

文章编号: 0253-9985(2007)03-0337-08

南里海盆地泥火山构造及其对油气成藏的影响

段海岗^{1,2}, 陈开远¹, 史卜庆²

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国石油天然气勘探开发公司 海外研究中心, 北京 100083)

摘要: 泥火山构造在地震相上为不连续、弱振幅的空白反射或杂乱反射, 呈柱状与围岩不整合接触。其分布规律受盆地应力场和构造活动带的控制, 在盆地边缘山前冲断带泥火山最发育, 盆地中心发育较少, 同一构造带上泥火山沿主断层和背斜发育带走向呈串珠状分布。泥火山构造具有幕式活动的特点, 并在浅层伴生放射状正断层和塌陷补偿构造。按照泥火山构造成因和构造特征可以划分为背斜型、走滑断层型和逆冲断层型 3 种。区域地质背景、挤压走滑应力场下的构造活动、快速而具有特色的沉积地层和地层超压环境是该地区泥火山构造形成的主要原因。泥火山构造对油气生成、运移、聚集、保存和破坏以及构造圈闭形成、储集层发育有不同程度的影响。

关键词: 泥火山; 构造特征; 构造类型; 形成机制; 快速沉积; 油气成藏; 南里海盆地

中图分类号: TE112.3 **文献标识码:** A

Mud volcano structure in South Caspian Basin and its impact upon hydrocarbon accumulation

Duan Haigang^{1,2}, Chen Kaiyuan¹, Shi Buqing²

(1. China University of Geosciences Beijing 100083; 2. CNODC Overseas Research Center, CNPC, Beijing 100083)

Abstract Mud volcano structures appear as discontinuous blank to chaotic reflections with weak amplitudes in seismic facies and are in columnar uncomfortable contact with adjacent rocks. Controlled by stress field and tectonic active belt of the basin, the mud structures are better developed in the piedmont thrust belt on the basin margin in the center of subsidence. In the same structural belt, mud volcanoes occur in patemoster distribution along trend of the major fault and anticlinal zone. Mud volcano structures are characterized by episodic eruption with radial normal faults and slump structures developed in shallow layers. The volcano structures can be classified into anticlinal, strike-slip fault, and thrust types according to their origins and characteristics. Geological background, tectonic activity in compressional strike-slip stress field, rapid sedimentation and abnormal formation pressure are the major reason behind the formation of mud volcano structures. The mud volcano structures exert influences over the hydrocarbon generation, migration, accumulation, preservation, and destruction as well as trap formation and development of reservoirs.

Key words mud volcano; structural feature; structural type; forming mechanism; rapid sedimentation; hydrocarbon accumulation; South Caspian basin

泥火山构造是沉积地层中的塑性泥岩喷发而形成的独特地质现象。由于泥火山和泥岩底辟活动带动了流体和塑性岩体的流动与转移, 因此泥火山往往被认为是岩石和流体流动、扩散和聚集的指示剂, 对油气成藏有明显的影响和控制作用。

南里海盆地是世界上泥火山最发育的地区之一, 地球上已知 700 多座泥火山中至少一半分布于南里海盆地。本文从区域地质资料出发, 利用中国石油在阿塞拜疆两个区块的地质、地球物理资料, 对南里海盆地库拉坳陷的泥火山构造特征、类型、

成因以及对油气成藏的影响进行了分析和探讨。

1 地质特征

南里海盆地是一个从格鲁吉亚西部穿过阿塞拜疆、南里海和伊朗北部地区延伸至土库曼斯坦西部的细长的前陆盆地, 面积 $28 \times 10^4 \text{ km}^2$, 包括库拉、西土库曼和南里海深海 3 个坳陷。库拉坳陷位于阿塞拜疆陆上, 包括 NW 走向的多个凹陷、地堑和隆起带。其中, 下库拉凹陷、古布斯坦-阿普歇伦地堑、阿普歇伦-普里巴尔汉隆起带位于下库拉-南里海西岸, 是阿塞拜疆最著名的油气区, 也是世界上最早的油气区之一^[1]。中国石油两个区块分别处于下库拉凹陷和古布斯坦-阿普歇伦地堑, 相距约 40 km, 是泥火山最发育的地区之一。

南里海盆地是一个中、新生代发育起来的弧后裂谷-前陆复合盆地^[2]。中生代处于古特提斯海构造域的东部南缘, 主要发育弧后扩张盆地。新生代以前陆盆地为特征。古近纪早期, 盆地受阿尔卑斯挤压运动的影响, 本区表现为阿尔卑斯褶皱带中的一个复向斜, 南北为大小高加索山脉环抱, 古伏尔加、库拉河等携带沉积物快速不断地注入下库拉和南里海地区, 以前缘浅水和三角洲沉积为主。上新世, 十分快速的古伏尔加、库拉河沉积和构造活动把里海和黑海分离, 形成封闭海, 接受周围古河流沉积并逐渐退缩。上新世末, 大型挤压走滑变形发育, 形成了多个 NW-SE 向背斜构造带, 并被走滑断层、逆冲断层及其伴生发育的泥火山喷发强烈破坏。

