

张爱敏, 隆浩, 杨飞, 张静然, 彭俊, 张甘霖. 释光测年技术量化土壤扰动: 原理与进展[J]. 土壤学报, 2026,

ZHANG Aimin, LONG Hao, YANG Fei, ZHANG Jingran, PENG Jun, ZHANG Ganlin. Quantifying Pedoturbation with Luminescence Dating Techniques: Principles and Progress [J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

释光测年技术量化土壤扰动: 原理与进展*

张爱敏^{1,2}, 隆浩^{1,2†}, 杨飞^{2,3}, 张静然⁴, 彭俊⁵, 张甘霖^{1,2,3}

(1. 湖泊与流域水安全全国重点实验室(中国科学院南京地理与湖泊研究所), 南京 211135; 2. 中国科学院大学南京学院, 南京 211135; 3. 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 4. 虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏省地理信息资源开发与协同创新中心(南京师范大学地理科学学院), 南京 210023; 5. 湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湖南湘潭 411201)

摘要: 土壤扰动是普遍存在的地表动态过程, 对土壤发育、养分与污染物迁移、土壤侵蚀及地貌演化均具有深刻影响。传统研究土壤扰动的方法主要依赖于野外观测、形态学分析或短周期放射性核素的空间分布特征。这些方法虽能提供有效信息, 但操作繁琐, 且定量研究仅适用于短时间尺度(近百年以来)。释光测年技术是第四纪研究中常用的测年手段, 可用于确定矿物颗粒最后一次暴露于光照的时间。近年来, 随着技术(尤其是单颗粒释光测年技术)的发展, 其在量化近现代至千年尺度的土壤扰动方面逐渐展现出独特优势。本文从释光测年技术的基本原理出发, 重点阐述其量化土壤扰动的方法体系, 系统总结该技术在土壤发育过程解析、土壤生物扰动历史重建以及土壤侵蚀—地貌演化研究中的最新应用进展。最后, 本文探讨该技术的优势与局限性, 旨在向土壤学界展示这一第四纪测年技术在解决土壤学问题中的应用潜力, 进而推动学科交叉创新。

关键词: 土壤扰动; 土壤混合; 释光测年; 土壤发生; 成土过程

中图分类号: S151 文献标志码: A

Quantifying Pedoturbation with Luminescence Dating Techniques: Principles and Progress

ZHANG Aimin^{1,2}, LONG Hao^{1,2†}, YANG Fei^{2,3}, ZHANG Jingran⁴, PENG Jun⁵, ZHANG Ganlin^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Nanjing 211135, China; 3. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 4. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment (Ministry of Education), Jiangsu Centre for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 5. School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract: Pedoturbation is a ubiquitous surface dynamic process that profoundly influences soil development, nutrient and contaminant transport, soil erosion, and geomorphic evolution. Traditional investigation methods primarily rely on field observations, morphological analysis, or spatial distribution characteristics of short-lived radionuclides, which, while providing

* 国家自然科学基金项目(42130715)、国家重点研发计划项目(2023YFD1500101)和中国科学院南京土壤研究所“十四五”自主部署项目(ISSAS2404)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42130715), the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFD1500101), and the Independent Deployment Project of the 14th Five-Year Plan, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (No.ISSAS2404)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: longhao@niglas.ac.cn

作者简介: 张爱敏(1995-), 女, 重庆涪陵人, 博士, 研究方向为土壤释光测年。E-mail: zhangaimin21@mails.ucas.ac.cn

收稿日期: 2025-08-18; 收到修改稿日期: 2025-12-24; 网络首发日期(www.cnki.net):

valuable information, are often labor-intensive, predominantly qualitative, and limited to short-term quantitative studies. Optically stimulated luminescence (OSL) dating, a well-established Quaternary dating method used to determine the last sunlight exposure of mineral grains, has recently demonstrated unique advantages in quantifying pedoturbation through technological advancements, particularly by single-grain OSL dating techniques. This review examines the fundamental principles of OSL dating, elaborates its methodological framework for pedoturbation quantification, and systematically synthesizes its recent applications in analyzing soil formation processes, reconstructing bioturbation history, and investigating soil erosion-landform evolution relationships. Finally, the review discusses the technique's strengths and limitations, aiming to demonstrate its potential for addressing pedological questions and promoting interdisciplinary innovation between Quaternary geochronology and soil science.

Key words: Pedoturbation; Soil mixing; Luminescence dating; Pedogenesis; Soil forming processes

土壤扰动 (Pedoturbation) 是指由物理或生物过程引起的土壤混合现象, 其常见驱动机制包括冻融作用、动物挖掘、植物根系生长以及侵蚀—堆积作用等^[1]。作为一种广泛存在的地表过程, 土壤扰动通过改变土壤结构、孔隙状况和土层的物质组成显著影响土体的理化性质, 并产生多方面的深远影响^[2]。具体而言, 它不仅通过混合作用重塑土壤层次结构, 直接参与土壤剖面形成演化^[1], 还通过驱动养分与污染物的迁移扩散, 深刻影响土壤的生态功能^[3]。此外, 扰动导致的结构变化也会显著改变土壤的氧化还原环境及微生物活性, 进而调控有机质分解速率和碳封存潜力^[4-6]。而从地貌演化角度看, 土壤扰动通过促进沉积物迁移与再分配, 也成为塑造地表形态的重要营力^[7-9]。

早在 19 世纪, 达尔文在研究蚯蚓对腐殖土的贡献时, 便已认识到土壤生物扰动的重要性^[10-11]。然而, 由于土壤扰动过程的隐蔽性和复杂性, 其定量表征仍面临挑战^[12]。传统研究方法主要依赖野外观测^[13,14]、土壤微形态分析^[15,16]和短周期放射性核素示踪技术^[17-18]。其中, 前两种方法虽能提供定性或半定量的直观认识, 但操作较繁琐, 且其时间尺度通常局限于现代; 而短周期核素示踪虽能有效揭示现代至百年尺度的扰动特征, 但在向更长时间尺度 (如千年以上) 外推时存在显著局限性^[19]。

近年来, 释光测年 (Luminescence dating) 技术的发展为量化近现代至数千年尺度的土壤扰动特征提供了新的研究手段^[19-20]。本文将从释光测年技术的基本原理出发, 重点介绍其量化土壤扰动的方法, 总结该技术在土壤发育过程解析、土壤生物扰动过程重建以及土壤侵蚀—地貌演化研究中的应用进展, 最后讨论该技术的优势与局限性, 以期在土壤学界展示这一第四纪测年技术在解决土壤学问题方面的应用潜力, 推动学科交叉创新。

