

渤海湾盆地南堡凹陷火山岩锆石年代学及形成模式

杜景霞,石文武,周 贺,王全利,夏秋君,刘君荣

(中国石油 冀东油田分公司 勘探开发研究院,河北 唐山 063004)

摘要:南堡凹陷古近系火山岩经历了两个裂陷旋回、4个喷发幕。对火山岩锆石形貌、SHRIMP和LA-ICPMS U-Pb年龄测定及Lu-Hf同位素研究结果表明,岩浆旋回早期的锆石95%以上为变质重结晶形成,U-Pb年龄变化大,主要来自1 800 Ma前碰撞花岗岩地壳,它是中、新太古代(2 900~2 600 Ma)新生地壳与古洋壳碰撞引起的重熔和再循环过程而形成的。岩浆旋回中、晚期锆石为幔源原岩岩浆溢出结晶而成,含岩浆锆石和较丰富的俘虏晶,有利于进行锆石年代学 and 同位素研究。通过这些锆石年龄,建立了南堡凹陷和华北克拉通相对应的构造热事件的垂向序列,同时准确标定了幔源岩浆溢出和相关地层的绝对年龄。南堡凹陷的馆陶组属于新近系中新统,东营组属于古近系渐新统,而沙河街组跨越古近系的古新统和始新统。

关键词:新生代玄武岩;SHRIMP 锆石年龄;火山岩;南堡凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE135

文献标识码:A

Zircon U-Pb age and formation model of volcanic rocks from Nanpu Sag of Bohai Bay Basin

Du Jingxia, Shi Wenwu, Zhou He, Wang Quanli, Xia Qiuju, Liu Junrong

(Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan, Hebei 063004, China)

Abstract: Nanpu Sag underwent two magmatic cycles and four episodic eruptions. Zircons of volcanic rocks from Nanpu Sag are dated by U-Pb SHRIMP, LA-ICPMS and Lu-Hf isotope method. The results indicate that more than 95% of zircons in the early magmatic cycle are formed by metamorphic recrystallization, with a big range of U-Pb age. It is explained that they are formed by collision granite crust in 1 800 Ma, which is caused by remelt and recycling process induced by collision between new crust of Middle and Neo-Archean (2 900~2 600 Ma) with palaeo-oceanic crust. In the middle to late magmatic cycle, zircons are formed by crystallization of mantle-derived magma overflow, and they contain magmatic zircon and rich captive crystal, which are helpful for chronology and isotope studies. Through those zircon ages, a vertical sequence of correspondent tectono-thermal events of the North China craton and Nanpu Sag is established. Moreover, the absolute ages of mantle-derived magma overflow and the related strata are calibrated accurately. The result shows that Guantao Formation belongs to Miocene, Dongying Formation belongs to the Oligocene and Shahejie Formation crosses Paleocene and Eocene.

Key words: Cenozoic basalt, Zircon U-Pb age, volcanic rock, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin

中生代以来,中国东部构造岩浆活动强烈,出现了大规模的玄武质火山作用,广泛分布着中、新生代火山岩,前人已有对其主量元素、微量元素以及Sr, Nd, Pb同位素岩浆源区(地壳及各种地幔端元)识别及演化特征示踪研究^[1-2],还有火山岩储层成藏、包裹体等方面的报道^[3-11],但缺少U-Pb年代学锆石年龄方面的研究。本研究以渤海湾盆地南堡凹陷内的多期幔源喷发玄武岩为对象,利用低混染玄武岩或重熔壳源火山岩中获取的岩浆锆石,测得始新统上部至中新统底部

的U-Pb年龄,为在南堡凹陷乃至渤海湾盆地建立年代地层序列和开展全球对比提供了可靠依据。准确厘定这套火山岩的形成时代,对于揭示南堡凹陷的构造格局与演化历史有重要意义。

1 南堡凹陷火山岩喷发序列

南堡凹陷是渤海湾盆地黄骅拗陷北部的一个小型含油气构造单元,是在华北地台上,经中、新生代的块

收稿日期:2014-02-10;修订日期:2014-06-20。

第一作者简介:杜景霞(1981—),女,硕士、工程师,石油地质。E-mail:dujingxia2008@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05006-006)。

断运动而发育起来的一个中生界北断南超的箕状凹陷。发育的地层主要有前新生界(奥陶系、石炭系—二叠系、侏罗系和白垩系)、古近系沙河街组和东营组以及新近系馆陶组和明化镇组。

南堡凹陷内含有大量新生代火成岩,主要分布在凹陷西南部,如南堡5号构造、南堡1号构造,老爷庙地区火山岩尤为发育^[12-14]。本区火山岩大致形成于沙河街期、东营期和馆陶期,每次火山活动间隙期都有大量沉积地层,说明火山活动的周期性和旋回性很强,盆地形成存在阶段性。在前人研究基础上,对火山岩(包括次火山岩)的厚度—岩性进行统计,南堡凹陷的裂谷与岩浆上涌、喷发过程在渤海湾盆地具代表性,整体演化过程可划分为两个旋回、4个喷发幕;每个岩浆演化旋回对应一个构造层序^[11-12]。每个演化旋回由初始湖扩开始,依次经历热点上隆、最大湖扩、热点强烈上隆、最后以湖退和构造抬升结束(图1)。在南堡凹陷,第一演化旋回由古近系沙河街组沙三段5亚段($Es^{3(5)}$)、沙三段4亚段($Es^{3(4)}$)、沙三段3亚段($Es^{3(3)}$)、沙三段2亚段($Es^{3(2)}$)和沙三段1亚段($Es^{3(1)}$)组成, $Es^{3(5)}$ 为含3~4个湖底火山岩熔岩溢流期,构成初始喷发幕; $Es^{3(4)}$ 不含火山岩,代表喷发后的最大湖扩; $Es^{3(3)}$ 至 $Es^{3(1)}$ 含9~10个湖底火山岩熔岩溢流期,构成强烈喷发幕。第二演化旋回由古近系沙河街组沙二段(Es^2)、沙一段(Es^1)、东营组三段(Ed^3)、二段(Ed^2)、一段(Ed^1)和馆陶组(Ng)构成, Es^2 、 Es^1 和 Ed^3 含5~6个湖底火山岩熔岩喷发期,构成初始喷发幕; Ed^2 中发现一个湖底火山岩熔岩喷发点,代表最大湖扩; Ed^1 至 Ng 为由湖底火山喷发转化为火山熔岩大面积水上溢出的过程,构成火山强烈喷发幕。分别对这两个旋回进行取样,样品包括 Es^3 、

