时期存在周期性火山作用^[39-41]: 火山灰携带营养物质输入水体, 促进了生物的大量繁殖甚至爆发, 提高了初级生产力, 增加了有机质的丰度; 后期水体中氧浓度过度消耗, 形成缺氧环境从而引起水体中生物的

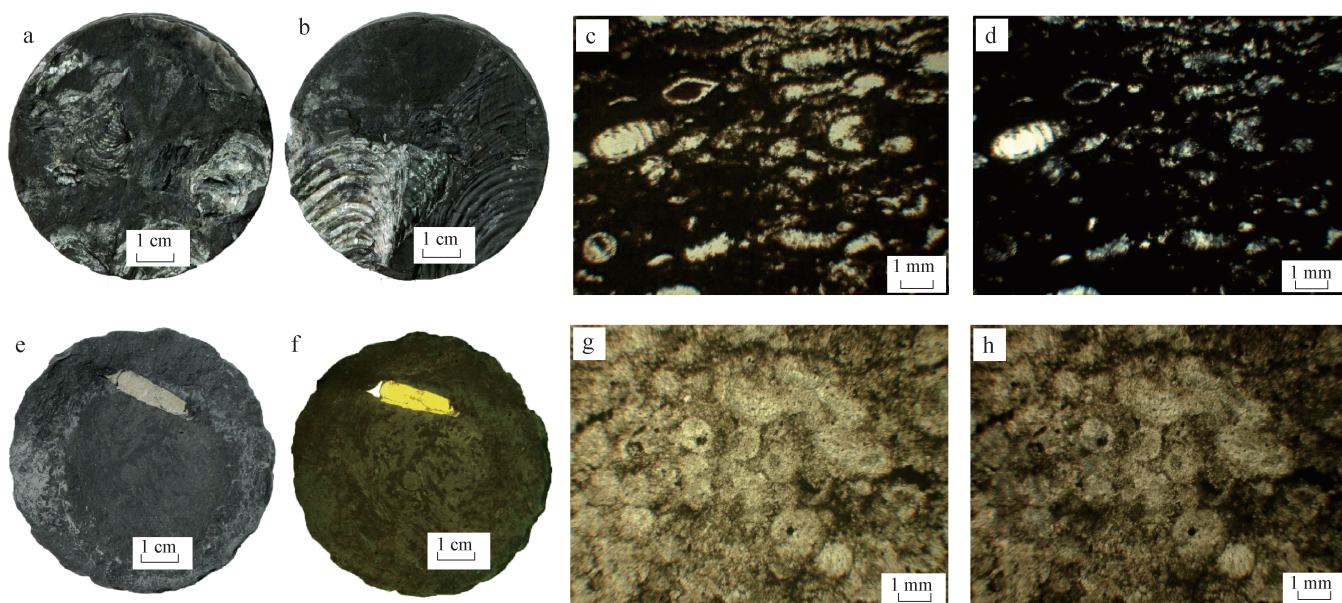


图5 西西伯利亚盆地中部汉特-曼斯克地区巴热诺夫组放射虫发育特征

Fig. 5 Characteristics of radiolarian growth in the Bazhenov Formation in the Khant-Mansique region of West Siberian Basin

a—d. 硅质放射岩,埋深 2 756.72 m; a, b. 岩石断面; c. 单偏光; d. 正交光; e—h. 灰质沥青质硅质放射岩,埋深 2 723.57 m; e, f. 岩石断面; f. 荧光照片; g. 单偏光; h. 正交光.^[43]

