

中国黄土释光测年与应用：过去、现在与未来

康树刚¹, 王旭龙¹, 王松娜^{1,2}

(1. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 中国黄土释光测年走过了近 40 年的历程, 这对于推动释光测年技术的进步和黄土古气候古环境研究的深入有重要意义。本文针对中国黄土(以黄土高原为主), 简要回顾了以多片法混合矿物热释光(TL)和红外释光(IRSL)测年技术为主的早期(20 世纪 70 年代末期至 21 世纪第一个十年初期)探索阶段的发展, 重点阐述了以成熟的单片再生剂量(SAR)法石英光释光(OSL)技术和延长测年年限的多种方法并存为特征的目前(21 世纪以来)研究进展。同时, 系统论述了释光测年技术在晚更新世以来中国黄土古气候古环境研究中的意义, 如在年代标尺建立、粉尘堆积速率变化重建、地层对比与划分、轨道和亚轨道尺度气候演变与气候事件揭示等方面的应用。另外, 也对将来中国黄土释光测年技术的发展方向和其在古气候古环境研究领域的应用前景进行了简单展望。

关键词: 中国黄土; 释光测年; 晚更新世; 石英 OSL; 年代标尺

Luminescence dating of Chinese loess and its applications: past, present and future

KANG Shugang¹, WANG Xulong¹, WANG Songna^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Background, aim, and scope It has been approximately forty years since the early luminescence dating of Chinese loess. Numerous efforts have been contributed to the luminescence dating technique development and its paleoclimate applications into Chinese loess. Thus, at this stage, it is important to present a systematic summary of the development of luminescence dating technique and its application into Chinese loess. **Materials and methods** This paper provides an overview and perspective of luminescence dating of Chinese loess and its applications in palaeoclimate area in the past approximately forty years. **Results** The luminescence dating development during early stage (1970s—2000s), which dominates by multiple-aliquot thermoluminescence (TL) and infrared stimulated luminescence (IRSL) dating of polymineral grains, will be briefly summarized. This paper will focus on the present (since 2000s) single-aliquot regenerative-dose (SAR) quartz optically stimulated luminescence (OSL) dating and other luminescence dating techniques that aim to extend dating limit

收稿日期: 2016-06-29; 录用日期: 2016-08-16

Received Date: 2016-06-29; Accepted Date: 2016-08-16

基金项目: 国家重大科学研究计划(2013CB955901, 2016YFA0601902); 国家自然科学基金项目(41290254); 中国科学院西部之光项目

Foundation Item: National Basic Research Program of China (2013CB955901, 2016YFA0601902); National Natural Science Foundation of China (41290254); West Light Foundation of Chinese Academy of Sciences

通信作者: 康树刚, E-mail: kshg@ieecas.cn

Corresponding Author: KANG Shugang, E-mail: kshg@ieecas.cn

in Chinese loess. Meanwhile, the applications of luminescence dating of Chinese loess at, such as, chronology construction, dust accumulation rate changes, strata division and correlation, paleoclimate evolution at orbital and sub-orbital timescales during the Late Pleistocene, are presented here. **Discussion** Here, advantages and disadvantages on dating material (e.g. quartz, feldspar), luminescence signal and measurement method at different stages are discussed in detail. The potential and shortage of application of luminescence dating into Chinese loess are systematically presented. **Conclusions** In summary, luminescence dating of Chinese loess has greatly contributed to and will continuously contribute to the development of luminescence dating technique and the research of paleoclimate and plaeoenvironment using Chinese loess. **Recommendations and perspectives** In addition, it is suggested that extending luminescence dating range, verifying the reliability of luminescence dating and increasing accuracy of dose rate estimation will be the key study areas in luminescence dating of Chinese loess. And, the potential of luminescence dating into Chinese loess in the future is deduced.

Key words: Chinese loess; luminescence dating; Late Pleistocene; quartz OSL; chronology

中国黄土高原黄土被认为是记录晚新生代以来构造尺度、轨道尺度(如冰期-间冰期尺度)和亚轨道尺度(如千年尺度)古气候古环境演化的重要载体,它清晰地记录了我国西北内陆干旱化进程、东亚冬夏季风的演化、东亚与北半球高纬和北大西洋地区的气候联系等(Porter and An, 1995; Liu and Ding, 1998; An, 2000; An et al, 2001; Ding et al, 2002; Guo et al, 2002; Sun and An, 2005; Qiang et al, 2011; Hao et al, 2012; Sun et al, 2012; Zhou et al, 2014)。各种时间尺度年代标尺的准确建立是奠定中国黄土在古气候研究领域地位的重要基础。基于磁极翻转的古地磁定年和基于黄土气候替代性指标与其他记录(如深海氧同位素、轨道参数等)对比的定年等非独立实测年代标尺建立模式在中国黄土,尤其在构造尺度和轨道尺度上的古气候研究中一直扮演着重要角色(Liu, 1985; Porter and An, 1995)。而作为应用于中国黄土中的少有独立实测绝对定年技术,释光测年相对放射性碳(^{14}C)测年所覆盖年代范围更广,应用也更为普遍。随着释光测年技术的进步和成熟,其在中国黄土轨道和亚轨道尺度古气候古环境(尤其晚更新世以来)研究中发挥着越来越重要的作用(Wintle, 1990; Singhvi et al, 2001; Roberts, 2008)。

在天然条件下,石英、长石等碎屑矿物在沉积前经历了太阳光晒退或者热作用,使释光信号(部分)归零。沉积后,矿物晶体接受周围环境U、Th和K等放射性元素提供的 α 、 β 粒子和 γ 射线以及部分宇宙射线的能量(例如用Gy表示),

开始积累释光信号。在百万年以来的地质历史上,相对U、Th和K放射性元素长达亿年的半衰期来说,可以认为晶体周围环境对矿物晶体的剂量率(如Gy/ka)为一恒定值。这样就可实验室内通过获得矿物晶体积累的能量(等效剂量, D_e)及其环境剂量率(D_r)来得到沉积物的埋藏年龄,即: 年龄 = $D_e / (a \times D_\alpha + D_\beta + D_\gamma + D_c)$, 其中 D_α 、 D_β 、 D_γ 和 D_c 分别来自 α 粒子、 β 粒子、 γ 射线和宇宙射线的贡献, a 代表 α 粒子的释光效率(Aitken, 1985, 1998)。实验室内,用热的形式激发矿物晶体而获取的释光信号称为热释光(TL),同样,也可用光来激发矿物晶体以获得光释光(OSL)信号。

中国黄土高原黄土很好地满足了释光测年的基本原理:(1)中国黄土多为细粉砂风成沉积,粉尘颗粒在沉积前的风力搬运过程中有充分的机会接受太阳光照射,因此释光信号归零机制明确;(2)黄土高原地处我国干旱-半干旱区交界地带,降雨量较低,黄土中含水量也较低,从而放射性U、Th和K元素在地层中的分布相对稳定,有利于环境剂量率的稳定;(3)黄土-古土壤序列中放射性U、Th和K元素的浓度相对均一,矿物晶体周围剂量辐射可近似按均质球体计算,有利于环境剂量率的准确确定;(4)两种常用的测年矿物,石英和长石,在黄土中含量较高,测年材料易于获取;(5)由于中国黄土风成沉积的本质,无论石英还是长石矿物,各种释光信号灵敏度普遍较高,能完全满足实验室测量的需求(Singhvi et al, 2001; Lu et al, 2007; Roberts, 2008; Lai,

2010; Kang et al, 2013)。另外, 中国黄土第四纪以来, 尤其晚更新世以来, 地层划分与对比有着十分丰富的可靠资料, 且有很好的年代学基础 (Liu, 1985; Liu and Ding, 1998; An, 2000; Ding et al, 2002)。因此, 释光测年技术在中国黄土中的应用有着很多优势, 这不仅能为中国黄土提供独立年代标尺, 同时, 中国黄土也成为检验释光测年技术可靠性的重要实验对象。

沉积物释光测年技术在过去半个多世纪以来发展迅速, 大体上实现了从 TL 到 OSL 测年的重要转变 (Aitken, 1985, 1998; Wintle, 2008)。尤其是 2000 年, 感量校正的单片再生剂量 (SAR) 法 OSL 测年技术的提出 (Murray and Wintle, 2000), 大大提高了释光测年的精度和准确度, 使得释光测年技术在过去 15 年中进入了一个成熟的发展时期, 从而更广泛地应用于多种沉积物可靠年代的测定 (Murray and Olley, 2002; Lian and Roberts, 2006; Wintle, 2008; Rhodes, 2011)。从沉积物释光测年的开始至今, 黄土的测年一直是其重要应用领域。关于黄土释光测年的发展, 已有若干文章对不同时期的结果进行了阶段性总结 (Wintle, 1990; Singhvi et al, 2001; Roberts, 2008), 但一直缺乏专门针对中国黄土测年的总结性报道。从 20 世纪 70 年代末马兰黄土 TL 测年的初步尝试 (李继亮等, 1977) 至今, 中国黄土释光测年已经走过了将近 40 年的历程, 很有必要对以往工作进行系统性回顾, 这对于推动中国黄土释光测年技术的自身进步和古气候古环境研究的深入均有一定意义。本文将以约 2000 年为时间节点扼要回顾以混合矿物 TL 和红外释光 (IRSL) 测年为代表的中国黄土测年技术及其应用的早期发展, 重点阐述当今中国黄土石英 OSL 测年技术及其他延长释光测年年限技术 (如石英回授光释光测年 (ReOSL)、长石红外后高温红外释光测年 (pIRIR)) 的进步和应用, 另外, 也对将来的发展方向做一简单展望。

1 早期中国黄土释光测年技术与应用

1.1 测年技术

1.1.1 测年材料

沉积物释光测年主要用到石英和长石两种矿物, 考虑到沉积物的粒度组成和 α 粒子的贡献, 在矿物颗粒粒径选择上一般常用细颗粒 (如 4—

11 μm) 或粗颗粒 (如 90—125 μm) (Aitken, 1985, 1998)。中国黄土矿物组成中石英含量最高, 长石次之 (Liu, 1985), 但限于中国黄土以细粉砂 (如 2—50 μm) 为主, 且早期对于石英提取技术的相对不成熟, 这导致在早期的中国黄土释光测年中大多以混合矿物为主。其中, 4—11 μm 混合矿物在 TL (Lu et al, 1987b, 1988a, 1988b; 卢演涛和赵华, 1991; Forman, 1991; Li and Wintle, 1992; Zhou et al, 1992; Musson et al, 1994; 孙继敏等, 1997; Sun et al, 1998; Frechen, 1999; 王文远等, 2000)、IRSL (陈杰等, 1997; 张景昭和赖忠平, 1997; 赵华等, 1998, 2000; 赖忠平等, 1999; Frechen, 1999; Roberts and Wintle, 2001; Watanuki and Tsukamoto, 2001; 赵华, 2003; Stokes et al, 2003; Watanuki et al, 2003; Wang et al, 2006b; Buylaert et al, 2007; Kang et al, 2010)、红外后蓝光释光 (post-IR OSL) (Roberts and Wintle, 2001; 赵华, 2003; Stokes et al, 2003; Watanuki et al, 2003; Wang et al, 2006b) 和绿光释光 (GLSL) (赵华等, 1998, 2000) 测年中最为常用。当然也存在部分基于 TL 或者 GLSL 测年的研究采用细颗粒 (卢良才和李虎侯, 1984; 李虎侯, 1985, 1990; 黄宝林和卢良才, 1989; 陈杰等, 1997; Watanuki and Tsukamoto, 2001) 或者粗颗粒石英 (Lu et al, 1987a; 卢演涛等, 1988) 测年的报道, 尽管有些报道中并未对石英 (尤其是细颗粒石英) 的纯度提出数据上的支持。

1.1.2 测年释光信号

1.1.2.1 热释光 (TL)

由于对马兰黄土 (L_1 , 堆积于末次冰期) 断代的客观需求, TL 技术被引入中国黄土测年 (李继亮等, 1977; 卢良才和李虎侯, 1984; 李虎侯, 1985; Lu et al, 1987b, 1988b)。早期, TL 测年技术被主要用于末次冰期黄土 L_1 和末次间冰期古土壤 S_1 的年代测定 (李虎侯和孙建中, 1986; Lu et al, 1987a, 1987b, 1988b; 黄宝林和卢良才, 1989; Forman, 1991; Musson et al, 1994; Sun et al, 1998; Frechen, 1999)。测年一般采用较为稳定的 325 $^{\circ}\text{C}$ 或者 375 $^{\circ}\text{C}$ TL 峰, 上述峰值的 TL 信号被认为有着较高的饱和剂量和热稳定性, 其测年上限甚至可达约 100—150 ka (Lu et al, 1987a, 1988b)。Lu et al (1987a, 1988b) 对 斋

堂和蓝田剖面的研究表明,粗颗粒石英和细颗粒混合矿物的 TL 年代在约 150 ka 以来有着很好的一致性,年代结果也与古地磁地层结果相一致;Forman (1991) 在洛川剖面获得了与斋堂 (Lu et al, 1987a) 和蓝田剖面 (Lu et al, 1988b) 可以很好对比的末次冰期黄土细颗粒混合矿物 TL 年代。但是,黄土 TL 测年面临着不可回避的问题:

(1) 细颗粒测年多采用混合矿物, TL 信号来源复杂,既有石英和长石的贡献,也可能部分来自其他矿物,长石矿物又具有异常衰退现象 (Wintle, 1990; Roberts, 2008); (2) 石英和细颗粒混合矿物 TL 信号普遍较为难以晒退,信号残留量较大,大大增加等效剂量测量的不确定性,尤其是对于年轻黄土 (如全新世黄土) (Lu et al, 1988a); (3) TL 测年中感量变化的问题很难予以评估或校正,导致等效剂量测量的低估或偏差 (Zhou and Wintle, 1994)。

1.1.2.2 红外释光 (IRSL)

随着 OSL 测年技术的提出 (Huntley et al, 1985), 长石的 IRSL 信号由于具有易晒退、残余等效剂量低、饱和剂量较高等特点,且红外光源 (约 880 nm) 廉价、稳定,所以 IRSL 信号开始应用于沉积物测年 (Hütt et al, 1988)。但长石 IRSL 信号面对着异常衰退的天然缺陷,会导致等效剂量的低估 (Wintle, 1973)。Musson et al (1994) 首先应用细颗粒混合矿物 IRSL 信号对黄土高原南缘的刘家坡剖面末次冰期黄土进行了测年,并与 TL 测年结果进行了对比,他们认为 IRSL 信号相对 TL 信号明显低估,并认为可能是由于 IRSL 信号的不稳定 (即异常衰退) 导致。即便在部分研究中对 IRSL 感量变化予以了校正,细颗粒混合矿物 IRSL 年龄相对 TL、post-IR OSL 和石英 OSL 年龄的低估现象在后续的中国黄土测年中也被广泛证实 (Frechen, 1999; 赖忠平等, 2001; 陈淑娥等, 2003; Watanuki et al, 2003; Wang et al, 2006b; Buylaert et al, 2007; Kang et al, 2010; Jia et al, 2011)。另外,中国黄土 IRSL 测年与其他测年结果的对比在不同研究之间还表现出较为复杂的现象,譬如,IRSL 年龄与细颗粒混合矿物或者细颗粒石英 GLSL 年龄的一致性 (陈杰等, 1997; 赵华等, 1998, 2000; Watanuki and Tsukamoto, 2001)、IRSL 年龄相对 post-IR OSL 年龄的偏高 (Roberts and Wintle, 2001) 和一致 (Stokes et al, 2003) 等。

总之,细颗粒混合矿物 IRSL 信号的异常衰退和其他问题 (如感量变化) 阻碍了其为中国黄土提供准确可靠的年龄。

1.1.2.3 绿光释光 (GLSL)

用波长约 500 nm 的绿光光束对石英矿物进行激发,便获得了 GLSL 信号。GLSL 信号在中国黄土中的应用出现在成熟的石英蓝光 (约 470 nm) 释光 (即常说的石英 OSL) 测年之前,使用时间较短,仅被少许研究应用于中国黄土细颗粒石英 (陈杰等, 1997; Watanuki and Tsukamoto, 2001) 和细颗粒混合矿物 (赵华等, 1998, 2000)。但如上所述,这些研究的结果均表明了 GLSL 与细颗粒混合矿物 IRSL 测年结果的基本一致性。现在看来,这有可能与细颗粒石英提取的纯度不够而导致长石矿物对 GLSL 信号的贡献有关。

