

基于 He 年代累积效应约束天然成藏时代 ——以四川威远气田为例

陶成, 刘文汇, 腾格尔, 秦建中, 王杰, 杨华敏, 王萍

中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏无锡, 214151

天然气成藏过程中 He 的年代累积效应早已被关注 (Torgerson, 1980; 刘文汇, 1993; Prinzhofer, 2003), 同时 He 的年代累积效应在低温热年代学, 地下水测年等方面的研究发展迅速, 并在逐渐拓展应用领域 (邱楠生, 2008; zhou, 2004), 但油气地质方面研究仍主要用 $3\text{He}/4\text{He}$ 比值示踪盆地构造活性、估算源岩年代、反映大地热流 (刘文汇, 2007) 等, 少见成藏年代学方面的研究应用。本文尝试对天然气藏中 He 的年代累积效应进行数学模型量化, 并将其用于约束天然气藏的形成时代。

1 天然气藏中 He 年代累积效应数学模型量化

众所周知放射性元素同位素 ^{238}U 、 ^{235}U 和 ^{232}Th 的系列衰变可以产生 4He (α 粒子)。母体元素与子体元素之间存在与时间相关的固有数理关系:

$$^4\text{He} = 8 \cdot ^{238}\text{U}(e^{\lambda t} - 1) + 7 \cdot ^{235}\text{U}(e^{\lambda t} - 1) + 6 \cdot ^{232}\text{Th}(e^{\lambda t} - 1)$$

He 分子直径小, 扩散性和渗透性很强。当地层温度高于 140°C 时, 化学性质稳定的锆石也无法有效保存 He (reiners, 2002)。相对漫长的地质时间, He 能够快速的脱离宿主矿物进入流体相 (Ballentine, 2002), 而 He 在液相中溶解度极低 (Kharaka, 1988; Smith 1985), 其更易在气相中聚集。由此假设储集岩地质体中发生大规模烃类气体聚集后, 原始相态构成彻底改变, 新的气-液平衡体系形成, 此时天然气藏中 He 的年代累积效应开始显现, 定年时钟开启。鉴于天然气藏形成是一个运聚动平衡的过程, 气藏中 He 的累积与散失同时发生, 达到聚散平衡前, 气藏中 He 的累积量与气藏形成的时间、He 的累积速率以及散失量之间可以用数学地质模型进行

描述。基于模型假设, 其对于油气藏形成时代的约束意义为天然气藏形成并保持稳定的地质时间。天然气藏中 He 的累积量可以表示为:

$$\text{He} = \text{He}_{\text{initial}} + \text{He}_{\text{in situ production}} + \text{He}_{\text{external flux}} - \text{He}_{\text{lost}}$$

其中 He 为气藏 He 的总量; $\text{He}_{\text{initial}}$ 气藏形成初始时 He 的量; $\text{He}_{\text{in situ production}}$ 气藏中由储层原位产生的 He 的累积量; $\text{He}_{\text{external flux}}$ 外部来源 He 进入气藏的量; He_{lost} 气藏 He 的散失量。

假设天然气藏中初始 $\text{He}_{\text{initial}}$ 主要来源于储集岩隙水中溶解的 He, 虽然 He 在水中有一定溶解度, 且随温度的升高溶解度有一定增加, 但即使在 110°C (典型天然气藏地层温度), He 的溶度系数也仅有 0.0125 (Smith, 1985), 可见储集岩孔隙水溶解态的 He 含量很低, 因此天然气藏中初始 $\text{He}_{\text{initial}}$ 可以近似为零。而 $\text{He}_{\text{in situ production}}$ 和 $\text{He}_{\text{external flux}}$ 均可以表示为时间的函数。

借鉴国内外相关地质模型, 引入气藏特征参数, 计算外部壳源以及气藏原位产生 He 的量, 明确累积量与时间的数学关系, 进而建立了约束天然气藏形成时代的新方法——He 定年模型。

对上述公式求导, 可变形为一阶常微分方程:

$$C_{(t)} = M/N (1 - e^{-Nt}) \quad (1)$$

$$\text{其中 } M = \frac{F \cdot S + P}{Q} + \frac{4.5D \cdot S}{Z \cdot Q} \times 10^{-8};$$

$$N = \frac{22.4 \cdot D \cdot S \cdot P_0 \cdot T_g}{K_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V \cdot Z \cdot \phi \cdot T_0}$$

$$P = \rho \cdot 0.2355 \times 10^{12} [\text{U}] \{1 + 0.123 ([\text{Th}/\text{U}] - 4)\} (1 - \phi) \cdot V$$

注: 本文为国家重点基础研究发展规划“973”项目 (编号 2012CB214801) 资助成果。

收稿日期: 2015-08-28; 改回日期: 2015-09-28; 责任编辑: 周健。

作者简介: 陶成, 男, 1978 年生。博士, 高工, 地球化学专业。Email: tc60@163.com。

$$F = J_4 * \rho * H$$

ρ 为储层密度; Λ 为He脱离岩石进入气相的扩散系数; ϕ 为储层孔隙度; H 为天然气藏下覆地壳厚度; J_4 为天然气藏单位时间内每克岩石铀钍元素产生He的量 ($\text{cm}^3 \text{STP } ^4\text{He/g}_{\text{rock}} \cdot \text{year}$); t 为天然气成藏时代; V 为气藏体积; S 为气藏含气面积; F 为外部壳源He进入天然气藏的通量; D 为He的扩散系数; Z 为天然气藏的埋深; S 为天然气藏面积; Q 为气藏的地质储量; P_0 为标准大气压1atm; T_0 为标准温度273K; $C_{(t)}$ 为气藏中 t 时刻He的体积百分比; ϕ 为储层孔隙度; T_g 为气藏地层温度。

2 天然气成藏时代约束—威远气田

威远大气田是我国最早发现的海相天然气藏。震旦系气藏同时是世界上地质时代最古老的气藏之一(戴金星 2003)。模型估算其成藏时代为31Ma前的渐新世。虽然威远震旦系天然气储层老、He丰度高,但模型估算震旦系天然气藏的形成时代约为31Ma,对应于渐新世喜山运动中期,结果与现今威远气田的成藏过程研究成果相吻合,表明该定年方法具有一定的实用性和应用价值,可能是对现有油气成藏定年技术系列的重要补充。