

## 放射性同位素等时线测年法的关键缺陷被发现

北卡罗来纳州立大学近期的一项研究揭示了一种“用于测定陨石和地质样本等各种物质年龄的放射性同位素测年技术存在疏漏”，这意味着“科学家可能高估了许多样本的年龄”。这项研究由该校核工程系副教授罗伯特·海耶斯（Robert Hayes）完成，研究报告发表在《核技术》（*Nuclear Technology*）期刊上。

1

声称在放射性同位素测年法中发现了关键缺陷，而该方法正是支撑着现代地质学数百万年理论体系的基础，这的确非同寻常。如此非同寻常的论断需要非同寻常的证据来支撑，而且由于这是一个复杂的问题，因此需要一些初步解释，以便读者能够更容易地理解这一论断的细节及其证据。

### 原子、同位素和放射性同位素

每种化学元素都由其特有的原子构成。所有原子都由原子核组成，电子（带负电荷的粒子）围绕原子核运动。几乎所有原子核内都含有质子和中子，分别带正电荷和不带电荷。

每种化学元素的所有原子核中质子数都相同。这个数字称为该元素的原子序数。元素 1 是氢，其原子核中

有一个质子，化学符号为 H。最重的元素之一是铀，其原子核中含有 92 个质子，符号为 U。

原子核中质子和中子的总和称为原子量，因为原子的几乎所有重量或质量都集中在原子核中。然而，每个原子核中的中子数并不总是相同的。通常情况下，中子数和质子数相等，但有时中子数会多于质子数。

因此，每种元素都具有相同原子序数的原子，但由于中子数不同，其原子可以具有几种不同的原子量。原子量不同的同种元素原子称为该元素的同位素。

例如，碳（符号 C）是第 6 号元素，因为它的每个原子核中都含有 6 个质子。然而，虽然大多数碳原子核中含有 6 个中子，但也有少数原子核中含有 7 个中子，更罕见的原子核中含有 8 个中子。我们根据原子量来区分这些碳的同位素，分别称为碳-12、碳-13 和碳-14，或者简写为<sup>12</sup>C、<sup>13</sup>C 和 <sup>14</sup>C（见图 1）。

