

台湾西南部乌山顶泥火山的成因机制初探

朱婷婷¹, 陆现彩¹, 祝幼华², 胡文瑄¹

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210093; 2. 中国科学院南京地质古生物研究所, 江苏南京 210008)

摘要: 乌山顶泥火山位于台湾西南部旗山断层沿线。由于台湾西南部具有独特的地质构造背景, 沿着古亭坑背斜和旗山断层沿线分布了许多泥火山。本文以乌山顶泥火山为例, 研究泥火山的成因。在了解泥火山地质背景、活动现状的基础上, 分析了喷出物的矿物组成、古生物组合、流体地球化学特征。喷出的主要矿物有石英、伊利石、高岭石-蒙脱石混层矿物、伊利石-蒙脱石混层矿物, 古生物有 *Reticulofenestra minuta*、*Sphenolithus abies* 等, 流体中的离子主要是 Cl^- 、 Na^+ 等。由此探讨了泥浆来源和成因机制, 认为泥火山的活动与深部古亭坑组地层存在异常高压有关, 构造活动是泥火山活动的主要诱发因素。

关键词: 泥火山; 成因机制; 异常高压; 乌山顶; 台湾

中图分类号: P317.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)05-0465-08

A preliminary genetic study of the Wushanding mud volcano in southwestern Taiwan

ZHU Ting-ting¹, LU Xian-cai¹, ZHU You-hua² and HU Wen-xuan¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The Wushanding mud volcano is located along the Chishan fault in southwestern Taiwan. Due to the unique tectonic setting, there exist many mud volcanoes along the Gutingkeng anticline and the Chishan fault in southwestern Taiwan. Investigation was conducted on the genesis of the Wushanding volcano. Based on a field investigation of the Wushanding mud volcano, the authors analyzed mineral components, fluid geochemistry and micropalaeontological assemblage of the muddy eruption. The main mineral components include quartz, illite, kaolinite-smectite, illite-smectite, with such fossils as *Reticulofenestra minuta* and *Sphenolithus abies*. Fluid ions are composed mainly of Cl^- and Na^+ . It is thought that both the overpressure of the Gutingkeng Formation and the structural extrusion in Quaternary must have played the crucial roles in the formation and activity of the mud volcano.

Key words: mud volcano; genetic mechanism; overpressure; Wushanding; Taiwan

泥火山的分布并不广泛, 迄今已有报道的泥火山约有 900 个, 主要分布于印度尼西亚、俄罗斯、中国台湾岛、特立尼达岛和巴巴多斯岛 (Milkov, 2000), 其中印度尼西亚的爪哇岛、伊朗的马克兰、罗马尼亚的布扎、阿塞拜疆的巴库以及美国的黄石公园等较为著名。泥火山一般形成于构造挤压区域,

通常需要以下地质条件: ①深部具有丰富的泥质地层, 且具有较高的孔隙流体压力, 常常和超压现象密切相关; ②具有能够维持深部沉积物高孔隙流体压力的封隔层, 通常为泥质岩层; ③具有深部泥质喷出的通道, 允许气体和泥浆的涌出, 多与活动性断层有关; ④需要触发泥火山活动的动力机制, 往往是断层

活动(Milkov, 2000; 高小其等, 2008)。

台湾西南部有 3 个泥火山活动区,目前活动的泥火山共有 17 座(You *et al.*, 2004),分别位于台南、高雄交界处的古亭坑背斜轴部沿线、高雄县燕山乡境内的旗山断层沿线以及高屏海岸平原(图 1)。泥火山在古亭坑背斜沿线、旗山断层沿线比较密集,而在高屏海岸平原分布较分散。古亭坑背斜与旗山断层大致呈两条平行线。其中,旗山断层沿线的泥火山最为密集,活动也比较剧烈,乌山顶则是位于该带南部最大的一座泥火山。前人对本区泥火山的喷出物开展了部分地球化学研究,Gieskes 等(1992)分析了数座泥火山喷出流体的氢氧同位素,认为海水是喷出流体的主要来源,后受粘土矿物成岩脱水作用的影响。Yang 等(2004)着重研究了处于活动期的泥火山(包括乌山顶泥火山)的喷出气体和流体的地球化学特征,发现古亭坑背斜活动区和旗山断层活动区泥火山喷出物中含有丰富的气相,气体以 CH_4 为主,含量可达 92% 以上,但亦有个别泥火山呈现富 CO_2 的特征;He 同位素组成显示地壳来源特征,但不排除地幔物质的混入(Yang *et al.*, 2003)。

本文在考察台湾西南部泥火山区的基础上,针对前人对固态喷出物研究相对薄弱、对物源缺乏清晰认识的状况,系统分析了乌山顶泥火山喷出物的矿物学、地球化学和古生物学分析,试图探讨泥火山的形成机制。

