

裴军令, 刘锋, 胡云壮, 等. 河北平原第四纪火山岩时代[J]. 中国地质, 2015, 42(6): 1765–1773.

Pei Junling, Liu Feng, Hu Yunzhuang, et al. Timing of Quaternary volcanic rocks in Hebei plain[J]. *Geology in China*, 2015, 42(6): 1765–1773(in Chinese with English abstract).

河北平原第四纪火山岩时代

裴军令¹ 刘 锋¹ 胡云壮² 周在征¹ 李建锋¹ 赵 越¹

(1. 国土资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国地质调查局天津地质矿产研究所, 天津 300170)

摘要: 河北平原第四纪火山岩时代对理解华北东部新构造运动具有重要意义, 但是对其准确年龄一直缺少研究。位于河北省海兴县附近 CK3 孔岩心揭示了 4 次第四纪的火山活动。针对第 1 次火山岩底部样品开展 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 测试, 其年龄为 (2.36 ± 0.05) Ma。结合磁性地层研究结果, 限定了其他 3 次火山活动时代分别为约 1.3 Ma、35~70 ka 和 10~15 ka。

关键词: 河北平原; 第四纪火山岩; ⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学; 磁性地层学

中图分类号: P597+.3; P534.63 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2015)06-1765-09

Timing of Quaternary volcanic rocks in Hebei plain

PEI Jun-ling¹, LIU Feng¹, HU Yun-zhuang², ZHOU Zai-zheng¹, LI Jian-feng¹, ZHAO Yue¹

(1. *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction of Ministry of Land and Resources, Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*; 2. *Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Tianjin 300170, China*)

Abstract: It is important to date the Quaternary volcanic rocks for understanding the neotectonic activities in Hebei plain. The 500.25 meter drill hole CK3 located near Haixing Country of Hebei Province revealed 4 layers of volcanic rocks. The ⁴⁰Ar/³⁹Ar age of the first stage of Quaternary volcanic rocks is 2.36±0.05 Ma. Combined with the magnetostratigraphy of CK3 core, the time of volcanic activities in Hebei Plain should be about 1.3 Ma, 35–70 ka and 10–15 ka, respectively.

Key words: Hebei plain; Quaternary volcanic rock; ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology; magnetostratigraphy

About the first author: PEI Jun-ling, doctor, mainly engages in the study of tectonic geomorphology and neotectonic activity; E-mail: jlpei@qq.com.

中国第四纪火山分布地区较多, 主要包括东北地区的兴安岭、长白山及松辽分水岭, 华北地区的大同、山东蓬莱与无棣等地及河北, 华东南京附近、

安徽嘉山县与六合县, 青藏高原和台湾。华北第四纪火山作用研究一直主要以地表可见火山岩为主, 根据年龄数据认为火山活动主要在晚更新世到中

收稿日期: 2015-02-09; 改回日期: 2015-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172177)和中国地质调查局项目(1212011120085)联合资助。

作者简介: 裴军令, 1977年生, 男, 博士, 副研究员, 构造地质专业, 主要从事区域构造及构造地貌研究; E-mail: jlpei@qq.com。

更新世之间同时在山东和山西两地开始活动, 0.4 Ma 左右活动强烈, 至 0.1 Ma 左右结束^[1,2]。河北平原第四纪火山岩主要分布于沧州市周边及渤海滨海地区, 多保留在第四纪沉积层中, 地层剖面对比结果显示有五期火山活动^[3]。近年来随着活动构造调查、地热资源开发以及火山引起的气候、灾害研究的深入, 火山活动周期、火山岩精准年龄确定日益受到重视^[3]。火山岩年龄的确定方法主要有间接的地层关系对比、古地磁方法和直接的同位素测年法、释光测年法等。河北平原东部前期主要是地层对比确定分期^[2]。尽管磁性地层学和释光测年法近年来在火山岩时代的研究上取得了一定进展, 但仍是通过确定第四系沉积地层的时代来间接推算火山岩的年龄^[5,6]。可以确定的是河北平原在早更新世显然发生过强烈火山活动, 然而这一带多期火山岩仍缺少直接同位素年龄, 严重影响了对整个华北第四纪火山活动历史的认识。因此, 本文以河北海兴附近钻孔岩心为研究对象, 选取代表性火山岩开展⁴⁰Ar/³⁹Ar 测试, 结合磁性地层研究以准确厘定火山活动时代。

1 地质背景

河北平原东临渤海湾, 是新生代以来的构造沉降带。新近纪主要是一套棕红、紫、灰绿、棕黄等颜色的泥岩与砂岩互层的湖相沉积。第四纪地层在此之上连续沉积, 岩相、沉积厚度等变化大。近年多个钻孔研究结果说明河北平原东部滨海的南堡凹陷地区第四纪地层厚度最大, 并且根据磁性地层学及海侵事件对比等方法建立和完善了河北平原第四纪地层时代框架^[7-16]。

