

# 鄂尔多斯盆地伊利石 K-Ar等时线图解与年龄

赵孟为 汉斯·阿伦特 克劳斯·魏玛

(德国哥廷根大学地质与岩石圈动力学研究所)

**提 要** 根据伊利石  $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ 和 $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 等时线图解与年龄验证了利用常规 K-Ar测年法所确定的鄂尔多斯盆地的两期成岩作用时代。分析结果表明,伊利石 K-Ar时钟是一个封闭体系,故能够用来确定沉积岩的成岩作用时代;常规 K-Ar年龄所揭示的侏罗纪(170~160 Ma)和志留-泥盆纪(420~370 Ma)成岩作用时代是可靠的;K-Ar等时线图解与年龄是检验常规 K-Ar测年法的有效补充性测年手段。

**关键词** 伊利石 K-Ar等时线图解与年龄 成岩作用时代 鄂尔多斯盆地

**分类号** P 533

**第一作者简介** 赵孟为 男 40岁 博士 盆地分析与石油地质专业

常规 K-Ar测年法得以成立的前提条件是 K-Ar体系在形成时与形成后始终是一个封闭体系<sup>[1-3]</sup>。然而,该方法本身并不能说明这一前提条件是否满足。在理想条件下,K-Ar等时线图解则有可能给出判断常规 K-Ar年龄是否合理有效的证据<sup>[4-9]</sup>,从而可用来对后者进行检验。

笔者根据常规 K-Ar测年法在鄂尔多斯盆地确定出侏罗纪和志留-泥盆纪两期成岩作用时代<sup>[3,10-12]</sup>。所得结论是否合理可靠有必要得到进一步论证与探讨。为此,本文在介绍 K-Ar等时线图解与年龄基本原理的基础上,根据鄂尔多斯盆地伊利石 K-Ar等时线资料考查了伊利石 K-Ar时钟的封闭性,并验证了上述两期成岩作用时代的可靠性,得到了令人满意的结果。

## 1 K-Ar等时线图解与年龄原理

K-Ar测年法计时的基本原理是放射性母体 $^{40}\text{K}$ 衰变为子体 $^{40}\text{Ar}$ 和 $^{40}\text{Ca}$ 。其中 $^{40}\text{Ar}$ 含量与 K-Ar体系封闭时的年代  $t$ 服从于衰变定律<sup>[1-3]</sup>:

$$^{40}\text{Ar} = \lambda e \lambda \cdot ^{40}\text{K} (e^{\lambda t} - 1) \quad (1)$$

解式(1)即可得到用常规 K-Ar法求出的地质年代  $t$ :

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left[ \frac{^{40}\text{Ar}}{^{40}\text{K}} (\lambda e \lambda + 1) \right] \quad (2)$$

式中 $\lambda$ 和 $\lambda e$ 分别为 $^{40}\text{K}$ 衰变为 $^{40}\text{Ca}$ 与 $^{40}\text{Ar}$ 的总衰变常数和 $^{40}\text{K}$ 衰变为 $^{40}\text{Ar}$ 的衰变常数。两式成立的基

本条件是:①体系在形成时不含有外来的 $^{40}\text{Ar}$ ;②形成后没有发生 $^{40}\text{Ar}$ 和 $^{40}\text{K}$ 的损失或混入<sup>[1-8]</sup>。

假如体系发生了含量为 $^{40}\text{Ar}_0$ 的损失或混入,则实际测得的 $^{40}\text{Ar}$ 应当包括 $^{40}\text{Ar}_0$ ,即式(1)应当表示为:

$$^{40}\text{Ar} = \lambda e \lambda \cdot ^{40}\text{K} (e^{\lambda t} - 1) + ^{40}\text{Ar}_0 \quad (3)$$

将式(3)两端同除以 $^{36}\text{Ar}$ ,即可得式(4):

$$\frac{^{40}\text{Ar}}{^{36}\text{Ar}} = \lambda e \lambda \cdot \frac{^{40}\text{K}}{^{36}\text{Ar}} (e^{\lambda t} - 1) + \left( \frac{^{40}\text{Ar}}{^{36}\text{Ar}} \right)_0 \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可见,一组年代相同且具有相同的初始值 $^{40}\text{Ar}_0$ 和 $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_0$ 的含 K 矿物,在以 $^{40}\text{K}$ 或 $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$ 为横(X)轴, $^{40}\text{Ar}$ 或 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 为纵(Y)轴的坐标系中,构成一条以 $m = \lambda e \lambda (e^{\lambda t} - 1)$ 为斜率, $b = ^{40}\text{Ar}_0$ 或 $(^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar})_0$ 为截距的一元一次直线方程:

$$y = mX + b \quad (5)$$

这样的直线被称为等时线,因为其上各点的年龄值相同。通过解方程 $m = \lambda e \lambda (e^{\lambda t} - 1)$ 即可得式(6):