1 地质背景

台湾位于欧亚板块和菲律宾板块的碰撞带,在其西南部发育有典型的增生楔,发育有一套上新统一更新统(5~0.5 Ma)砂泥岩组合,泥岩厚度约为 4 000~5 000 m。上新统泥岩称作“南化泥岩”,富含沉积有机质,更新统较上新统含有更多的砂岩,这一沉积体系具有生成和聚集油气的潜力(Chiu *et al.*, 2006)。

古亭坑背斜为一紧闭褶皱,两翼岩层倾角高达 60° ,轴部张性裂隙发育,为深部物质上涌提供了通道。区内出露上新统南化组泥岩,厚度在 2 000 m 以上。沿古亭坑背斜轴线有 5 座泥火山呈近等距线状分布(图 1)。

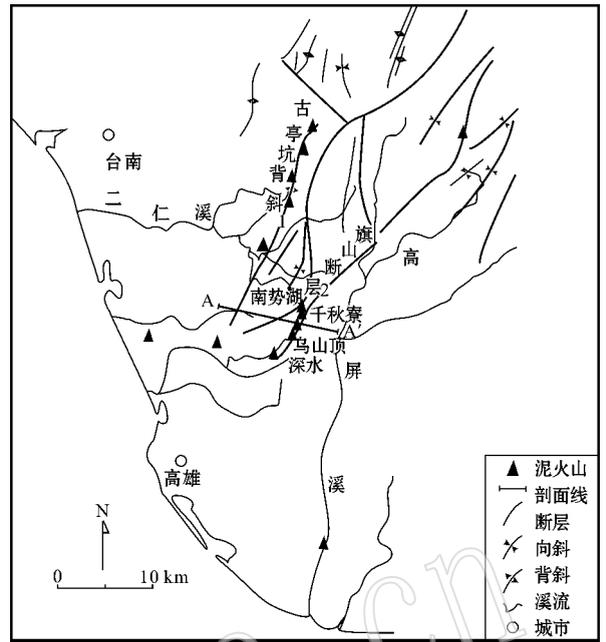


图 1 中国台湾西南部泥火山分布示意图(根据 You 等(2004)修绘,AA'为测线剖面)

Fig. 1 Distribution of mud volcanoes in southwestern Taiwan (after You *et al.*, 2004, Line AA' stands for the section)

旗山断层北起高雄县三民乡,南至燕巢乡,长约 65 km,为一东北-西南向逆断层,倾向南东。断层东侧为上冲的大窝组细砂岩,西侧分为南北两段,北段为南化组泥岩,南段出露关庙组细砂岩(图 2)。沿断层有泥火山 5 座,喷出泥浆的含砂量有向南增高的趋势^①。

旗山断层沿线存在若干座泥火山,包括养女湖、乌山顶、新养女湖和燕巢泥火山等。其中乌山顶泥火山是其中最高大的一座泥火山,高约 3.5 m,坡度约 50° ,是一座标准的喷泥锥(图 3a)。每隔数秒即喷发一次,喷出的泥浆非常浓稠,在锥口形成直径约 50 cm 的泥泡,喷出物表面还漂浮着一层黑色的油,喷出的气体可以点燃,点燃后的火焰约有 1 m 高(图 3b)。不断喷出的泥浆沿着锥面流淌形成舌状泥流,可流至距喷口约 70 m 处。据 Yang 等(2004)取样分析,该泥火山喷出气的流量可达 1.39 L/min , CH_4 的含量高达 99.05%~99.43%, N_2 含量为 0.18%~0.41%, CO_2 含量 0.39%~0.66%, He 含量约 $16.0 \times 10^{-6} \sim 24.7 \times 10^{-6}$ 。从气体的化学组

① 王鑫, 陈美玲, 杨建夫. 1988. 台湾泥火山地形景观. 台湾省立博物馆年刊, 31: 31~49.