1 释光测年技术识别土壤扰动的原理

1.1 释光测年基本原理

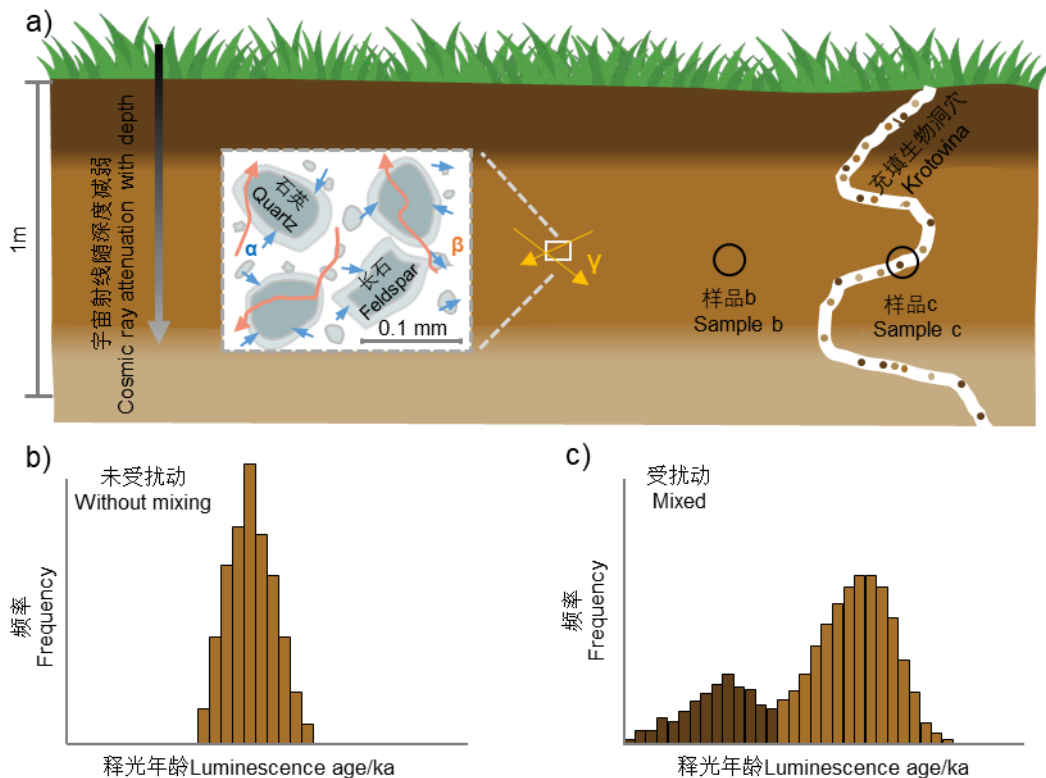
自然界的矿物晶格中普遍存在结构缺陷, 这些缺陷可充当天然的辐射剂量计。当矿物埋藏于地下时, 会持续受到宇宙射线及周围放射性元素 (如铀、钍、钾) 衰变产生的 α 、 β 和 γ 辐射作用, 导致晶格缺陷中逐渐累积能量 (其累积量与暴露于辐射的时间成正比)。当矿物受到光或热激发时, 储存的能量会以发光的形式释放 (即产生释光信号)。其中, 受热激发释光称为热释光 (Thermoluminescence), 受光照激发释光则称为光释光 (Optically stimulated luminescence), 因为后者是沉积物释光研究的主要方法, 下文所讨论的释光测年均指光释光测年。在实验室条件下, 通过精确测量矿物的释光信号强度, 可以确定其累积的天然辐射剂量 (称为等效剂量, Equivalent dose, D_e)。基于等效剂量与环境剂量率的比值, 即可获得矿物的释光年龄^[21]:

$$\text{年龄 (ka)} = \text{等效剂量 (Gy)} / \text{剂量率 (Gy} \cdot \text{ka}^{-1}) \quad (1)$$

矿物颗粒在埋藏时累积信号, 在曝光时释放信号, 这一过程可循环重复, 而光释光年龄反映的是矿物颗粒最后一次曝光以来的时长。自 1985 年提出^[22]以来, 光释光测年技术经过持续发展, 目前

已能实现单颗粒尺度的 D_e 测试, 并已成为测定各类第四纪沉积物埋藏年龄的重要方法^[23]。

石英和长石因其相对良好的释光特性和广泛的地表分布, 成为释光测年中最常用的两种矿物^[23]。石英具有抗风化能力强、释光信号晒退效率高和稳定性好等特点^[24]。然而, 并非所有颗粒均能产生释光信号, 而石英的发光颗粒比例通常较低 (1%~5%), 这导致其单颗粒测试效率受限^[25]。相较而言, 长石发光比例显著更高 (>50%), 单颗粒测试效率更为理想^[12]。而且长石的测年上限 (>50 万年) 显著高于石英 (10 万年~20 万年)^[23], 具有更宽的测年范围。但长石也有其不足之处, 一方面, 长石释光信号的晒退效率低于石英, 埋藏前未充分曝光而残留的信号可能导致年龄高估; 另一方面, 长石释光信号可能受“异常衰减”(Anomalous fading)^[26-27]的影响, 导致测年结果偏低^[28]。因此, 在实际应用中需综合考量样品特性、测试效率和测年范围等因素进行矿物选择。



注: 矿物颗粒埋藏后接收的辐射来源包括宇宙射线及土体中放射性元素衰变产生的 α 、 β 和 γ 射线 (据文献^[21])

(a)。右侧白色通道内以不同颜色的点代表因生物扰动混合的不同层位土体物质。两个黑色圆圈标记了未受扰动和受扰动的释光样品采样位置, 其年龄分布如图 (b) 和图 (c) 所示。Note: After burial, mineral grains receive radiation from cosmic rays and α , β , and γ rays produced by the decay of radioactive elements in the soil (after reference^[21]) (a). The right panel illustrates soil mixing by bioturbation. Colored points within the white channel represent materials from different soil layers. The two black circles mark the sampling sites for undisturbed and disturbed samples; their respective age distributions are presented in (b) and (c).