Es^1 、 Ed^3 和 Ng 的岩心,多为灰黑、灰绿色的玄武岩。

2 锆石年代学

根据火山岩的分布特征,挑选了7个样品,分别是:下白垩统, NP5-4井(5360 m, 斜斑玄武岩);第一旋回, NP5-96井(3964 m, 安山岩)、NP5-4井(4107.3 m, 流纹岩)、NP5-4井(3573 m, 流纹岩);第二旋回, NP5-4井(3573 m, 流纹岩), NP1井(4044~4045 m, 斜斑玄武岩)、M1井(4066~4068 m, 玄武岩)、JH1X1井(2490.04~2492.65 m, 玄武岩)。

样品NP1井(4045 m, 斜斑玄武岩)中的锆石自形程度较好,无色透明的不规则粒状—长条状,长宽比为2:1至1.5:1(图2a),为岩浆锆石;NP5-4井(4107.3 m, 流纹岩)中的锆石自形程度较好,长宽比为2.5:1至1.5:1。大部分锆石具有较好的环带结构或条带状结构(图2b),属岩浆锆石;NP5-4井(5360 m, 斜斑玄武岩, 下白垩统)中的锆石颗粒整体较小(图2c),粒径多在40~80 μm ,颗粒多为椭圆状或不规则粒状,未见自形柱状颗粒。阴极发光图像显示:颗粒多为核边结构,暗色均一的核外为浅色具振荡环带或均一结构的边,部分颗粒具较暗振荡环带或均一结构。锆石特征显示颗粒多为捕虏晶,推测年龄较老。

2.1 下白垩统火山岩锆石

样品NP5-4井(5360 m, 斜斑玄武岩, 下白垩统),有效测试的锆石颗粒共21颗。共获得22个U-Pb年代学数据,主要分为5组,依次为:中太古代(3176~3051 Ma, 同一个颗粒,2个数据),太古宙末期(2521~2418 Ma, 3个数据)、古元古代中晚期(2177~1856 Ma, 15个

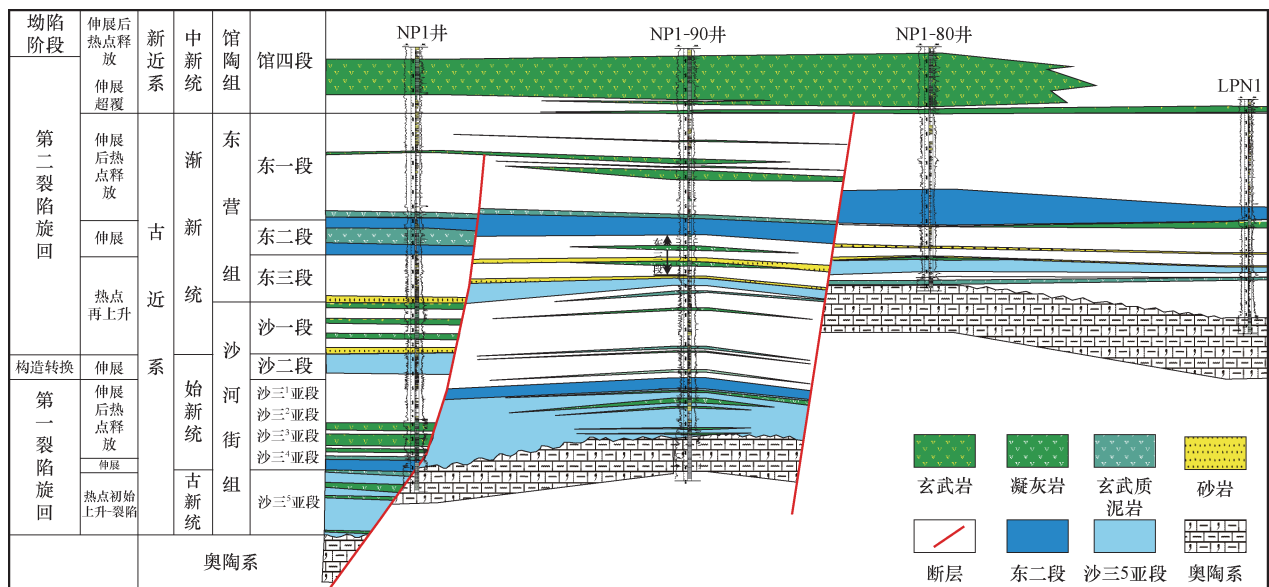


图1 南堡凹陷构造—岩浆演化旋回和火山喷发幕划分

Fig. 1 Tectono-magmatic evolutionary cycles and volcanic eruption division of Nanpu Sag

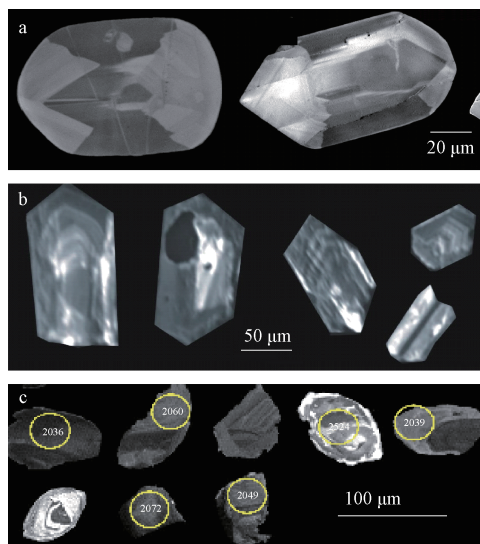


图2 锆石阴极发光图像

Fig. 2 Cathodoluminescence images of zircon

(圆圈表示锆石 U-Pb 年龄分析点及对应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。)a. NP1 井, 4 045 m, Es^2 ; b. NP5-4 井, 4 107.3 m, Es^3 ;
c. NP5-4 井, 5 360 m, 下白垩统