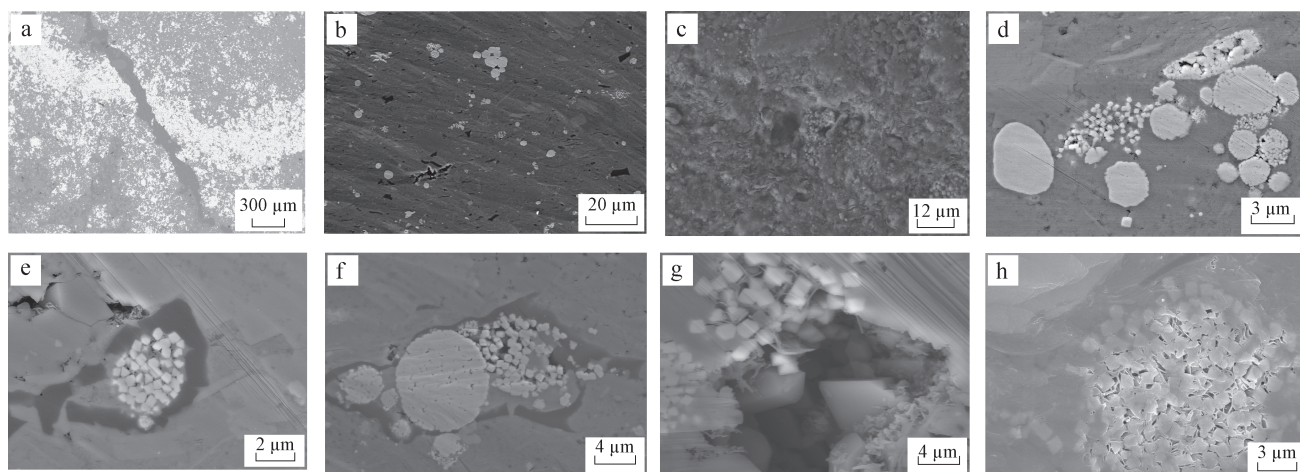


图6 西西伯利亚盆地汉特-曼斯克地区 611 井巴热诺夫组上段扫描电镜显微特征(埋深 2 359.23 m)

Fig. 6 SEM features of the upper member (at a burial depth of 2 359.23 m) of Bazhenov Formation in Well 611 in Hant-Mansik region, West Siberian Basin

a. 黄铁矿呈层分布并被断裂切割; b—d. 黄铁矿定向排列; e, f. 生物有机质包裹黄铁矿颗粒; g, h. 黄铁矿粒间和粒内孔隙发育

死亡,为富有机质烃源岩的快速形成、大量保存和有效埋藏提供了必要条件^[20,42]。

3.2 形成强还原的沉积环境,促进有富有机质埋藏

巴热诺夫组富有机质页岩存在黄铁矿化、硅化和炭化 3 种作用^[27,44],岩心观察显示巴热诺夫组火山灰发育层段之下岩性主要为炭质与钙质泥页岩互层,见硅质弱白云岩化与次生白云岩互层,黄铁矿发育程度不高,岩心上表现不明显,因此推测为弱氧化或者弱还

原环境;而在火山灰发育层段之上草莓状黄铁矿呈层大量发育(图 3)于硅质钙质泥页岩中,同时放射虫大量发育,见碳酸盐岩结核,体现海底生物扰动频繁。扫描电镜下黄铁矿以球形-椭球形集合体为主,直径 2~10 μm 不等,一般由大量等粒的微米-纳米级多面黄铁矿晶体聚集而成,晶内粒间孔隙发育,形状大小不一(图 6),部分黄铁矿颗粒被有机质包裹,体现了局部细菌的强还原作用;平面上以盆地沉积的中心部分最为明显,剖面上自下而上草莓状黄铁矿含量逐渐增加,

纹层中成层性较好,连续出现,Co/Ni 比值小于 1,S/Fe 比值偏高^[37],以正常沉积成因为主。这反映了密闭海底环境中藻类和细菌的大量勃发消耗水体中氧含量,使得水体由火山灰降落时期的弱氧化或还原环境向强还原环境转变,因此减少了有机质氧化和降解,促进了有机质的有效保存和埋藏。

