

稳定同位素地质译文集

——在矿床研究中的某些应用——

地质科学研究所地质矿产所
北京大学地质地理系 译

地 质 出 版 社

地质出版社
GEOLOGICAL
PUBLISHERS

稳定同位素地质译文集

——中国科学院地质研究所编——

中国科学院地质研究所编
地质出版社 地质研究所 编



地质出版社 地质研究所 编

稳定同位素地质译文集

—— 在矿床研究中的某些应用 ——

地质科学研究院地质矿产所 译
北京大学地质地理系

地 质 出 版 社

内 容 提 要

本译文集主要介绍稳定同位素地质学在矿床研究中的某些应用。

本集前言中对整个译文内容作了综合性的评述，这些译文反映了国外应用硫、氧、碳和氢等稳定同位素比值来研究成矿作用、找矿方法等方面的一些成果，以及有关稳定同位素地质的基本理论的探讨。

本书适于同位素地质、矿床地质及其他有关地质人员参考，也适合大专院校师生参阅。

稳 定 同 位 素 地 质 译 文 集

在矿床研究中的某些应用

地质科学研究所地质矿产所 译
北京大学地质地理系

*

地质局书刊编辑室编辑

地质出版社出版

地质印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1974年9月北京第一版·1974年9月北京第一次印刷

印数1—4,000册·定价0.95元

统一书号：15038新68

毛 主 席 语 录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

前 言

稳定同位素地质学，或称稳定同位素地球化学，是研究地质体中稳定同位素的分布及其在各种地质条件下的运动规律，并运用这些规律来解决地质问题的一门科学。

最近二十多年来，随着生产和科学技术水平的提高，这门学科也得到了迅速发展。现在，不论在月球、陨石、天体演化和宇宙起源诸方面的研究中，还是在矿物、岩石、矿床以及石油地质、水文地质等各个地质学科中，稳定同位素地质学都已经或正在成为解决某些重大问题的研究手段之一。

本译文集仅收集稳定同位素地质学在矿床研究中应用等方面的一些资料，向广大地质工作者介绍国外利用硫、氧、氢、碳、（铅）等稳定同位素研究矿床的成果和发展趋势。从国外大量的文献资料中可以看出，稳定同位素地质学在解决矿床学的一些基本问题方面起着极为重要的作用，这不仅有助于对成矿规律的认识和成矿理论的发展，同时，也初步开拓了稳定同位素地球化学找矿的前景。

根据现有资料，与矿床研究直接有关的应用可以概括为以下四个方面：

1. 研究成矿物质的来源。到目前为止，世界上一些主要类型的矿床大都先后进行了这方面的研究，积累了大量的资料，并使人们有可能深入探讨整个内生矿床的物质来源。这是稳定同位素地质学在矿床研究中的一个重要应用。这方面的资料很多，本译文集中编译的有关世界各大型层状铜矿的资料，和有关北美斑岩铜矿、加拿大铅锌矿、日本黑矿的译文，都反映了这一个侧面。

2. 研究成矿作用的物理化学条件。这方面的应用亦较为广泛。其最为突出的是同位素地质温度计的应用。特别是硫同位素

地质温度计的大量应用,被称之为近年来硫化矿床研究中的一项重大进展。本译文集中平克尼等人有关密西西比上游铅锌矿硫同位素分馏作用的文章可作为这方面的例子。其他一些译文也程度不等地涉及了这一问题。应用稳定同位素研究含矿溶液的物理化学状态(如: pH、Eh、气体分压等)也取得了一定的成果。梶原等人的文章探讨了矿液中氧的有效分压(逸度),平克尼等人的文章对矿液的 pH 值进行了推算,大本等人的文章,对一些矿床的物理化学条件也作了定性的探讨。

此外,本集中还选译了贝克尔等人通过测定碳同位素比值,来研究西澳大利亚条带状铁矿沉积环境和沉积盆地发展史的文章。

3. 研究矿床成因及分类。应用稳定同位素的研究来判断矿床成因是大家很感兴趣的一个问题。有许多研究者进行了这方面的研究,以讨论一些有争议的矿床究竟是岩浆热液,还是地下水成因的热液,或者是化学沉积的,还是生物还原形成的。本译文集中沃伦研究卷筒式铀矿床的文章可作为这方面的例子。其他一些译文也多少讨论了这个问题。

