https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.084

新西兰Taranaki盆地中新世Kora火山高精度地层格架

唐华风[1,2,3],陶 鹏[2],Alan Patrick Bischoff[3],王寒非[3],Marcos Rossetti[3],Andrew Nicol[3],Ben Kennedy[3],郭天婵[2]

1. 吉林大学自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室,吉林长春 130061
2. 吉林大学地球科学学院,吉林长春 130061
3. 坎特伯雷大学地球与环境学院,基督城 8140

摘 要: 建立埋藏火山的高精度地层格架对了解火山系统的演化、储层成因和资源潜力等具有重要意义.以新西兰Taranaki盆地中新世Kora火山为例,利用小波变换和井震联合对比等方法,开展火山地层高精度格架分析.在Kora火山识别出20个堆积单元,主要为火山碎屑堆积单元以及再搬运碎屑堆积单元,可合并为5个部分(相当于5个火山机构);整体上火山地层的建造与喷发中心的形成和迁移有关.利用井和常规三维地震数据可以较为准确地识别出喷发间断不整合界面系统、可建立堆积单元尺度的高精度地层格架,利用常规三维地震数据只能识别出部分喷发间断不整合界面、只能建立火山机构尺度的地层格架.相对年代的高精度地层格架是埋藏火山的更好选择.

关键词: 火山地层格架;火山岩;地层界面;地层单元;火山机构;石油地质学.

中图分类号: P618.13 **文章编号:** 1000-2383(2022)07-2631-15 **收稿日期:** 2021-03-19

High-Resolution Stratigraphic Framework of Miocene Kora Volcano in Taranaki Basin, New Zealand

Tang Huafeng[1,2,3], Tao Peng[2], Alan Patrick Bischoff[3], Wang Hanfei[3], Marcos Rossetti[3], Andrew Nicol[3], Ben Kennedy[3], Guo Tianchan[2]

1. *Key Laboratory of Mineral Resources Evaluation in Northeast Asia of Ministry of Natural Resources, Jilin University, Changchun* 130061, *China*
2. *College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun* 130061, *China*
3. *School of Earth and Environment, University of Canterbury, Christchurch* 8140, *New Zealand*

Abstract: Establishment of high-resolution volcano-stratigraphic frameworks (HRVF) of buried volcanoes is important for understanding the evolution of the volcanic system and its potential to form volcanic reservoirs. Taking Miocene Kora volcano in Taranaki Basin, New Zealand as an example, in this paper it uses wavelet transform and well-seismic correlation to analyze the

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(No.41790453);国家重点研发计划项目(No.2019YFC0605402);国家科学技术部重大专项(No.2016ZX05026-004-001).

作者简介: 唐华风(1979—),男,教授,博士,主要从事火山地层和火山岩储层地质-地球物理综合研究. ORCID:0000-0002-1951-8059. E-mail: tanghfhc@jlu.edu.cn

引用格式: 唐华风,陶鹏,Alan Patrick Bischoff,王寒非,Marcos Rossetti,Andrew Nicol,Ben Kennedy,郭天婵,2022.新西兰Taranaki盆地中新世Kora火山高精度地层格架.地球科学,47(7):2631-2645.

Citation: Tang Huafeng, Tao Peng, Alan Patrick Bischoff, Wang Hanfei, Marcos Rossetti, Andrew Nicol, Ben Kennedy, Guo Tianchan, 2022. High-Resolution Stratigraphic Framework of Miocene Kora Volcano in Taranaki Basin, New Zealand. *Earth Science*, 47(7): 2631-2645.

HRVF. It mapped 20 units that include predominately deposits from pyroclastic eruptions, together with reworked debris deposits. The Kora Volcano can be divided into five parts according to major unconformities that are related with active and quiescent eruptive periods and with the formation and migration of distinctive eruptive centers. The outline framework can be built by using the conventional 3D seismic data, and the HRVF can be built by using the wells and conventional 3D seismic data. The better choice for building the HRVF of the buried volcano is in relative age.

Key words: volcano-stratigraphic framework; volcanic rock; stratigraphic boundary; stratigraphic unit; volcanic facies architecture; petroleum geology.

0 引言

建立高精度火山地层格架对分析火山系统的演化、储层刻画和资源潜力分析等具有重要意义.相对于沉积地层,火山地层具有3个显著的特征,首先,火山地层具有短时间喷发建造和长时间剥蚀的时间属性(Tang *et al.*, 2015);第二,火山地层空间分布特征受喷发样式控制(Dai *et al.*, 2019);第三,地层产状变化与喷发口有关(唐华风等,2011,2012).第一点表明火山地层中存在大量喷发间断不整合界面,后两点表明火山地层具有多样的堆积单元和内部结构.因此,喷发间断不整合界面系统和堆积单元的刻画是建立高精度火山地层格架的重点.

为了使火山地层格架分析结果能有效指导火山岩储集层的精细描述以及勘探开发,需刻画到堆积单元精度或岩性单元尺度.根据现代火山的喷发方式和喷发物构成,火山地层堆积单元可划分为熔岩流、火山碎屑流和/或火山泥石流等(Lockwood and Hazlett, 2010; 侯明才等,2019).在盆地火山地层刻画时,从堆积单元-火山机构-段-组的火山地层单位划分来看(唐华风等,2017),地层格架的精度通常为组-段级别,少数情况到了火山机构级别,还无法满足火山岩油气藏精细勘探开发的需求.

为了能建立起火山地层的高精度地层格架,需要从火山地层界面系统和充填单元的关系入手进行分析.关于火山地层界面,在野外地质调查和盆地研究中已有广泛的研究.根据界面形成的时间跨度和动力学类型可划分为喷发整合界面、喷发不整合界面、喷发间断不整合界面、构造不整合界面和侵入接触(唐华风等,2013).通常喷发不整合界面和喷发整合界面侧向延伸小,喷发间断不整合界面可区域性追踪(陈业全和李宝刚,2004;王璞珺等,2011; 田忠华等,2020).根据火山喷发特征可知,喷发间断不整合界面是对堆积单元的一种围限,通过喷发间断不整合界面基本能够识别出单个堆积单元或组合.所以喷发间断不整合界面的识别是火山地层格架建立的重要基础.在盆地中可根据岩心、测井和地震资料进行综合识别(陈庆等,2008; Wu *et al.*, 2021).

本文以具有长井段岩心、测井和三维地震数据的Kora火山为例,基于地层界面和地层单位之间的关系,探讨堆积单元尺度的高精度火山地层格架构建方法;识别出19个喷发间断不整合界面,进而划分出20个堆积单元,建立堆积单元尺度的高精度火山地层格架.相关研究成果可为Taranaki盆地和邻近地区的火山岩油藏研究提供依据.

1 地质背景

Taranaki盆地位于新西兰北岛的西南部海域(图1a),有着复杂的沉积和构造演化史(Nicol and Campbell, 1990;Holt and Stern, 1994),大致上可分为陆内裂谷、被动边缘和汇聚板块边缘3个演化阶段.每个阶段都由不同的板块边界运动学控制,这些运动学与太平洋板块和澳大利亚板块之间相对运动的变化有关(Kamp, 1984; Sutherland, 1995).具体如下:(1)中晚白垩世-古新世为陆内裂谷阶段,受伸展控制的局部正常断层发育,随着塔斯曼海拉开,西兰大陆最终从东澳大利亚和南极洲分离开.(2)始新世-渐新世为被动边缘阶段,其特征是平静的构造活动伴随着裂谷后漂移和沉降过程.(3)晚渐新世-中新世-现今为汇聚板块边缘阶段,太平洋板块和澳大利亚板块的汇聚将西兰大陆分为两部分,本文研究的中新世Kora火山形成于该阶段(图2).Taranaki盆地火山岩主要发育在弧后环境中,为弧后盆地背景,火山呈链状分布,属于中心式喷发.

Kora火山是Mohakatino火山带的一部分(图1b),该火山带呈NNE方向延伸、超过25个海底火山(Bischoff, 2019),形成于中新世Taranaki盆地北部地堑拉开阶段(King and Thrasher, 1996; See-

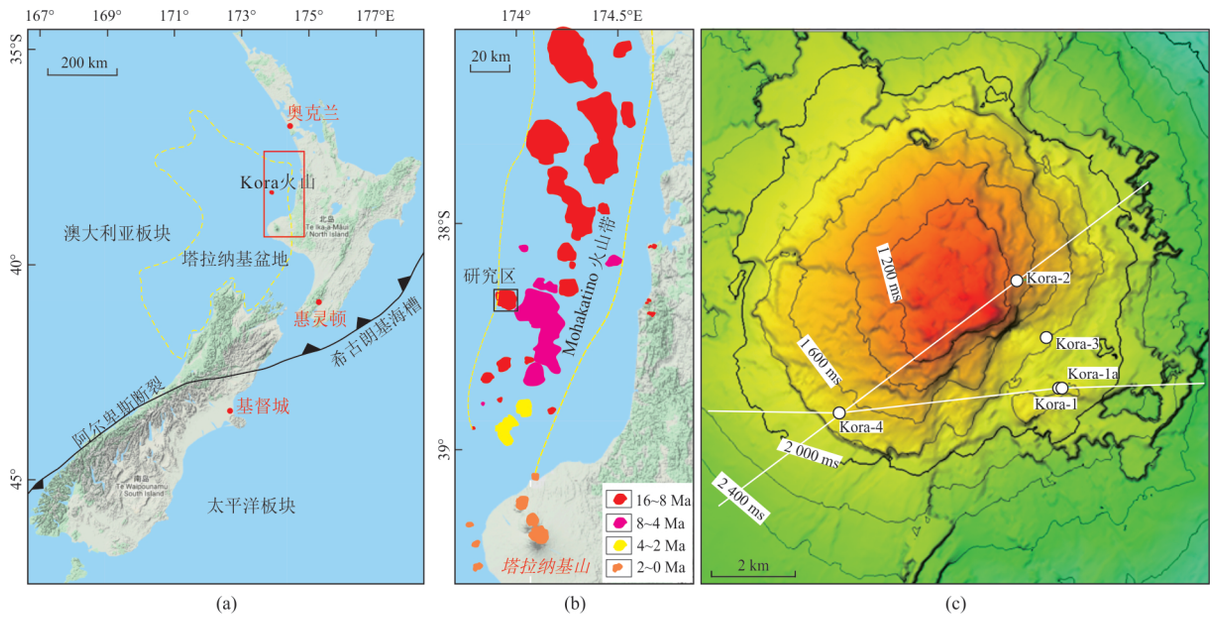

图 1　研究区位置

Fig.1　The location of study area

a. Taranaki 盆地的构造位置；b. Mohakatino 火山带的位置（据 Bischoff *et al.*, 2017）；c. Kora 火山形态特征

