

岩石表层释光暴露年龄及侵蚀速率的相关参数影响分析

罗 明^{1,2,3} 龚志军¹ 郭福生¹ 彭花明¹

1(东华理工大学 地球科学学院 南昌 330013)

2(东华理工大学 江西省数字国土重点实验室 南昌 330013)

3(中国地震局地质研究所 地震动力学国家重点实验室 北京 100029)

摘要 近十年,岩石表层释光测年方法自提出以来发展迅速,表现出广泛的应用前景和潜力,但该方法相关的参数对暴露年龄和侵蚀速率结果的影响却鲜有研究。本文通过模拟光衰减系数 μ 、晒退速率 $\overline{\sigma\phi_0}$ 、环境剂量率 \dot{D} 及特征饱和剂量 D_0 这些相关参数与半饱和深度(量化释光信号晒退深度的指标)之间的关系,分析研究了上述参数对暴露年龄和侵蚀速率的影响,以及在不同参数 μ 、 $\overline{\sigma\phi_0}$ 、 \dot{D} 及 D_0 下获得暴露年龄和侵蚀速率的极限。结果表明 μ 和 $\overline{\sigma\phi_0}$ 对释光信号晒退和侵蚀速率的影响非常显著,当增加相同的暴露时间或侵蚀速率时, μ 值越小,对应半饱和深度变化的速率更大,而不同 $\overline{\sigma\phi_0}$ 值对应半饱和深度变化的速率相同。浅色透光性(μ 值较小)岩石是较为理想的定年材料,野外作业中应优先采集。一般情况下,环境剂量率 \dot{D} 和特征饱和剂量 D_0 的大小对暴露年龄和侵蚀速率的值基本不产生影响,故在实际应用中可忽略岩石表面和内部的 \dot{D} 值差异。该方法测年范围为 10^{-3} ~ 10^2 ka,获得侵蚀速率范围为 10^{-2} ~ 10^3 mm·ka⁻¹。

关键词 岩石表层, 释光测年, 侵蚀速率, 光衰减参数, 数值模拟

中图分类号 TL84

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.010002

Effect of related parameters on exposure age and erosion rate obtained via rock surface luminescence dating

LUO Ming^{1,2,3} GONG Zhijun¹ GUO Fusheng¹ PENG Huaming¹

1(School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

2(Key Laboratory for Digital Land and Resources of Jiangxi Province, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

3(State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

Abstract [Background] Rock surface luminescence dating has developed rapidly in the past decade. It has been widely used to obtain exposure ages and erosion rates of various rocks in archaeology, geology, and geography, such as stone artifacts, glacier bedrock, gravel, and bedrock fault surfaces. However, there is little study on the effect of parameters related to this method, such as attenuation coefficient μ , decay rate of the trapped charge at the rock

国家自然科学基金(No.42202247)、东华理工大学江西省数字国土重点实验室开放研究基金项目(No.DLLJ202209)和地震动力学国家重点实验室项目(No.LED2022B07)资助

第一作者: 罗明, 男, 1989年出生, 2019年于中国地震局地质研究所获博士学位, 研究领域为活动构造与释光年代学

通信作者: 龚志军, E-mail: 13697082584@163.com

收稿日期: 2023-08-21, 修回日期: 2023-11-06

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.42202247), Key Laboratory for Digital Land and Resources of Jiangxi Province, East China University of Technology (No.DLLJ202209) and State Key Laboratory of Earthquake Dynamics (No.LED2022B07)

First author: LUO Ming, male, born in 1989, graduated from Institute of Geology, China Earthquake Administration with a doctoral degree in 2019, focusing on active tectonics and luminescence chronology

Corresponding author: GONG Zhijun, E-mail: 13697082584@163.com

Received date: 2023-08-21, revised date: 2023-11-06

surface $\overline{\sigma\phi_0}$, environmental dose rate \dot{D} , and characteristic saturation dose D_0 on exposure age and erosion rate results.

[Purpose] This study aims to quantitatively investigate the impact of relevant parameters on exposure age and erosion rate, and examine the limits of exposure age and erosion rate obtained by the method under different parameters. **[Methods]** First, parameters that might have an impact on age and erosion rate results were determined through theoretical analyses. Then, the relationship among the parameters, depth of half saturation and exposure age (erosion rate) were studied using numerical simulations. The impact of each relevant parameter on exposure age and erosion rate was observed for varied parameter values. Finally, the dating limit was determined from the inflection point in the simulated profiles. **[Results]** The smaller μ value is, the greater the rate of change in the depth of half saturation would be when increasing the same exposure time. However, the rate of change in the depth of half saturation remains constant for different $\overline{\sigma\phi_0}$ values when the same erosion rate is increased. **[Conclusions]** Among the parameters, $\overline{\sigma\phi_0}$ and, more remarkably, μ significantly affect the dating result. In general, \dot{D} and D_0 have little effect on the exposure age and erosion rate; therefore, the differences in \dot{D} between the surface and interior of rocks may be ignored. The growth rate of depth of half saturation of granite gneiss is significantly higher than that of sandstone for the same exposure time increment. Therefore, light-colored rocks such as granite should be prioritized for collection during field work. The ranges of dating and obtaining erosion rate using this method are $10^{-3}\sim 10^2$ ka and $10^{-2}\sim 10^3$ mm \cdot ka $^{-1}$, respectively.

Key words Rock surface, Luminescence dating, Erosion rate, Light attenuation parameter, Numerical simulation

近十年来,新兴和快速发展的岩石表层释光测年方法为获取 $10^1\sim 10^4$ 年时间尺度上的暴露年龄和侵蚀速率提供了一种新的方法和思路^[1-2]。该方法具有前处理过程简单、测试耗时短、有潜力揭示岩石曾经的暴露和埋藏历史等优点,并已在全世界吸引了广泛的研究兴趣,它正逐渐成为释光测年乃至第四纪地质研究的一个热点。不同学者尝试利用该方法获取基岩壁画的创作时间^[1,3]、岩石复杂的曝光和埋藏历史^[4]、河流、海滩砾石以及冲洪积砾石的晒退情况和年龄^[5-13]、考古点石块年龄^[14-16]、太阳辐射量的变化^[17]、岩石的侵蚀速率^[2,18-21]以及基岩断层的活动历史^[22]等。

与释光信号积累和晒退有关的若干参数对于测年和获取侵蚀速率影响至关重要,但这些参数往往不一定能测量准确。例如:岩石中矿物分布不均匀时,岩片的环境剂量率 \dot{D} 也就随之不同;释光信号-深度曲线拟合获取光衰减系数 μ 和晒退速率 $\overline{\sigma\phi_0}$ 时,有较大的不确定性和误差等。这些参数不准确或不精确时,将会对测年和侵蚀速率结果造成多大的影响? 故需定量研究这些参数对于释光信号-深度曲线的影响程度。Sohbati 等^[23]考虑改变光的波长、特征饱和剂量、光的衰减系数对于释光信号晒退深度的影响,然而其没有考虑环境剂量率、晒退速率变化的影响,而且其模拟的数据点间隔过大,导致半饱和和深度(指释光信号晒退至饱和值的 50% 时的深度;用来量化释光信号晒退深度的指标)与暴露年龄的指数呈线性区和饱和区之间没有显示本应有的圆弧过渡区。此外,目前还未有研究系统考虑相关参数

μ 、 $\overline{\sigma\phi_0}$ 、 \dot{D} 及特征饱和剂量 D_0 对通过该方法获取侵蚀速率的影响程度。

本文拟通过理论公式总结可能影响利用该方法获取暴露年龄和侵蚀速率的参数: μ 、 $\overline{\sigma\phi_0}$ 、 \dot{D} 及 D_0 , 通过模拟不同参数下半饱和深度与暴露年龄和侵蚀速率之间的关系,从而研究相关参数 μ 、 $\overline{\sigma\phi_0}$ 、 \dot{D} 及 D_0 对暴露年龄和侵蚀速率的影响,并获得不同参数下该方法获取暴露年龄和侵蚀速率的极限,以及模拟研究典型岩石类型砂岩和花岗片麻岩的光晒退情形。