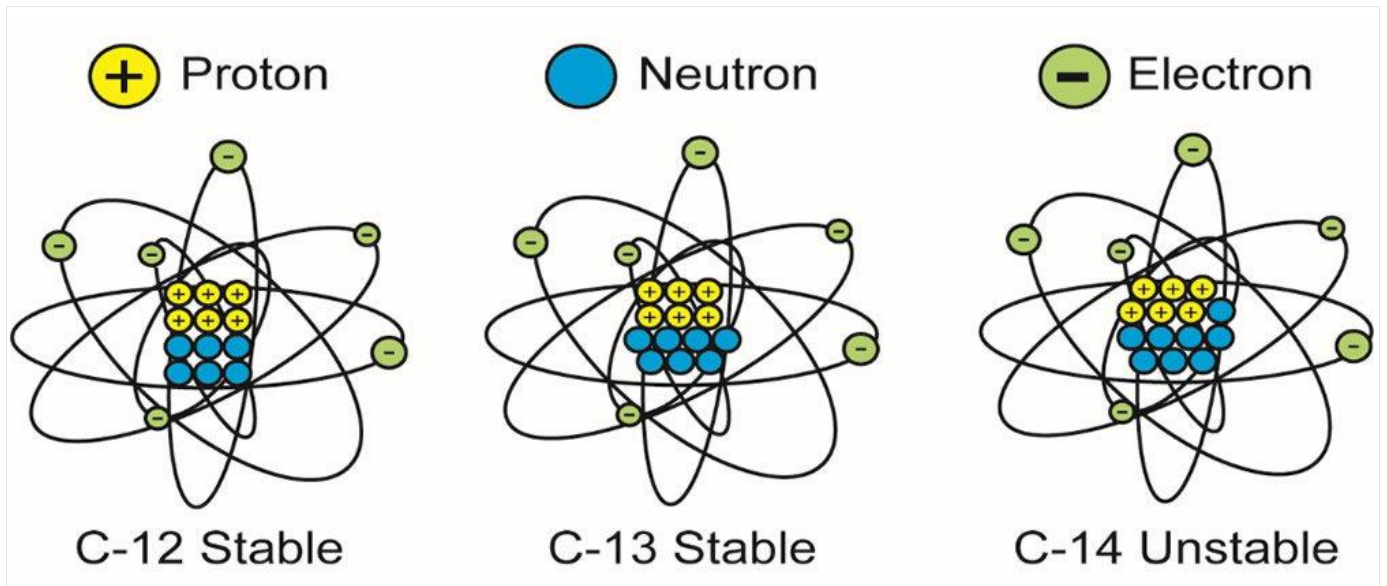


图 1. 碳的三种同位素，显示它们的质子数、中子数和电子数。

由于碳<sup>-14</sup>原子核体积较大，其稳定性较差，因此每个碳原子都会随机地将一部分中子射出原子核。由此产生的原子核各有七个质子和七个中子，并有七个电子围绕其运行。这些特征定义了元素 7 的原子，即稳定的氮<sup>-14</sup>原子。

原子核释放出的粒子可以用合适的探测器（例如盖革计数器）进行测量。原子核释放粒子的过程称为放射性衰变。因此，不稳定的同位素被称为放射性同位素。所以，碳<sup>-14</sup>通常被称为放射性碳。

*地质学家和其他人士已经设计出利用放射性衰变来测定岩石和骨骼等死亡有机物年代的方法。*

地质学家和其他研究人员已经设计出利用放射性衰变来测定岩石和骨骼等死亡有机物年代的方法。这种方法被称为放射性测年法、放射性测定法或放射性同位素测年法。2 发生衰变的放射性同位素通常被称为母同位素；而放射性衰变的最终产物——稳定的同位素——则被称为子同位素。

以放射性碳定年法为例，我们可以测量如今碳<sup>-14</sup>衰变为氮<sup>-14</sup>的速率。如果我们知道动物死亡时骨骼中碳<sup>-14</sup>的含量，并且能够测量如今骨骼中碳<sup>-14</sup>的含量，那么通过计算衰变速率，我们就可以推算出动物死亡的时间。3 理论上是这样。但实际情况要复杂一些。4 一些据称非常古老的物质，按进化时间尺度来看应该很古老，但其中仍然含有碳<sup>-14</sup>，因此它们实际上只有几千年的历史。5

## 等时线测年

放射性测年法的一种改进方法称为等时线测年法。以碳<sup>-14</sup>衰变为氮<sup>-14</sup>，钾<sup>-40</sup>衰变为氩<sup>-40</sup>为例，只需单个样本即可测量母元素和子元素，并分别计算骨骼或岩石的年龄。

然而，在许多岩石单元中，例如单个花岗岩体和单个玄武岩熔岩流，许多单个样品可能会得出不同的铷-锶或铀-铅放射性测年结果。这是因为不同的样品中母体放射性同位素的含量不同。

因此，等时线法应运而生，它利用每个岩层单元的多个样本来获得该岩层的单一年龄。有观点认为，使用多个样本可以得到更可靠的结果。此外，等时线法还被认为克服了所有放射性测年技术中存在的假设问题。

<sup> 6</sup>

等时线定年法的原理如下：在岩石单元形成之时（例如，花岗岩体结晶冷却之时），各个样本中母体铷<sup>-87</sup>原子的数量各不相同。但由于铷<sup>-87</sup>的放射性衰变刚刚开始，所有样本中子体锶<sup>-87</sup>的含量均为零。