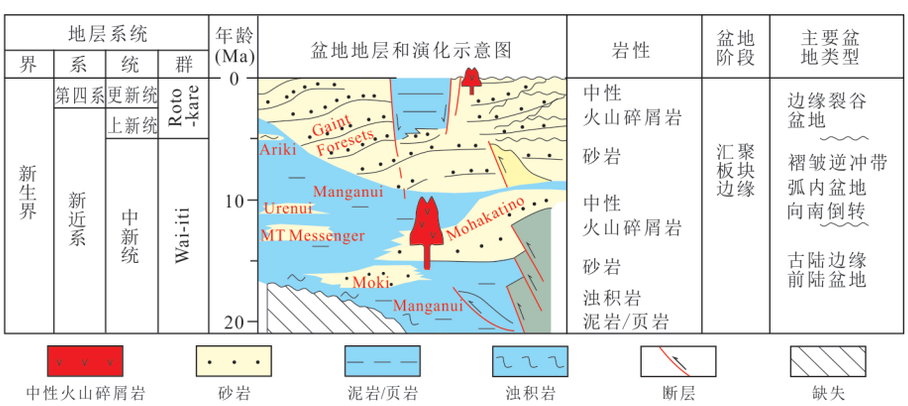

图 2　新西兰 Taranaki 盆地新近纪-第四纪综合柱状图（据 King and Thrasher, 1996 修改）

Fig.2　The Neogene- Quaternary composite column of Taranaki Basin in New Zealand（modified from King and Thrasher, 1996）

beck *et al.*, 2014），岩浆是由澳大利亚板块之下的太平洋俯冲板块脱水产生的．地球化学分析表明，火山岩主要由中低钾、钙碱性安山岩和玄武岩组成（Bergman *et al.*, 1992）．Kora 火山的储层主要赋存于角砾岩、凝灰岩、凝灰质砾岩和凝灰质砂岩等；岩性组合特征和地震资料显示其顶面存在夷平面的特征，可知该火山的主体保存完整，但也有部分地层被侵蚀，整体上可代表复合火山的特征（似层状地层结构）．

有 5 口钻井揭示了 Kora 火山（图 1c），岩性包括凝灰岩、火山角砾岩、凝灰质集块岩、集块岩、凝灰质砾岩和砂岩等．Kora-1 井和 Kora-4 井钻穿中新世火山岩段．Kora-1a 井属于 Kora-1 井的侧钻、二者相距 50 m，Kora-1a 井获取了约 100 m 的长井段岩心．这些资料为建立 Kora 火山高精度地层格架提供了实物支撑．

2　Kora 火山的界面系统

通过岩心、测井和地震资料来识别界面．界面系统由顶界面、底界面、喷发间断不整合界面（EIUB）和侵入接触（IC）构成．

2.1　顶界面和底界面

Kora 火山的顶界面位于 Giant Foresets 组的沉积岩和 Mohakationo 组的火山岩之间（图 3）．利用伽玛和密度比值进行小波变换，结果显示该界面从低

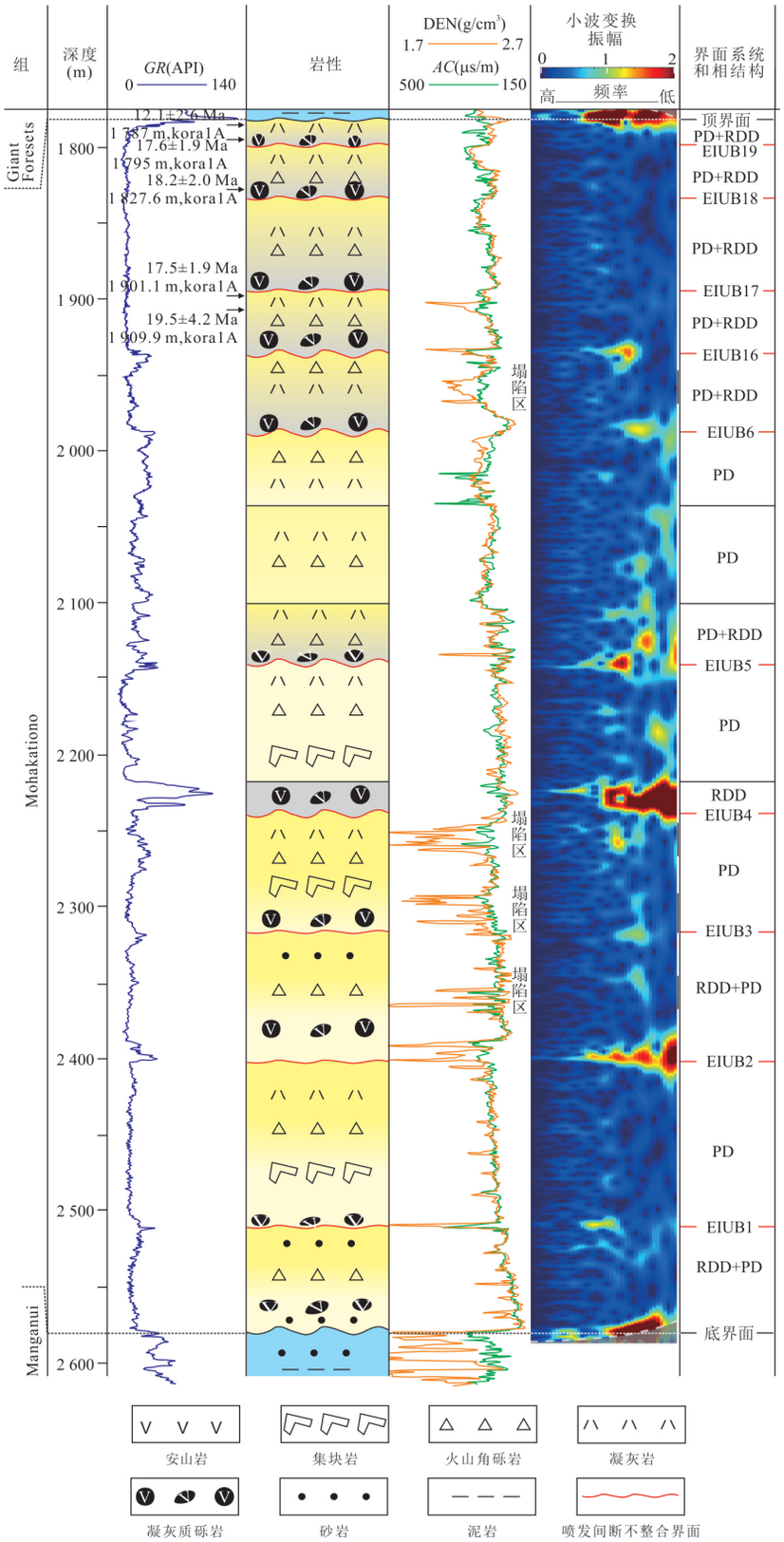

图 3 新西兰 Taranaki 盆地 Kora-1 井中新世火山地层界面和堆积单元

Fig.3 The volcano-stratigraphic boundaries and units of Miocene Volcano of Well Kora-1 in Taranaki Basin, New Zealand

EIUB1. 利用井资料和地震资料命名的喷发间断不整合界面序号；PD. 火山碎屑堆积单元；RDD. 再搬运碎屑堆积单元；小波变换的数据是 *GR* 和 DEN 的比值，可以突出可能与风化或侵蚀过程有关的高 *GR* 值和低 DEN 值的井段. 低频的强振幅代表着喷发间断不整合界面，喷发间断不整合界面的序号由井震对比决定. 火山岩年龄据 Bergman *et al.* (1992)