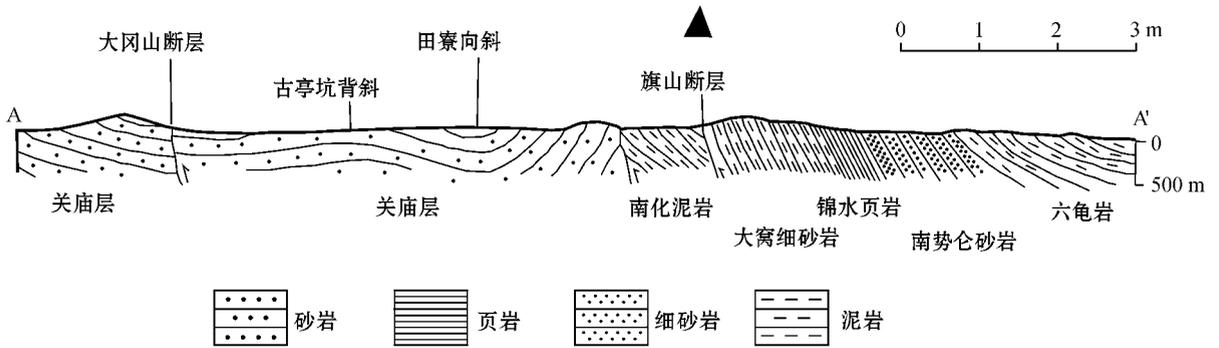


图 2 AA 测线剖面图(黑色三角形为乌山顶泥火山的位置)

Fig. 2 Section of Line AA (triangle marks the location of the Wushanding mud volcano)



图 3 乌山顶泥火山

Fig. 3 The Wushanding mud volcano

a—乌山顶最大的泥火山喷泥锥；b—喷出气体可点燃；c—泥浆的表面油斑和喷出的泥泡

a—the largest mud volcano in Wushanding；b—the emitted gas, which can be ignited；c—bubbles and flowing oil

成上看,旗山断裂带附近泥火山的喷出气体来自浅部地层(Yang *et al.* , 2004)。喷出流体具有富 Cl^- 和高离子强度的特征(Chen , 1975),与区内的热泉流体相似。

2 喷出物特征

2.1 水化学特征

2008 年 7 月 现场采集泥质喷出物后 经高速离

心获得喷出液样品。用液相色谱法分析了阴阳离子的含量 检测按照 DZ/T 0064-1993《地下水水质检验方法》、DZ/T 0130. 6-2006《地质矿产实验室测试质量管理规范》,分析工作由南京地质矿产研究所完成,分析仪器为戴安公司 ICS-1500 专业型离子色谱仪,分析结果如表 1。由表 1 可知 泥质喷出流体具有相对较高的盐度,阴离子以 Cl^- 为主,阳离子以 Na^+ 为主 另外, K^+ 、 Mg^{2+} 的含量亦不可忽视。从阴阳离子平衡状况推测, CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 离子含量应较低,

表 1 乌山顶泥火山的水化学数据

mg/L

Table 1 Chemical composition of erupted fluids of the Wushanding mud volcano

| 采集时间 | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | NO ₃ ⁻ | PO ₄ ³⁻ | Ca ²⁺ | K ⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | 来源 |
|------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------|----------------|------------------|-----------------|--------------------------|
| 2008/07/14 | 3 530.0 | 1 550.0 | 343.7 | <0.5 | 26.0 | 26.0 | 54.0 | 3 480.0 | 本文 |
| 2002/02/26 | 3 266.0 | 35.0 | 101.1 | - | 8.0 | 23.8 | 7.9 | 2 530.0 | Yeh <i>et al.</i> , 2005 |
| 2002/07/25 | 3 341.0 | 36.0 | 99.8 | - | 8.8 | 24.6 | 8.6 | 2 875.0 | Yeh <i>et al.</i> , 2005 |
| 2003 | 4 118.0 | 163.2 | - | - | 5.2 | 3 783.0 | 14.6 | 3 565.0 | You <i>et al.</i> , 2004 |

-表示未检出。

Ca²⁺则相对较高。对比前人分析结果,可以发现,不同时间所取样品的化学特征存在明显的差异,特别是SO₄²⁻、K⁺的含量差异较大,但是Cl⁻、Na⁺的含量基本上保持稳定。说明在泥火山喷发过程中,喷出流体一直具有高矿化度的特征,SO₄²⁻、K⁺含量的变化可能与泥浆源区发生变化有关,具体原因还有待通过持续取样、化学分析等深入研究。

2.2 矿物组成

利用扫描电镜(内生金属矿床成矿机制国家重点实验室,型号 Hitachi H600A-II。样品表面喷铂金,高真空模式,加速电压 20 kV,最大束流 2 μA)观察风干后的泥质喷出物,发现以粘土矿物和石英粉砂为主,石英粉砂多在 20 μm 以下,粘土矿物多呈不规则片状,局部见有针状或薄片状矿物,可能为自生粘土矿物(图 4),根据能谱分析结果,粘土矿物主要为混层粘土矿物、高岭石和少量绿泥石,但显示出存在长石碎屑物(图 4)。

将喷出泥浆风干后研磨后做 KI 压片,利用 Bede

D/MAX-3A 型 X 射线衍射仪(内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室)进行矿物相分析。工作条件为:铜靶,40 kV,50 mA,狭缝 1°/1°,积分时间 0.03 min,步长 0.02°。分析结果显示,泥质喷出物中含有石英、伊利石、高岭石-蒙脱石混层矿物、伊利石-蒙脱石混层矿物(图 5),但未见有相对纯的蒙脱石矿物。

