

文章编号: 1000-0364(2000)01-0107-06

# 宇宙射线对地表矿物晶格的损伤 及其地质作用的研究\*

杨铜锁<sup>1</sup>, 强志军<sup>1</sup>, 方秋霞<sup>1</sup>, 鲁百佐<sup>1</sup>, 马耀峰<sup>2</sup>

(1. 陕西师范大学物理系, 西安 710062; 2. 陕西师范大学地理系, 西安 710062)

**摘要:** 文章从理论与实验两个方面论证了宇宙射线对地表矿物晶格造成损伤的可能性。并初步计算了宇宙射线对地表矿物晶格造成损伤的大小及其对土壤形成影响的程度。把宇宙射线发挥地质作用的方式与太阳能和地球外天体的万有引力能的地质作用方式作了比较, 得出宇宙射线对地表矿物晶格的损伤是地质作用研究中不可忽视的因素的结论。

**关键词:** 宇宙射线, 矿物损伤, 地质作用

**中图分类号:** O572.1      **文献标识码:** A

地质学教材都将地质作用的能量来源归结为两种, 一种是太阳能, 另一种是地球外天体的万有引力能。近几十年来, 人们对月质学的研究, 发现对月球来说并不完全是这样。文献中有如下论述: “宇宙射线对月球表面的影响很强烈, 涉及到月球表面土壤的形成和有机物演变的历史<sup>[1]</sup>”。“剥蚀作用的另一个因素是宇宙射线。宇宙射线乃是一种从宇宙某处被加速到近于光速的粒子流。质子就是宇宙射线的主要成分。在宇宙射线中还发现氦和铁一类的原子核。当这些高能粒子打到月球岩石表面时, 它们会留下细微的斑痕, 从而使岩石的晶体结构稍有改变。在阿波罗飞船宇宙航行员带回的月球岩样上确已找到了这种宇宙射线作用痕迹的记录<sup>[2~4]</sup>。月球样品研究资料表明暴露年龄  $10^7$  年的月岩中银河系宇宙射线粒子留下的径迹密度为  $10^7$  径迹数/ $\text{cm}^2$ <sup>[5]</sup>。径迹实质上是损伤的标志。这表明对月质作用而言, 人们已经承认了除太阳能和地球外天体的万有引力能之外, 还有一个不容忽视的月质作用能源—宇宙射线能<sup>[6,7]</sup>。宇宙射线在月质学研究中不能被忽视, 在地质学研究中能否被忽视, 我们探讨了这一课题。

## 1 实验

实验测得在地磁为  $45^\circ$  的海平面上每平方米每秒大约有 10 000 个宇宙射线粒子通过。 $\mu$  子占宇宙射线总强度的 70%,  $e^\pm$  占 29%, 其它重粒子占 1%。 $\mu$  子的平均能量为  $3 \times 10^9$

\* 收稿日期: 1999-07-06。

作者简介: 杨铜锁(1946—)男, 陕西西安市人, 陕西师范大学物理系副教授, 主要从事宇宙射线和原子结构研究。

eV。我们模拟宇宙射线的重粒子成分对地表矿物的辐照作用作了如下的辐照实验：

### 1.1 样品与实验过程

实验所用的样品是西安工程学院在商南山区采集的长石,其主要成分  $\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_8)$  的含量非常高,只含有很少量杂质铷。矿物样品的地质年代为二亿年。

将样品用玛瑙钵加无水乙醇研磨成细粉状试样。将每一种试样分成两份,一份放入玻璃小瓶密封保存,另一份敞开在室温和一个大气压情况下,用  $\alpha$  放射源照射,所使用的放射源为  $^{239}_{94}\text{Pu}$  发射的  $\alpha$  射线  $\alpha$  粒子的平均能量约为 5.1 MeV。放射线的强度为  $2 \times 10^5$  Bq (Bq 贝可勒尔:每秒衰变一次定义为 1 贝可勒尔)。被照射样品的质量约 40 mg,面积约 1  $\text{cm}^2$ 。样品受照射时间 133 天。由这些数据可算出样品接收的  $\alpha$  粒子数约为  $2.36 \times 10^{11}$  He/ $\text{cm}^2$ 。相当于自地球诞生以来地球表层每  $\text{cm}^2$  上接收的重粒子数的 1.6/10 000,也相当于接收宇宙射线总粒子数的 1.6/1 000 000。样品受辐射的剂量约为  $3 \times 10^3$  Gy (Gy 戈瑞:1 千克任何物质吸收辐射能量 1 焦耳定义吸收剂量为 1 戈瑞)。将被照射的样品放置 180 天,排除在照射结束初期常温下微弱恢复的影响,并释放出辐照时产生的氦气。然后将长石未被辐照过的样品和已被辐照过的样品分别用 DELTA 系列热分析组和系统的 DSC—7 型示差扫描量热计进行热量分析。分析结果如图 1、图 2 所示。