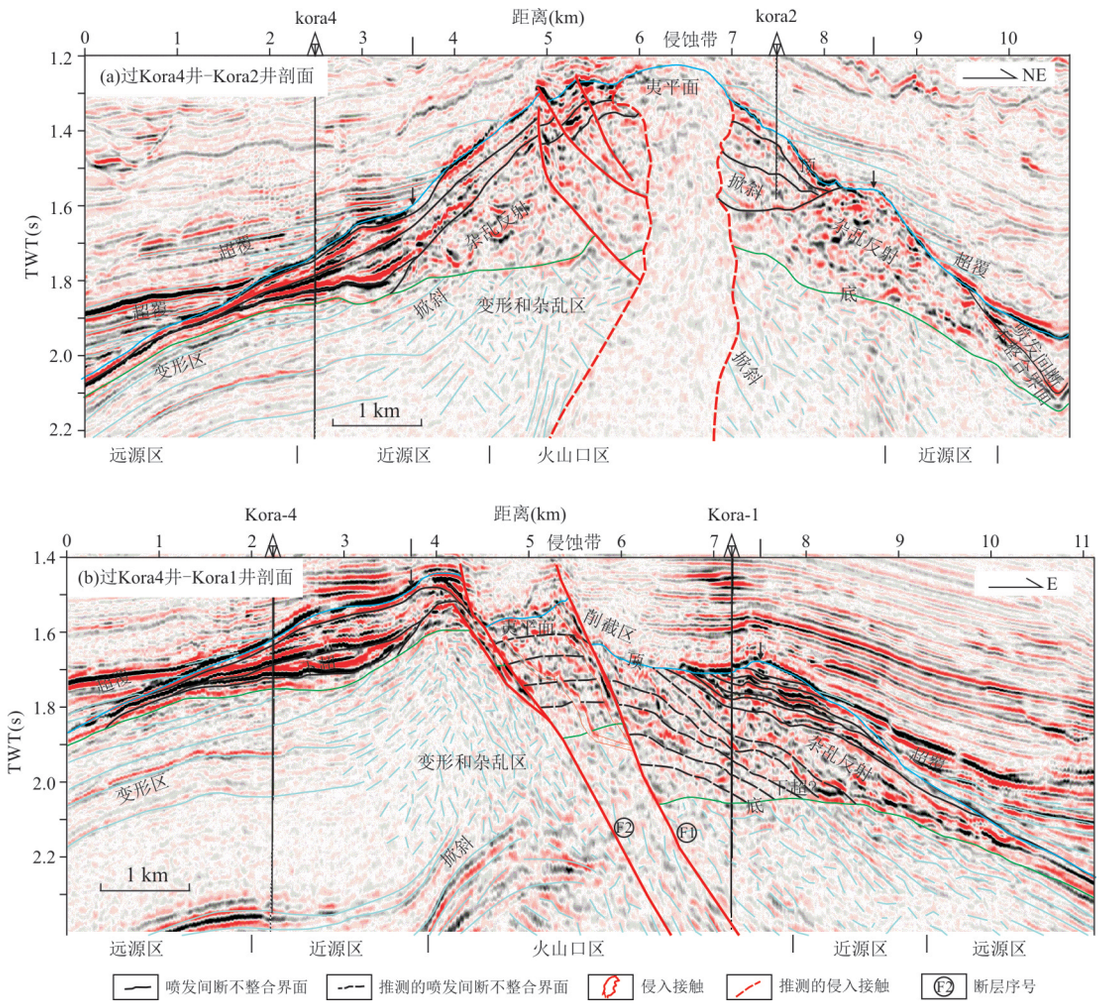

图 4　新西兰 Taranaki 盆地 Kora 火山火山地层界面系统

Fig.4　The volcano-stratigraphic boundary system of Kora Volcano in Taranaki Basin, New Zealand

频到高频信息均为强振幅．在火山的远源区和近源区会有超覆接触关系，界面特征为连续、强振幅、中高频、大部分区域是平滑的．在火山口区有削截接触，界面特征为连续性好、强振幅、中高频和锯齿状，或连续性差、弱振幅和平滑的（图 4）．

底界面位于 Mohakationo 组火山岩和 Manganui 组沉积岩之间（图 3）．利用伽玛和密度比值进行小波变换，结果显示该界面从低频到高频信息均为强振幅．在火山近源区为平行不整合界面，如 Kora-4 井，具有中等振幅、良好的连续性和中等频率的特征．在火山口区为角度不整合界面，如 Kora-1 井，为中等–弱振幅、中弱连续、中频的特征．在火山口–近火山口区和近源区也可能是一个模糊的界面，表现为杂乱、弱反射和低频率（图 4）．

2.2　喷发间断不整合界面（EIUB）

喷发间断不整合界面形成于喷发间歇阶段，时间间隔从几年到几千年不等（Tang *et al.*, 2015；赵然磊等，2016）．在喷发间断不整合界面附近发育明显的侵蚀或沉积岩（Giannetti and De Casa, 2000；Andrews *et al.*, 2008；Lucchi *et al.*, 2008）．因此，凝灰岩和/或沉积岩发育在喷发间断不整合界面之上，表现为高伽马、低密度特征，据此可以利用 *GR* 和 DEN 的比值进行小波变换，识别出喷发间断不整合界面．Kora-1a 井的岩心显示圆状的火山颗粒和生物碎屑，这意味着喷发间断．喷发间断不整合界面通常表现为漏斗状的高伽马、低密度和高声波测井特征，介电测井时差（TPL）特征类似于声波时差（图 5）．Kora-1a 井岩心中有 3 层凝灰质砾岩，因此该井上部至少有 3 次喷发间断．利用伽玛和密度比值进行小波变换，喷发间断不整合界面表现为从低频到高频下的强–中振幅．综合利用岩心、小波变换在 Kora-1 井识别出 10 个喷发间断不整合界面（图 3），

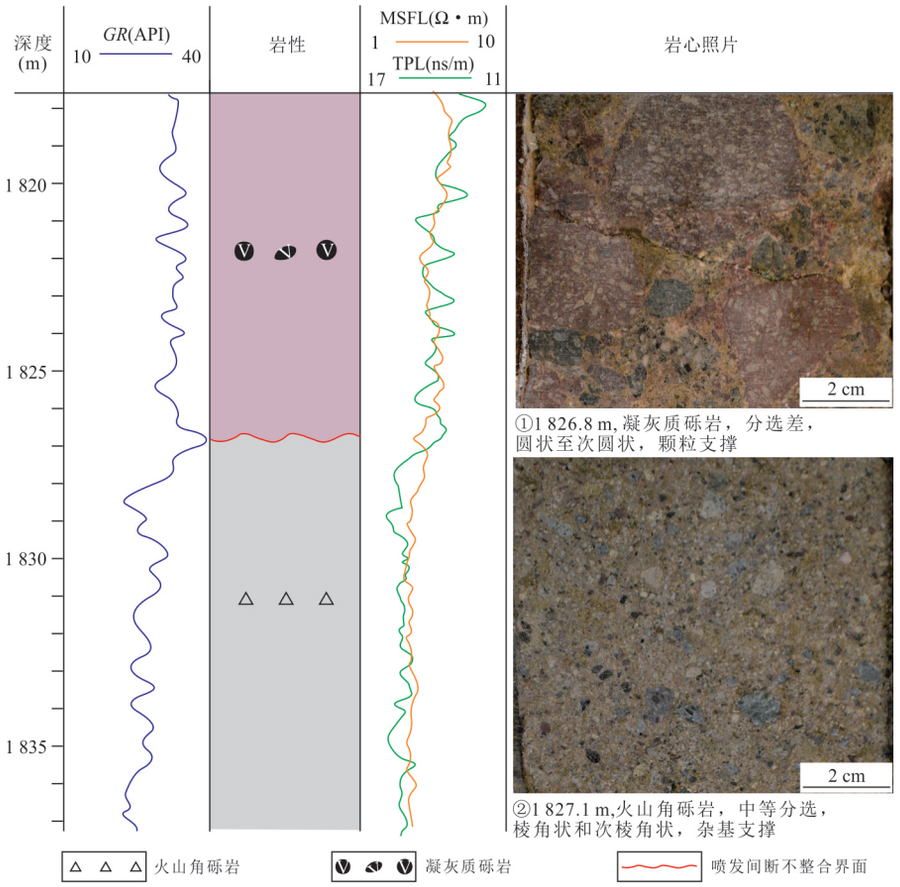

图 5 新西兰 Taranaki 盆地 Kora-1a 井中新世火山喷发间断不整合界面特征

Fig.5 The EIUB characteristics of Miocene volcano of Well Kora-1a in Taranaki Basin, New Zealand

在 Kora-4 井识别出 3 个喷发间断不整合界面；然后，根据井震标定和地震资料对比了 Kora-1 井、Kora-2 井和 Kora-4 井之间的喷发间断不整合界面．Kora 火山中识别出 19 个喷发间断不整合界面（图 4）．

2.3 侵入接触（IC）

侵入接触（IC）是侵入岩和次火山岩与围岩（火山岩或沉积岩）的接触界面，如岩床、岩脉、岩盖或岩株（Gu *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2006; Rohrman, 2007; Rey *et al.*, 2008）．研究区的岩心没有揭示该类界面．然而，地震相和包络属性显示了 Kora 火山周围的侵入体（Infante-Paez and Marfurt, 2017, 2018）．Kora-4 井和 Kora-2 井对比剖面显示，下伏沉积岩和火山下部地层在喷发口附近有明显的掀斜．从喷发通道向外延伸，倾角从高值快速变为零．表现为火山活动时火山通道对围岩的改造，火山停止活动时在该深度形成浅层侵入岩，从而保留了侵入接触界面．该界面为不规则的圆柱状或圆锥状（图 4a）；Kora-4 井和 Kora-1 井的对比剖面显示高倾角岩脉贯穿围岩，外形为树枝状（图 4b）．

3 Kora 火山的堆积单元

火山地层单位中堆积单元是最小的基本单位，通常指沿同一喷出口的一次连续喷发而形成的火山堆积体或火山碎屑物经同一次再搬运而形成的堆积体，根据喷发方式和就位环境可划分为熔岩流堆积单元、火山碎屑堆积单元和再搬运碎屑堆积单元 3 类．岩心、岩屑和测井显示该区主要为火山碎屑堆积单元和再搬运碎屑堆积单元；从取心段来看堆积单元主要由喷发间断不整合界面（EIUB）围限．根据喷发间断不整合界面在 Kora 火山共识别出 20 个堆积单元（图 6）．

3.1 火山碎屑堆积单元

Kora-1a 井和 Kora-2 井揭示了火山碎屑堆积单元的 2 种序列．Kora-2 井火山碎屑堆积单元为块状、1 个粗-细韵律、弱胶结，Kora-1a 井为互层状、多个