1 获取暴露年龄和侵蚀速率的基本原理和公式

本文主要聚焦岩石表层释光测年获取暴露年龄和侵蚀速率,岩石的暴露年龄是指原本长期埋藏的岩石由于地质、生物或人为等事件后暴露地表,从而暴露在日光下的时间;侵蚀速率是指在单位时间内岩石表面受物理、化学和生物风化作用下的剥蚀量^[2]。下面从理论公式方面探讨有哪些参数可能影响由岩石表层释光测年方法获得的暴露年龄和侵蚀速率。

当受到光照时,岩石表面晶体的晶格缺陷中的陷获电子一方面受到光晒退的影响而逃逸减少,另一方面受到环境电离辐射而捕获增加。假设电子捕获和逃逸遵循一级动力学,则在距离岩石表面的深度 x (mm) 处陷获电子浓度 n (mm $^{-3}$) 的瞬时变化率为^[2,23]:

$$\frac{dn}{dt} = (N - n)F(x) - nE(x) \quad (1)$$

式中： $t(\text{ka})$ 为时间； $N(\text{mm}^{-3})$ 为电子陷阱浓度； $F(x)$ (ka^{-1})和 $E(x)$ (ka^{-1})分别是电子被俘获和逃逸的速率。

日光穿透岩石时，受到岩石矿物的屏蔽影响，入射光强度会随穿透深度而衰减，假设陷获电子的逃逸速率 $E(x)$ (ka^{-1})随深度 x (mm)的关系遵循 Lambert-Beers 定律^[5,24]：

$$E(x) = \overline{\sigma\phi_0} e^{-\mu x} \quad (2)$$

式中： $\overline{\sigma\phi_0}$ (ka^{-1})是岩石表面陷获电子的晒退速率； μ (mm^{-1})是光随着深度的衰减系数。

电子俘获速率系数 $F(x)$ 可表示为：

$$F(x) = \frac{\dot{D}(x)}{D_0} \quad (3)$$

式中： $\dot{D}(\text{Gy} \cdot \text{ka}^{-1})$ 为环境剂量率； $D_0(\text{Gy})$ 为填充陷阱的约 63% (即 $1 - e^{-1}$) 的特征饱和剂量^[25]。在岩石表面和内部的 \dot{D} 可能有所差异，但对于暴露测年来说，因为在岩石表面附近时， $E(x)$ 比 $F(x)$ 大了数个数量级，因此可以忽略。从而在曝光过程中的剂量率可以近似认为与深度无关，即 $F = \dot{D}/D_0 = \text{常数}$ ^[2]。

当之前埋藏的岩石首次暴露在太阳光下，以及初始陷获电子浓度近似等于电子陷阱浓度时，将式(1)进行积分，从而获得陷获电子浓度 $n(\text{mm}^{-3})$ 除以电子陷阱浓度 $N(\text{mm}^{-3})$ 的比值与 $t(\text{ka})$ 、 $x(\text{mm})$ 、 $E(x)(\text{ka}^{-1})$ 及 $F(\text{ka}^{-1})$ 的关系^[2]为：

$$\frac{n(x,t)}{N} = \frac{E(x)e^{-t[E(x)+F]} + F}{E(x) + F} \quad (4)$$

式(4)中，岩石表面侵蚀速率为0。根据式(4)可以模拟经历不同暴露时间后的岩石残余释光信号与深度之间的关系曲线(图1(a))；参数值来自于 Luo 等^[22]里狼山基岩样品，即 $\mu = 1.1 \text{ mm}^{-1}$ ， $\overline{\sigma\phi_0} = 2\,630.9 \text{ ka}^{-1}$ ， $\dot{D} = 3.3 \text{ Gy} \cdot \text{ka}^{-1}$ ， $D_0 = 506.0 \text{ Gy}$ ，下同)。

假如岩石表面侵蚀速率为 $\varepsilon(\text{mm} \cdot \text{ka}^{-1})$ ，释光信号来源深度 x 与时间 t 的关系如下：

$$\frac{dx}{dt} = -\varepsilon \quad (5)$$

将式(5)进行积分，获得时间为 t 时释光信号距岩石表面的深度：

$$x(t) = x_0 - \varepsilon t \quad (6)$$

式中： x_0 是基准面深度。将式(6)代入式(2)，然后代入式(1)，并进行积分，假设侵蚀达到稳态(累积侵蚀量足够大，以致释光信号的晒退深度不再随着时间而变化，即 $x_0 = \infty$)时，离岩石表面深为 $x(\text{mm})$ 处的残余释光信号与侵蚀速率的关系^[2]为：

$$\frac{n(x,\varepsilon)}{N} = M \left(1 + \frac{F}{\mu\varepsilon}, -\frac{E(x)}{\mu\varepsilon} \right) \quad (7)$$

根据式(7)可以模拟不同侵蚀速率下的释光信号-深度曲线(图1(b))。

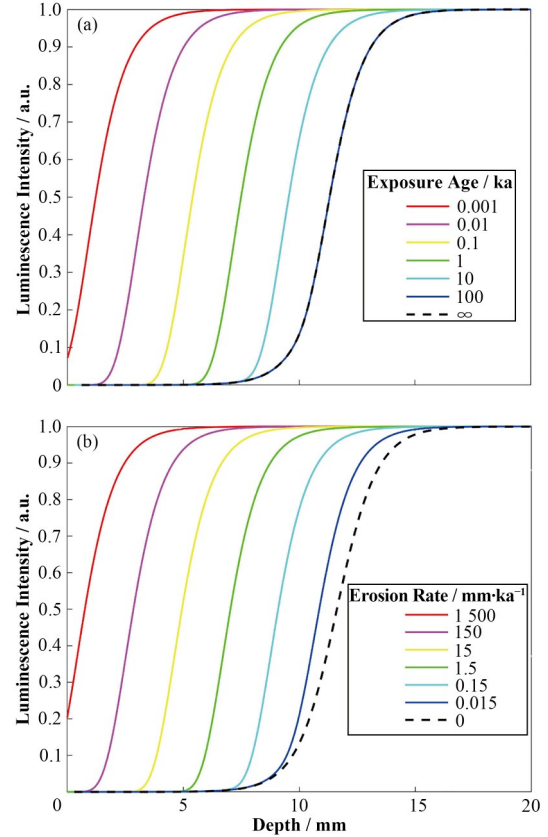


图1 分别采用式(4)、(7)推算的零侵蚀下岩石表面不同暴露年龄(a)、不同侵蚀速率(b)下的残余释光信号-深度曲线
Fig.1 Simulated the residual luminescence-depth profiles as predicted using Eqs.(4) and (7) for rock surfaces having different exposure ages (a) and erosion rates (b), respectively