### 1.2 对实验结果的分析与讨论

图 1 表示未辐照过的长石由于经过研磨和本身固有等原因有轻微损伤。加热时在 222.93 ~ 259.70  $^{\circ}\text{C}$  有少量退火热量放出,放出热量的数值是 0.81 J/g,放热的峰值温度为 245.56  $^{\circ}\text{C}$ 。图 2 表示被  $\alpha$  放射源照射过的长石放热的温度范围为 172.62 ~ 304.53  $^{\circ}\text{C}$ ,放出的退火热量的数值是 26.14 J/g,放热的峰值温度仍为 245.56  $^{\circ}\text{C}$ 。

比较图 1 与图 2 可以看出样品接受辐照后与辐照前有两点变化比较明显:第一,放出的退火热量增大了约 30 倍。第二,放出退火热量的温度范围扩大。放出热量的峰值温度没有变化。

晶体中的缺陷以应变形式积蓄能量,加热退火法是一个从无序向有序进行的过程,熵减少。很自然这是一个有热量放出的过程。未接受辐照的样品损伤小,退火时放出的热量少。已接受辐照的样品损伤显著增大,放出的退火热量显著增加。用样品退火时放出热量的多少判断样品损伤程度的大小看来是合理的。

至于图 1 和图 2 中在 330  $^{\circ}\text{C}$  多度出现的放热峰,可能是天然长石中的杂质在退火时放热量形成的。总的来看,辐照前后矿物的 DSC 曲线有很大变化,表明辐照显著改变了矿物晶格的结构是一个可以肯定的事实。

其它人的实验也证明了作为宇宙射线另一种基本成分的  $\gamma$  射线,辐照晶体后也能造成晶体的损伤。如最近何景棠等五人合作的<sup>[8]</sup>  $^{137}\text{CsI}$  晶体的辐照损伤研究<sup>[8]</sup>表明  $^{60}\text{Co}$  发射的  $\gamma$  射线对  $\text{CsI}$  晶体有明显的破坏作用,甚至用肉眼可以直接观察到  $\text{CsI}$  晶体颜色的改变。并用实验证明这种破坏是永久性的,在常温下基本没有自动恢复现象。而他们实验时对晶体的辐照剂量比宇宙射线对地表矿物晶体的辐照剂量要小得多。

