

热释光年代方法在地热调查中的应用^{*}

全 亚 荣

(中山大学地球科学系, 广州 510275)

摘 要 采用改进的热释光 (TL) 年代方法对日本若干地热区的地表变质岩作 TL 年龄测定。结果表明, 大部分样品的天然 TL 强度, 在高地热活动区小于 100 mGy/g, 在中、低地热活动区为几十到几百 mGy/g, 在非地热活动区则在一大范围内变化: 样品含石英时大于 1 000 mGy/g, 含方石英时则很小; 与之相应的 TL 年龄分别为小于 100, 100~ 500 和大于 1 000 ka。总体上显示出地热活动性随变质年龄的增大而降低的负相关性。

关键词 古剂量, 年剂量, TL 强度, TL 年龄, 地热活动性

分类号 P 53

热释光 (thermoluminescence, 简称 TL) 年代方法最先是应用于考古学, 是利用古陶器、砖瓦等标本中的石英、长石等碎屑矿物的天然 TL 量作为烧制年龄的度量, 测定的年龄下限可近至数百年^[1]。其后, 应用逐渐扩展至地质学领域, 被用于测定有确定受热史或有明确计时起点的年轻地质样品的年龄, 测定年龄上限可达 1 Ma^[2]。这表明, 石英、长石等矿物具有良好的热释光特性, 可用于测定年轻的热源岩石如火山岩及变质岩的年龄。基于这一认识, 本文应用经改进的 TL 年代方法对日本九州若干地热区的热液变质岩进行了研究, 以探讨其在地热调查中应用的可能性。

1 实 验

1.1 样品采集与处理

样品的采集按通常的热释光断代样品的要求进行, 在距地表约 30 cm 处采集具有代表性的新鲜岩样。样重一般 100~ 500 g, 视其中石英的含量而定。采集的样品用黑色塑料袋和布袋包装好置阴凉处保存, 以达到避光和保持原始湿度的目的, 并且样品的加工处理需在暗室中进行。每样分成 2 份, 分别用于古剂量 (paleodose, 简称 PD) 和年剂量 (annual dose, 简称 AD) 的确定。

用于求 PD 的部分, 按以下流程处理: ① 加水粉碎, 以避免干粉碎时产生的摩擦热导致热释光的衰减; ② 样品为全粉碎过筛, 取粒径 0.074~ 0.177 mm (200~ 80 目) 的矿物颗粒, 用水冲洗掉粘土组分, 并用淘选法除去锆石、磷灰石等重矿物, 风干或 60℃ 以下烘干

^{*} 国家教委留学人员基金 (1994660) 资助项目

收稿日期: 1997-05-30 全亚荣, 男, 52 岁, 副教授

后,用磁铁、海力蒙分选器 (Halimond separator)、磁选机分选出石英矿物颗粒;③ 用 20% HF 浸泡 30 min 除去石英外表薄层,以使 α 剂量的影响可以忽略,然后用 6 mol/L HCl 在 60 $^{\circ}\text{C}$ 下浸泡 30 min 对样品作净化处理,洗净凉干后可制得纯净的石英试样.

用于求 AD 的部分,对于干样可直接粉碎,对于湿样则需称出湿重和干重作含水量校正. 样品为全粉碎过 20 目筛.

1.2 PD 的确定

求取古剂量 PD 有“附加法”和“再生法”2 种. 后者在对样品作人工辐照之前要先进行 400 $^{\circ}\text{C}$ 以上的退火处理可能会使样品的 TL 灵敏度发生变化,因而在应用时需进行检验. 实验发现有部分样品经退火后其 TL 灵敏度发生改变,故本实验采用“附加法”来确定 PD 的值. 所谓“附加法”就是给待测样品施加不同剂量 (通常是递增的等差剂量) 的人工辐照,然后通过测出其相应辐射剂量的热释光总量来求取 PD 值. 实验表明,附加人工辐照后的热释光会在低温段出现新的 TL 峰,严重时甚至会出现高温峰被低温峰所掩盖,以致难于辨认的情况 (图 1). 这种低温峰是不稳定的,在自然地质条件下早已衰退掉,因而样品的天然热释光通常表现为单一的高温峰的情况. 为了克服人工辐照产生的不稳定 TL 信号的影响,我们采用 130 $^{\circ}\text{C}$ 12 h 加热处理的方法予以除去^[3]. 由图 2 可以看出,经“热清洗”后,图 1 中低温部的信号已消失,高温峰清楚地显现出来,其形态与天然 TL 曲线的形态非常一致. 这样取同一温度下的峰高或同一温度区间内的积分作为样品接受不同辐照剂量后产生的热释光强度对辐照剂量作图,便可求得样品的 PD 值.