1.1.2.4 红外后蓝光释光 (post-IR OSL)

廉价、稳定和寿命较长的蓝光 (约 470 nm) LED 作为激发光源的使用,对于 OSL 测年来说是一大进步。把用 470 nm 蓝光激发石英矿物所获得的信号称为蓝光释光 (BLSL),通常即称为石英 OSL。经典的 SAR 法的提出是基于粗颗粒石英 OSL 信号 (Murray and Wintle, 2000)。但是,对于细颗粒混合矿物来说,由于当时提取纯石英存在技术上的难题,或者提取的石英纯度不够等因素, Banerjee et al (2001) 便提出了 SAR 法红外-蓝光联合激发法来获取细颗粒混合矿物的石英 OSL 信号。即,先使用红外光对细颗粒混合矿物进行激发,可获得 IRSL 信号,再使用蓝光进行激发,即可获得 post-IR OSL 信号,而该信号被认为以石英 OSL 信号为主。

Roberts and Wintle (2001) 首次利用 SAR 法红外-蓝光联合激发法将细颗粒混合矿物 post-IR OSL 信号应用到中国黄土高原西部的多哇全新世剖面中,虽未明确指出 IRSL 和 post-IR OSL 年龄哪一种更为可靠,但相对 IRSL 年龄的混乱, post-IR OSL 信号所产出的年代在地层层序上更为合理,该信号后来也被他们用于重建多哇剖面的粉尘堆积速率变化中去 (Roberts et al, 2001)。与 Roberts and Wintle (2001) 运用相同的方法但得出不同结论的是, Stokes et al (2003) 在对张掖阶地之上的黄土进行测年后指出, IRSL 和 post-IR OSL 在测量过去约 50 ka 的黄土年龄上均较可靠,且具

有很好的一致性。Watanuki et al (2003) 基于对镇江和乌鲁木齐的细颗粒混合矿物 IRSL 和 post-IR OSL 以及细颗粒石英 OSL 测年后则认为, 和 IRSL 相比, post-IR OSL 年龄可能更为可靠, 虽然二者相对石英 OSL 年龄都会产生不同程度的低估, 并建议在使用 post-IR OSL 测年时, 应该进行异常衰退检验。Wang et al (2006b) 提出, 可以使用红外激发时间与 post-IR OSL 等效剂量坪的方式来评估细颗粒混合矿物红外激发时间, 当红外激发时间在等效剂量坪区间时, post-IR OSL 信号与细颗粒石英 OSL 信号的快和中组分很接近, 且细颗粒混合矿物 post-IR OSL 与石英 OSL 年龄在约 300 Gy 范围内保持很好的一致性。但多数基于细颗粒混合矿物 post-IR OSL 的研究仍指出, 石英 OSL 测年仍然是最好的选择 (Wang et al, 2006b; Zhang and Zhou, 2007)。

上述可见, 虽然细颗粒混合矿物 post-IR OSL 信号能提供相对 IRSL 信号更为可靠的年龄, 甚至与石英 OSL 相一致的年代。但 post-IR OSL 信号有时难免会携带来自于长石或者其他矿物的释光信号, 因此, 相对而言, 石英 OSL 信号仍是最好选择 (见下文)。

1.1.3 测年方法

在 SAR 法 (Murray and Wintle, 2000) 尚未提出之前, 释光测年多采用多片法, 即测量等效剂量是在多个测片上完成的, 譬如, 若干测片用于测量天然释光信号强度, 另有若干测片用于建立实验室再生剂量响应曲线, 也就是常说的再生剂量法; 也可直接在不同的天然测片上附加不同的实验室再生剂量, 这就是所谓的附加法。SAR 法的出现, 使得每一个测片都可获得一个等效剂量值, 大大提高了等效剂量测量的精度和准确度。

在中国黄土 TL 测年时期, 不管细颗粒混合矿物、细颗粒石英还是粗颗粒石英, 在测量等效剂量时几乎都采用了多片法 (李继亮等, 1977; 李虎侯, 1982; 卢良才和李虎侯, 1984; 李虎侯和孙建中, 1986; Lu et al, 1987a, 1987b, 1988b, 1999b; Forman, 1991; Musson et al, 1994; Frechen, 1999), 具体又包含了多种方法, 如再生热释光法 (Readhead, 1982)、部分晒退法 (Wintle and Huntley, 1982)、残余热释光法 (Singhvi et al, 1982) 等。在此, 不再对这些方法进行详细介绍, 在上述及其他文献 (Lu et al, 1987b; Berger,

1988; Wintle, 1990; Zöller and Wagner, 1990) 中均有详细描述。而对于细颗粒混合矿物 IRSL 和 GLSL 信号的测量, 在未出现 SAR 法之前, 均使用多片再生剂量 (MAR) 法或者多片附加剂量法 (Musson et al, 1994; 陈杰等, 1997; 赵华等, 1998, 2000; Frechen, 1999; 赖忠平等, 2001; Watanuki and Tsukamoto, 2001)。在比较早的 TL、IRSL 和 GLSL 测年中, 均未考虑感量变化的校正。后来, 随着考虑了感量校正的细颗粒混合矿物红外-蓝光联合激发法的出现, IRSL 和 post-IR OSL 等效剂量开始均使用 SAR 法测量 (Roberts and Wintle, 2001; 陈淑娥等, 2003; Stokes et al, 2003; Watanuki et al, 2003; Wang et al, 2006b; Jia et al, 2011; Song et al, 2012), 这可谓是中国黄土细颗粒混合矿物释光测年上的一个重要进步。

1.2 应用

尽管早期的 TL、IRSL 和 post-IR OSL 信号在中国黄土的测年中存在一些问题, 但这些早期的测年结果的确对于理解晚更新世中国黄土的沉积和古气候演化具有重要意义。早期的测年结果最主要的贡献在于建立晚更新世以来中国黄土的大致年代标尺, 并基本奠定了末次冰期-间冰期旋回中国黄土-古土壤序列与深海氧同位素 (MIS) 各个阶段的对应性, 即末次冰期马兰黄土 L_{1-3} 、 L_{1-2} 和 L_{1-1} 分别对应于 MIS4、MIS3 和 MIS2, 而末次间冰期古土壤 S_1 则对应于 MIS5 (也有人提出仅对应于 MIS5e) (卢良才和李虎侯, 1984; 李虎侯和孙建中, 1986; Lu et al, 1987a, 1987b, 1988b, 1999b; 黄宝林和卢良才, 1989; 卢演涛和赵华, 1991; Forman, 1991; Musson et al, 1994; 孙继敏等, 1997; Fang et al, 1997; 赵华等, 1998; Frechen, 1999; 赖忠平等, 2001; Roberts and Wintle, 2001; Wang et al, 2006b)。Lu et al (1987a, 1987b, 1988b) 较早系统建立了斋堂和蓝田剖面末次冰期-间冰期旋回的 TL 年代标尺, 并将地层进行了划分和与深海记录对比, 这些结果也基本得到了来自其他剖面的 TL (黄宝林和卢良才, 1989; 卢演涛和赵华, 1991; Forman, 1991; Musson et al, 1994; 孙继敏等, 1997; Frechen, 1999) 和 IRSL (赵华等, 1998; Frechen, 1999; 赖忠平等, 2001) 测年结果的支持。上述地层划分与年代标尺的建立有力地促进了晚

更新世以来中国黄土记录的轨道尺度上东亚冬季季风演化 (An et al, 1991a, 1991b) 和末次冰期千年尺度上气候事件 (Porter and An, 1995; Chen et al, 1997) 的研究。另外, 早期的 TL (李虎侯, 1986; 黄宝林和卢良才, 1989)、IRSL (赵华等, 1998) 和 post-IR OSL (Roberts et al, 2001) 测年结果还试图去揭示中国黄土粉尘堆积速率变化。尽管这些测年结果, 尤其是 TL 和 IRSL 测年结果, 不足以重建高准确度的粉尘堆积速率变化, 但是在一定时间尺度上仍具有重要意义。譬如, 赵华等 (1998) 根据邙山约 80 m 厚马兰黄土的 24 个细颗粒混合矿物多测片 IRSL 年龄, 详细计算了亚轨道尺度上的粉尘堆积速率变化, 指出存在 4 个明显的粉尘堆积加快和 3 个明显的粉尘堆积减缓事件; Roberts et al (2001) 应用细颗粒混合矿物 SAR 法红外-蓝光联合激发法对黄土高原西部的多哇全新世剖面进行了 post-IR OSL 测年, 14 个年代结果指示, 从早全新世至 2.5 ka, 粉尘堆积速率约为 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 从 2.5 ka 到 0.68 ka, 粉尘堆积大大加快, 达到 $0.8 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 而从 0.68 ka 到 0.41 ka, 粉尘堆积速率异常高, 可达 $3.4 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 并据此推测, 后两个粉尘堆积较快的事件可能是人类耕作活动的加强所导致。

2 目前中国黄土释光测年技术与应用

2.1 测年技术

2.1.1 测年材料

不同于早期, 目前中国黄土的释光测年多强调使用纯度较高的单矿物, 主要有石英和长石两种, 毫无疑问, 单矿物的使用大大提高了释光测年数据的可靠性。

2.1.1.1 石英

沉积物粗颗粒石英提取技术 (氢氟酸刻蚀法) 一直比较成熟, 2000 年以后, 随着氟硅酸溶蚀法 (Jackson et al, 1976; Berger et al, 1980) 提取中颗粒 (如 $38\text{—}63 \mu\text{m}$) 和细颗粒石英技术的完善和普及, 再加上中国黄土以细粉砂为主, 越来越多的研究者在中国黄土中开始使用细颗粒和中颗粒石英, 譬如, $4\text{—}11 \mu\text{m}$ 的细颗粒石英 (Zhou and Shackleton, 2001; Watanuki et al, 2003; 王旭龙等, 2005b, 2005b; Wang et al, 2006a, 2006b, 2006c, 2007; Lu et al, 2007; 康树刚等, 2009; Feng et al, 2011; Kang et al, 2011, 2012, 2013,

2015b; Meng et al, 2015; Zhang et al, 2015; Zhou et al, 2010), $38\text{—}63 \mu\text{m}$ (Lai and Murray, 2006; Lai et al, 2006, 2008, 2010; Lai, 2006; Lai and Brückner, 2008; Chapot et al, 2012; E et al, 2012; Long et al, 2012; Li et al, 2015c; Song et al, 2015)、 $40\text{—}60 \mu\text{m}$ (鹿化煜等, 2006; Stevens et al, 2006, 2007a, 2007b, 2008) 和 $45\text{—}63 \mu\text{m}$ 的中颗粒石英 (Lai and Wintle, 2006; Lai, 2006, 2010; 覃金堂和周力平, 2007; Lai et al, 2007b; Lai and Fan, 2014; Qiu and Zhou, 2015), 以及 $50\text{—}80 \mu\text{m}$ (Sun et al, 2010)、 $50\text{—}90 \mu\text{m}$ (Sun et al, 2012)、 $63\text{—}90 \mu\text{m}$ (Buylaert et al, 2008; Lu et al, 2013; Fu et al, 2015; Li et al, 2015c; Yi et al, 2015; Zhao et al, 2015)、 $63\text{—}100 \mu\text{m}$ (Yang et al, 2014)、 $90\text{—}160 \mu\text{m}$ (Küster et al, 2006)、 $63\text{—}150 \mu\text{m}$ (Zhao et al, 2007) 和 $90\text{—}125 \mu\text{m}$ (Yi et al, 2012; Fu et al, 2015) 的粗颗粒石英。需要注意的是, 上述研究中细颗粒和中颗粒石英只采用了氟硅酸溶蚀, 因此在计算环境剂量率时, 均需考虑 α 粒子贡献。对于细颗粒石英, 前人有限的测量结果表明, α 有效系数在不同样品之间有一定差异, 但平均值在 0.04 左右 (Rees-Jones, 1995; Lu et al, 2007; Lai et al, 2008; Kang et al, 2013), 这一常数被广泛用于上述中国黄土细颗粒测年, 同时也被用于中颗粒石英测年。而对于粗颗粒石英, 研究者们均采用了氢氟酸刻蚀的方法来去除 α 粒子的贡献, 因此计算环境剂量率相对较简单。另外, 对于中国黄土不同粒径的石英释光信号亮度往往表现出越细越亮, 越粗越暗的现象, 这意味着越细的颗粒越有利于实验室的测量。当然, 已有的上述研究结果表明, 不同粒径的中国黄土石英均能满足实验室的测量需求。中国黄土采用不同的石英粒径测年也提供了一种检验释光测年是否可靠的自检验, 尤其是当使用不同粒径的石英在同一剖面进行测年时。

2.1.1.2 富钾长石

中国黄土的粒度组成决定了提取细颗粒长石一般技术上有难度, 但是, 对于较靠近沙漠的区域, 譬如黄土高原的西部和北部, 还是有一定潜力提取中颗粒和粗颗粒长石。近年来, 随着用以延长释光测年年限的富钾长石 pIRIR 测年 (Buylaert et al, 2009, 2012; Li and Li, 2011a; Thiel et al,

2011) 以及其他基于富钾长石的试图延伸释光测年的方法的出现, 如远红外(波长大于 665 nm) 释光测年(Lai et al, 2003) 和等时线法测年(Li et al, 2011), 一些研究者就使用重液(如密度为 $2.58 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 分离中国黄土中的富钾长石来作为测年材料, 譬如, 38—78 μm (Lai et al, 2003) 和 38—63 μm (Li et al, 2015c) 的中颗粒富钾长石和 63—90 μm (Li and Li, 2011a, 2012; Fu et al, 2012, 2015; Li et al, 2014b, 2015c; Buylaert et al, 2015; Chen et al, 2015; Meng et al, 2015; Yi et al, 2015; Zhao et al, 2015)、90—125 μm (Li et al, 2011, 2013; Chen et al, 2015; Fu et al, 2015)、90—180 μm (Buylaert et al, 2015)、125—150 μm (Li et al, 2011, 2013; Li and Li, 2011a)、150—180 μm (Li et al, 2011, 2013; Li and Li, 2011b;)、180—212 μm (Li et al, 2011, 2013; Li and Li, 2011a) 和 212—250 μm (Li et al, 2011) 的粗颗粒富钾长石。另外, 为去除 α 粒子贡献, 上述研究中富钾长石都采用了氢氟酸不同时间的刻蚀。

2.1.1.3 混合矿物

在中国黄土 pIRIR 测年中, 也有研究者直接使用细颗粒(Buylaert et al, 2011) 和 45—63 μm 中颗粒(Qiu and Zhou, 2015) 混合矿物作为测年材料。当然, 这种情况下, 就要考虑 α 有效系数的问题, 譬如, Qiu and Zhou (2015) 和 Buylaert et al (2011) 对 4—11 μm 和 45—63 μm 混合矿物的 α 有效系数均采用了已发表的参考值 0.08 (Rees-Jones, 1995)。值得进一步研究的是, 中国黄土细颗粒混合矿物与中或者粗颗粒富钾长石是否能获取一致的 pIRIR 年龄, 若能, 则对于 pIRIR 测年来说, 前处理流程将大大简化。

2.1.2 测年释光信号

在目前国际释光测年技术以成熟石英 OSL 测年和对新的延长释光测年年限方法研究的大趋势下, 中国黄土的释光测年也呈现出两大特点: (1) 在晚更新世以来, 尤其是末次冰期以来的黄土测年中使用成熟的石英 OSL 信号 (Murray and Wintle, 2000; Wintle and Murray, 2006); (2) 利用新的信号, 譬如石英 ReOSL (Wang et al, 2006a, 2006c, 2007)、富钾长石 pIRIR (Buylaert et al, 2009, 2012; Li and Li, 2012) 等, 突破传统石英 OSL 测年

年限, 期望能够测量中更新世以来的黄土。

2.1.2.1 石英光释光 (OSL)

