新疆乌苏泥火山地球化学特征及其泥浆源

樊海龙^{1,2,3}, 彭传凯⁴, 余心起³, 陈晶源³, 李江涛⁵, 乔东海³, 郭建明¹, 许世阳^{1,2} FAN Hailong^{1,2,3}, PENG Chuankai⁴, YU Xinqi³, CHEN Jingyuan³, LI Jiangtao⁵, QIAO Donghai³, GUO Jianming¹, XU Shiyang^{1,2}

1.甘肃省油气资源研究重点实验室/中国科学院油气资源研究重点实验室,甘肃 兰州 730000;

2.中国科学院大学,北京100049;

3.中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京100083;

4.新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第七地质大队,新疆乌苏 833000;

5.新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第八地质大队,新疆 阿克苏 843000

1. Key Laboratory of Petroleum Resources, Gansu Province/Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and

Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

4. No. 7 Geological Party, BGMERD of Xinjiang, Wusu 833000, Xinjiang, China;

5. No. 8 Geological Party, BGMERD of Xinjiang, Akesu 843000, Xinjiang, China

摘要:泥火山是地质流体活动的结果,喷发需具备泥浆源、泥浆运移通道和水补给3个条件。对乌苏泥火山8个喷口泥浆进行 岩石地球化学分析,轻稀土元素富集,重稀土元素亏损,轻、重稀土元素平均比值为6.81,泥浆中富集大离子亲石元素Ba、Rb 等,高场强元素Nb、Ta强烈亏损,Th弱亏损,(La/Yb)№值为5.47,Ce/La值为2.22,球粒陨石标准异常值δEu显示中等负异常 (0.760~0.805);Sr/Ba值为0.33~1.01(平均值0.60),表明源岩为陆相沉积且古盐度较低,Ce/La(2.22)、Ce_{anom}(-0.007)、V/(V+Ni) (0.78)值均指示源岩形成于还原环境。稀土、微量元素分析及地层对比分析表明,乌苏泥火山源岩来自于下侏罗统八道湾组、 三工河组,为河流沼泽相-半深湖相含煤地层代表的弱还原-还原沉积环境,源岩的最大埋藏深度为7~8km。泥火山源岩的研 究为指示油页岩、烃类物质的位置提供了证据。

关键词:泥火山;地球化学;侏罗纪;页岩;源岩地层;还原环境;新疆乌苏

中图分类号:P595;P588.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2017)08-1428-11

Fan H L, Peng C K, Yu X Q, Chen J Y, Li J T, Qiao D H, Guo J M, Xu S Y. Geochemical characteristics of Wusu mud volcanoes in Xinjiang and their mud sources. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(8):1428–1438

Abstract: The mud volcano results from magmatic eruption formed by geological fluid activity. The formation of mud volcano requires three conditions, i.e., mud source, mud migration channel and water supply. Geochemical data of 8 samples from Wusu mud volcanoes are characterized by enrichment of LREEs relative to HREEs. Chondrite standard abnormal δ Eu values are 0.760~0.805, (La/Yb)_N is 5.47, and Ce/La is 2.22. The mud is enriched in large ion stone elements (LILE) such as Ba and Rb, whereas the high field strength elements (HFSE) Nb, Ta are strongly depleted. Sr/Ba ratios (0.33~1.01) suggest a lower paleo-salinity, Ce/La (2.22), Ce_{anom} (-0.007), and V/ (V+Ni) (0.78) ratios indicate that the source rocks were formed in a reducing environment. REE and trace elements analyse show that the source rocks of Wusu mud volcanoes were derived from lower Jurassic Dadaowan Formation and San-

收稿日期:2016-08-18;修订日期:2017-01-11

资助项目:中国地质调查局项目《天山成矿带境内外构造背景与成矿环境对比研究》(编号:12120114006201)

作者简介:樊海龙(1994-),男,在读硕士生,构造地质学专业。E-mail:geofhl@126.com

通讯作者:余心起(1962-),男,博士,教授,从事构造地质学及沉积大地构造学研究。E-mail:yuxinqi@cugb.edu.cn

gonghe Formation, suggesting a river swamp-semi-deep lake sedimentary facies of coal-bearing strata which represent a kind of weak reducing environment. The mud volcano geochemical data and stratigraphic section of Wusu imply that the maximum depth of mud source strata is about 7~8km.

Key words: mud volcano; geochemistry, Jurassic; shale; source rock strata; reducing environment; Wusu, Xinjiang

准南前陆冲断带是准噶尔盆地一级构造单 元,又称北天山山前冲断带,其与新生代晚期天山 降升造山后的大规模陆内逆冲推覆有关,是准南再 生前陆盆地后缘逆冲断层形成的构造楔带[1-8]。受 新近纪以来强烈的冲断构造变形作用影响,准南 前陆冲断带具有自南向北扩展的新生代逆冲挤 压构造,发育台阶状逆断层及各类断层相关褶 皱、双重构造、突发构造、三角带构造、披覆构造、 叠瓦逆冲构造等,具有东西分段、南北分排的特 征[9-13]。乌苏泥火山地处准噶尔南缘四棵树煤矿, 该区自古生代以来可划分为周缘前陆盆地阶段 (P)、陆内坳陷阶段 $(T-E_1)$ 、再生前陆盆地阶段 (N-Q)3个阶段,分别代表晚海西、印支一燕山 运动和喜马拉雅运动对准噶尔盆地的控制和影 响[14-18]。准噶尔构造的多旋回在盆地中造成多期 活动、类型多样的构造组合,深层次古生界基底 发生压扭性堑垒构造,浅层次中生界为重力作用 形成的薄皮滑褶构造[19-20]。喜山期天山剧烈隆起, 向北褶皱逆冲,山前四棵树坳陷向北挤压,形成一 系列盖层滑脱褶皱,燕山期形成的断裂重新活动, 为泥火山形成和运移的基础[21-23]。新生代以来,由 印-藏碰撞远程效应产生的持续挤压改造了天山 地区的构造格局,在天山两侧发育近东西走向的 冲断褶皱带[12,24-26]。白杨沟四棵树泥火山处于天山 山前坳陷带托斯台背斜轴部,呈东西向分布,与托 斯台背斜轴部走向一致,并与天山山脉走向基本 相同[27]。独山子泥火山发育在独山子背斜轴部,被 东西向延伸的断裂切割向南倾斜,在背斜轴部发 育数条正断层和张性断裂带[28-29]。

1 泥火山研究现状及分布概况

泥火山是地质流体活动的结果,在特定的地质、水文条件下形成,其喷发类似岩浆作用^[30]。泥火山和火山作用的来源、深度、运动机制及物源补给均不一致,泥火山的喷发强度和规模远小于岩浆火山^[31-33]。地质学家通过对海底泥火山地球物理特征研究,提出海底泥火山是地壳深部大套巨厚富含有机质及流体的欠压实泥页岩在区域动力学作用