新生代太平洋俯冲板片对华北可能产生的由下而上的影响控制华北东部, 华北克拉通破坏, 岩石圈处于伸展减薄环境, 在构造上表现为广泛发育的正断层地堑式或裂谷型盆地, 形成如松辽—下辽河—冀中及其两侧的裂谷系^[17-19]。渤海湾西岸在大地构造位置上属华北拗陷区, 其中包括冀中拗陷、沧县隆起、黄骅拗陷、埕宁隆起和济阳拗陷等三级构造单元。本次研究钻孔 (CK3) 位于埕宁隆起与黄骅拗陷交界带, 邻近海兴县小山^[6] (图 1)。小山是一火山堆积物构成的隆丘, 位于海兴县城东北 3 km, 东距渤海湾约 23.5 km, 山顶海拔 35.11 m, 高出

地表约 30 m^[20]。呈向南开口的椅状隆丘, 东翼、北翼高于西翼, 且出露较好, 西翼大部伏于地表之下。东翼、北翼地表所见火山堆积主要为岩屑凝灰岩、沉凝灰岩、凝灰质砂层与黏土层等^[3]。ESR 测试结果认为小山火山活动时代为晚更新世晚期^[5]。

CK3 孔孔深 500.25 m, 沉积地层主要为黄棕色、棕褐色泛滥平原相黏土质粉砂、粉砂质黏土或黏土沉积, 少见棕灰色—灰绿色湖相细粒沉积, 另外累计钻遇 83.9 m 砂层。CK3 孔共揭示火山岩或沉凝灰岩 4 层, 由上至下分别为: 13.14~16.18 m 灰橄榄色玄武质沉凝灰岩, 33.37~48.02 m 暗灰色玄武质角砾岩、玄武质沉凝灰岩、玄武质火山碎屑岩, 145.8~154.05 m 灰绿色玄武质沉凝灰岩、玄武质凝灰角砾岩, 222.16~233.80 m 灰黑色—黑色玄武岩夹玄武质凝灰岩。

2 实验与结果

岩心中最下层火山岩为玄武岩, 呈块状构造, 致密, 细—微细粒构造, 见气孔和杏仁构造, 下伏沉积岩层接触带见烧烤现象 (图 2)。年龄样品取自该层靠近底部位置新鲜玄武岩。本区已知玄武岩主要由中拉长石、辉石、少量橄榄石、铁矿物及玻璃质组成, 部分出现伊丁石化^[3]。样品处理及测试在美国俄勒冈州立大学地质年代学实验室 (OSU Argon Geochronology Lab CEOAS Oregon State University, Corvallis, USA) 完成。将野外采集样品初步粉碎成小块, 选择无风化边, 无裂隙充填物的新鲜无蚀变岩石进一步破碎, 用钢制碎样器反复对岩石样品进行破碎至 250~500 μm。碎样后即倒入样品筛中进于显微镜下人工剔除斑晶和包体, 剔除斑晶和包体后的基质作为测试对象。将筛选好的样品置于加热至 50℃ 的超声波清洗池用浓度为 1 N 的硝酸浸泡 20 min, 然后再用超纯净水清洗后, 低温 (70℃ 左右) 烘干。用铜箔纸包装, 密封于真空石英瓶中, 送至美国俄勒冈州立大学 TRIGA 核反应堆进行照射。照射后的样品通过 10 W CO₂ 激光器阶段加热释放出气体, 然后在惰性质谱仪 MAP-215/50 进行 Ar 同位素分析。上述前处理及测试的具体方法及流程参见文献 [21]。样品年龄计算采用 ArArCALC 软件^[22], 结果显示 CK3 孔第 1 期火山岩底部玄武岩样品坪年龄为 (2.36 ± 0.05) Ma, MSWD 为 0.68, 与反等时线年龄

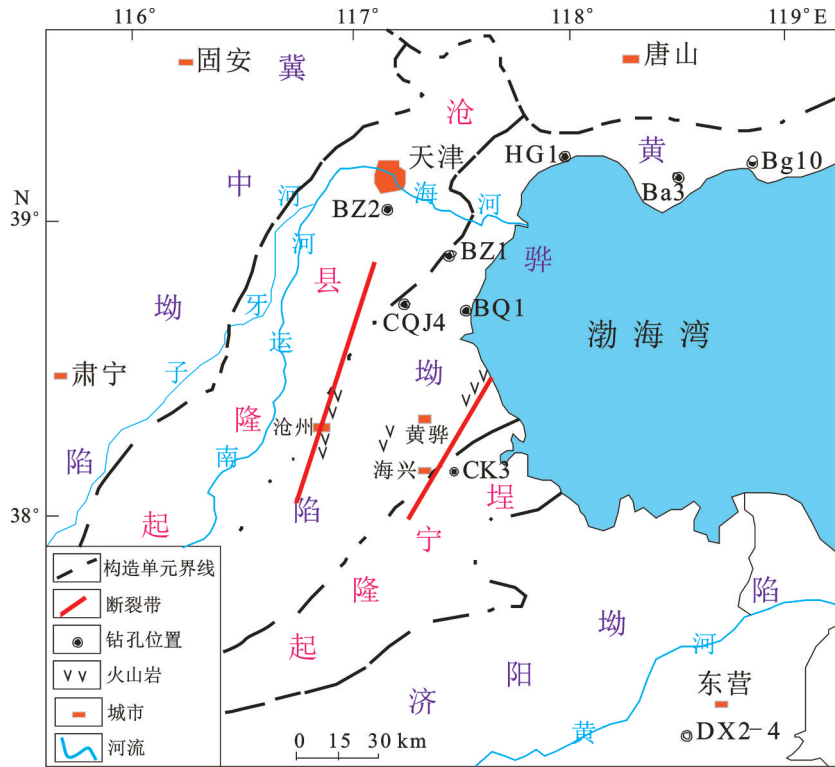


图1 研究区地质构造单元及钻孔位置图(据文献[6]修改)