如上所述, 一般把用约 470 nm 的蓝光(如: LED) 激发石英所产生的蓝光释光信号称为石英 OSL 信号。使用石英 OSL 测年的主要优势在于光晒退很快(譬如太阳光下若干分钟) 和信号具有足够高的热稳定性(譬如室温达 $\sim 10^8$ 年) (Murray and Wintle, 1999; Li and Chen, 2001)。可以说石英 OSL 是释光测年领域研究最为详细、应用最为广泛的唯一测年信号, 应用其测年已形成一套较为标准的程序, 测年的可靠性也经过了大量检验 (Murray and Wintle, 2000; Murray and Olley, 2002; Duller, 2004; Wintle, 2008; Madsen and Murray, 2009; Preusser et al, 2009; Rhodes, 2011)。2000 年以来发展的石英 OSLSAR 或感量校正的 MAR 法测年中最核心的一点在于使用了试验剂量 OSL 信号来校正感量变化 (Murray and Wintle, 2000)。中国黄土应用石英 OSL 信号测年有几大优势: (1) 黄土的风成本质决定了石英颗粒沉积前 OSL 信号的完全晒退; (2) 石英 OSL 信号灵敏度普遍能满足实验室测量的需求; (3) 各种粒径, 尤其是颗粒和细颗粒, 石英含量丰富; (4) 石英 OSL 信号以快速组分为主(见下文)。再加上古气候研究对于高准确度年代标尺的客观需求, 因此, 过去 15 年中, 尤其过去 10 年, 石英 OSL 信号被广泛应用于晚更新世以来中国黄土测年 (Roberts, 2008)。

石英 OSL 信号中可包含快、中、慢等多个组分 (Bailey et al, 1997), 应用 SAR 法石英 OSL 测年的一个基本前提是石英 OSL 信号以快速成分为主 (Murray and Wintle, 2000; Wintle and Murray, 2006)。现已有大量基于成分分解、线性激发、积分区间坪等的研究表明中国黄土多种粒级的石英 OSL 信号均以快速组分为主 (Zhou and Shackleton, 2001; Wang et al, 2006b; Lai, 2010; Zhou et al, 2010; Kang et al, 2012), 这一点也可简单地众多石英 OSL 衰减曲线的形态(快速衰减) 得以证实。因此, 在应用 SAR 法或者感量校正的 MAR 法 (Zhou and Shackleton, 2001; 王旭龙等, 2005b; Lu et al, 2007; Kang et al, 2012) 测量中国黄土时, 各种常规检验参数, 如回复比例、循环比例和剂量恢复比例等往往具有良好的表现 (Lai and Wintle, 2006; Stevens

et al, 2007a; Buylaert et al, 2008; Sun et al, 2010; Kang et al, 2013), 这也说明了感量校正的石英 OSL 测年在中国黄土中有良好适用性。

石英 OSL 等效剂量的测量能力与其生长曲线的形态密切相关。传统认为, 石英 OSL 信号在较低的再生剂量, 如 150—200 Gy, 会发生饱和现象 (Wintle and Murray, 2006), 但近几年的研究中发现再生剂量在 200—1000 Gy, 部分样品石英 (尤其对于细颗粒和中颗粒) OSL 信号还具有一个近似线性或者饱和指数的增长成分, 但对于这一成分是否能用于准确测年还有争议 (Watanuki et al, 2005; Murray et al, 2007; Lai, 2010; Lowick et al, 2010; Pawley et al, 2010; Kang et al, 2012)。中国黄土细颗粒和中颗粒石英的这一现象十分明显, 譬如, Lai (2010) 发现洛川剖面 45—63 μm 的中颗粒石英在超过约 400 Gy 的再生剂量后依然有一个线性增长的成分, 直到至少 700 Gy, 但他们认为中颗粒石英 OSL 可靠的等效剂量测量上限仅为约 230 Gy; Kang et al (2012) 利用渭南剖面细颗粒石英样品也发现了类似 Lai (2010) 的现象, 即直至 700 Gy, 生长曲线还未看到明显饱和, 不同的是, 他们采用了双饱和指数的形式来描述生长曲线, 通过与细颗粒石英 ReOSL 等效剂量对比, 他们认为可靠的感量校正的 MAR 法细颗粒石英 OSL 等效剂量上限为约 300 Gy, 这之前 Wang et al (2006b) 的结论相一致。对于较高剂量区间的这一线性或者饱和指数成分存在的机制目前认识尚不清晰, Lowick et al (2010) 认为这可能与石英紫外复合中心和非紫外复合中心对于陷阱电子的竞争相关, Lai (2010) 则认为这一成分的出现只在实验室条件下成立, 是由于实验室的辐射所致, 在天然条件下该成分并不存在。

对比天然条件和实验室条件下的再生剂量曲线形态是理解上述问题的一个途径, 当然, 这需要有已知年龄和环境剂量率的样品为前提。通过借助洛川剖面末次冰期-间冰期旋回的天文调谐年代 (Lu et al, 1999a), Lai and Fan (2014) 建立了约 450 Gy 以内的天然条件下的生长曲线形态, 结果表明, 天然与实验室生长曲线形态类似, 具有约 130 Gy 的 D_0 值, 意味着能测试约 260 Gy 的可靠等效剂量, 这与 Lai (2010) 建议的约 230 Gy 的可靠等效剂量测量上限相接近。同样在洛川剖

面, Chapot et al (2012) 基于 7 个 70 万年以来样品 (其中末次间冰期以来 3 个) 的轨道调谐年代 (Ding et al, 2002), 发现在比较大的剂量区间 (如超过约 500 Gy) 天然和实验室生长曲线形态明显不一致, 即实验室条件下的线性或者饱和指数增长, 在天然条件下并不存在, 他们认为, 在洛川剖面使用 35—63 μm 石英 SAR 法 OSL 可以测量的可靠等效剂量在约 150 Gy 之内。需要注意的是, 在采用类似上述研究对比中国黄土天然和实验室条件下生长曲线的形态时, 难以回避两个问题:

(1) 已知年代为间接形式获得, 在一定时间尺度内可靠性如何; (2) 环境剂量率的准确客观评估。上述两个问题会直接影响期望等效剂量的准确性。

目前, 对于石英 OSL 在中国黄土中的测年上限, 不同的研究者还存在不同的认识, 在探讨这个问题之前, 需要明确的是使用了何种粒径的石英和采用了什么测试方法。Zhou and Shackleton (2001) 认为中国黄土细颗粒石英 SAR 法 OSL 测年上限约为 200 Gy, 相当于约 55 ka, 而 Wang et al (2006b) 则认为洛川剖面可以获得约 300 Gy 的等效剂量, 相当于末次冰期的开始。而使用感量校正的 MAR 法, 细颗粒石英 OSL 的可靠测年范围可达渭南剖面末次冰期开始 (Kang et al, 2012), 甚至可能达到洛川剖面末次间冰期开始 (Lu et al, 2007)。另外, Lu et al (2007) 还发现, 等效剂量在 400 Gy 以内 SAR 法相对 MAR 法存在最高达 8% 的低估。覃金堂和周力平 (2007) 对黄土高原西北部的靖远剖面使用 45—63 μm 的中颗粒石英测年后认为, SAR 和感量校正的 MAR 法 OSL 所测量年龄相一致, 对于倒数第二次冰期 (L_2) 和末次间冰期 (S_1) 交界处的样品均相对客观年龄低估了约 30%—50%。在随后的研究中, Qin and Zhou (2009) 提出使用 25 Gy 的单位剂量脉冲辐照可以有效解决靖远剖面末次冰期早期黄土细颗粒石英 SAR 法 OSL 测年的低估现象。Buylaert et al (2007, 2008) 对黄土高原西部的四个剖面 (乐都、土巷道、钟家寨和东川) 和洛川剖面应用 63—90 μm 的石英 SAR 法 OSL 测年后认为, 其测年上限约为 40—50 ka (约 120—150 Gy), 同时指出当获得老于约 70 ka 的年代时, 会产生低估现象。同样在洛川剖面, Lai (2010) 和 Lai and Fan (2014) 的结果指示 45—63 μm 的中颗粒石英 SAR 法 OSL 测年的可信上限在约 70 ka (约 230—260 Gy)。

同样基于天然和实验室生长曲线的对比, Chapot et al (2012) 的结果仅支持 35—63 μm 中颗粒石英 SAR 法 OSL 在约 45 ka (约 150 Gy) 以来黄土测年中的可靠性。从以前的测年统计结果来看, 中国黄土石英 SAR 法 OSL 测年很少有超过约 100 ka 的年龄, 对于这一现象, 大多研究的解释是生长曲线的饱和所致, 但是, Lai and Fan (2014) 最近基于洛川剖面黄土的结果指出, 这可能是由于石英在 20℃ 下其陷阱电子寿命仅为 0.311 Ma 所致。

由以上分析可以看出, 尽管石英 OSL 信号在中国黄土测年应用中最为成熟, 但是对于其有效测年年龄上限还没有一致的看法, 不过可以明确的一点是, 石英 OSL 测年能为中国黄土提供 MIS4, 至少 MIS3 开始以来的可靠年代 (图 1)。

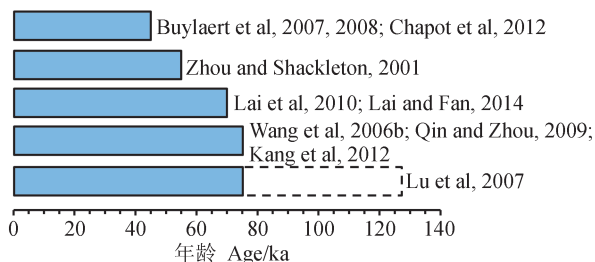


图 1 中国黄土石英 OSL 测年年龄的上限

Fig.1 Upper dating limit of Chinese loess using the quartz OSL protocol

2.1.2.2 石英回授光释光 (ReOSL)

当石英 OSL 信号被彻底光晒退 (譬如蓝光 LED) 之后, 再把样品适当加热 (如 260℃), 可以使样品再产生少量的 OSL 信号, 这部分信号即称为热转移 OSL (TTOSL) 信号 (Huntley et al, 1985; Smith et al, 1986; Aitken and Smith, 1988)。而 TTOSL 信号又包含了 ReOSL 和基本转移 OSL (BTOSL) 信号 (Aitken, 1998)。以洛川黄土细颗粒石英为研究材料, Wang et al (2006a, 2006c, 2007) 首先提出了 ReOSL 信号的分离程序及其基本释光特性 (来源、热稳定性、剂量响应特征等), 并建立了使用 SAR 和感量校正的 MAR 法进行等效剂量测量的标准程序, 证实了末次间冰期以来感量校正的 MAR 法 ReOSL、SAR 法 ReOSL 和石英 OSL 等效剂量测量结果的一致性, 重点证实了 ReOSL 信号在测量 B/M 界线 (约 0.8 Ma) 附近黄土样品的可靠性, 并指出

黄土 ReOSL 测年的上限可能在约 0.8 Ma, 这大大突破了传统石英 OSL 信号的测量范围。随后, TTOSL 或 ReOSL 测年被众多研究者用以多种类型沉积物的测年, 证实了 TTOSL 或 ReOSL 测年在突破传统石英 OSL 测年年限方面的巨大潜力, 同时, 不同研究者也提出了不同的测年程序, 详细可参阅 Duller and Wintle (2012) 及其中参考文献。

考虑到天然辐射与实验室辐射的差异, 对于测量较老 (如 B/M 界线附近) 的黄土样品时, 在 ReOSL 测年中, Wang et al (2006a) 提出使用脉冲辐照的方式来解决等效剂量低估的问题。而对于测量相对年轻的样品则不需要使用脉冲辐照, 譬如, 使用细颗粒石英感量校正的 MAR 法 ReOSL 测年, Kang et al (2011) 以渭南剖面为基础首次建立了中国黄土末次间冰期古土壤 S_1 的高准确度实测年代标尺, 通过对比 L_2/S_1 和 S_1/L_1 界线处 ReOSL 年代与其他记录的年代, 证实了该年代标尺的可靠性; 运用相同的方法, Zhao et al (2010a) 获得了泥河湾盆地末次冰期-间冰期循环黄土的 5 个 ReOSL 年代, 证实其与石英 OSL 结果的一致性。Yi et al (2012) 运用粗颗粒 (90—125 μm) 石英 SAR 法 TTOSL 技术测试了中国东北科尔沁沙地边缘的库伦沟和平安村黄土剖面, 测得最老的年代约为 300 ka。

研究表明, ReOSL/TTOSL 信号在水成相等沉积物中可能有较高的残留, 但是对于风成沉积物来说, 沉积前的晒退应该不是问题 (Duller and Wintle, 2012), 这一点从中国黄土石英 OSL 与 ReOSL/TTOSL 年代结果的一致性上也可以得到证实 (Wang et al, 2006a; Zhao et al, 2010a; Kang et al, 2011; Yi et al, 2012)。基于上述对于中国黄土石英 ReOSL/TTOSL 测年的方法研究和初步应用表明, 该技术有很大潜力为中更新世以来中国黄土提供可靠年代支撑。

2.1.2.3 富钾长石红外后高温红外释光 (pIRIR)

传统 IRSL 信号有着较高的饱和剂量, 但 IRSL 信号的异常衰退现象 (Wintle, 1973) 阻碍了其在释光测年领域的广泛应用, 即便在一定程度上可以校正异常衰退的影响 (Huntley and Lamothé, 2001)。近年对富钾长石的研究发现, 在激发完传统 IRSL 信号后, 接着在适当高的温度 (如 200—300℃) 下再进行等温 IRSL 信号测量, 所产生的 pIRIR 信号几乎不产生异常衰退或者异常衰退的程度很低, 并认为该信号有潜力延

长释光测年年限,譬如可达接近约 600 ka 的量级 (Thomsen et al, 2008; Buylaert et al, 2009, 2012; Li and Li, 2011a)。由于中国黄土在超过末次间冰期尺度上独立实测年龄的缺乏,再加上中国黄土存在被广泛接受的间接独立年龄(粒度模型年代、轨道调谐年龄等),于是从 pIRIR 技术的提出,中国黄土便成为该技术的重要应用对象,同时也可以用来检验该技术的可靠性。

目前已发表的多数基于中国黄土的研究,主要集中在对该方法可靠性、测年程序和测年能力的探索上。Buylaert et al (2011) 对近现代中国黄土样品研究后认为,黄土 pIRIR 信号的残留量在约 20 Gy 以内,意味着该残留信号在测量较老的黄土样品方面微不足道,但是在测量较年轻(如全新世)的样品时需要注意。基于黄土中颗粒富钾长石, Li and Li (2011b) 指出,富钾长石 pIRIR 信号与 400 °C TL 峰相关,不易于衰退,有足够高的热稳定性。

一般对于天然或者再生剂量的 pIRIR 信号仅测量一次 (Buylaert et al, 2012), Li and Li (2011a) 首次提出了多步法测量程序,该方法的核心在于能够获得多个温度激发下的 pIRIR 年龄,从而根据温度-年龄关系图寻找坪区间作为可靠的结果。该研究和随后的研究 (Fu et al, 2012) 证实了该方法在测量末次间冰期以来中国黄土中-粗颗粒富钾长石和细颗粒混合矿物 pIRIR 年龄的可靠性。Li and Li (2012) 指出多步法测量中国黄土的上限在约 300 ka (约 1000 Gy)。Fu and Li (2013) 通过降低 pIRIR 激发温度的办法或简单的三步法,提出该信号可以准确用于全新世黄土的测年。随后, Li et al (2013, 2014b) 和 Chen et al (2015) 发现了多步法 pIRIR 信号的剂量效应,指出,基于该效应使用单测片或多测片法可以延伸中国黄土的 pIRIR 测年至约 500 ka (约 1500 Gy)。

截至目前, pIRIR 测年已经被应用到中国黄土全新世 (Fu et al, 2015; Li et al, 2015c)、末次冰期-间冰期旋回 (Buylaert et al, 2015; Qiu and Zhou, 2015; Yi et al, 2015)、甚至接近中更新世 (Meng et al, 2015; Qiu and Zhou, 2015) 的年代测定中,有限的结果指示了该方法测年的潜力。但需要注意的是,不同的研究者对于 pIRIR 测年中所采用的预热温度和常规 IRSL 和 pIRIR 的激发温度差别比较大。如此看来,即便对于中国黄土如此均质

的沉积物和采用富钾长石的条件下,也不存在皆适用的测量程序,这背后的原因是什么?另外,不同的测试条件下, pIRIR 信号的晒退程度,即残留的等效剂量,差别很大,该如何理解这一现象在准确 pIRIR 测年中的影响 (Li et al, 2014a)?