在沉积地层上, 库拉坳陷从下向上沉积了侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系地层。中生界沉积地层厚度约 10 km, 新生界沉积地层一般超过 10 km, 南里海盆地沉降中心最大沉积地层厚度可达 25~30 km。古近系、新近系是研究区主要的目的层系, 为滨浅海和三角洲碎屑岩沉积。古近系地层厚度 1 700~3 000 m 左右, 岩性主要为块状泥岩夹薄层砂岩和泥灰岩。其中渐新统和中新统下部 Maytop 组地层是泥火山的主要来源, 在古布斯坦地区厚 1 000~3 000 m, 下段基本为纯暗色泥岩, 泥质含量一般 95%。新近系地层厚度 4 500~5 500 m 左右, 下段以砂质泥岩为主, 上段

多为浅水厚层砂岩沉积夹泥岩和介壳灰岩。第四系最大厚度超过 1 500 m。下部为介壳灰岩和碎屑灰岩、砂质泥岩夹薄层细粒砂岩互层。中部为泥土夹薄层砂岩组成的浅海相沉积。上部为介壳、软泥和粗粒砂、砾石组成的现代沉积(图 1)。

受前陆盆地古构造环境的控制, 古近纪、新近纪具有沉积速度快、地层厚度大、岩石疏松、胶结作用差、下部塑性泥岩发育等显著特点。例如, 作为该盆地主要产层的上新统地层厚度达 3 000~5 000 m, 但沉积时间约 $280 \times 10^4 \text{ a}$ 沉积速率最大可达 $1 800 \text{ m Ma}^{[3]}$ 。在这种构造地质背景和快速沉积、巨厚沉积条件下, 十分利于泥火山和泥岩底辟构造的发育。

2 泥火山构造特征和类型

南里海盆地泥火山广泛分布于下库拉凹陷、古布斯坦-阿普歇伦地堑、阿普歇伦-普里巴尔汉隆起带、北阿普歇伦隆起带和南里海深海次盆等快速沉积地区, 开始活动于更新世, 晚第四系时期最活跃, 近现代仍时有泥火山活动。如处于古布斯坦区块南部的 Dashgil 泥火山, 是阿塞拜疆东部活动的泥火山之一, 据记载 1882、1902、1908、1926 和 1958 年曾经喷发^[4]。泥火山构造是由地下经构造活动带延伸至地表的特殊构造现象, 有地面喷出物堆积和地下构造两方面的特征。

2.1 地表发育特点

泥火山喷出物成分有固体、流体和气体。固体成分主要是渐新统一中新统喷出形成的角砾岩, 包含了约 90 种矿物和 30 种微量元素。气体成分包括烃类、 CO_2 、 N_2 和其他成分, 其中甲烷一般可以达到 99%。地化分析结果表明, 气体主要来自 Maytop 组烃源岩, 其携带烃类气体向浅层运移并在上新统聚集, 部分泄露至地表。流体成分主要为地层水和少量油膜, 地层水盐度和微量元素 (I B, Br) 表明来自泥火山的水和油气田地层水性质基本一致^[4]。