岩石埋藏于地下足够长时间(通常 $>0.5 \text{ Ma}$)，其矿物晶体积累的潜在释光信号饱和。当岩石经历构造抬升、流水冲蚀、滑坡、人为改造等原因开始暴露于地表后，太阳光会将表面的释光信号晒退，而随着光强度随着深度减弱，岩石内部的残余释光信号会较多，这样释光信号随深度之间关系呈现“S”形曲线(图1(a))。不仅如此，暴露时间(1 a、10 a、100 a、1 000 a等)越长，其释光信号-深度曲线晒退得越深，但暴露时间超过100 ka(对于图1设定参数)后，释光信号-深度曲线基本不再改变，即达到测年极限(图1(a))。在实际定年应用中，在测量岩石不同深度的岩片残余释光信号后，可获得释光信号-深度之间的关系曲线，晒退速率 $\overline{\sigma\phi_0}$ 往往根据同一区域同种岩性的已知暴露年龄样品的释光信号-深度曲线拟合求得具体值^[1,4,22]，然后将其代入到未知暴露年龄样品的释光信号-深度曲线中拟合以求暴露年龄，因此，晒退速率 $\overline{\sigma\phi_0}$ 是获取暴露年龄的前提条件。但 $\overline{\sigma\phi_0}$ 值对暴露年龄会造成多大影响，假如找不到已知

年龄样,可否假设其为某一值或某一范围,后文会对此进行研究。

图1(b)表明,岩石在暴露地表一段时间达到稳态侵蚀(释光信号的晒退深度不再随着时间而变化)后,当岩石表面的侵蚀速率越小,其释光信号-深度曲线晒退得越深。在实际获得侵蚀速率应用中,一种做法是认为新暴露(例如3 a)的岩石表面还未被侵蚀,采用式(4)拟合其释光信号-深度曲线获得该地区同种岩性岩石的晒退速率 $\overline{\sigma\phi_0}$,然后将其代入未知侵蚀速率样品的释光信号-深度曲线,采用式(7)拟合获得其侵蚀速率^[2];另一种做法是采用宇宙成因核素测年方法获得岩石暴露年龄,然后结合释光信号-深度曲线,用软件编程的方式获得侵蚀速率的分布范围^[19]。 $\overline{\sigma\phi_0}$ 值对侵蚀速率会造成多大影响,后文会对此进行研究。

2 参数对暴露时间及极限的影响

2.1 各参数的影响和定年极限

由式(3)可知,参数 μ 、 $\overline{\sigma\phi_0}$ 、 \dot{D} 、 D_0 的大小应该对释光信号晒退都有或多或少的影 响。为研究上述参数对释光信号晒退的影响,本文拟改变其中一参数值,其他参数值不变,采用式(3)进行模拟获取释光信号-深度曲线和半饱和深度(图2)。

图2(a)显示了不同的光衰减系数 μ 的岩石经历不同暴露时间后半饱和和深度的分布,可观察到释光信号晒退对于 μ 值非常敏感,即在相同的暴露时间下,改变 μ 值,半饱和和深度会发生显著变化。例如,当暴露1 ka时,光衰减系数 μ 为 0.5 mm^{-1} (代表相对较透明的岩石表面)的半饱和和深度约是 μ 为 1.0 mm^{-1} (代表相对不透明岩石表面)的两倍(图2(a))。不仅如此,无论 μ 值为多少,半饱和和深度初始随着暴露时间而增加,且与暴露时间的指数呈线性关系。此外,当增加相同的暴露时间时,较小的 μ 值对应的半饱和和深度增加的速率(即半饱和和深度-暴露时间曲线的斜率)更大。然而,当暴露时间超过一定值(例如图2(a)的星号)时,半饱和和深度不再随暴露年龄的指数而线性增加,而是增加的速率迅速变小(即半饱和和深度-暴露时间曲线的斜率变缓),直至半饱和和深度不再随着时间改变而变化。在半饱和和深度确定(通过样品的释光信号-深度曲线可获得)时,不同的 μ 值对应的暴露年龄差距悬殊,例如:当半饱和和深度为6 mm、 μ 值为 0.50 mm^{-1} 和 1.25 mm^{-1} 时对应的暴露年龄分别约为0.01 ka和1.0 ka,两者暴露年龄相差约100倍(图2(a))。这说明 μ 值对于暴露年龄的影响巨大,在测量和拟合光释光信号-深度曲线时需尤其

注意。本文将半饱和和深度最大值的95%处^[26](图2中星号位置)对应的暴露时间认为是岩石表层释光暴露测年的极限(下同),当暴露时间超过测年极限时,半饱和和深度增加较缓慢,此时对应的时间分辨率较低(图2)。通过模拟可得,当 μ 值为 0.5 mm^{-1} ,测年极限为125.9 ka;而 μ 值为 $0.75\sim 2.0 \text{ mm}^{-1}$ 时,测年极限为158.5 ka(图2(a))。

图2(b)显示了不同 $\overline{\sigma\phi_0}$ 值的岩石经历不同暴露时间后半饱和和深度的分布。在相同的暴露时间下,不同的 $\overline{\sigma\phi_0}$ 值对应不同的半饱和和深度。例如,当暴露1 ka时, $\overline{\sigma\phi_0}$ 值为 $6\ 400 \text{ ka}^{-1}$ 的半饱和和深度约是 $\overline{\sigma\phi_0}$ 值为 200 ka^{-1} 的两倍(图2(b))。对于某一 $\overline{\sigma\phi_0}$ 值,半饱和和深度初始与暴露时间的指数呈线性正关系,且当增加相同的暴露时间时,不同 $\overline{\sigma\phi_0}$ 值对应的半饱和和深度增加的速率(即半饱和和深度-暴露时间曲线的斜率)相同。然而,当暴露时间超过一定值(图2(b)的星号)时,半饱和和深度增加的速率迅速变小,直至基本不变(图2(b))。在半饱和和深度确定时,不同的 $\overline{\sigma\phi_0}$ 值对应的暴露年龄相差较大,例如,当半饱和和深度为4 mm, $\overline{\sigma\phi_0}$ 值为 $1\ 600 \text{ ka}^{-1}$ 和 200 ka^{-1} 时对应的暴露年龄分别约为0.1 ka和1.0 ka,两者暴露年龄相差约10倍(图2(b))。这说明 $\overline{\sigma\phi_0}$ 值对于暴露年龄的影响较大,不宜通过假设某一值或某一范围去计算暴露年龄。当 $\overline{\sigma\phi_0}$ 值为 $200\sim 800 \text{ ka}^{-1}$ 时,对应模拟的测年极限为199.5 ka; $\overline{\sigma\phi_0}$ 值为 $1\ 600\sim 6\ 400 \text{ ka}^{-1}$ 时,测年极限为158.5 ka; $\overline{\sigma\phi_0}$ 值为 $25\ 600 \text{ ka}^{-1}$ 时,测年极限为125.9 ka(图2(b))。

图2(c)显示了不同的环境剂量率 \dot{D} 的岩石经历不同暴露时间后半饱和和深度的分布,模拟包括了自然界中存在的大多数环境剂量率范围($1\sim 7 \text{ Gy}\cdot\text{ka}^{-1}$)。当暴露时间小于100 ka时,不同剂量率下的半饱和和深度与暴露时间关系曲线都是重合的,即无论剂量率如何变化,都不影响半饱和和深度或暴露年龄,这说明岩石表层释光暴露测年对环境剂量率 \dot{D} 值的敏感度较低。最初半饱和和深度随着暴露时间的指数增加而线性增加。当暴露时间超过一定值(图2(c)的星号)时,半饱和和深度增加的速率迅速变小,直至达到最大值(图2(c))。剂量率小($2 \text{ Gy}\cdot\text{ka}^{-1}$)的模型样品与剂量率大($7 \text{ Gy}\cdot\text{ka}^{-1}$)的所能达到最大半饱和和深度相差约1.5 mm。当 \dot{D} 值分别为 $1 \text{ Gy}\cdot\text{ka}^{-1}$ 、 $2 \text{ Gy}\cdot\text{ka}^{-1}$ 、 $3 \text{ Gy}\cdot\text{ka}^{-1}$ 、 $4 \text{ Gy}\cdot\text{ka}^{-1}$ 、 $5 \text{ Gy}\cdot\text{ka}^{-1}$ 、 $6 \text{ Gy}\cdot\text{ka}^{-1}$ 、 $7 \text{ Gy}\cdot\text{ka}^{-1}$ 时,测年极限分别为501.2 ka、251.2 ka、199.5 ka、125.9 ka、100.0 ka、100.0 ka、79.4 ka(图2(c))。