下挤入上覆地层,使上覆岩层弯曲隆起或刺穿上覆 地层而形成的一种地质构造^[34],海底泥火山具有低 密度、异常高温超压的地质特点;泥火山的喷发产 生大量碳氢化合物,与沉积序列深部存在厚层、细 粒、软化可塑的沉积物有密切联系。受岩层、地表 物质成分和地下水影响,不同泥火山泥浆粘稠度不 同,外形也不同。泥火山喷发含油泥浆和气体,含 量最多的是烃类物质、CO₂、N₂、He、Ar^[35-36]。

全球陆地有40多个泥火山发育区,海底有20 多个发育区,每个发育区有几座到200座不等。迄 今为止,地球上发现的泥火山大约有900多座,陆地 上现存泥火山有220余座。各地泥火山有不同的喷 发周期,喷发物的形态、大小和物质成分也有差 别。著名的泥火山群分布在巴库阿塞拜疆、美国黄 石公园、罗马尼亚布扎、地中海、墨西哥湾、巴伦支 海、波罗的海等地^[37]。

中国泥火山群主要分布在新疆、台湾,在青海 柴达木盆地边缘、四川盆地内渠江和江苏南部小规 模发育。2001年,中国地质学家在新疆发现了规模 很大的泥火山群,迄今为止已发现90余个泥火山喷 口,其中具代表性的泥火山分布在沙湾县霍尔果 斯、独山子油矿、乌苏白杨沟镇四棵树和艾其沟(图 1)。乌苏泥火山群位于天山北缘山前坳陷带,距乌 苏市南的白杨沟镇约2.5km,四棵树泥火山喷口的 高度集中在1253~1285m之间,独山子泥火山喷口 的高度仅为940m。乌苏地区分布近70余座大小不 一的泥火山,泥火山口集中在不到0.5km²的范围 内,在区域上呈北东东向线性分布。

对新疆白杨沟、艾其沟和独山子三地的泥火山 考察发现,活动的泥火山多为泥泉和泥潭,喷口呈 圆形,干涸的泥火山呈丘状叠起,喷口直径最小为 10cm,最大可达2.3m;泥火山喷发时常伴有咕嘟咕 嘟的响声(图2-a),喷口周围散发着浓郁的汽油味, 喷发间隔集中在5~30s之间,翻滚的泥浆溢出在周 围形成泥丘(图2-b),规模较小。从喷发间隔时间 看,四棵树泥火山喷发间隔略长,独山子泥火山喷 发间隔短而喷发强烈,说明泥火山受运移通道内的 压力控制明显。



图1 新疆乌苏地区地质简图和泥火山位置(据参考文献①修改)

Fig. 1 Geological sketch map and location of the mud volcanoes in Wusu area, Xinjiang
1一第四纪风成沙丘、风成黄土、砾石沙土;2-第四纪土黄色砂、泥、亚砂土、灰色砾石、砂;3-新近纪红棕色
粗砂岩、灰色砂质灰岩、红褐色细砂质砾岩、介壳灰岩;4-古近纪灰绿色页岩夹泥质灰岩、粗砂岩夹细砾岩;
5一白垩纪杂色页岩、砂岩、泥岩、粉砂岩互层;6-件罗纪灰色砂岩、砾岩、泥岩夹砂质页岩、炭质页岩及煤;
7-三叠纪红褐色及灰绿色砂岩互层、砂岩及炭质页岩透镜体、煤;8-石炭纪紫红色及灰绿色炭质
玄武岩、褐色层状凝灰质砂岩、粉砂岩夹凝灰岩;9-花岗岩体;10-泥火山分布位置

2 区域地质概况

2.1 研究区构造背景

准噶尔盆地为一挤压型复合含油气盆地,盆地 基底南倾,在大地构造上属于欧亚板块,西邻哈萨 克板块,东接西伯利亚板块,南边为塔里木板块。 准噶尔盆地构造演化复杂,先后经历了海西期、印 支期、燕山期、喜马拉雅期等多期次构造运动和沉 积旋回,是具备多套油气藏组合的叠合盆地^[3-4,21,26]。 现普遍认为,准噶尔盆地具双层结构的基底,即早 期形成的前寒武纪结晶基底和后期叠加的海西期 褶皱基底,石炭系通常被划分为基底构造层^[38-41]。 盆地分为乌伦古坳陷、陆梁隆起、中央坳陷、中央隆 起,其中北天山山前坳陷、课夏断阶带、车排子隆起 和东部隆起,北天山山前坳陷由四棵树凹陷、昌吉 凹陷和山前褶断带组成,沉积厚度大,为油气聚集 有利区。研究区位于四棵树凹陷,受海西期等多期 次构造运动影响,四棵树凹陷先后经历汇聚型大陆 边缘残留海盆地、前陆盆地、压扭盆地、陆内坳陷、 再生前陆盆地等多次演化^[3,42-44]。

四棵树凹陷构造面貌复杂,印支晚期—燕山早 期为凹陷初始形成阶段,该时期构造运动强,沉降 幅度大,形成了凹陷的主体沉降格局;燕山中期— 喜马拉雅早期表现为沉降停止和缓慢沉降交替进 行,构造运动较弱;喜马拉雅中晚期该区域又经历 了剧烈沉降阶段,受印度板块和欧亚板块碰撞影



图 2 乌苏泥火山野外露头 Fig. 2 The outcrops of mud volcanoes in Wusu area a--泥潭;b--泥丘;c--泥浆温度与空气温度对比

响,区域构造运动强烈,发育独山子、卡因迪克等一系列走滑构造系,奠定了现今的构造格局。四棵树 凹陷发育基底深部断裂和浅部的滑脱型断裂,断裂 深度可延伸到石炭系中,不同期次构造运动造成的 褶皱带变形程度差异很大,整体而言,靠近山前造 山带的高泉地区断裂数量多、断距大、变形程度强; 远离造山带的卡因迪克等地断裂少。学者们^[15,45-47] 对四棵树凹陷提出了多种次级构造单元,如卡因迪 克背斜、西湖背斜、高泉背斜、独山子背斜和独南背 斜等,卡因迪克背斜位于四棵树凹陷北斜坡的构造 转折端,受喜马拉雅运动影响较小,背斜隆起幅度 小,其余背斜受喜马拉雅运动的影响较大,形成较 高的隆起。

2.2 研究区沉积特征

四棵树凹陷区在石炭纪时期与准噶尔盆地同 属一体,石炭系组成了四棵树凹陷区的基底地层。 区内地层由老到新分别为石炭系、三叠系、侏罗系、 白垩系、古近系、新近系和第四系,总厚度可达 15km,二叠系缺失(图3)。受构造运动影响,区内发 育多处沉积不整合接触,具有代表性的有中石炭统 八晋沟组(C₂b)与上石炭统沙大王组(C₃s)、沙大王 组(C₃s)与中下三叠统(T₁₊₂)、中下侏罗统头屯河组 (J₁₊₂)与上侏罗统齐古组(J₃q)、齐古组与下白垩统吐 谷鲁群(K₁t),以及吐谷鲁群与古近系(E₁₊₂)之间的 角度不整合接触。