因此，我们将此绘制在以  $^{87}\text{Rb}$  为横轴、 $^{87}\text{Sr}$  为纵轴的图表上。在零时刻，图表上连接每个样本点的直线是一条水平线（见图 2）。由于该直线上的所有点都具有相同的零年龄，因此该直线被称为等时线（*iso* 表示“相同”，*chron* 表示“年龄”），在本例中为零等时线。

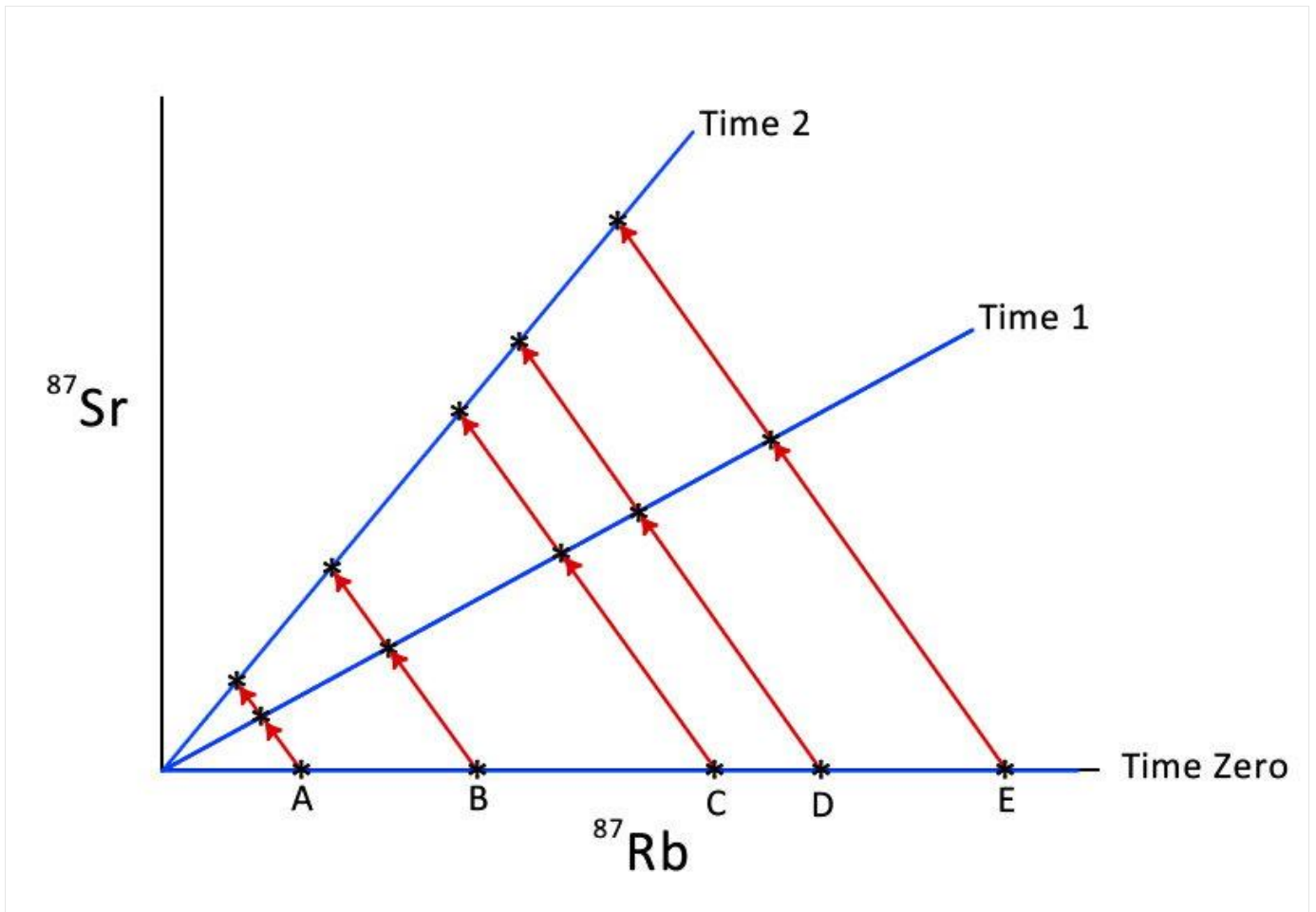


图 2. 五个花岗岩样品（标记为 A、B、C、D 和 E），其  $^{87}\text{Rb}$  原子数与  $^{87}\text{Sr}$  原子数的关系图，所得等时线分别位于 0、1 和 2 时刻，表示  $^{87}\text{Rb}$  衰变为  $^{87}\text{Sr}$ 。

随着时间的推移，不同数量的  $^{87}\text{Rb}$  原子衰变为不同数量的  $^{87}\text{Sr}$  原子，但比例保持不变。因此，在时间 1 时， $^{87}\text{Rb}$  原子数量是样品 A 两倍的样品 B，其  $^{87}\text{Sr}$  含量将远高于样品 A。但由于两个样品的年龄相同，它们在图上会落在同一条线上（见图 2）。然而，等时线只是从时间 0（水平）向上旋转到时间 1（倾斜）。这是因为随着每个样品中  $^{87}\text{Sr}$  原子数量的增加，由于  $^{87}\text{Rb}$  原子的放射性衰变，其数量会减少。

随着时间的推移，不同数量的<sup>87</sup>Rb 原子持续衰变，在不同的样品中产生不同数量的<sup>87</sup>Sr 原子，但比例保持不变。因此，在图上绘制时，所有时间点 2 的样品都落在时间点 2 的等时线上(见图 2)。同样，等时线只是从时间点 1 到时间点 2 发生了旋转。

事实证明，根据描述等时线的数学原理，这些等时线的斜率等于岩石单元在时间 0、1 和 2 的年龄。