Fig.1 Geological map of the study area and location of CK3 drill hole

(2.29 ± 0.13) Ma 较为一致(图3)。反等时线初始氩(314.23 ± 25.92) 略大于大气 $^{40}\text{Ar} / ^{36}\text{Ar}$, 但在误差范围内。因此, $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ 测试结果是可靠的。

3 讨论

3.1 CK3孔火山岩时代

磁极性地层学起源于科学家在第四纪的熔岩发现与现今磁场方向相反的天然剩磁现象。文献[23]对晚中新世以来的火山岩进行系统的古地磁研究并结合同位素年代学测定结果, 首次建立了4.5 Ma 以来的地磁极性年表。经历多年多学科发展与验证, 第四纪标准地磁极性得到公认, 鉴于极性倒转的全球性和非重复性, 具有地质年代界限的全球同时性, 因此成为地层时代、全球气候变化等多个学科不可替代的方法之一。CK3孔磁性地层研究的测试工作在国土资源部古地磁与古构造重建重点实验室利用超导磁力仪经过系统的热退磁和交变退磁获得, 为揭示第四纪以来4期火山岩提供了时代框架^[6]。从老至新推算年龄分别为: 第1期位于 Olduvai 极性亚时以下, 其年代约为 2.12 Ma;

第2期位于 Jaramillo 下界, 其年代约为 1.34 Ma; 第3期处于区域第2与第3海侵层之间, 其年代对应于 35~70 ka; 第4期处于第1与第2海侵层之间, 其年代对应于 10~15 ka^[6](图4)。

本文在 CK3 孔第1期火山岩底部玄武岩的 $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ 定年结果显示其为 (2.36 ± 0.05) Ma, 与磁性地层学推算的约 2.12 Ma 年龄存在差异。造成这一差异的原因是 $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ 测试结果偏老还是磁极性序列对比出现偏差? 同一期火山岩样品曾得到过 14 Ma 的 $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ 年龄, 有可能由于老物质的再熔融混入所导致^[6]。本次测试对象选择基质, 并且获得一致的反等时线年龄, (2.36 ± 0.05) Ma 的年龄极可能是火山活动时代。因此, 磁极性序列对比可能存在问题。

将所建立的磁极性序列与国际标准极性年表确切对比时, 既要仔细分析极性条带分布的总体特征和细微结构, 又要考虑地层剖面岩性的变化。因为地层的磁极性序列是以地层厚度为标尺, 而国际地层极性年表则是以时间为标尺。地层沉积厚度的影响因素很多, 如古气候、沉积物物源、构造运