区域最老地层为下石炭统安集海河组,为深色 凝灰岩、灰色粉砂岩,厚度较大。四棵树凹陷在三 叠纪接受沉积,沉积厚度很薄,约400m,中下三叠统 为山麓辫状水流沉积;上统下部主要为较深水广湖 沉积,上部以滨湖沼泽和三角洲相沉积为主。侏罗 系沉积分布广泛,厚度较大,与下伏地层呈明显的 角度不整合关系,主要发育八道湾组(I,b)、三工河 组 (J_{1s}) 、西山窑组 (J_{2x}) 、头屯河组 (J_{2t}) 和齐古组 (J_{3q}) 5套地层,中下统为河流沼泽相、湖泊沼泽交替的含 煤建造,该套煤系是四棵树凹陷最主要的烃源岩 层;上统沉积厚度小,以砂质页岩、红色泥岩组成的 红色建造为主。区内白垩系沉积厚度很薄,仅有下 白垩统吐谷鲁群出现,为稳定的构造活动阶段,以 浅水湖泊相为主。古近纪受印度板块向欧亚板块 俯冲碰撞,四棵树凹陷逐渐成为该时期的沉积中 心,为较稳定的浅湖-深湖相泥质沉积。新近系沉 积厚度较大,以浅水湖泊相和河流相为主,在泥火 山发育的四棵树沟地区为泛滥平原相泥岩地层。 在准噶尔盆地沉积过程中,发育一系列烃源岩层, 分布于不同的凹陷中,其中,石炭系烃源岩、侏罗系 烃源岩和古近系烃源岩为勘探和研究的重点区域。

3 样品采集与分析

选择冬天(1月份)进行样品采集,乌苏及其周 边地区基本被积雪覆盖。泥火山发育区积雪融化, 泥浆上涌形成灰黑色泥丘或泥潭,外部为穹状薄层 冰盖,泥火山喷口泥浆的温度为1~5℃,远高于空气 温度(-8~-12℃)(图2-c)。用小烧杯及药勺在泥 火山喷口采集粘稠状固液浑浊体或固体泥样,为防

2017	寉	
201/		

界	系	统	地 力 名	方性 称	代号	柱状图	厚度 /m	地 层 描 述
	第四系				Q			冲击、风成黄土、风成沙堆积、洪积堆积、洪积风成堆积、冰 川和冰水堆积
				第二亚			1200~ 2000	灰色砾岩组成下部夹粗砂岩
新生	新近	上新统	昌吉河组	第一亚组	N ₂ c		785~ 1000	上部:淡黄色、红棕色、红褐色砂质页岩、泥岩夹粗砂岩、砾岩; 中部:棕红色、褐黄色、棕色页岩、砂岩页岩互层夹灰色砂岩、 介壳灰岩及植物化石碎片; 下部:棕褐色、红棕色砂质页岩互层夹灰色粗砂岩及细砂岩, 在页岩中含软体动物、鱼类、脊椎骨片等化石
界	纪	中新统	前山组		$\mathbf{N}_2 q$			上部:灰绿色页岩、红色、棕红色砂质页岩及褐色页岩、砂 岩、泥灰岩、粗砂岩、炭质页岩、鲕状介壳灰岩;
	古 近	渐新统	玛纳斯组		E m		475~ 1215	中部:棕红色、褐黄色、绿黄色、棕色页岩、砂质页岩互层夹 灰色砂岩及介壳灰岩及植物化石碎片; 下部:棕红色砂质页岩、粗砂岩及细砂岩
	纪	始古 新新世			F F		180~ 850	灰色、深灰色、灰绿色、灰绿色页岩夹灰岩、介壳灰岩、砂岩
	白垩系	下统	吐谷 鲁群		K.t		18~450	红色、鲜红色砂质页岩、棕红色粗砾岩夹细砾岩、玫瑰色石灰 岩,下部紫红色砾岩
		上统	齐古组		La		58~720	杂色、灰色、棕色、紫红色、灰绿色页岩、砾岩、泥岩、粉砂岩 互层
			头屯河		- 34		387	珠红色、黄灰色、灰绿色砂岩夹砂质页岩,细砾岩
中 生 界	侏罗系	中下统	C组 西山窑组 三工河		$\mathbf{J}_{1+2}t$ $\mathbf{J}_{1+2}x$		185~ 1700	上部:紅色厚层砂质页岩、砂岩、粗砾岩,夹薄层煤层及炭质 页岩; 中部:灰色、灰绿色砂质页岩、砂岩、砂岩互层中含劣质煤线 及炭质页岩; 下部:灰色、黄色、灰绿色厚层砾岩、砂岩、泥岩含植物化石 碎片及劣质煤线
			1组 八道湾		31.25		170-800	灰色、灰绿色砾岩、砂岩、泥岩互层夹多层炭质页岩,含透镜 状菱铁矿,5~10层煤(可采30层)及化石
	Ξ	上统	组		$J_{1+2}b$		400 502	灰色、灰绿色、黄绿色、灰色砂质页岩、砂岩夹粉砂岩、粗 砂岩、砾岩、炭质页岩、菱铁矿结核
	叠系	中下统			T ₁₊₂		-5 ₈₉ 200	灰色厚层砾岩夹砂岩、页岩及四层煤(可采3层)
		上统	沙大王		C ₃ <i>s</i>		218	上部:红褐色、灰黄色致密状软泥,砂岩护层夹砾岩; 下部:灰黄色透镜状粗砾岩及泥岩互层
	石		组	第三	$C h^{\circ}$		1385	上部:黄绿色砾岩、砂岩、页岩夹透镜状煤层及铁质结核; 下部:灰绿、褐色、灰黄绿色透镜状粗砾岩、泥岩互层
上			八	业 组 第			875	紫色、暗紫色、灰绿色、绿色块状玄武玢岩、底部有一层杂色 底砾岩
生	炭系	中统	百沟	三亚组	C_2b^{\flat}		1028	灰色、灰绿色、褐色中厚层状凝灰质砂岩、粉砂岩夹凝灰岩、 晶屑岩屑凝灰岩、凝灰砾岩
界			组	第一亚	$C_{2}b^{a}$		1030	灰黑色薄层状凝灰质细砂岩、粉砂岩夹凝灰质泥岩、粉砂岩
			安	组		0000	717	灰色厚层状细砂岩、粉砂岩、砾岩、含砾粗砂岩
		「 统	集海组		C_1a		1000	灰绿色、浅灰绿、灰色块状厚层状凝灰岩、晶屑岩屑凝灰 岩、凝灰砂岩、夹凝灰粉砂岩、灰岩层或透镜体