图2(d)显示了岩石在不同特征饱和剂量 D_0 条件下,经历不同暴露时间后半饱和和深度的分布。当

暴露年龄小于约 30 ka 时,不同特征饱和和剂量下的半饱和深度与暴露时间关系曲线基本重合,说明此时岩石表层释光暴露测年对特征饱和和剂量的敏感度较低。当暴露时间超过一定值(图 2(d)的星号)时,半饱和深度增加的速率迅速变小,直至基本不变(图 2

(d))。当 D_0 值分别为 100 Gy、500 Gy、900 Gy、1 300 Gy、1 700 Gy、2 100 Gy、2 500 Gy 时,测年极限分别为 39.8 ka、158.5 ka、251.2 ka、398.1 ka、501.2 ka、631.0 ka、794.3 ka(图 2(d))。

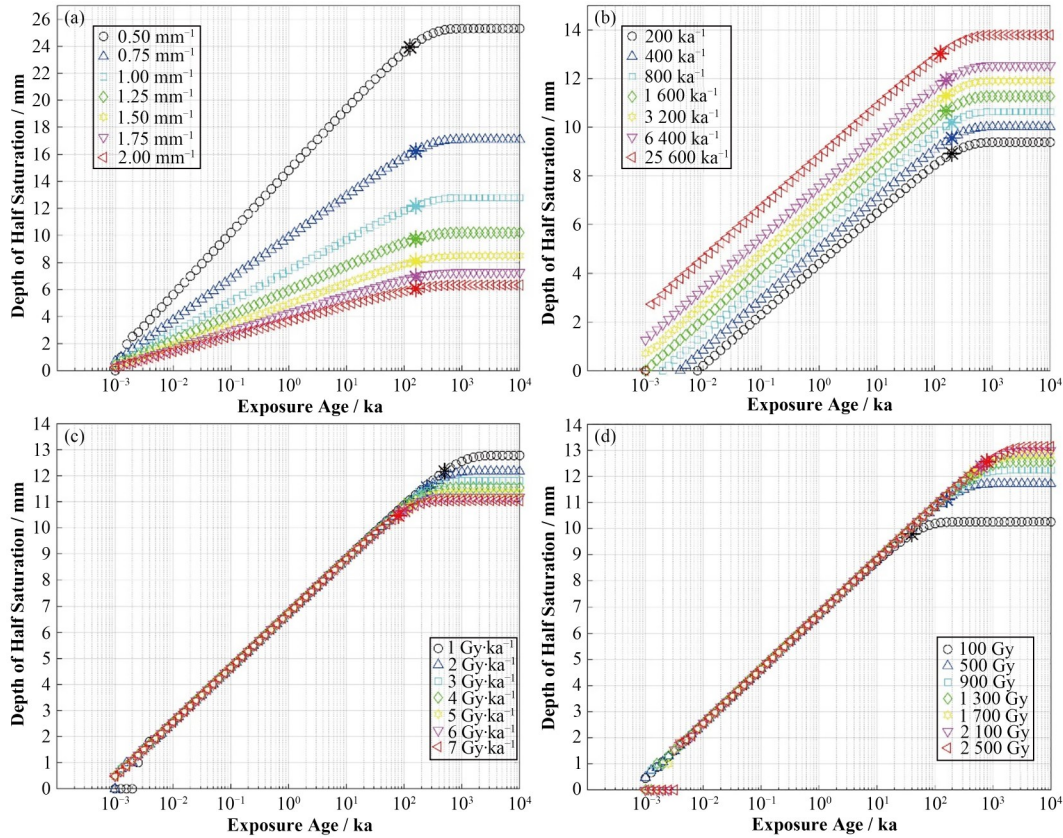


图 2 不同参数下释光信号-深度曲线的半饱和深度(释光信号晒退至饱和值的 50% 时的深度)与暴露时间关系只改变下面某一参数值,其他参数保持不变:(a) μ 值, (b) $\overline{\sigma\phi_0}$ 值, (c) \dot{D} 值, (d) D_0 值

Fig.2 Relationship between the depth of half saturation (the depth at which the luminescence signal is 50% of the saturation level) and exposure time under different parameter values. Only one of the following parameters were varied while keeping the other parameters unchanged: (a) μ , (b) $\overline{\sigma\phi_0}$, (c) \dot{D} , (d) D_0 .

2.2 典型类型岩石的光晒退特征

由 §2.1 可知,参数 μ 和 $\overline{\sigma\phi_0}$ 对释光信号晒退影响较大,而 \dot{D} 和 D_0 的数值大小对释光信号晒退一般不会产生太大影响。本文整理了近年来报道的岩石表层释光测年的相关参数: μ 、 $\overline{\sigma\phi_0}$ 、 \dot{D} 、 D_0 (表 1)。

由表 1 可知,前人研究中常见的岩石类型大致可以分成颜色相对较深的砂岩和颜色相对较浅的花岗岩或片麻岩,它们的光衰减系数 μ 值往往不同。一般而言,颜色相对较深的砂岩透光性较差, μ 值相对较大;而颜色相对较浅的花岗岩或片麻岩透光性较好, μ 值相对较小(表 1),这可能是由于岩石岩性或矿物组成的差异导致的颜色差异,进而控制了光在穿透岩石表面过程中损失了不同特定波长的组分。表 1 中各样品的晒退速率 $\overline{\sigma\phi_0}$ 相差较大,且未见

明显规律,原因可能是 $\overline{\sigma\phi_0}$ 不仅与矿物和电子陷阱有关,而且与采样纬度、云量和高度等多种因素有关^[17,30-31]。

本文选择两种比较典型的岩石,即透光性较差的砂岩(μ : 2.43 mm⁻¹; $\overline{\sigma\phi_0}$: 1 100 ka⁻¹)和透光性较好的花岗片麻岩(μ : 0.59 mm⁻¹; $\overline{\sigma\phi_0}$: 2 165 ka⁻¹; \dot{D} : 5.45 Gy·ka⁻¹; D_0 : 238 Gy)作为常见的岩石释光研究对象进行模拟。由 §2.1 可知,参数 \dot{D} 和 D_0 对释光信号晒退几乎没有影响,且由于原文中没有给出砂岩的 \dot{D} 和 D_0 值,故模拟时假设该值与花岗片麻岩相同。应用这些参数结合式(3)进行模拟,从而获得释光信号-深度曲线和半饱和深度(图 3)。经历相同的暴露时间,花岗片麻岩释光信号的半饱和深度明显比砂岩的深,且它们能晒退的最大深度相差巨大,即

表1 目前已发表的释光信号晒退参数统计
Table 1 Statistics on the bleaching parameters of luminescence signals in the literature