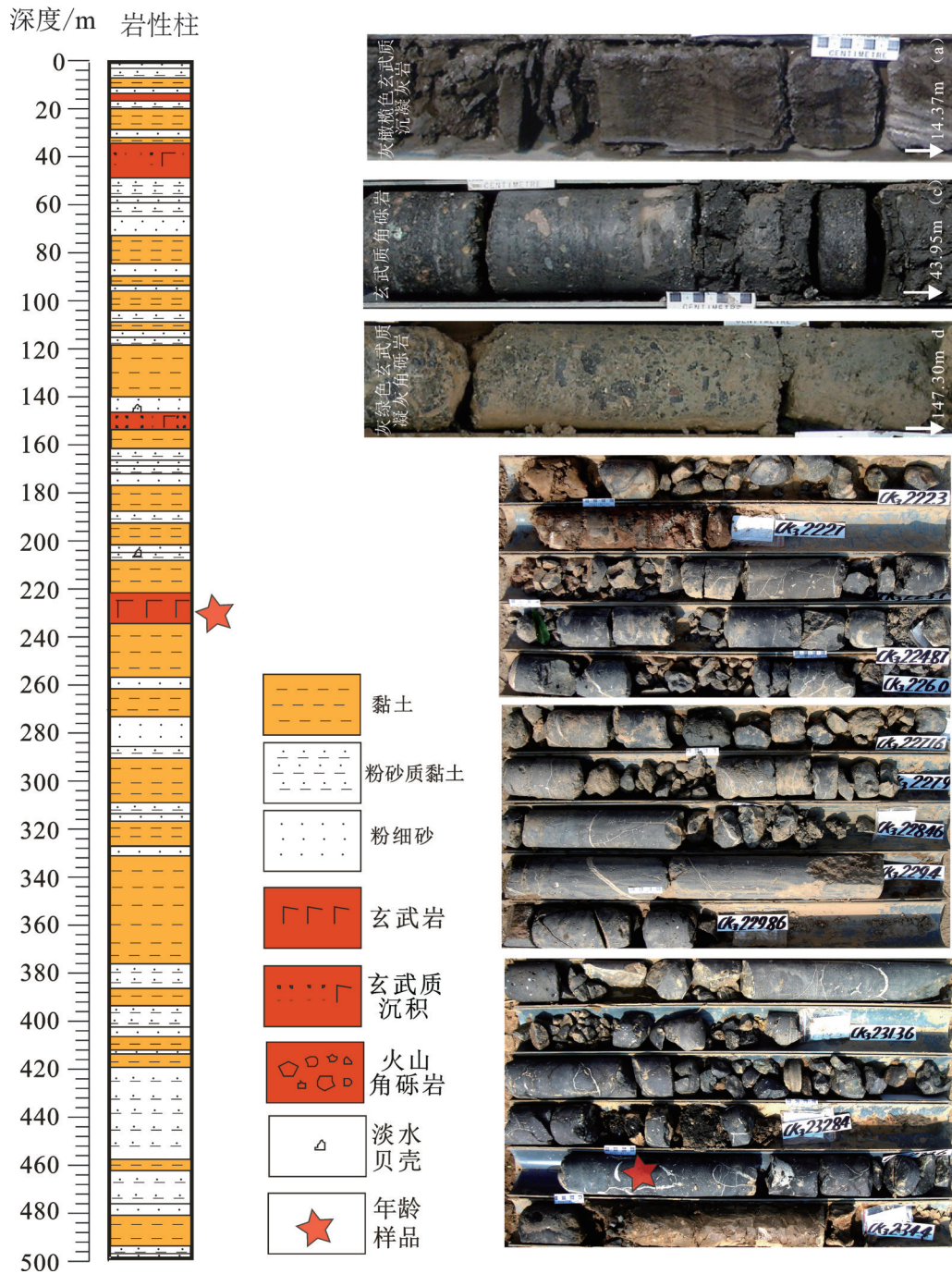


图2 CK3孔岩性及火山岩照片
Fig.2 Typical photographs of volcanic rock in CK3

动、沉积速率、沉积时间及海侵事件等,这就增加了地层的磁极性序列与国际地磁极性年表对比的难度。陆相地层比海洋沉积存在着更多的地层间断则是陆相沉积地层开展磁性地层工作无法避开的缺陷^[24],渤海湾西岸滨海平原晚第四纪以来也存在

沉积间断^[25]。CK3孔岩心记录的磁极性序列与附近多个钻孔的磁性地层结果对比在形态特征上一致,与标准极性柱对比则存在形态上的局部不和谐,这是深度与时间尺度对比过程中出现的正常现象。因此,本文根据⁴⁰Ar/³⁹Ar测试结果,认为在第1期火