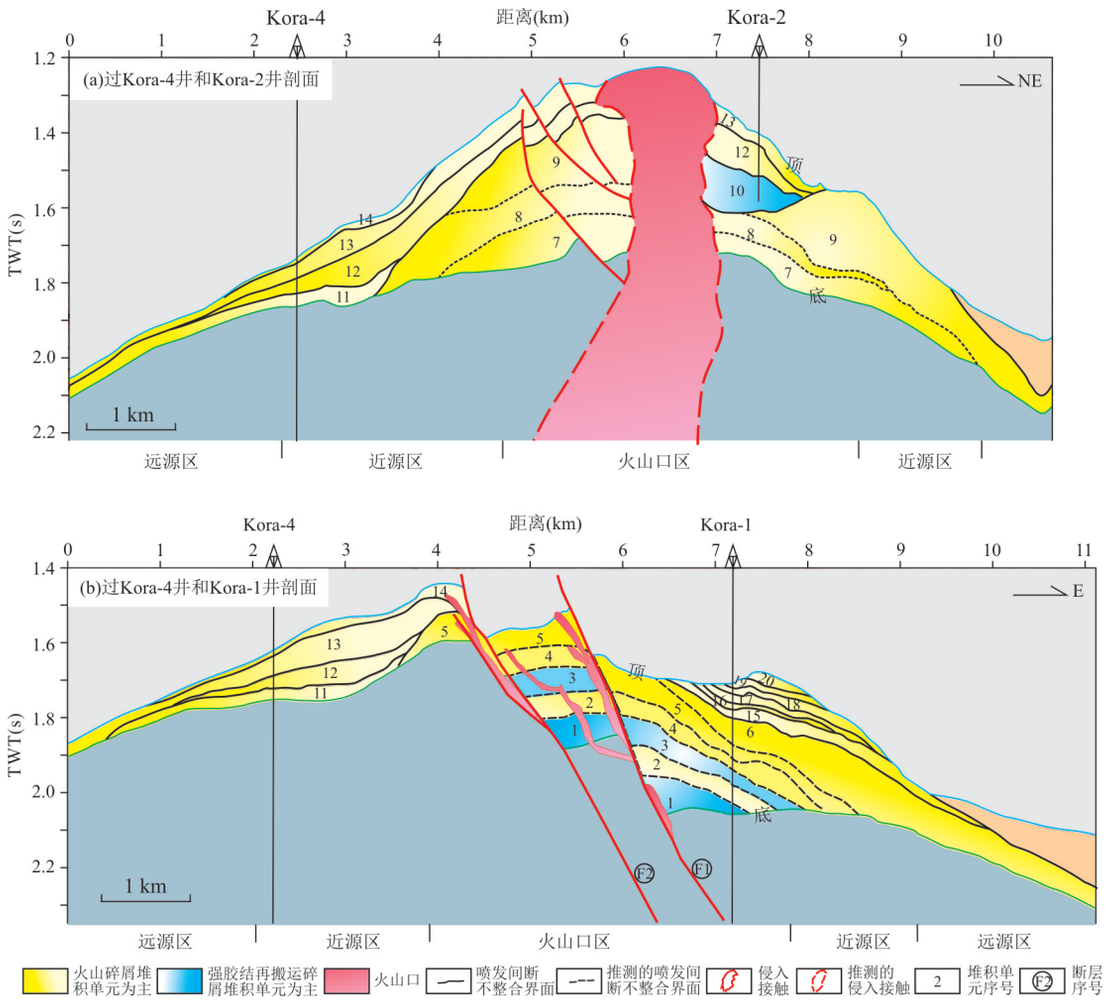

图 6　新西兰 Taranaki 盆地 Kora 火山的火山地层堆积单元的解释

Fig.6　The interpretation of volcano-stratigraphic units of Kora Volcano in Taranaki Basin, New Zealand

地层单元通过岩心、密度测井、声波测井和地震相分析确定

粗-细韵律、弱胶结. 火山碎屑堆积单元厚度超过 10 m,总体上具有正粒序层理. 密度测井和声波测井曲线表现为钟形或箱形,弱胶结火山碎屑岩密度小于 2.5 g/cm^3、声波大于 262 μs/m,强胶结沉火山碎屑岩密度大于 2.5 g/cm^3、声波小于 262 μs/m. 在 Kora-1 井和 Kora-4 井附近的地震剖面中,火山碎屑堆积单元的外形为楔状和席状.

Kora-2 井火山碎屑堆积单元可分为三部分,即下部的集块岩层、中部的火山角砾层和上部的凝灰岩. 集块岩层分选极差、杂乱堆积、颗粒支撑,其与整个单元的厚度比大于 50%;集块成分为安山岩和安山质凝灰岩,前者是圆状/次圆状的、直径为几厘米到十厘米,后者是棱角状的、几厘米到几十厘米. 火山角砾岩层为中等分选、杂乱堆积、颗粒支撑;角砾成分为棱角状凝灰岩和圆状安山岩,前者最常见、直径 1~5 cm,后者很少、直径 3~5 cm. 凝灰岩层分选好,颗粒成分为岩屑、晶屑(长石和角闪石). 伽马曲线显示下部为高值(高达 80 API),上部为低值(低至 30 API);密度测井和声波测井的值变化明显(图 7a).

Kora-1a 井火山碎屑堆积单元可分为两部分,即下部的火山角砾岩层和上部的凝灰岩、凝灰质火山角砾岩. 火山角砾岩层分选差、无定向和杂基支撑,其与单元的厚度比大于 70%;角砾成分为安山质凝灰岩和安山岩,前者呈棱角状、直径 1~6 cm,后者呈圆状/次圆状、直径 2~5 cm. 凝灰岩、凝灰质火山角砾岩层分选中-好、层理发育,颗粒成分为岩屑、晶屑(长石和角闪石). 伽马、介电测井时差(TPL)和微球电阻率测井(MSFL)的值没有明显变化(图 7b).

3.2　再搬运碎屑堆积单元

再搬运碎屑堆积单元指次生火山碎屑和非火

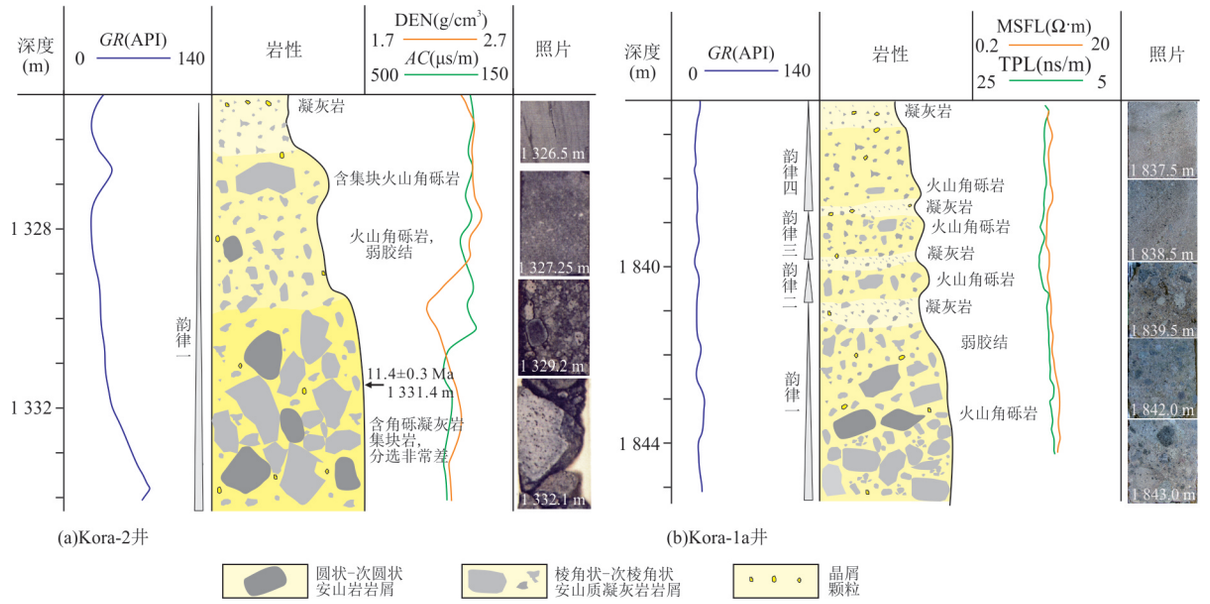

图 7　新西兰 Taranaki 盆地 Kora 火山碎屑堆积单元特征

Fig.7　The characteristics of pyroclastic deposit units of Kora Volcano in Taranaki Basin, New Zealand