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left[ \frac{m}{\lambda e \lambda} + 1 \right] \quad (6)$$

所以,根据等时线的斜率  $m$  便可用式(6)计算出该组矿物的 K-Ar等时线年龄<sup>[4-7]</sup>。比较式(2)和式(6)可知,两式的差别仅在于前者使用的是某一样品的 $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$ 比率;而后者则用的是一组样品的等时线斜率  $m$ 。

如果式(3)中 $^{40}\text{Ar}_0 = 0$ ,即等时线通过 $^{40}\text{K}-^{40}\text{Ar}$

坐标系的原点,表明体系为封闭体系,常规 K-Ar 年龄应当与等时线年龄相同,反映一期地质事件的年代。假如  $^{40}\text{Ar}_0 > 0$ , 即等时线在 y 轴上的截距为正值,说明体系中含有过剩的  $^{40}\text{Ar}$ , 常规 K-Ar 年龄应大于所对应的地质事件的年代。如  $^{40}\text{Ar}_0 < 0$ , 即等时线在 y 轴上的截距为负值,表明样品中有  $^{40}\text{Ar}$  损失, 常规 K-Ar 年龄应小于所对应的地质事件的年代<sup>[4-7]</sup>。

对于式 (4) 而言, 如果  $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_0 = 295.5$  (即大气中的  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比率), 则表明体系没有发生过 Ar 的混入或损失; 满足常规 K-Ar 测年法的基本假定, 因而其 K-Ar 年龄是有效的, 且应当与等时线年龄相同。如果  $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_0$  与 295.5 相差甚远, 则有可能意味着体系发生过 Ar 的混入或散失, 从而使常规 K-Ar 年龄不能真实地反映地质事件的年代<sup>[7]</sup>。

综上所述, 通过观察 K-Ar 等时线的线性关系及其截距  $^{40}\text{Ar}_0$  和  $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_0$ , 并比较 K-Ar 等时线年龄与其对应的常规 K-Ar 年龄, 有可能判断 K-Ar 体系的封闭性与常规 K-Ar 年龄的可靠性, 从而使人们更有效的利用 K-Ar 资料研究并解决地质问题。

## 2 结果与讨论

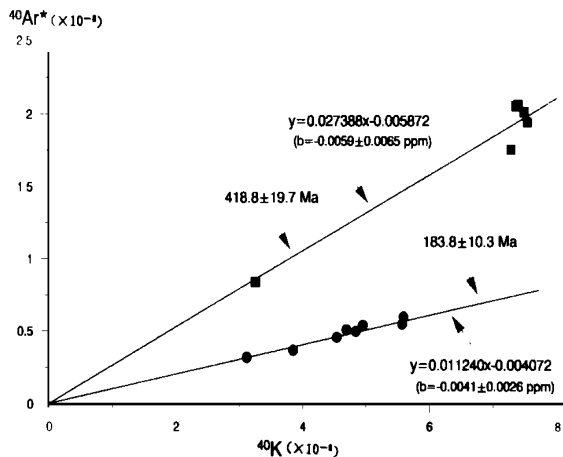
$^{40}\text{K}-^{40}\text{Ar}$  等时线和  $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  等时线所需参数是在进行常规 K-Ar 测年的测试过程中获得的。具体的 K-Ar 等时线数据见表 1, 结果见图 1