然而，分析过程并非简单地测量花岗岩体中几个样品中<sup>87</sup>Rb 和<sup>87</sup>Sr 原子的数量。首先，实际上，将不同样品中<sup>87</sup>Rb 和<sup>87</sup>Sr 原子的数量绘制成图，通常不会落在一条连贯的直线上。其次，花岗岩样品中这些元素的原子数量非常少，使得精确测量变得极其困难。

解决这两个难题的方案是使用一种专门用于测量同位素的仪器：质谱仪。它可以根据原子量区分同位素。此外，它对测量同位素比值非常敏感。

锶的稳定同位素是<sup>86</sup>Sr。这意味着花岗岩样品中

<sup>86</sup>Sr 原子的数量不会随着

<sup>87</sup>Rb 原子衰变为<sup>87</sup>Sr 原子而改变。因此，无需计算<sup>87</sup>Rb 和

<sup>87</sup>Sr 原子的数量，而是使用质谱仪测量样

品中的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值。

*等时线法已成为岩石放射性测年中的最佳实践标准程序。*

此过程中的数学运算称为归一化。它实际上是将 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值这两个变量纳入一个称为等时线的线性关系中，该等时线的斜率可以证明是花岗岩体的表观年龄。因此，等时线法已成为岩石放射性测年中的最佳实践标准方法。

## 被忽视的“皱纹！”

现在人们发现，这种方法存在一个关键缺陷，而这个缺陷迄今为止一直被忽视。而这会导致等时线年龄被高估。

$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值被认为仅受 $^{87}\text{Rb}$ 放射性衰变为 $^{87}\text{Sr}$ 的影响。整个等时线定年理论都基于这一看似合理的假设，并且依赖于此假设。

然而，这种假设并未考虑差异质量扩散——即不同原子在材料中扩散速率不同的现象。在这种情况下， $^{86}\text{Sr}$ 原子比 $^{87}\text{Sr}$ 和 $^{87}\text{Rb}$ 原子更容易扩散（或泄漏），原因很简单， $^{86}\text{Sr}$ 原子体积更小。