地表泥火山构造分布明显受构造活动带的控制, 沿主断层和背斜发育带走向呈串珠状分布。泥火山地表角砾岩的分布也相应受构造控制, 在

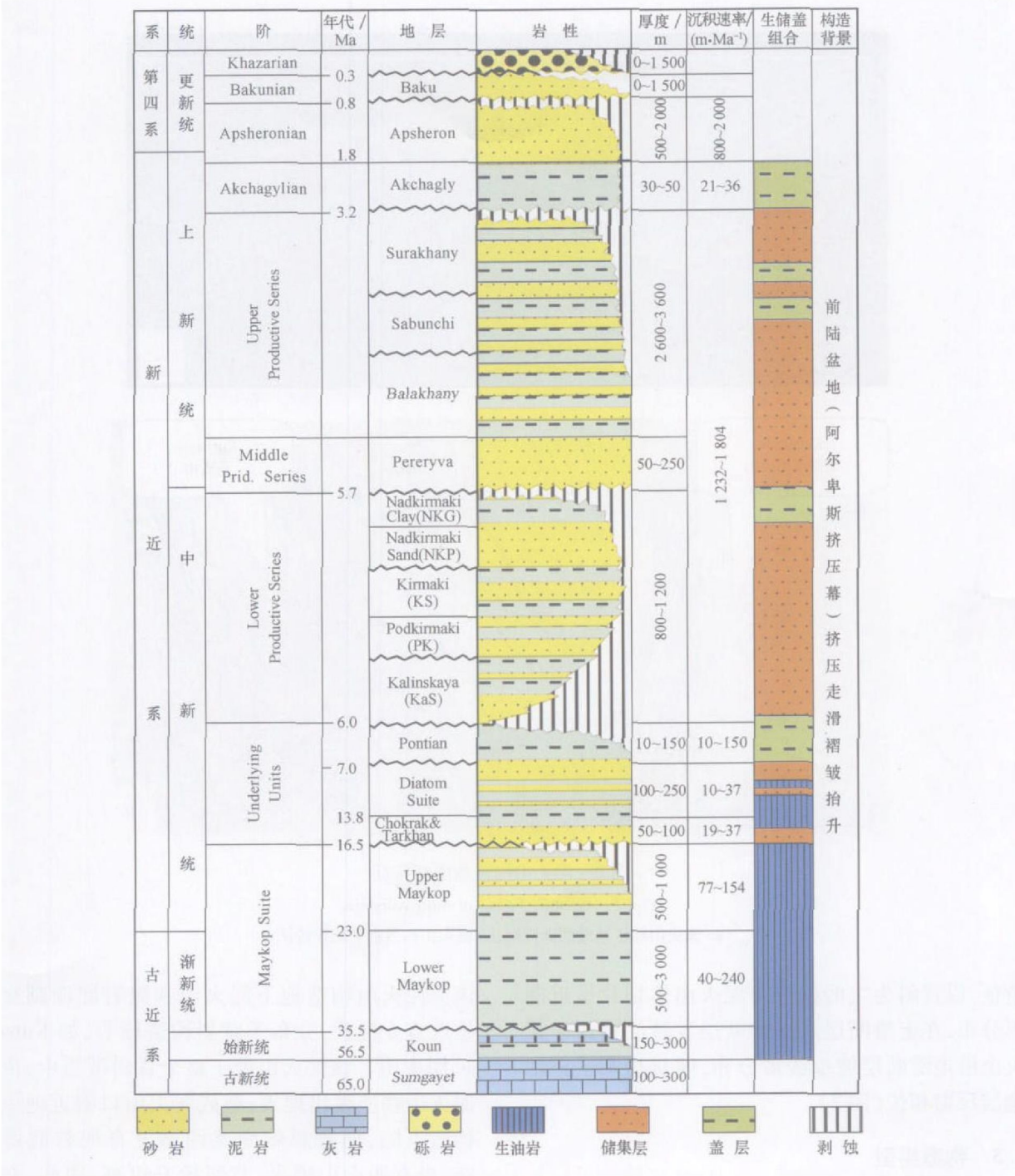


图 1 库拉坳陷地层综合柱状图

Fig. 1 Stratigraphic column of Kula sub-basin

以背斜为主的构造带中, 泥火山角砾岩呈圆锥形分布于泥火山喷出口, 在火山口处形成火山坑, 如 Kursenge 泥火山。在走滑断层和逆冲断层发育的断背斜构造带中, 泥火山角砾岩沿构造走向优势展布。如 Dashgil 泥火山受东西向穹状的背斜构造及其主控逆冲断层控制, 在地表呈东西向席状展布, 火山角砾岩分布面积超过 $470 \times 100 \text{ m}^2$ 。

2.2 构造地震相特征

在地震剖面上泥火山和泥岩底辟构造表现为不连续、弱振幅的空白反射, 或杂乱发射, 常呈柱状刺穿地层到地表。泥火山刺穿柱体和围岩明显呈不整合关系, 泥火山周围有层位上拉现象。在水平切片上泥火山表现为不连续杂乱或空白反射