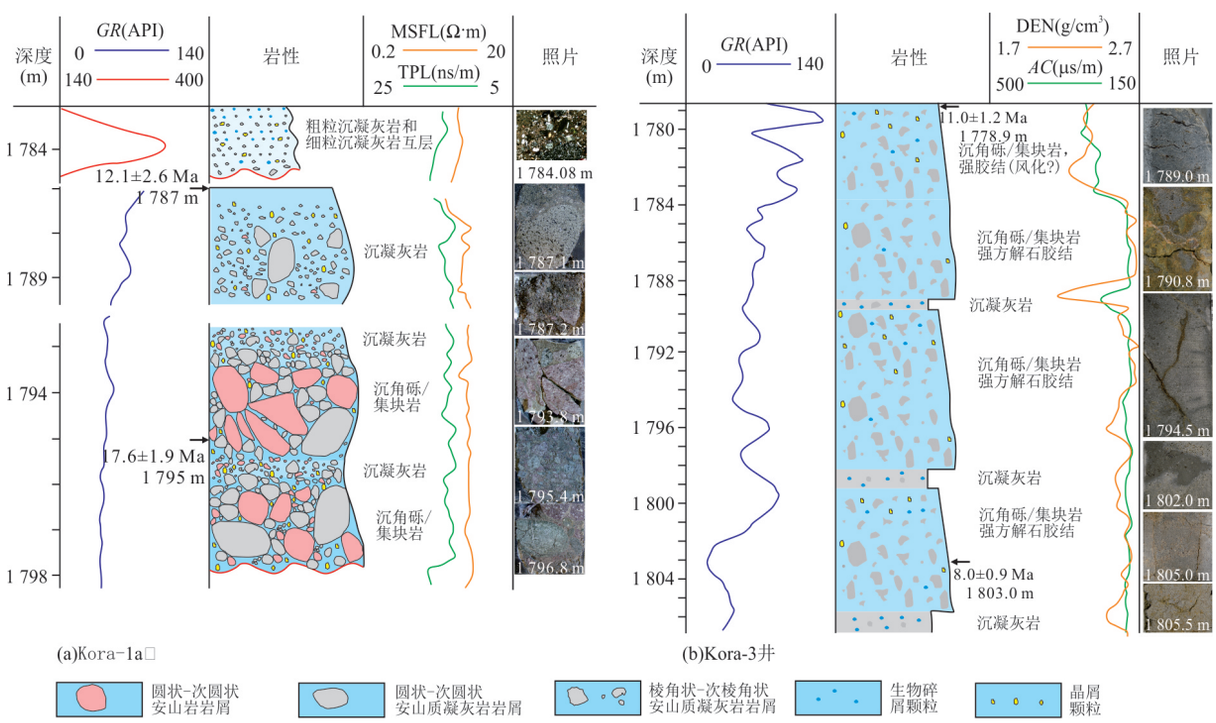

图 8　新西兰 Taranaki 盆地 Kora 火山再搬运碎屑堆积单元特征

Fig.8　The characteristics of reworked debris deposit units of Kora Volcano in Taranaki Basin, New Zealand

山颗粒的百分比超过 50 %、原生火山碎屑少于 50% 的碎屑堆积单元. 研究区次生火山碎屑包括圆状红色安山岩巨砾/粗砾/中砾/细砾、灰色安山岩颗粒;非火山颗粒包括生物碎屑颗粒和海绿石.

Kora-1a 井和 Kora-3 井的岩心揭示了再搬运碎屑堆积单元,有厚层块状和薄层状这两种相结构,均具有正粒序层理. 在地震资料中很难从火山碎屑堆积单元中分离出来.

在 Kora-1a 井中,岩心显示从底部到顶部有数个厚层粗-细旋回. 每个旋回可分为两部分,即中下部沉角砾/集块岩和上部沉凝灰岩. 中下部沉角砾/集块岩有丰富的圆状巨砾和中砾,分选极差、杂乱

堆积和颗粒支撑,圆状颗粒百分比高达 80%、成分为安山岩和凝灰岩、粒径为 1～15 cm. 上部沉凝灰岩颗粒磨圆好、分选差–中等、杂乱堆积和杂基支撑,颗粒的成分以灰色凝灰岩为主(图 8a). 此外,岩心揭示薄层型为由粗到细的旋回,单个旋回厚约几厘米,下部为粗粒沉凝灰岩,上部为细粒沉凝灰岩. 粗粒沉凝灰岩的颗粒成分为火山碎屑(40%)、晶屑(25%)、生物碎屑颗粒(17%)和海绿石(3%);基质成分为火山灰,胶结物为方解石和粘土(图 8a).

Kora-3 井再搬运碎屑堆积单元可分为下部沉角砾/集块岩层和上部沉凝灰岩层两部分. 沉角砾/集块岩层为中等分选、微定向、颗粒支撑、强方解石胶结,颗粒成分为安山岩岩屑、安山质凝灰岩岩屑、晶屑(长石和角闪石). 安山岩和安山质凝灰岩岩屑的粒径为 3～20 mm,较大的岩屑呈棱角状,较小的岩屑呈圆状/次圆状;晶屑呈棱角状,直径 1～5 mm;岩石的暗色部分有较多的生物碎屑和粘土–方解石胶结物. 沉角砾/集块岩层与单元的厚度比大于 95%(图 8b). 沉凝灰岩层中等分选、杂基支撑、强方解石胶结,火山物质包括棱角状熔岩和晶屑,体积比约占 50%,生物碎屑约占 20%,其余为胶结物.

4　Kora 火山的高精度地层格架

一般来说,火山地层由随喷发中心的横向迁移和垂向叠置而产生的喷发物构成,所以可根据井和地震资料揭示的垂向和横向叠置关系来确定地层单元的喷发序列. 研究表明,通过喷发间断不整合界面系统、单元产状和单元叠置关系的识别,可建立相对年代下的高精度火山地层格架(图 9). 在 Kora 火山识别出 20 个单元,主要为火山碎屑堆积单元和再搬运碎屑堆积单元的复合体,大多数单元以火山碎屑堆积单元为主、少数以再搬运碎屑堆积单元为主. 根据喷发间断不整合界面的叠置关系、喷发中心的迁移和地质体的产状变化,Kora 火山可分为 5 个部分,对照地层单位特征(唐华风等,2017)看作 5 个火山机构,分别命名为火山机构 1、2、3、4 和 5.

4.1　火山机构 1

该机构包括 4 个堆积单元,Kora-1 井揭示了它们. 地震数据显示,Kora-3 井区域应该有这些单元. 喷发中心位于 Kora-1 井和 Kora-4 井之间,火山岩的分布西边界受断层 2 控制,东边界是下超终止样式. 单元 1 和 3 是高密度和低声波测井,测井特征与强胶结再搬运碎屑堆积单元取心段相同,岩性除火山碎屑岩外还含有较多沉火山碎屑岩或沉积岩,岩相为火山沉积相中的再搬运火山碎屑沉积岩亚相. 单元 2 和单元 4 是中低密度测井和中高声波测井,具有弱胶结火山碎屑堆积单元的特征,岩性主要为火山碎屑岩,岩相为水下喷发的爆发相碎屑流亚相. 该机构的地层在横向延伸有限.

4.2　火山机构 2

该机构包括 2 个堆积单元,Kora-1 井揭示了它们. 地震数据显示,Kora-2 井和 Kora-3 井的区域应该有这些单元. 喷发中心位于 Kora-3 井和 Kora-1 井的东部. 单元 5 和 6 具有锥形外形,Kora-1 井揭示为低伽马、中密度和中声波特征,测井特征与弱胶结火山碎屑堆积单元的取心段相同,岩性主要为火山碎屑岩,岩相为水下喷发的爆发相碎屑流亚相. 单元 5 和 6 的横纵比很小.

4.3　火山机构 3

该机构包括 4 个堆积单元,Kora-2 井和 Kora-3 井揭示了部分单元. 地震数据显示,Kora-2 井的区域应该有单元 7、8 和 9. 喷发中心在 Kora-2 井和 Kora-3 井的西南部. Kora-3 井表明,单元 9 为中低密度和中高声波特征,与弱胶结火山碎屑堆积单元的特征相同,岩性主要为火山碎屑岩,岩相为水下喷发的爆发相碎屑流亚相. 单元 10 是高密度测井和低声波特征,为强胶结再搬运碎屑堆积单元,岩性除火山碎屑岩外还含有较多沉火山碎屑岩和沉积岩,岩相为火山沉积相再搬运火山碎屑沉积岩亚相. 单元 7 和 8 没有钻井揭示,其地震相特征与单元 9 相同,推测单元 7 和 8 为弱胶结火山碎屑堆积单元,岩性、岩相特征与单元 9 相似. 该机构火山碎屑岩的横纵比为中等–小.

4.4　火山机构 4

该机构包括 4 个堆积单元,喷发中心在 Kora-4 井的东北部. Kora-4 井揭示单元 11、12、13 和 14,为中低密度和中高声波特征,这与弱胶结火山碎屑堆积单元的特征相同. 同时,Kora-2 井揭示,除了单元 13 的最上部以外,单元 12 和 13 为中低密度和中高声波特征,岩心显示为方解石弱胶结. 因此,单元 11、12、13 和 14 以弱胶结火山碎屑堆积单元为主,岩性主要为火山碎屑岩,岩相为水下喷发的爆发相碎屑流亚相,在横向上有一定的变化、横纵比较大.

