

文章编号: 1006-6616 (2003) 04-0371-08

第四纪测年研究新进展

孙洪艳, 李志祥, 田明中

(中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 第四纪与人类的关系及其在地质历史中的重要位置, 需要高精度高分辨率的测年。第四纪地质学家们改进、发展了许多第四纪的测年方法。文章主要从岩石地层法、生物法、磁性地层法、考古法、放射性定年法等方面讨论了近年第四纪测年的一些研究进展。目前, 这些方法的主要进展表现在由于科学技术的提高, 如激光显微探测技术等, 使得测年的精度、功效显著提高而样品的用量却有了显著的降低, 并且拓展了一些测年的应用领域, 如电子自旋法应用于冰碛物的测年, 其测年结果建立的序列可与深海氧同位素阶段对比。但要使得测年的可靠性增强, 则需要有丰富的地质工作经验, 根据所测样品的特征选择恰当的测年方法, 且要尽量选择多种适当方法进行对比测年。

关键词: 第四纪; 测定年代; 测年进展; 测年精度

中图分类号: P534.63

文献标识码: A

第四纪是所有地质时期中最新也是最短的一个纪, 由于在这个时期产生了人类, 并与人类发展密切相关, 因此, 对其的研究显得格外重要, 形成了独立的第四纪科学。人们探讨的环境演变一般都局限在第四纪范畴, 在这样短的时期, 要求更精确的, 分辨率更高的测年, 以便更准确地确定周期和相位, 进行全球性对比, 进而认识自然演变趋势和发展规律, 为科学地推测过去、认识现在、预测未来找到依据。

第四纪地质的某些测年方法和技术与测定前第四纪物质(如 K-Ar 法)的方法和技术有很大的相似性。建立在各种物理化学和生物作用基础上的前第四纪物质的许多测年方法和技术, 稍加改进就可以用以第四纪地质的研究。不仅如此, 第四纪学家们也发展了许多专门测定年轻沉积物年龄的方法和技术。各种测年方法及技术归纳起来如表 1^[1-3];

表 1 第四纪测年方法 (据刘嘉麒等^[1]修改, 1997)

Table 1 The methods of Quaternary dating (modified after Liu Jiaqi, 1997)

岩石地层法	生物法	磁性地层法	考古法	放射性定年法	其它测年法
地层层序	化石			放射性同位素法	黑曜岩脱水
构造其次	孢子花粉	磁性倒转	文化古迹	宇宙成因核素	岩石漆法
沉积纹层	树木年轮		历史文献	核辐射效应法	氨基酸消旋法
	地衣生长法				

收稿日期: 2003-05-20

作者简介: 孙洪艳 (1976-), 女, 博士研究生, 第四纪地质学专业, 研究方向为第四纪生态环境。E-mail: shywch@163.com。通讯地址: 北京市海淀区学院路 29 号中国地质大学 B2002, 100083

上述测年方法中一类属数值定年,也就是能给出具体的年龄值,如放射性定年法、树木年轮等;另一类属对比性的定年,即能确定年龄新老,或年龄区间,但不能给出某个样品、某个事件地具体年龄值,如某些岩石地层法、生物法乃至地磁法。在实际的应用中,以上两类方法相辅相成、互相验证。

1 岩石地层法

此类方法是基于对比进行测年,如地层层序、构造期次仅用于确定地质体形成的时代和新老关系,可适用于任何地质时代,但要想正确的定年,需要有丰富的野外地质工作经验。

沉积纹层目前主要用于测定湖泊沉积物,建立古气候、古环境演化的时间序列。纹层(lamina)是种犹如树轮的沉积纹理^[4]。湖泊沉积物的纹泥是由于气候的年轮回而产生的,每个层偶(couplet)包括粗的、浅色(夏季)层和细粒、暗色(冬季)层,代表了一年。这为沉积物本身提供了精确的年代,从现代沉积物表面往下数层偶,也就确定了湖泊的形成或与其有关的特征。如把纹泥确定的相对年龄与用某种沉积物测量的日历年龄相结合,便可建立起高分辨率的古气候时间序列^[4];而且这种季节纹泥不会因为测年技术的发展而改变其相对年龄值,据此也可研究太阳黑子活动的各种周期及一些更短的周期事件(如厄尔尼诺)。

2 生物法

动物和植物演化在第四纪沉积物的定年中也是非常有用的,但与前第四纪时期相比使用范围不一样,这是因为多数组合的演变速率与包含它们的短时期相比显得太缓慢了^[2]。第四纪沉积物中孢子花粉颗粒异常丰富和分布广泛,因而它们比其它任何化石更多地利用来建组合生物带。但由于穿时性,并且可能没有严格的相似物,因而很难用于环境状况重建或难于用于年龄测定和对比。发现于陆相第四纪沉积物中的脊椎动物化石(主要是骨骼和牙齿),在确定年龄上可能要比其他化石组合迅速一些。如今已证实软体动物对年龄测定有用,特别应用于第四纪早期的测年。