2.3 微体古生物学特征

样品采用直接涂片法制备光学玻片,在偏光显微镜下(显微镜型号为 Leitz Ortholux II POL-BK)放大 1 250 倍鉴定,共发现钙质超微化石 9 属 17 种(表 2),化石保存较差。由表 3 可知,泥质喷出物中含有不同时代的钙质超微化石,具有典型的混合特征,表明泥浆在喷出前有显著的混合作用。从化石组合面貌分析,喷出物应来自早中新世或上新世以来的地层,与研究区内分布的上新统泥质地层的时代基本相符。但由于检出 *D. deflandrei* 和 *S. belemnos*,故不能排除年龄更老、埋藏更深地层物质的部分混入。

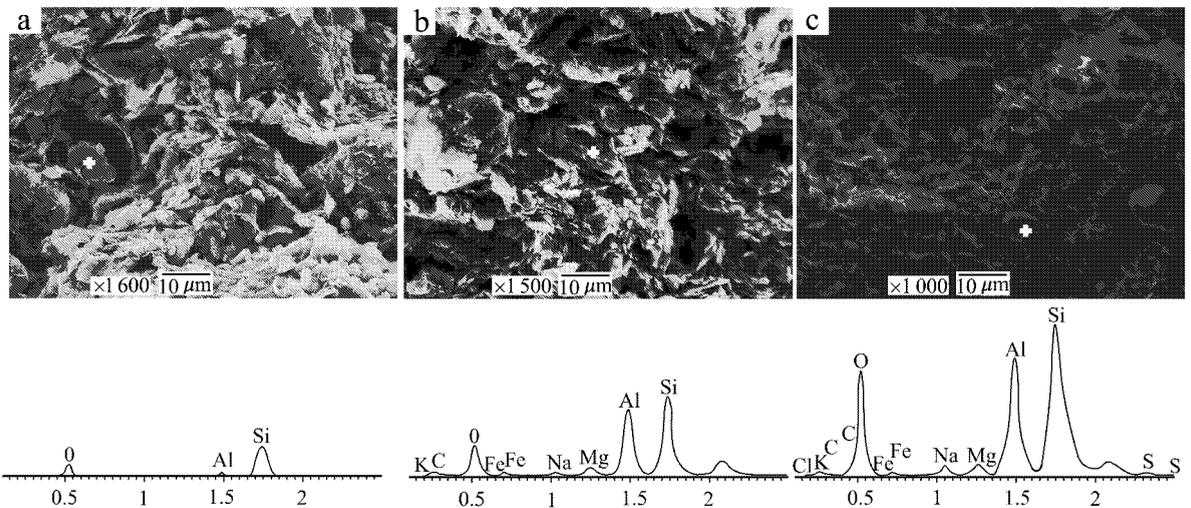


图 4 扫描电子显微镜照片和能谱分析结果

Fig. 4 SEM images and energy spectrum analyses of the mud

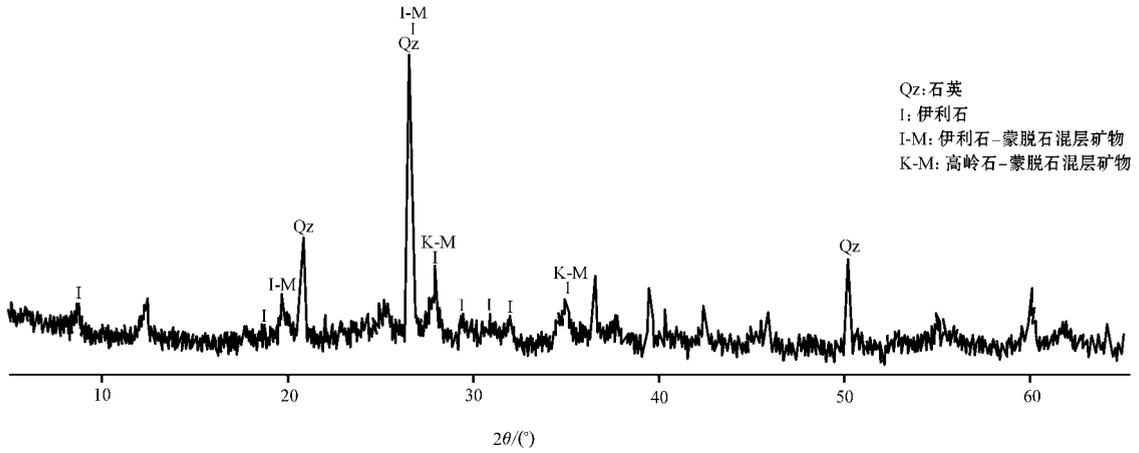


图 5 XRD 衍射光谱

Fig. 5 XRD spectrum of the mud

表 2 喷出泥浆中的钙质超微化石鉴定结果

Table 2 Calcareous microfossils in the erupted mud

| 化石 | 丰度 | 化石带 | 分布时代 |
|--------------------------------|----|-------------|-----------|
| <i>Calcidiscus leptoporus</i> | P | NN2-NN21 带 | 早中新世-第四纪 |
| <i>C. macintyreii</i> | R | NN7-NN18 带 | 中新世-晚上新世 |
| <i>Coccolithus pelagicus</i> | P | 古新世-NN21 带 | 古新世-第四纪 |
| <i>Discoaster berggrenii</i> | P | NN11 带 | 晚中新世 |
| <i>D. brouweri</i> | R | NN8-NN18 带 | 中新世-晚上新世 |
| <i>D. deflandrei</i> | P | NP11-NN7 带 | 始新世-中中新世 |
| <i>D. exilis</i> | P | NN5-NN8 带 | 中中新世 |
| <i>D. pentaradiatus</i> | R | NN9-NN17 带 | 中新世-晚上新世 |
| <i>Helicosphaera carteri</i> | P | NN1-NN21 带 | 早中新世-第四纪 |
| <i>H. kamptneri</i> | P | NN1-NN21 带 | 早中新世-第四纪 |
| <i>Gephyrocapsa oceanica</i> | R | NN19-NN21 带 | 第四纪 |
| <i>Pseudoemiliana lacunosa</i> | P | NN15-NN19 带 | 早上新世-第四纪 |