由于上述成果的取得,有力地推动了矿床分类的发展。国内外已有人根据同位素资料等来进行矿床分类。因争论颇多,且不完全是一个同位素地质问题,在此不作更多的介绍。本译文集中杉板等人研究硅酸盐矿物氧同位素变化规律的文章,提出了划分“次火山矿床”的新根据,可属于这一类型的研究。

4. 稳定同位素地球化学找矿。近年来,随着研究程度的深入,这方面已显示苗头。本集中詹生关于稳定同位素在地球化学探矿中的应用,以及卡农、皮尔斯关于探查密西西比流域铅锌矿的铅同位素标志的译文,都反映了这方面的尝试。

此外,本译文集中还收入了大本等人讨论“热液矿床中硫和碳的同位素系统”的文章,反映了稳定同位素地质基本理论方面的一些进展。此文强调了在解释同位素地质资料时,要密切结合地质背景,综合考虑各种影响因素,避免简单地对比而得出片面

的结论。

总之，稳定同位素地质学还是一门正在迅速发展的科学，许多问题需要进一步探讨，许多理论有待发展和完善。本译文集中的这些文章虽然反映了一个很有价值的方面，但研究的深度还是不够的，研究的方法和观点也不是没有问题的，希望读者批判地对待。但是，它象许多新兴学科一样，有着广阔的发展前景。

由于我们水平有限，从选题到翻译等各方面一定存在不少问题，希读者批评指正。

一九七三年八月

目 录

前言	II
应用硫同位素研究卷筒式铀矿床的成因地球化学	1
密西西比河上游锌铅矿区成矿过程中硫同位素的分馏作用	15
日本科罗科型和基斯拉吉型层状硫化矿床的硫同位素研究	39
稳定同位素在地球化学探矿中的应用	55
应用碳同位素研究西澳大利亚条带状铁矿层的成因	65
斑岩铜矿床中矿物的氢和氧同位素比值的研究	85
与热液矿床有关的硅酸盐矿物的氧同位素研究	129
不列颠哥伦比亚省布利贝耳铅锌矿的液体包裹体和氢、氧、 碳同位素的研究	145
探查密西西比流域铅锌矿的铅同位素标志	185
热液矿床中硫和碳的同位素系统	201
世界上某些大型层状铜矿床稳定同位素的研究(综合)	238

应用硫同位素研究卷筒式铀 矿床的成因地球化学

摘 要

卷筒式铀矿床产于含有黄铁矿和其他还原矿物的砂岩层中。这种矿床是由沿着砂岩层面流动的含氧成矿溶液所形成。经过很长时期，地下水中的氧破坏了在现有矿床上游蚀变带中的大多数黄铁矿。硫被溶解以后，又在较远下游的卷筒建造中再沉淀为黄铁矿。在成矿过程中，沿着蚀变带边缘的一个狭带，黄铁矿不断地受到破坏，同时又在较远的下游不断地再沉淀成黄铁矿。按照本文提出的论点，卷筒建造的黄铁矿可有四种情况：

(1) 如果所有溶解的硫都参与形成卷筒建造中黄铁矿的反应，那么成矿期的一些黄铁矿要比砂岩层中原有的黄铁矿更富集硫-34(S^{34})。

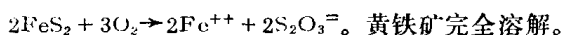
(2) 在稳定状态的条件下，如果只有一部分溶解的硫参与形成主矿中成矿期黄铁矿的反应，那么矿卷中的 S^{34} 比例要普遍低于原有的黄铁矿。

(3) 如果从蚀变带迁移走的所有黄铁矿都在卷筒建造中再沉淀，那么在矿床中会有大量的黄铁矿。

(4) 如果被溶解的黄铁矿只有一部分再沉淀，那么在矿床中的黄铁矿总量要少于从蚀变带迁移走的黄铁矿总量。

对怀俄明许多矿床的实验室和野外研究表明：次矿带的黄铁矿相当富集 S^{34} 。次矿带的 S^{34} 比例要高于原有黄铁矿的 S^{34} 比例。在雪莱盆地的整个铀矿卷中的黄铁矿量，看来比从蚀变带迁移走的黄铁矿量少得多。如果是稳定状态，这两方面的观察说明所有从蚀变带迁移走的硫，都参与了在铀矿卷中再沉淀为黄铁矿的反应。并且还说明从蚀变带迁移走的硫只有一部分在铀矿卷中再