图3 新疆乌苏地区地层剖面图(据参考文献①修改)

Fig. 3 Stratigraphic column of Wusu area, Xinjiang

止污染,所有样品均在干净密封袋内保存。样品测试前,在65℃条件下烘干成固体并研磨至200目试样。样品测试在广州澳实矿物实验室完成,采用 ME-MS681(ME-MS61和ME-MS81的合成)和 ME-XRF06方法分析。

ME-MS61(电感耦合等离子体发射光谱测定 超痕量元素):检测仪器为等离子体发射光谱与等 离子体质谱(ICP-AES & ICP-MS);试样用高氯酸 (HClO₄)、硝酸(HNO₃)、氢氟酸(HF)、盐酸(HCl) 消解,蒸至近干后的样品用稀盐酸溶解定容,再用 等离子体发射光谱与等离子体质谱进行分析,元素 之间的光谱干扰得到矫正后,即是最后分析结果。

ME-MS81(超低含量检测):检测仪器为电感 耦合等离子体质谱仪(ICP-MS);将试样加入到偏 硼酸锂(LiBO₂)/四硼酸锂(Li₂B₄O₇)熔剂中,混合均 匀,在1025℃以上的熔炉中熔化,待熔液冷却后用 硝酸、盐酸和氢氟酸定容,再用等离子体质谱仪分 析。该方法主要针对稀土元素,本文检测的17个稀 土元素数据可靠;低含量的难熔元素,如Ba、Cr、Nb、Rb、Sn、Ta、W、Zr等也较可靠。而常见的金属 元素,特别是以硫化物存在时,采用ME-MS681 (ME-MS61和ME-MS81的合成)法检测。

乌苏泥火山中稀土元素检测数据及分析结果 见表1。8个泥火山样品的稀土元素总量(∑REE) 较低,整体变化较小,介于130.29×10⁻⁶~183.83×10⁻⁶ 之间,平均值为159×10⁻⁶。所测样品的∑REE几乎 全部低于PAAS(澳大利亚后太古宙平均页岩),与 UCC(全球平均大陆上地壳成分)相近,这可能与泥 火山样品中含有少量的CaO有关(WS-08、WD-02、WT-C、WT-N四个样品中的CaO含量分别为 0.54%、4.49%、1.26%、1.21%,平均值为1.88%)。整体 而言,WT系列样品稀土元素总量较高,WD系列样 品稀土元素总量较低,基本与所测CaO含量呈负相 关。∑LREE/∑HREE值为6.42~7.23,平均值为 6.84;(La/Yb)^N值为4.60~6.00,平均值为5.47,显示 轻、重稀土元素分馏中等,Yb含量较高(2.59×10⁻⁶~

10-6

									10
元素	WS-02	WS-03	WS-05	WS-08	WD01	WD02	WT-C	WT-N	均值
La	32.90	30.90	29.20	29.70	26.70	25.00	30.70	30.30	29.43
Ce	76.10	70.20	64.10	64.30	53.70	53.10	71.40	70.20	65.39
Pr	8.37	7.52	7.27	6.92	6.25	5.89	8.22	8.17	7.33
Nd	33.50	29.50	28.40	26.70	24.50	23.60	33.40	33.50	29.14
Sm	7.46	6.23	6.20	5.94	4.86	4.91	7.32	7.16	6.26
Eu	1.53	1.36	1.29	1.25	0.98	1.06	1.61	1.54	1.33
Gd	6.27	5.75	5.32	5.30	4.44	4.49	6.35	6.27	5.52
Tb	1.05	0.91	0.86	0.81	0.71	0.74	1.04	0.95	0.88
Dy	6.63	5.59	4.87	5.01	4.31	4.64	6.23	6.16	5.43
Но	1.33	1.08	0.98	1.05	0.90	0.91	1.29	1.30	1.11
Er	3.80	3.42	3.08	3.10	2.56	2.55	3.72	3.83	3.26
Tm	0.57	0.52	0.42	0.45	0.39	0.41	0.55	0.53	0.48
Yb	3.75	3.30	2.89	3.00	2.64	2.59	3.82	3.91	3.24
Lu	0.57	0.47	0.46	0.46	0.40	0.40	0.58	0.55	0.49
Ce/La	2.31	2.27	2.20	2.16	2.01	2.12	2.33	2.32	2.22
ΣREE	183.83	166.75	155.34	153.99	133.34	130.29	176.23	174.37	159.27
ΣLREE	159.86	145.71	136.46	134.81	116.99	113.56	152.65	150.87	138.86
ΣHREE	23.97	21.04	18.88	19.18	16.35	16.73	23.58	23.50	20.40
ΣLREE/ΣHREE	6.67	6.93	7.23	7.03	7.16	6.79	6.47	6.42	6.81
(La/Yb) _N	5.21	5.56	6.00	5.88	6.00	5.73	4.77	4.60	5.47
δEu	0.76	0.76	0.77	0.76	0.72	0.77	0.81	0.78	0.77
Ceanom	0.008	0.009	-0.008	- 0.004	- 0.038	- 0.019	0.001	- 0.004	-0.007

表1 乌苏地区泥火山泥样稀土元素质量分数 Table 1 Content of REE of mud volcano samples in Wusu area

注:La_N表示样品所测定的La含量与北美页岩NASC标准化后的值,Yb_N计算方法相似; Σ LREE/

ΣHREE为轻、重稀土元素比值;δEu=Eu_N/(Sm_N*Gd_N)^{1/2};Ce_{anom} =lg[3Ce_N/(2La_N+Nd_N)]



Fig.4 Chondrite standard curve of mud volcano samples

3.91×10⁻⁶)。这2个指标可较好地反映轻、重稀土元 素分异的状况,即样品显示轻稀土元素富集、重稀 土元素亏损,为判断物质来源提供依据。

对样品进行球粒陨石标准化处理,得到其稀土 元素配分模式图(图4)。各样品稀土元素曲线基本 重合,整体向右倾斜,表现为左高右低的趋势,轻稀 土元素配分曲线较陡,表明轻稀土元素分异中等, 重稀土元素配分曲线平坦,表明重稀土元素分异较 弱,没有明显的异常。球粒陨石标准异常值(8Eu) 显示中等的负异常(0.72~0.81,平均值为0.77),高于 PAAS(0.65)及UCC值(0.71),这种稀土元素分布特 征指示泥火山泥浆的源岩来自上地壳。各样品稀 土元素配分模式与澳大利亚后太古宙页岩 PAAS相 似,稀土元素含量略低,可能指示泥浆源岩形成时 水动力较弱,水系较稳定^[48-50]。