正如北卡罗来纳州立大学的罗伯特·海耶斯所指出的，地质学家在对岩石进行年代测定时，必须确保铯<sup>-87</sup>、铯<sup>-86</sup>和铷<sup>-87</sup>的差异扩散不会导致铯<sup>-87</sup> / 铯<sup>-86</sup>和铯<sup>-87</sup> / 铯<sup>-86</sup>比值呈线性分布，就像等时线那样。8 任何可能由这种同位素扩散效应引起的线性偏差，在将等时线放射性测年方法应用于同位素比值时，都必须进行校正。

## 差异扩散是如何发生的

固体扩散有两种数学模型：稳态扩散和动态扩散，分别对应于研究较为深入的菲克第一定律和第二定律。<sup>9</sup> 扩散的驱动力是浓度梯度，它试图在微观尺度上使所有物质均匀化。在浓度梯度因扩散过程而逐渐趋近于零之前，每种同位素的扩散都遵循菲克第二定律。当然，地质学家认为，浓度梯度趋近于零的过程会在地质时间尺度上缓慢进行，因此，迄今为止，这种扩散并未被视为对岩石等时线年代测定构成问题。

然而，对于给定的基质，每种同位素的扩散系数预计都会有所不同，这是由于每种同位素的质量、化学键合、缺陷类型和浓度存在差异。

当待测岩石样品中含有晶界时，晶界及其周围的扩散效应预计会成为主要影响因素。所有岩石样品都存在这种情况，即使是那些为了进行等时线测年而分离出

矿物的样品也不例外。所有岩石样品都含有大量的晶界，因此它们都会受到这种更为显著的扩散效应的影响。

为了解释质量效应，有多种近似方法，首先是假设晶格中所有振动的谐振频率相同。晶体中同种原子间原子键强度相同的近似也是一个很好的近似，尽管考虑质量依赖性的近似可能给出更优的整体结果。无论采用哪种方法，将相邻原子间的原子键近似为经典弹簧都会产生振荡频率的质量效应。因此，振动频率的平方与扩散原子的同位素质量成反比。

频率分布揭示了低质量同位素扩散速度快于高质量同位素的基本机制。这意味着在室温下，<sup>86</sup>Sr 的振动频率比 <sup>87</sup>Sr 的振动频率高出 1% 以上。在假定的地质时间尺度上，如果没有充分的测量验证，就不能简单地认为这种频率差异可以忽略不计。对于含有大量晶界的样品而言，这一点尤为重要。

在固体中，扩散效应的相对增幅最小的是空位扩散，其次是间隙扩散，而晶界扩散则是最大的潜在机制（如果存在的话）。这导致了样品特异性的同位素质量扩散效应，因为如果存在颗粒状包裹体，杂质、缺陷和晶界的贡献在单个岩石样品中可能存在显著差异。

铯与钙和镁属于同一化学族。另一方面，铷与钾和钠属于同一化学族。由于可能发生族内元素替代，含钾或钠的矿物，例如钠长石和/或钾长石，其铷含量预计会较高。同样，通常含有钙或镁的矿物，例如钙长石、橄榄石和/或辉石，由于族内元素替代，其铯含量预计会较高。

火成岩是等时线定年法的主要目标，它们通常含有斜长石，有时还含有钾长石，以及其他相关矿物。这些长石晶体通常比其他不含钾的矿物含有更高的铷含量。

火成岩的结晶速率通常会因冷却环境的不同而有所差异，例如，花岗岩冷却于地下，玄武岩冷却于地表。这导致岩浆中的铷和铯在岩石结晶过程中，于不同温度下分馏到不同的相容矿物中。因此，岩石的流动性和凝固速率会随温度变化，从而决定每种矿物中同位素比值的初始条件。

这些效应导致矿物中 Rb/Sr 比值呈现自然分布。正是这种变化使得线性分布能够产生等时线，从而为岩石及其组成矿物提供年代估算。放射性衰变的进一步作用可以导致 Rb/Sr 比值与岩石成分之间存在函数关系，前提是岩石内部不再发生混合，例如地下水渗入、晶体再生或风化侵蚀等物质降解。