数据)、新元古代(880 Ma, 1 个数据), 最新的年龄为中生代(144 Ma, 1 个数据)(图 3)。本样品中年龄分布比较复杂, 最年轻的年龄(144 Ma)揭示了岩浆的喷发时代可能为早白垩世。

2.2 第一演化旋回火山岩锆石

样品南堡 5-96 井(3 963.36 ~ 3 964.45 m, 安山岩)利用 LA-ICPMS 法获得 25 个 U-Pb 年代学数据, 其中谐和-近谐和数据 21 个, 年龄主要分为 4 组(图 4a): 2 593 ~ 2 552 Ma, 2 个数据; 2 030 ~ 1 756 Ma, 6 个数据, 俘获晶主要来源于深部碰撞花岗岩地壳; 438 ~ 146 Ma, 6 个数据, 代表火山口碎屑锆石混染; 39 ~ 34 Ma, 7 个数据, 平均 $35.5 \text{ Ma} \pm 1.5 \text{ Ma}$, 代表 Es^3 早期的绝对地层年龄。

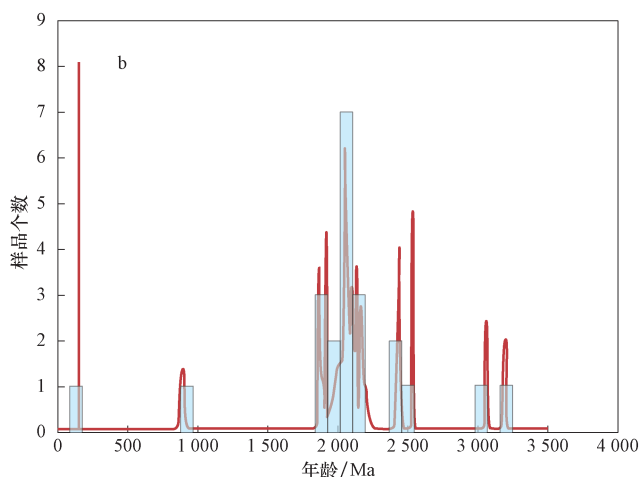
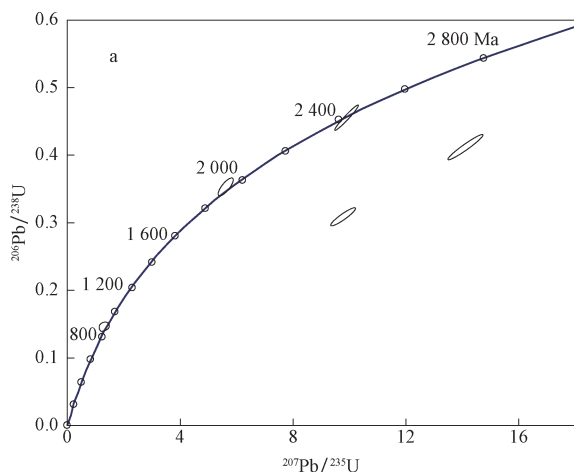


图3 NP5-4 井(5 360 m)SHRIMP U-Pb 年龄谐和图 a) 和岩浆锆石 U-Pb 年龄分布密度 b)

Fig. 3 U-Pb zircon concordia diagram a) and magmatic zircon U-Pb age distribution density diagram b) from 5 360 m section of Well NP5-4

共获得 13 组 Lu-Hf 同位素数据。仅两个岩浆锆石数据, 年龄分别为 34 Ma 和 35 Ma, 利用谐和年龄值图解, 岩浆锆石的加权平均年龄为 $35.5 \text{ Ma} \pm 1.5 \text{ Ma}$ (图 4b)。

样品 NP5-4 井(4 107.3 m, 流纹岩)分离出大量岩浆锆石, 颗粒较粗, 晶形好, 部分具环带结构。利用 LA-ICPMS 方法, 得出谐和年龄为 $35.34 \text{ Ma} \pm 0.26 \text{ Ma}$ (图 5), 代表 Es^3 顶部的绝对地层年龄, 与 NP5-96 同层位的年龄一致。

样品 NP5-4 井(3 573 m, 流纹岩)利用 LA-ICPMS 方法共获得谐和-近谐和年龄 16 个。年龄主要分为 3 组: 古元古代中晚期(1 962 ~ 1 701 Ma, 3 个数据)、古生代(385 ~ 295 Ma, 2 个数据)以及第三系(36 ~ 34 Ma, 11 个数据)。其中, 36 ~ 34 Ma 的锆石的阴极发光图像为条带环带结构, Th/U 比值为 0.62 ~ 1.18, 具明显岩浆锆石的特征, 加权平均年龄为 $34.55 \text{ Ma} \pm 0.62 \text{ Ma}$ (图 6), 代表 Es^3 下部的绝对年龄。

2.3 第二演化旋回火山岩锆石

样品 NP1 井, 4 044 ~ 4 045 m, 斜斑玄武岩, 代表第二演化旋回的开始。利用 SHRIMP 法共获得 17 个年龄数据, 仅有 1 个岩浆结晶锆石数据, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $33.6 \text{ Ma} \pm 1.5 \text{ Ma}$, 代表了沙二段顶部的绝对年龄。俘虏锆石年龄分布单一, 具有明显的变晶锆石特点, 特别是俘虏晶的铅丢失白色边缘的年龄远远小于内核年龄, 表明上涌的地幔柱在一定的深度集中俘虏了麻粒岩中地壳的锆石(图 7a)。俘虏的变晶锆石的 SHRIMP 年龄值的谐和图交点年龄与平均年龄均为 $2 509 \text{ Ma} \pm 18 \text{ Ma}$ (图 7b), 为新太古代地层的绝对年龄, 代表变晶铅丢失后的俘虏晶年龄, 变晶前可能为接近中、新太古代增生地壳的年龄(3 200 ~ 2 600 Ma)。锆石的形貌及年龄指示它们是来自于遭受俯冲热变质的麻粒岩中地壳。表明在 33.6 Ma 时上隆地幔柱顶部至少已到达中地壳。