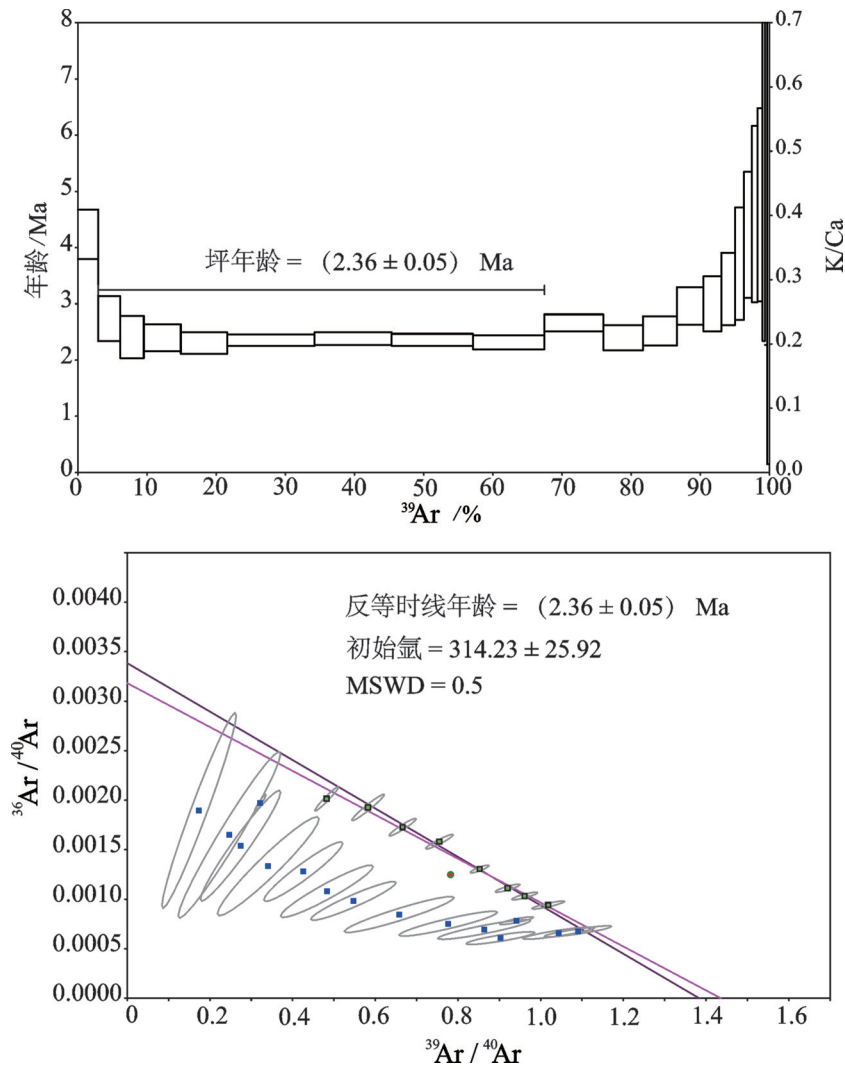


图3 CK3岩心火山岩⁴⁰Ar/³⁹Ar测试结果
Fig.3 ⁴⁰Ar/³⁹Ar age of volcanic rock in the CK3 core

山岩之上CK3孔揭示的地层沉积存在沉积间断,原因可能是由于火山岩形成正地貌所致。第1期火山岩年龄的确定为磁极性序列的对比提供了可靠依据,说明其他3期火山岩通过磁性地层对比推算时代是可信的。

3.2 河北平原第四纪火山岩时代

河北平原第四纪火山岩资料主要来自于大量钻孔岩心,岩性多变,呈多层不连续分布,根据以色彩特征为主要手段的地层时代对比方案划分为更新世马村期、更新世沧州期、更新世杨庄期、更新世苏基期和更新世小山期^[3]。CK3孔所揭示的火山岩根据地层对比及岩性特征对应沧州期、杨庄期和更

新世小山期3期活动,马村期和苏基期在CK3孔中没有记录(图5)。

根据CK3孔磁性地层结果,原认为沧州期对应Olduvai极性事件应该是位于其下,该段火山岩剩磁测试结果显示皆为反极性也说明不能对应至Olduvai极性事件。⁴⁰Ar/³⁹Ar测试结果则确定沧州期玄武岩年龄为(2.36 ± 0.05) Ma。杨庄期剩磁测试结果也为反极性,位于Jaramillo极性事件之下,时代上缺少直接年龄数据。小山期依据¹⁴C和ESR测年和磁性地层结果,限定为35~70 ka和10~15 ka。