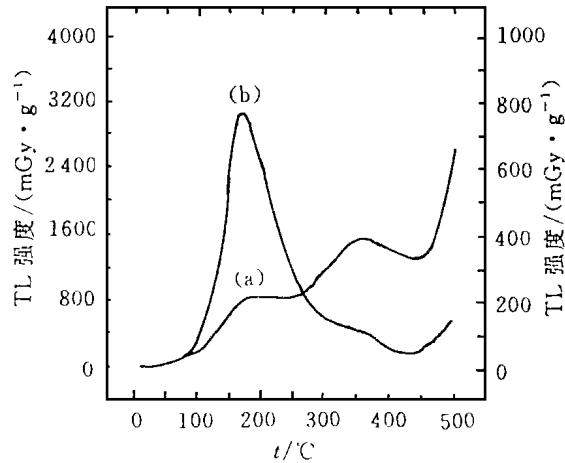


图 1 附加 γ 辐照后的石英 TL 曲线
a 附加 50 Gy (用右纵坐标);
b 附加 100 Gy (用左纵坐标)

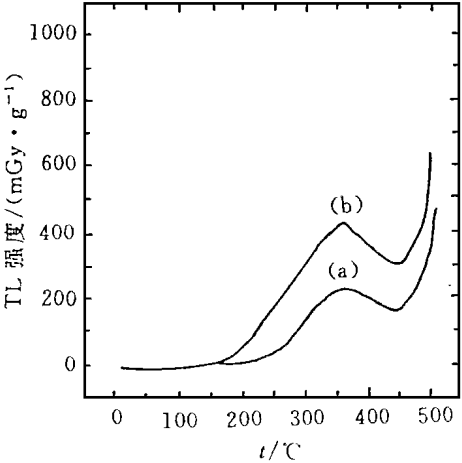


图 2 经“热清洗”后的附加 γ 辐照的石英 TL 曲线
a 天然 TL 曲线; b 附加 50 Gy 的 TL 曲线

1.3 AD 的确定

样品年剂量 AD 的求取有化学分析、 α 计数、 γ 能谱分析、埋置剂量片等方法. 本文采用比较待测样与标准样的放射强度的方法来确定. 对比的标准是日本地质调查所提供的天然岩石样品其放射性元素含量已经准确分析测定. 作放射性强度测量时,待测样与标准样交替进行,每样测 5 次,每次 30 min. 考虑到天然放射性衰变具有统计规律和计数器的灵敏

度随时间可能会有变化,放射性强度采用式 $I = (S - B) / B$ 确定.其中 I 是测样的放射性强度, S 是 5 次测量的平均值, B 为本底值. 所测得的 7 个标准样的放射性强度与由其放射性元素含量用有关年剂量换算系数^[4]求得的年剂量之间的关系绘于图 3. 很明显,两者之间有非常好的线性关系,依此可确定待测样品的年剂量. 该方法所测定的只是样品的放射性强度,如样品所在地发生放射性元素的迁移或氡的逸散,其放射性强度必定会不同,而由此来确定的年剂量也就随之变化,因而用这种方法确定的年剂量能反映出样品中的放射性元素含量对年剂量的实际贡献.至于宇宙射线的贡献考虑为 0.2 mGy/a.