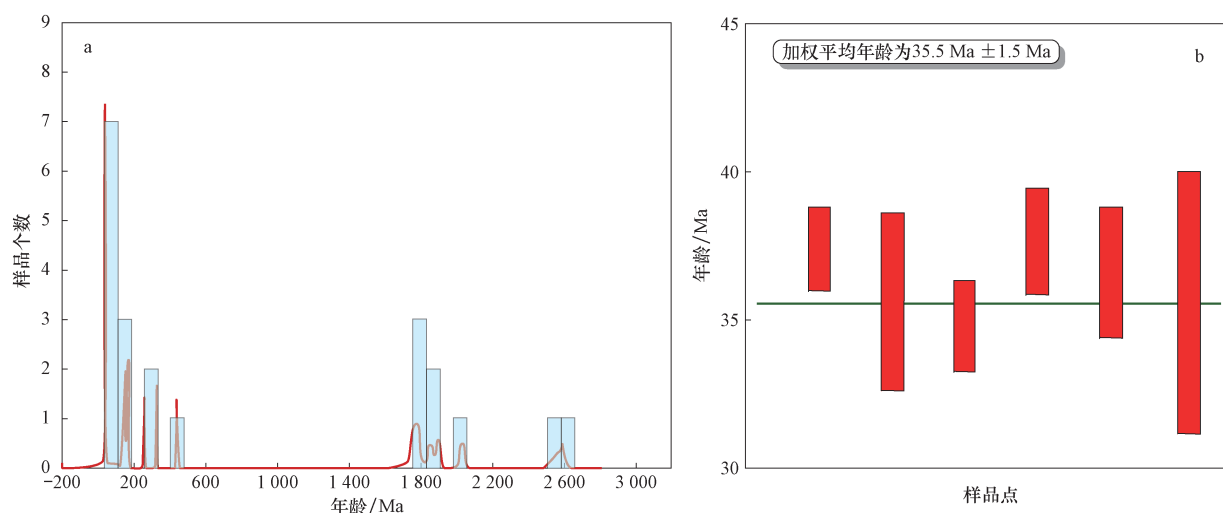


图4 NP5-96井锆石年龄分布密度 a) 与岩浆锆石加权平均年龄 b)

Fig. 4 U-Pb Zircon distribution density diagram a) and U-Pb Zircon weighted average age b) for andesite from Well NP5-96

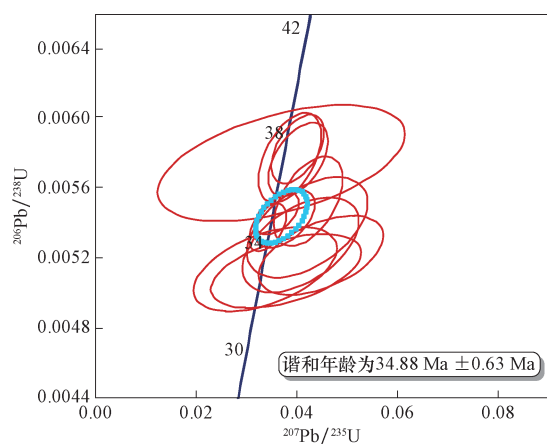


图5 NP5-4井4 107.3 m处流纹岩中的岩浆锆石 U-Pb 年龄值谐和图

Fig. 5 U-Pb zircon concordia diagram for rhyolite from 4 107.3 m section of Well NP5-4

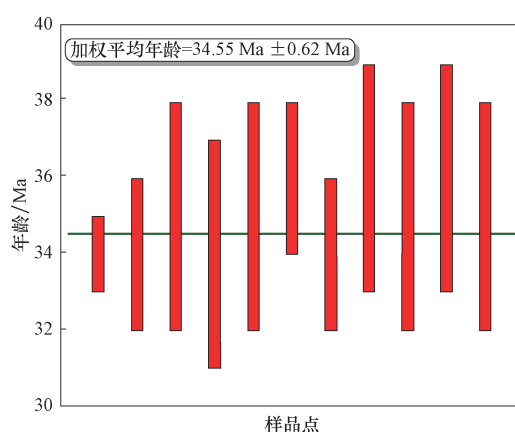
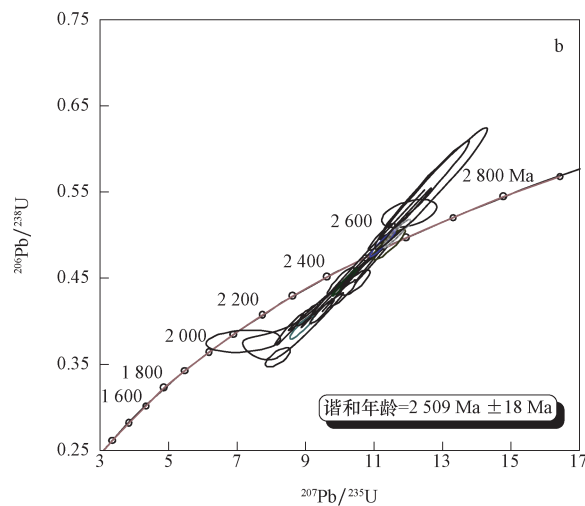
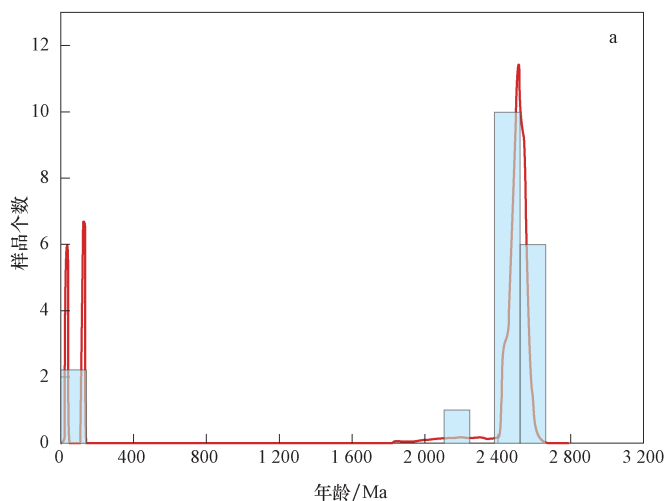
图6 NP5-4井3 573 m处流纹岩中的岩浆锆石 U-Pb 年龄分布密度与岩浆锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄
Fig. 6 U-Pb zircon age distribution density diagram and weighted average age for magmatic zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ from 3 573 m section of Well NP5-4