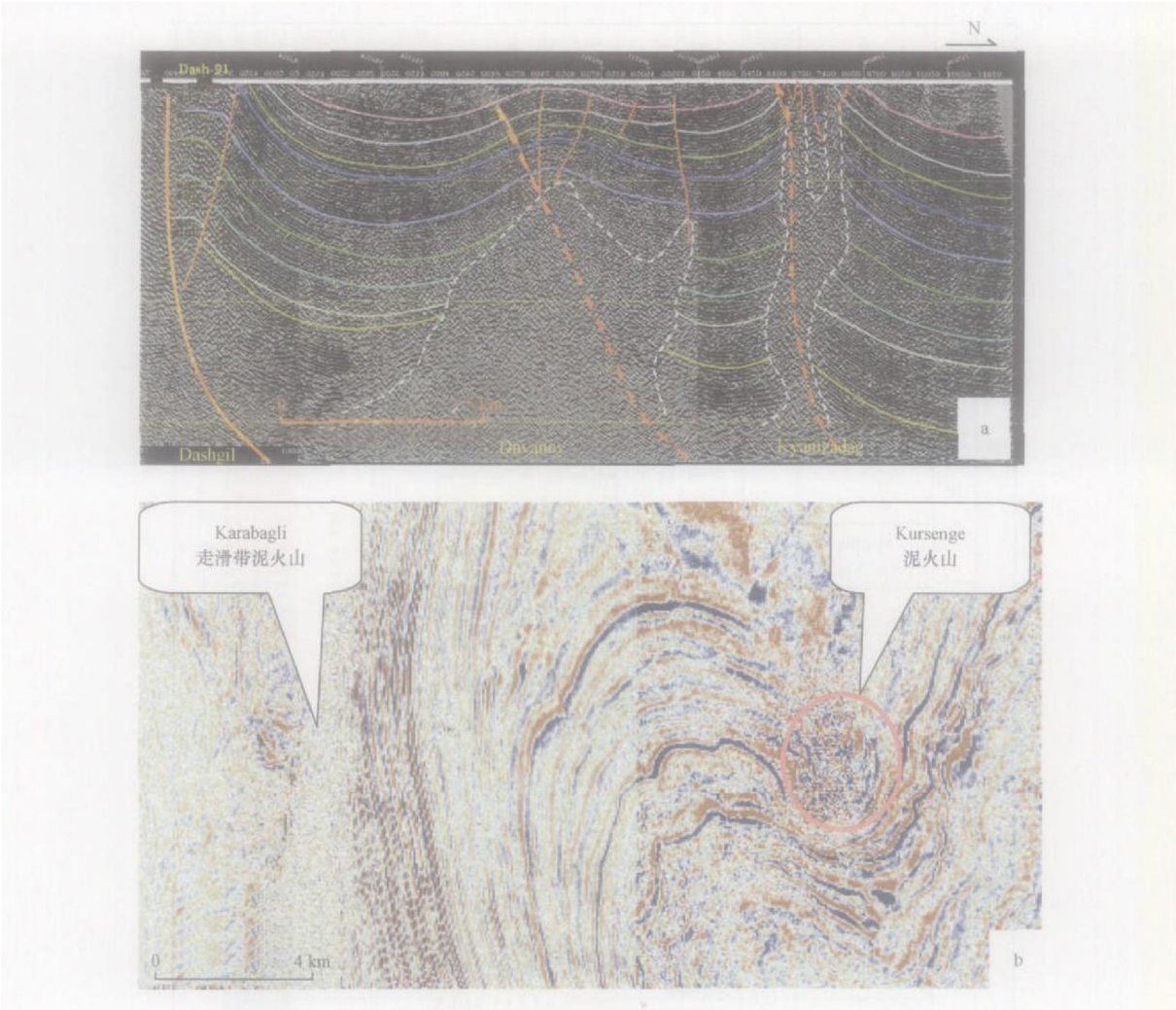


图 2 泥火山构造地震相特征

Fig. 2 Seismic facies of mud volcanoes

a. 泥火山构造地震剖面特征; b. 泥火山构造水平切片特征

特征,以背斜为主的构造中泥火山体切片呈近圆形分布,在走滑断层或逆冲断层发育的构造中泥火山沿走滑断层缝呈线形分布,明显切割了正常地层反射相位(图 2)。

2.3 构造类型

背斜构造、逆冲断层和走滑断层等构造活动是诱发泥火山形成的主要条件,相应产生的泥火山则具有不同的构造表现特征。依据其形成的诱发因素可以将泥火山划分为背斜型、逆冲断层型和走滑断层型泥火山。由于研究区不同构造单元承受的应力强度具有差异,因此泥火山在不同地区具有不同的构造类型。

背斜型泥火山主要为背斜隆起引发的泥火山构造,近盆地中心分布,高加索山前地区较少。

该类泥火山构造地下泥火山和泥岩底辟刺穿体呈近直立柱状,分布于背斜构造核心,如 Kursenge 泥火山。该泥火山处于整个背斜带当中,由于泥火山物质喷出地表,造成泥火山口附近地层和构造下陷,而背斜带南北两端发育泥岩底辟构造,没有泥火山喷出,背斜抬升更高,因此,在泥火山附近形成整个背斜带的鞍部,而在 Kursenge 泥火山南北形成断背斜构造。Kursenge 南、北背斜构造受深层泥岩底辟隆起抬升的影响,在浅层形成了许多放射状横向次级正断层,在背斜背景下组合成各类断块,是油气聚集的有利场所(图 3)。