样品名 Sample name	岩性 Lithology	表面颜色 Surface color	采样位置 Sampling location	μ / mm^{-1}	$\overline{\sigma\phi_0}$ / ka^{-1}	\dot{D} / $\text{Gy}\cdot\text{ka}^{-1}$	D_0 / Gy	释光信号 Luminescence signal	参考文献 References
2014KZ4	细砂岩 Fine sandstone	紫红色 Purplish red	中国新疆 Xinjiang province in China	2.43±0.48	(1.1±1.9)×10 ³			IR ₅₀	[27]
HS-OSL-29	砂岩 Sandstone	土黄色* Khaki*	美国犹他州 Utah, USA	1.01±0.02	214±19			IR ₅₀	[1]
CO-01	砂岩 Sandstone	灰色 Grey	英国 Britain	2.86±0.60	—			pIRIR ₂₂₅	[6]
—	富长石花岗岩 Feldspar-rich granite	红褐色* Reddish brown*	丹麦奥胡斯 Aarhus, Denmark	0.72±0.07	(5±2)×10 ³	6.0±0.2	280±30	IR ₅₀	[4]
MBTP1	花岗岩 Granite	灰白色* Grey white*	欧洲阿尔卑斯 European Alps	0.596	129×10 ³	8	500	IR ₅₀	[28]
1 K	花岗岩 Granite	肉红色 Flesh pink	中国内蒙古 Inner Mongolia, China	1.10±0.19	2 631±14	3.3±0.2	506.0±15.5	pIRIR ₁₇₅	[22]
GG18-05-01	片岩 Schist	—	瑞士 Switzerland	1.6	4 900			pIRIR ₂₂₅	[20]
MUZTAGH-2	花岗片麻岩 Granitic gneiss	青灰色* Cinerrous*	新疆帕米尔 Chinese Pamir	0.59±0.01	2 165±51	5.45±0.09	238±34	IR ₅₀	[2]
MZ051S-3	片麻岩 Gneiss	灰黑色* Dark gray*	意大利北部 Northern Italy	0.91±0.16	—		430±30	IR ₅₀	[29]
GZ5(2)	片麻岩 Gneiss	灰黑色* Dark gray *	新疆帕米尔 Chinese Pamir	1.05±0.02	(11±1) × 10 ³			MET-pIRIR ₁₇₀	[17]

注:*表示作者根据采样照片大致判断的颜色

Note: * indicates the color judged roughly by the author based on the sampled photos

它们的半饱和深度极限分别约为 19 mm、4 mm; 增加相同的暴露时间, 花岗片麻岩半饱和和深度的增长速率(即半饱和深度与暴露时间的斜率)明显比砂岩的增长速率高。在增加相同暴露时间的情况下, 花岗片麻岩增长的半饱和和深度明显比砂岩大, 这表明花岗片麻岩比砂岩在暴露测年方面的分辨率更高, 因此浅色透光性岩石是较为理想的定年材料, 野外作业中应优先采集。

3 参数对侵蚀速率及极限的影响

为研究参数 μ 、 $\overline{\sigma\phi_0}$ 、 \dot{D} 、 D_0 对侵蚀速率的影响, 本文拟改变其中一参数值, 其他参数值不变, 采用式(4)进行模拟获得不同侵蚀速率下的释光信号-深度曲线和半饱和深度。

图4(a)显示了不同的光衰减系数 μ 的岩石经历不同侵蚀速率后半饱和和深度的分布。在相同的侵蚀速率下, 半饱和深度对于 μ 值非常敏感, 即改变 μ 值, 半饱和深度会发生明显变化。例如, 当侵蚀速率为 $1 \text{ mm}\cdot\text{ka}^{-1}$ 时, 光衰减系数 μ 为 0.5 mm^{-1} 的半饱和和深

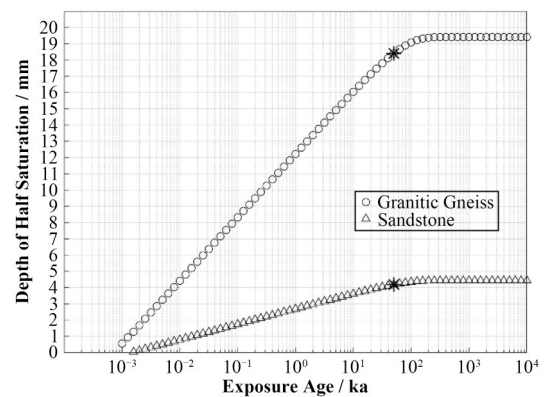


图3 典型花岗片麻岩(圆圈)和砂岩(三角形)释光信号的半饱和深度与暴露时间关系

Fig.3 Relationship between the depth of half saturation and exposure age of typical granite gneiss (circle) and sandstone (triangle)

度约是 μ 为 1.25 mm^{-1} 的 3 倍(图4(a))。假如拟应用该方法获取该地区岩石的侵蚀速率, 野外作业中应优先采集浅色透光性岩石。不仅如此, 无论 μ 值为多少, 半饱和深度初始随着侵蚀速率的增加而基本不变, 而当侵蚀速率大于一定程度(图4中星号位

置)时,半饱和深度会随侵蚀速率增大而变小,且与侵蚀速率的指数呈线性关系。此外,当增加相同的侵蚀速率时,较小的 μ 值对应的半饱和深度减小的速率(即半饱和深度-侵蚀速率曲线的斜率)更大。在半饱和深度确定时,不同的 μ 值对应的侵蚀速率差距悬殊,例如:当半饱和深度为6 mm, μ 值为 0.75 mm^{-1} 和 1.25 mm^{-1} 时对应的侵蚀速率分别约为 $100 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ 和 $1 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$,两者侵蚀速率相差约100倍(图4(a))。本文将半饱和深度最大值的95%处

(图4中星号位置)对应的侵蚀速率认为是岩石表层释光暴露测年方法获得侵蚀速率最小值的极限,当侵蚀速率小于极限时,侵蚀速率改变时半饱和深度变化极为缓慢,即侵蚀速率小于该极值时,其对释光信号晒退深度的影响可以忽略不计(图4)。当 μ 值为 $0.5 \sim 0.75$,获得侵蚀速率极限为 $0.02 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$; μ 值范围为 $1.0 \sim 2.0$ 时,侵蚀速率极限为 $0.01 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ (图4(a))。

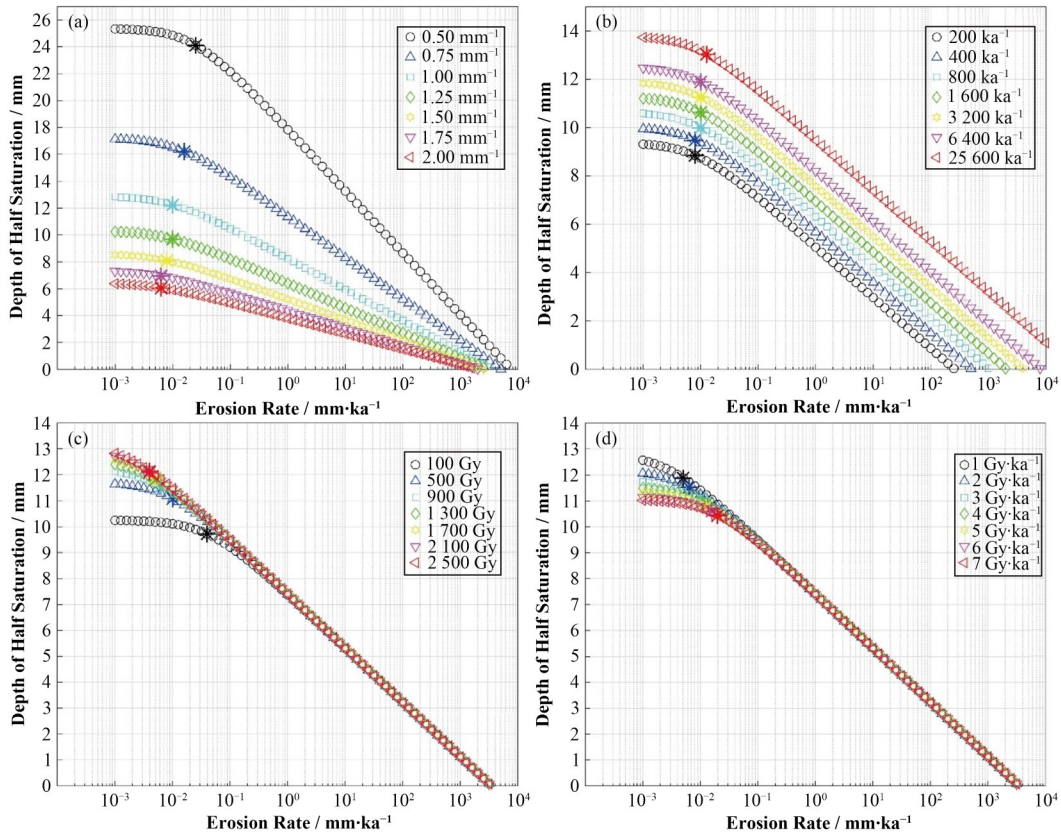


图4 不同参数下释光信号-深度曲线的半饱和深度与侵蚀速率关系

只改变下面某一参数值,其他参数保持不变:(a) μ 值,(b) $\overline{\sigma\phi_0}$ 值,(c) D_0 值,(d) \dot{D} 值

Fig.4 Relationship between the depth of half saturation and erosion rate under different parameter values.