图7 NP1井4 044~4 045 m斜斑玄武岩中锆石年龄分布密度 a) 和 U-Pb 年龄谐和图 b)

Fig. 7 U-Pb Zircon age distribution density diagram a) and U-Pb Zircon concordia b) for basalt from 4 044-4 045 m section of Well NP1

M1 井 4 066 ~ 4 068 m, 岩浆锆石的形貌特征表现晶形好, 结构均一和简单的环带结构, 利用 SHRIMP 法测得的岩浆锆石年龄值中有 17 个值谐和度高, 谐和年龄为 $27.7 \text{ Ma} \pm 0.26 \text{ Ma}$ (图 8a), 加权平均年龄为 $26.0 \text{ Ma} \pm 1.0 \text{ Ma}$ (图 8b), 指示了岩浆事件发生在渐新世中晚期, 代表了东三段下部的绝对年龄。集中出现的俘虏晶交点年龄为 $2 483 \text{ Ma} \pm 10 \text{ Ma}$, 说明俘获晶唯独来源于古元古代增生地壳。岩浆锆石和俘获晶的年龄结果, 表明渐新世中晚期第二旋回初始喷发幕的玄武岩带来了古元古代增生的花岗岩上地壳的俘虏晶, 指示地幔柱顶面已经很浅。

JH1X1 井 2 490.04 ~ 2 492.65 m 为玄武岩, 获得的锆石包括俘虏锆石, 还有结构均一、自形较好的岩浆结晶锆石。岩浆锆石加权平均年龄为 $22.0 \text{ Ma} \pm 2.5 \text{ Ma}$, 指示火山事件年龄为中新世早期 (图 9), 代表了东一段至馆陶组年龄。玄武岩中的俘虏晶全部来 U-Pb 年龄为 $2 465 \text{ Ma}$ 的花岗岩上地壳, 说明馆陶期驱动火山事件的地幔柱已上升至上地壳。

3 讨论

3.1 各喷发旋回岩浆事件

在南堡凹陷, 第一岩浆喷发旋回 (NP5 - 4 井, 5 360 ~ 5 363 m), 样品中的锆石大部分是捕虏锆石。获得了一个 $3 000 \text{ Ma}$ ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄) 的年龄, 判断可能是华北陆块早期生长的产物^[15]; 一个 $2 432 \text{ Ma} \pm 10 \text{ Ma}$ 的谐和年龄和一个 $1 800 \text{ Ma}$ 的近谐和年龄, 这响应了华北地台前寒武纪出现过的两次重大地质事件, $2 500 \text{ Ma}$ 代表了华北陆块在新太古代末期, 由各微陆块通过陆-陆和弧-陆的方式拼合事件; $1 800 \text{ Ma}$ 代表了华北陆块在古元古代中晚期, 由东部地块、西部地

块和中央构造带拼合成克拉通现存的构造格局^[16-17]; 还发现一个 $880 \text{ Ma} \pm 24.7 \text{ Ma}$ 的近谐和年龄, 其 Th/U 比值都大于 0.8, 为岩浆锆石, 可能反映了 Rodinia 超大陆的拼合裂解事件在华北陆块也有响应^[16-17], 获得了 2 个岩浆锆石年龄 $35.34 \text{ Ma} \pm 0.26 \text{ Ma}$ 和 $34.55 \text{ Ma} \pm 0.62 \text{ Ma}$, 分别标定了玄武岩所在地层 Es³ 早期和晚期绝对年龄。

第二岩浆喷发旋回早期, 幔源岩浆中主要以变质重结晶锆石为主, 岩浆结晶锆石较少。变质重结晶锆石的来源推测为幔源岩浆在上升过程中捕虏了岩石圈底部的锆石。这两个样品获得的年龄分别是 $2 509 \text{ Ma} \pm 18 \text{ Ma}$ 和 $1 806 \text{ Ma} \pm 12 \text{ Ma}$, 这也响应了 $2 500 \text{ Ma}$ 和 $1 800 \text{ Ma}$ 华北地台前寒武纪出现过的两次重大地质事件。晚期幔源岩浆遭受混染, 锆石类型复杂化, 除了变质重结晶锆石外, 还出现了未变晶地壳锆石, 同时喷发结晶锆石也大量出现。得出的同喷发岩浆锆石的结晶年龄有 $33.6 \text{ Ma} \pm 1.5 \text{ Ma}$ 和 $27.7 \text{ Ma} \pm 0.26 \text{ Ma}$, 分别标定了玄武岩所在地层 Es² 和 Ed³ 的绝对年龄。

第二岩浆喷发旋回晚期锆石类型相对简单, 获得的年龄结构也与前两个旋回具有类似性, 得到的年龄相对较老, 同时也得到了同喷发岩浆锆石的结晶年龄 $22.0 \text{ Ma} \pm 2.5 \text{ Ma}$ 的年龄, 给出了岩浆喷发的时代, 标定了玄武岩所在地层东一段至馆陶期的绝对年龄。