图 1 释光测年揭示土壤扰动的原理图

Fig. 1 Schematic diagram illustrating soil mixing revealed by luminescence dating

1.2 土壤扰动的释光识别依据

根据物质来源, 土壤母质可分为基岩风化型和沉积型两大类^[1]。两类母质对应的土壤剖面释光特征及扰动识别依据有所差异^[20]。

在基岩风化型母质的土壤剖面中, 矿物颗粒由基岩风化面直接进入土体, 其释光信号在曝光前处于饱和状态, 故无法提供有效释光年龄。在不考虑外源物质输入的情况下, 此类土壤剖面中测得的

有限释光年龄便可归因于后期扰动事件——即部分饱和颗粒曾因生物活动或侵蚀作用出露地表并曝光,随后在土壤扰动过程中被再次埋藏,从而重新开始累积释光信号^[29]。

对于沉积型母质的土壤剖面而言,其沉积物母质的释光信号通常在搬运过程中已被(曝光)清除,沉积埋藏后,在环境核辐射作用下重新累积释光信号。因此,释光年龄记录了母质的沉积埋藏时间,且随深度增加呈现地层层序特征。土壤扰动通常导致不同层位、不同年龄颗粒的混合。通过单颗粒释光测试分析各样品的 D_e 或年龄分布,便可以识别扰动的存在^[30] (图 1c)。

2 释光测年技术量化土壤扰动的方法

2.1 土壤扰动程度

土壤扰动程度(即单位体积内被扰动的土量)可通过 D_e 分布的离散度和零剂量颗粒比例进行量化。在沉积型母质的土壤剖面中,理想情况下,同一样品中的所有颗粒应具有相同特征:它们呈现均一的释光特性,埋藏前释光信号均被清空,埋藏期间接受相同的环境辐射,且经历相同的埋藏时长^[31,32]。在此条件下,考虑测试误差后,应获得较窄的 D_e 分布(图 1b)。若样品经历沉积后扰动作用,不同年龄颗粒的混合会导致 D_e 分布呈现更离散的特征^[30] (图 1c)。

D_e 分布的离散程度可通过多种指标量化,如相对标准偏差^[33]、偏度^[30,34-35]、四分位距^[36]及离散度(Overdispersion, OD)^[34,37-39]。其中,OD 值特指由非实验因素引起的数据离散,可通过中值年龄模型(Central Age Model, CAM)^[40]计算得出,该模型通过考虑单个 D_e 值的误差来计算加权平均的 D_e 估计值。当土壤扰动主导 D_e 分布特征时,这些量化指标便可作为土壤总体扰动程度的代用指标。以 OD 值为例,该指标通常以百分比表示,其数值与离散程度呈正相关:未受扰动的母质样品 D_e 分布的 OD 值约为 30%^[41-43];而在耕作层^[37]或受生物扰动影响导致沉积结构破坏的块状砂层中^[34],其 OD 值则可超过 120%。

土体内部的零剂量颗粒是土壤扰动的另一个明确指标^[12,34,35,37-39]。虽然这些颗粒本质上属于 D_e 分布的组成部分,但由于其与表层土壤扰动密切相关,有必要将其作为独立指标单独考量。如原理部分所述,地表颗粒经日光晒退后,其 D_e 值接近于零。当这些颗粒被埋藏至地下避光后,会在环境辐射的影响下重新累积释光信号,对应的 D_e 值也便随着埋藏深度和时间的增加而增大。在此背景下,土体内部出现零剂量颗粒的最佳解释,便是近期表层颗粒混入该层位,且尚未积累足够的释光信号。因此,土体中的零剂量颗粒可用于指示近期土壤向下混合的深度范围^[12,35]。近期向下扰动的强度可通过样品中零剂量颗粒的比例进行量化,比例越高,扰动越强烈。例如,Zhang 等^[37]对东北黑土剖面开展单颗粒释光测年后发现:在 20 cm 深度的耕作层上部(Ap1),零剂量颗粒占比高达~50%;随深度增加,该比例逐渐减小;40 cm 深度的耕作下部(Ap2)降至 16%,60~80 cm 深度的 A/B 过渡层进一步降至 4%~8%,而在 80 cm 以下深度的母质层(C 层)中则均未检出零剂量颗粒。

2.2 土壤扰动速率

确认矿物颗粒的曝光—埋藏与土壤扰动直接相关后,便可用释光年龄获取扰动速率。目前利用释光数据计算土壤扰动速率的方法主要有三种:年龄—深度比值法、对流—扩散模型和概率模型。

(1) 年龄—深度比值法。该方法在基岩风化型和沉积型母质的土壤剖面中均有应用,但其原理有所差异。基岩风化型剖面中的应用始于 Heimsath 等^[29]的开创性工作。他们使用石英单颗粒测量了澳大利亚新南威尔士州一处斜坡土壤剖面的释光年龄。由于该剖面发育于基岩风化物,剖面中所有能给出有效释光年龄的颗粒可直接判定为扰动组分。基于这一认识,他们通过扰动组分的释光年龄与埋藏深度的比值,估算了土壤扰动的平均速率。然而,Reimann 等^[12]认为简单地利用释光年龄(A)除以深度(D)计算得到的扰动速率难以反映不同深度扰动速率的差异。因此,他们将其称为“表观扰动速率”(Apparent reworking rate)。为改进这一方法,Reimann 等^[12]在研究西班牙一个发育于花岗

岩风化产物的土壤剖面时, 提出将表观扰动速率乘以参与扰动的颗粒比例 (即释光信号不饱和的颗粒数占总颗粒数的比例, Non-saturated factor, NSF), 从而获得“有效扰动速率” (Effective reworking rate, SR_{eff}):

$$SR_{eff} = \frac{A}{D} \times NSF \quad (2)$$

研究结果显示, 改进后的扰动速率能更准确地反映其随深度递减的趋势。

对于沉积型母质的土壤剖面而言, 由于沉积物本身具有有效释光年龄, 识别扰动组分更加困难, 但以地表堆垛 (Mounding) 型生物扰动为主的剖面可以从另一个角度估计土壤扰动速率。堆垛生物 (如白蚁) 会将深层土壤搬运至地表形成堆垛 (即土堆)。随后在雨水冲刷下, 堆垛物质在地表铺展开来, 形成新的沉积层^[2]。这些被生物搬运至地表的物质沉积速率 (即沉积年龄—深度比值) 在一定程度上反映了堆垛生物扰动速率^[44-45]。