Only one of the following parameters are varied while keeping the other parameters unchanged: (a) μ , (b) $\overline{\sigma\phi_0}$, (c) D_0 , (d) \dot{D} .

图4(b)显示了不同 $\overline{\sigma\phi_0}$ 值的岩石经历不同侵蚀速率后半饱和深度的分布。在相同的侵蚀速率下,改变 $\overline{\sigma\phi_0}$ 值,对半饱和深度会有一些影响。例如,当侵蚀速率为 $1 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ 时, $\overline{\sigma\phi_0}$ 值为 25600 ka^{-1} 的半饱和深度约是 $\overline{\sigma\phi_0}$ 值为 200 ka^{-1} 的两倍(图4(b))。对于某一 $\overline{\sigma\phi_0}$ 值而言,半饱和深度初始随侵蚀速率基本保持不变,当侵蚀速率超过一定程度(图4中星号位置)时,半饱和深度与侵蚀速率的指数呈线性关系,且当增加相同的侵蚀速率时,不同 μ 值对应的半饱和深度减小的速率(即半饱和深度-侵蚀速率曲线的斜率)相等(图4(b))。在半饱和深度确定时,不

同的 $\overline{\sigma\phi_0}$ 值对应的侵蚀速率相差较大,例如,当半饱和深度为6 mm, $\overline{\sigma\phi_0}$ 值为 400 ka^{-1} 和 6400 ka^{-1} 时对应的暴露年龄分别约为 $1 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ 和 $10 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$,两者侵蚀速率相差大约10倍(图2(b))。这说明 $\overline{\sigma\phi_0}$ 值对于侵蚀速率的影响较大,不宜通过假设某一值或某一范围去计算侵蚀速率。当 $\overline{\sigma\phi_0}$ 值为 $200 \sim 25600 \text{ ka}^{-1}$,获得侵蚀速率极限为 $0.01 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$,当侵蚀速率小于该极值时,其对释光信号晒退深度的影响可以忽略不计(图4(b))。

图4(d)显示了不同的环境剂量率 \dot{D} 的岩石经历不同侵蚀速率后半饱和深度的分布。当侵蚀速率

大于 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ 时,不同剂量率下的半饱和深度与侵蚀速率关系曲线都是重合的,即无论剂量率如何变化,都不影响半饱和深度或侵蚀速率,这说明该方法对环境剂量率 \dot{D} 值的敏感度较低。当侵蚀速率超过一定值(图4(d)的星号)时,半饱和深度随着侵蚀速率的指数增加而线性减少。当 \dot{D} 值为 $1 \sim 5 \text{ Gy} \cdot \text{ka}^{-1}$ 时,获得侵蚀速率极限为 $0.01 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$; 当 \dot{D} 值为 $6 \sim 7 \text{ Gy} \cdot \text{ka}^{-1}$ 时,获得侵蚀速率极限为 $0.02 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ (图4(d))。

图4(c)显示了岩石在不同特征饱和剂量 D_0 条件下,经历不同侵蚀速率后半饱和深度和分布。与环境剂量率的情况相似,当侵蚀速率大于 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ 时,不同特征饱和剂量下的半饱和深度与侵蚀速率关系曲线基本重合,该方法对特征饱和剂量的敏感度较低。当 D_0 值分别为 100 Gy 时,获得侵蚀速率极限分别为 $0.04 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$; 当 D_0 值大于 500 Gy 时,获得侵蚀速率极限均小于等于 $0.01 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ (图2(c))。

4 讨论

由图2(a)和图4(a)可知,光衰减系数 μ 对释光信号晒退和侵蚀速率的影响非常显著,准确测量这两个参数值对于暴露测年和获取侵蚀速率尤为重要。 μ 值一般由样品的释光信号-深度曲线拟合获得^[1,14,28],或者通过利用光谱仪直接测量光在岩片中的衰减数据获得,直接测量获得的衰减系数比曲线拟合获得的整体略大一些,可能是因为通过光谱仪获得特定波长的光衰减信息,而曲线拟合方式整合了太阳光谱中不同波长对释光信号的影响^[6],这两种方式是可以进行互相检验和对比的,以促进对岩石内部释光信号晒退机制的研究。此外,目前测试流程大多选用的是 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 红外激发法(Luminescence Protocol of Infrared at $50 \text{ }^\circ\text{C}$, IR_{50})^[1,2,4,19,28-29],也有测试流程采用的是红外两步升温激发法(Post-infrared Infrared Stimulated Luminescence Protocol; pIRIR)^[6,20,22]或红外多步升温激发法(Multi-elevated-temperature Post-infrared Infrared Stimulated Luminescence Protocol, MET-pIRIR)^[17]。虽然 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 的红外激发(IR_{50})信号的晒退速率比其他更高温度信号晒退速率快^[17],但是低温红外的异常衰减相对比较严重^[32-33],这会导致同一期次暴露岩石的释光信号-深度曲线更加分散^[22],故推荐采用两步红外激发法或多步红外激发法,以求能更准确地测量岩片的残余释光信号。

无论处于何种年龄或侵蚀速率, $\overline{\sigma\phi_0}$ 值对半饱和深度的影响都较大(图2(b)和图4(b)),如何准确测

量获得 $\overline{\sigma\phi_0}$ 至关重要。 $\overline{\sigma\phi_0}$ 反映了在特定光谱的照射下,岩石表面释光信号的晒退速率,目前暂时无法通过直接测量有效地获得该参数。前人认为同一地区岩性相同的岩石同种释光信号晒退速率 $\overline{\sigma\phi_0}$ 通常是一致的,从而可以通过已知年龄样的释光深度曲线拟合获得^[1,4,22]。 $\overline{\sigma\phi_0}$ 里包含光致截面积 σ 和光子通量 ϕ_0 ,其中 σ 取决于样品所含矿物和电子陷阱^[31], ϕ_0 主要由纬度、云量以及样品高度等控制^[30]。其中矿物和电子陷阱可以通过前处理和测试流程进行控制,纬度、高度可以通过采样控制,只是云量无法控制,只能假设某一时间尺度内年平均近似相等。构造运动、冰川活动、滑坡等地质过程可能会对岩石的光照条件(ϕ_0)产生影响,但具体如何量化这种影响还需实例进行研究。无论如何,本文建议应尽可能收集已知年龄样的释光信号晒退信息,以便建立数据库,进一步系统总结该参数的精细变化规律,以求进一步提高定年结果的可靠性。