地层的绝对年龄值 $35.34 \text{ Ma} \pm 0.26 \text{ Ma}$, $34.55 \text{ Ma} \pm 0.62 \text{ Ma}$, $33.6 \text{ Ma} \pm 1.5 \text{ Ma}$, $27.7 \text{ Ma} \pm 0.26 \text{ Ma}$ 和 $22.0 \text{ Ma} \pm 2.5 \text{ Ma}$, 已经清楚地标定南堡凹陷的馆陶组属于新近系的中新统, 东营组属于古近系的渐新统, 而沙河街组跨越古近系的古新统和始新统。

3.2 南堡凹陷形成模式

古近纪和新近纪早期, 渤海湾盆地由地幔物质部

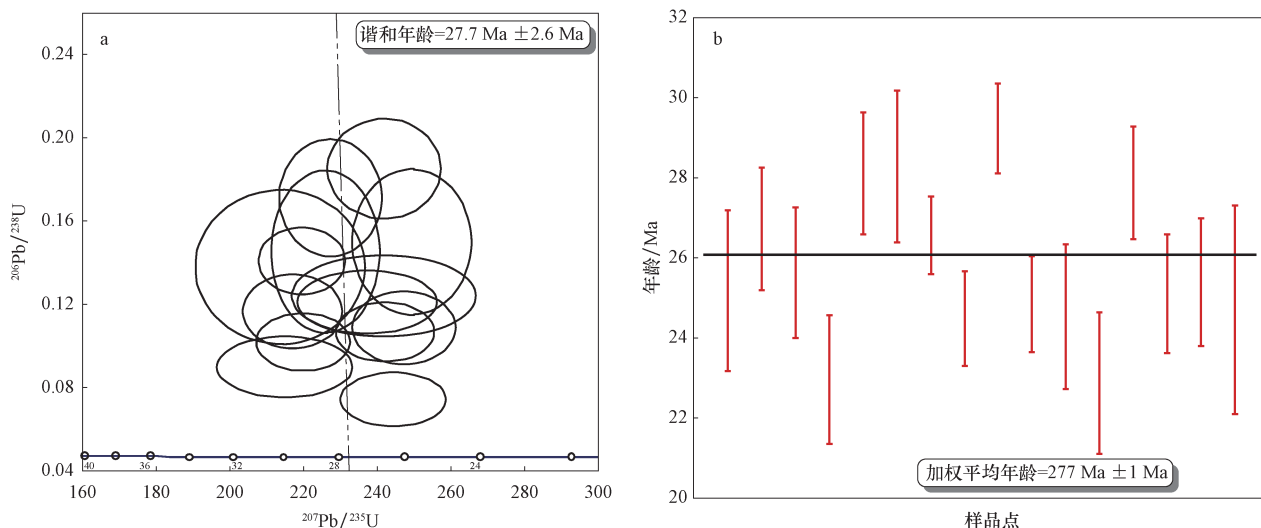


图 8 M1 井 4 066.43 ~ 4 068.83 m 玄武岩中岩浆锆石 U-Pb 年龄谐和图 a) 和加权平均年龄 b)

Fig. 8 Magmatic zircon SHRIMP U-Pb concordia a) and weighted average age b) from 4 066.43 - 4 068.83 m section of Well M1

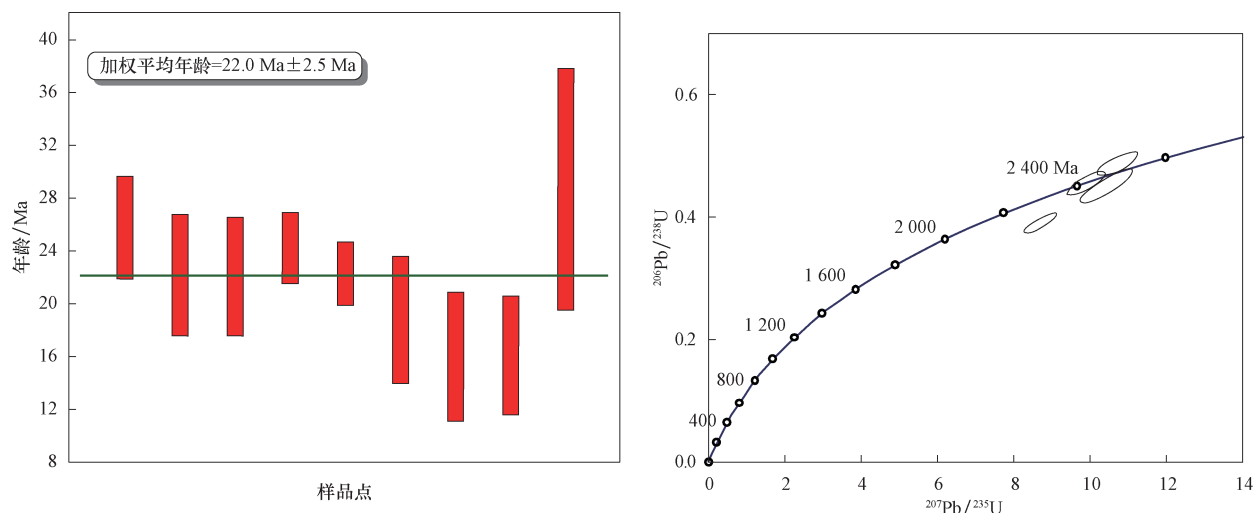


图9 JH1X1井2 490.04 ~ 2 492.65 m玄武岩 SHRIMP U - Pb 年龄谐和图 a) 及直方图 b)

Fig. 9 U-Pb Zircon concordia a) and column graph b) for zircon age distribution from 2 490.04 – 2 492.65 m section of Well JH1X1

分熔融和上涌进入盆地和地壳的数量很多,而且盆地充填序列中的玄武岩层分布,首先充填于凹陷之内的是黑灰色粗玄武岩,碱性玄武岩从盆地形成的最早期(孔店组)就出现,说明盆地最初形成就受地幔上隆过程控制^[18]。