表 1 鄂尔多斯盆地伊利石 K-Ar 等时线数据

Table 1 K-Ar isochron data of illites from the Ordos basin

| 岩样     | 粒级<br>( $\mu\text{m}$ ) | $\text{K}_2\text{O}$<br>(wt.%) | K<br>(wt.%) | $^{40}\text{K}$<br>( $\times 10^{-6}$ ) | $^{40}\text{Ar}$<br>(nl/g) | $^{40}\text{Ar}$<br>( $\times 10^{-7}$ ) | $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$<br>( $\times 10^2$ ) | $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ |
|--------|-------------------------|--------------------------------|-------------|---|----------------------------|--|---|---------------------------------|
| Q36-10 | < 0.2                   | 4.84                           | 4.02        | 4.69                                    | 28.33                      | 0.51                                     | 2206.61   | 2618.25                         |
| Q36-17 | < 0.2                   | 4.69                           | 3.89        | 4.54                                    | 25.95                      | 0.46                                     | 2101.27   | 2386.26                         |
| Q36-40 | < 0.2                   | 5.00                           | 4.15        | 4.84                                    | 27.89                      | 0.50                                     | 4215.59   | 4523.42                         |
| Q36-80 | < 2                     | 3.22                           | 2.67        | 3.12                                    | 18.00                      | 0.32                                     | 1447.06   | 1750.16                         |
| Q36-80 | < 0.2                   | 3.97                           | 3.30        | 3.85                                    | 21.01                      | 0.37                                     | 1779.94   | 1988.88                         |
| Q36-86 | < 0.2                   | 5.11                           | 4.24        | 4.95                                    | 30.06                      | 0.54                                     | 2429.80   | 2865.77                         |
| Q36-94 | < 0.2                   | 5.77                           | 4.79        | 5.59                                    | 33.89                      | 0.60                                     | 1722.05   | 2113.92                         |
| TS1-3  | < 0.2                   | 5.75                           | 4.77        | 5.57                                    | 30.88                      | 0.55                                     | 3008.59   | 3200.47                         |
| TS1-34 | < 2                     | 7.64                           | 6.34        | 7.40                                    | 116.26                     | 2.07                                     | 5218.18   | 14573.04                        |
| TS1-34 | 2~1                     | 7.60                           | 6.31        | 7.36                                    | 115.40                     | 2.06                                     | 5355.21   | 14917.30                        |
| TS1-34 | 1~0.63                  | 7.73                           | 6.42        | 7.49                                    | 113.02                     | 2.02                                     | 5432.78   | 14578.12                        |
| TS1-34 | 0.63~0.2                | 7.78                           | 6.46        | 7.54                                    | 109.22                     | 1.95                                     | 5426.74   | 13993.92                        |
| TS1-34 | < 0.2                   | 7.51                           | 6.23        | 7.28                                    | 98.81                      | 1.76                                     | 3698.78   | 9045.84                         |
| T2-6   | < 2                     | 3.36                           | 2.79        | 3.26                                    | 47.30                      | 0.84                                     | 3926.25   | 10233.64                        |

和图 2



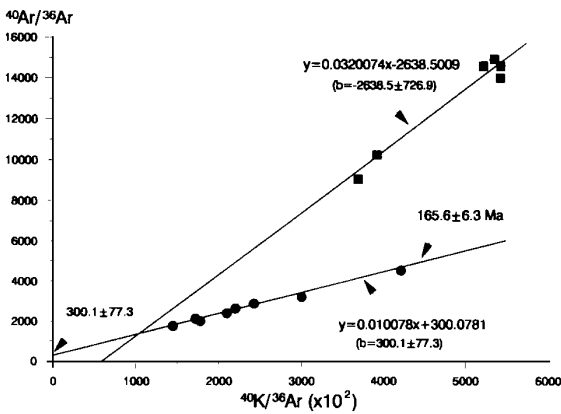
● 代表二叠—三叠纪岩样, □ 表示寒武—奥陶纪岩样

图 1  $^{40}\text{K}-^{40}\text{Ar}$  等时线图解与年龄

Fig. 1  $^{40}\text{K}-^{40}\text{Ar}$  isochron diagram and ages

### 2.1 $^{40}\text{K}-^{40}\text{Ar}$ 等时线图解

图 1 表明, 揭示侏罗纪 (170~160 Ma) 成岩作用事件的二叠—三叠纪岩样在  $^{40}\text{K}-^{40}\text{Ar}$  关系图上构成具有良好线性关系的等时线, 其相关系数达 0.98。此等时线在  $^{40}\text{Ar}$  (y) 轴上的截距为  $-0.004 \pm 0.0026 \times 10^6$ , 几乎等于 0, 基本通过坐标系原点 (图 1)。其等时线年龄为  $183.8 \pm 10.3$  Ma, 虽然略高于各岩样的实测常规 K-Ar 年龄值 (174~157 Ma)<sup>[3]</sup> 与它们的平均值  $166 \pm 8$  Ma, 但它们的差别与其测