第四纪以来河北平原东部滨海一带沉积速率变化不大,指示了稳定的下沉趋势^[6,9]。但在整体沉

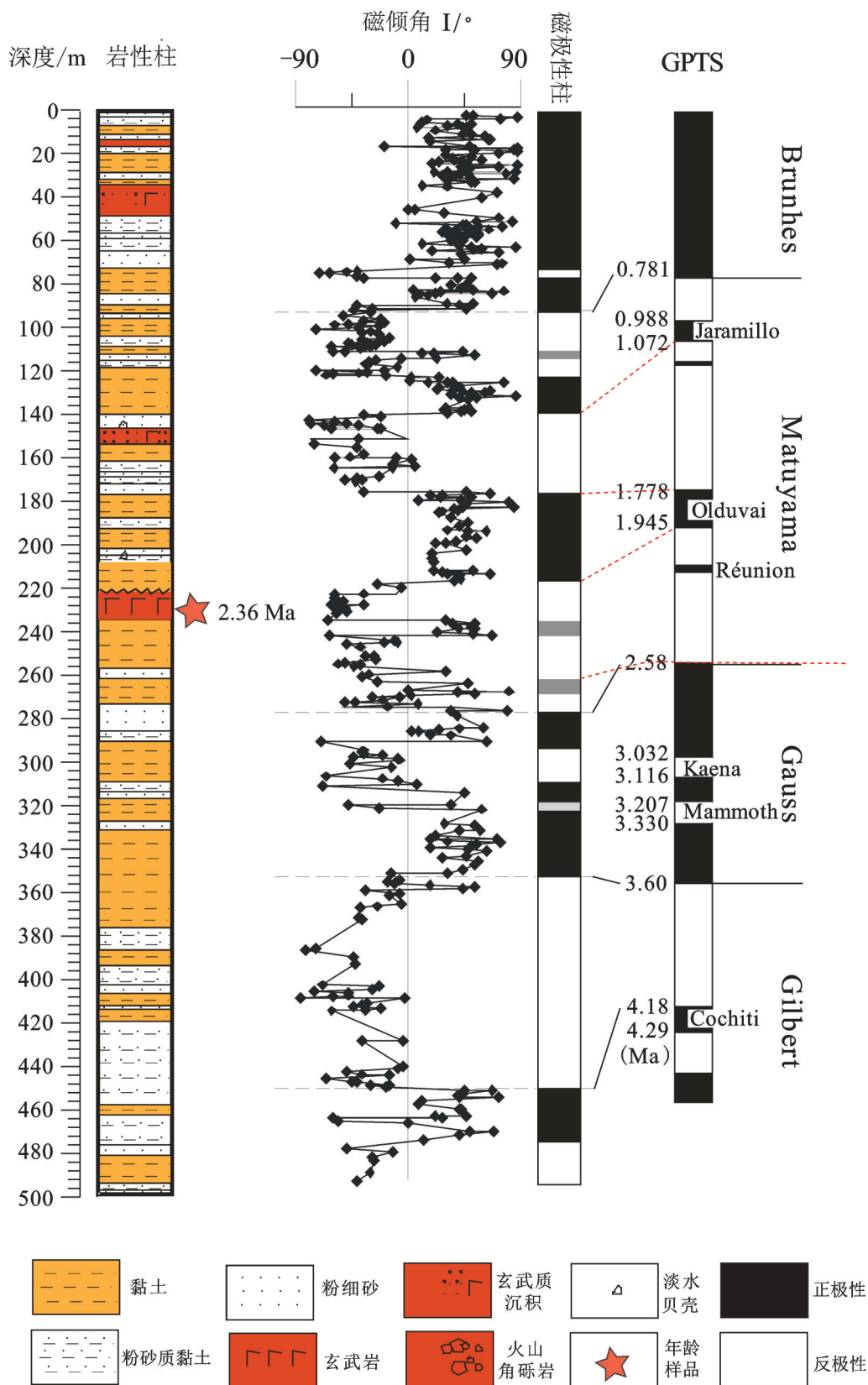


图4 CK3岩心岩性、磁极性序列及与地磁极性年表对比

Fig.4 Lithostratigraphy and magnetostratigraphy of the CK3 core in correlation with the geomagnetic polarity timescale (GPTS)

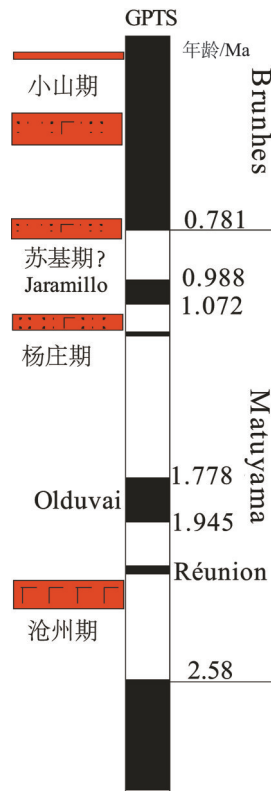


图5 河北平原东部火山岩时代

Fig.5 The age of volcanic rock in eastern Hebei plain

降中存在不均匀沉降,从而产生了一系列张性断裂,最终成为地震带和火山活动带^[3](图1)。通过火山岩地球化学分析认为山东蓬莱、无棣火山岩是地幔部分熔融产生的原始岩浆,表明华北地区第四纪时期具有大陆拉张带或裂谷上地幔的性质^[2],正是新生代以来中国东部岩石圈持续减薄导致正断层、地堑式或裂谷型盆地发育。

本文主要根据CK3孔所揭示的火山岩的年龄重新厘定河北平原多期火山活动时代,通过本文研究也说明仅根据钻孔揭示的火山岩层认为河北平原第四纪存在5期火山活动值得商榷,建议以年龄直接表示火山活动。整个河北平原保留有更多期次火山活动需要精确定年,梳理第四纪以来详细的火山分布与活动规律,可以为地热资源开发^[26-31]、断裂活动特征^[32,33]及地震等地质灾害提供可靠数据支持。

4 结 论

华北第四纪火山岩河北平原具有明确记录和完整活动序列,CK3孔岩心中发现的第1期火山岩

⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄为(2.36 ± 0.05) Ma,代表了早更新世火山活动。CK3孔岩心揭示在河北平原东部第四纪火山活动还包括约1.34 Ma、35~70 ka和10~15 ka的3期火山活动。多期次的火山活动暗示研究区第四纪以来经历了多期新构造运动,亟需理清河北平原更多期次火山分布与活动特征。

致谢:感谢天津地质矿产研究所在样品采集工作中的支持和王强研究员具体的指导,感谢审阅人和期刊编辑杨艳老师从多个方面给出了建设性修改意见使得本文得以完善。

参考文献 (References):