沉淀为黄铁矿。下列化学反应顺序与观察相符，所以稳定状态的化学作用可能是形成雪莱盆地铀矿床的主要方式。反应式说明可能发生的化学反应，但这并非唯一可能的反应。



$4\text{Fe}^{++} + 7\text{S}_2\text{O}_3^{=} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{FeS}_2 + 6\text{SO}_4^{=} + 6\text{H}^+$ 。部分黄铁矿再沉淀。

在生物成因的矿床中，理论上可能再沉淀所有从蚀变舌迁移走的黄铁矿。定量再分布 (quantitative redistribution) 是极端的情况，这未必能达到。虽然定量再分布并不可能，但仍进行这方面的讨论，因为这种想法有助于成矿理论的研究。如果生物作用再分布了所有的黄铁矿，则 (a) 在矿床中的某处要出现 S^{34} 的较高比例，(b) 会有大量的黄铁矿。如果在稳定状态过程中，生物作用再分布了一部分黄铁矿，则 (a) 在矿床中要普遍出现 S^{34} 的低比例，(b) 只会有适量的黄铁矿。实际上，在雪莱盆地的矿床中，黄铁矿的适量聚积和 S^{34} 的高比例，似乎排除了生物作用是形成该矿床的主要方式的可能性。

引 言

奥斯汀指出：卷筒式铀矿床的各个带中黄铁矿有其特征的硫同位素丰度。在一些矿床中，如金和奥斯汀叙述过的怀俄明加斯希尔的矿床，从矿床的一部分到另一部分其特征的同位素丰度稍有渐变。同位素相对丰度的分布形式必定与矿床的形成过程有关。本文的两个目的是检验在三种不同理想模型中硫同位素的分布方式，并将模型中的分布与实际矿床中的分布加以比较。

卷筒式铀矿床的概述

在怀俄明的第三纪岩石和在新墨西哥爱帕罗西亚湖的侏罗纪岩石中的卷筒式铀矿床 (图 1)，出现在舌形蚀变岩带的两侧和末端。铀矿产在蚀变舌边缘接触带相对未蚀变的砂岩中，经常富集铁的硫化矿物和含铀、硒、钒及 (或) 钼的矿物。实际上，在蚀变舌见不到通常可由特殊颜色加以识别的黄铁矿和碳质物质。发育

完全的矿卷如图 1 所示, 形成一个凹向蚀变舌的新月形或 C 形矿体。按照肖威和格兰杰的意见, 可能是由含氧、铀并穿过可渗透砂岩的含矿溶液与黄铁矿和有机碳化合物的反应作用下, 形成了矿床和伴生的蚀变岩石。这种矿带的矿物, 沿着矿床边缘不断地被氧化和溶解, 并在不远的下游再沉淀。氧化前缘和整个矿床的迁移必定比含矿溶液的迁移要慢得多。

卷筒式铀矿床中黄铁矿的分布

黄铁矿是卷筒式铀矿床中最常见的后成矿物和最富硫的矿物。在雪莱盆地中, 除矿带附近有少量黄铁矿外, 蚀变带的黄铁矿几乎完全被迁移走了。正好在氧化前缘下游的矿带中, 黄铁矿的含量通常最多, 并且随着从氧化前缘往下游的距离增加而减少, 直至与砂岩的背景含量相等。一般认为黄铁矿的背景分布相当均一, 并在矿床形成以前就存在。黄铁矿的背景含量被认为是成矿前的黄铁矿, 并由未蚀变砂岩的黄铁矿平均含量(卷筒式矿床再分布的黄铁矿除外)来确定。金和奥斯汀把这个区域称为远离的无矿区。由卷筒矿床中的再分布黄铁矿超过未蚀变砂岩中的背景含量的过剩量来确定成矿期的黄铁矿。由于, 成矿期黄铁矿和成矿前黄铁矿的密切混合, 并且成矿期黄铁矿漫生在成矿前黄铁矿之上, 所以无法观察区分这两类黄铁矿。在矿化过程中, 蚀变带的所有黄铁矿几乎全被迁移走, 其中一部分再沉淀为成矿期黄铁矿。有些成矿期黄铁矿可有过好几次再循环, 而所有的成矿期黄铁矿至少有过一次循环。然而, 在矿床中