(2) 对流—扩散模型。借鉴流体力学理论, 该模型将扰动引起的土壤颗粒随机位移类比为扩散过程, 而将侵蚀导致的老颗粒向上迁移类比为对流过程。虽然土壤扰动的扩散特征早有研究^[46], 但 Johnson 等^[47]首次将该模型应用于释光数据并计算了土壤扰动速率。相较于仅能提供平均值的年龄—深度比值法, 对流—扩散模型能够进一步揭示土壤扰动速率随深度的变化特征, 如均匀分布^[17,48]或非线性分布^[2]。Johnson 等^[47]在研究澳大利亚昆士兰台地的土壤剖面时, 建立了以下对流—扩散方程:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(z) \frac{\partial A}{\partial z} \right) - T \frac{\partial A}{\partial z} + 1 \quad (3)$$

式中, A 代表释光年龄, t 表示时间, z 为土壤深度, $D(z)$ 为深度相关的扩散系数, T 为侵蚀速率, $+1$ 表征颗粒埋藏后随时间线性累积的年龄。该研究通过实测石英单颗粒数据, 结合大气成因¹⁰Be 计算的土壤侵蚀速率, 系统分析了基岩风化型剖面在不同侵蚀条件下的释光年龄分布模式。分析结果显示, 所研究剖面的土壤扰动速率更符合随深度呈指数变化的非线性分布模式。

(3) 概率模型。最早由 Furbish 等^[49-50]引入, 该研究指出常规的对流—扩散模型可能不适用于研究土壤颗粒的运动, 因为可用于释光测年的土壤矿物颗粒分布实际上具有稀疏性 (Rarefied) 和非连续性 (Non-continuum) 特征^[51]。为此, 作者引入概率模型来分析土壤颗粒的随机运动对释光年龄分布的影响, 并提出了一种计算土壤扰动速率的新方法。该模型采用福克尔—普朗克方程 (Fokker-Planck equation), 将土壤颗粒运动建模为具有深度依赖性的非均匀二维运动。扰动速率通过一个 Pe 参数进行量化, 该参数综合了三个关键因素: 颗粒从基岩风化界面进入土体的速度、土体厚度以及表层扩散系数。

基于 Furbish 等^[49-51]的研究, Gray 等^[19]进一步建立了土壤颗粒释光强度的无量纲深度剖面模型, 用以描述土壤颗粒释光强度的系综平均运动:

$$\frac{\partial}{\partial t} [L(z, t)] = \frac{\partial}{\partial z} \left[W_p(z, t) L(z, t) - k_z(z, t) \frac{\partial L(z, t)}{\partial z} \right] + \frac{D_R}{D_0} \gamma (1 - L(z, t)) \quad (4)$$

式中, L 表示系综平均释光强度, t 为时间, z 为风化基岩面以上的深度, W_p 代表系综平均垂直颗粒运动速度, k_z 为系综平均垂直颗粒扩散率, D_R 为土壤的平均剂量率, D_0 表示土壤颗粒特征剂量的算术平均值, γ 为 D_0 算术平均值与调和平均值之间的比例常数。通过将该模型模拟结果与全球不同气候带已发表的土壤剖面释光数据进行对比, Gray 等^[19]证实, 所有气候带下的土壤扰动速率均具有深度依赖性。

3 释光测年技术量化土壤扰动的应用进展

释光技术量化的土壤扰动特征为土壤学研究提供了新视角。下面将重点介绍其在土壤发育过程解析、土壤生物扰动过程重建以及土壤侵蚀—地貌演化研究中的应用进展。

3.1 重建沉积—成土历史

不同地区的土壤单颗粒释光研究均表明,现代地表以下一定深度范围内存在较高的 OD 值和零剂量颗粒占比^[12,35,37,39],且这两个指标均随深度增加逐渐减小,并在母质层内趋于稳定,反映了扰动强度的深度相关性^[19]。近地表 OD 值和零剂量颗粒占比较高的这段土体被称为“活跃扰动带”(Active Reworking Zone, ARZ)。在 ARZ 下部,由于扰动相对较弱,仍可获取可靠母质沉积年龄^[37];而在 ARZ 上部,强烈的扰动作用致使土壤颗粒经历反复曝光—埋藏过程,通常难以获取母质的原始沉积年龄^[35,37,39]。然而,近期研究发现,通过分析扰动组分同样可以获取沉积—成土演化的有效信息。

Zhang 等^[37]提出了稳定地表与加积地表两种场景下土壤剖面释光特征差异的概念模型。该模型假设土壤发育期间的扰动特征保持不变。在稳定地表条件下(侵蚀速率 $\approx$ 沉积速率),ARZ 将长期维持在近地表固定深度范围内,土体持续混合,且混合程度日益加深。因不断接收地表晒退颗粒,其释光年龄分布中最年轻的组分始终接近于零。在加积地表场景下,ARZ 则会随粉尘堆积向上迁移,进而使原 ARZ 底部逐渐脱离扰动影响^[35]。脱离扰动带的沉积物释光年龄分布整体随时间推移变老,其中最年轻的颗粒(即原 ARZ 内的零剂量颗粒)的年龄记录了其脱离扰动影响的时间。区别于颗粒最初沉积后的“埋藏年龄”,该年龄被称为“稳定年龄”(Stabilization age)^[52]。

Glignani 等^[35]在研究澳大利亚风成沙丘活动年代时发现,由于剖面土壤发育导致沉积物受到强烈扰动,难以直接测定原始风沙沉积年龄。于是,基于加积地表模型,他们通过分析剖面各深度的稳定年龄来计算沉积物脱离 ARZ 的时间。因为脱离 ARZ 是由地表加积所致,由此便获得了风沙加积的年龄框架(Aggregational chronology)。同时,其年龄—深度关系也可在一定程度上反映地表粉尘的加积速率。这一创新性研究为确定扰动土体的年龄框架开辟了新途径,并为青藏高原高寒草甸土^[39]、中国东北黑土^[37]以及丹麦人为土^[42]的形成过程研究提供了重要借鉴。