| <i>Reticulofenestra minuta</i> | F | NN2-NN16 带 | 早中新世-晚上新世 |
| <i>R. pseudoumbilica</i> | R | NN4-NN15 带 | 早中新世-早上新世 |
| <i>Sphenolithus abies</i> | F | NN9-NN15 带 | 中新世-早上新世 |
| <i>S. belemnus</i> | P | NN2-NN3 带 | 早中新世 |
| <i>Umbilicosphaera rotula</i> | P | NN2-NN16 带 | 早中新世-晚上新世 |

注：F(较少)=1/(2~10)FOV(2至10个视域见1粒化石)；R(稀少)=1/(11~50)FOV；P(贫乏)<1/50 FOV。

表 3 台湾西南部地区新生界部分地层特征(据陈时祖, 1994)

Table 3 Characteristics of Cenozoic strata in southwestern Taiwan (after Chen Shizu, 1994)

| 地质年代 | 地层 | 岩石性质 |
|------|---------------|---|
| 更新世 | 关庙层(六双层及二重溪层) | 疏松细粒至粉砂质块状厚层浅灰色砂岩, 夹青灰色泥岩。底部及顶部夹石灰岩层。局部含薄层砾岩。 |
| 上新世 | 南化泥岩(古亭坑层) | 青灰及暗灰色泥岩, 夹少量薄砂岩, 风化后形成恶地。顶部为青灰色泥岩与松砂岩之互层, 夹石灰岩层。 |
| | 北寮页岩 | 暗灰色或青灰页岩及砂质页岩为主, 夹有黄褐色泥质砂岩薄层。局部夹有灰色粉砂岩及细砂岩页岩互层。 |
| 中新世 | 茅埔页岩 | 黑色页岩为主, 夹有灰色泥质砂岩, 及细粒砂岩。 |
| | 盐水坑页岩 | 黑灰色页岩为主, 含有黄灰色砂岩或石灰质砂岩, 此砂岩多呈扁豆状。 |

3 泥火山形成机制探讨

3.1 泥浆来源

喷出物表面中见有油膜并含有丰富的 CH_4 气体,可能为深部的源区地层进入生烃门限而生成油气的表现。据 You 等(2004)研究,该泥火山喷出甲烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -38‰ ,更接近热催化降解阶段形成的伴生甲烷。由微体化石分析可知,泥浆来自上新统及其上覆的更年轻的泥质地层,这些地层包括富含有机质的南化泥岩(表 3),其最大埋藏深度均达 3 000 m 左右,已经进入生烃门限(根据地温梯度为 $30\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ 估算)。沉积物中的有机质会分解生成原油和 CH_4 等气体,并伴有 CO_2 和有机酸生成。 CO_2 和有机酸会导致沉积岩中的方解石分解,导致岩层更为松散、易于泥化。另外,在此深度区间内,伴随着生烃作用,碎屑粘土中的蒙脱石层一般会发生伊利石化,从而释放出大量的流体(Hunt, 1990), Yeh 等(2005)获得的 $\delta^{18}\text{O}$ 值也支持粘土脱水作用的贡献,这些流体对于泥浆的形成有着重要意义。