在不同自然环境下,不同元素的迁移能力及 富集特征不同,对构造环境有较好的指示作用^[51]。 在沉积物风化、沉积过程中,主量元素的组分会 有较大变化,而微量元素如La、Ce、Ni等具有较 弱的迁移能力,在风化、再沉积过程中往往会从 母岩中转入新的沉积物。泥火山的泥浆由于地 下沉积物受构造作用碎裂,沿断裂带运移到地 表,微量元素含量除受元素本身的物理化学性质 限制外,还与古气候、源岩所处的环境等密切相 关。因此,针对泥火山样品中一些对古环境有指 示意义的微量元素进行分配规律、含量、比值等 分析,对于反演其源岩形成时的地质环境、构造 背景等有重要意义^[52-53]。泥火山泥浆微量元素含量 如表2所示。

4 源岩属性及沉积环境分析

4.1 古盐度分析

古盐度是反映沉积环境的重要标志,对于分析 古地理格局有重要意义。目前,通常用Sr、Ba、Ga、 Ru、B、K等元素及其比值来判断海相和陆相环境,并 测定古盐度、分析古气候^[54-55]。Sr含量在陆相(淡水) 中为0.1‰~0.3‰,在海相(咸水)中含量为0.8‰~ 1‰,本文所测样品中Sr含量为202×10⁻⁶~534×10⁻⁶, 平均含量为306×10⁻⁶,指示淡水环境;Ba含量较高 (平均值为532.50×10⁻⁶),刘刚等^[53]、黄静等^[55]等指 出,Sr/Ba值与古盐度具有明显的正相关,可作为判 断沉积物古盐度的灵敏标志,海相沉积物中Sr/Ba 值大于1,陆相(淡水)沉积物中Sr/Ba值小于1,当比 值介于0.6~1.0时为海陆过渡相(半咸水相,彭海艳 等^[54]采用0.5~0.8界定),小于0.6时为陆相(微咸水 相),本次研究所测样品的Sr/Ba值在0.33~1.01之 间,平均值为0.60。Sr含量及Sr/Ba值均表明,源岩 为陆相沉积目沉积时盐度较低。

4.2 源岩沉积时的氧化还原性

利用微量元素判断沉积环境的氧化还原性已 被广泛使用,判别方法主要有δU、Th/U比值法、 V/(V+Ni)比值法、Ce/La比值法、铈异常(Ceanom) 法、V/Cr比值法、Ni/Co比值法等。本文主要采 用Ce/La、铈异常(Ceanom)、V/(V+Ni)比值法进行 判别^[54-56]。

由于Ce的4f亚层结构,Ce³⁺常被氧化成Ce⁴⁺并 形成CeO₂,与其他三价稀土元素分离,因而在氧化 环境下表现为Ce亏损,还原环境下富集,在不同 沉积环境下的含量差别较大,可根据其表现的正 负异常对形成环境的氧化还原性进行判别。在一 定的pH条件下,Ce在缺氧的情况下浓度会增高, 当处于氧化环境时,浓度会降低;以往研究中,多 采用Ce/La值代替Ce异常,Ce/La值小于1.5代表 富氧环境,1.5~1.8为贫氧环境,大于2.0表示还原 环境^[57]。样品中Ce平均含量为65.39×10⁻⁶,La平均 含量为25.43×10⁻⁶,Ce/La值为2.01~2.33,平均值为 2.22,8个样品的Ce/La值均大于2.0,指示泥浆源 岩形成于还原环境。

宋健等^[58]、黄静等^[55]根据Ce的变价特征,采用

Ceanom判别沉积物的氧化还原环境,Ce异常计算公式为Ceanom=lg[3Cen/(2Lan+Ndn)](Cen表示样品所测定的Ce含量与北美页岩NASC标准化后的值,Lan、Ndn的计算方法与Cen相似)。当Ceanom大于-0.1时,表明沉积水体环境为缺氧、还原的环境,当Ceanom小于-0.1时,代表富氧环境(氧化环境)。运用上述公式对样品Ceanom计算显示,-0.038 < Ceanom < 0.017,平均值为-0.007,独山子2个样品的Ceanom异常值较低

且变化幅度较大,分别为-0.038和-0.019,其余样品的 Ceanom 值变化幅度很小,所测数据的 Ceanom 异常值均大于-0.1,反映还原的沉积环境。

V、Fe、Ni等元素与还原介质密切相关,还原性 越强含量越高,因此V/(V+Ni)值可以反映氧化还原 性。黄喜峰等^[57]研究认为,高V/(V+Ni)值指示水体 分层,底层水体通常形成厌氧环境,V/(V+Ni)>0.54 指示还原环境,0.46<V/(V+Ni)<0.54为中等值,指

									10^{-6}
元素	WS-02	WS-03	WS-05	WS-08	WD-01	WD-02	WT-C	WT-N	平均值
Ba	610.00	510.00	480.00	510.00	530.00	440.00	580.00	600.00	532.50
Be	2.44	2.32	2.30	2.03	2.14	2.04	2.32	2.40	2.25
Bi	0.45	0.39	0.43	0.33	0.57	0.47	0.43	0.46	0.44
Cd	0.19	0.13	0.10	0.13	0.12	0.08	0.18	0.20	0.14
Co	17.80	15.20	13.60	12.50	13.30	13.10	18.00	18.00	15.19
Cr	66.00	63.00	60.00	54.00	69.00	61.00	65.00	65.00	62.88
Cs	6.44	7.51	8.28	7.26	8.70	7.64	5.58	6.27	7.21
Cu	49.50	42.00	36.70	35.30	36.10	33.50	49.80	49.90	41.60
Ga	22.90	21.00	20.70	20.10	18.70	18.10	22.20	22.30	20.75
Hf	5.00	5.10	4.70	5.30	3.80	3.80	4.90	4.90	4.69
In	0.08	0.09	0.07	0.07	0.07	0.07	0.09	0.09	0.08
Li	54.80	51.10	50.10	47.10	54.30	47.60	55.10	55.00	51.89
Мо	0.94	0.94	0.88	0.83	1.32	1.18	0.97	0.96	1.00
Nb	9.60	10.40	10.60	10.20	11.20	10.50	9.70	9.50	10.21
Ni	44.40	37.20	33.90	28.80	40.30	35.70	44.30	45.20	38.73
Pb	20.70	18.50	19.90	16.90	34.20	17.70	19.90	20.40	21.03
Rb	89.20	95.50	94.60	96.70	108.00	105.00	86.90	85.90	95.23
Re	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	0.00	0.00
Sb	1.26	1.20	1.14	1.52	1.20	1.09	1.25	1.27	1.24
Sc	21.40	17.90	16.20	15.40	14.20	13.90	19.50	21.40	17.49
Sr	201.00	286.00	468.00	181.00	534.00	372.00	202.00	204.00	306.00
Та	0.70	0.80	0.80	0.70	0.80	0.80	0.60	0.60	0.73
Th	10.50	11.10	11.70	10.60	10.30	10.30	7.90	9.40	10.23
Tl	0.40	0.48	0.52	0.39	0.67	0.59	0.41	0.44	0.49
U	2.82	3.05	3.08	3.27	3.52	3.54	2.88	2.81	3.12
V	177.00	147.00	130.00	117.00	109.00	105.00	169.00	169.00	140.38
W	1.80	1.90	1.90	1.80	2.50	2.30	1.70	1.80	1.96
Y	35.80	30.30	26.90	28.00	23.70	24.30	34.20	34.40	29.70
Zn	105.00	99.00	94.00	87.00	89.00	79.00	105.00	104.00	95.25
Zr	198.00	191.00	184.00	209.00	147.00	152.00	196.00	192.00	183.63
Th/Sc	0.49	0.62	0.72	0.69	0.73	0.74	0.41	0.44	0.60
Zr/Sc	9.25	10.67	11.36	13.57	10.35	10.94	10.05	8.97	10.65
Rb/Sr	0.44	0.33	0.20	0.53	0.20	0.28	0.43	0.42	0.36
Sr/Ba	0.33	0.56	0.98	0.35	1.01	0.85	0.35	0.34	0.60
V/Cr	2.68	2.33	2.17	2.17	1.58	1.72	2.60	2.60	2.23
V/Y	4.94	4.85	4.83	4.18	4.60	4.32	4.94	4.91	4.73
V/(V+Ni)	0.80	0.80	0.79	0.80	0.73	0.75	0.79	0.79	0.78