除利用扰动组分的稳定年龄建立上部土体的加积年代框架外,扰动组分本身也能提供土壤形成的重要线索。根据成土因素理论,土壤是母质、气候、地形、生物和时间等因素共同作用的结果^[1]。在温带地区,当气候条件适宜时,植被生长和生物活动增强,土壤扰动也必然较以沉积为主的阶段更为活跃。尤其是对于黑土而言,其深厚腐殖质层的形成曾被认为与土壤扰动密切相关^[37]。因此, von Suchodoletz 等^[41]在研究德国一处被墓葬土丘埋藏的黑土剖面时,将土壤扰动的开始和结束时间分别作为土壤发育起始时间和剖面埋藏时间的替代指标。由于剖面上部的扰动速率高,扰动信息会不断更新;相比之下,剖面的下部扰动速率较低,早期扰动信息得以保存。基于此,作者利用黑土剖面最下部和最上部的扰动组分的稳定年龄分别推断黑土发育的起始和结束时间。结果显示,黑土在 9~11 ka 前已开始发育。同层位的放射性 ^{14}C 测年结果为 ~ 8 cal. ka BP,由于 ^{14}C 受年轻碳影响,所得结果偏年轻^[53-54],这也从侧面支持了基于扰动推测的土壤发育起始年龄。类似地, Zhang 等^[37]在研究中国东北黑土剖面时,通过对光释光量化的土壤扰动特征分析发现,剖面自末次冰期以来以沉积作用为主,约 16 ka 前,土壤扰动强度显著增强,他们据此推测,此时气候开始适宜黑土发育。该推断也得到东北古环境资料以及典型黑土区封闭体系下的 ^{14}C 年龄的支持^[54]。

3.2 重建土壤生物扰动过程

充填生物洞穴(krotovina)作为土壤生物活动的产物,是研究土壤生物及其生态学意义的良好载体^[55]。此外,历史时期的充填生物洞穴通常保存了珍贵的古环境信息,对于因侵蚀而缺失早期地表记录的古环境研究尤为重要^[56]。再者,土壤生物活动既可能将有机碳埋藏至深层使其得以保存,也可能将古土壤中的碳搬运至地表而加速其分解^[57]。因此,充填生物洞穴具有重要的生物生态学、古

环境及碳循环研究价值,而明确其物质来源及形成时代是解决相关科学问题的关键^[38]。

传统方法主要依靠宏观或微观形态对比来识别充填物来源,通过洞穴内物质的 ^{14}C 测年确定其形成年代。然而,当剖面物质组成相对均一时,或剖面有多层形态特征相近的古土壤层时,仅凭形态特征往往难以准确区分物质来源^[55];而 ^{14}C 测年则受限于有机质的保存状况^[56]。相比之下,释光测年技术能够记录扰动组分的年龄及运移方向信息,结合沉积环境背景分析,可为重建土壤生物充填洞穴的形成历史提供新的研究途径。

Zhang 等^[38]通过系统研究,首次展示了释光测年在这方面的应用潜力。作者以中国松嫩平原北部一个发育典型充填生物洞穴的黑土剖面为研究对象,对三组生物充填洞穴的洞内外样品开展了系统的释光测试。释光年龄结果显示,洞外样品呈现出良好的地层层序特征;而同一深度的洞内外样品则表现出显著差异。其中,70 cm 深度的黄色充填物年龄较地层年龄偏老,表明其主要源自剖面下部;而 80 cm 和 160 cm 深度的两个黑色充填物年龄均显著小于对应深度的地层年龄,指示其物质来源于表层黑土。通过释光量化扰动程度,并结合沉积环境和剖面形态特征,作者进一步确定这两个黑色洞穴的形成时间不超过 2.7 ka,且很可能是在一次充填事件中(如生物隧道坍塌)同时形成。

除了通过充填生物洞穴的系统释光测试研究土壤生物扰动以外,剖面释光年龄的分布特征也能在一定程度上反映土壤生物扰动的模式。当沉积物因生物扰动在三维空间内随机移动(即“扩散”混合)时,土壤剖面的释光年龄通常随深度呈指数变化^[47]。然而,Madsen 等^[44]对受到沙蠅(*Arenicola marina*)扰动的潮滩剖面的研究发现,释光年龄随深度的变化呈线性关系,模型分析结果表明剖面的生物扰动更符合“传送带”(Conveyor belt)模式——即物质以点对点方式向上迁移,而非“扩散”式混合。之后,Kristensen 等^[45]和 Sprafke 等^[58]对受非洲白蚁影响的土壤剖面释光研究发现,白蚁的扰动行为也符合“传送带”模式。

需要注意的是,上述研究仅分析了主要的土壤扰动形式,而实际上,土壤中常同时存在多种扰动类型。为了更好地区分不同扰动机制的贡献,van der Meij 等^[36]对比分析了两种主导扰动模式(蚯蚓活动主导的地下混合和白蚁活动主导的地表堆垛)的释光剖面特征,并借助模型模拟尝试量化各类扰动的相对贡献。虽然当前模型的模拟结果与实际情况仍存在一定差异,但已能揭示基本趋势。该研究为未来深入探究不同土壤扰动类型的相对贡献及其生态效应奠定了重要基础。

3.3 重建土壤侵蚀—地貌演化

土壤扰动能够改变地表物质结构,调节土壤渗透性并促进沉积物运移,从而直接影响土壤侵蚀速率和地貌演化过程^[7,59]。

传统坡地土壤蠕动(Soil creep)研究主要依赖插入土体的标桩或软管监测^[60],但其空间分辨率有限,难以揭示颗粒尺度的沉积物运移特征。虽然通过全土层布设标记颗粒可实现微尺度位移测量^[61],但该方法存在工作量大、效率低的局限性。相较而言,释光测年技术展现出显著优势:一方面,可通过分析坡脚剖面的年龄—深度关系来估算坡面侵蚀速率^[62–64];另一方面,其单颗粒测年技术利用土体内的矿物颗粒作为天然示踪剂,能够精细量化颗粒尺度的运移参数,为深入理解土壤侵蚀机制和地貌演化过程提供全新的研究视角和技术支撑。

Heimsath 等^[29]首次将单颗粒释光技术应用于土壤蠕动过程的研究。作者将土壤蠕动分解为两个方向的运动,即平行于坡面、向坡下的迁移,以及垂直于坡面的扰动,后者通过石英单颗粒释光信号得以量化。结果显示,整个剖面中的土壤颗粒曾反复暴露于地表。结合数值模拟,作者证实土壤蠕动是由颗粒尺度的随机位移主导的扩散过程,而非整体剪切流动。Stockmann 等^[65]在此基础上进一步拓展,他们在利用石英单颗粒释光测年技术研究澳大利亚 Werrikimbe 国家公园内的两个坡地序列的土壤扰动速率时,假设山坡不同位置的生物扰动特征相同,通过对比坡中和坡脚土壤剖面的扰动速率差异,计算了坡面物质的侧向迁移速率。不过,后续研究发现这一假设不一定成立^[66]。