环境剂量率 \dot{D} 与特征饱和剂量 D_0 共同决定了捕获电子速率常数 F (即 \dot{D}/D_0) 的大小,它们分属 F 的分子和分母,对 F 以及式(3)、(4)的作用正好相反。在暴露年龄 $< 50 \text{ ka}$ 和侵蚀速率 $> 0.1 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ 时,环境剂量率和特征饱和剂量的大小对释光信号晒退深度基本不产生影响,即一般情况下,这两项值测量不准确或假设为某一值对于获取暴露年龄或侵蚀速率的结果都影响不大。环境剂量率小 ($3 \text{ Gy} \cdot \text{ka}^{-1}$) 的样品比剂量率大 ($6 \text{ Gy} \cdot \text{ka}^{-1}$) 测年极限更大,假如拟采用实际样品挑战暴露测年的极限,应该尽量选择剂量率低的样品,这与沉积物释光测年的选择类似。特征饱和剂量越大,其测年极限越大,假如拟挑战测年极限,可以选择特征饱和剂量大的信号(例如更高的红外激发温度)。

半饱和深度为 0 时,不一定代表没有能力分辨释光信号-深度曲线。例如晒退后表层残留释光信号占饱和值比例仍大于 50%,且比例不一样。此时释光信号还没晒退至小于 50%,半饱和深度应为 0,但由于晒退比例不一样,释光信号-深度曲线应该会有差异。故岩石表层释光测年方法测年极小值可以非常小(例如数小时、数天、数年),这从实际晒退模拟实验中^[6,34]可以验证。

本文将半饱和深度最大值的 95% 处对应的暴露时间和侵蚀速率认为是岩石表层释光暴露测年极大值和获得侵蚀速率极小值,实际上半饱和深度在其能达到的最大深度 95% 以上时,其对应的暴露年龄和侵蚀速率仍然分别有缓慢的增长和下降(图2和图4),只是不如 95% 范围内半饱和深度呈线性增减那么显著。而在实际应用中,采样的岩石面可能

并不完全平整、岩石矿物不均匀分布、释光信号的测量误差等因素可能会对释光信号-深度曲线和半饱和深度造成一定的不确定性,故本文将分辨率低(半饱和深度超过其能达到的最大深度95%时)的部分暂不纳入测年或获得侵蚀速率范围内。将来随着采样、前处理、信号测量和数据处理技术改进和完善,可能会拓展该方法测年或获侵蚀速率的极限。

5 结语

可能影响获得暴露年龄和侵蚀速率的参数有光衰减系数 μ 、晒退速率 $\overline{\sigma\phi_0}$ 、环境剂量率 \dot{D} 和特征饱和剂量 D_0 。其中 μ 和 $\overline{\sigma\phi_0}$ (尤其是 μ)对释光信号晒退和侵蚀速率的影响非常显著,在相同的暴露年龄或侵蚀速率下,不同的 μ 或 $\overline{\sigma\phi_0}$,会导致半饱和深度差异较大。当增加相同的暴露时间或侵蚀速率时, μ 值越小,对应半饱和深度变化的速率(图2(a)和4(a)中曲线斜率)更大;不同 $\overline{\sigma\phi_0}$ 值对应半饱和深度变化的速率(图2(b)和4(b)中曲线斜率)相同。低温红外的异常衰减相对比较严重,推荐采用两步红外激发法或多步红外激发法,以求能更准确地测量岩片的残余释光信号和获得释光信号-深度曲线,从而能更准确地获得 μ 和 $\overline{\sigma\phi_0}$ 。一般情况下, \dot{D} 的大小对释光信号晒退深度基本不产生影响,故在实际应用中可忽略岩石表面和内部 \dot{D} 的差异。但 \dot{D} 和 D_0 会影响暴露测年和获侵蚀速率的极限,假如拟采用实际样品挑战暴露测年的极限,应尽量选择剂量率低的样品或特征饱和剂量大的信号(例如更高的红外激发温度)。

通常,砂岩相对于花岗岩和片麻岩,光衰减系数 μ 较大,透光性较差。经历相同的暴露时间,花岗片麻岩的半饱和深度明显比砂岩的深,且它们能晒退的最大半饱和深度分别约为19 mm、4 mm;增加相同的暴露时间,花岗片麻岩半饱和深度的增长速率明显比砂岩的增长速率高。因此浅色透光性岩石是较为理想的定年材料,野外作业中应优先采集。

本文将半饱和深度最大值的95%处对应的暴露时间和侵蚀速率认为是岩石表层释光暴露测年极大值和获得侵蚀速率极小值,并模拟不同参数值获得暴露和侵蚀速率的极限。总体而言,该方法测年范围为 $10^{-3}\sim 10^2$ ka,获得侵蚀速率范围为 $10^{-2}\sim 10^3$ mm \cdot ka $^{-1}$ 。

作者贡献声明 罗明负责理论模型设计、结果分析,文章撰写和修改;龚志军负责对文章的知识性内容作批评性审阅,参与研究问题和讨论;郭福生对文章进行全面审阅和修改;彭花明对文章知识性内

容做出指导。

参考文献

- Sohbati R, Murray A S, Chapot M S, *et al.* Optically stimulated luminescence (OSL) as a chronometer for surface exposure dating[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, **117**(B9): B09202. DOI: [10.1029/2012jb009383](https://doi.org/10.1029/2012jb009383).
- Sohbati R, Liu J F, Jain M, *et al.* Centennial- to millennial-scale hard rock erosion rates deduced from luminescence-depth profiles[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, **493**: 218 - 230. DOI: [10.1016/j.epsl.2018.04.017](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.017).
- Pederson J L, Chapot M S, Simms S R, *et al.* Age of Barrier Canyon-style rock art constrained by cross-cutting relations and luminescence dating techniques[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, **111**(36): 12986 - 12991. DOI: [10.1073/pnas.1405402111](https://doi.org/10.1073/pnas.1405402111).
- Freiesleben T, Sohbati R, Murray A S, *et al.* Mathematical model quantifies multiple daylight exposure and burial events for rock surfaces using luminescence dating[J]. *Radiation Measurements*, 2015, **81**: 16 - 22. DOI: [10.1016/j.radmeas.2015.02.004](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2015.02.004).
- Sohbati R, Murray A S, Jain M, *et al.* Investigating the resetting of OSL signals in rock surfaces[J]. *Geochronometria*, 2011, **38**(3): 249 - 258. DOI: [10.2478/s13386-011-0029-2](https://doi.org/10.2478/s13386-011-0029-2).
- Ou X J, Roberts H M, Duller G A T, *et al.* Attenuation of light in different rock types and implications for rock surface luminescence dating[J]. *Radiation Measurements*, 2018, **120**: 305 - 311. DOI: [10.1016/j.radmeas.2018.06.027](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2018.06.027).
- Liu J F, Cui F R, Murray A S, *et al.* Resetting of the luminescence signal in modern riverbed cobbles along the course of the Shiyang River, China[J]. *Quaternary Geochronology*, 2019, **49**: 184 - 190. DOI: [10.1016/j.quageo.2018.04.004](https://doi.org/10.1016/j.quageo.2018.04.004).
- Liu Q, Chen J, Qin J T, *et al.* MET-post-IR IRSL luminescence dating of cobbles buried in fluvial terraces in the Northern Chinese Tian Shan[J]. *Quaternary Geochronology*, 2022, **72**: 101351. DOI: [10.1016/j.quageo.2022.101351](https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101351).
- Brill D, Ageby L, Obert C, *et al.* Investigating the resetting of IRSL signals in beach cobbles and their potential for rock surface dating of marine terraces in Northern Chile[J]. *Marine Geology*, 2022, **443**: 106692.