走滑断层引发的泥火山也是近盆地中心分布,受陡峭的走滑断层面控制,平面上沿断层面呈线形分布,剖面上呈一个个不连续的柱体。如

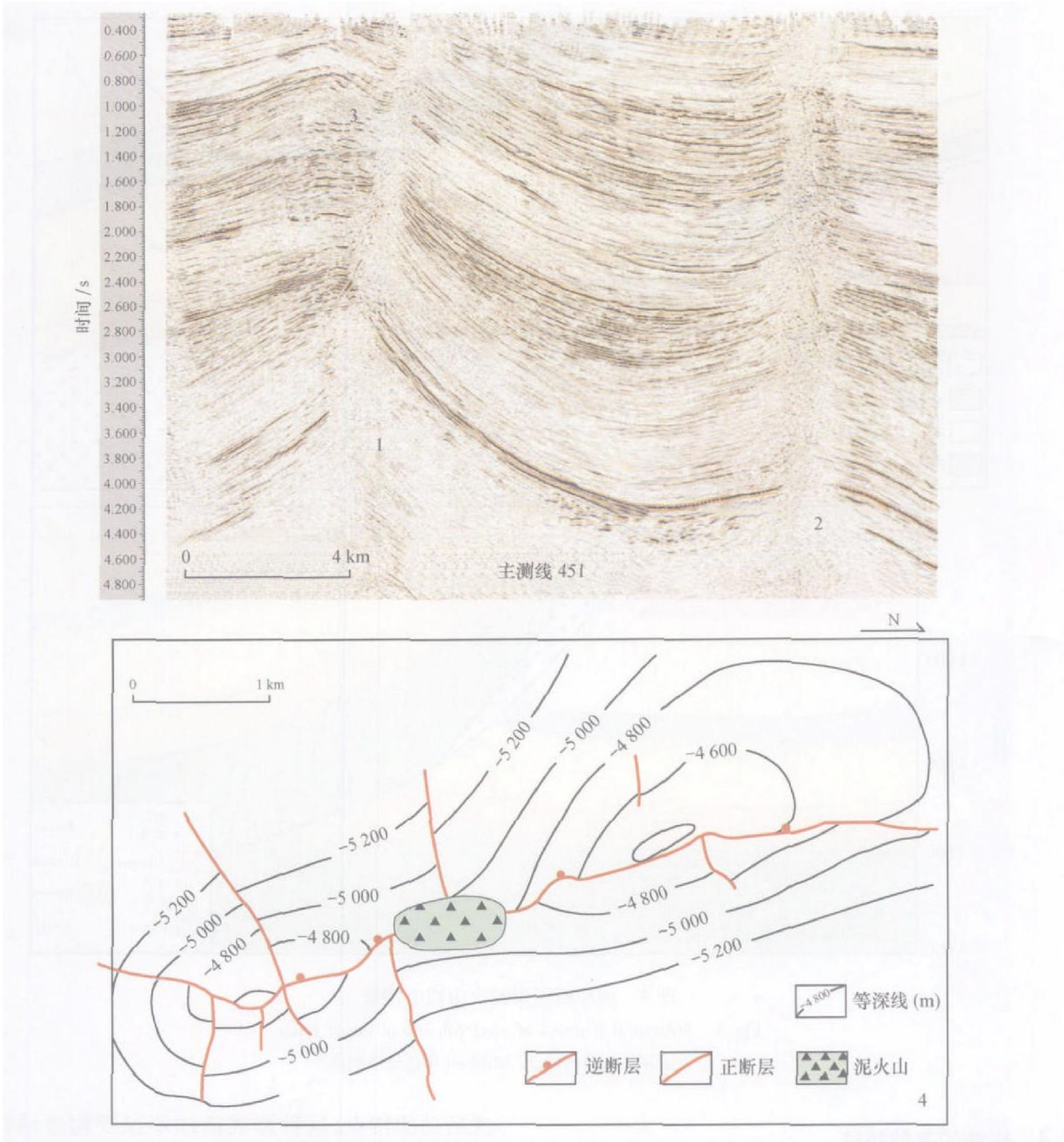


图 3 背斜型和走滑断层型泥火山构造特征

Fig. 3 Structural features of mud volcanos of anticlinal and strike-slip fault types

1. 走滑断层型泥火山构造 (Karabagli构造); 2. 背斜型泥火山构造 (Kursenge构造);

3. Karabagli构造浅层补偿下陷构造; 4. Kursenge构造图

Karabagli构造在剖面上深层断层减少并逐渐合并为一条, 断层产状陡峭, 插入基底, 构造相对简单; 中浅层伴生发育雁列正断层系, 它们互相切割, 表现为典型的走滑断层形成的“正花状构造”(图 3)。

逆冲断层型泥火山发育于大高加索山前逆掩断裂带中, 剖面上该类泥火山沿逆冲断层面呈铲状分布, 大部分沿断层面偏离构造核心喷出,

平面上泥火山沿断层走向展布, 地表角砾岩向断层冲掩一侧分布。受逆冲断层逆掩程度和断距大小的影响, 该类泥火山构造形态多样。断层逆掩程度低和断距小的构造上保留有背斜形态, 而逆掩程度大和断距大的构造上, 由于冲覆体出露剥蚀, 背斜形态已经不完整, 上盘构造圈闭只有上倾方向上的泥火山泥岩封闭, 如 Adzhiveli泥火山(图 4)。