Martin 等(1996)首次分析了台湾泥火山的喷出流体,认为流体来源较深的地层,这一认识后被 Yeh 等(2002)的研究进一步证实。虽然不同构造背景下的泥火山在不同喷发阶段的喷出物成分不尽相同,但本次研究和前人的分析都表明,流体中 Na^+ 和 Cl^- 的含量较高,指示其来源相对较深,为成岩中晚期阶段的地层卤水。当然,也有人将此特征解释为海水来源的原生孔隙水(Gieskes *et al.*, 1992),与泥质喷出物具有同源性,但受成岩作用的一定影响。

喷出泥浆的固体物质以粘土矿物和石英为主,未检出方解石。表明泥浆的源区地层可能未发生胶结作用,也可能早期胶结的方解石在后期被溶解而消失,与 CO_2 、有机酸的溶蚀作用有关,这可能是孔隙水富集 Ca^{2+} 的原因。Yeh 等(2005)通过水化学离子平衡计算,也发现了孔隙水具有外来 Ca^{2+} 的加入,认为是斜长石溶解造成的。本研究喷出流体的 Ca^{2+} 离子含量远高于 Yeh 等(2005)的分析结果,鉴于泥质喷出物中尚能发现斜长石碎屑(图 4),说明 Ca^{2+} 的来源可能主要是碳酸盐矿物,而非斜长石。喷出泥浆中不含蒙脱石,说明泥浆来源区温度很高,应在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,根据该区地温梯度计算,对应深度约为 2 500 m 以下,这与前文有关生烃作用的认识亦一致。

综上所述,乌山顶泥火山的喷发物主要来自于深部上新统富含有机质的泥质地层古亭坑组及其生烃产物。该地层的年龄约为 1.8~1.25 Ma,厚度约为 1 100 m,若不考虑成岩压实作用,该地层的平均沉积速率超过 $1\text{ km}/\text{Ma}$,如此之快的快速沉积一般会导致欠压实作用,导致地层流体含量丰富,有利于泥浆的形成。

3.2 孔隙流体压力的聚集

泥火山的形成需要泥质的源区具有较高的地层压力,在泥火山成因研究中,深部泥质地层孔隙流体压力增高对泥火山形成的重要意义在近期得到了更为深入的讨论(Mazzini *et al.*, 2007; Normile, 2008)。乌山顶泥火山深部地层的压力可能来自快速沉积超压、生烃作用增压和构造应力加压等 3 个方面。

自上新世以来的盆地快速沉积,是造成超压现象的主要原因之一。根据 Nordgard 等(2004)计算,沉积速率高于 $160\text{ m}/\text{Ma}$ 时会导致地层的异常高压现象。古亭坑组高达 $1\text{ km}/\text{Ma}$ 的快速沉积不仅仅会导致沉积物的含水量异常高,而且会造成地层具有异常高的孔隙流体压力。

深部地层的生烃作用亦会导致较高的地层压力。据王新洲等(1996)模拟实验结果计算,干酪根降解可以产生大量的气体,在同等温压条件下,体积可以增加 200 多倍,在理想封隔层存在的条件下,即便考虑 CO_2 的溶解作用,也无疑可以产生巨大的异常高压。研究区内具有大量的富含有机质的泥质地层,并在喷口已经观察到了油气显示,因此,泥浆源区地层的生烃作用导致的膨胀增压不容忽视。

台湾位于板块碰撞带,活动造山带发育(Lacombe *et al.*, 2004)。长期以来,古亭坑背斜与旗山断层均处于构造挤压带,构造应力也对地层压力积聚有着重要的贡献(罗晓容, 2004)。由更新世时期的构造应力场(图 6)可知,古亭坑背斜和旗山断层的走向都垂直于该应力方向,那么超高压段不仅受到上覆岩石的重力还要受到侧向的构造挤压力,使沉积物的孔隙流体压力进一步增高,更容易达到上覆封隔层的突破压力而释放,宏观上表现为泥底辟或者泥火山。

古亭坑组既是泥质喷出物的物源,同时也是深部压力得以积聚的封隔层。该层段以富含有机质的青灰色泥岩为主,夹有数层胶结松散的砂岩层。前人研究表明(Luo *et al.*, 2006)在砂岩和泥岩的接触处