- DOI: [10.1016/j.margeo.2021.106692](https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106692).
- 10 Cui F R, Qin J T, Liu J F, *et al.* Isolating quartz-dominated OSL signal of rock slice by using pulsed stimulation: implications for dating burial age of cobbles [J]. *Quaternary Geochronology*, 2022, **72**: 101367. DOI: [10.1016/j.quageo.2022.101367](https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101367).
 - 11 李阳, 欧先交, 温佳洁, 等. 年轻冰川沉积砾石的晒退特征及其对岩石释光埋藏测年的启示[J]. *冰川冻土*, 2022, **44**(4): 1395 - 1405. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0125](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0125).
 - LI Yang, OU Xianjiao, WEN Jiajie, *et al.* Bleaching characteristics of young glacial cobbles and its implications for rock luminescence burial dating[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, **44**(4): 1395 - 1405. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0125](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0125).
 - 12 温佳洁, 欧先交, 李阳, 等. 岩石释光埋藏测年中砾石晒退程度的快速评估[J]. *第四纪研究*, 2022, **42**(5): 1462 - 1474. DOI: [10.11928/j.issn.1001-7410.2022.05.19](https://doi.org/10.11928/j.issn.1001-7410.2022.05.19).
 - WEN Jiajie, OU Xianjiao, LI Yang, *et al.* Rapid evaluation of gravel drying degree in rock luminescence burial dating[J]. *Quaternary Sciences*, 2022, **42**(5): 1462 - 1474. DOI: [10.11928/j.issn.1001-7410.2022.05.19](https://doi.org/10.11928/j.issn.1001-7410.2022.05.19).
 - 13 Smith L N, Sohbat R, Jain M. Rock surface luminescence dating of gravel determines the age of a glacial outburst megaflood, Glacial Lake Missoula, Montana, USA[J]. *Geology*, 2023, **51**(4): 323 - 328. DOI: [10.1130/g50721.1](https://doi.org/10.1130/g50721.1).
 - 14 Gliganic L A, Meyer M C, May J H, *et al.* Direct dating of lithic surface artifacts using luminescence[J]. *Science Advances*, 2021, **7**(23): eabb3424. DOI: [10.1126/sciadv.abb3424](https://doi.org/10.1126/sciadv.abb3424).
 - 15 al Khasawneh S, Abu-Jaber N, Hamarneh C, *et al.* Age determination of runoff terrace systems in Petra, Jordan, using rock surface luminescence dating[J]. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2022, **14**(3): 48. DOI: [10.1007/s12520-022-01510-9](https://doi.org/10.1007/s12520-022-01510-9).
 - 16 Feathers J K, Frouin M, Bench T G. Luminescence dating of Enigmatic rock structures in New England, USA[J]. *Quaternary Geochronology*, 2022, **73**: 101402. DOI: [10.1016/j.quageo.2022.101402](https://doi.org/10.1016/j.quageo.2022.101402).
 - 17 Luo M, Chen J, Liu J F, *et al.* A test of rock surface luminescence dating using glaciofluvial boulders from the Chinese Pamir[J]. *Radiation Measurements*, 2018, **120**: 290 - 297. DOI: [10.1016/j.radmeas.2018.07.017](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2018.07.017).
 - 18 Brown N D, Moon S. Revisiting erosion rate estimates from luminescence profiles in exposed bedrock surfaces using stochastic erosion simulations[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, **528**: 115842. DOI: [10.1016/j.epsl.2019.115842](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115842).
 - 19 Lehmann B, Herman F, Valla P G, *et al.* Postglacial erosion of bedrock surfaces and deglaciation timing: new insights from the Mont Blanc massif (western Alps) [J]. *Geology*, 2020, **48**(2): 139 - 144. DOI: [10.1130/g46585.1](https://doi.org/10.1130/g46585.1).
 - 20 Elkadi J, Lehmann B, King G E, *et al.* Quantification of post-glacier bedrock surface erosion in the European Alps using ^{10}Be and optically stimulated luminescence exposure dating[J]. *Earth Surface Dynamics*, 2022, **10**(5): 909 - 928. DOI: [10.5194/esurf-10-909-2022](https://doi.org/10.5194/esurf-10-909-2022).
 - 21 Sohbat R, Hippe K. OSL- ^{14}C - ^{10}Be : a novel composite geochronometer for simultaneous quantification of timing and magnitude of change in bedrock outcrop erosion rate [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2023, **48**(2): 322 - 331. DOI: [10.1002/esp.5487](https://doi.org/10.1002/esp.5487).
 - 22 Luo M, Chen J E, Owen L A, *et al.* A novel approach for reconstructing slip histories for bedrock fault scarps using rock surface luminescence dating[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(16): e2022GL099526. DOI: [10.1029/2022gl099526](https://doi.org/10.1029/2022gl099526).
 - 23 Sohbat R, Jain M, Murray A S. Surface exposure dating of non-terrestrial bodies using optically stimulated luminescence: a new method[J]. *Icarus*, 2012, **221**(1): 160 - 166. DOI: [10.1016/j.icarus.2012.07.017](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.07.017).
 - 24 Laskaris N, Liritzis I. A new mathematical approximation of sunlight attenuation in rocks for surface luminescence dating[J]. *Journal of Luminescence*, 2011, **131**(9): 1874 - 1884. DOI: [10.1016/j.jlumin.2011.04.052](https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2011.04.052).
 - 25 Wintle A G, Murray A S. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols [J]. *Radiation Measurements*, 2006, **41**(4): 369 - 391. DOI: [10.1016/j.radmeas.2005.11.001](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2005.11.001).
 - 26 Biswas R H, Pathan A N, Malik J N. General order kinetics model for OSL rock surface exposure dating[J]. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 2023, **89**(3): 644 - 654. DOI: [10.1007/s43538-023-00172-y](https://doi.org/10.1007/s43538-023-00172-y).
 - 27 罗明. 岩石暴露面光释光测年初探[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2016.
 - LUO Ming. Preliminary study on luminescence dating of exposed rock surface[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2016.
 - 28 Lehmann B, Herman F, Valla P, *et al.* Evaluating post-glacial bedrock erosion and surface exposure duration by

- coupling *in situ* OSL and ^{10}Be dating[J]. *Earth Surface Dynamics Discussions*, 2019, **7**: 1 - 38. DOI: [10.5194/esurf-2018-97](https://doi.org/10.5194/esurf-2018-97).
- 29 Ageby L, Angelucci D E, Brill D, *et al.* Rock surface IRSL dating of buried cobbles from an alpine dry-stone structure in Val di Sole, Italy[J]. *Quaternary Geochronology*, 2021, **66**: 101212. DOI: [10.1016/j.quageo.2021.101212](https://doi.org/10.1016/j.quageo.2021.101212).
- 30 Blumthaler M, Ambach W, Ellinger R. Increase in solar UV radiation with altitude[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 1997, **39**(2): 130 - 134. DOI: [10.1016/S1011-1344\(96\)00018-8](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(96)00018-8).
- 31 Bailey R M. Simulation of dose absorption in quartz over geological timescales and its implications for the precision and accuracy of optical dating[J]. *Radiation Measurements*, 2004, **38**(3): 299 - 310. DOI: [10.1016/j.radmeas.2003.09.005](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2003.09.005).
- 32 Buylaert J P, Murray A S, Thomsen K J, *et al.* Testing the potential of an elevated temperature IRSL signal from K-feldspar[J]. *Radiation Measurements*, 2009, **44**(5 - 6): 560 - 565. DOI: [10.1016/j.radmeas.2009.02.007](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.02.007).
- 33 Li B, Li S H. Luminescence dating of K-feldspar from sediments: a protocol without anomalous fading correction [J]. *Quaternary Geochronology*, 2011, **6**(5): 468 - 479. DOI: [10.1016/j.quageo.2011.05.001](https://doi.org/10.1016/j.quageo.2011.05.001).
- 34 Galli A, Artesani A, Martini M, *et al.* An empirical model of the sunlight bleaching efficiency of brick surfaces[J]. *Radiation Measurements*, 2017, **107**: 67 - 72. DOI: [10.1016/j.radmeas.2017.10.004](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2017.10.004).