3.3 火山灰携带催化元素促进有机质生烃演化

火山灰形成前后一般伴随岩浆活动及热液喷发,除了携带大量的高温、高压地幔热液以及 Fe,Cu,Zn,Ag 等多种金属元素,也携带了典型促进烃源岩生烃热演化的微量催化元素如 Se,Zr,Ti,V,Co,Mn,Ni,Mo,U 等^[15-17]。过渡金属氧化物在不同酸碱性条件下大都有半导性、酸碱性和氧化还原性等催化活性。研究表明,过渡金属元素中催化性能最强的是镍元素,烃源岩中含量有 1×10^{-6} 的镍就能显示出很强的催化力,可吸附气体和有机质,导致其 C-C 键、C-S 键、C-O 键断裂,从而达到催化目的^[45];实验表明 Mo,Se,Zr 可明显促进饱和芳香烃降解^[46];另外过渡金属的单质、氧化物、硫化物及其他有机化合物都具有显著的催化作用,在炼油厂的裂解和化工上均有广泛

应用^[45]。

巴热诺夫组页岩平面上火山灰发育井区与邻近区相比,有机质成熟度适中, R_o 偏分布于生油高峰带(0.7%~1.1%)(图 2),说明有机质中干酪根处于热催化生油阶段。同时,前人研究也表明,该区生烃潜力高,TOC 含量多高于 7%(图 2),地球化学显示轻烃组分 S_1 一般大于 6 mg/g^[47]。巴热诺夫组富有机质页岩火山灰夹层层段与不发育火山灰层段相比,多种催化元素含量明显升高,如 Ni,Mo,U 等(图 7)。前人研究表明^[30],在沉积盆地中心的 M 地区,Ach,Rag,Mah 等区块测试巴热诺夫组 Ce,Cd,V 的含量明显高于同层段的浅水陆棚区,同时硅质放射岩中发现有火山灰,元素测试其中 Ni 的百分含量约 97~170 g/t,其他元素如 Mo 介于 10~46 g/t,Cr 位于 118~160 g/t,Cd 位于 4.0~44 g/t,Mn 达 1390 g/t。可见火山灰携带的催化元素的加入在富有机质页岩埋藏生烃过程中对烃源岩生烃演化具有重要的促进作用。一方面催化元素可改变周围地区的化学场,加速干酪根的生烃速度,缩短反应时间,另一方面可改变不同的反应机理,进而促进了有机质的成烃和演化,加速油气的形成。