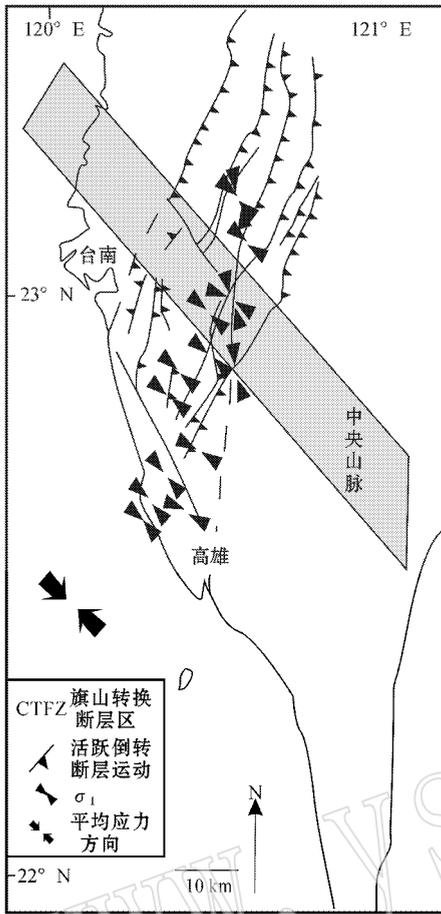


图6 更新世时该区域的应力场(据 Lacombe *et al.*, 2001 修改)

Fig. 6 Stress field of this area in Pleistocene (after Lacombe *et al.*, 2001)

常出现压力梯度的变化。砂岩的渗透率较高,因此在砂岩层内压力梯度大大减小,砂岩内部压力与静水压相等;而泥岩层渗透率很低,当由砂岩层过渡为泥岩层时,泥岩充当阻挡层,砂岩中贮存的水无法排出,因此在砂岩和页岩的接触带压力梯度骤增。在泥岩层内,压力梯度又逐渐回复正常,压力介于静水压和静岩压之间。

在侧向的构造挤压力、快速沉积造成的欠压实超压作用、生烃膨胀作用等的共同作用下,孔隙流体压力逐渐积累、上升,为泥火山的喷发准备了条件。

3.3 诱发因素

构造活动(包括地震)和人为干扰(如钻探)被认为是泥火山喷发的主要诱发条件。尤其是爪哇岛泥火山喷发以来,相关的讨论日渐增加(Mazzini *et al.*, 2007; Normile, 2008),台湾西南部广泛存在着逆冲和后期的逃逸构造(Lacombe *et al.*, 2001;

Ching *et al.*, 2007)。台湾西南部泥火山几乎都沿着背斜轴部或断层分布(图1),这是由于背斜轴部产生许多张裂隙,旗山断层的断层面也是天然裂隙,这些裂隙为物质上涌提供了通道。

此外,背斜轴部以及断层上冲盘的快速剥蚀导致下伏岩石压力减小,使孔隙流体中的溶解相气体的溶解度下降而分离,导致增压或为向上运移提供动力,使处于超压状态的古亭坑层中的泥浆喷出。泥火山的间歇喷发是因为积聚压力的速率小于喷发出泥浆和气体降压的速率,因此喷发一次之后,需要一定时间累积 CH_4 等高压气体、超高水压以及侧向压力才能够发生下一次喷发,也可能与物质供应不足或通道不畅有关。

4 结论

(1)通过泥质喷出物中的超微古生物化石的分析,发现微体化石组和具有显著的混合特征,指示泥浆在喷出前经过了混合作用。根据化石年代的分布判定,乌山顶泥火山喷出物主要来自深部上新统以新的泥质地层,喷出物中的甲烷和原油为泥岩沉积有机质生烃作用的产物。泥火山可能与南化泥岩地层存在的泥底辟作用有关。

(2)泥火山的形成与新生界富有机质泥岩巨厚沉积的成岩、生烃演化有关,并受构造活动的制约。深部地层的压力可能来自快速沉积超压、生烃作用增压和构造应力加压三方面因素为泥火山的形成提供了物质基础和压力条件,背斜构造轴部的张性裂隙和旗山逆冲断层使超压地层迅速减压,诱发了长期的泥火山作用。

致谢 台湾大学地理学院的林俊全教授在野外工作中的指导,台湾大学地理学院的陈文山老师提供了详细的地质背景资料。

References

- Chen C H. 1975. Origin of hot springs and geothermal exploration in Taiwan [J]. *Ti-Chih*, (2): 107~117.
- Chen Shizhu. 1994. The geologic engineering characteristic of mud stone in SW Taiwan [J]. *Geologic Engineering Technology*, (48): 25~33 (in Chinese).
- Ching K E, Rau R J, Lee J C, *et al.* 2007. Contemporary deformation of tectonic escape in SW Taiwan from GPS observations, 1995-