Román-Sánchez 等^[66]在西班牙一处花岗岩山区的斜坡上,对坡顶至坡脚 4 个位置的土壤剖面开展了单颗粒释光测年。研究发现,20 cm 深度的 NSF 沿下坡显著递增(坡顶 0.12 至坡脚 0.94),表

明该斜坡的侧向侵蚀以土壤蠕动为主：土壤蠕动时，因生物扰动而暴露于地表的颗粒被持续搬运至坡下，导致中间深度的 NSF 沿坡累积；而坡面流等过程会重置释光信号，难以形成此规律。Román-Sánchez 等^[67]进一步利用对流—扩散模型对该斜坡的土壤扰动过程开展定量研究。结果显示，表面扩散系数（反映土壤扰动强度）在斜坡不同位置存在显著差异——从坡顶的 $11.4 \text{ mm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 增至坡底的 $81.9 \text{ mm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。模型敏感性分析进一步证实土壤扰动对斜坡土壤侵蚀具有重要影响。该研究通过解析解将释光数据与土壤动力学模型结合，为同时量化土壤扰动和侵蚀—沉积过程提供了新的定量工具。

van der Meij 等^[68]进一步将释光数据与土壤—地貌演化模型结合，提出了 ChronoLorica 模型。该模型耦合了土壤—景观演化模型 Lorica 与地质年代学模块，能动态关联土壤—地貌演化过程与土壤颗粒释光年龄的时空变化。同时，该模型还能基于模拟的土壤深度、有机质含量与黏粒含量等属性，评估剂量率的时空变化，从而为精确量化土壤扰动速率、重建地貌演化过程提供关键技术支撑。

4 释光测年技术量化土壤扰动的优势与局限性

释光测年技术在土壤扰动量化研究中的优势显著：其一，该方法操作简便，直接以土壤矿物颗粒为研究对象，无需引入外源示踪剂；其二，空间分辨率高，单颗粒释光测年技术可识别颗粒尺度的扰动特征；其三，时间跨度广，既能通过零剂量颗粒分析现代土壤垂向扰动，也可利用老地层中的年轻组分追溯历史扰动事件，其时间范围涵盖近现代至数千年尺度。

然而，该技术的应用也存在一定局限性^[69]。首先，单颗粒释光测年需选用粒度较粗（如 $>63 \mu\text{m}$ ）的矿物颗粒，因此不适用于质地偏细的黏壤类土壤。其次， D_e 分布虽能反映土壤扰动，但颗粒间释光特性差异、沉积前晒退不均以及埋藏期间微剂量率的空间异质性也会干扰其分布^[32]，故在解译扰动信号前需评估这些因素的潜在影响。再者，释光测年通常假设埋藏期间剂量率恒定，但成土过程可能打破这一假设：矿物风化会改变颗粒粒径与成分，从而影响放射性核素浓度^[70-71]；而淋溶、淀积及土壤扰动可能导致放射性核素在剖面中迁移。这些过程会引起剂量率的时空变化，因此当前释光测年在土壤中的成功应用多集中于末次冰期以来在均质母质上发育的年轻土壤，而对于风化强烈或淋溶-淀积作用显著的土壤，仍难以直接应用。此外还需注意，释光信号对土壤扰动的反映本质上源于对颗粒埋藏—曝光过程的分析，其信号本身并不能直接对应具体的扰动过程（如生物掘穴或冻融），解释时须结合土壤剖面的实际特征进行综合研判。

值得关注的是，针对上述释光量化扰动所面临的挑战，目前学界已在积极探索各种解决方案。例如，通过优化年龄模型以更精准地提取扰动组分^[72]；采用 Timepix 像素探测器原位测量 β 微剂量率^[73]，直接评估其对 D_e 分布的影响；利用长石等时线测年法减少外部剂量率干扰^[74]；通过数值模拟反演剂量率的时空变化^[75]；以及借助土壤—景观演化模型（如 ChronoLorica）从物质组成及地表动态过程综合评估各方面因素对释光年龄的影响^[68]。此外，将释光测年方法与其他反映扰动的手段相结合，也有助于实现多角度、多证据的综合解读，从而更全面地理解土壤扰动过程。

5 结论与展望

释光测年技术以地表广泛存在的石英、长石矿物为研究对象，测定矿物颗粒最后一次曝光的时间。随着技术方法的不断改进，特别是单颗粒测年技术和年龄模型的发展，目前已经能够从剖面释光信号中识别土壤扰动的存在，并量化土壤扰动程度和扰动速率。基于释光量化的土壤扰动促进了土壤发育过程解析、土壤生物扰动过程重建以及土壤侵蚀—地貌演化的研究。凭借其较高分辨率、较长时间跨度的优势，释光测年技术正逐渐成为近现代至千年时间尺度上重建土壤形成演化过程的

重要工具。尽管目前仍面临一些技术挑战,但通过优化材料选择、推进技术创新以及开展多方法综合验证,释光测年技术在土壤扰动量化研究领域将持续释放巨大应用潜力。

参考文献 (References)