4.5　火山机构 5

该机构包括 6 个堆积单元,在 Kora-1 井和 Kora-1a

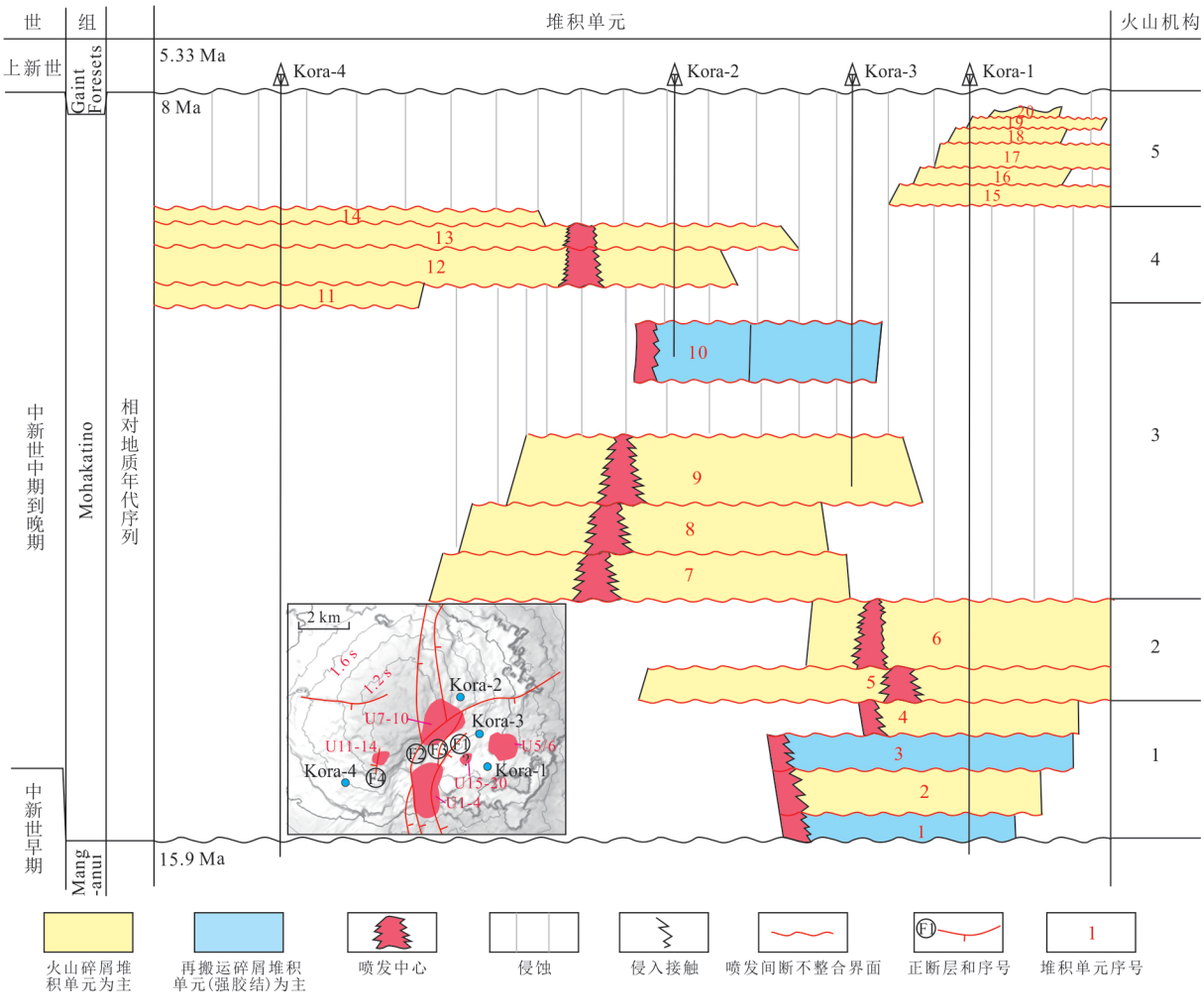

图 9 新西兰 Taranaki 盆地 Kora 火山的相对地质年代高分辨率地层格架

Fig.9 The high-resolution volcano-stratigraphic framework in relative geologic age of Kora Volcano in Taranaki Basin, New Zealand

沉积岩年龄来自生物地层学研究 (Bergman *et al.*, 1992; Kutovaya *et al.*, 2019),火山岩的年龄测定采用 K-Ar 和 Ar-Ar 测年方法(Bergman *et al.*, 1992). 样品是明显蚀变的角闪石,火山岩的年龄数据精度不高,因此火山地层格架的年龄数据仅基于生物地层学数据

井中有揭示. 这部分的喷发中心不清晰,但产状是向东倾斜的. 伽马测井值低于单元 11、12、13 和 14,所以火山机构 5 和火山机构 4 在岩性上不一致. Kora-1 井显示单元 15、16、17、18 和 19 为中低密度和中高声波特征. 岩心揭示包括火山碎屑堆积单元和再搬运碎屑堆积单元两类,但地震资料很难确定二者的界面. 在地层格架的充填单元中将其看成火山碎屑堆积单元和再搬运碎屑堆积单元的复合体. 岩性以火山碎屑岩、沉火山碎屑岩为主,夹少量沉积岩,岩相为水下喷发的爆发相碎屑流亚相和沉火山碎屑岩相再搬运火山碎屑沉积岩亚相的混合. 该机构每个单元的外形均为席状,堆积单元具有较大的横纵比.

5 讨论

5.1 火山地层格架的时间属性

现代火山的历史表明,喷发阶段在时间尺度上是稀疏的点,喷发间断的时间是连续的(杨晓平等, 2019). 有一些火山喷发时间较短,如中国东北的老黑山火山和火烧山火山;文献中记录老黑山火山的建造时间为 14 个月,从 1720 年 2 月到 1721 年 3 月. 此外,紧随老黑山火山之后,火烧山火山在 1921 年喷发(陈洪洲和吴雪娟,2003). 总的来说,单次连续喷发的持续时间的主体小于 6 个月. 埋藏火山应该和现代火山具有相同的时间属性. Kora 火山的年龄数据中存在一些与正常叠置层序有矛盾的数据. 在 Kora-1a 井中,1 827.6 m(18.2±2.0 Ma)样品的结果

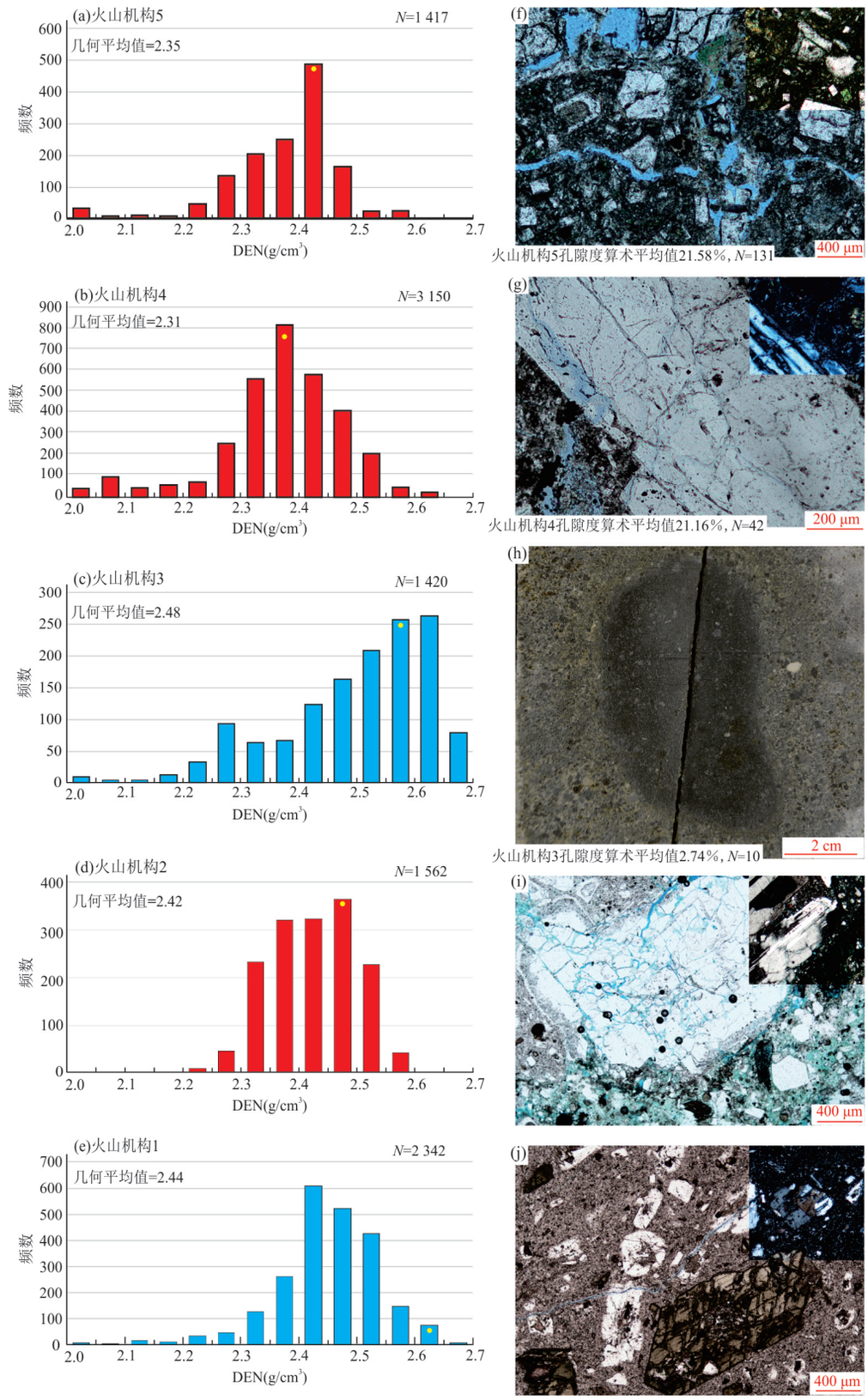

图 10　新西兰 Taranaki 盆地 Kora 火山各机构的测井密度特征和典型孔隙特征

Fig.10　Characteristics of density and void space of volcanic edifices in Kora Volcano, Taranaki Basin, New Zealand

f. 火山机构 5，Kora-1 井，1 798 m，凝灰岩；g. 火山机构 4，Kora-2 井，1 323 m，凝灰岩；h. 火山机构 3，Kora-3 井，1 804.8 m，沉火山角砾岩，强钙质胶结；i. 火山机构 2，Kora-1 井，1 990.1 m，晶屑凝灰岩，长石具有微裂缝；j. 火山机构 1，Kora-1 井，2 575 m，凝灰质砾岩，安山岩砾石．N 为数据总数或样品数，图 a～e 中黄点为右侧典型照片对应的密度值，孔隙度数据据唐华风等(2021)

比1 901.1 m(17.5±1.9 Ma)样品要老;此外,在Kora-2井中,1 778.9 m样品(11.0±1.2 Ma)的结果比1 803.0 m(8.0±0.9Ma)样品要老(Bergman *et al.*, 1992). 该现象可能是由K-Ar和Ar-Ar年代测定法和火山碎屑样品本身造成的. 首先,分析用的角闪石样品明显经受过蚀变;其次,火山碎屑堆积单元和再搬运碎屑堆积单元中的同岩浆矿物难以确定;第三,取心有限,很难获得埋藏火山每个喷发阶段的样品. 所以这些数据精确度不高,对整个火山的时代分析是有用的,但难以满足构建Kora火山的高精度地层格架的要求.