2.1.2.4 其他信号

在延长中国黄土释光测年年限方面,除上述研究相对较为透彻、应用相对广泛的石英 ReOSL/TTOSL 和富钾长石 pIRIR 信号外,还有若干其他信号,以下简述之。

常规 IRSL 测年中,一般接收的是紫外/蓝光区域发射光,长石远红光(波长大于约 665 nm)发射谱 IRSL 信号被认为有潜力克服异常衰退的影响,并能延长释光测年年限 (Visocekas and Zink, 1999; Stokes and Fattahi, 2003)。Lai et al (2003) 使用中国黄土 11—38 μm 和 38—78 μm 的富钾长石对该信号的部分特性进行了初步研究,明确该信号在中国黄土中的存在,指出实验室内可以有效恢复约 100—600 Gy 的实验室剂量,认为该信号有潜力突破约 100—150 ka 的中国黄土测年。但目前关于该方法的后续研究和测年应用在中国黄土中还有待开展。

石英释光测年中一般获取的是紫外光谱,而石英的红光(约 600 nm)发射谱 TL 信号曾被用于受热的火山熔岩和没有高温历史的松散沉积物,研究表明该信号比紫外区域释光信号具有更高的饱和剂量,有潜力延伸释光测年年限 (Fattahi and Stokes, 2000, 2005)。Lai and Murray (2006) 对 38—63 μm 的中国黄土中颗粒石英 SAR 法红光 TL 信号进行了研究,指出该信号有着较高的饱和剂量 ($D_0 \sim 550$ Gy),但是该信号经太阳光晒退后残余量比较大(譬如可达天然信号的 40%),且当再生剂量大于~1500 Gy 时,试验剂量的 TL 信号不能用来校正感量变化。随后, Lai et al (2006) 观察到了使用 SAR 法红光 TL 信号在剂量恢复试验中的严重高估,并提出使用单片再生剂量附加法 (SARA) 来克服这一问题,但该方法依然存在较高的残留等效剂量,譬如可达约~100 Gy。目前该方法在中国黄土中测年的可行性和应用依然有待探索。

富钾长石等时线法测年被认为能够克服 IRSL 信号异常衰退的影响和不受环境剂量率变化的影响,并能延长释光测年年限,使用该方法的一个前提是样品要具备不同粒级的富钾长石 (Li et al,

2007, 2008)。Li et al (2011) 使用该方法对黄土高原与沙漠交界带的石崩砂 - 黄土 - 古土壤剖面 90—125 μm 、125—150 μm 、150—180 μm 、180—212 μm 和 212—250 μm 粒组的富钾长石进行了测试, 结果表明, 等时线年龄与期望年龄在 250 ka 以来大致一致, 且该方法的测年上限在约 200—250 ka。中国黄土的粒度组成限制了该方法只能应用于黄土与沙漠交界带的区域。

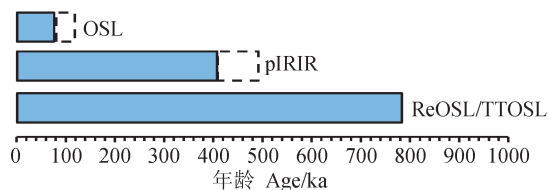


图 2 中国黄土石英 OSL、富钾长石 pIRIR 与石英 ReOSL/TTOSL 测年上限的对比

Fig.2 Upper dating limit of Chinese loess using protocols of quartz OSL, potassium-rich feldspar pIRIR and quartz ReOSL/TTOSL

从以上对于目前中国黄土释光测年方法的总结可以看出, 石英 OSL 测年依然是末次冰期或末次间冰期以来最可靠的方法, 在超越末次冰期 - 间冰期旋回的尺度上, 石英 ReOSL/TTOSL 和富钾长石 pIRIR 测年将有很大潜力提供过去分别约 0.8 Ma 和 0.5 Ma 以来的年代框架 (图 2)。

2.1.3 测年方法

由于石英 SAR 法 OSL 测年的提出和完善 (Murray and Wintle, 2000; Wintle and Murray, 2006), 使得等效剂量的测量能够在一个测片上独立完成, 大大提高了等效剂量测量的精度和准确度。这直接带来了该方法在中国黄土各种粒径 (尤其是中颗粒) 石英测年中的广泛应用, 且大多研究中 SAR 法的常规内检验参数 (回复比例、循环比例和剂量恢复比例) 均有良好表现 (Zhou and Shackleton, 2001; Lai and Wintle, 2006; Wang et al, 2006b; 覃金堂和周力平, 2007; Buylaert et al, 2007; Lai et al, 2007b; Stevens et al, 2007a; Zhao et al, 2007; Lai, 2010; Sun et al, 2010; E et al, 2012; Long et al, 2012; Yang et al, 2014; Kang et al, 2015b; Qiu and Zhou, 2015; Zhang et al, 2015)。Wang et al (2011) 指出, 黄土细颗粒石英剂量恢复实验的效果却与所使用的晒退光源和晒退时间长短相关, 没有统一的标准可以适用所有样品, 该研究指出了剂量恢复实

验作为 SAR 法检验标准所存在的问题。另外, 黄土石英 ReOSL/TTOSL 的测年也发展和使用了 SAR 法 (Wang et al, 2007; Yi et al, 2012)。与石英 OSL 测年类似, 关于中国黄土富钾长石或者混合矿物的 pIRIR 测年, 也几乎全部采用了 SAR 法 (Buylaert et al, 2011, 2012, 2015; Li and Li, 2011a, 2012; Fu et al, 2012, 2015; Fu and Li, 2013; Li et al, 2014b, 2015c; Meng et al, 2015; Qiu and Zhou, 2015; Yi et al, 2015)。

SAR 法有着种种优势和检验标准, 但在一个测片上反复加热、晒退和辐照所带来的感量变化会产生积累效应 (即便考虑了感量变化校正)。基于中国黄土并借鉴 SAR 法中感量变化校正的概念, 感量校正的 MAR 法被提出并广泛应用于中国黄土细颗粒石英 OSL (Zhou and Shackleton, 2001; 王旭龙等, 2005b; 覃金堂和周力平, 2007; Lu et al, 2007; Zhao et al, 2010a; Kang et al, 2012, 2013) 和 ReOSL 测年 (Wang et al, 2006a; Zhao et al, 2010a; Kang et al, 2011), 多数感量校正的 MAR 法测年结果与 SAR 法表现出大致的一致性, 即使可能会有低于约 10% 的偏差 (Lu et al, 2007)。感量校正的 MAR 法相对 SAR 法的一个重要优势在于尽可能的降低剂量积累和感量变化。由于细颗粒石英测片之间的重复性较好, 因此使用细颗粒石英感量校正的 MAR 法在一定程度上还可以通过减少再生剂量测片而减少测量时间。最近, 基于剂量依赖效应和感量未校正的 MAR 法 pIRIR 多步法测年也被用于中国黄土富钾长石, 证实了其相对传统 SAR 法 pIRIR 测年, 可以有效延长 pIRIR 测年年限 (Li et al, 2013; Chen et al, 2015)。

无论 SAR 还是感量校正的 MAR 法, 均需独立建立每一个样品的生长曲线而获得等效剂量。出于节省实验室测量时间而发展的标准生长曲线 (SGC) 法 (Roberts and Duller, 2004), 其核心在于, 当不同样品之间有着一致的剂量生长曲线时, 可以通过建立一条生长曲线而获得很多样品的等效剂量, 这种方法有助于大大降低实验室的测量时间。随后的研究表明, 石英 OSL (Lai et al, 2007a; Kang et al, 2012; Li et al, 2015b)、富钾长石 pIRIR (Li et al, 2015a)、石英 ReOSL/TTOSL (Kim et al, 2009; Kang et al, 2011) 等信号均可在区域或者全球尺度上建立 SGC, 表明这种方法在测年方面的潜力。虽然 SGC 法被很多

研究证实了其适用性,但是用于提供中国黄土年龄的应用并不多(Lai, 2006; Stevens et al, 2006, 2008),截至目前,黄土高原多数释光年龄还是依靠独立获取。Lai (2006)利用黄土高原4个典型剖面的中颗粒(38—63 μm 和45—53 μm)石英建立了一条SGC,并证实使用SGC方法获得的约200 Gy以内的等效剂量与标准SAR法所获得的完全一致,提出SGC方法可以适用于中国黄土高原。基于细颗粒石英感量校正的MAR法,Kang et al (2012)利用来自黄土高原渭南、西峰和靖远的多个样品也建立了一条SGC,同样指出SGC法有潜力应用于整个黄土高原。同样基于40—63 μm 的中颗粒石英SAR法OSL测年,Stevens et al (2007a)却指出,SGC法可能只用于已经建立SGC的独立剖面(Stevens et al, 2006, 2008)。Kang et al (2011)还指出使用细颗粒石英感量校正的MAR法ReOSL测年也可以在渭南末次间冰期古土壤中建立SGC。

2.2 应用

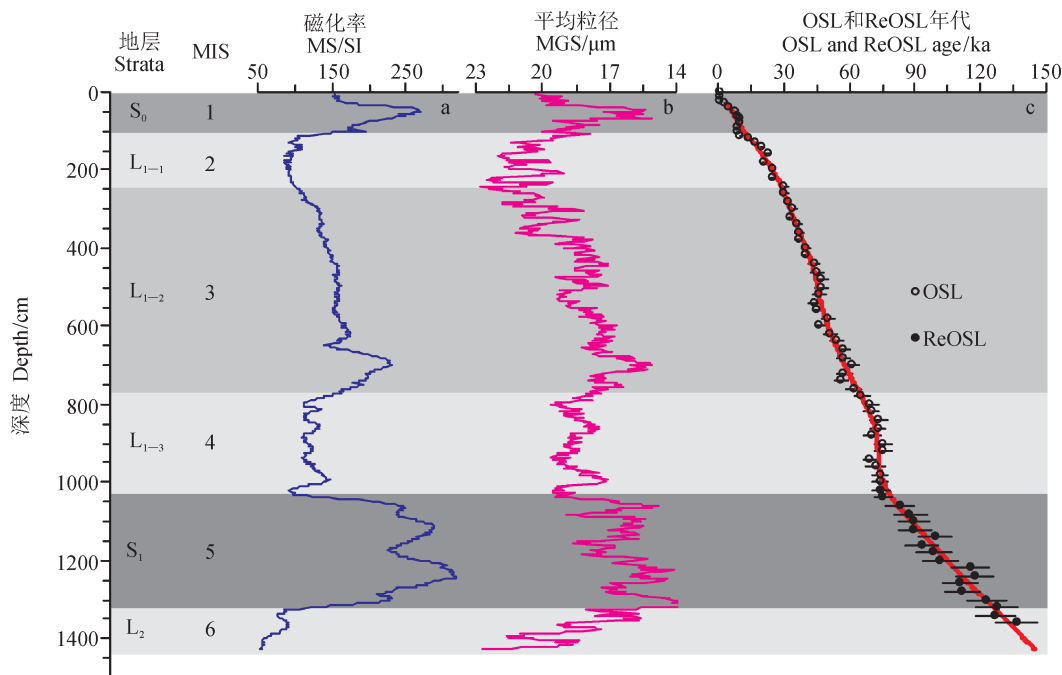
由于目前石英OSL测年在中国黄土末次冰期或者末次间冰期以来的应用占释光测年的绝对比例,因此,下文对于现阶段释光测年的应用回顾主要建立在石英OSL测年基础上。

2.2.1 高准确度年代标尺的建立

建立各种时间尺度上的高准确度年代标尺是释光测年在中国黄土中应用面临的最主要问题。近10余年,已有众多末次间冰期以来中国黄土剖面主要使用石英OSL技术建立了高准确度年代标尺。Stevens et al (2006, 2008)和鹿化煜等(2006)使用中颗粒石英SAR和SGC法建立了黄土高原环县北郭塬、西峰、旬邑、石官寨和蓝田剖面约40—50 ka以来的高密度年代标尺,但在西峰、蓝田等全新世和末次冰消期的地层中,年代往往出现混乱的现象,他们认为,这可能与生物扰动、非风力作用过程、地层混合等因素有关。Lai and Wintle (2006)和Lai et al (2007b)运用45—63 μm 的中颗粒石英SAR法OSL测年建立了黄土高原西部塬堡剖面约50 ka以来的高密度和高准确度年代标尺。Zhao et al (2007)基于63—150 μm 的粗颗粒石英SAR法OSL测年,获得了关中盆地耀县两个剖面全新世的年代序列。在洛川剖面,Lu et al (2007)使用感量校正的MAR法建立了末次间冰期以来的细颗粒石英OSL可靠年代序列,该结果同细颗粒石英感量校正的MAR法ReOSL年代有着很好的一致性(Wang et al, 2006a); Lai (2010)

基于45—63 μm 的中颗粒石英SAR法OSL测年获取了末次冰期-间冰期黄土-古土壤序列的年代,但指出末次冰期的年代比较可靠,而末次间冰期的年龄均出现了低估;Lu et al (2013)使用63—90 μm 的粗颗粒石英SAR法OSL测年重点建立了过去约25 ka的高密度年代序列;Fu et al (2012)获得了末次冰期细颗粒混合矿物和63—90 μm 的富钾长石的多步法pIRIR年代,表明其与细颗粒石英OSL年代(Lu et al, 2007)的一致性。Buylaert et al (2008)获得了黄土高原西部乐都、土巷道和钟家寨三个剖面过去约40—50 ka至末次冰期结束时的63—90 μm 石英SAR法OSL年代。使用50—80 μm 或50—90 μm 的石英SAR法OSL测年技术,Sun et al (2010, 2012)建立了黄土高原西北边缘的靖远和古浪剖面末次冰期的高密度年代序列,其可靠性得到了与极地冰芯和中国南方石笋记录的对比。Kang et al (2013)使用同Lu et al (2007)相同的感量校正的MAR法,并结合细颗粒石英感量校正的MAR法ReOSL测年(Kang et al, 2011),以10 cm和20 cm释光采样间距建立了黄土高原南缘渭南剖面末次间冰期以来的高密度和高准确度年代标尺(图3)。Qiu and Zhou (2015)结合细颗粒混合矿物pIRIR和45—63 μm 中颗粒石英OSL测年,获得了邛山剖面过去约50—10 ka以来的年代框架,在超越这一时间段的尺度上(约50—400 ka),石英OSL年龄明显表现出了相对细颗粒混合矿物pIRIR年龄的低估。除上述渭南(Kang et al, 2011)和洛川剖面(Lu et al, 2007)末次间冰期古土壤 S_1 的年代标尺,Buylaert et al (2015)还使用63—90 μm 和90—180 μm 的富钾长石SAR法pIRIR测年获取了黄土高原北缘靖边剖面的高密度年代。Yi et al (2015)使用63—90 μm 石英OSL和富钾长石pIRIR建立了中国东北科尔沁沙地边缘三把火黄土剖面末次冰期高密度年代标尺。在上述部分研究中,还对以前基于粒度模型、轨道调谐等模式建立的中国黄土时间序列可靠性提出了质疑(Lai and Wintle, 2006; Lai et al, 2007b; Lu et al, 2007; Stevens et al, 2008)。在上述众多黄土高原末次间冰期以来释光年代标尺中,在某一独立剖面,年代标尺贯穿末次冰期-间冰期旋回和全新世的并不多,仅有的两个序列存在于渭南(Kang et al, 2011, 2013)(图3)和洛川剖面(Lu et al, 2007)。

近年来,石英OSL(少量研究兼使用混合矿



有关该图的详细内容请参阅 Kang et al (2013) 图 3。

For details about this figure, please refer to Fig.3 in Kang et al (2013).