本文总结出了南堡凹陷玄武岩浆由深至浅,先后3个喷发时期所俘获围岩锆石形貌-成因类型和锆石年龄值垂向变化,表明了地幔柱隆升的过程(图10)。图10a显示了不同时期岩浆俘获锆石的形貌-成因类型折射出混染岩浆的岩石类型和所在岩石圈的位置。沙河街组三段上部的凝灰岩所捕获锆石绝大多数为变晶锆石,说明高变质的下地壳麻粒岩混染了幔源岩浆,地幔柱初始上隆,由下地壳麻粒岩拆沉而形成(图10b)。且 SHRIMP 年龄约为 2 509 Ma,说明早期的幔源岩浆只接受了下地壳底部的拆沉混染。向上进入东营组三段下部,所俘获的锆石为下地壳变晶锆石和上地壳古碎屑锆石各占一半,大量出现多个年龄段的碎屑锆石代表了幔源岩浆上升过程中曾经历或停留在上地壳的前寒武浅变质沉积岩系,在其沉积过程中接受来自源区的各时期结晶岩中供给的碎屑锆石,说明地幔柱已上升到下中地壳过渡部位,下地壳麻粒岩和上地壳浅变质岩都对幔源岩浆拆沉混染(图10c)。继续向上至馆陶组下部含橄榄石的拉斑玄武岩,所捕获的锆石有古碎屑锆石和寒武纪后岩浆热事件成因锆石。说明地幔柱完全进入上地壳,不仅上地壳浅变质岩混染幔源岩浆,而且寒武系后的岩浆热事件产生的各时期岩浆岩体也参与混染作用。

4 结论

根据对南堡凹陷火山岩多期、多成因的锆石年龄

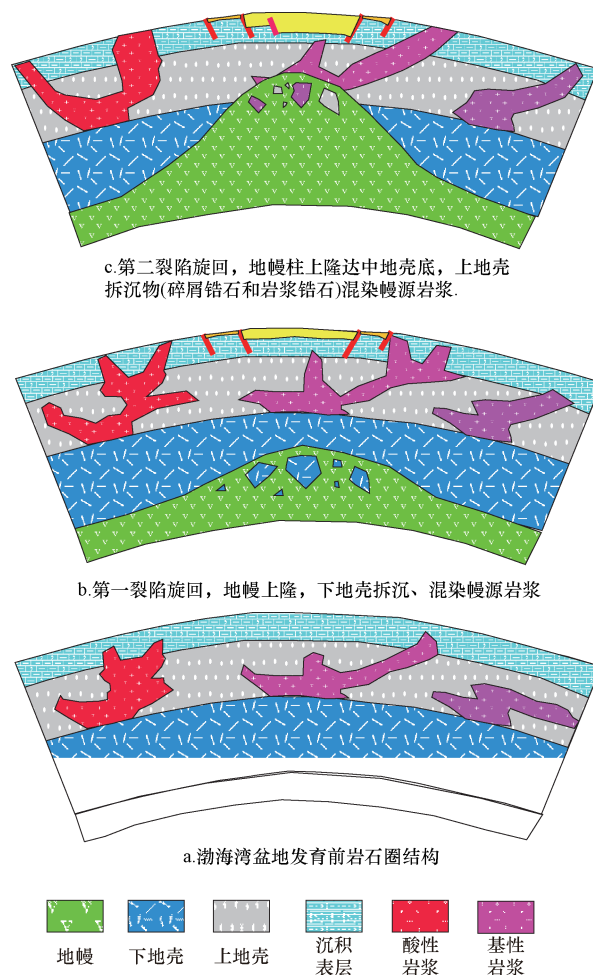


图10 南堡凹陷地幔柱隆升过程

Fig. 10 Mantle uplift process diagram of Nanpu Sag

的 SHRIMP 及 LA - ICPMS 方法研究,得出多组年龄数据。约 3 000 Ma ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄)可能是华北陆块早期生长的产物;2 600 ~ 2 200 Ma 代表华北克拉通最早形成基底的年龄;1 820 ~ 1 830 Ma 可能是华北克拉通拼合年龄;460 ~ 120 Ma 代表了华北克拉通破坏事件

年龄;一个 $880 \text{ Ma} \pm 24.7 \text{ Ma}$ 近谐和,可能反映了 Rodinia 超大陆的拼合裂解事件在华北陆块也有响应。通过一系列锆石 U-Pb 年代学研究,建立了南堡凹陷和华北克拉通相对应的构造热事件的垂向序列。另外,还得到了五个同喷发岩浆锆石的结晶年龄 $35.34 \text{ Ma} \pm 0.26 \text{ Ma}$, $34.55 \text{ Ma} \pm 0.62 \text{ Ma}$, $33.6 \text{ Ma} \pm 1.5 \text{ Ma}$, $27.7 \text{ Ma} \pm 0.26 \text{ Ma}$ 和 $22.0 \text{ Ma} \pm 2.5 \text{ Ma}$,分别标定了玄武岩所在地层沙三段早期、沙三段晚期、沙二段、东三段晚期和东一段至馆陶期的绝对年龄。多成因锆石 U-Pb 年龄测定与锆石形貌分离方法相结合,可以准确标定幔源岩浆溢出和相关地层的绝对年龄,为建立南堡凹陷(渤海湾盆地)的年代地层序列开辟了新途径。