● 代表二叠—三叠纪岩样, □ 表示寒武—奥陶纪岩样

图 2  $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  等时线图解与年龄

Fig. 2  $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  isochron diagram and ages

试误差相差不大,即与常规 K-Ar 年龄相近。

记录志留—泥盆纪 (420~ 370 Ma) 成岩作用时代的寒武—奥陶纪岩样在  $^{40}\text{K}$ - $^{40}\text{Ar}$  关系图上也绘出良好的等时线 (相关系数为 0.97)。等时线在  $^{40}\text{Ar}$  (y) 轴上的截距为  $-0.0059 \pm 0.0065 \times 10^6$ , 接近于 0, 也基本上通过坐标系原点 (图 1)。其等时线年龄为  $418.8 \pm 19.7$  Ma, 几乎与岩样 T1-34 的  $< 2\mu\text{m}$  和  $2\sim 1\mu\text{m}$  粒级的常规 K-Ar 年龄 ( $419.4 \pm 8.8$  Ma 和  $418.6 \pm 8.5$  Ma)<sup>[3]</sup> 完全一致。

由此可见, 两条  $^{40}\text{K}$ - $^{40}\text{Ar}$  等时线均呈良好的线性关系, 而且均基本上通过坐标系原点, 其等时线年龄与常规 K-Ar 年龄十分相近。这些证据均表明伊利石 K-Ar 体系的确是一个封闭体系; 常规 K-Ar 年龄所揭示的侏罗纪和志留—泥盆纪成岩作用时代<sup>[3, 10-12]</sup> 是可靠的。

### 2.2 $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 等时线图解

图 2 表明, 二叠—三叠纪岩样  $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$  和  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  值也构成良好的线性关系, 相关系数为 0.99。等时线在  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  (y) 轴上的截距为  $300.1 \pm 77.3$ , 与大气中的  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比率 (295.5) 十分接近。其等时线年龄为  $165.6 \pm 6.3$  Ma (图 2), 几乎与它们的常规 K-Ar 年龄的平均值 ( $166 \pm 8$  Ma) 完全一致。这些结果进一步证明伊利石 K-Ar 时钟确实是封闭的, 侏罗纪成岩作用事件也确实是存在的。

然而, 虽然寒武—奥陶纪岩样在  $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  关系图上也呈良好的线性关系 (相关系数为 0.98), 但其等时线在  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  轴上的截距却为负值 ( $b = -2638.5 \pm 726.9$ , 图 2)。显然,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  这

一比率是不可能为负值, 因为  $^{40}\text{Ar}$  和  $^{36}\text{Ar}$  在自然界里存在而且只能是正值。可见这条“等时线”并不是真正的“等时”, 从而不可能绘出具有地质意义的等时线年龄。

Hunziker 曾报道过类似结果: 虽然  $< 0.6\mu\text{m}$  粒级在  $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  关系图上绘出良好的等时线, 但如将  $< 0.6\mu\text{m}$  粒级与  $> 0.6\mu\text{m}$  的数据组合在一起却得到一条其  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  轴上的截距为负值的“混合线”<sup>[8, 9]</sup>。所以, 人为地将两组不同时代形成的岩样数据组合在一起将会导致截距为负值的混合线<sup>[8, 9]</sup>, 从而得不到等时线。常规 K-Ar 年龄所记录的志留—泥盆纪成岩作用时代 (420~ 370 Ma) 跨度较大, 达 50 Ma<sup>[3]</sup>。粗粒级 (如  $< 2\mu\text{m}$  和  $2\sim 1\mu\text{m}$ ) 记录下成岩作用的初期; 而细粒级却仅记录下该成岩作用的晚期。可见这一成岩作用的初期和晚期相差 50 Ma, 显然, 不同粒级的岩样是不等时的, 所以将它们的数据组合在一起自然不可能得到一条等时线。由此可见, 相差较大的常规 K-Ar 年龄数据不适于用  $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  等时线处理。如果数据足够多, 而能够将不同粒级的数据分别处理, 则有可能分别得到理想的等时线。这一点尚需进一步的测试结果来证实。由此可见, 如果在  $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  等时线图解中得到截距为负值的混合线, 这很可能意味着所选岩样来自不同时代。