固态扩散可以通过多种途径发生，包括间隙扩散、空位扩散，甚至多空位扩散。扩散可以发生在岩石表面、晶界，也可以直接在岩石内部发生（尽管速度慢得多）。其中，沿岩石表面扩散最为显著，其次是沿晶界扩散。

这些扩散机制通常都遵循扩散系数的温度依赖性。当多种扩散机制同时发生时，各个扩散系数的乘积不会改变整体的温度依赖性。类似地，由于扩散是指数形式的，因此扩散的总活化能是各个扩散活化能之和。

这种同位素效应在地质年代学文献中鲜有讨论（即便有讨论）。在固体中，一种物质在另一种物质中的扩散率仍然取决于质量，这意味着<sup>86</sup>Sr 的扩散速度比<sup>87</sup>Rb 或<sup>87</sup>Sr 更快。

根据<sup>87</sup>Rb 的化学键合情况，

<sup>86</sup>Sr 的扩散速度通常也应比该同位素更快。Rb 的原子半径比 Sr 大 20%，这使得两种 Sr 同位素的扩散性通常都更强。由于<sup>86</sup>Sr 的质量小于<sup>87</sup>Sr，因此<sup>86</sup>Sr 的扩散性比<sup>87</sup>Sr 更强。这有可能在待测样品中形成一种与放射性衰变无关的天然同位素分布。

## 对等时线日期的影响

为了评估基于上述所有机制的同位素扩散效应，罗伯特·海耶斯仔细地进行了点源扩散的数值模拟。通过

评估<sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr 和<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值的影响，他发现起作用的基本原理是质量效应和化学键合相关效应。

对于<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值，<sup>86</sup>Sr 的质量较小，因此扩散后较轻同位素的分布标准偏差参数高于较重同位素。

<sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr 比值也存在类似情况，尽管在某些特殊情况下，化学键合力可能对扩散系数起主导作用。

*一般而言，没有理由预期这些同位素会随着时间的推移以相同的速率扩散到任何物质中，因此在对岩石样品进行同位素测年时，不应考虑这种影响。*

铷的半径比元素锶大约 15%，因此通常情况下，锶同位素的扩散速度应该明显快于铷同位素。然而，海耶斯发现，唯一适用于所有情况的基本结论是：没有理由预期这些同位素在任何物质中随时间推移的扩散速率都相同，并且在岩石样品进行同位素定年时应考虑这一效应。

在 Hayes 的数值模拟中，扩散系数和活化能的大小存在三种不同的潜在机制。由于同位素效应，<sup>86</sup>Sr 的扩散必须大于 <sup>87</sup>Sr。然而，原则上，扩散最终可能符合以下任何一种关系：

$^{86}\text{Sr} > ^{87}\text{Sr} > ^{87}\text{Rb}$ ,  
 $^{86}\text{Sr} > ^{87}\text{Rb} > ^{87}\text{Sr}$ , 以及  
 $^{87}\text{Rb} > ^{86}\text{Sr} > ^{87}\text{Sr}$ 。

最有可能的情况是  $^{86}\text{Sr} > ^{87}\text{Sr} > ^{87}\text{Rb}$ ，因为 Rb 的原子尺寸相对于 Sr 更大，使得 Sr 通常更易扩散。

假设浓度相等且活化能差异可忽略不计，Hayes 的结果呈现出近乎线性的关系图。然而，颇具启发性的是，如果仅从构成每个图的五十个数据点中选取几个，则很容易将这些关系图误认为是线性关系，如同等时线一样。

海耶斯强调了这一点对等时线测年研究的重要性，因为在测年文献中，地质年龄通常是用少于七个数据点来定义等时线。根据他的分析，仅凭这种同位素扩散差异效应，几乎就能保证获得类似等时线的线性图！