Kora火山的下伏地层为中新世早期的深海泥岩,年代为18.70~15.90 Ma,可能意味着早期火山喷发开始于约15.9 Ma(Bergman *et al.*, 1992;Kutovaya *et al.*, 2019). 角闪石测年数据表明,Kora-1a、Kora-2和Kora-3井的火山岩年龄为19.5±4.2 Ma~8.0±0.9 Ma,19.5 Ma早于下伏地层的最老年龄,应该不是火山喷发的年龄,将这个年龄解释为深部岩浆开始结晶的年龄. 根据下伏沉积岩(Manganui组)的最晚年代,火山的喷发作用估计在15.9 Ma开始. 根据上覆沉积岩(Gaint Foresets组)的最早年代,喷发大约持续到8 Ma. 因此,火山地层建造的时间跨度不超过8 Ma.

综上所述,埋藏火山很难建立准确的绝对地质年代格架,即使幸运地获得了每次喷发的绝对地质年龄,在火山地层格架上也只是一些零散孤立的点(陈淑华等,2020;赵鹏飞等,2021). 这将错过火山地层的重要信息,反而夸大了构成火山次要部分的信息,如再搬运火山碎屑和沉积岩在时间轴上是连续的. 地层叠覆原理说明了根据岩层上下位置的相对关系确定岩层的相对年龄的思想. 相对年代的地层格架只需要表示堆积单元之间的先后(老新)顺序关系,而不需要确定每个单元形成的绝对时间. 因此,根据叠覆原理建立相对年代的高精度地层格架是埋藏火山的更好选择,也有利于表述火山地层的物质特征和空间属性.

5.2 埋藏火山地层格架的合理精度及对储层的约束

根据岩心、测井和地震数据可以建立埋藏火山的高精度地层格架. 岩心是表征界面系统和充填单元的最佳数据,但在大多数时候是稀少的,所以火山地层格架分辨率受到测井和地震数据的限制. 在没有井标定时,只能根据喷发间断不整合或构造不整合界面及其叠置关系识别出火山机构一级的地层格架,难以对火山机构内幕的堆积单元进行识别;根据Kora-1a井的特征可知,部分喷发间断准整合界面也难以被识别,只有在钻井的标定下才有可能准确地识别出堆积单元精度的地层格架. 因此,利用常规三维地震数据可以建立火山机构尺度的地层格架,这也是勘探早期所能达到的最好识别精度;进入勘探中后期,建立堆积单元尺度的高精度地层格架必须依靠钻井和岩心资料.

在高精度地层格架的约束下可以进一步约束有利储层. 如Kora火山的岩心揭示储层与岩性的关系为火山碎屑岩>沉火山碎屑岩>火山碎屑沉积岩>沉积岩(唐华风等,2021),强胶结作用会显著降低储层物性.

Kora-1井2 224~2 580 m属于火山机构1,Kora-1井1 986~2 224 m属于火山机构2,Kora-2井1 500~1 656 m和Kora-3井1 750~1 928 m属于火山机构3,Kora-2井1 280~1 500 m和Kora-4井1 680~1 940 m属于火山机构4,Kora-1井1 770~1 985 m属于火山机构5. 密度测井可以反映岩石的致密程度,利用密度测井来反映孔隙,密度大则孔隙小、密度小则孔隙大. 火山机构1、3整体呈现高密度的特点,火山机构4、5呈现中低密度的特点,火山机构2介于二者之间. 5个火山机构密度的几何平均值也表现为火山机构2、4和5小于火山机构1、3(图10a~10e);表明火山机构2、4和5的储层更好,火山机构1、3的储层较差.

Kora火山的再搬运颗粒致密,使总孔隙度降低,特别是在高孔隙度的岩石中,再搬运颗粒含量的增加会显著降低总孔隙度. 火山机构1、3再搬运碎屑堆积单元比例高、强钙质胶结现象普遍,一方面熔岩砾石孔隙少、密度大,会导致岩石密度变大、孔隙度低(图10j);另一方面钙质胶结会充填岩石孔隙,使孔隙度降低、岩石密度增加,Kora-3井岩心出现大量强胶结作用(图10h). 火山机构2、4和5的再搬运颗粒比例少、未发现强钙质胶结现象,所以密度小、孔隙好. 因此,导致不同火山机构物性差异的主控因素为再搬运颗粒的含量与强胶结作用.

6 结论

(1)Kora火山形成于弧后盆地,岩性以中性火山碎屑岩和沉火山碎屑岩为主. 喷发间断不

整合界面系统是高精度火山地层格架的重要约束因素,该类界面地质标志为风化壳顶面和沉火山碎屑岩底面,在测井上响应为高伽马、低密度和高声波特征,测井小波变换为高频-低频强振幅异常.根据井-震对比,在 Kora 火山识别出 19 个喷发间断不整合界面.

(2)堆积单元包括火山碎屑堆积单元和再搬运碎屑堆积单元.Kora 火山的火山碎屑堆积单元为爆发相的碎屑流亚相,有 2 种相结构:一是块状的、粗粒的、分选差的和颗粒支撑,二是层理发育、细颗粒、分选好的和杂基支撑,前者离喷出口近、后者离喷出口远.再搬运碎屑堆积单元为火山沉积相中的再搬运火山碎屑沉积岩亚相,除圆状非新生火山颗粒的含量不同外,再搬运碎屑堆积单元的结构也可有厚层块状和薄层层理发育两类.

(3)利用钻井和地震资料可以建立堆积单元尺度的高精度火山地层格架.根据喷发间断不整合界面的叠置关系、在 Kora 火山识别出 20 个堆积单元,根据喷发中心的迁移和地质体的产状变化,可分为 5 个火山机构.相比较而言火山机构 2、4 和 5 的储层物性更好,导致不同火山机构物性差异的主控因素为再搬运颗粒的含量与强胶结作用.

致谢:感谢 D. Gravely、M. Villeneuve 和 A. Nichols 对火山系统中地质过程的解释!

References

Andrews, G. D. M., Branney, M. J., Bonnichsen, B., et al., 2008. Rhyolitic Ignimbrites in the Rogerson Graben, Southern Snake River Plain Volcanic Province: Volcanic Stratigraphy, Eruption History and Basin Evolution. *Bulletin of Volcanology*, 70(3): 269－291. https://doi.org/10.1007/s00445-007-0139-0

Bergman, S.C., Talbot, J.P., Thompson, P.R., 1992. The Kora Miocene Submarine Andesite Stratovolcano Hydrocarbon Reservoir, Northern Taranaki Basin, New Zealand. In: 1991 New Zealand Oil Exploration Conference. Society of Petroleum Engineers, New Zealand, 178－206.

Bischoff, A.P., 2019. Architectural Elements of Buried Volcanic Systems and Their Impact on Geoenergy Resources (Dissertation). University of Canterbury, Christchurch.

Bischoff, A. P., Nicol, A., Beggs, M., 2017. Stratigraphy of Architectural Elements in a Buried Volcanic System and Implications for Hydrocarbon Exploration. *Interpretation*, 5(3): 141－159. https://doi. org/10.1190/INT-2016-0201.1

Chen, H.Z., Wu, X.J., 2003. Observation Records of the Eruption of Wudalianchi Volcanoes in 1720－1721 AD. *Seismology and Geology*, 25(3): 491－500 (in Chinese with English abstract).

Chen, Q., Qian, G.B., Dang, Y., et al., 2008. A Study on Stratigraphic Sequences and Lithofacies of the Igneous Rocks in Ke Well-92 Region. *Journal of Southwest Petroleum University* (*Science & Technology Edition*), 30(4): 48－50 (in Chinese with English abstract).

Chen, S.H., Lin, C.L., Xu, W.G., et al., 2020. Age and Tectonic Significance of Volcanic Rocks in Cretaceous Red Beds in Fujian. *Earth Science*, 45(7): 2508－2523 (in Chinese with English abstract).

Chen, Y.Q., Li, B.G., 2004. Classification and Correlation of Permian Volcanic Rocks in Mid-Tarim Area. *Journal of China University of Petroleum* (*Edition of Natural Sciences*), 28(6): 6－10 (in Chinese with English abstract).

Dai, X. J., Tang, H. F., Zhang, T., et al., 2019. Facies Architecture Model of the Shimentan Formation Pyroclastic Rocks in the Block-T Units, Xihu Sag, East China Sea Basin, and Its Exploration Significance. *Acta Geologica Sinica* (*English Edition*), 93(4): 1076－1087. https://doi.org/10.1111/1755-6724.13807

Giannetti, B., De Casa, G., 2000. Stratigraphy, Chronology, and Sedimentology of Ignimbrites from the White Trachytic Tuff, Roccamonfina Volcano, Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 96(3－4): 243－295. https://doi. org/10.1016/S0377-0273(99)00144-4

Gu, L.X., Ren, Z.W., Wu, C.Z., et al., 2002. Hydrocarbon Reservoirs in a Trachyte Porphyry Intrusion in the Eastern Depression of the Liaohe Basin, Northeast China. *AAPG Bulletin*, 86(10): 1821－1832. https://doi.org/10.1306/61eedd8c-173e-11d7-8645000102c1865d

Holt, W. E., Stern, T. A., 1994. Subduction, Platform Subsidence, and Foreland Thrust Loading: The Late Tertiary Development of Taranaki Basin, New Zealand. *Tectonics*, 13(5): 1068－1092. https://doi. org/10.1029/94tc00454

Hou, M.C., Jiang, W.J., Deng, M., et al., 2019. Characteristics of Ordovician Volcaniclastic Materials in Yanxia Area of Northern Tarim Basin and Their Geological Significance. *Earth Science*, 44(3): 822－832 (in Chinese with English abstract).