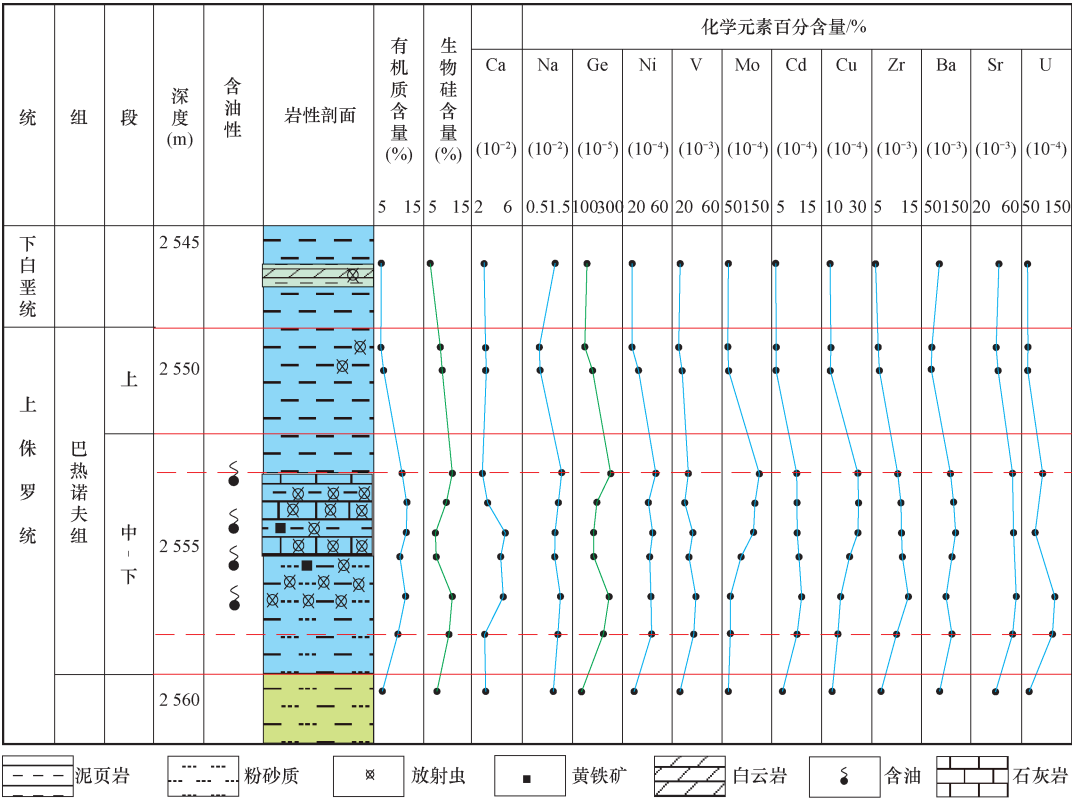


图7 西西伯利亚盆地 M 区 1-P 井巴热诺夫组岩性-地球化学特征 (Predtechenskaya,2016)
Fig.7 Lithologic-geochemical characteristics of the Bazhenov Formation in Well 1-P in the M district of the West Siberian Basin(Predtechenskaya,2016)

3.4 火山灰发育层段利于发育富有机质交互纹层

富有机质页岩优质储层中常见有机质纹层与碳酸盐岩纹层互层^[8,22,48]。浮游藻类包括硅藻、颗石藻和沟鞭藻等,其分布广泛且生长具有季节性,特定条件和时期的生成和富集具有很强的排他性。在温暖潮湿的还原环境下,火山灰中营养元素的加入使水体中浮游生物大量繁殖甚至勃发,浮游植物中藻类数量在短时间内快速增多,死亡沉降之后大量有机质聚集,形成有机质纹层;同时,大量的藻类勃发使光合作用加强,消耗掉透光层中的 CO_2 ,使得 CaCO_3 达到过饱和而结晶析出,形成碳酸盐岩沉积纹层。如此多期的火山灰反复加入造成了火山灰层、碳酸盐岩沉积纹层与有机质纹层的交互沉积。巴热诺夫组的富有机质页岩全盆地大面积分布,属于海侵时期的深海陆棚相。火山灰发育层段剖面上位于巴热诺夫组中上层,平面上主要位于盆地的沉积中心区。在已经发现火山灰的井岩心观察中,该层段交互纹层都非常发育,主要由厘米级灰褐色火山灰薄层、黑色的富含有机质纹层和白色钙质纹层组成,富有机质纹层中藻类丰富,见丝网状体,呈连续水平状,钙质纹层为微晶方解石,厚度比富有机质纹层稍大,钙质结核中黄铁矿发育(图8)。火山灰的降

落本身为沉积盆地提供直接物质基础,加之藻类勃发形成富有机质纹层与碳酸盐岩纹层交互沉积,有利于发育层间孔缝,形成页岩油气运移的重要通道,提高富有机质页岩层段的物性;同时,碳酸盐岩纹层的存在增强了地层的脆性,有利于页岩层的压裂改造^[49]。

4 结论

1) 西西伯利亚盆地巴热诺夫组富有机质页岩中发育火山灰沉积,平面上火山灰发育井区 *TOC* 多大于 7%,成熟度介于 0.7% ~ 1.1%;单井剖面上火山灰与页岩的互层具有自然电位和自然伽马值正异常、电阻率低值、声波时差高值的特征;镜下薄片火山灰蚀变矿物沸石发育,指示火山活动的化学元素如 Ge, Co, Ni, Mn 等含量异常,且整体火山灰发育层段之上的页岩中放射虫丰度高于火山灰发育层段之下的页岩。

2) 巴热诺夫组火山灰的发育与优质页岩的形成存在一定的关系:火山灰可促进巴热诺夫页岩形成时期古生物的大量繁殖,在消耗营养物质之后又大量死亡,为烃的形成奠定了物质基础;火山灰沉积后期形成强还原的沉积环境促进富有机质保存埋藏,其携带的具有催化作用的微量元素加速了烃源岩成烃演化过程。