图 3 末次间冰期以来渭南黄土 - 古土壤序列地层划分 (最左边两列)、磁化率 (a)、平均粒径 (b) 和细颗粒石英 OSL/ReOSL 年代 (c) (Kang et al, 2011, 2013)

Fig.3 Stratigraphic subdivision (the two leftmost columns) and variations of magnetic susceptibility (a), mean grain size (b) and fine-grained quartz OSL and ReOSL age (c) with depth for Weinan loess-paleosol sequences since the Last Interglacial (Kang et al, 2011, 2013)

物 / 富钾长石 pIRIR 测年) 也被应用到除黄土高原之外的其他区域 (主要为中亚新疆地区) 的黄土测年中, 也获得了一些高质量的末次冰期以来年代标尺。在新疆西部的伊犁盆地, E et al (2012) 基于 38—63 μm 的中颗粒石英 SAR 法 OSL 测年, 建立了则可台剖面末次冰期的年代标尺, 与之前使用细颗粒石英感量校正的 MAR 法 OSL 测年结果 (Feng et al, 2011) 基本一致; 使用与 E et al (2012) 同样的方法, Song et al (2015) 获得了尼勒克剖面整个末次冰期黄土的高密度年代, 同时与 ^{14}C 年代进行了对比, 指出 ^{14}C 年代在约 25—30 ka 之前与石英 OSL 年代基本一致, 但是超过这一时间, 则明显低估; Kang et al (2015b) 使用细颗粒石英 SAR 法 OSL 测年, 建立了塔勒德剖面约 30 ka 以来高密度的年代标尺。在新疆天山北麓, Li et al (2015c) 和 Zhao et al (2015) 基于 63—90 μm 的石英 OSL 和 38—63 μm /63—90 μm 富钾长石 pIRIR 测年, 建立了三个剖面的全新世年代序列, 同时指出了两种方法测年结果的一致性。

在中更新世中国黄土测年中, 由于测年方法的限制和实验室测年时间的限制, 可靠的高准确度年代标尺十分缺乏。Li and Li (2012) 使用 63—90 μm 的富钾长石获得了洛川剖面 8 个分布于过去约 130—300 ka 的 pIRIR 年代, 结果与期望年代相一致。如上所述, Qiu and Zhou (2015) 获得了邛山剖面 9 个分布于过去约 130—400 ka 的 pIRIR 年龄, 所获得年代也符合地层规律。

2.2.2 粉尘堆积速率的变化

当获得黄土可靠释光年代以后, 可以直接判断黄土堆积的连续程度, 也可以很容易计算粉尘堆积速率的变化, 再结合黄土的密度, 可以获得质量堆积速率, 这对于认识黄土的沉积过程和古气候变化有重要意义 (Singhvi et al, 2001; Kohfeld and Harrison, 2003; Roberts, 2008)。截至目前, 通过释光测年来理解黄土堆积速率变化还是主要依据石英 OSL 测年结果。

在冰期 - 间冰期尺度上, 一般认为中国黄土粉尘堆积在冰期受到强烈冬季风的影响而大大加

强,在间冰期伴随冬季风的减弱大大减缓(Liu, 1985; An et al, 1991b; An, 2000),这不仅得到早期基于TL测年结果的证实(Lu et al, 1988b, 1999b; 卢演涛和赵华, 1991; Sun et al, 1998; 王文远等, 2000),更得到了现阶段一些高精度释光年代数据的支持(Lu et al, 2007; Sun et al, 2010; Kang et al, 2011, 2013; Yi et al, 2015)。相对末次冰期粉尘堆积速率的多变性(见下文),末次间冰期古土壤所记录的粉尘堆积往往表现得较为稳定。譬如,细颗粒石英感量校正的MAR法OSL所揭示的洛川剖面(Lu et al, 2007)、细颗粒石英感量校正的MAR法ReOSL所得到的渭南剖面(Kang et al, 2011)和中-粗颗粒富钾长石pIRIR所指示的靖边剖面(Buylaert et al, 2015)末次间冰期古土壤 S_1 的粉尘堆积速率均表现出较稳定的特点,不同的是剖面间的堆积速率存在差异,渭南剖面的平均堆积速率约为 $5.6 \text{ cm} \cdot \text{ka}^{-1}$,而靖边剖面的可以达到 $10 \text{ cm} \cdot \text{ka}^{-1}$,这很可能由距离沙漠粉尘源区的远近所导致。

末次冰期中国黄土已有的大量可靠石英OSL年代也有效支撑了末次冰期轨道尺度上,即末次冰期MIS4时期黄土 L_{1-3} 、MIS3时期弱发育古土壤 L_{1-2} 和MIS2时期黄土 L_{1-1} ,粉尘堆积速率的变化。Kang et al (2013)系统总结了黄土高原西部的塬堡(Lai and Wintle, 2006; Lai et al, 2007b)和靖远剖面(Sun et al, 2010)以及黄土高原东部的洛川(Lu et al, 2007)和渭南剖面(Kang et al, 2013)的地层与石英OSL年代数据,发现位于黄土高原东部的渭南和洛川剖面 L_{1-2} 的平均粉尘堆积速率明显高于 L_{1-1} ,并且在洛川剖面还高于 L_{1-3} ,而位于黄土高原西部的靖远和塬堡剖面 L_{1-2} 的平均粉尘堆积速率明显低于 L_{1-1} ,并且在靖远剖面还低于 L_{1-3} 。Kang et al (2013)认为,在末次冰期轨道时间尺度上,由东亚夏季风直接控制的地面粉尘捕获能力和湿沉降比例在黄土高原东部平均粉尘堆积速率变化上占主导地位,而在东亚夏季风相对较弱的黄土高原西部地区,由东亚冬季风控制的大气粉尘通量变化占据主导地位,这导致了上述黄土高原东西部粉尘堆积速率的差异。类似黄土高原东部的末次冰期轨道尺度上的粉尘变化在伊犁盆地的尼勒克黄土剖面也似乎存在(Song et al, 2015),但在中国东北的科尔沁沙地边缘三把火黄土剖面的pIRIR测年结果揭示的粉尘堆积

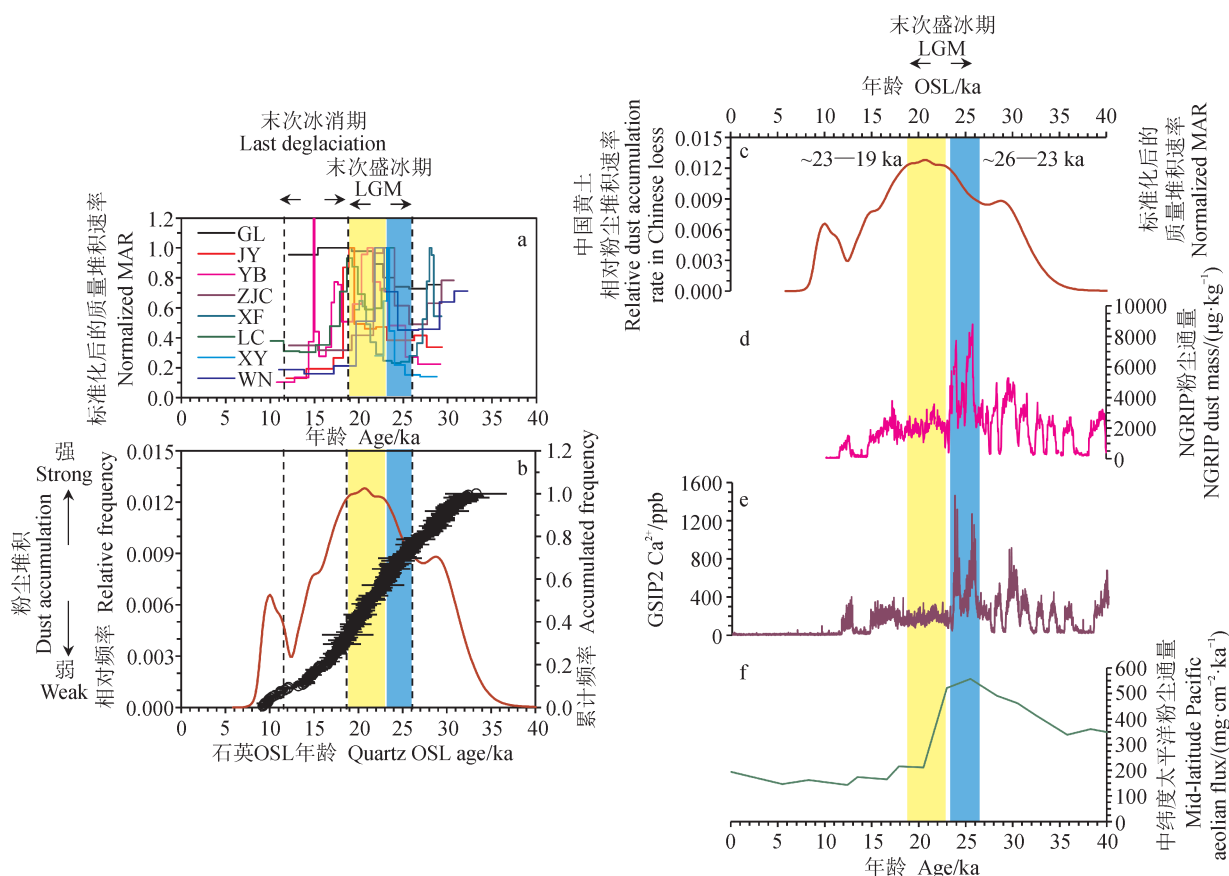
变化(Yi et al, 2015)与黄土高原西部的结果却有所类似。

高密度和高准确度的石英OSL测年使得中国黄土近几万年以来甚至末次冰期以来亚轨道尺度上的粉尘堆积速率变化细节被逐渐揭示出来,譬如,在黄土高原的靖远(Sun et al, 2010)、塬堡(Lai and Wintle, 2006; Lai et al, 2007b)、乐都(Buylaert et al, 2008)、旬邑(Stevens et al, 2008)、北郭塬(Stevens et al, 2008)、渭南(Kang et al, 2013)等剖面。以黄土高原MIS2时期黄土为例,Kang et al (2013)将黄土高原洛川(Lu et al, 2007)、西峰(Stevens et al, 2006)、旬邑(Stevens et al, 2008)、钟家寨(Buylaert et al, 2008)、靖远(Sun et al, 2010)、塬堡(Lai and Wintle, 2006; Lai et al, 2007b)和渭南剖面 L_{1-1} 石英OSL年代分析后发现,在这些剖面中都存在约20 ka前后粉尘堆积速率由快变慢的现象。随后,Kang et al (2015a)又通过对源自中国黄土高原8个典型地点(古浪(Sun et al, 2012)、靖远(Sun et al, 2010)、塬堡(Lai and Wintle, 2006; Lai et al, 2007b)、钟家寨(Buylaert et al, 2008)、北郭塬(Stevens et al, 2006)、西峰(Stevens et al, 2006)、洛川(Lu et al, 2013)、旬邑(Stevens et al, 2008)和渭南(Kang et al, 2013))已发表的高密度石英OSL年代进行FFT平滑,获得了各个剖面在约MIS2时期的数值粉尘质量堆积速率变化。结果表明,整体上,黄土高原在LGM时期(约26—19 ka)有着较高的粉尘堆积通量,而在约19—12 ka的末次冰消期粉尘堆积通量大大降低。另外,基于对黄土高原15个地点的159个石英OSL年代(分布于约30—10 ka)的概率密度分析所获取的相对粉尘堆积速率变化也证实了上述结果。上述MIS2时期粉尘堆积变化可能与LGM的极大全球冰量而带来的东亚冬季风十分强盛及19 ka以后东亚冬季风的逐渐减弱有关。Kang et al (2015a)又通过将黄土高原在LGM时期粉尘堆积通量变化和相对粉尘堆积速率变化与高纬格陵兰冰芯和中纬度北太平洋沉积物粉尘记录进行对比,揭示出,中国黄土记录的快速粉尘堆积峰值主要发生在~23—19 ka的LGM晚期,而格陵兰冰芯和北太平洋沉积物记录的快速粉尘堆积峰值主要发生在~26—23 ka的LGM早期。他们认为,控制近源粉尘堆积的东亚冬季风强度变化和

影响远源粉尘堆积的北半球西风急流在经过青藏高原附近时的平均位置摆动可能共同控制了上述不同步现象。即：LGM 晚期，在全球冰量的影响下，西风急流在经过青藏高原附近时平均位置大大南移，导致没有足够的动力来进行远源粉尘搬运，即便在中亚干旱区存在丰富粉尘物源情况下，

远源的格陵兰冰芯和北太平洋沉积物粉尘记录未出现沉积峰值。而 LGM 早期，西风急流在青藏高原附近平均位置相对 LGM 晚期向北移动，使得中亚源区远距离粉尘搬运有了相对较强的搬运动力，带来了远源粉尘记录的峰值出现在 LGM 早期。

亚轨道尺度上粉尘堆积速率的变化对于地层



图中黄色和绿色的垂直阴影部分分别代表末次盛冰期时期中国黄土和格陵兰冰芯/北太平洋的快速粉尘堆积。图中 a、b 和 c 中的结果 (Kang et al, 2015a) 主要依据前人已经发表的大量石英 OSL 年代 (Lai and Wintle, 2006; Stevens et al, 2006, 2008; Lai et al, 2007b; Buylaert et al, 2008; Sun et al, 2010, 2012; Kang et al, 2013; Lu et al, 2013)。格陵兰冰芯和北太平洋沉积物的风尘记录来源于 (Hovan et al, 1989; Mayewski et al, 1997; Ruth et al, 2007)。有关该图的详细内容请参阅 Kang et al (2015a) 图 3 和图 5。

The vertical yellow and blue bands mark the period of rapid dust accumulation during the Last Glacial Maximum in Chinese loess (~23—19 ka) and in Greenland ice cores and North Pacific Ocean sediments (~26—23 ka) respectively. The results in (a, b and c) (Kang et al, 2015a) are derived from previously published quartz OSL ages in Chinese loess (Lai and Wintle, 2006; Stevens et al, 2006, 2008; Lai et al, 2007b; Buylaert et al, 2008; Sun et al, 2010, 2012; Kang et al, 2013; Lu et al, 2013), and the dust records in Greenland and mid-latitude North Pacific Ocean are from (Hovan et al, 1989; Mayewski et al, 1997; Ruth et al, 2007). For details about this figure, please refer to Fig.3 and Fig.5 in Kang et al (2015a).

图 4 MIS2 期间中国黄土标准化和相对质量堆积速率变化 (a 和 b) 以及其与格陵兰和中纬度北太平洋粉尘记录的对比 (c、d、e 和 f) (Kang et al, 2015a)

Fig.4 Normalized and relative mass accumulation rate changes on the Chinese Loess Plateau during MIS 2 (a and b) and its comparison with dust records in Greenland and mid-latitude North Pacific Ocean (c, d, e and f) (Kang et al, 2015a)

划分、粉尘堆积连续性等研究也有重要意义。不同于以往基于黄土地层 (岩性、颜色等) 或者

气候替代性参数 (磁化率、粒度等) 为依据来划分地层界线, Lai and Wintle (2006) 和 Lai et al

(2007b)以塬堡剖面为研究对象,指出高密度石英 OSL 年代所揭示的粉尘堆积速率变化可以作为 MIS3/2 和 MIS2/1 在该剖面中的地层界线,并基于此,计算出这两个界线在塬堡剖面中的年龄分别为 13.48 ± 1.15 ka 和 25.8 ± 2.1 ka。鹿化煜等(2006)和 Stevens et al (2006)以高密度(约 10 cm)的石英 OSL 测年为手段,指出黄土高原的环县和西峰剖面在约 15—10 ka 存在约 5 ka 的沉积缺失(间断),这可能是由于侵蚀作用所致,另外,成壤作用导致的地层混合、非风成作用等也可能伴随了黄土的沉积。上述沉积的缺失(间断)现象并不广泛存在于整个黄土高原,譬如在靖远(Sun et al, 2010)、塬堡(Stevens et al, 2006)、洛川(Lu et al, 2007)、旬邑(Buylaert et al, 2008)、渭南(Kang et al, 2013)等剖面则表现为沉积的连续性,这一点也可从图 4 所示的集成性研究中体现出来。

除了黄土高原,处于西风区的新疆黄土释光测年所揭示的粉尘堆积速率变化在近几年也取得了不少进展。除上述尼勒克黄土末次冰期粉尘堆积速率的重建外(Song et al, 2015), Li et al (2015c)基于石英 OSL 和富钾长石 pIRIR 测年,获得了天山北麓一全新世黄土剖面的详细粉尘堆积速率,即全新世早-中期和晚期均表现为较低的粉尘堆积速率,而约 6—3 ka 的中全新世粉尘堆积大大加快;Kang et al (2015b)利用细颗粒石英 OSL 测年在新疆西部伊犁盆地塔勒德黄土剖面发现了全新世粉尘堆积的连续性和速率的持续增加现象以及 LGM 时期的快速堆积事件,并结合其他发表在中亚地区的黄土石英 OSL 年代(Feng et al, 2011; E et al, 2012; Yang et al, 2014; Youn et al, 2014),进一步指出, LGM 的快速粉尘堆积并不广泛存在于中亚伊犁盆地,这可能与地形作用有关。