- [1] Schaetzl R J, Thompson M L. Soils[M]. New York, NY: Cambridge University Press, 2015.
- [2] Wilkinson M T, Richards P J, Humphreys G S. Breaking ground: Pedological, geological, and ecological implications of soil bioturbation[J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 97(1/2/3/4): 257-272.
- [3] Whitesides C J, Butler D R. Bioturbation by gophers and marmots and its effects on conifer germination[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41(15): 2269-2281.
- [4] Yoo K, Ji J L, Aufdenkampe A, et al. Rates of soil mixing and associated carbon fluxes in a forest versus tilled agricultural field: Implications for modeling the soil carbon cycle[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2011, 116(G1): G01014.
- [5] Klaminder J, Krab E J, Larsbo M, et al. Holes in the tundra: Invasive earthworms alter soil structure and moisture in tundra soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 859: 160125.
- [6] Francis M L, Palcsu L, Molnár M, et al. Calcareous termite mounds in South Africa are ancient carbon reservoirs[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 926: 171760.
- [7] Bétard F. Insects as zoogeomorphic agents: an extended review[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, 46(1): 89-109.
- [8] Grigusova P, Larsen A, Brandl R, et al. Mammalian bioturbation amplifies rates of both hillslope sediment erosion and accumulation along the Chilean climate gradient[J]. *Biogeosciences*, 2023, 20(15): 3367-3394.
- [9] Germain D. Hidden engineers of the earth: Investigating the geomorphic impacts of small fossorial rodents in the Vaud Pre-Alps, Switzerland[J]. *Catena*, 2025, 250: 108798.
- [10] Darwin C. The formation of vegetable mould, through the action of worms, with observations on their habits[M]. New York: D. Appleton, 1882.
- [11] Dreibrodt S, Hofmann R, Dal Corso M, et al. Earthworms, Darwin and prehistoric agriculture-Chernozem genesis reconsidered[J]. *Geoderma*, 2022, 409: 115607.
- [12] Reimann T, Román-Sánchez A, Vanwalleghe T, et al. Getting a grip on soil reworking—Single-grain feldspar luminescence as a novel tool to quantify soil reworking rates[J]. *Quaternary Geochronology*, 2017, 42: 1-14.
- [13] Richards P J, Humphreys G S. Burial and turbulent transport by bioturbation: A 27-year experiment in southeast Australia[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(7): 856-862.
- [14] Don A, Hagen C, Grüneberg E, et al. Simulated wild boar bioturbation increases the stability of forest soil carbon[J]. *Biogeosciences*, 2019, 16(21): 4145-4155.
- [15] Humphreys G S. Bioturbation, biofabrics and the biomantle: An example from the Sydney Basin[M]//*Soil Micromorphology: Studies in Management and Genesis*. Amsterdam: Elsevier, 1993: 421-436.
- [16] Valdez A S, Bosch-Serra À D, Yagüe M R, et al. Earthworm community and soil microstructure changes with long-term organic fertilization[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2020, 66(7): 957-970.
- [17] Kaste J M, Heimsath A M, Bostick B C. Short-term soil mixing quantified with fallout radionuclides[J]. *Geology*, 2007, 35(3): 243.
- [18] Fisher B A, Aufdenkampe A K, Yoo K, et al. Soil carbon redistribution and organo-mineral associations after lateral soil movement and mixing in a first-order forest watershed[J]. *Geoderma*, 2018, 319: 142-155.
- [19] Gray H J, Keen-Zebert A, Furbish D J, et al. Depth-dependent soil mixing persists across climate

- zones[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(16): 8750-8756.
- [20] Zhang A M, Long H, Yang F, et al. Luminescence dating illuminates soil evolution[J]. Earth-Science Reviews, 2025, 265: 105103.
- [21] Aitken M J. An introduction to optical dating[M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [22] Huntley D J, Godfrey-Smith D I, Thewalt M L W. Optical dating of sediments[J]. Nature, 1985, 313(5998): 105-107.
- [23] Mahan S A, Rittenour T M, Nelson M S, et al. Guide for interpreting and reporting luminescence dating results[J]. GSA Bulletin, 2022, 135(5/6): 1480-1502.
- [24] Murray A, Arnold L J, Buylaert J P, et al. Optically stimulated luminescence dating using quartz[J]. Nature Reviews Methods Primers, 2021, 1: 72.
- [25] Duller G A T. Single-grain optical dating of Quaternary sediments: Why aliquot size matters in luminescence dating[J]. Boreas, 2008, 37(4): 589-612.
- [26] Wintle A G. Anomalous fading of thermo-luminescence in mineral samples[J]. Nature, 1973, 245(5421): 143-144.
- [27] Riedesel S. Not fade away - The persistence of fading in feldspar luminescence[J]. Ancient Thermoluminescence, 2025, 43(1): 9-19.
- [28] Zhang J J, Li S H. Review of the post-IR IRSL dating protocols of K-feldspar[J]. Methods and Protocols, 2020, 3(1): 7.
- [29] Heimsath A M, Chappell J, Spooner N A, et al. Creeping soil[J]. Geology, 2002, 30(2): 111.
- [30] Bateman M D, Frederick C D, Jaiswal M K, et al. Investigations into the potential effects of pedoturbation on luminescence dating[J]. Quaternary Science Reviews, 2003, 22(10/11/12/13): 1169-1176.
- [31] Bateman M D, Boulter C H, Carr A S, et al. Preserving the Palaeoenvironmental record in Drylands: Bioturbation and its significance for luminescence-derived chronologies[J]. Sedimentary Geology, 2007, 195(1/2): 5-19.
- [32] Wallinga J, Sevink J, van Mourik J M, et al. Luminescence dating of soil archives[M]//Reading the Soil Archives. 2019: 115-162.
- [33] Boulter C, Bateman M D, Frederick C D. Developing a protocol for selecting and dating sandy sites in East Central Texas: Preliminary results[J]. Quaternary Geochronology, 2007, 2(1/2/3/4): 45-50.
- [34] Bateman M D, Boulter C H, Carr A S, et al. Detecting post-depositional sediment disturbance in sandy deposits using optical luminescence[J]. Quaternary Geochronology, 2007, 2(1/2/3/4): 57-64.
- [35] Gliganic L A, Cohen T J, Slack M, et al. Sediment mixing in aeolian sandsheets identified and quantified using single-grain optically stimulated luminescence[J]. Quaternary Geochronology, 2016, 32: 53-66.
- [36] van der Meij W M, Riedesel S, Reimann T. Mixed Signals: Interpreting mixing patterns of different soil bioturbation processes through luminescence and numerical modelling[J]. Soil, 2025, 11(1): 51-66.
- [37] Zhang A M, Long H, Yang F, et al. Reconstructing mollisol formation processes through quantified pedoturbation[J]. Geophysical Research Letters, 2024, 51(11): e2024GL108189.
- [38] Zhang A M, Long H, Yang F, et al. Revisiting krotovina formation using luminescence dating – a case study from NE China[J]. Catena, 2025, 248: 108554.
- [39] Chen J J, Zong H R, Yan Z H, et al. Age and pedogenesis of alpine grassland soils on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau: Insights from optical dating[J]. Catena, 2025, 258: 109217.
- [40] Galbraith R F, Roberts R G, Laslett G M, et al. Optical dating of single and multiple grains of quartz from jinnium rock shelter, northern Australia: Part i, experimental design and statistical models[J].

Archaeometry, 1999, 41(2): 339-364.

[41] von Suchodoletz H, van Meer M, Kühn P, et al. Deciphering timing and rates of Central German Chernozem/Phaeozem formation through high resolution single-grain luminescence dating[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 4769.

[42] Choi J, van Beek R, Chamberlain E L, et al. Luminescence dating approaches to reconstruct the formation of plaggic anthrosols[J]. Soil, 2024, 10(2): 567-586.

[43] Choi J, Chamberlain E, Wallinga J. Variance in pIRIR signal bleaching for single grains of feldspar[J]. Quaternary Geochronology, 2024, 83: 101577.