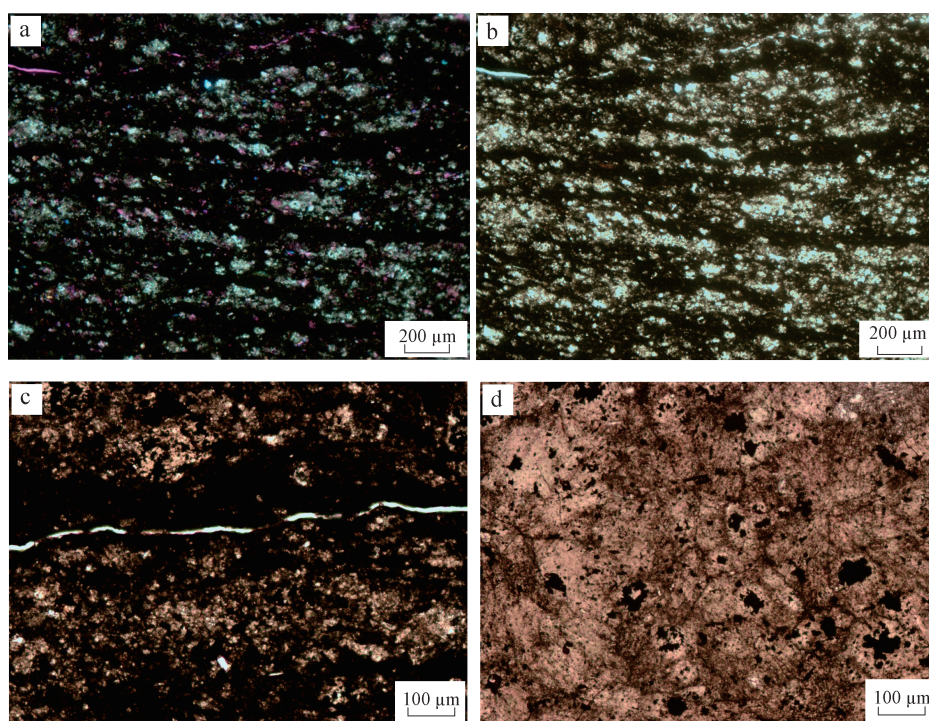


图8 西西伯利亚盆地汉特-曼西斯克地区611井巴热诺夫组岩心薄片镜下特征(埋深2 359.23 m)

Fig. 8 Microscopic images of thin sections (at a burial depth of 2 359.23 m) from the Bazhenov Formation in Well 611 in the Hant-Mansik region, West Siberian Basin
a, b. 有机质与泥页岩纹层; c. 纹层间缝; d. 钙质结核内黄铁矿

同时,火山灰在促进藻类勃发过程中消耗掉大量 CO_2 并析出 CaCO_3 结晶,形成泥页岩交互纹层,利于页岩油气运移并提高地层的脆性。

3) 尽管巴热诺夫组火山灰及其伴生作用可促进富有机质形成和成烃演化,但火山灰主要由快速沉降期的构造运动引起,盆地内火山灰来源和分布模式有待判定,火山灰对富有机质纹层状泥页岩的成源-成储的作用时间范围和影响规模仍不明确。因此,未来研究不仅应考虑构造和沉积的共同作用,同时还需考虑沉积环境对火山灰后期蚀变作用进而对排烃和压裂的影响,以应用于后期开发。