不出所料，Hayes 发现  $^{87}\text{Rb} > ^{86}\text{Sr} > ^{87}\text{Sr}$  这一情景呈现出负相关关系，即负斜率的线性关系。这与岩石自然系统中产生的正斜率等时线的实际情况不符。因此，由于  $^{87}\text{Rb}$  的原子尺寸和质量最大，其化学键合机制<sup>导致</sup>其扩散速度不及其他两种 Sr 同位素。

然而，海耶斯证实，几乎所有受同位素差异扩散影响的岩石和矿物样品，其同位素比值分布都会呈现一定的非线性特征。这种分布可以追溯到由同位素差异扩

散效应引起的偏差，而与放射性衰变导致的纯线性分布无关。否则，由此得到的等时线将错误地估计岩石和矿物的真实年龄。

需要强调的是，这种差异扩散是岩石和矿物中不可避免的现实。这是因为母体放射性同位素

( $^{87}\text{Rb}$ 、 $^{147}\text{Sm}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ ) 及其子体 (分别为  $^{87}\text{Sr}$ 、 $^{143}\text{Nd}$ 、 $^{206}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}$ ) 并非构成待测岩石中矿物的主要元素，而仅仅是微量元素，它们会取代或被困于这些造岩矿物的晶格中。因此，它们在晶格中的结合力较弱，比那些结合力更强的主要元素更容易扩散。

海耶斯得出结论，他已经证明，消除固态质量扩散效应的最简单方法就是在测定样品年龄时不使用同位素比值。换句话说，等时线测年技术存在缺陷且具有误导性，因此应该只考虑模型年龄。然而，人们已经充分认识到，由于模型年龄是基于单个样品，因此岩石单元的模型年龄通常分散性很大，几乎完全不可靠。所以，如果等时线测年法不像之前认为的那样可靠，那么所有利用放射性同位素测定岩石年龄的努力都具有极大的误导性和可信度。

## 两种拟议解决方案

海耶斯提出了两种解决方案。首先，应首先对每个用于等时线测年研究的样品（岩石或矿物）中母同位素和子同位素的差异扩散效应进行单独评估，并尽可能进行量化。只有这样，在使用相关同位素比值绘制等时线并确定岩石和矿物年龄时，才能消除这些效应。

其次，还可以对获得的同位素比值及其所绘制的等时线进行仔细的统计分析，以确定并消除差异扩散效应。只有这样，才能使用“校正后”的同位素比值绘制“校正后”的等时线，从而获得看似更可靠的岩石年龄。

但这是一种非常主观的方法，因为地质年代学界使用的这类统计工具仅仅是为了剔除那些无法紧密落在等时线上的同位素比值，从而得出被认为是岩石有效年龄的同位素比值。然而，有可能落在等时线上的同位素比值实际上是受差异扩散影响最大的，正如海耶斯所证明的，差异扩散会产生类似于等时线的线性图！因此，这些数据点才应该被舍弃！

此外，海耶斯还指出，如果没有多达三十个样本点，通常无法进行足以区分线性分布和非线性分布的严格统计分析。事实上，他建议为了避免假阳性，至少需要七个样本点。但这样一来，首先评估每个样本中同位素的差异扩散所需的工作量几乎令人难以承受。

海耶斯提出的唯一其他替代方案是在进行同位素分析的质谱测定之前，去除分离出的矿物颗粒的边缘。该建议基于以下前提：差异扩散的两个主要成分分别发生在岩石表面和矿物边缘，以及晶界之间和晶界沿线。通过去除晶界，可以有效地消除已发生的差异同位素扩散的两个主要成分。然而，对于每个等时线测定需要处理的七个以上样品，这样做将是一项非常繁琐的工作。而且，也不能保证所有晶界都被去除，从而完全消除主要的差异同位素扩散的影响。