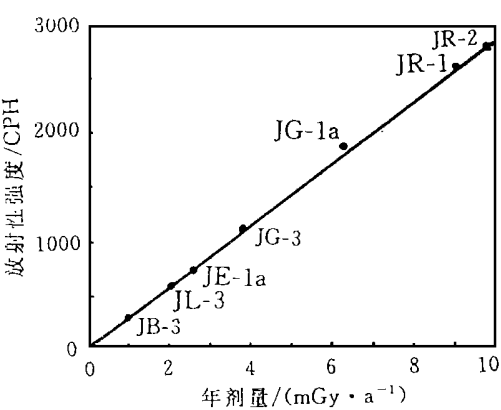


图 3 标准样品的年剂量与其相应的放射性强度

2 结果与讨论

应用上述实验方法,作者对日本九州丰肥地区的大岳、八丁原、岳汤、野矢、汤平、黑川和汤田等地的热液变质岩系统取样作 TL 年代测定. 其中,大岳—八丁原地热田是日本最活跃的地热田之一,沿大岳—八丁原变质带地表出露有许多喷气孔、泥火山、泥池和温泉,地下热储温度 220~280℃. 195 年在大岳打出日本第一口地热井,其后在大岳—八丁原相继打出多口地热井,并建成日本最大的地热电站 (110 MW). 以大岳—八丁原为中心,北西 15 km 的岳汤,北 20 km 的野矢,北东 10 km 的汤平,南 5 km 的黑川,南西 15 km 的汤田等地碱性或酸性变质带都有不同程度的地热活动显示.

2.1 TL 曲线

实验所得的 TL 曲线,按其形态可分为 5 个类型: a 宽峰型, b 尖峰型, c 双峰型, d 坪型, e 增长型 (图 4).

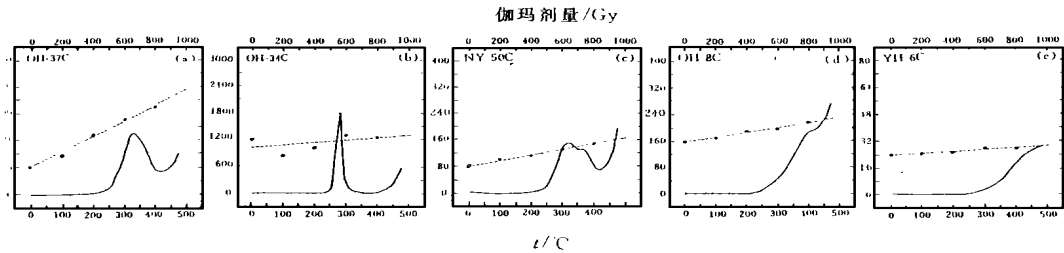


图 4 TL 曲线的类型

a 宽峰型, b 尖峰型, c 双峰型, d 坪型, e 增长型 (其中的虚线是 TL 生长曲线)

a 型曲线具明显的 TL 峰, 峰的两侧梯度不太大, 峰值温度随样品的不同会有所不同, 变化范围在 300~380℃ 之间.

b型曲线较为罕见，所测定样品中只有 2个属此类型，其 TL峰强而窄，形如一个强的电脉冲. 产生这种脉冲峰的原因尚不清楚，但这 2个样品都含有明矾石，强的尖峰异常可能与此有关. 实验发现，具此类 TL曲线的样品其人工诱发的热释光与辐照剂量常不成线性关系 (图 4b)，因而不能作 TL年龄测定.

c型曲线往往与样品中除石英外还含有其他硅矿物，如方石英、磷硅石等有关. 特点是在主峰的旁侧有一次峰的双峰型.

d型曲线没有明显的 TL峰出现，曲线随加热温度呈上升态势，在到达 400℃ 以上接近加热炉热辐射温度时，出现一平的阶步. 具此类曲线的样品常测得老的年龄值，反映出其热释光接近饱和状态，难以得出可靠的年龄值.

e型曲线较平滑，随加热温度的增大持续缓慢上升并直接过渡到达热辐射本底值. TL强度小于 20 mGy /g 以下，却往往测得老的年龄值. X射线衍射分析表明，出现此类型曲线的样品其硅矿物多为方石英，且含量较少. 具此类型曲线的样品也不宜作 TL年龄测定.