致谢:感谢俄罗斯秋明国有地下资源合理利用分析研究中心和喀山大学地质与石油技术学院提供数据资料和样品,感谢审稿专家对本文的审核并提出的建设性意见。

参 考 文 献

- [1] White J D L, Houghton B F. Primary volcanoclastic rocks[J]. *Geology*, 2006, 34: 677 – 680.
- [2] Lowe D J. Tephrochronology and its application[J]. *A review Quat Geochronol*, 2011, 6: 107 – 153.
- [3] 刘嘉麒, 孙春青, 游海寿. 全球火山灰年代学研究概述[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48: 1 – 29.
Liu J Q, Sun C Q, You H T. An overview of global tephrochronology[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2018, 48: 1 – 29.
- [4] 朱筱敏. 沉积岩石学(第四版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
Zhu Xiaomin. *Sedimentary petrology* (4th edition)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [5] Batchelor R A. Geochemistry of biotite in metabentonites as an age discriminant, indicator of regional magma sources and potential correlating tool[J]. *Mineralogical Magazine*, 2003, 67(4): 807 – 817.
- [6] Li Denghua, Li Jianzhong, Huang Jinliang, et al. An important role of volcanic ash in the formation of shale plays and its inspiration[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(5): 56 – 65.
- [7] 吴蓝宇, 陆永潮, 蒋恕, 等. 上扬子区奥陶系五峰组-志留系龙马溪组沉积期火山活动对页岩有机质富集程度的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 806 – 816.
Wu Lanyu, Lu Yongchao, Jiang Shu, et al. Effects of volcanic activities in Ordovician Wufeng-Silurian Longmaxi period on organic-rich shale in the Upper Yangtze area, South China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 806 – 816.
- [8] Zou Caineng, Zhu Rukai, Chen Zhongqiang, et al. Organic-matter-rich shales of China[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 189: 51 – 78.
- [9] Gao Ping, He Zhiliang, Li Shuangjian, et al. Volcanic and hydrothermal activities recorded in phosphate nodules from the Lower Cambrian Niutitang Formation black shales in South China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 505: 381 – 397.
- [10] 刘佳宜, 刘全有, 朱东亚等. 深部流体在富有机质烃源岩形成中的作用[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(2): 168 – 177.
Liu Jiayi, Liu Quanyou, Zhu Dongya, et al. The role of deep fluid in the formation of organic-rich source rocks[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(2): 168 – 177.
- [11] 刘全有, 朱东亚, 孟庆强, 等. 深部流体及有机-无机相互作用下油气形成的基本内涵[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(3): 499 – 520.
Liu Quanyou, Zhu Dongya, Meng Qingqiang, et al. The scientific connotation of oil and gas formations under deep fluids and organic-inorganic interaction[J]. *Science China(Earth Sciences)*, 2019, 49(3): 507 – 528.
- [12] Hong Hanlie, Algeo Thomas J, Fang Qian, et al. Facies dependence of the mineralogy and geochemistry of altered volcanic ash beds: An example from Permian-Triassic transition strata in southwestern China[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 190: 58 – 88.
- [13] Liu Quanyou, Zhu Dongya, Jin Zhijun, et al. Influence of volcanic activities on redox chemistry changes linked to the enhancement of the ancient Sinian source rocks in the Yangtze craton[J]. *Precambrian Research*, 2019, 327: 1 – 13.
- [14] Liao Zhiwei, Hu Wenxuan, Cao Jian, et al. Heterogeneous volcanism across the Permian-Triassic Boundary in South China and implications for the Latest Permian Mass Extinction: New evidence from volcanic ash layers in the Lower Yangtze Region[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 127: 197 – 210.
- [15] Little C T S, Herrington R J, Mas. V V, et al. Silurian hydrothermal vent community from the Southern Urals, Russia[J]. *Nature*, 1997, 385: 146 – 148.
- [16] Verati C, Donatode P, Prieur D, et al. Evidence of bacterial activity from micrometer-scale layer analyses of black smoker sulfide structures[J]. *Chemical Geology*, 1999, 158: 257 – 269.
- [17] Rasmussen B. Filamentous microfossils in a 3235 Ma old volcanogenic massive sulphide deposit[J]. *Nature*, 2000, 405: 676 – 679.
- [18] Dick G J, Anantharaman K, Baker B J, et al. The microbiology of deep-sea hydrothermal vent plumes: Ecological and biogeographic linkages to seafloor and water column habitats[J]. *Front Microbiol*, 2013, 4: 124.
- [19] Zhang Laiming, Wang Chengshan, Wignall P B, et al. Deccan volcanism caused coupled pCO_2 and terrestrial temperature rises, and pre-impact extinctions in northern China[J]. *Geology*, 2018, 46(3): 271 – 274.
- [20] Lee Cin-Ty A, Jiang Hehe, Ronay Elli, et al. Volcanic ash as a driver of enhanced organic carbon burial in the Cretaceous[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1 – 9.
- [21] Schimmelmann A, Mastalerz M, Gao L, et al. Dike intrusions into bituminous coal, Illinois Basin; H, C, N, O isotopic responses to rapid and brief heating[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(20): 6264 – 6281.
- [22] 李登华, 李建忠, 黄金亮, 等. 火山灰对页岩油气成藏的重要作用及其启示[J]. *天然气工业*, 2014, 34(5): 56 – 65.
Li Denghua, Li Jianzhong, Huang Jinliang, et al. An important role of volcanic ash in the formation of shale plays and its inspiration[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(5): 56 – 65.
- [23] 金之钧, 王志欣. 西西伯利亚盆地油气地质特征[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007: 84 – 91.
Jin Zhijun, Wang Zhixin. *Oil & gas geological characteristics of West Siberia Basin*[M]. Beijing: Sinopec Press, 2007: 84 – 91.
- [24] 朱伟林, 王志欣, 宫少波, 等. 国外含油气盆地丛书: 俄罗斯含油气盆地[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
Zhu Weilin, Wang Zhixin, Gong Shaobo, et al. *Foreign oil and gas basin series: oil and gas basin of Russia*[M]. Beijing: Science Press,