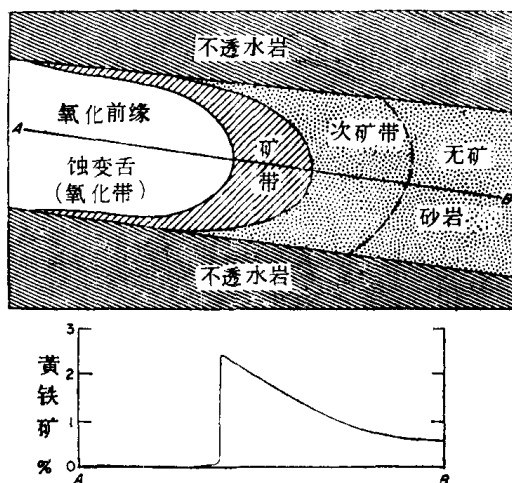


图 1 卷筒式铀矿床的理想化的纵剖面
和沿AB线的黄铁矿含量曲线图

的成矿前黄铁矿并没有受到成矿作用的干扰。

硫的化学分析通常按全硫、硫酸盐的硫和硫化物的硫表示。硫化物的硫存在于白铁矿和黄铁矿以及其他硫化物中，但由于在卷筒式铀矿床中黄铁矿是占优势的硫化矿物，所以硫化物的硫分析和黄铁矿的硫分析实质上是相同的，在这里两者可交换使用。

理想化的卷筒式铀矿床

在讨论理想化的硫同位素丰度的分布形式以前，先对理想化的铀矿床作如下说明是合宜的：

(1) 在成矿作用开始以前，含矿砂岩层具有相当均一的孔隙度和黄铁矿含量。

(2) 地下水在砂岩层面上以匀速流过矿床。

(3) 在矿床形成过程中，沿着氧化前缘的一条狭带不断地迁移走黄铁矿。

(4) 部分或全部溶解的硫不断地再沉淀，大都漫生在矿体中原有的黄铁矿之上。

(5) 随着从氧化前缘往下游的距离增加，直至达到成矿前带，矿床的黄铁矿含量逐渐减少。

(6) 假定地下水接近平行层面并垂直于氧化前缘从氧化舌流入矿床。实际上，只要地下水不是平行于氧化前缘流动，严格的垂直是不必要的。

铀矿卷中黄铁矿的硫同位素含量

在所有天然硫中， S^{32} 和 S^{34} 两个同位素占99.2%。用质谱计测定 S^{34}/S^{32} 比值可得出样品中这两个同位素的相对数量。这些比值与一个标准相比得出千分率偏差（千分之几）。这个标准是卡扬迪阿布罗（Canyon Diablo）陨石的陨硫相，大致 $S^{34}/S^{32}=0.045$ 。其千分率值为0.0。

$$\delta S^{34} = 1000(S^{34}/S^{32} - \text{标准}) / \text{标准} \quad (1)$$

式中 S^{34}/S^{32} 是同位素原子丰度的比率。正的 δS^{34} 表示样品里的 S^{34} 比标准要多。

E. N. 哈什曼提供了怀俄明雪莱盆地的卷筒式矿床的黄铁矿样品。用重液分离接着用水与甲基·戊基甲酮合剂浮选，把砂岩中的黄铁矿与其他物质分开。R. O. 拉伊测定了黄铁矿硫的 δS^{34} 值。

沿着近似于图 1 AB线的一部分线上采集了一套样品，其 δS^{34} 值和采样点列于表 1。由于黄铁矿的含量低，蚀变舌中的样品没有得到同位素分析结果。

表 1 雪莱盆地铀矿床中黄铁矿的硫同位素含量

氧化前缘往前的距离 (呎)	硫化物的硫 (%)	U (%)	δS^{34} (‰)
矿带			
7	2.06	3.07	-32.68
17	1.05	1.30	-28.50
27	1.10	0.72	-25.10
32	0.47	0.75	+ 7.10
次矿带			
37	0.62	0.001	+ 6.68
42	1.47	0.002	+ 4.89
47	0.55	0.001	+10.82
52	0.29	0.001	+16.97
57	0.34	0.002	+13.97
62	0.35	0.002	+18.82