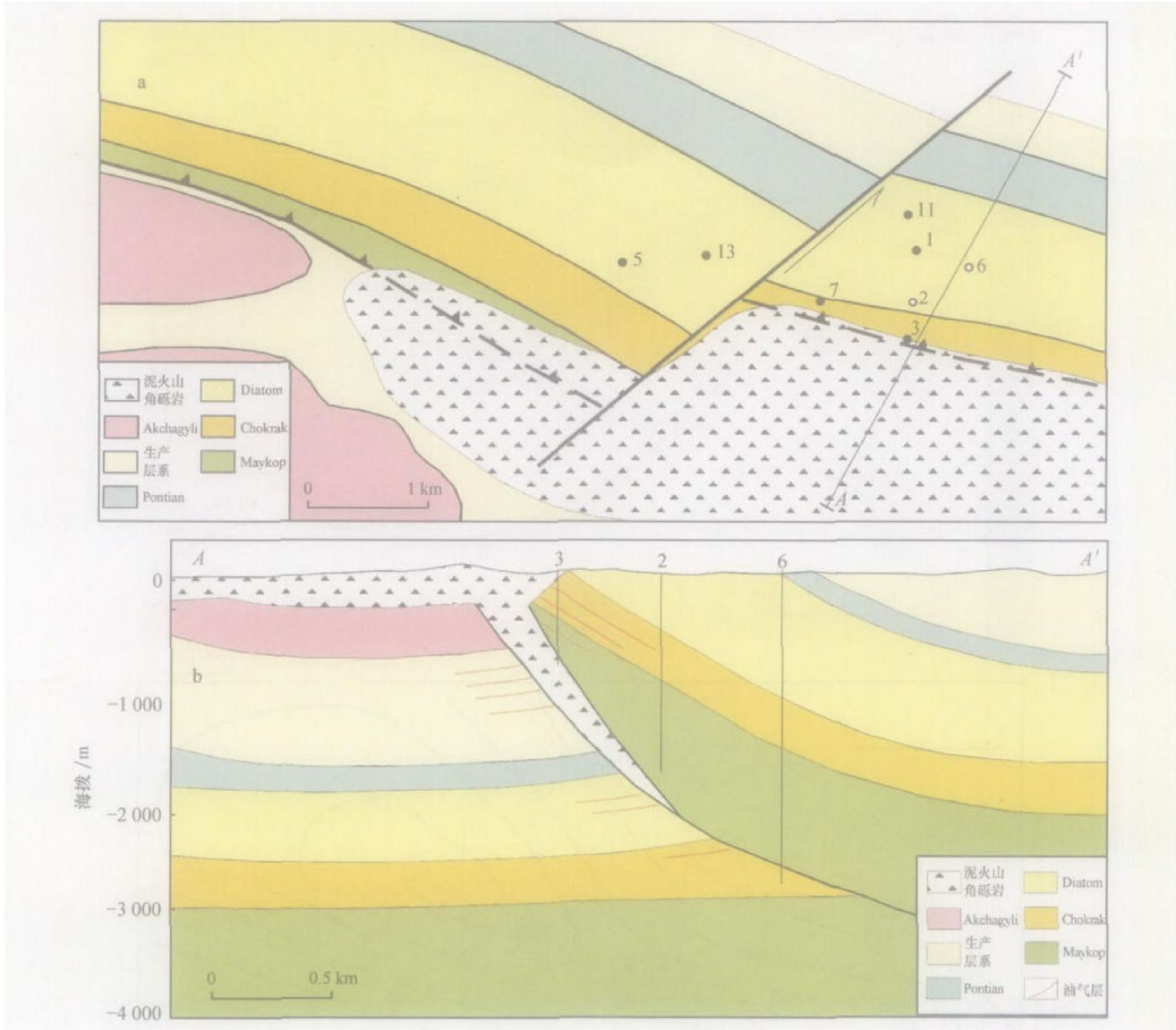


图 4 逆冲断层型泥火山构造特征

Fig. 4 Structural features of mud volcano of thrust types

a. Adzhivieli构造地质; b. Adzhivieli构造地质剖面

2.4 构造的其他特征

在许多情况下,特别是走滑断层型和背斜型泥火山构造在浅层常伴随有“挤陷式向斜”的假构造形态,它们呈下垂的漏斗状,发育次级正断层。这是由于泥火山幕式喷发后,浅表地层下陷,随之被新近系或第四系沉积充填并压实,由于差异压实作用形成了次级正断层和补偿构造(图 3)。这些构造的特点是:地层向构造内部陡峭倾斜,自较老地层向新地层产状变缓,常出现环状、半环状或放射状正断层,在背斜构造背景下形成破碎断块构造。

另外,泥火山的喷发和构造活动一样,具有幕

式活动的特点,这种幕式活动不仅受构造的幕式活动控制和调节,而且受深层压力和能量的聚集及其间歇释放控制,最终导致多期次的泥火山构造和泥岩底辟构造的幕式活动^[5]。

3 泥火山形成地质条件探讨

3.1 沉积地层条件

渐新统一中新统厚层塑性泥岩是本区泥火山喷出物的主要来源。该泥岩下部 Maykop 组基本为纯泥岩,泥质含量一般 95%,向上随水体变浅,砂岩含量逐渐增多,但泥岩类含量一般也超过 60%。如

古布斯坦地区 K-1 井揭示的中新统 1 130 m 地层中砂岩约 100 m 左右,中上部 D₁atm 组地层泥岩含量仍然达到 85%。这些泥岩主要为深灰、暗灰色,软-中等硬度,胶结差,岩石密度 2.3~2.6 g/cm³,粘度 10⁶~10¹² Pa·s,塑性十分大。另外,在快速沉积条件下,这些厚层泥岩欠压实程度高,地层水来不及及时排出,大量存在于地层中。同时该套泥岩是研究区主要生油岩,生成了大量烃类流体。这些地层水和烃类流体大量存在,造成地层中流体含量很高,在这些地下流体的混合和润滑作用下,泥岩塑性进一步提高。