表 1 样品的 TL测年数据

样品编号	热释光强度 (mGy/g)	古剂量 (Gy)	年剂量 (mGy/a)	TL年龄 (ka)
OH-7	4± 2	1027± 71	1. 52± 0. 06	676± 54
OH-8	158± 5	2023± 94	1. 52± 0. 07	1331± 87
OH-10	483± 17	1800± 93	3. 80± 0. 15	474± 31
OH-13	108± 13	273± 4	3. 56± 0. 14	77± 3
OH-14	1295± 94	1062± 82	3. 70± 0. 17	287± 26
OH-30	1. 4± 0. 5	37± 9	4. 02± 0. 12	9± 2
OH-31	25± 3	571± 40	2. 18± 0. 11	260± 20
OH-32	16± 2	61± 3	3. 30± 0. 11	20± 1
OH-33	9. 2± 0. 9	339± 12	4. 72± 0. 16	72± 4
OH-35	1009± 70	359± 16	3. 33± 0. 15	110± 10
OH-36	621± 75	1329± 38	3. 52± 0. 12	380± 20
OH-37	195± 3	349± 25	3. 42± 0. 15	102± 9
OH-38	41± 2	993± 76	3. 16± 0. 14	310± 30
KK-1	290± 15	603± 49	3. 07± 0. 17	200± 20
KK-2	56± 11	1222± 56	2. 15± 0. 13	568± 43
KK-3	67± 12	430± 12	2. 67± 0. 12	180± 30
NY-1	6. 2± 0. 4	3143± 168	3. 47± 0. 25	906± 81
NY-4	35± 2	633± 25	1. 25± 0. 12	510± 50
NY-5	79± 2	931± 22	2. 75± 0. 11	340± 20
NY-6	840± 20	369± 36	3. 41± 0. 14	114± 12
NY-10	131± 15	529± 54	2. 32± 0. 11	230± 30
TE-1	3185± 223	1958± 63	1. 34± 0. 16	1461± 180
TE-2	77± 4	3143± 115	2. 97± 0. 15	1060± 390
TE-3	40± 1	1610± 117	0. 86± 0. 07	1872± 181
TE-4	79± 2	1905± 137	1. 01± 0. 06	1886± 176
TK-1	34± 2	163± 9	1. 56± 0. 07	104± 7
TK-4	302± 12	1131± 27	2. 92± 0. 14	387± 21
YD-1	1485± 13	2308± 132	1. 31± 0. 05	1762± 121
YD-2	98± 10	846± 62	4. 01± 0. 25	211± 20
YD-3	1635± 58	3610± 516	2. 82± 0. 12	1280± 60
YH-2	14± 2	371± 10	3. 67± 0. 14	101± 5
YH-5	47± 3	1527± 103	1. 64± 0. 04	931± 67
YH-6	16± 2	2271± 129	2. 94± 0. 23	772± 75

上述情况说明,测定样品的 TL 曲线并作分析归类,将有助于从众多样品中选出适合于作 TL 年龄测定之样品,其中具 a 型和 c 型曲线者应属选取之列。

2.2 TL 强度与 TL 年龄

为便于表述和比较,本研究采用以 ^{226}Ra 标准 γ 源标定来测定样品热释光强度的方法,即以接受了标准源辐照的剂量片其单位辐照剂量所产生的热释光量为基准来刻度仪器的读数,并以 mGy/g 作为量度的单位。其具体技术指标为: 剂量片 MSO-5D, $95.2\mu\text{g }^{226}\text{Ra}$ 标准源在 MSO-5D 孔的剂量率为 0.47 mGy/h ,误差为 3.5% 。这样就使得样品的热释光量的大小有了一个明确的衡量标准。表 1 就是以此来表示的各样品的 TL 强度及其年龄的测定结果。可以看出,样品的 TL 值在 $1.4\sim 3185\text{ mGy/g}$ 的大范围内变化,TL 年龄为 $9\sim 1886\text{ ka}$ 。对于采自高地热活动区的样品(大岳、八丁原),其 TL 值在 100 mGy/g 以下,变质年龄小于 100 ka (OH-13, OH-32, OH-3 等)。其中采自喷气孔附近的 OH-30,其 TL 值异常小,只有 1.4 mGy/g ,年龄为 9 Ka 。而采自地热活动性稍低或低的地热活动区(岳汤、野矢、汤平、黑川、大岳—八丁原南西)的样品,其 TL 值为几十到几百 mGy/g ,TL 年龄在 $100\sim 300\text{ ka}$ 之间,个别达到 500 ka 以上(TK、NY、YH、KK、OH-7、OH-10、OH-3 等),对于采自基本无或非地热活动区(汤田、津江)的样品,当其中的硅矿物为石英时,其 TL 值大于 1000 mGy/g (YD-1、YD-3、YE-1),为方石英时 TL 值则小于 100 mGy/g (TE-2、TE-3、TE-4),但年龄都在 1000 Ka 以上。这似乎反映出在相同辐照剂量下方石英的 TL 敏感度比石英要低,更容易接近饱和状态。