表2 乌苏地区泥火山泥样微量元素分析结果

 Table 2
 Content of trace elements of mud volcano samples in Wusu area

示不强烈的厌氧环境,V/(V+Ni) < 0.46代表弱的贫 氧环境;宋健等^[58]将V/(V+Ni)值与0.46对比,小于 0.46为氧化环境,大于0.46代表还原环境。本次所 测泥火山样品的V/(V+Ni)值介于0.73~0.80之间, 平均值为0.78,各样品的V/(V+Ni)值变化幅度小, 均反映还原环境,与Ce/La值、Ceanom异常值指示的 结果一致。

5 泥火山泥浆来源及深度讨论

泥火山泥浆的来源对研究泥火山存在的构造背景、泥火山与岩浆火山的区别、泥火山发育的深度等问题至关重要。王道等^[31]、范卫平等^[59]研究认为,泥火山物质不是来自地壳以下的高温高压岩浆,而是来自不太深处(通常数千米)的低温泥砂质岩石、地下水和天然气,厚层质纯的泥页岩层为泥浆形成的必要条件。对新疆白杨沟四棵树、艾其沟、独山子三地泥火山泥浆元素地球化学研究发现,泥火山泥浆中含有非常丰富的稀土元素和稀散元素。通过泥浆所含元素对比发现,各喷口泥火山所含的物质成分、含量基本一致,指示该地区泥火山的发育具有同源性,并受相同的地质背景和构造控制。

稀土元素分布特征指示,泥火山泥浆的源岩 来自上地壳,且各样品稀土元素配分模式与澳大 利亚后太古宙页岩 PAAS 相似,稀土元素含量略 低,可能指示泥浆源岩形成时水动力较弱,水系 较稳定;所采样品微量元素配分曲线与页岩曲线 基本重合,与其他类型沉积物差别较大。对样品 进行微量元素地球化学特征分析,Sr含量及Sr/Ba 值均表明,源岩为陆相沉积日沉积时盐度较低。 判断沉积物氧化还原性的3个参数Ce/La、Ceanom、 V/(V+Ni)值分别为2.01×10⁻⁶ < Ce/La < 2.33×10⁻⁶ (平均值2.22×10⁻⁶),-0.038 < Ceanom < 0.017(平均 值-0.007),0.73 < V/(V+Ni) < 0.80(平均值0.78),均 表明源岩沉积环境为还原环境。Milkov等^[24]提出, 泥火山的成因与油气藏的形成和破坏密切相关,油 气藏形成所产生的超高压膨胀效应是导致泥火山 沿断裂通道运移并伴生天然气的重要原因。野外 观察发现,泥火山表面喷发物为致密的粘稠状灰黑 色、棕褐色液体,液体表面有大量具浓烈汽油味的 气泡不断冒出,为该观点提供了佐证。

刘洪军等^[60]、陈建平等^[61]认为,四棵树凹陷发育 以中下侏罗统泥页岩、煤层和古近系黑色泥岩为 主的多套烃源岩;况军等^[62]对四棵树凹陷油气生 成研究认为,托斯台地区油源来自侏罗系煤系, 通过凹陷中的TTI热演化剖面研究发现,凹陷内 有效烃源岩的埋藏深度为7000m;杨晓芳等^[63]对 北天山泥火山成因机制研究认为,托斯台背斜、 独山子背斜主要地层为侏罗系、白垩系和古近 系,并提出北天山独山子、霍尔果斯、四棵树等地 的泥火山是同源的。

四棵树、独山子、艾其沟泥火山处于托斯台及 独山子背斜上,石炭纪以来经历了海西期、印支期、 燕山期、喜山期多期次构造运动,形成复杂的挤压 褶皱和以基底深部断裂和浅部滑脱断裂为主的多 期断裂活动。受晚石炭世一二叠纪造山运动影响, 石炭纪形成的张性正断层逆冲反转,这些断裂在白 垩纪构造挤压过程中刺穿侏罗纪、白垩纪地层;喜 马拉雅中晚期,受印度板块和欧亚板块剧烈碰撞影 响,天山隆升产生的挤压力剧烈改造和破坏山前坳 陷带,北天山山前强烈的挤压作用切割了中、新生 代地层,形成一系列走滑构造体系⁶⁴。新近纪以来, 在印度板块的推挤作用下,近造山带基底断裂继续 活动并穿断至地表。区内独山子断裂形成于早、中 更新世之间,地表倾角为40°~60°,向下逐渐变缓,断 距加大,主断裂在8~9km深的侏罗纪下部煤系地层 中变为水平滑脱面,滑脱面上发育多个断坡,或出 露地表,或隐伏地下,断坡下部倾角为20°,上部可 达60°[65-66]。结合本文对四棵树、独山子、艾其沟泥 火山稀土、微量元素的研究,推测源岩发育于下侏 罗统八道湾组、三工河组,泥页岩厚度可达700m,泥 火山泥浆源岩的最大深度和中下侏罗统油气藏烃 源岩的深度大致相当,埋藏深度为7~8km。托斯台、 独山子背斜轴部产生许多次级断裂,与下部断坡 相互连通、错断,形成高效断裂输导体系,为泥火 山及油气运移提供通道,使该构造带大多见地表 油苗[64.67]。由于天山北缘中新生代碎屑岩沉积地层 地势较高,地下水因地势高低形成一定的水压差, 强烈的构造活动使中生代能干性较弱的岩层发生 破碎、泥化或溶解,地下深部的高压水携带极细粉 状或溶解的浆状页岩物质、油气藏物质组成的泥浆 不断向上部地层侵入和充注,或沿断裂带向上运 移,最终喷出地表形成泥火山。后期受天山水补 给,水压差保持相对稳定,从而使乌苏四棵树泥火 山不断喷发。