上下岩层坚硬中间地层松软的沉积层序特点和巨厚沉积地层覆盖是泥火山从渐新统一中新统泥岩喷出的重要条件。渐新统一中新统泥岩下伏白垩系和古一始新统地层主要沉积灰岩地层和灰、泥岩互层地层,岩石密度一般 2.6~2.9 g/cm³,十分致密。而渐新统一中新统泥岩上覆的上新统生产层系地层为砂泥岩互层,上部砂岩十分发育,砂岩密度一般 2.5~2.6 g/cm³。这些下伏灰岩和上覆砂岩岩性坚硬,塑性小,流动性差。在快速沉积形成的巨厚沉积覆盖下,夹在上新统砂岩和白垩系一始新统灰岩之间的渐新统一中新统泥岩负载十分大,成为塑性流动和变形的主体。

3.2 构造条件

挤压构造应力场利于形成盆地超压,提供泥火山喷发的动力;同时,背斜隆起、逆冲断层错断、走滑断层发育等构造活动对泥火山构造活动也具有控制、诱发和调节作用。新生代的南里海盆地是处于阿尔卑斯-喜马拉雅构造褶皱带中的前陆盆地,持续受阿尔卑斯构造运动挤压应力的影响。构造的挤压应力促使了盆地深层强超压系统的形成,为泥火山的形成孕育和聚集了能量。同时,在区域构造挤压应力背景下,该区背斜构造、逆冲断层和走滑断层发育,这些构造活动诱发深层强超压塑性泥岩体沿断层面和背斜隆起向上运移,形成深层强超压泥岩能量释放的途径,为泥火山喷发提供了通道^[6-7]。在此机理下,泥火山分布明显受构造发育带的控制,逆冲断层型泥火山主要分布于大高加索山前逆掩带,背斜型和走滑断层型泥火山往往近盆地中心分布,每一个构造活动带中泥火山构造沿构造走向呈串珠状分布,每一个

单独的泥火山也明显受构造走向控制,沿构造走向优势展布。

3.3 地层压力条件

快速沉积条件下的欠压实、构造挤压和生烃作用是造成南里海盆地超压存在的主要原因^[8]。下库拉凹陷某钻井揭示出,上新统产层下部压力一般超过 80 MPa 5 097 m 处地层压力为 116 MPa 压力系数达到 2.3。渐新统一中新统泥岩未钻遇井,推测地层压力更大(图 5)。强超压环境为泥火山喷发提供了能量和动力,也进一步增加了泥岩的塑性变形能力。强超压塑性泥岩在深层压力和能量聚集到一定的程度,在构造活动的诱发下沿逆冲和走滑断层断面、背斜隆起等封闭薄弱带喷出,释放压力和能量。泥火山喷发后,地层压力下降,继续接受能量和压力聚集,当达到一定的超压强度和构造活动的诱发下,再次喷出。最终导致多期次的泥火山构造和泥岩底劈构造在该盆地十分发育,并表现为幕式活动的特点。