2.2.3 对于亚轨道尺度古气候研究的意义

中国黄土在晚更新世以来冰期-间冰期和轨道尺度上的古气候研究已经有着坚实的基础(Liu, 1985; An et al, 1991a; Liu and Ding, 1998; An, 2000)。不同于具有实测数值(或计数等)年龄的中国南方石笋和极地冰芯研究(Wang et al, 2001; NGRIP members, 2004),以往基于中国黄土对千年尺度的气候事件研究主要基于间接的年代标尺(Porter and An, 1995; Guo et al, 1996; An and Porter, 1997; Chen et al, 1997; Ding et al, 1998)。高准确度释光(尤其石英

OSL)年代标尺,将有助于古气候研究的深入,譬如对于末次冰期以来亚轨道尺度上气候事件的认识上。以下列举三例石英 OSL 测年在末次冰期和全新世千年尺度古气候研究中的贡献:(1)Sun et al (2012)基于高密度的石英 SAR 法 OSL 年代结果,建立了黄土高原西北缘靖远和古浪剖面的末次冰期的可靠年代标尺,使得中国黄土能够建立在实测年代标尺的基础上和高纬的冰芯记录与低纬的石笋记录进行对比(图 5),这对于揭示高纬过程(如大西洋经向翻转流)对东亚季风的影响有重要意义;(2)Rao et al (2013)基于黄土高原西部已发表的靖远(Sun et al, 2010)和塬堡剖面(Lai and Wintle, 2006; Lai et al, 2007b)石英 OSL 年代,通过线性内插方式建立两个剖面末次冰期的年代标尺,进而结合 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 气候指标,重建了末次冰期高分辨率降水;(3)基于对旬邑、洛川和榆林剖面高密度的中颗粒石英 OSL 测年所建立的年代标尺,结合磁化率和碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 气候替代性指标, Lu et al (2013)指出,全新世东亚夏季风降雨的增加发生在 8 ka 以后,峰值持续到约 3 ka,这与石笋记录的早全新世即突然增加有着明显的差异,并指出,这可能是由于 CO_2 驱动的高纬气温变化引起的赤道复合带的南北移动所导致。从以上几例不难看出,在现阶段中国黄土高分辨率的古气候研究中,释光年代(譬如石英 OSL)日益发挥着重要作用。

3 中国黄土释光测年技术与应用的将来发展

3.1 测年技术

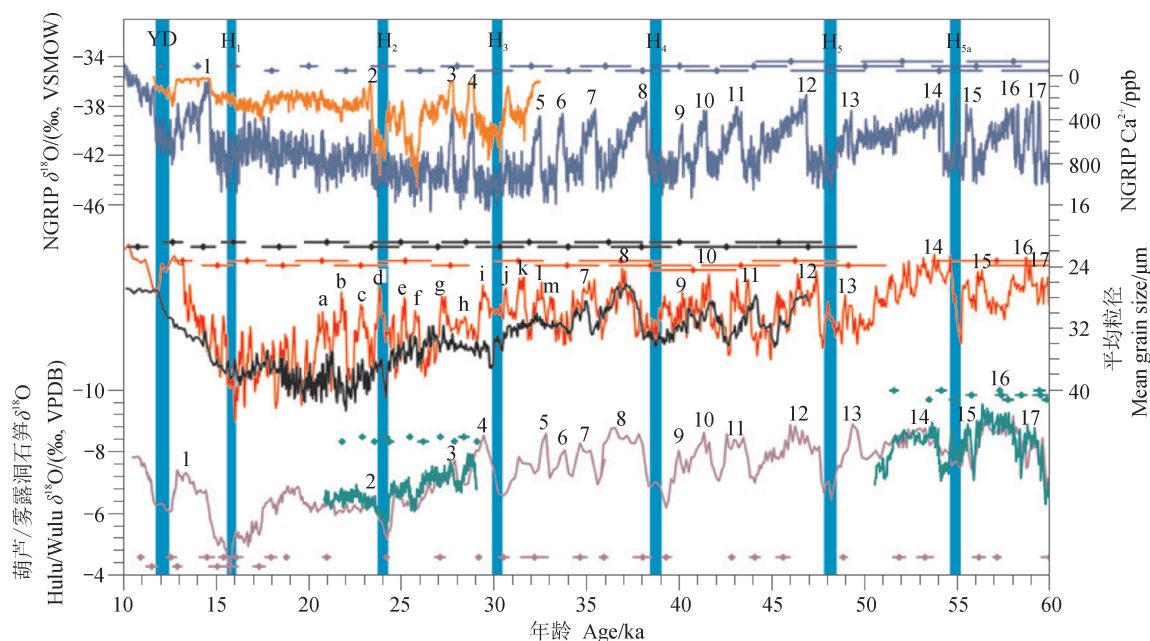
从以上分析可以看出,石英 SAR 或感量校正的 MAR 法 OSL 测年技术在末次冰期以来中国黄土测年中将继续发挥主导作用。在超越末次冰期-末次间冰期的中更新世黄土测年中,虽然已经有若干技术(石英 ReOSL/TTOSL、富钾长石 pIRIR 等)的提出和初步应用,但部分方法本身的方法学层面还有待深入研究,所以,继续研究和完善已有技术并探索新的延长中国黄土释光测年年限技术仍是未来一段时间的重要发展方向

尽管中国黄土释光测年早期和目前存在一些不同释光测年技术之间的对比研究,但继续加大各种不同测试方法之间的对比将为评估各种方法的正确性与优缺点提供借鉴,譬如在同一个剖面采用多种技术来建立年代标尺并分析这些不同年代序列的可

靠程度。另外,使用已知黄土年龄样品来检验释光测年技术的可靠性的研究还需加强,这对于延长释

光测年年限的技术研究更为重要。

以往对于中国黄土释光测年技术的研究,把



古浪和靖远黄土的石英 OSL 年代及误差标记于平均粒度曲线上。格陵兰的记录来源于 (NGRIP members, 2004; Rasmussen et al, 2008; Svensson et al, 2008), 石笋记录来源于 (Wang et al, 2001; Liu et al, 2010; Zhao et al, 2010b), 有关该图的详细内容请参阅 Sun et al (2012) 图 2。

OSL ages and errors (1 σ error bars) of two loess sequences, Gulang and Jingyuan, are marked on the grain size curves. The Greenland NGRIP ice core $\delta^{18}\text{O}$ and Ca^{2+} records are from (NGRIP members, 2004; Rasmussen et al, 2008; Svensson et al, 2008), and the Hulu (purple)/Wulu (green) speleothems $\delta^{18}\text{O}$ records are from (Wang et al, 2001; Liu et al, 2010; Zhao et al, 2010b). For details about this figure, please refer to Fig.2 in Sun et al (2012).

图5 古浪 (红色) 和靖远 (黑色) 黄土平均粒径和格陵兰 NGRIP 冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ (蓝色) 和 Ca^{2+} (橙色) 以及 葫芦 (紫色) / 雾露 (绿色) 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的对比 (Sun et al, 2012)

Fig.5 Comparison of Gulang (red) and Jingyuan (black) mean grain size with NGRIP $\delta^{18}\text{O}$ (blue) and Ca^{2+} (orange) records and Hulu (purple)/Wulu (green) speleothems (Sun et al, 2012)

注意力主要放在了如何获取正确的或者较高的等效剂量方面,但是一个可靠的释光年龄还离不开环境剂量率的准确评估。显然,以往中国黄土在环境剂量率的研究方面的工作明显不足,当然这也与国际上释光测年技术发展的大背景有一定关系。环境剂量率计算所涉及到的众多参数的合理测量、计算与客观评估等将是进一步提高中国黄土释光年龄准确度所必须做的工作。

3.2 应用

未来,释光测年技术在中国黄土中的应用将可能主要在两个领域展开:(1)采用可靠的释光测年技术,如石英 OSL,继续为中国黄土晚更新世和全新世的黄土-古土壤序列提供高密度和高准确度的年代数据,重点为亚轨道尺度(如千年、

百年尺度)上的气候事件研究提供支撑;(2)采用已有或者新的延长释光测年年限的技术,建立中更新世中国黄土的高准确度年代标尺及粉尘堆积速率变化,从而为促进冰期-间冰期或者轨道尺度上中更新世黄土的古气候记录提供重要基础。

4 总结

过去约 40 年,中国黄土释光测年技术及其应用取得了重要进展:早期(20 世纪 70 年代末期—21 世纪第一个十年初期),中国黄土释光测年以混合矿物 TL、IRSL、post-IR OSL 等多片再生或附加法测年技术为主,基于此,建立了晚更新世以来中国黄土的大致释光年代框架,促进了地层划分及其与深海、高纬等记录的对比;目前(21

世纪以来), 中国黄土释光测年以成熟的 SAR 法石英 OSL 技术为主(感量校正的 MAR 法也有一定应用), 并伴随有延长测年年限的多种技术(如石英 ReOSL、富钾长石 pIRIR 等), 这些技术对促进中国黄土晚更新世以来高准确度年代标尺建立、多种时间尺度上粉尘堆积速率的详细变化、地层划分与对比、轨道和亚轨道尺度气候演变与事件等方面研究具有重要贡献。将来, 中国黄土释光测年技术可能朝着继续探索已有并发展新的延伸测年年限的技术、环境剂量率计算准确度的提高等方向发展, 而建立中更新世高准确度年代标尺、支撑晚更新世和全新世亚轨道尺度上高分辨率古气候研究等将成为其主要的应用领域。

参考文献

- 陈杰, 卢演涛, 尹功明, 等. 1997. 甘肃巴谢剖面黄土-古土壤的光释光测年研究[J]. *地球学报*, 18: 239-241. [Chen J, Lu Y C, Yin G M, et al. 1997. Optically stimulated luminescence dating of loess and paleosol from the Baxie profile, China [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 18: 239-241.]
- 陈淑娥, 黄春长, 庞奖励. 2003. 用改进的单片再生剂量法测定多矿物细粒黄土的等效剂量[J]. *原子能科学技术*, 37: 169-173. [Chen S E, Huang C C, Pang J L. 2003. Equivalent dose estimation of polymineral fine grains using improved single-aliquot regenerative-dose protocol [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 37: 169-173.]
- 黄宝林, 卢良才. 1989. 中国黄土热释光年代学研究[J]. *地球化学*, (4): 352-360. [Huang B L, Lu L C. 1989. TL dating of loess in China [J]. *Geochimica*, (4): 352-360.]
- 康树刚, 卢演涛, 王旭龙, 等. 2009. 黄土细颗粒石英光释光测年中预热温度选取的简易方法[J]. *地震地质*, 31: 543-550. [Kang S G, Lu Y C, Wang X L, et al. 2009. A simple approach for preheat temperature determination in fine-grained quartz optically stimulated luminescence dating [J]. *Seismology and Geology*, 31: 543-550.]
- 赖忠平, 张景昭, 卢演涛. 1999. 红外释光测年中黄土样品预热条件的确定[J]. *核技术*, 22: 609-612. [Lai Z P, Zhang J Z, Lu Y C. 1999. Determination of preheating condition in IRSL dating of loess samples from loess plateau, China [J]. *Nuclear Techniques*, 22: 609-612.]
- 赖忠平, 周杰, 夏应菲, 等. 2001. 南京下蜀黄土红外释光测年[J]. *自然科学进展*, 11: 203-207. [Lai Z P, Zhou J, Xia Y F, et al. 2001. IRSL dating of Xiashu loess in Nanjing [J]. *Progress in Natural Science*, 11: 203-207.]
- 李虎侯. 1982. 黄土的热释光年代[J]. *地球化学*, (1): 82-84. [Li H H. 1982. Thermoluminescence age of loess [J]. *Geochimica*, (1): 82-84.]
- 李虎侯. 1985. 用石英的热释光测定出的马兰黄土的形成年龄[J]. *科学通报*, 30: 862-864. [Li H H. 1985. The quartz thermoluminescence age of Malan loess [J]. *Chinese Science Bulletin*, 30: 862-864.]
- 李虎侯. 1986. 马兰黄土的形成年龄[J]. *科学通报*, 31: 372-375. [Li H H. 1986. The age of Malan loess [J]. *Chinese Science Bulletin*, 30: 862-864.]
- 李虎侯. 1990. 马兰黄土的热释光年龄[J]. *地球化学*, (3): 264-269. [Li H H. 1990. Thermoluminescence (TL) age of Malan loess [J]. *Geochimica*, (3): 264-269.]
- 李虎侯, 孙建中. 1986. 马兰黄土的形成年代——石英的热释光测出的年龄[J]. *中国科学B辑*, (1): 66-73. [Li H H, Sun J Z. 1986. The age of Malan loess-thermoluminescence age [J]. *Science in China Series B*, (1): 66-73.]
- 李继亮, 裴静娴, 王在中, 等. 1977. 黄土中石英粉砂的热发光及黄土地层年龄测定的初步研究[J]. *科学通报*, 22: 498-502. [Li J L, Pei J X, Wang Z Z, et al. 1977. Preliminary research on thermoluminescence from quartz in loess and the dating of loess [J]. *Chinese Science Bulletin*, 22: 498-502.]
- 卢良才, 李虎侯. 1984. 甘肃马兰黄土热释光年龄[J]. *地球化学*, (4): 400-404. [Lu L C, Li H H. 1984. TL dating of Malan loess in Gansu Province [J]. *Geochimica*, (4): 400-404.]
- 卢演涛, Mortlock A J, Price D M, et al. 1988. 马兰黄土的粗颗粒石英热释光断代[J]. *科学通报*, 33: 47-50. [Lu Y C, Mortlock A J, Price D M, et al. 1988. Coarse quartz thermoluminescence dating of Malan loess [J]. *Chinese Science Bulletin*, 33: 47-50.]
- 卢演涛, 赵华. 1991. 陕西渭南介子村黄土的热释光测年[J]. *地质论评*, 37: 356-362. [Lu Y C, Zhao H. 1991. Thermoluminescence dating of the late Quaternary loess-plaeosol sequence at the Jiezhichun section, Weinan County, Shaanxi Province [J]. *Geological Review*, 37: 356-362.]
- 鹿化煜, Stevens T, 弋双文, 等. 2006. 高密度光释光测年揭示的距今约 15—10 ka 黄土高原侵蚀事件[J]. *科学通报*, 51: 2767-2772. [Lu H Y, Stevens T, Yi S W, et