## 2 理论分析与初步计算

宇宙射线入射到地球表层矿物晶体中,通过弹性碰撞和非弹性碰撞把能量传递给靶原

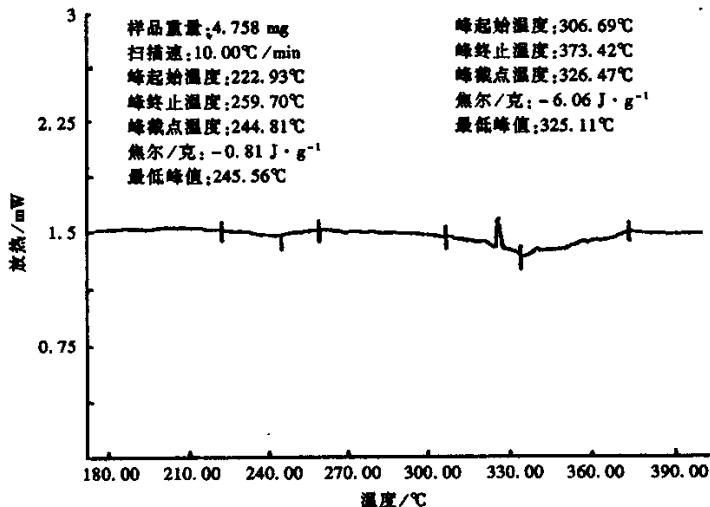


图 1 未照射前的长石的 DSC 曲线

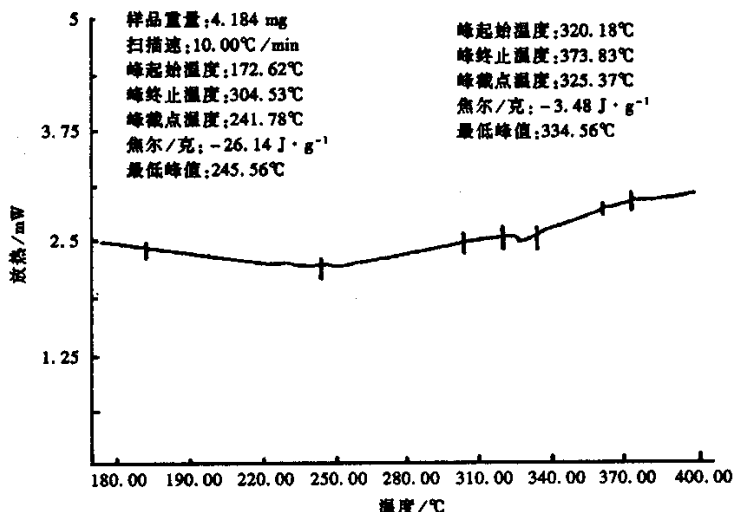


图 2 照射后的长石的 DSC 曲线

子和电子,自己逐渐损失能量直至最后停止在某一位置。在这些相互作用的碰撞中,被碰撞的原子可以获得足够的能量,使它摆脱原来晶格的束缚离开平衡位置进入间隙状态,成为间隙原子,失去原子的晶格就形成一个“空位”,间隙原子和空位总是成对出现的,这就是夫伦克耳(Frenkel)缺陷对。计算宇宙射线对地表矿物晶格造成的损伤程度,就是要计算自地球诞生以来,宇宙射线粒子能在地球表层矿物中产生多少夫伦克耳缺陷对。被宇宙射线粒子初次碰出晶格点阵平衡位置的位移原子(间隙原子),从碰撞中所获得的反冲动能  $E$  有可能远远超过位移阈能  $E_d$  ( $E_d$  指形成位移原子必须获得的最低能量,其大小等于形成位移原子的断键能和位移原子克服势垒所做功之和。位移阈能的数值一般为几十个电子伏特。如 Si、Al、Ni、Cu、Ag、Au 的平均位移阈能依次为 15、27、33、29、39、43 eV)。初次被碰撞出平衡位置的原子会有能量与其附近的晶格原子发生碰撞,使第二个被碰撞的原子位移。新的位

移原子还有可能再与其它晶格原子发生碰撞,这样产生更多的位移原子。直到最后位移原子的动能  $E < E_d$  时这个碰撞才会终止。这样的连续碰撞叫做级联碰撞。在级联碰撞中产生的位移原子数  $N$  可以用修正后的金奇恩-皮斯(Kinchin-Pease)公式计算<sup>[9]</sup>:

$$N_{(E)} = \xi_{(E)} \frac{E - E_{in}}{2E_d} \quad (1)$$

公式(1)中  $\xi_{(E)}$  实质上是在级联碰撞中传递给原子运动能量的百分比,它的解析表达式是

$$\xi_{(E)} = \frac{1}{1 + 0.13(3.4\epsilon^{1/6} + 0.4\epsilon^{3(4+\epsilon)})} \quad (2)$$

式中  $\epsilon$  为约化能量,其表达式为

$$\epsilon = \frac{E}{2Z^2 e^2 / a} \quad (3)$$

(1)(2)(3)式中  $E$  是矿物晶体中初级位移原子的反冲动能。 $E_d$  是矿物晶格的位移阈能,根据地表层主要元素的分布比例可求得地表层矿物的平均原子量约为  $22 \times 1.66 \times 10^{-27}$  kg 比硅的原子量小,平均核电荷数约为 11,由此估计地表层矿物的平均位移阈能为  $E_d = 11$  eV。 $a$  是屏蔽半径。 $E_{in}$  是级联碰撞中非弹性碰撞损失的能量。

宇宙射线粒子与矿物晶格原子的碰撞属于相对论粒子的碰撞。晶格中初级位移原子的最大动能由下式决定

$$E_{R.m} = \frac{2E'(E' + 2mc^2)}{Mc^2} \quad (4)$$

式中  $E'$  是入射粒子的能量, $m$  是其质量,将宇宙射线主要成分  $\mu$  子的能量  $E' = 3 \times 10^9$  eV,其静质量对应的能量  $mc^2 = 105.66$  MeV。地表层矿物晶格点阵原子的平均质量  $M = 22 \times 1.66 \times 10^{-27}$  kg 代入(4)式,可求得初级反冲位移原子的最大动能为  $E_{R.m} = 940.22$  MeV。初级反冲位移原子对各种散射角反冲动能的平均值为<sup>[10,11]</sup>

$$E = \frac{1}{2} E_{R.m} = 470.11 \text{ MeV} \quad (5)$$

(3)式中屏蔽半径  $a = 0.885 3 a_0 2^{-1/2} z^{-1/3} = 0.885 3 \times 0.529 \times 2^{-1/2} \times 11^{-1/3} = 0.150 4 \text{ \AA}$ <sup>[9]</sup>。将此  $a$  值代入(3)式可求得  $\epsilon = 20 289$ ,再将  $\epsilon$  值代入(2)式得

$$\xi_{(E)} = \frac{1}{1 + 0.13(3.4 \times 5.225 + 0.4 \times 1.001 47)} \quad (6)$$