- 2005 [J]. Earth and Planetary Science Letters , 262 : 601 ~ 619.
- Chiu J K , Tseng W H and Liu C S. 2006. Distribution of gassy sediments and mud volcanoes offshore Southwestern Taiwan [J]. Terr. Atmos. Ocean. Sci. , 17 (4) : 703 ~ 722.
- Gao Xiaoqi , Wang Haitao , Gao Guoying , et al. 2008. Preliminary research on the relation between activities of horgos mud volcanoes and mid-strong earthquakes in xinjiang [J]. Seismic Geology , 28 (2) : 464 ~ 472 (in Chinese with English abstract).
- Gieskes J M , You C F , Lee T , et al. 1992. Hydro-geochemistry of mud volcanoes in Taiwan [J]. Acta Geol. Taiwan , 30 : 79 ~ 88.
- Hunt J M. 1990. Generation and Migration of Petroleum from Abnormally Pressured Fluid Compartments [J]. AAPG Bulletin , 74 (1) : 1 ~ 12.
- Lacombe O , Angelier J , Mouthereau F , et al. 2004. The Liuchiu Hsu island offshore SW Taiwan : tectonic versus diapiric anticline development and comparisons with onshore structures [J]. Comptes Rendus Géoscience , 336 (9) : 815 ~ 825.
- Lacombe O , Mouthereau F , Angelier J , et al. 2001. Structural , geodetic and seismological evidence for tectonic escape in SW Taiwan [J]. Tectonophysics , 333 : 323 ~ 345.
- Luo Xiaorong. 2004. Quantitative analysis on overpressuring mechanism resulted from tectonic stress [J]. Geophysics Transaction , 47 : 484 ~ 493 (in Chinese with English abstract).
- Luo Xiaorong , Liu Loujun and Li Xueyi. 2006. Overpressure distribution and pressuring mechanism on the southern margin of the Junggar Basin , Northwestern China [J]. Chinese Science Bulletin , 51 : 2 383 ~ 2 390.
- Martin J B , Kastner M , Henry P , et al. 1996. Chemical and isotopic evidence for sources of fluids in a mud volcano field seaward of the Barbados accretionary wedge [J]. J. Geophys. Res. , 101 : 20 325 ~ 20 345.
- Mazzini A , Sensen H , Akhmanov G G , et al. 2007. Triggering and dynamic evolution of the LUSI mud volcano , Indonesia [J]. Earth and planetary Science Letters , 261 : 375 ~ 388.
- Milkov A V. 2000. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates [J]. Marine Geology , 167 : 29 ~ 42.
- Nordgard Bolas H M , Hermanrud C and Teige G M G. 2004. Origin of overpressure in shales : constraints from basin modeling [J]. A. A. P. G. Bulletin , 88 (2) : 193 ~ 211.
- Normile D. 2008. Two years on , a mud volcano still rages-and be wilders [J]. Science , 320 : 1 406.
- Wang Xinzhou , Song Yitao and Wang Xuejun. 1996. Cause of Formation of Petroleum and Physical Simulation of Exclude Petroleum [M]. Dongying : Publisher of Petroleum University , 136 ~ 144 (in Chinese).
- Yang T F , Yeh G H , Fu C C , et al. 2004. Composition and exhalation flux of gases from mud volcanoes in Taiwan [J]. Environmental Geology , 46 : 1 003 ~ 1 011.
- Yang T F , Chou C Y , Chen C H , et al. 2003. Exhalation of radon and its carrier gases in SW Taiwan [J]. Radia. Meas. , 36 : 425 ~ 429.
- Yeh G H , Yang T F , Chen J C , et al. 2005. Fluid chemistry of mud volcanoes in Taiwan [A]. Martinelli G and Panahi B. Mud Volcanoes , Geodynamic and Seismicity [C]. Netherlands : Springer , 227 ~ 237.
- Yeh G H , You C F , Chen J C , et al. 2002. Fluid geochemistry of mud volcanoes at the accretionary prism in southern Taiwan [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta , 66 (s) : A862.
- You C F , Gieskes J M , Lee T , et al. 2004. Geochemistry of mud volcano fluids in the Taiwan accretionary prism [J]. Applied Geochemistry , 19 : 695 ~ 707.

附中文参考文献

- 陈时祖. 1994. 台湾西南部地区泥(页)岩之工程地质特性 [J]. 地工技术 (48) : 25 ~ 33.
- 高小其 , 王海涛 , 高国英 , 等. 2008. 霍尔果斯泥火山活动与新疆地区中强以上地震发生对应现象的研究 [J]. 地震地质 , 28 (2) : 464 ~ 472.
- 罗晓容. 2004. 构造应力超压机制的定量分析 [J]. 地球物理学报 , 47 : 484 ~ 493.
- 王新洲 , 宋一涛 , 王学军. 1996. 石油成因与排油物理模拟 [M]. 东营 : 石油大学出版社 , 136 ~ 144.