- al. 2006. An erosional hiatus in Chinese loess sequences revealed by closely spaced optical dating [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51: 2767–2772.]
- 孙继敏, 尹功明, 陈杰, 等. 1997. 榆林剖面的热释光测年及其对这一地区干旱事件的讨论 [J]. *中国沙漠*, 17: 1–8. [Sun J M, Yin G M, Chen J, et al. 1997. Thermoluminescence chronology of aeolian sequences in Yulin and the arid episodes of this region [J]. *Journal of Desert Research*, 17: 1–8.]
- 覃金堂, 周力平. 2007. 沙漠边缘厚层黄土上部光释光测年的初步研究 [J]. *第四纪研究*, 27: 546–552. [Qin J T, Zhou L P. 2007. Late Quaternary climatic changes in northern China—new evidences from sand dune and loess records based on optically stimulated luminescence dating [J]. *Quaternary Sciences*, 27: 546–552.]
- 王文远, 刘嘉麒, 潘懋, 等. 2000. 末次间冰期以来黄土—古土壤的热释光测年——渭南、会宁剖面的对比研究 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 20: 67–72. [Wang W Y, Liu J Q, Pan M, et al. 2000. Thermoluminescent dating of the loess sequence of the late Quaternary—the comparing study on the Weinan and Huining sections [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 20: 67–72.]
- 王旭龙, 卢演涛, 李晓妮. 2005a. 黄土细颗粒单测片再生法光释光测年的进展 [J]. *核技术*, 28: 383–387. [Wang X L, Lu Y C, Li X N. 2005a. Progress in luminescence dating of Chinese loess by Single-aliquot Regenerative-dose (SAR) protocol [J]. *Nuclear Techniques*, 28: 383–387.]
- 王旭龙, 卢演涛, 李晓妮. 2005b. 细颗粒石英光释光测年: 简单多片再生法 [J]. *地震地质*, 27: 615–623. [Wang X L, Lu Y C, Li X N. 2005b. Luminescence dating of fine-grained quartz in Chinese loess: simplified multiple aliquot regenerative-dose (MAR) protocol [J]. *Seismology and Geology*, 27: 615–623.]
- 张景昭, 赖忠平. 1997. 光释光测年: 黄土样品 IRSL 信号的晒退实验 [J]. *核技术*, 20: 485–488. [Zhang J Z, Lai Z P. 1997. Optical dating: bleaching experiment on IRSL signals from loess samples [J]. *Nuclear Techniques*, 20: 485–488.]
- 赵华. 2003. 黄土细颗粒多矿物多片、单片光释光测年对比 [J]. *核技术*, 26: 36–39. [Zhao H. 2003. Comparison of dating results between polymineralic fine-grains SAR and MAR [J]. *Nuclear Techniques*, 26: 36–39.]
- 赵华, 蒋复初, 卢演涛. 1998. 郑州邙山马兰黄土的光释光 (OSL) 测年初步研究 [J]. *地质力学学报*, 4: 19–29. [Zhao H, Jiang F C, Lu Y C. 1998. Preliminary study of OSL dating of the Malan loess at Mangshan Plateau, Zhengzhou, Henan Province [J]. *Journal of Geomechanics*, 4: 19–29.]
- 赵华, 卢演涛, 陈杰, 等. 2000. 华北晚第四纪沉积物细颗粒组分红外释光与绿光释光测年 [J]. *科学通报*, 45: 2332–2337. [Zhao H, Lu Y C, Chen J, et al. 2000. Fine-grained IRSL and GLSL dating of late Quaternary sediments in northern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 45: 2332–2337.]
- Aitken M, Smith B. 1988. Optical dating: recuperation after bleaching [J]. *Quaternary Science Reviews*, 7: 387–393.
- Aitken M J. 1985. Thermoluminescence dating [M]. New York: Academic Press.
- Aitken M J. 1998. An introduction to optical dating [M]. Oxford: Oxford University Press.
- An Z S, Kukla G J, Porter S C, et al. 1991a. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130,000 years [J]. *Quaternary Research*, 36: 29–36.
- An Z S. 2000. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate [J]. *Quaternary Science Reviews*, 19: 171–187.
- An Z S, Kukla G, Porter S C, et al. 1991b. Late Quaternary dust flow on the Chinese Loess Plateau [J]. *Catena*, 18: 125–132.
- An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times [J]. *Nature*, 411: 62–66.
- An Z S, Porter S C. 1997. Millennial-scale climatic oscillations during the last interglaciation in central China [J]. *Geology*, 25: 603–606.
- Bailey R, Smith B, Rhodes E. 1997. Partial bleaching and the decay form characteristics of quartz OSL [J]. *Radiation Measurements*, 27: 123–136.
- Banerjee D, Murray A, Bøtter-Jensen L, et al. 2001. Equivalent dose estimation using a single aliquot of polymineral fine grains [J]. *Radiation Measurements*, 33: 73–94.
- Berger G, Mulhern P, Huntley D. 1980. Isolation of silt-sized quartz from sediments [J]. *Ancient TL*, 11: 8–9.
- Berger G W. 1988. TL dating studies of tephra, loess and

- lacustrine sediments [J]. *Quaternary Science Reviews*, 7: 295–303.
- Buylaert J P, Yeo E Y, Thiel C, et al. 2015. A detailed post-IR IRSL chronology for the last interglacial soil at the Jingbian loess site (northern China) [J]. *Quaternary Geochronology*, 30: 200–206.
- Buylaert J P, Jain M, Murray A S, et al. 2012. A robust feldspar luminescence dating method for Middle and Late Pleistocene sediments [J]. *Boreas*, 41: 435–451.
- Buylaert J P, Murray A S, Thomsen K J, et al. 2009. Testing the potential of an elevated temperature IRSL signal from K-feldspar [J]. *Radiation Measurements*, 44: 560–565.
- Buylaert J P, Murray A S, Vandenberghe D, et al. 2008. Optical dating of Chinese loess using sand-sized quartz: Establishing a time frame for Late Pleistocene climate changes in the western part of the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Geochronology*, 3: 99–113.
- Buylaert J P, Thiel C, Murray A S, et al. 2011. IRSL and post-IR IRSL residual doses recorded in modern dust samples from the Chinese Loess Plateau [J]. *Geochronometria*, 38: 432–440.
- Buylaert J P, Vandenberghe D, Murray A S, et al. 2007. Luminescence dating of old (>70 ka) Chinese loess: A comparison of single-aliquot OSL and IRSL techniques [J]. *Quaternary Geochronology*, 2: 9–14.
- Chapot M, Roberts H, Duller G, et al. 2012. A comparison of natural-and laboratory-generated dose response curves for quartz optically stimulated luminescence signals from Chinese Loess [J]. *Radiation Measurements*, 47: 1045–1052.
- Chen F H, Bloemendal J, Wang J M, et al. 1997. High-resolution multi-proxy climate records from Chinese loess: evidence for rapid climatic changes over the last 75 kyr [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 130: 323–335.
- Chen Y, Li S H, Li B, et al. 2015. Maximum age limitation in luminescence dating of Chinese loess using the multiple-aliquot MET-pIRIR signals from K-feldspar [J]. *Quaternary Geochronology*, 30: 207–212.
- Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. 2002. Stacked 2.6-Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}\text{O}$ record [J]. *Paleoceanography*, 17: 1–21.
- Ding Z L, Rutter N W, Liu T S, et al. 1998. Correlation of Dansgaard-Oeschger cycles between Greenland ice and Chinese loess [J]. *Palaeoclimates*, 2: 281–291.
- Duller G A T. 2004. Luminescence dating of Quaternary sediments: recent advances [J]. *Journal of Quaternary Science*, 19: 183–192.
- Duller G A T, Wintle A G. 2012. A review of the thermally transferred optically stimulated luminescence signal from quartz for dating sediments [J]. *Quaternary Geochronology*, 7: 6–20.
- E C Y, Lai Z P, Sun Y J, et al. 2012. A luminescence dating study of loess deposits from the Yili River basin in western China [J]. *Quaternary Geochronology*, 10: 50–55.
- Fang X M, Li J J, VanderVoo R, et al. 1997. A record of the Blake Event during the last interglacial paleosol in the western Loess Plateau of China [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 146: 73–82.
- Fattahi M, Stokes S. 2000. Extending the time range of luminescence dating using red TL (RTL) from volcanic quartz [J]. *Radiation Measurements*, 32: 479–485.
- Fattahi M, Stokes S. 2005. Dating unheated quartz using a single aliquot regeneration-dose red thermoluminescence protocol (SAR RTL) [J]. *Journal of Luminescence*, 115: 19–31.
- Feng Z D, Ran M, Yang Q, et al. 2011. Stratigraphies and chronologies of late Quaternary loess-paleosol sequences in the core area of the central Asian arid zone [J]. *Quaternary International*, 240: 156–166.
- Forman S L. 1991. Late Pleistocene chronology of loess deposition near Luochuan, China [J]. *Quaternary Research*, 36: 19–28.
- Frechen M. 1999. Luminescence dating of loessic sediments from the Loess plateau, China [J]. *Geologische Rundschau*, 87: 675–684.
- Fu X, Li B, Li S H. 2012. Testing a multi-step post-IR IRSL dating method using polymineral fine grains from Chinese loess [J]. *Quaternary Geochronology*, 10: 8–15.
- Fu X, Li S H. 2013. A modified multi-elevated-temperature post-IR IRSL protocol for dating Holocene sediments using K-feldspar [J]. *Quaternary Geochronology*, 17: 44–54.
- Fu X, Li S H, Li B. 2015. Optical dating of aeolian and fluvial sediments in north Tian Shan range, China: Luminescence

- characteristics and methodological aspects [J]. *Quaternary Geochronology*, 30: 161–167.
- Guo Z T, Liu T S, Guiot J, et al. 1996. High frequency pulses of East Asian monsoon climate in the last two glaciations: link with the North Atlantic [J]. *Climate Dynamics*, 12: 701–709.
- Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 416: 159–163.
- Hütt G, Jaek I, Tchonka J. 1988. Optical dating: K-feldspars optical response stimulation spectra [J]. *Quaternary Science Reviews*, 7: 381–385.
- Hao Q Z, Wang L, Oldfield F, et al. 2012. Delayed build-up of Arctic ice sheets during 400,000-year minima in insolation variability [J]. *Nature*, 490: 393–396.
- Hovan S A, Rea D K, Pisias N G, et al. 1989. A direct link between the China loess and marine $\delta^{18}\text{O}$ records: aeolian flux to the north Pacific [J]. *Nature*, 340: 296–298.
- Huntley D J, Godfrey-Smith D I, Thewalt M L W. 1985. Optical dating of sediments [J]. *Nature*, 313: 105–107.
- Huntley D J, Lamothe M. 2001. Ubiquity of anomalous fading in K-feldspars and the measurement and correction for it in optical dating [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 38: 1093–1106.
- Jackson M, Sayin M, Clayton R. 1976. Hexafluorosilicic acid reagent modification for quartz isolation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 40: 958–960.
- Jia Y F, Huang C C, Mao L J. 2011. OSL dating of a Holocene loess-paleosol sequence in the southern Loess Plateau, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 64: 1071–1079.
- Küster Y, Hetzel R, Krbetschek M, et al. 2006. Holocene loess sedimentation along the Qilian Shan (China): significance for understanding the processes and timing of loess deposition [J]. *Quaternary Science Reviews*, 25: 114–125.
- Kang S G, Roberts H M, Wang X L, et al. 2015a. Mass accumulation rate changes in Chinese loess during MIS 2, and asynchrony with records from Greenland ice cores and North Pacific Ocean sediments during the Last Glacial Maximum [J]. *Aeolian Research*, 19: 251–258.
- Kang S G, Wang X L, Lu Y C. 2013. Quartz OSL chronology and dust accumulation rate changes since the Last Glacial at Weinan on the southeastern Chinese Loess Plateau [J]. *Boreas*, 42: 815–829.
- Kang S G, Wang X L, Lu Y C, et al. 2015b. A high-resolution quartz OSL chronology of the Taledo loess over the past ~30 ka and its implications for dust accumulation in the Ili Basin, Central Asia [J]. *Quaternary Geochronology*, 30: 181–187.
- Kang S G, Lu Y C, Wang X L. 2011. Closely-spaced recuperated OSL dating of the last interglacial paleosol in the southeastern margin of the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Geochronology*, 6: 480–490.
- Kang S G, Wang X L, Li X N, et al. 2010. Anomalous fading of the IRSL signal of polymineral grains in Chinese loess [J]. *Radiation Measurements*, 45: 22–28.
- Kang S G, Wang X L, Lu Y C. 2012. The estimation of basic experimental parameters in the fine-grained quartz multiple-aliquot regenerative-dose OSL dating of Chinese loess [J]. *Radiation Measurements*, 47: 674–681.
- Kim J C, Duller G A T, Roberts H M, et al. 2009. Dose dependence of thermally transferred optically stimulated luminescence signals in quartz [J]. *Radiation Measurements*, 44: 132–143.
- Kohfeld K E, Harrison S P. 2003. Glacial-interglacial changes in dust deposition on the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 22: 1859–1878.
- Lai Z P, Brückner H, Zöller L, et al. 2007a. Existence of a common growth curve for silt-sized quartz OSL of loess from different continents [J]. *Radiation Measurements*, 42: 1432–1440.
- Lai Z P, Fan A C. 2014. Examining quartz OSL age underestimation for loess samples from Luochuan in the Chinese Loess Plateau [J]. *Geochronometria*, 41: 57–64.
- Lai Z P. 2006. Testing the use of an OSL standardised growth curve (SGC) for D_e determination on quartz from the Chinese Loess Plateau [J]. *Radiation Measurements*, 41: 9–16.
- Lai Z P. 2010. Chronology and the upper dating limit for loess samples from Luochuan section in the Chinese Loess Plateau using quartz OSL SAR protocol [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37: 176–185.
- Lai Z P, Brückner H. 2008. Effects of feldspar contamination on equivalent dose and the shape of growth curve for OSL of silt-sized quartz extracted from Chinese loess [J]. *Geochronometria*, 30: 49–53.
- Lai Z P, Murray A. 2006. Red TL of quartz extracted from

- Chinese loess: Bleachability and saturation dose [J]. *Radiation Measurements*, 41: 836–840.
- Lai Z P, Murray A S, Bailey R M, et al. 2006. Quartz red TL SAR equivalent dose overestimation for Chinese loess [J]. *Radiation Measurements*, 41: 114–119.
- Lai Z P, Stokes S, Bailey R, et al. 2003. Infrared stimulated red luminescence from Chinese loess: basic observations [J]. *Quaternary Science Reviews*, 22: 961–966.
- Lai Z P, Wintle A G. 2006. Locating the boundary between the Pleistocene and the Holocene in Chinese loess using luminescence [J]. *Holocene*, 16: 893–899.
- Lai Z P, Wintle A G, Thomas D S G. 2007b. Rates of dust deposition between 50 ka and 20 ka revealed by OSL dating at Yuanbao on the Chinese Loess Plateau [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 248: 431–439.
- Lai Z P, Zöller L, Fuchs M, et al. 2008. Alpha efficiency determination for OSL of quartz extracted from Chinese loess [J]. *Radiation Measurements*, 43: 767–770.
- Lai Z P, Zhang W G, Chen X, et al. 2010. OSL chronology of loess deposits in East China and its implications for East Asian monsoon history [J]. *Quaternary Geochronology*, 5: 154–158.
- Li B, Jacobs Z, Roberts R G, et al. 2013. Extending the age limit of luminescence dating using the dose-dependent sensitivity of MET-pIRIR signals from K-feldspar [J]. *Quaternary Geochronology*, 17: 55–67.
- Li B, Jacobs Z, Roberts R G, et al. 2014a. Review and assessment of the potential of post-IR IRSR dating methods to circumvent the problem of anomalous fading in feldspar luminescence [J]. *Geochronometria*, 41: 178–201.
- Li B, Li S H, Wintle A G, et al. 2007. Isochron measurements of naturally irradiated K-feldspar grains [J]. *Radiation Measurements*, 42: 1315–1327.
- Li B, Li S H. 2011a. Luminescence dating of K-feldspar from sediments: A protocol without anomalous fading correction [J]. *Quaternary Geochronology*, 6: 468–479.
- Li B, Li S H. 2011b. Thermal stability of infrared stimulated luminescence of sedimentary K-feldspar [J]. *Radiation Measurements*, 46: 29–36.
- Li B, Li S H. 2012. Luminescence dating of Chinese loess beyond 130 ka using the non-fading signal from K-feldspar [J]. *Quaternary Geochronology*, 10: 24–31.
- Li B, Li S H, Sun J M. 2011. Isochron dating of sand-loess-soil deposits from the Mu Us Desert margin, central China [J]. *Quaternary Geochronology*, 6: 556–563.
- Li B, Li S H, Wintle A G, et al. 2008. Isochron dating of sediments using luminescence of K-feldspar grains [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (2003–2012), 113, doi:10.1029/2007JF000900.
- Li B, Roberts R G, Jacobs Z, et al. 2014b. A single-aliquot luminescence dating procedure for K-feldspar based on the dose-dependent MET-pIRIR signal sensitivity [J]. *Quaternary Geochronology*, 20: 51–64.
- Li B, Roberts R G, Jacobs Z, et al. 2015a. Construction of a ‘global standardised growth curve’ (gSGC) for infrared stimulated luminescence dating of K-feldspar [J]. *Quaternary Geochronology*, 27: 119–130.
- Li B, Roberts R G, Jacobs Z, et al. 2015b. Potential of establishing a ‘global standardised growth curve’ (gSGC) for optical dating of quartz from sediments [J]. *Quaternary Geochronology*, 27: 94–104.
- Li G, Wen L, Xia D, et al. 2015c. Quartz OSL and K-feldspar pIRIR dating of a loess/paleosol sequence from arid central Asia, Tianshan Mountains, NW China [J]. *Quaternary Geochronology*, 28: 40–53.
- Li S H, Chen G. 2001. Studies of thermal stability of trapped charges associated with OSL from quartz [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34: 493–498.
- Li S H, Wintle A. 1992. A global view of the stability of luminescence signals from loess [J]. *Quaternary Science Reviews*, 11: 133–137.
- Lian O B, Roberts R G. 2006. Dating the Quaternary: progress in luminescence dating of sediments [J]. *Quaternary Science Reviews*, 25: 2449–2468.
- Liu D, Wang Y, Cheng H, et al. 2010. Sub-millennial variability of Asian monsoon intensity during the early MIS 3 and its analogue to the ice age terminations [J]. *Quaternary Science Reviews*, 29: 1107–1115.
- Liu T S. 1985. Loess and the environment [M]. Beijing: China Ocean Press.
- Liu T S, Ding Z L. 1998. Chinese loess and the paleomonsoon [J]. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 26: 111–145.
- Long H, Lai Z, Fuchs M, et al. 2012. Palaeodunes intercalated in loess strata from the western Chinese Loess Plateau:

- timing and palaeoclimatic implications [J]. *Quaternary International*, 263: 37–45.
- Lowick S E, Preusser F, Wintle A G. 2010. Investigating quartz optically stimulated luminescence dose-response curves at high doses [J]. *Radiation Measurements*, 45: 975–984.
- Lu H, Liu X, Zhang F, et al. 1999a. Astronomical calibration of loess-paleosol deposits at Luochuan, central Chinese Loess Plateau [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 154: 237–246.
- Lu H, Yi S, Liu Z, et al. 2013. Variation of East Asian monsoon precipitation during the past 21 ky and potential CO₂ forcing [J]. *Geology*, 41: 1023–1026.
- Lu Y C, Mortlock A J, Price D M, et al. 1987a. Thermoluminescence dating of coarse-grain quartz from the Malan loess at Zhaitang section, China [J]. *Quaternary Research*, 28: 356–363.
- Lu Y C, Prescott J R, Hutton J T. 1988a. Sunlight bleaching of the thermoluminescence of Chinese loess [J]. *Quaternary Science Reviews*, 7: 335–338.
- Lu Y C, Prescott J R, Robertson G B, et al. 1987b. Thermoluminescence dating of the Malan loess at Zhaitang, China [J]. *Geology*, 15: 603–605.
- Lu Y C, Wang X L, Wintle A G. 2007. A new OSL chronology for dust accumulation in the last 130,000 yr for the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Research*, 67: 152–160.
- Lu Y C, Zhang J Z, Xie J. 1988b. Thermoluminescence dating of loess and palaeosols from the Lantian section, Shaanxi Province, China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 7: 245–250.
- Lu Y C, Zhao H, Yin G M, et al. 1999b. Luminescence dating of loess-paleosol sequences in the past about 100 ka in North China [J]. *Bulletin of the National Museum of Japanese History*, 81: 209–220.
- Madsen A T, Murray A S. 2009. Optically stimulated luminescence dating of young sediments: A review [J]. *Geomorphology*, 109: 3–16.
- Mayewski P A, Meeker L D, Twickler M S, et al. 1997. Major features and forcing of high-latitude northern hemisphere atmospheric circulation using a 110,000-year-long glaciochemical series [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102: 26345–26366.
- Meng Y M, Zhang J F, Qiu W L, et al. 2015. Optical dating of the Yellow River terraces in the Mengjin area (China): First results [J]. *Quaternary Geochronology*, 30: 219–225.
- Murray A S, Olley J M. 2002. Precision and accuracy in the optically stimulated luminescence dating of sedimentary quartz: a status review [J]. *Geochronometria*, 21: 1–16.
- Murray A S, Wintle A G. 1999. Isothermal decay of optically stimulated luminescence in quartz [J]. *Radiation Measurements*, 30: 119–125.
- Murray A S, Svendsen J I, Mangerud J, et al. 2007. Testing the accuracy of quartz OSL dating using a known-age Eemian site on the river Sula, northern Russia [J]. *Quaternary Geochronology*, 2: 102–109.
- Murray A S, Wintle A G. 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol [J]. *Radiation Measurements*, 32: 57–73.
- Musson F M, Clarke M L, Wintle A G. 1994. Luminescence dating of loess from the Liujiapo section, central China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 13: 407–410.
- NGRIP members. 2004. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period [J]. *Nature*, 431: 147–151.
- Pawley S M, Toms P, Armitage S J, et al. 2010. Quartz luminescence dating of Anglian Stage (MIS 12) fluvial sediments: Comparison of SAR age estimates to the terrace chronology of the Middle Thames valley, UK [J]. *Quaternary Geochronology*, 5: 569–582.
- Porter S C, An Z S. 1995. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation [J]. *Nature*, 375: 305–308.
- Preusser F, Chithambo M L, Götze T, et al. 2009. Quartz as a natural luminescence dosimeter [J]. *Earth-Science Reviews*, 97: 196–226.
- Qiang X K, An Z S, Song Y G, et al. 2011. New eolian red clay sequence on the western Chinese Loess Plateau linked to onset of Asian desertification about 25 Ma ago [J]. *Science China Earth Sciences*, 54: 136–144.
- Qin J, Zhou L. 2009. Stepped-irradiation SAR: A viable approach to circumvent OSL equivalent dose underestimation in last glacial loess of northwestern China [J]. *Radiation Measurements*, 44: 417–422.
- Qiu F, Zhou L. 2015. A new luminescence chronology for the Mangshan loess-paleosol sequence on the southern bank of the Yellow River in Henan, central China [J].

- Quaternary Geochronology*, 30: 24–33.
- Rao Z, Chen F, Cheng H, et al. 2013. High-resolution summer precipitation variations in the western Chinese Loess Plateau during the last glacial [J]. *Scientific Reports*, 3, doi:10.1038/srep02785.
- Rasmussen S O, Seierstad I K, Andersen K K, et al. 2008. Synchronization of the NGRIP, GRIP, and GISP2 ice cores across MIS 2 and palaeoclimatic implications [J]. *Quaternary Science Reviews*, 27: 18–28.
- Readhead M. 1982. Extending thermoluminescence dating to geological sediments [M]// Ambrose W, Duerden P. Archaeometry: an Australasian Perspective. Occasional Papers in Prehistory 12. Canberra: Department of Prehistory, Research School of Pacific Studies, The Australian National University: 276–281.
- Rees-Jones J. 1995. Optical dating of young sediments using fine-grain quartz [J]. *Ancient TL*, 13: 9–14.
- Rhodes E J. 2011. Optically stimulated luminescence dating of sediments over the past 200,000 years [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39: 461–488.
- Roberts H M. 2008. The development and application of luminescence dating to loess deposits: a perspective on the past, present and future [J]. *Boreas*, 37: 483–507.
- Roberts H M, Duller G A T. 2004. Standardised growth curves for optical dating of sediment using multiple-grain aliquots [J]. *Radiation Measurements*, 38: 241–252.
- Roberts H M, Wintle A G. 2001. Equivalent dose determinations for polymineralic fine-grains using the SAR protocol: application to a Holocene sequence of the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 20: 859–863.
- Roberts H M, Wintle A G, Maher B A, et al. 2001. Holocene sediment-accumulation rates in the western Loess Plateau, China, and a 2500-year record of agricultural activity, revealed by OSL dating [J]. *Holocene*, 11: 477–483.
- Ruth U, Bigler M, Röthlisberger R, et al. 2007. Ice core evidence for a very tight link between North Atlantic and east Asian glacial climate [J]. *Geophysical Research Letters*, 34, L03706, doi:10.1029/2006GL027876.
- Singhvi A, Sharma Y, Agrawal D. 1982. Thermoluminescence dating of sand dunes in Rajasthan, India [J]. *Nature*, 295: 313–315.
- Singhvi A K, Bluszcz A, Bateman M D, et al. 2001. Luminescence dating of loess-palaeosol sequences and coversands: methodological aspects and palaeoclimatic implications [J]. *Earth-Science Reviews*, 54: 193–211.
- Smith B W, Aitken M J, Rhodes E, et al. 1986. Optical dating: methodological aspects [J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 17: 229–233.
- Song Y G, Lai Z P, Li Y, et al. 2015. Comparison between luminescence and radiocarbon dating of late Quaternary loess from the Ili Basin in Central Asia [J]. *Quaternary Geochronology*, 30: 405–410.
- Song Y G, Li C X, Zhao J D, et al. 2012. A combined luminescence and radiocarbon dating study of the Ili loess, Central Asia [J]. *Quaternary Geochronology*, 10: 2–7.
- Stevens T, Armitage S J, Lu H Y, et al. 2006. Sedimentation and diagenesis of Chinese loess: Implications for the preservation of continuous, high-resolution climate records [J]. *Geology*, 34: 849–852.
- Stevens T, Armitage S J, Lu H Y, et al. 2007a. Examining the potential of high sampling resolution OSL dating of Chinese loess [J]. *Quaternary Geochronology*, 2: 15–22.
- Stevens T, Lu H Y, Thomas D S G, et al. 2008. Optical dating of abrupt shifts in the late Pleistocene East Asian monsoon [J]. *Geology*, 36: 415–418.
- Stevens T, Thomas D S G, Armitage S J, et al. 2007b. Reinterpreting climate proxy records from late Quaternary Chinese loess: A detailed OSL investigation [J]. *Earth-Science Reviews*, 80: 111–136.
- Stokes S, Fattahi M. 2003. Red emission luminescence from quartz and feldspar for dating applications: an overview [J]. *Radiation Measurements*, 37: 383–395.
- Stokes S, Hetzel R, Bailey R, et al. 2003. Combined IRSL-OSL single aliquot regeneration (SAR) equivalent dose (D_e) estimates from source proximal Chinese loess [J]. *Quaternary Science Reviews*, 22: 975–983.
- Sun J M, Yin G M, Ding Z L, et al. 1998. Thermoluminescence chronology of sand profiles in the Mu Us Desert, China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 144: 225–233.
- Sun Y B, An Z S. 2005. Late Pliocene-Pleistocene changes in mass accumulation rates of eolian deposits on the central Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 110, D23101, doi:10.1029/2005JD006064.

- Sun Y B, Clemens S C, Morrill C, et al. 2012. Influence of Atlantic meridional overturning circulation on the East Asian winter monsoon [J]. *Nature Geoscience*, 5: 46–49.
- Sun Y B, Wang X L, Liu Q S, et al. 2010. Impacts of post-depositional processes on rapid monsoon signals recorded by the last glacial loess deposits of northern China [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 289: 171–179.
- Svensson A, Andersen K K, Bigler M, et al. 2008. A 60000 year Greenland stratigraphic ice core chronology [J]. *Climate of the Past*, 4: 47–57.
- Thiel C, Buylaert J P, Murray A, et al. 2011. Luminescence dating of the Stratzing loess profile (Austria)—Testing the potential of an elevated temperature post-IR IRSL protocol [J]. *Quaternary International*, 234: 23–31.
- Thomsen K J, Murray A, Jain M, et al. 2008. Laboratory fading rates of various luminescence signals from feldspar-rich sediment extracts [J]. *Radiation Measurements*, 43: 1474–1486.
- Visocekas R, Zink A. 1999. Use of the far red TL emission band of alkali feldspars for dosimetry and dating [J]. *Quaternary Science Reviews*, 18: 271–278.
- Wang X L, Lu Y C, Wintle A G. 2006a. Recuperated OSL dating of fine-grained quartz in Chinese loess [J]. *Quaternary Geochronology*, 1: 89–100.
- Wang X L, Lu Y C, Zhao H. 2006b. On the performances of the single-aliquot regenerative-dose (SAR) protocol for Chinese loess: fine quartz and polymineral grains [J]. *Radiation Measurements*, 41: 1–8.
- Wang X L, Wintle A G, Du J H, et al. 2011. Recovering laboratory doses using fine-grained quartz from Chinese loess [J]. *Radiation Measurements*, 46: 1073–1081.
- Wang X L, Wintle A G, Lu Y C. 2006c. Thermally transferred luminescence in fine-grained quartz from Chinese loess: Basic observations [J]. *Radiation Measurements*, 41: 649–658.
- Wang X L, Wintle A G, Lu Y C. 2007. Testing a single-aliquot protocol for recuperated OSL dating [J]. *Radiation Measurements*, 42: 380–391.
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. 2001. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China [J]. *Science*, 294: 2345–2348.
- Watanuki T, Murray A S, Tsukamoto S. 2003. A comparison of OSL ages derived from silt-sized quartz and polymineral grains from Chinese loess [J]. *Quaternary Science Reviews*, 22: 991–997.
- Watanuki T, Murray A S, Tsukamoto S. 2005. Quartz and polymineral luminescence dating of Japanese loess over the last 0.6 Ma: Comparison with an independent chronology [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 240: 774–789.
- Watanuki T, Tsukamoto S. 2001. A comparison of GLSL, IRSL and TL dating methods using loess deposits from Japan and China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 20: 847–851.
- Wintle A, Huntley D. 1982. Thermoluminescence dating of sediments [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1: 31–53.
- Wintle A G. 1973. Anomalous fading of thermoluminescence in mineral samples [J]. *Nature*, 245: 143–144.
- Wintle A G. 1990. A review of current research on TL dating of loess [J]. *Quaternary Science Reviews*, 9: 385–397.
- Wintle A G. 2008. Luminescence dating: where it has been and where it is going [J]. *Boreas*, 37: 471–482.
- Wintle A G, Murray A S. 2006. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols [J]. *Radiation Measurements*, 41: 369–391.
- Yang S, Forman S L, Song Y, et al. 2014. Evaluating OSL-SAR protocols for dating quartz grains from the loess in Ili Basin, Central Asia [J]. *Quaternary Geochronology*, 20: 78–88.
- Yi S W, Buylaert J P, Murray A S, et al. 2015. High resolution OSL and post-IR IRSL dating of the last interglacial-glacial cycle at the Sanbahu loess site (northeastern China) [J]. *Quaternary Geochronology*, 30: 200–206.
- Yi S W, Lu H Y, Stevens T. 2012. SAR TT-OSL dating of the loess deposits in the Horqin dunefield (northeastern China) [J]. *Quaternary Geochronology*, 10: 56–61.
- Youn J, Seong Y, Choi J, et al. 2014. Loess deposits in the northern Kyrgyz Tien Shan: Implications for the paleoclimate reconstruction during the Late Quaternary [J]. *Catena*, 117: 81–93.
- Zöller L, Wagner G A. 1990. Thermoluminescence dating of loess—recent developments [J]. *Quaternary International*, 7: 119–128.
- Zhang J F, Zhou L P. 2007. Optimization of the ‘double SAR’ procedure for polymineral fine grains [J]. *Radiation Measurements*, 42: 1475–1482.

- Zhang J R, Nottebaum V, Tsukamoto S, et al. 2015. Late Pleistocene and Holocene loess sedimentation in central and western Qilian Shan (China) revealed by OSL dating [J]. *Quaternary International*, 372: 120–129.
- Zhao H, Chen F H, Li S H, et al. 2007. A record of Holocene climate change in the Guanzhong Basin, China, based on optical dating of a loess-palaeosol sequence [J]. *Holocene*, 17: 1015–1022.
- Zhao H, Li S H, Li B, et al. 2015. Holocene climate changes in westerly-dominated areas of central Asia: Evidence from optical dating of two loess sections in Tianshan Mountain, China [J]. *Quaternary Geochronology*, 30: 188–193.
- Zhao H, Lu Y C, Wang C M, et al. 2010a. ReOSL dating of aeolian and fluvial sediments from Nihewan Basin, northern China and its environmental application [J]. *Quaternary Geochronology*, 5: 159–163.
- Zhao K, Wang Y, Edwards R L, et al. 2010b. High-resolution stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records of Asian monsoon changes in central and southern China spanning the MIS 3/2 transition [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 298: 191–198.
- Zhou L P, Fu D P, Zhang J F. 2010. An analysis of the components of the luminescence signals of selected polymineral and quartz samples from loess in western China and southern Tajikistan, and their suitability for optical dating [J]. *Quaternary Geochronology*, 5: 149–153.
- Zhou L P, Shackleton N J. 2001. Photon-stimulated luminescence of quartz from loess and effects of sensitivity change on palaeodose determination [J]. *Quaternary Science Reviews*, 20: 853–857.
- Zhou L P, Wintle A G. 1994. Sensitivity change of thermoluminescence signals after laboratory optical bleaching: experiments with loess fine grains [J]. *Quaternary Science Reviews*, 13: 457–463.
- Zhou W J, An Z S, Lin B H, et al. 1992. Chronology of the Baxie loess profile and the history of monsoon climates in China between 17,000 and 6000 years BP [J]. *Radiocarbon*, 34: 818–825.
- Zhou W J, Xian F, Du Y J, et al. 2014. The last 130 ka precipitation reconstruction from Chinese loess ^{10}Be [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119: 191–197.