参照快中子射入金属靶时考虑晶体各向异性以及非弹性碰撞的影响引起的修正因素的取值方法<sup>[12]</sup>取

$$E - E_{in} = \frac{1}{3} E_{R.m} = 313.4 \text{ MeV} \quad (7)$$

将  $\xi_{(E)}$ 、 $E - E_{in}$  以及  $E_d$  的值代入(1)式可以求得每个  $\mu$  子入射时平均在地表矿物晶格中产生的位移原子数为

$$N = 0.3 \times \frac{313.4 \times 10^6}{2 \times 11} = 4.274 \times 10^6 \text{ (个)} \quad (8)$$

陨石分析等研究资料表明宇宙射线强度在  $10^9$  年范围内是稳定的<sup>[5]</sup>,这样自地球诞生以来宇宙射线中的  $\mu$  子在地球表层每平方米面积上的矿物晶格中产生的位移原子数可以达到

$$4.6 \times 10^9 \times 365 \times 24 \times 3 600 \times 10^4 \times 70\% \times 4.274 \times 10^6 = 4.34 \times 10^{27} \text{ (个/m}^2\text{)}$$

$$= 7.21 \times 10^3 (\text{mol/m}^2) = 158.61 (\text{kg/m}^2)$$

考虑到位移原子和空位成对出现,宇宙射线辐射中 $\mu$ 子造成的缺陷质量可以达到 $317.22 \text{ kg/m}^2$ 。土壤不是完全由非晶层物质组成的。如在我国分布面积 60 万平方公里的黄土中含碎屑矿物占 70% 左右(其中以长石和石英为主)粘土矿物占 20% ~ 30%。假定矿物中缺陷物质占 20% 左右就可以形成土壤。则宇宙射线中 $\mu$ 子的地质作用会在地球表层产生约 1 米厚的黄土层。我国黄土层的平均厚度约 20 ~ 30 米,这就意味着宇宙射线中 $\mu$ 子对土壤层形成的影响约为 1/20 ~ 1/30。 $\mu$ 子的强度只占到达地面的宇宙射线总强度的 70%,若全面考虑宇宙射线的地质作用,其影响比上面估算的肯定还要大。

### 3 与太阳能的比较

宇宙射线辐射到地球表面的功率仅相当于太阳辐射到地面功率的约 1 亿分之一。仅从能量角度来看,宇宙射线的地质作用似乎是微不足道的,但上述实验与理论计算表明它的地质作用却是不能忽视的,其根本原因在于宇宙射线能与太阳能发挥地质作用的方式不同。或者说能量的利用效率不同。下面列出各种射线对晶体的辐照效应<sup>[10]</sup>。

辐射类型	能量(eV)	电离效应	离位效应	蜕变效应
紫外光	$10 \sim 10^3$	有	无	无
X 射线	$10^3 \sim 10^5$	有	无	无
$\gamma$ 射线	$10^5 \sim 10^8$	有	少量	无
快中子	$10^4 \sim 10^7$	无	有	少量
带电核子	$10^4 \sim 10^9$	有	有	少量
带电离子	$10 \sim 10^4$	有	有	无
电子	$\geq 10^6$	有	有	无

离位效应是指晶格中产生位移原子的效应,蜕变效应是指产生核反应的效应。

太阳辐射能量的 93% 在红外线,可见光光子的能量范围内,其能量在 3.11 eV 以下,根本不可能有电离、离位、蜕变效应。太阳辐射能量的 7% 在紫外部分(包括 X 射线、 $\gamma$  射线),其中紫外线、X 射线没有离位效应, $\gamma$  射线占太阳辐射线紫外部分本身的比例很少,再加上  $\gamma$  射线本身离位效应微弱,因此,太阳发射的  $\gamma$  射线的离位效应是微乎其微的。太阳发射的高能粒子流仅占宇宙射线总强度的 0.1%,与宇宙射线相比可以忽略不计。总之可以说太阳向大地的发射能量对地球表层矿物晶格基本没有离位效应。而达到地面的宇宙射线的基本成分中,电子的能量在  $3.5 \times 10^7 \text{ eV}$  以上,重粒子的能量平均约在  $10^9 \text{ eV}$  数量级,都有明显的离位效应。占宇宙射线主要成分的  $\mu$  子,表中虽然没有列出,但从它的质量、电荷、自旋等性质来看,它的离位效应是介于电子和核子之间的粒子,可以肯定平均能量为  $3 \times 10^9 \text{ eV}$  的  $\mu$  子对晶格点阵原子有明显的离位效应。即从整体上看,宇宙射线的几乎所有成分都有离位效应。离位效应是辐照对固体的最主要的效应之一,宇宙射线有,而太阳辐照却没有,从物质作用的方式来看,宇宙射线对矿物晶格的作用是高能实物粒子对晶格的直接碰撞作用,而太阳能和地球外天体的万有引力能是场力对物质的作用。前者是高效率的直接的地质作用方式,后者是通过风化作用、剥蚀作用、搬运作用、成岩作用间接的,低效率的地质作用方式。前者好象有人使出 1 kW 的功率抡起大锤猛砸一堆岩石,后者好象是用 1 kW 的日光灯