- [1] 陈望和,倪明云. 河北第四纪地质[M]. 北京:地质出版社,1987: 1-186.
Chen Wanghe, Ni Mingyun. Quaternary Geology of Hebei Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 1-186 (in Chinese with English abstract).
- [2] 陈孝德,史兰斌,林传勇. 华北第四纪火山作用研究[J]. 地震地质, 2001, 23(4): 581-587.
Chen Xiaode, Shi Lanbin, Lin Chuanyong. A research on Quaternary volcanism in north China[J]. Seismology and Geology, 2001, 23(4): 581-587(in Chinese with English abstract).
- [3] 邵时雄,张玉芳,韩书华. 河北平原第四纪火山堆积及火山活动分期的特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1983, 3(2): 87-102.
Shao Shixiong, Zhang Yufang, Han Shuhua. Quaternary volcanic deposits in Hebei Plain and the periods of their activities[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1983, 3(2): 87-102 (in Chinese with English abstract).
- [4] Petraglia M D, Ditchfield P, Jones S, et al. The Toba volcanic super-eruption, environmental change, and hominin occupation history in India over the last 140000 years[J]. Quaternary International, 2012, 258: 119-134.
- [5] 尹功明,赵波,许建东,等. 河北沧州小山火山的ESR年代学研究[J]. 岩石学报, 2013, 29(12): 4415-4420.
Yin Gongming, Zhao Bo, Xu Jiandong, et al. Electron Spin Resonance data of the Xiaoshan volcano in Cangzhou, Hebei Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(12): 4415-4420(in Chinese with English abstract).
- [6] 胡云壮,胥勤勉,袁桂邦,等. 河北海兴小山CK3孔磁性地层与第四纪火山活动记录[J]. 古地理学报, 2014, 16(3): 411-426.
Hu Yunzhuang, Xu Qinmian, Yuan Guibang, et al. Magnetostratigraphy of borehole CK3 and record of the Quaternary volcanic activities in Xiaoshan of Haixing, Hebei Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(3): 411-426(in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- [7] 李华梅, 王俊达. 渤海湾北岸平原钻孔岩芯的古地磁研究[J]. 地球化学, 1983, (2): 196–204.
Li Huamei, Wang Junda. Palaeomagnetic study on drill core from northern Bohai coastal plain[J]. *Geochimica*, 1983, (2): 196–204(in Chinese with English abstract).
- [8] 王强, 刘立军, 徐海振, 等. 华北平原第四系下限的再研究[J]. 地质调查与研究, 2003, 26(8): 52–60.
Wang Qiang, Liu Lijun, Xu Haizhen, et al. Re-study on the lower boundary of Quaternary system in the north China plain[J]. *Geological survey and Research*, 2003, 26(8): 52–60(in Chinese with English abstract).
- [9] 姚政权, 郭正堂, 陈宇坤, 等. 渤海湾海陆交互沉积的磁性地层学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(1): 9–15.
Yao Zhengquan, Guo Zhengtang, Chen Yukun, et al. Magnetostratigraphy of marine-terrestrial faces deposits in Bohai bay[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2006, 26(1): 9–15(in Chinese with English abstract).
- [10] 肖国桥, 郭正堂, 陈宇坤, 等. 渤海湾西岸 BZ1 钻孔的磁性地层学研究[J]. 第四纪研究, 2008, 28(5): 909–916.
Xiao Guoqiao, Guo Zhengtang, Chen Yukun, et al. Magnetostratigraphy of BZ1 borehole in west coast of Bohai bay, northern China[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(5): 909–916(in Chinese with English abstract).
- [11] 王强, 张玉发, 袁桂邦, 等. MIS 3 阶段以来河北黄骅北部地区海侵与气候期对比[J]. 第四纪研究, 2008, 28(1): 79–95.
Wang Qiang, Zhang Yufa, Yuan Guibang, et al. Since MIS 3 stage the correlation between transgression and climatic changes in the North Huanghua area, Hebei[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(1): 79–95(in Chinese with English abstract).
- [12] 施林峰, 翟子梅, 王强, 等. 从天津 CQJ4 孔探讨中国东部海侵层的年代问题[J]. 地质评论, 2009, 55(3): 376–384.
Shi Linfeng, Zhai Zimei, Wang Qiang, et al. Geochronological study on transgression layers of the CQJ4 borehole at Dagang area in Tianjin, China[J]. *Geological Review*, 2009, 55(3): 376–384(in Chinese with English abstract).
- [13] Yao Z Q, Xiao G Q, Wu H B, et al. Plio-Pleistocene vegetation changes in the North China Plain: Magnetostratigraphy, oxygen and carbon isotopic composition of pedogenic carbonates[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 297: 502–510.
- [14] 胥勤勉, 袁桂邦, 张金起, 等. 渤海湾沿岸晚第四纪地层划分及地质意义[J]. 地质学报, 2011, 85(8): 1352–1367.
Xu Qinnian, Yuan Guibang, Zhang Jinqi, et al. Stratigraphic division of the late Quaternary strata along the coast of Bohai bay and its geology significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(8): 1352–1367(in Chinese with English abstract).
- [15] 袁桂邦, 胥勤勉, 王艳, 等. 渤海湾北岸 Bg10 孔磁性地层研究及其地质意义[J]. 地质学报, 2014, 88(2): 285–298.
Yuan Guibang, Xu Qinnian, Wang Yan, et al. Magnetostratigraphy and tectonic significance of Bg10 borehole in Northern coast of Bohai bay[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(2): 285–298(in Chinese with English abstract).
- [16] 肖国强, 杨吉龙, 赵长荣, 等. 天津滨海地区 G2 孔磁性地层年代及其构造指示[J]. 地质通报, 2014, 33(10): 1642–1650.
Xiao Guoqiang, Yang Jiling, Zhao Changrong, et al. Magnetostratigraphy of drill hole G2 in the Tianjin coastal area and its tectonic significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(10): 1642–1650(in Chinese with English abstract).
- [17] 刘嘉麒. 中国火山[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 1–125.
Liu Jiaqi. *Volcanoes in China*[M]. Beijing: Science Press, 1999: 1–125(in Chinese).
- [18] 安美建, 赵越, 冯梅, 等. 什么控制了华北克拉通东部在新近纪的构造活动?[J]. 地学前缘, 2011, 18(3): 121–140.
An Meijian, Zhao Yue, Feng Mei, et al. What resulted in new tectonic activities in the eastern North China Craton in the Neogene?[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(3): 121–140(in Chinese with English abstract).
- [19] 李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 等. 渤海湾盆地形成与华北克拉通的破坏[J]. 地学前缘, 2010, 17(4): 64–89.
Li Sanzhong, Suo Yanhui, Dai Liming, et al. Development of the Bohai Bay Basin and destruction of the North China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(4): 64–89(in Chinese with English abstract).
- [20] 冯金良. 小山风积物特征及其形成时代探讨[J]. 地理学与国土研究, 1997, 13(2): 53–56.
Feng Jinliang. Characters of Xiaoshan aeolian deposits and their formation age[J]. *Geography and Territorial Research*, 1997, 13(2): 53–56(in Chinese with English abstract).
- [21] Duncan R A, Al-Amri A M. Timing and composition of volcanic activity at Harrat Lunayyir, western Saudi Arabia[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2013, 260: 103–116.
- [22] Koppers A A P. ArArCALC—software for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age calculations[J]. *Computers & Geosciences*, 2002, 28: 605–619.
- [23] Cox A, Doell R, Dalryple G B. Geomagnetic polarity epochs and Pleistocene geochronometry[J]. *Nature*, 1963, 198: 1049–1051.
- [24] Wang Qiang, Yuan Guibang, Hu Yunzhuang, et al. Microfossils in tidal flat strata on the northern Huanghua area since the MIS 3[J]. *Acta Micropalaeontological Sinica*, 2008, 25(1): 1–18.
- [25] 李凤林, 王宏, 阎玉忠, 等. 渤海湾西岸滨海平原晚第四纪以来的沉积间断[J]. 地质调查与研究, 2004, 27(3): 177–183.
Li Fenglin, Wang Hong, Yan Yuzhong, et al. The significance of