## 扩散并非唯一的问题

虽然海耶斯的研究令人大开眼界，敲响了警钟，但差异同位素扩散并不是放射性同位素测年方法目前发现的唯一问题。

首先，要确定放射性年龄，必须确保母体放射性同位素的衰变速率已被精确测定，并且自岩石形成以来一直保持恒定。RATE 项目发现了多条无可辩驳的证据，表明放射性同位素的衰变速率在过去并非恒定不变，而是显著加快，至少在创世洪水这一全球性灾难期间是如此。<sup>10</sup>此外，过去 60-80 年的实验测定未能准确确定这些放射性同位素衰变速率的当前值。<sup>11</sup>因此，如果没有精确已知的恒定衰变速率，这些放射性同位素测年“时钟”根本无法确定岩石的年龄。

其次，已知这些同位素在分析过程中会根据其原子量发生分馏。<sup>12</sup> 也就是说，分析过程本身会导致被分析样品中同位素的分离和迁移。这是同位素质量差异导致的另一种扩散形式。如果在分析样品之前已经发生了同位素扩散，并且在分析过程中又发生了进一步的质量分馏，那么最终测得的同位素比值就很难准确反映过去放射性衰变的时间进程。

第三，我们永远无法确定岩石形成时（即初始条件）各子同位素的浓度。<sup>13</sup>在钾氩（K-Ar）法中，假设岩石形成时不存在子同位素氩，因此现在测得的所有氩都是岩石形成后钾发生放射性衰变产生的。对于铷锶（Rb-Sr）、钐钕（Sm-Nd）和铀铅（U-Pb）法，有人认为可以通过绘制等时线来确定岩石形成时的初始同位素比值，或者可以通过样品中非放射性衰变产生的<sup>204</sup>Pb 含量来确定初始（普通）铅含量。但现在已经证明，这些等时线的可靠性很低。而且，人们早已知道，岩石形成时，地幔和地壳中的子同位素可能并非由放射性衰变产生，而是继承自岩石的来源！

## 结论

这项发现以及近期对同位素差异扩散作为放射性同位素等时线测年法关键缺陷的阐述，无疑是给这些放射性同位素测年方法雪上加霜。如果岩石及其所含矿物

中存在同位素差异扩散，导致分析得到的同位素比值绘制出的直线与等时线无法区分，那么我们就永远无法确定是否获得了真正的等时线，也就无法确定等时线年龄是否正确。

然而，这种错误的等时线也可能是由于在分析样品以测量同位素比值（即绘制成等时线的同位素比值）的过程中，发生了进一步的扩散或同位素质量分馏造成的。此外，如果我们无法确定岩石形成时的初始同位素浓度（即起始条件），也无法确定自岩石形成以来衰变速率是否恒定，那么这些放射性同位素衰变“时钟”就根本无法可靠地用于测定岩石的绝对年龄。

读完这篇文章，你心里是否有一些触动？有没有一些新的想法，或者值得你认真思考的问题？或许，你也开始重新思考自己的信仰和人生的方向。

如果你愿意，现在就可以向上帝祷告，打开心门，成为祂的儿女。祷告不需要华丽的言辞，只要一颗真诚的心。你可以这样祷告：

天父上帝，

今天我来到你面前，愿意立定心志，宣告我相信耶稣基督是我的救主，是我生命的主。我愿意离开过去那些不讨你喜悦的生活方式，求你赦免我的过犯。靠着你的恩典，帮助我学习顺服你、爱人如己，活出你所

賜的新生命。求圣灵每天引导我、扶持我，使我一生榮耀你的名。奉主耶穌基督的名禱告，阿們。

如果你已經做了這個禱告，願你知道，你並不孤單。信仰的道路需要陪伴和成長。鼓勵你在自己居住的地方，尋找一間合適的教會，與弟兄姐妹一同聚會、學習和成長。

如果你有任何疑問，或在信仰上需要幫助，歡迎隨時寫信與我們聯繫。我們願意傾聽，也願意與你一同前行。