去照射同样一堆岩石。在相同的时间内那一种方式对岩石的破坏效果显著是可想而知的,另外,宇宙射线的穿透能力是很强的,在地下相当于3 000 m水深处仍发现有宇宙射线粒子存在。这表明宇宙射线能够伸入地表深层对矿物晶格造成损失而发挥其地质作用,其主要作用范围分布在从地球表面到地下5米深这一矿物厚层内,这一方面的计算由参考文献[13]中有关公式很容易得出。从这个角度看宇宙射线好象对矿物晶体起着“伤其筋骨”的深层破坏作用,而太阳能和地球外天体的万有引力能对矿物晶体起着“伤其血肉”的浅层破坏作用。前者不易觉察,后者很直观,这大概是宇宙射线的地质作用长期被人们忽视的原因。

### 参考文献

- [1]徐道一,杨正宗,张勤文,孙亦因.天文地质学概论[M].北京:地质出版社,1983:199.
- [2]S. J英格利斯著,李致森等四人译.行星,恒星,星系[M].北京:科学出版社,1979:137.
- [3]Apollon 17 Preliminary Examination Team, Apollon 17 lunar samples: chemical and petrographic description [J], Science, 1973, 180(4112): 659~672.
- [4]Apollon Field Geology Investigation Team, Geologic exploration of Taurus-littow: Apollon 17 landing site [J], Science, 1973, 180(4113): 672~680.
- [5]中国科学院贵阳地球化学研究所.月质学研究进展[M].北京:科学出版社,1977.240(241):302.
- [6]G. Crozaz *et al.*, Solar particle track in glass from the surveyor spacecraft [J]. science, 1971, 171: 1237~1239.
- [7]R. L. Fleischr *et al.*, Very heavy solar cosmic rays: Energy spectrum and implication for lunar erosion [J], Science, 1991, 171: 1240~1242.
- [8]何景棠,毛裕芳,董晓黎等. CK(TI)晶体的辐照损伤研究[J].高能物理与核物理,1997,21(2):21~24.
- [9]王广后.粒子同固体相互作用物理学[M].北京:科学出版社,1991:20~27,870~875.
- [10]冯端等著.金属物理学[M].北京:科学出版社,1987:227,237,238.
- [11]By G. H. Kinchin and R. S. Pease, J. Nucl. Energy [J]. 1995, 1: 200.
- [12]吴风美,赖启基,张莉华. 12 MeV 电子辐照缺陷能级的研究[J].物理,1985,14(9):550~551.
- [13]S. Hayakawa. cosmic ray physics nuclear and astrophysical aspect [M]. n. y. john wiley socs, 1969:391~393.

## Study on the cosmic ray's damage to the mineral crystal lattice of the earth's surface and its geological effect

YANG Tong-suo<sup>1</sup>, QIANG Zhi-jun<sup>1</sup>, FANG Qiu-xia<sup>1</sup>, LU Bai-zuo<sup>1</sup>, MA Yao-feng<sup>2</sup>

(1. Department of Physics, Shaanxi Normal University, 710062, Xi'an; 2. College of Tourism and Environment Science, Shaanxi Normal University 710062 Xi'an, Shaanxi, PRC)

**Abstract:** In this paper, the damage to the mineral crystal lattice of the earth's surface caused by the cosmic ray is demonstrated experimentally and theoretically. The magnitude of the damage and that of the cosmic ray's effect on soil formation are calculated preliminarily. By comparing the geological effect pattern of the cosmic ray with those of the solar energy and the gravitations of other celestial bodies, a conclusion, that the damage in the geological study can not be neglected, is obtained.

**Keywords:** cosmic ray; damage of mineral; geological effect