Infante-Paez, L., Marfurt, K. J., 2017. Seismic Expression and Geomorphology of Igneous Bodies: A Taranaki Ba-

sin, New Zealand, Case Study. *Interpretation*, 5(3): 121－140. https://doi.org/10.1190/INT-2016-0244.1

Infante-Paez, L., Marfurt, K. J., 2018. In-Context Interpretation: Avoiding Pitfalls in Misidentification of Igneous Bodies in Seismic Data. *Interpretation*, 6(4): 29－42. https://doi.org/10.1190/ INT -2018-0076.1

Kamp, P. J. J., 1984. Neocene and Quaternary Extent and Geometry of the Subducted Pacific Plate beneath North Island, New Zealand: Implications for Kaikoura Tectonics. *Tectonophysics*, 108(3－4): 241－266. https://doi.org/10.1016/0040-1951(84)90238-5

King, P. R., Thrasher, G. P., 1996. Cretaceous-Cenozoic Geology and Petroleum Systems of the Taranaki Basin, New Zealand. *Monograph - Institute of Geological and Nuclear Sciences* (*New Zealand*), 13.

Kutovaya, A., Kroeger, K. F., Seebeck, H., et al., 2019. Thermal Effects of Magmatism on Surrounding Sediments and Petroleum Systems in the Northern Offshore Taranaki Basin, New Zealand. *Geosciences*, 9(7): 288. https://doi.org/10.3390/geosciences9070288

Lockwood, J.P., Hazlett, R.W., 2010. Volcanoes: Global Perspectives. Wiley-Blackwell, New Jersey.

Lucchi, F., Tranne, C. A., De Astis, G., et al., 2008. Stratigraphy and Significance of Brown Tuffs on the Aeolian Islands (Southern Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(1): 49－70. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.11.006

Nicol, A., Campbell, J. K., 1990. Late Cenozoic Thrust Tectonics, Picton, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 33(3): 485－494. https://doi.org/10.1080/00288306.1990.10425703

Rey, S. S., Planke, S., Symonds, P. A., et al., 2008. Seismic Volcanostratigraphy of the Gascoyne Margin, Western Australia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172(1－2): 112－131. https://doi. org/10.1016/j.jvolgeores.2006.11.013

Rohrman, M., 2007. Prospectivity of Volcanic Basins: Trap Delineation and Acreage De-Risking. *AAPG Bulletin*, 91(6): 915－939. https://doi.org/10.1306/12150606017

Seebeck, H., Nicol, A., Villamor, P., et al., 2014. Structure and Kinematics of the Taupo Rift, New Zealand. *Tectonics*, 33(6): 1178－1199. https://doi.org/10.1002/2014TC003569

Sutherland, R., 1995. The Australia-Pacific Boundary and Cenozoic Plate Motions in the SW Pacific: Some Constraints from Geosat Data. *Tectonics*, 14(4): 819－831. https://doi.org/10.1029/95TC00930

Tang, H.F., Bai, B., Bian, W.H., et al., 2012. Quantitative Models of Strata Texture within Volcanic Edifices of Yingcheng Formation in Songliao Basin, NE China. *Acta Petrolei Sinica*, 33(4): 541－550 (in Chinese with English abstract).

Tang, H.F., Li, R.L., Wu, Y.H., et al., 2011. Textural Characteristics of Volcanic Strata and Its Constraint to Impedance Inversion. *Chinese Journal of Geophysics*, 54 (2): 620－627 (in Chinese with English abstract).

Tang, H. F., Phiri, C., Gao, Y. F., et al., 2015. Types and Characteristics of Volcanostratigraphic Boundaries and Their Oil-Gas Reservoir Significance. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89(1): 163－174. https://doi.org/10.1111/1755-6724.12402

Tang, H.F., Sun, H.B., Gao, Y.F., et al., 2013. Types and Characteristics of Volcanostratigraphic Boundary and Its Signification of Reservoirs. *Journal of Jilin University* (*Earth Science Edition*), 43(5): 1320－1329 (in Chinese with English abstract).

Tang, H.F., Wang, H.F., Kennedy, B., et al., 2021. Characteristics and Controlling Factors of Volcanic Reservoirs of Subaqueous Pyroclastic Rocks: An Analysis of the Miocene Kora Volcano in the Taranaki Basin, New Zealand. *Earth Science Frontiers*, 28(1): 375－387 (in Chinese with English abstract).

Tang, H.F., Zhao, P.J., Gao, Y.F., et al., 2017. Spatio-Temporal Attributes of Volcano Stratigraphy and Its Lithostratigraphic Units in a Basin. *Journal of Jilin University* (*Earth Science Edition*), 47(4): 949－973 (in Chinese with English abstract).

Tian, Z.H., Xu, W., Liu, L.S., et al., 2020. Paleoproterozoic Back-Arc Basin Opening and Closure: Evidence from the Structural Research of the Volcanic-Sedimentary Rocks in the Helan Town, Liaodong Peninsula. *Earth Science*, 45(9): 3217－3238 (in Chinese with English abstract).

Wang, P.J., Zhang, G.C., Meng, Q. A., et al., 2011. Applications of Seismic Volcanostratigraphy to the Volcanic Rifted Basins of China. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(2): 597－610 (in Chinese with English abstract).

Wu, C. Z., Gu, L. X., Zhang, Z. Z., et al., 2006. Formation Mechanisms of Hydrocarbon Reservoirs Associated with Volcanic and Subvolcanic Intrusive Rocks: Examples in Mesozoic-Cenozoic Basins of Eastern China. *AAPG Bulletin*, 90(1): 137－147. https://doi. org/10.1306/04070505004

Wu, X. Z., Guo, Q. L., Zhang, W., et al., 2021. Characteristics of Volcanic Reservoirs and Hydrocarbon Accumulation of Carboniferous System in Junggar Basin, China.

Journal of Earth Science, 32(4): 972－985. https://doi.org/10.1007/s12583-020-1119-y

Yang, X.P., Jiang, B., Yang, Y.J., 2019. Spatial-Temporal Distribution Characteristics of Early Cretaceous Volcanic Rocks in Great Xing′an Range Area. *Earth Science*, 44(10): 3237－3251 (in Chinese with English abstract).

Zhao, P.F., Liu, P., Ming, J., et al., 2021. Distribution Characteristics of Volcanic Rock in CFD Oilfield and Its Controlling Effect on Reservoir. *Earth Science*, 46(7): 2466－2480 (in Chinese with English abstract).

Zhao, R.L., Wang, P.J., Zhao, H., et al., 2016. Reservoir Significance of Volcanostratigraphic Boundary: A Case Study of Huoshiling Formation, Southern Songliao Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 37(4): 454－463 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈洪洲，吴雪娟，2003. 五大连池火山 1720－1721 年喷发观测记录. 地震地质，25(3): 491－500.

陈庆，钱根宝，党艳，等，2008. 克 92 井区火山岩地层格架与岩相研究. 西南石油大学学报(自然科学版)，30(4): 48－50.

陈淑华，林慈銮，徐维光，等，2020. 福建白垩纪红层火山岩夹层时代及构造意义. 地球科学，45(7): 2508－2523.

陈业全，李宝刚，2004. 塔里木盆地中部二叠系火山岩地层的划分与对比. 中国石油大学学报(自然科学版)，28(6): 6－10.

侯明才，江文剑，邓敏，等，2019. 塔里木盆地盐下地区奥陶系火山碎屑物质特征. 地球科学，44(3): 822－832.

唐华风，白冰，边伟华，等，2012. 松辽盆地营城组火山机构地层结构定量模型. 石油学报，33(4): 541－550.

唐华风，李瑞磊，吴艳辉，等，2011. 火山地层结构特征及其对波阻抗反演的约束. 地球物理学报，54(2): 620－627.

唐华风，孙海波，高有峰，等，2013. 火山地层界面的类型、特征和储层意义. 吉林大学学报(地球科学版)，43(5): 1320－1329.

唐华风，王寒非，Kennedy, B.，等，2021. 水下喷发火山碎屑岩储层特征及主控因素：以新西兰 Taranaki 盆地中新世 Kora 火山为例. 地学前缘，28(1): 375－387.

唐华风，赵鹏九，高有峰，等，2017. 盆地火山地层时空属性和岩石地层单位. 吉林大学学报(地球科学版)，47(4): 949－973.

田忠华，许王，刘利双，等，2020. 辽东半岛河栏镇火山-沉积岩构造研究：对古元古代弧后盆地张裂与闭合的启示. 地球科学，45(9): 3217－3238.

王璞珺，张功成，蒙启安，等，2011. 地震火山地层学及其在我国火山岩盆地中的应用. 地球物理学报，54(2): 597－610.

杨晓平，江斌，杨雅军，2019. 大兴安岭早白垩世火山岩的时空分布特征. 地球科学，44(10): 3237－3251.

赵鹏飞，刘朋，明君，等，2021. CFD 油田火山岩展布特征及其对油藏的控制作用. 地球科学，46(7): 2466－2480.

赵然磊，王璞珺，赵慧，等，2016. 火山地层界面的储层意义：以松辽盆地南部火石岭组为例. 石油学报，37(4): 454－463.