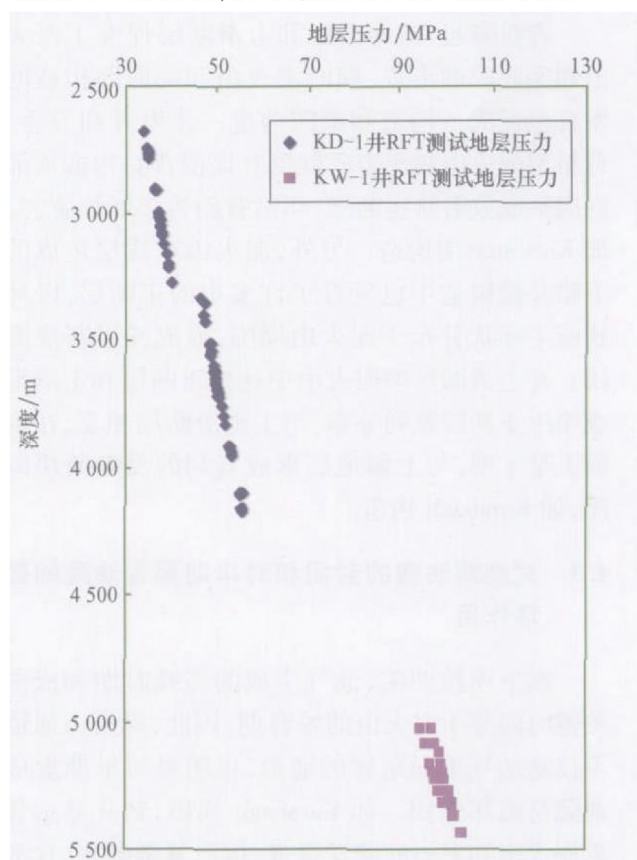


图 5 库拉坳陷某油田地层压力剖面

Fig. 5 Formation pressure profile in an oilfield in Kula sub-basian

4 泥火山构造对油气成藏的影响

4.1 对油气生成和运移的影响

中-渐新统厚层泥岩不仅是泥火山的主要来源又是该盆地最主要烃源岩,其生油高峰在上新世晚期,泥火山形成于更新世和第四系。成熟的生油岩由泥火山携带向地表蠕动和喷出过程中,携带油气向浅层垂向运移^[5],因此,泥火山通道是油气运移的主要通道之一,地面泥火山中油气苗和汽水喷出物是油气向浅层运移的良好证明。同时,在持续快速沉积充填下随埋深增加本应进入过成熟阶段的部分生油岩由于泥火山和泥岩底辟上涌而仍处于生油门限深度内,扩大了生油范围和强度。再者,深层泥火山喷出过程中携带热流上移,对较浅层的烃源岩成熟度产生影响,促使浅层生油岩的成熟^[9]。

4.2 对构造和圈闭形成的影响

背斜隆起、逆冲断层和走滑断层促发了泥火山和泥底辟的形成,同时泥火山和泥底辟构造的发育也促成了构造和圈闭的进一步发育和完善。背斜型泥火山和泥岩底辟拱升促使背斜构造顶部四周形成放射状正断层,切割背斜为多断块背斜,如 Kursenge 南构造。另外,泥火山在浅层造成的下陷补偿构造中也发育了许多小的正断层,以环状或半环状分布于泥火山周围,形成浅层断块圈闭。在走滑断层型泥火山中这些正断层和走滑形成半生正断层雁列分布,与主走滑断层相交,在剖面上呈 y 型,与上倾地层形成有利的反向断块圈闭,如 Karabagli 构造。

4.3 对晚期油藏的封闭和对早期聚集油藏的破坏作用

在下库拉凹陷,油气生成的高峰时期和成藏关键时间早于泥火山的发育期,因此,泥火山通道不仅是油气垂向运移的通道,也明显对早期形成油藏有破坏作用。如 Karabagli 油田,钻井显示邻近泥火山和泥岩底辟发育带,构造复杂破碎,含油气性差;而构造翼部在反向正断层的封闭下,含油气情况良好,是该油田的主要产油气断块。而泥火山活动间歇期沿断层面形成的泥岩涂抹和泥火山刺穿体对晚期形成的油气藏又起到上倾封堵作

用,如 Adzhiveli 和 Duvanny 油气田。

4.4 对储层分布和发育的影响

上新统沉积时,许多构造已经隆升发育,控制地层沉积,构造高部位地层厚度变薄,甚至形成局部不整合,造成部分构造高点储层不发育或缺失。另外,泥火山和泥底辟的侵入致使泥火山周围泥岩发育而砂岩含量偏低。

5 结论

泥火山构造是比较特殊的地质现象,国内少有如此特征明显的泥火山。通过对南里海盆地库拉坳陷泥火山构造特征和地震相特征分析,从构造成因上把该盆地泥火山分为背斜型、走滑断层型和逆冲断层型泥火山,不同构造单元泥火山类型和表现特征不同。该盆地泥火山的形成受构造地质背景控制,快速巨厚沉积及其层序特点、构造挤压应力场和强超压是泥火山形成的重要原因。泥火山构造影响油气生成、运移、聚集、保存和破坏的全过程,并影响圈闭形成和储层发育。本文研究认识对风险区块勘探有良好的指导意义。

参 考 文 献

- 1 童晓光,徐树宝.世界石油勘探开发图集(独联体地区分册).北京:石油工业出版社,2005
- 2 刘池洋,赵红格,杨兴科,等.前陆盆地及其确定和研究[J].石油与天然气地质,2002,23(4):307~313
- 3 Nadirov R S, Bagirov E B, Tagiyev M. Flexural plate subsidence, sedimentation rates and structural development of the super-deep South Caspian Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 1997, 14(4):383~400
- 4 Buryakovskiy I, Chilingar G, Am inzadeh F. Petroleum geology of the South Caspian basin[M]. Gulf Professional Publishing, 2001
- 5 宫少波,王彦.莺歌海盆地中央底辟带油气成藏条件分析[J].石油与天然气地质,2000,21(3):232~235
- 6 曾联波.库车前陆盆地喜马拉雅运动特征及其油气地质意义[J].石油与天然气地质,2004,25(2):175~179
- 7 王毅,宋岩,单家曾.构造应力在油气运聚成藏过程中的作用[J].石油与天然气地质,2005,26(5):563~571
- 8 王连进,叶加仁.沉积盆地超压形成机制述评[J].石油与天然气地质,2001,22(1):17~20
- 9 Tagiyev M F, Nadirov R S, Bagirov E B. Geohistory, thermal history and hydrocarbon generation history of the north-west South Caspian[J]. Marine and Petroleum Geology, 1997, 14(3):363~382

(编辑 高 岩)