参 考 文 献

- [1] 杜景霞,肖龙,周海民,等. 渤海湾盆地南堡凹陷第三纪火山岩地球化学特征及成因[J]. 桂林工学院学报,2008,28(2):157-166.
Du Jingxia, Xiao Long, Zhou Haimin, et al. Petrogenesis and geochemical characteristics of volcanic rocks from Nanpu Sag of Bohai Bay Basin, East China[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2008,28(2):157-166.
- [2] 刘中云,肖尚斌,姜在兴. 渤海湾盆地第三系火山岩及其成因[J]. 石油大学学报:自然科学版,2001,25(1):22-26.
Liu Zhongyue, Xiao Shangbin, Jiang Zaixing. Volcanic rocks of Bohai Bay Basin in Tertiary and their genesis[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2001,25(1):22-26.
- [3] 张斌. 松辽盆地南部张强凹陷义县组火山岩储层特征及成藏规律[J]. 石油与天然气地质,2013,34(4):508-515.
Zhang Bin. Characteristics and hydrocarbon accumulation patterns of volcanic rocks in the Yixin Formation Zhangqiang depression, southern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013,34(4):508-515.
- [4] 李吉君,曹喜铨,王伟明,等. 徐家围子断陷火山岩包裹体组分和同位素组成分析及应用[J]. 石油与天然气地质,2014,35(1):124-130.
Li Jijun, Cao Xicheng, Wang Weiming, et al. Analysis and application of components and isotopic compositions of fluid inclusions in volcanic reservoirs of the Xujiaweizi fault depression[J]. Oil & Gas Geology, 2014,35(1):124-130.
- [5] 李祖兵,王建伟,刘洋. 南堡凹陷5号构造沙河街组火山岩岩性分布及储层特征[J]. 天然气地球科学,2010,(3):413-420.
Li Zubing, Wang Jianwei, Liu Yang. Distribution of volcanic reservoir in Shahejie Group of 5# structure Nanpu Depression and its feature[J]. Natural Gas Geoscience, 2010,(3):413-420.
- [6] 金春爽,乔德武,淡伟宁. 渤海湾盆地中、新生代火山岩分布及油气藏特征[J]. 石油与天然气地质,2012,33(1):19-29,36.
Jin Chunshuang, Qiao Dewu, Dan Weining. Meso-Cenozoic volcanic rock distribution and reservoir characteristics in the Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012,33(1):19-29,36.
- [7] 张超,马昌前,廖群安,等. 渤海湾黄骅盆地晚中生代-新生代火山岩地球化学:岩石成因及构造体制转换[J]. 岩石学报,2009,5:1159-1177.
Zhang Chao, Ma Changqian, Liao Qunan, et al. Geochemistry of Late Mesozoic-Cenozoic volcanic rocks in the Huanghua depression, Bohai Bay: Petrogenesis and implications for tectonic transition[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009,5:1159-1177.
- [8] 黄曼宁,董月霞,庞雄奇,等. 南堡凹陷构造型油气藏分布主控因素及预测方法[J]. 石油与天然气地质,2012,33(5):695-704.
Huang Manning, Dong Yuexia, Pang Xiongqi, et al. Controlling factors of structural reservoir distribution and its prediction method in Nanpu depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012,33(5):695-704.
- [9] 王盛鹏,林潼,孙平,等. 两种不同沉积环境下火山岩储层成岩作用研究[J]. 石油实验地质,2012,34(2):145-152.
Wang Shengpeng, Lin Tong, Sun Ping, et al. Influences of diagenetic effects on volcanic rock reservoirs under two different sedimentary environments[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012,34(2):145-152.
- [10] 吴颜雄,王璞珺,边伟华,等. 松辽盆地深层火山岩储集性能[J]. 石油与天然气地质,2012,33(2):236-247.
Wu Yanxiong, Wang Pujun, Bian Weihua, et al. Poroperm characteristics of deep volcanic reservoirs in Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012,33(2):236-247.
- [11] 胡志华,申春生,刘宗宾,等. 渤海湾盆地火山岩喷发旋回和期次研究的方法及应用[J]. 油气地球物理,2013,2:30-33.
Hu Zhihua, Shen Chunsheng, Liu Zongbin, et al. The research method and application of the volcanic rock eruption cycle and stage in the Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geophysics, 2013,2:30-33.
- [12] 董月霞,周海民,夏文臣. 南堡凹陷火山活动与裂陷旋回[J]. 石油与天然气地质,2000,21(4):304-307.
Dong Yuexia, Zhou Haimin, Xia Wenchen. Volcanic activities and rift-subsidence cycles in Nanpu sag[J]. Oil & Gas Geology, 2000,21(4):304-307.
- [13] 肖军, Kamaye T, 王华,等. 渤海湾盆地南堡凹陷火山岩特征及其有利成藏条件分析[J]. 地质科技情报,2004,23(1):52-56.
Xiao Jun, Kamaye T, Wang Hua, et al. Characteristics of igneous rocks and their favorable pool-forming conditions in Nanpu Sag, Bohai Bay[J]. Geological Science and Technology Information, 2004,23(1):52-56.
- [14] 周海民,马乾. 南堡凹陷北堡地区火成岩储层特征[J]. 石油与天然气地质,2003,24(1):36-38.
Zhou Haimin, Ma Qian. Characteristics of pyrolytic reservoirs in Beipu area, Nanpu Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2003,24(1):36-38.
- [15] 刘敦一,万渝生,伍家善. 华北克拉通太古宙地壳演化和最古老的岩石[J]. 地质通报,2007,26(9):1131-1138.
Liu Dunyi, Wan Yusheng, Wu Jiashan, et al. Archean crustal evolution and the oldest rocks in the North China craton[J]. Geological Bulletin of China, 2007,26(9):1131-1138.
- [16] 彭澎,翟明国. 华北陆块前寒武纪两次重大地质事件的特征和性质[J]. 地球科学进展,2002,17(6):818-825.
Peng Peng, Zhai Mingguo. Two major Precambrian geological events of North China block (NCB): characteristics and property[J]. Advances in Earth Sciences, 2002,17(6):818-825.
- [17] 张国伟,程顺有,郭安林,等. 秦岭-大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识-兼论中国大陆主体的拼合[J]. 地质通报,2004(9-10):846-853.
Zhang Guowei, Chen Shunyou, Guo Anlin, et al. Mianlue paleo-suture on the southern margin of the Central Orogenic System in Qinling-Dabie with a discussion of the assembly of the main part of the continent of China[J]. Geological Bulletin of China, 2004(9-10):846-853.
- [18] 肖龙,王方正,王华,等. 地幔柱构造对松辽盆地及渤海湾盆地形成的制约[J]. 地球科学,2004,29(3):283-292.
Xiao Long, Wang Fangzheng, Wang Hua, et al. Mantle plume tectonics constraints on the formation of Songliao and Bohaiwan Basins[J]. Earth Science, 2004,29(3):283-292.

(编辑 董立)