[44] Madsen A T, Murray A S, Jain M, et al. A new method for measuring bioturbation rates in sandy tidal flat sediments based on luminescence dating[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 92(3): 464-471.

[45] Kristensen J A, Thomsen K J, Murray A S, et al. Quantification of termite bioturbation in a savannah ecosystem: Application of OSL dating[J]. Quaternary Geochronology, 2015, 30: 334-341.

[46] Michel E, Néel M C, Capowiez Y, et al. Making Waves: Modeling bioturbation in soils—are we burrowing in the right direction [J]. Water Research, 2022, 216: 118342.

[47] Johnson M O, Mudd S M, Pillans B, et al. Quantifying the rate and depth dependence of bioturbation based on optically-stimulated luminescence (OSL) dates and meteoric ^{10}Be [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2014, 39(9): 1188-1196.

[48] Cousins I T, MacKay D, Jones K C. Measuring and modelling the vertical distribution of semi-volatile organic compounds in soils. II: Model development[J]. Chemosphere, 1999, 39(14): 2519-2534.

[49] Furbish D J, Roering J J, Almond P, et al. Soil particle transport and mixing near a hillslope crest: 1. particle ages and residence times[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2018, 123(5): 1052-1077.

[50] Furbish D J, Roering J J, Keen-Zebert A, et al. Soil particle transport and mixing near a hillslope crest: 2. cosmogenic nuclide and optically stimulated luminescence tracers[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2018, 123(5): 1078-1093.

[51] Furbish D J, Schumer R, Keen-Zebert A. The rarefied (non-continuum) conditions of tracer particle transport in soils, with implications for assessing the intensity and depth dependence of mixing from geochronology[J]. Earth Surface Dynamics, 2018, 6(4): 1169-1202.

[52] van der Meij W M, Reimann T, Vornehm V K, et al. Reconstructing rates and patterns of colluvial soil redistribution in agrarian (hummocky) landscapes[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(12): 2408-2422.

[53] Zhang G L, Long H, Yang F. Understanding the formation time of black soils[J]. The Innovation Geoscience, 2023, 1(1): 100010.

[54] Yang F, Long H, Gong K Y, et al. Onset time and accretionary formation of Mollisols in Northeast China[J]. Science Bulletin, 2023, 68(18): 1999-2002.

[55] Ponomarenko D, Ponomarenko E. Describing krotovinas: A contribution to methodology and interpretation[J]. Quaternary International, 2019, 502: 238-245.

[56] Pietsch D. Krotovinas—soil archives of steppe landscape history[J]. Catena, 2013, 104: 257-264.

[57] Robert C. Aller. Bioturbation and remineralization of sedimentary organic matter[J]. Chemical Geology, 1994, 114(3/4), 331–345.

[58] Sprafke T, Kadereit A, Lauer F, et al. Key processes and timescales of tropical earth formation[J]. Earth-Science Reviews, 2024, 254: 104804.

[59] Nascimento D L, Chiapini M, Vidal-Torrado P, et al. The underestimated role of leaf-cutting ants in soil

- and geomorphological development in neotropical America[J]. *Earth-Science Reviews*, 2024, 248: 104650.
- [60] Yair A. Short and long term effects of bioturbation on soil erosion, water resources and soil development in an arid environment[J]. *Geomorphology*, 1995, 13(1/2/3/4): 87-99.
- [61] Rink W J, Dunbar J S, Tschinkel W R, et al. Subterranean transport and deposition of quartz by ants in sandy sites relevant to age overestimation in optical luminescence dating[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2013, 40(4): 2217-2226.
- [62] Cao Z H, Ke Q H, Zhang K L, et al. Millennial scale erosion and sedimentation investigation in karst watersheds using dating and palynology[J]. *Catena*, 2022, 217: 106526.
- [63] Peñuela A, Hayas A, Infante-Amate J, et al. A multi-millennial reconstruction of gully erosion in two contrasting Mediterranean catchments[J]. *Catena*, 2023, 220: 106709.
- [64] Zádorová T, Penížek V, Koubová M, et al. Landscape history mirrored in colluvial profiles: A multi-proxy approach from a Luvisol region in Central Czechia[J]. *Geoderma Regional*, 2024, 36: e00777.
- [65] Stockmann U, Minasny B, Pietsch T J, et al. Quantifying processes of pedogenesis using optically stimulated luminescence[J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64(1): 145-160.
- [66] Román-Sánchez A, Reimann T, Wallinga J, et al. Bioturbation and erosion rates along the soil-hillslope conveyor belt, part 1: Insights from single-grain feldspar luminescence[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(10): 2051-2065.
- [67] Román-Sánchez A, Laguna A, Reimann T, et al. Bioturbation and erosion rates along the soil-hillslope conveyor belt, part 2: Quantification using an analytical solution of the diffusion–advection equation[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(10): 2066-2080.
- [68] van der Meij W M, Temme A J A M, Binnie S A, et al. ChronoLorica: Introduction of a soil–landscape evolution model combined with geochronometers[J]. *Geochronology*, 2023, 5(1): 241-261.
- [69] Williams M A J. Termites and stone lines - traps for the unwary archaeologist[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 226: 106028.
- [70] Cunningham A C, Buylaert J P, Murray A S. Attenuation of beta radiation in granular matrices: Implications for trapped-charge dating[J]. *Geochronology*, 2022, 4(2): 517-531.
- [71] Peng J, Wang X L, Yin G M, et al. Accumulation of aeolian sediments around the Tengger Desert during the late Quaternary and its implications on interpreting chronostratigraphic records from drylands in North China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2022, 275: 107288.
- [72] Yates L A, Aandahl Z, Brook B W, et al. A new OSL dose model to account for post-depositional mixing of sediments[J]. *Quaternary Geochronology*, 2024, 81: 101502.
- [73] Fu X, Romanyukha A A, Li B, et al. Beta dose heterogeneity in sediment samples measured using a Timepix pixelated detector and its implications for optical dating of individual mineral grains[J]. *Quaternary Geochronology*, 2022, 68: 101254.
- [74] Xu D Y, Jin J H, Wei J J, et al. New chronology of K-feldspar isochron optical dating (iIRSL) in the late Pleistocene coastal aeolian deposits of Southeast China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2024, 649: 112315.
- [75] Diaz N, King G E, Valla P G, et al. Pedogenic carbonate nodules as soil time archives: Challenges and investigations related to OSL dating[J]. *Quaternary Geochronology*, 2016, 36: 120-133.

(责任编辑: 檀满枝)