## 3 结 论

鄂尔多斯盆地伊利石  $^{40}\text{K}$ - $^{40}\text{Ar}$  和  $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  等时线图解与年龄分析表明, 伊利石 K-Ar 时钟是一个封闭体系, 可有效地用于确定沉积岩的成岩作用时代; 常规 K-Ar 年龄所揭示的侏罗纪 (170~ 160 Ma) 和志留—泥盆纪 (420~ 370 Ma) 成岩作用时代是可靠的。

K-Ar 等时线图解与年龄可以用来判断 K-Ar 体系的封闭性, 验证常规 K-Ar 年龄的可靠性, 是检验 K-Ar 测年法的补充性测年手段。两种方法相结合可以使人们更好地利用 K-Ar 测年资料解决地质问题。

感谢长庆石油勘探局提供测试样品。

### 参 考 文 献

- [1] Hunziker, J.C., Potassium argon dating. In Jaeger E and Hunziker, J.C., eds, Lectures in isotope geology, Berlin, Springer-Verlag, 1979, 52~ 76.

- [2] Faure, G. Principles of isotope geology: New York, John Wiley & Sons Inc, 1986, 388.
- [3] 赵孟为, Hans Ahrendt, Klaus Wemmer. K-Ar 测年法在确定沉积岩成岩时代中的应用以鄂尔多斯盆地为例: 沉积学报, 1996, 14(3): 11-21.
- [4] McDougall I, et al. Excess radiogenic argon in young subaerial basalts from Auckland volcanic field, New Zealand. Geochim Cosmochim Acta, 1969, 33: 1485-1520.
- [5] Happer, C. T. Graphical Solutions to the problem of radiogenic argon-40 loss from metamorphic minerals. Eclogae geol., Helv. 1970, 63: 119-140.
- [6] Hayatsu, A and Carmichael, C.M. K-Ar isochron method and initial argon ratios. Earth Planet. Sci. Lett, 1970, 8: 71-76.
- [7] Shafiqullah, M and Damon, P. E. Evaluation of K-Ar isochron methods. Geochim Acta. 1974, 33: 1341-1358.
- [8] Hunziker, J.C. The evolution of illite to muscovite. An example of the behaviour of isotopes in low-grade metamorphic terrains. Chem. Geol. 1986, 57: 31-40.
- [9] Clauer, N and Chaudhuri, S. Clays in crustal environments, Isotope dating and tracing. Springer-Verlag, Berlin, 1995, 359.
- [10] Zhao, M-W. Beitrage zur thermischen Geschichte, den Palaeofluidsystemen und der Diagenese des Ordos Beckens(China): Goettinger Arb. Geol. Palaeont., 1994, 62: 1-97.
- [11] 赵孟为等. 鄂尔多斯盆地志留-泥盆纪和侏罗纪热事件: 首次伊利石 K-Ar 年龄证据. 地质学报, 1996, 70(2): 186-194.
- [12] Zhao, M-W, et al. Thermal and tectonic history of the Ordos basin, China. Evidence from apatite fission track analysis, vitrinite reflectance and K-Ar dating. AAPG Bull, 1996, 80: 1110-1134.

## The K-Ar Isochron Diagram and Ages of Illites from The Ordos Basin

*Zhao Mengwei Hans Ahrendt and Klaus Wemmer*

(Institute of Geology and Dynamics of Lithosphere, University of Goettingen, 37077 Goettingen, Germany)

### Abstract

The principle of K-Ar isochron method was introduced in this paper. The k-Ar isochron data of illites from the Ordos basin were successfully used to evaluate the two distinct diagenetic stages identified by conventional K-Ar dating. Both the Permian-Triassic and Cambrian-Ordovician samples yield well defined  $^{40}\text{K}-^{40}\text{Ar}$  isochrons, which indicate intercepts almost equal to zero and similar isochron ages to the conventional K-Ar ages. In addition, the Permian-Triassic samples gave also a well-defined  $^{40}\text{K}/^{36}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  isochron, which yields an intercept of nearly the atmospheric argon ratio (295.5) and a similar isochron age to the conventional K-Ar ages. These facts indicated that the illite K-Ar clock belongs actually to a closed system, and thus can validly be used to determine diagenetic ages of sedimentary rocks. The Jurassic (170-160 Ma) and Silurian-Devonian (420-370 Ma) diagenetic stages revealed by conventional K-Ar data were proved to be reliable. K-Ar isochron methods can supply additional information to evaluating the validity of conventional K-Ar isochron methods. It can also provide improved constraints on interpreting K-Ar data and their geological meanings.

**Key Words** illite K-Ar isochron diagenetic ages Ordos basin