- 2012.
- [25] Fomin A N. Thermal maturity of uppermost Middle Jurassic sediments in the West Siberian basin [J]. Russian Geology and Geophysics, 2017, 58: 443–450.
- [26] Kontorovich A E, Ponomareva E V, Burshtein L M. Distribution of organic matter in rocks of the Bazhenov horizon (West Siberia) [J]. Russian Geology and Geophysics, 2018, 59: 285–298.
- [27] Shal'dybin M V, Lopushnyak Y M, Goncharov I V, et al. The mineralogy of the clayey-silty siliceous rocks in the Bazhenov Shale Formation (Upper Jurassic) in the West Siberian Basin, Russia: The role of diagenesis and possible implications for their exploitation as an unconventional hydrocarbon reservoir [J]. Applied Clay Science, 2017, 136: 75–89.
- [28] 肖异凡. 二叠纪放射虫生物地层划分及古生态的统计学研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- Xiao Yifan. Statistical study on biostratigraphic division and paleoecology of Permian radiolarians [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- [29] 张宁. 广西板城晚泥盆世—早石炭世硅质岩系放射虫演化及其对全球事件的响应 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2004.
- Zhang Ning. Evolution of radiolarian from late Devonian to early Carboniferous siliceous rocks in Bancheng, Guangxi and its response to global events [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2004.
- [30] Предтеченская Е. А., Малюшко Л. Д. Геохимические особенности и факторные модели баженовской свиты в центральных и юго-восточных районах Западно-сибирской плиты [J]. Известия вузов. Геология и разведка. 2016, 4: 23–36.
- [31] Булатов Т. Д., Оксенойд Е. Е., Семечкова Л. В. и др. Туфогенные прослои в отложениях баженовской свиты в центральной части Западной Сибири [R]. Сборник «Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО». Двадцать первая научно-практическая конференция. Т. 2, стр. 189–198. Ханты-Мансийск, ООО «Издательство НаукаСервис». 2018 г.
- [32] Волков В. А., Олейник Е. В., Оксенойд Е. Е. и др. Строение и генерационный потенциал баженовской свиты на территории центральной части Западной Сибири [J]. Геология и минеральные ресурсы Сибири, 2016, 3 (27): 79–98.
- [33] Панченко И В, Камзолкин В А, Латышев А В. и др. Туфы и туффиты в баженовской горизонте (Западная Сибирь) [R]. Эволюция осадочных процессов в истории Земли: материалы 8-го Всероссийского литологического совещания, Москва, 27–30 октября 2015 г.
- [34] Frogner P, Gíslason S R, O'skarsson N. Fertilizing potential of volcanic ash in ocean surface water [J]. Geological Society of America. Geology, 2001, 29: 487–490.
- [35] Zhang R, Jiang T, Tian Y, et al. Volcanic ash stimulates growth of marine autotrophic and heterotrophic microorganisms. Geology [J], 2017, 45: 479–682.
- [36] Zeng Z, Pike M, Tice M M, et al. Iron fertilization of primary productivity by volcanic ash in the Late Cretaceous (Cenomanian) Western Interior Seaway [J]. Geology, 2018, 46: 859–862.
- [37] Zanin Yuri N, Eder Vika G, Zamirailova Al'bina G, et al. Models of the REE distribution in the black shale Bazhenov Formation of the West Siberian marine basin, Russia [J]. Chemie der Erde, 2010, 70: 363–376.