2.3 TL 年龄与地热活动性

为说明采样地的地热活动性,我们引入地热活动度指数 AI 的概念^[5],其定义为:

$$AI = 100 \times [(t_m - t_g) / (t_b - t_g)]$$

式中, t_m 是钻井测温记录到的最高温度, t_b 是相应深度水的沸腾温度, t_g 是由正常地温梯度 ($3^\circ\text{C}/100\text{ m}$) 算得的相应深度处的正常地温。

按地热活动度指数的大小可把地热活动性分为 5 个类型: $80\sim 100$ 的高活动型, $60\sim 80$ 的中活动型, $40\sim 60$ 的低活动型, $20\sim 40$ 的基本无活动型和 $0\sim 20$ 的非活动型。图 5 是各地热区的地热活动度指数与地表最年轻变质岩之间的关系图。可以看出,大岳—八丁原为高活动型,变质年龄小于 100 ka ,而岳汤、黑川、八丁原南西、汤平及野矢属中、低活动型,其年龄为 $100\sim 500\text{ ka}$,汤田和津江属基本无活动型或非活动型,其年龄大于 1000 ka ,显示出随着变质年龄的增大地热活动指数减小,即地热活动性降低的趋势。

3 结 语

(1) 采用 ^{226}Ra 标准源标定来测定样品热释光强度的方法,使热释光量的大小有明确的衡量基准,方便了样品热释光强度的相互比较。

(2) 提出了用待测样与放射性元素含量为已知的岩石标准样的放射性强度作比较来确定样品年剂量的新方法。其依据是,产地不同放射性元素含量各异的天然岩石样品的放射性强度与其年剂量之间存在着线性关系。方法的优点是简单易行,并且放射性元素的迁移或氡的逸散不影响样品年剂量的评价。

(3) 样品的天然 TL 曲线按其形态可分 5 个类型: a 宽峰型, b 尖峰型, c 双峰型, d 坪型, e 增长型。a 型是最典型和最具代表性的一种,大部分样品其 TL 曲线属此类型,适合

于作 TL 年龄测定. 其次是 c 型. b 型属罕见, 具此类型曲线的样品一般不能作 TL 年龄测定. d, e 型无 TL 峰出现, 一般也不宜采用. 因此, 在具体实施 TL 年龄测定实验之前先测出样品的 TL 曲线, 分析曲线的类型能帮助我们判断样品是否适合于做 TL 年龄测定作出抉择.

(4) 根据测定的结果, 可将样品的天然 TL 强度分为 3 个档次: < 100 , $100 \sim 1\,000$ 和 $> 1\,000$ mGy/g, 它们分别与高地热活动区、中低地热活动区以及基本无或非地热活动区相对应. 说明在该地区根据地表变质岩的天然热释光强度可粗略地对地下热状况作快速的评价, 这特别适合于要对大批量样品处理的场合.