6 结 论

(1) 泥火山泥浆的源岩来自上地壳,各样品稀 土元素配分模式与澳大利亚后太古宙页岩 PAAS相 似,稀土元素含量略低,推测泥浆源岩形成时水动 力较弱,水系较稳定; Sr含量为202×10⁻⁶~534×10⁻⁶, Sr/Ba值在0.33~1.01之间,反映源岩为陆相沉积且 沉积时盐度较低。

(2) Ce/La(2.22)、Ce_{anom}(-0.007)、V/(V+Ni) (0.78) 值反映源岩形成时的弱还原-还原沉积环 境。结合稀土元素分布特征、泥火山喷口油气渗 漏、托斯台地区烃源岩埋藏深度及区内构造演化、 断裂穿透深度等信息,与乌苏地区地层剖面对比, 推测乌苏泥火山源岩发育于下侏罗统八道湾组、三 工河组,源岩的最大埋藏深度为7~8km,滑脱构造、 断坡及次级断裂形成高效的疏导体系,为泥火山的 运移提供通道。

致谢:感谢评审专家指导并提出宝贵的修改意 见,野外踏勘中得到天山草原站工作人员的帮助, 在此一并致谢。

参考文献

- [1]徐新,周可法,王煜. 西准噶尔晚古生代残余洋盆消亡时间与构造 背景研究[J]. 岩石学报,2010,26(11):3206-3214.
- [2]戴金星,吴小奇,倪云燕,等. 准噶尔盆地南缘泥火山天然气的地 球化学特征[J]. 中国科学:地球科学,2012,42(2):178-190.
- [3]曲国胜,马宗晋,陈新发,等.论准噶尔盆地构造及其演化[J]. 新疆 石油地质,2009,30(1):1-5.
- [4]梁云海,李文铅,李卫东.新疆准噶尔造山带多旋回开合构造特征[J].地质通报,2004,23(3):279-285.
- [5]朱宝清,冯益民. 新疆西准噶尔板块构造及演化[J]. 新疆地质, 1994,12(2):91-105.
- [6]高小其,梁卉,王海涛,等.北天山地区泥火山的地球化学成因[J]. 地震地质,2015,37(4):1215-1224.
- [7]高岗,柳广弟,王绪龙,等. 准噶尔盆地上三叠统泥页岩解析气特 征[J]. 天然气地球科学,2013,24(6):1284-1289.
- [8]董连慧,徐兴旺,屈迅,等.初论环准噶尔斑岩铜矿带的地质构造 背景与形成机制[J].岩石学报,2009,25(4):713-737.
- [9]陈书平,漆家福,于福生,等. 准噶尔盆地南缘构造变形特征及其 主控因素[J]. 地质学报,2007,81(2):151-157.
- [10]管树巍,李本亮,侯连华,等.准噶尔盆地西北缘下盘掩伏构造油 气勘探新领域[J].石油勘探与开发,2008,35(1):17-22.
- [11]李永军,王冉,李卫东,等.西准噶尔达尔布特南构造-岩浆岩带 斑岩型铜-钼矿新发现及找矿思路[J].岩石学报,2012,28(7): 2009-2014.
- [12]陈发景,汪新文,汪新伟. 准噶尔盆地的原型和构造演化[J]. 地学

前缘,2005,12(3):77-89.

- [13]马宗晋,曲国胜,陈新发.准噶尔盆地构造格架及分区[J].新疆石 油地质,2008,29(1):1-6.
- [14] 孟元库, 施发剑, 汪新文. 准噶尔盆地南缘四棵树凹陷构造变形 特征分析[J]. 宁波大学学报(理工版), 2012, 25(2):116-120.
- [15]张枝焕,向奎,秦黎明,等.准噶尔盆地四棵树凹陷烃源岩地球化 学特征及其对车排子凸起油气聚集的贡献[J].中国地质,2012, 39(2):326-337.
- [16]黄彦庆,侯读杰.准噶尔盆地四棵树凹陷原油地球化学特征分析[J].天然气地球科学,2009,20(2):282-286.
- [17]林潼,李文厚,孙平,等. 新疆准噶尔盆地南缘深层有利储层发育 的影响因素[J]. 地质通报,2013,32(9):1461-1470.
- [18]谭程鹏,于兴河,李胜利,等. 准噶尔盆地南缘八道湾组扇三角洲 露头基准面旋回与储层的响应关系[J]. 中国地质, 2014, 41(1): 197-205.
- [19]陈新,卢华复,舒良树,等. 准噶尔盆地构造演化分析新进展[J]. 高校地质学报,2002,8(3):257-267.
- [20]陈正乐,鲁克改,王果,等.准噶尔盆地南缘新生代构造特征及其 与砂岩型铀矿成矿作用初析[J].岩石学报,2010,26(2):457-470.
- [21]孙文军,赵淑娟,李三忠,等. 准噶尔盆地东部中生代构造迁移规律[]. 大地构造与成矿学,2014,38(1):52-61.
- [22]吴孔友,查明,王绪龙,等.准噶尔盆地构造演化与动力学背景再 认识[J].地球学报,2005,26(3):217-222.
- [23]徐芹芹,季建清,龚俊峰,等.新疆西准噶尔晚古生代以来构造样 式与变形序列研究[J].岩石学报,2009,25(3):636-644.
- [24]Milkov A V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates[J]. Marin Geology, 2000, 167(1): 29–42.
- [25]Avouac J P, Tap Ponniar P, Bai M, et al. Active thrusting and folding along the northern Tianshan and late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan[J]. Journal of Geophysicel Research, 1993, 98(B): 6755–6804.
- [26]林潼,李文厚,孙平,等. 新疆准噶尔盆地南缘深层有利储层发育 的影响因素[J]. 地质通报,2013,32(9):1461-1470.
- [27]余兴,孙远成,张秀敏,等.准噶尔盆地南缘四棵树凹陷构造样式 与油气藏类型[J].中国石油和化工标准与质量,2013,33(7):144.
- [28]曲国胜,马宗晋,张宁,等. 准噶尔盆地及周缘断裂构造特征[J]. 新疆石油地质,2008,29(3):290-295.
- [29]李锰,王道,李茂伟,戴晓敏.新疆独山子泥火山喷发特征的研究 [J].内陆地震,1996,10(4):359-362.
- [30]何家雄,卢振权,陈胜红,等.地球流体活动——火山、泥火山/泥 底辟及含气陷阱与油气运聚[C]//2014年中国地球科学联合学 术年会——专题10:流体地球科学与巨型成矿带及重大自然灾 害成因,2014:599-599.
- [31]王道,李茂玮,李锰,等. 新疆独山子泥火山喷发的初步研究[J]. 地震地质,1997,19(1):15-17.
- [32]段海岗,陈开远,史卜庆.南里海盆地泥火山构造及其对油气成 藏的影响[]].石油与天然气地质,2007,28(3):337-344.
- [33]何家雄,祝有海,马文宏,等.火山、泥火山/泥底辟及含气陷阱与 油气运聚关系[J].中国地质,2010,37(6):1720-1732.
- [34]孟祥君,张训华,韩波,张菲菲.海底泥火山地球物理特征[J].海

洋地质前沿,2012,28(12):6-9.