表 1 说明大多数与铀矿伴生的黄铁矿硫的 S^{34} 较少。表 1 还说明 δS^{34} 从氧化前缘往下游直到采样处为止，随着距离的增加而增大。 δS^{34} 的这种连续增大足以使得在次矿带的 δS^{34} 为正值。奥斯汀检查了铀矿床的硫同位素数据，发现矿带中的 δS^{34} 通常较低，但在金和奥斯汀叫做原矿带的次矿带中，其 δS^{34} 值却可高达 +25‰。此值稍高于表 1 中在 62 呎处样品的 +18.82‰。

在下游的更远处没有测过一套连续样品来确定 δS^{34} 的趋势。但是，我们根据整个怀俄明含矿岩石的无矿化样品可作推理：在

δS^{34} 最大值的点之外, 其值逐渐减小到成矿前黄铁矿所特有的 δS^{34} 值。这个区域(金和奥斯汀称为远离的无矿区)的样品, 奥斯汀的数据平均值为 -17% 。因此, 可预计 δS^{34} 是从最大的 $+25\%$ 左右减少到离氧化前缘很远处的 -17% 左右。

卷筒式铀矿床成因的主要理论

生物成因模型

詹生提出: 矿床的矿带中细菌在成矿时期把进入地下水中的硫酸盐化学还原成硫化氢。遍布于整个矿带的有机物质为硫酸盐还原作用提供了能量。细菌靠有机物质滋养, 通过新陈代谢作用将硫酸盐还原成沉淀铀和形成黄铁矿的硫化氢。

里森松和库兹涅佐娃测定过苏联砂岩型铀矿床中地下水的 Eh 和成分, 并且提出由于地下水输氧给矿带, 氧化了矿床上游的黄铁矿和碳质物质。有些作者认为在黄铁矿氧化作用中含有亲氧细菌。对生物成因模型来说, 无论是什么过程氧化黄铁矿, 它都产生可溶性硫酸盐。

通常认为嫌氧细菌能使矿带中的硫酸盐还原, 产生氢、硫化氢或甲烷。里森松和库兹涅佐娃的报告中还谈到在紧接氧化前缘的下游处就发生强烈的嫌氧细菌活动。细菌活动与地下水中的强还原条件和氢、硫化氢或甲烷的出现是一致的。

厄普德格拉夫研究过微生物和铀矿床的关系。他在三个产铀区即新墨西哥格兰次、怀俄明加斯希尔和科罗拉多乌拉凡所选取的63个矿石样品中, 发现极少的微生物, 并且比通常在土壤中可找到的微生物种类要少得多。他没有发现在含铀高和含铀低的样品之间在细菌群上有明显的差别。如果只是在矿床形成时存在细菌的话, 那么不存在细菌就只能表明矿床通常是不活动的。无论对厄普德格拉夫所得到的结果作何解释, 里森松和库兹涅佐娃所报导的在矿带有大量微生物群活动并非是所有铀矿床的特征。

生物作用的独有特征是溶解的黄铁矿可完全或部分地再形成成矿期黄铁矿。如果(1)沉积的含矿岩石富铁或者所有来自

在矿床前缘氧化黄铁矿的铁都是可溶的并得到地下水的搬运；

(2) 所有来自氧化黄铁矿的硫酸盐硫，由生物还原成硫化物，则会定量再形成成为成矿期黄铁矿。这种条件在自然界的地质环境中是罕有的，而硫通常要丢失。虽然生物成因不可能定量形成黄铁矿，但考虑到在能够明确地排除定量再分布以前，仍有必要讨论它的可能性。

中井、信行和詹生在实验室里研究过硫酸盐的生物还原作用。他们发现含有 S^{32} 的硫酸根离子要比含有 S^{34} 的硫酸根离子还原得更快。按照梅兰德的意见，这种作用趋向于留下较重的同位素。由于硫酸盐受到还原，所以还没有被还原的硫酸盐就富集 S^{34} 。随着还原的硫酸盐愈来愈多，富集程度也就愈来愈大。图2表示硫酸盐的 δS^{34} 如何随着硫酸盐还原部分的增加而增大。图2的1.02线表示当 $S^{32}O_4^{2-}$ 的反应速度比 $S^{34}O_4^{2-}$ 要快2%时的结果。