- [38] Philippe, Van, Cappellen, et al. Benthic phosphorus regeneration, net primary production, and ocean anoxia: A model of the coupled marine biogeochemical cycles of carbon and phosphorus [J]. Paleoceanography, 2010, 9 (5).
- [39] Брадучан Ю В, Гольберт А В, Гулари Ф Г и др. Баженовский горизонт Западной Сибири [J]. Тр. ИГиГ СОАН СССР. В. 649. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1986. 216 с.
- [40] Гулари Ф Г, Вайц Э Я, Меленевский В Н и др. Условия формирования и методика поисков залежей нефти в аргиллитах баженовской свиты. М.: Недра, 1988. 197 с.
- [41] Гулари Ф Г, Кроль Л А, Перозин Г Н и др. Баженовская свита: седиментационная модель, палеоэкологическая обстановка. Среда и жизнь в геологическом прошлом: Матер. Всерос. Симпозиума [J]. Новосибирск: НИЦ ОИГТМ СО РАН, 2000. С. 32–33.
- [42] Амон Э О. Радиоларии в баженовской свите (волжский ярус) Широкого Приобья, Западная Сибирь [J]. ЕЖЕГОДНИК – 2010, Тр. ИГГ УрО РАН, вып. 158, 2011, с. 3–8.
- [43] 梁新平, 金之钧, Alexander Shpilman, 等. 俄罗斯页岩油地质特征及勘探开发进展, 石油与天然气地质, 2019, 40 (3): 478–490, 503.
- Liang Xinping, Jin Zhijun, Shpilman Alexander, et al. Geological characteristics and latest progress in exploration and development of Russian shale oil [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40 (3): 478–490, 503.
- [44] Shal'dybin M V, Wilson M J, Wilson L, et al. The nature, origin and significance of luminescent layers in the Bazhenov Shale Formation of West Siberia, Russia [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 100: 358–375.
- [45] 翟庆龙. 火山热液活动对烃源岩生排烃的作用—以东营凹陷西部沙三段为例 [J]. 油气地质与采收率, 2003, 10 (3): 19–21 + 3.
- Zhai Qinglong. Effect of volcanic hydrothermal fluid activities on hydrocarbon generation and expulsion from source rocks-taking Es³ of the western Dongying sag as example [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10 (3): 11–13.
- [46] 卢红选, 孟自芳, 李斌, 等. 微量元素对褐煤有机质热解成烃的影响 [J]. 油气地质与采收率, 2008, 15 (2): 64–66 + 115.
- Lu Hongxuan, Meng Zifang, Li Bin et al. Effects of trace elements on pyrogenic hydrocarbon generation of lignite [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15 (2): 64–66 + 115.
- [47] Немова В. Д., Панченко И. В. Факторы продуктивности Баженовского горизонта во Фроловской метавпадине [J]. Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2017, 12 (4): 6.
- [48] 石巨业, 金之钧, 刘全有, 等. 基于米兰科维奇理论的湖相细粒沉积岩高频层序定量划分 [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40 (6): 1205–1214.
- Shi Juye, Jin Zhijun, Liu Quanyou, et al. Quantitative classification of high-frequency sequences in fine-grained lacustrine sedimentary rocks based on Milankovitch theory [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40 (6): 1205–1214.
- [49] 金之钧, 白振瑞, 高波, 等. 中国迎来页岩油气革命了吗? [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40 (3): 451–458.
- Jin Zhijun, Bai Zhenrui, Gaobo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution? [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40 (3): 451–458.