(5) 首次测定的九州丰肥若干地热区的变质年龄, 除 OH-30 号样的误差为 22% 外, 其余皆在 15% 以内, 与在此前做过的已知年龄样品的对比测定误差 15% 相一致 (溶结凝灰岩 K-Ar 年龄 0.99

Ma, TL 年龄 0.85 Ma), 说明 TL 年代方法用于测

定第四纪变质岩的年龄是可行的. 但本次测定结果中有多个样品的年龄值超过 1 Ma, 超出了公认的 TL 年龄的适用范围 (< 1 Ma). 虽然已有 TL 年龄超过 1 Ma 达 1.8 Ma 的报道^[6], 但其可靠性仍需进一步用已知年龄的标准样品作对比测定进行检验的. 由于尚未做过这种检验, 所以本文中出现的超过 1 000 ka 的年龄并不一定代表样品的真实年龄, 只可看作一种大致年龄. 从测定的结果中可以看出, 在高地热活动区变质年龄小于 100 ka, 在中低地热活动区变质年龄在 100~500 ka 之间, 而基本无或非地热活动区其变质年龄在 1 000 ka 以上. 这反映出变质年龄与地热活动性之间存在着相关性, 即老的变质年龄预示着低的地热活动性. 因此, TL 年龄的测定为地热资源的调查评价是在利用 TL 强度作大致推断的基础上提供了又一个较可靠的判据.

致谢 研究得到日本九州产业大学林正雄教授的大力帮助和指导, 在此谨表衷心的感谢, 同时也对九州大学的岡井富雄博士和松本清先生帮助完成样品的 ^{90}Sr 辐照表示感谢.

参 考 文 献

- 王维达, 周智新. “非剂量”热释光断代. 核技术, 1988, 11 (11): 25~26
- 高岛勋, 本多朔郎. 福島県会津田島地域の火砕流堆積物の K-Ar 年代と TL 年代の比較. 地质学杂志, 1989, 95 (11): 812~813
- 全亚荣. 天然石英的热释光特性. 中山大学学报 (自然科学版), 1996, 35 (增刊): 154~155
- Aitken M J. Thermoluminescence Dating. London: Academic Press, 1985, 66~69
- 林正雄. 深部高温地热貯留層探査のターゲット. 日本地热学会志, 1982, 4 (2): 81~90
- 高岛勋, 本多朔郎. 熱ルミネッセンス年代測定による八幡平玉川一 小和瀬地域の地热活動史の解明. 岩石矿物矿床学会志, 1986, 81: 458~465

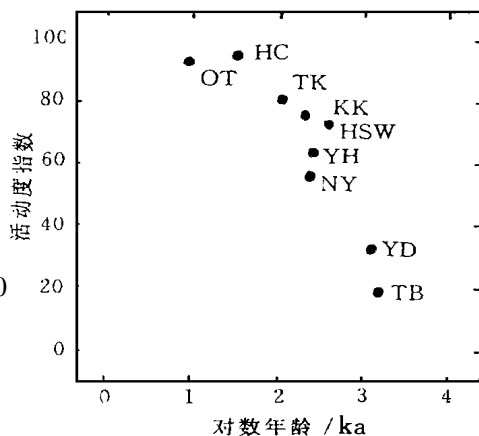


图 5 地热活动度指数与相应的变质年龄

OT HC TK KK HSW YH NY YD TE
依次表示: 大岳、八丁原、岳汤、黑川、
八丁原南西、汤平、野矢、汤田、津江

A Applied Study of TL Dating Method to Geothermal Survey

Quan Yarong^{*}

Abstract A improved TL dating method has been applied to sureface alteration rocks from some geothermal fields in the Hohi area, Kyushu, Japan. In the result, natural TL intensity of most samples is smaller than 100 mGy/g in very active geothermal field, $n \times 10$ to $n \times 100$ mGy/g in less active fields, and it ranges widely that altered rocks containing quartz have TL larger than 1 000 mGy/g while those containing cristoblite have small in non-active fields. The relevant TL age is smaller than 100 ka, 100 to 500 ka, larger than 1 000 ka respectively, and on the whole they demonstrate negative interrelationship that geothermal activity becomes smaller as the alteration age becomes larger.

Keywords paleodose, annual dose, TL intensity, TL age, geothermal activity

^{*} Department of Geoscience, Zhongshan University, Guangzhou 510275