- the depositional hiatuses on the coastal plain of west Bohai bay since the late Quaternary period[J]. *Geological Survey and Research*, 2004, 27(3): 177–183(in Chinese with English abstract).
- [26] 卫万顺, 郑桂森, 栾英波. 北京平原区浅层地温场特征及其影响因素研究[J]. *中国地质*, 2010, 37(6): 1733–1739.
- Wei Wanshun, Zheng Guisen, Luan Yingbo. Characteristics and influencing factors of the shallow geothermal field in Beijing plain area[J]. *Geology in China*, 2010, 37(6): 1733–1739(in Chinese with English abstract).
- [27] 田光辉, 林黎, 程万庆, 等. 天津市浅层地热能开发利用动态监测网建设[J]. *中国地质*, 2011, 38(6): 1660–1666.
- Tian Guanghui, Lin Li, Cheng Wanqing, et al. The construction of dynamic monitoring network for the development and utilization of shallow geothermal energy in Tianjin[J]. *Geology in China*, 2011, 38(6): 1660–1666(in Chinese with English abstract).
- [28] 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 中国地热资源及其潜力评估[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 312–321.
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 312–321(in Chinese with English abstract).
- [29] 王卫星, 李攻科, 李宏, 等. 河北汤泉地热流体水文地球化学特征及其成因[J]. *中国地质*, 2013, 40(6): 1935–1941.
- Wang Weixing, Li Gongke, Li Hong, et al. Hydrogeochemical characteristics and origin of the geothermal fluid in Tangquan area, Hebei Province[J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1935–1941(in Chinese with English abstract).
- [30] 李攻科, 王卫星, 李宏, 等. 河北汤泉地热田地温场分布及其控制因素研究[J]. *中国地质*, 2014, 41(6): 2099–2109.
- Li Gongke, Wang Weixing, Li Hong, et al. Temperature distribution and controlling factors of the Tangquan geothermal field in Hebei Province[J]. *Geology in China*, 2014, 41(6): 2099–2109(in Chinese with English abstract).
- [31] 栾英波, 郑桂森, 卫万顺. 北京平原区粉质粘土热导率影响因素实验研究[J]. *中国地质*, 2013, 40(3): 981–988.
- Luan Yingbo, Zheng Guisen, Wei Wanshun. The experimental study of the factors affecting the rate of thermal conductivity of silty clay in Beijing plain[J]. *Geology in China*, 2013, 40(3): 981–988(in Chinese with English abstract).
- [32] 葛肖虹, 刘俊来, 任收麦, 等. 中国东部中—新生代大陆构造的形成与演化[J]. *中国地质*, 2014, 41(1): 19–38.
- Ge Xiaohong, Liu Junlai, Ren Shoumai, et al. The formation and evolution of the Mesozoic – Cenozoic continental tectonics in eastern China[J]. *Geology in China*, 2014, 41(1): 19–38(in Chinese with English abstract).
- [33] 刘春成, 戴福贵, 杨津, 等. 渤海湾盆地海域古近系—新近系地质结构和构造样式地震解释[J]. *中国地质*, 2010, 37(6): 1545–1558.
- Liu Chuncheng, Dai Fugui, Yang Jin, et al. Seismic interpretation of Eocene–Neogene geological structures and tectonic styles in the sea area of Bohai Gulf basin[J]. *Geology in China*, 2010, 37(6): 1545–1558(in Chinese with English abstract).