当地下水流过矿床时，硫酸盐被生物所还原，而留在溶液里

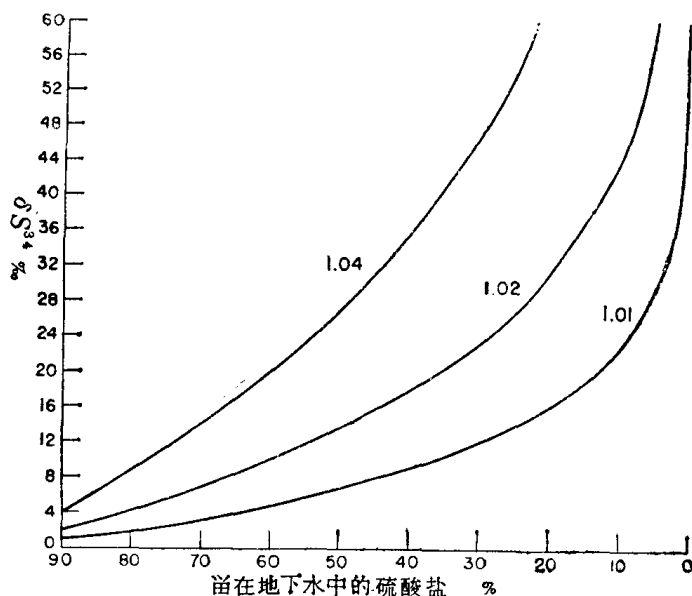


图 2 溶解的硫酸盐的同位素含量对留在地下水中的硫酸盐百分数作图。较轻同位素的反应速度比较重同位素快 1.01、1.02 或 1.04 倍

的硫酸盐富集了 S^{34} 。因此,留在地下水中的硫酸盐的同位素组成取决于地下水流过矿床的距离。离氧化前缘最远处的 δS^{34} 最高。在每一处的硫酸盐总是多少要比所沉淀的成矿期黄铁矿更富集 S^{34} , 因为当硫酸盐还原成黄铁矿时发生分馏作用。但是,硫酸盐和成矿期黄铁矿之间有密切的关系,所以从氧化前缘往下游,两者都富集 S^{34} 。如果硫酸盐由于某种原因不能完全转变成黄铁矿,那么整个作用就要中断,并且不再进一步发生同位素分馏作用。图 2 的 1.02 线表示在溶液除去 90% 的硫酸盐以后能发生富集作用。

黄铁矿的生物成因再分布的效率与黄铁矿的同位素组成之间的密切关系,使我们值得更详细地检验生物作用的效率。如果矿床是生物成因的,那么黄铁矿的同位素组成就应表明:是发生了完全的还是部分的再分布。如果是生物作用形成的矿床,那么这种同位素证据应当可以检验其他的地质事实。

1. 硫酸盐完全转变成黄铁矿的生物作用

地下水所携带的硫酸盐若完全转变时,则会产生大量黄铁矿的沉淀。虽然这种定量再分布的情况可能比较罕见,但其中有些概念对后面的讨论有用。定量再分布的数量相当于从蚀变舌转移到铀矿床的黄铁矿数量。如果这种作用持续很久,蚀变舌很大,那么搬运的黄铁矿数量以及成矿期黄铁矿数量也都很大。成矿期黄铁矿数量大到了控制矿床中硫同位素含量的程度。成矿前黄铁矿(与成矿期黄铁矿相比是次要成分)对大多数矿床的同位素丰度并不会有很大的影响。

前面已指出:生物成因的矿床在氧化前缘下游的黄铁矿中富集 S^{34} 。只有在成矿期黄铁矿占优势时,这种富集作用才能延续。在矿床以外,成矿前黄铁矿就占优势,并且控制着同位素组成。矿床所特有的同位素比值和成矿前带所特有的同位素比值逐渐一致。图 3 代表在硫酸盐完全转变成黄铁矿的生物作用所形成的矿床中,某一时间所预计的同位素分布。

图 3 的同位素分布形式与表 1 所列的一般同位素分布形式相