- [35]高苑,王永莉,郑国东,等. 新疆准噶尔盆地独山子泥火山天然气 地球化学特征[J]. 地球学报,2015,33(6):149-154.
- [36]马向贤,郑国东,郭正府,等. 准噶尔盆地南缘独山子泥火山温室 气体排放通量[]]. 科学通报,2014,59(32):3190-3196.
- [37]何家雄,祝有海,翁荣南,等.南海北部边缘盆地泥底辟及泥火山 特征及其与油气运聚关系[J].地球科学(中国地质大学学报), 2010,35(1):75-86.
- [38]曲国胜,马宗晋,邵学钟,等. 准噶尔盆地基底构造与地壳分层结构[]]. 新疆石油地质,2008,29(6):669-674.
- [39]胡霭琴,韦刚健.关于准噶尔盆地基底时代问题的讨论——据同 位素年代学研究结果[]].新疆地质,2003,21(4):398-406.
- [40]杨宗仁,顾焕明. 准噶尔盆地基底性质及演化——航磁资料初步 处理结果讨论[]. 新疆石油地质,1987,8(2):37-45.
- [41]江远达. 关于准噶尔地区基底问题的初步探讨[J]. 新疆地质, 1984,2(1):11-16.
- [42] 雷振宇, 鲁兵, 蔚远江, 等. 准噶尔盆地西北缘构造演化与扇体形成和分布[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 86-91.
- [43] 孟家峰, 郭召杰, 方世虎. 准噶尔盆地西北缘冲断构造新解[J]. 地 学前缘, 2009, 16(3): 171-180.
- [44]晏文博,王国灿,李理,等. 准噶尔西北缘石炭-二叠纪构造转换 期变形分析及其地质意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2015,40(3):504-520.
- [45] 庄新明. 准噶尔盆地四棵树凹陷石油地质特征及勘探方向[J]. 新 疆地质,2006,24(4):429-433.
- [46]杨庚,王晓波,李本亮,等. 准噶尔盆地西北缘斜向挤压构造与油 气分布规律[J]. 石油与天然气地质,2009,30(1):26-32.
- [47]王伟锋,王毅,陆诗阔,等. 准噶尔盆地构造分区和变形样式[J]. 地震地质,1999,21(4):324-333.
- [48]申华梁. 准噶尔盆地米东区芦草沟组沉积学研究及有机地球化 学特征[D]. 成都理工大学硕士学位论文,2015.
- [49]刘小平,刘庆新,刘杰,等.黄骅坳陷沧东凹陷孔二段富有机质泥 页岩地球化学特征[]].岩性油气藏,2015,27(6):15-22.
- [50]吴陈君,张明峰,刘艳,等.四川盆地古生界泥页岩的地球化学特征[J].煤炭学报,2013,38(5):794-799.
- [51]胡广.中国东南部下白垩统黑色泥页岩的时限、形成环境及生烃 潜力[D].南京大学博士学位论文,2012.
- [52]李翔,刘招君,孙平昌,等.松辽盆地东南隆起区青山口组一段泥 页岩地球化学特征及地质意义[J].世界地质,2014,33(4):746-

757,767.

- [53]刘刚,周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用——以江 汉盆地潜江组为例[]]. 石油实验地质,2007,29(3):307-310,314.
- [54]彭海艳,陈洪德,向芳,等.微量元素分析在沉积环境识别中的应 用——以鄂尔多斯盆地东部二叠系山西组为例[J]. 新疆地质, 2006,24(2):202-205.
- [55]黄静,李琦,胡俊杰,等. 羌塘角木日地区中二叠统龙格组泥岩地 球化学特征及其地质意义[J]. 高校地质学报,2015,21(1):59-67.
- [56]范玉海,屈红军,王辉,等.微量元素分析在判别沉积介质环境中的应用——以鄂尔多斯盆地西部中区晚三叠世为例[J].中国地质,2012,39(2):382-389.
- [57]黄喜峰,钱壮志,逯东霞,等.贺兰山中南段奥陶系米钵山组的沉积环境与构造背景分析[J].地球学报,2009,30(11):65-71.
- [58]宋健,赵省民,陈登超,等.内蒙古西部额济纳旗及邻区二叠纪暗 色泥岩微量元素和稀土元素地球化学特征[J].地质学报,2012, 86(11):1773-1780.
- [59]范卫平,郑雷清,龚建华,刘玉香. 泥火山的形成及其与油气的关系[J]. 吐哈油气,2007,12(1):43-47.
- [60]刘洪军,段俊梅,秦黎明,等. 准噶尔盆地腹部及西南缘白垩系烃 源岩地球化学特征及沉积环境分析[J]. 地质科技情报,2013,32 (4):25-30.
- [61]陈建平,王绪龙,邓春萍,等. 准噶尔盆地南缘油气生成与分布规
 律——烃源岩地球化学特征与生烃史[J]. 石油学报,2015,36(7):
 767-780.
- [62]况军. 准噶尔盆地四棵树凹陷油气生成、运移及聚集探讨[J]. 石油实验地质,1992,14(3):272-281.
- [63]杨晓芳,于红梅,赵波,等.新疆北天山泥火山固体喷出物特征及成因机制初探[J]. 地震地质,2014,36(1):123-136.
- [64]孙永河,吕延防,付晓飞,等. 准噶尔盆地南缘褶皱冲断带断裂输 导石油效率评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2008,38(3): 430-436.
- [65]陈伟,郝晋进,张健,等. 准噶尔盆地南缘托斯台背斜的几何学分 析[J]. 石油学报,2011,32(1):90-94.
- [66]邓起东,冯先岳,张培震,等.乌鲁木齐山前坳陷逆断裂-褶皱带 及其形成机制[J].地学前缘,1999,6(4):191-201.
- [67]张闻林,况军,王立宏,等. 独山子油田成藏机制剖析[J]. 天然气勘探与开发,1999,22(3):20-24.
- ①新疆地质局区域地质测量大队.乌苏幅地质矿产图(1: 200000).1973.