以树木生长的年轮的厚度或密度变化为基础的树轮年代学^[5,6]主要特点是准确、连续性强、分辨率高及易于获取复本等。它广泛应用于气候学、考古学、水文学、生态学、木材解剖学、农业科学、环境科学等方面,其应用领域还在不断的扩展,已成为一门有发展前途的、跨领域的综合性学科。但无论应用何种研究,年表的建立尤为重要^[6]。为定年提供服务的长年表在北美洲、欧洲、南美洲、澳洲等都有建立^[7]。长年表的建立,可为¹⁴C测年提供了校准曲线,使¹⁴C测年的精度提高^[7,8]。德国建立的橡树年表和松树年表延伸了新仙女木期,使树轮年代学为¹⁴C在全新世测年提供了确切的时间控制^[9]。我国的树轮年代学起步较晚。近年,我国相应在天山^[10]、长白山等一些地区建立了树轮宽度年表。在今后的测年研究中,树轮年代学将会发挥更大的作用。

冰川融化或消退后,新近露出的冰碛沉积物或平滑的基岩面开始被地衣群落占据。Beschel(1950)提出地衣的生长速率可用来测量从地表露出以来的时间^[2],通常所选取的地衣种类(即*Rhizocarpon geographicum*)的年龄已由历史或其它已知年龄的地表面上测定,此外推测定未知年龄的地表面。该方法曾用于测定北极和阿尔卑斯山地区近代冰川后退阶段(Andrew等,1964)^[2]。但使用该测年方法应注意地衣生长不受大气圈污染的影响。

3 磁性地层法

地球磁场在过去以各种方式变化,包括地磁极的南北极倒转、极性漂移等,蕴含于这些物质中的磁性特征的测量可通过已建立的倒转和其他变化层序的对比确定其年代。古地磁年代学为第四纪地质年代表的建立奠定最重要的基础。

中国的第四纪沉积物中尤其是中国北方的黄土中蕴含了丰富的古地磁学信息^[11-15],且其沉积序列能与深海氧同位素进行对比^[16]。几十年来,中国的黄土古地磁学也已取得很大的发展。早在20世纪70年代李华梅等在山西午城剖面对中国黄土首次进行了古地磁学研究。近几十年来,中外学者对不同地区具有相同地层的代表性黄土剖面开展了大量的磁性地层研究,为我国一系列早、中更新世连续沉积地磁和早期古人类遗址^[15]卡住了基本时间框架。

极性倒转是地球磁场的重要特征之一。地质历史时期中地球磁场有规律地频繁发生过极性倒转,据此得出的全球性5 Ma以来的地磁极性年表,已广泛用于确定第四纪地层的地质年龄。除地磁性倒转外,还有磁性位置极短的移动,即偏移。布容正极性时的短期极性事件和极性漂移可用于地层的进一步细分和对比,但由于这些极性事件及极性漂移持续时间短,能进行全球性对比的不多^[17,18]。地球磁场并非只是简单的偶极,且处处有变化的非极性因素,需利用经良好测年长期变化的标准曲线测定某些古地磁特征以测定有限地区内沉积的层序。但地层剖面时标的细刻度常需要对沉积速率进行假设,假设不同,测年结果不同。这也是迄今仍未建立全球完全一致性的地磁极性序列的最重要的原因之一。

4 考古法

人类的出现使得第四纪的精确测年尤为重要,也给测年带来一些特殊的途径。第四纪沉积物所含有的人类活动的许多遗存,可以进行对比测年和数值测年^[19]。如沉积物中的“文化层”,陶器或铜器上粘附的烟灰、珍贵的甲骨、古藏经卷、岩壁上的画像文字本身等都可以用于人类出现后的年代测定。且陶瓷、钱币可为约2500年的沉积物提供相当精确的年龄,而产出丰富的石器由于制造方法和不同类型式样异地的迁移相当缓慢,而且有些在不同的时间里,曾不止一次引进到一定地区,加之,若干文化在一地共同存在的时间很长,故石器的类型不可用于第四纪早期沉积物年龄的测定,只可给出近似的年龄。

5 放射性定年法

与放射性有关的定年方法是各类方法中种类最多、应用最广的测年方法。因为它能给出具体的年龄值,所以也是最重要的一类测年方法。

5.1 放射性同位素法

放射性同位素 ^{40}K - ^{40}Ar 法和 ^{39}Ar - ^{40}Ar 法对建立第四纪磁性年表和深海氧同位素时间标尺起了关键作用^[3]。近年来,超低底本超高灵敏惰性气体质谱仪的发展,提高了 ^{40}Ar 的测限。激光显微探测技术使 ^{39}Ar - ^{40}Ar 法测年可应用于岩石中的单矿物^[20,21],并使得测年的样品用量降低(1 mg即可),减小了解析矿物麻烦,且解决了样品非均性测年困难。这一技术还可用

于测定深成岩的冷却速率^[32]。钾-氩法配合裂变径迹法是建立东非古人类年表的主要手段。目前, 该技术在我国已有发展。现在, 用钾氩法测第四纪沉积地层中伊利石、蒙脱石等自生矿物年龄的可能性已引起广泛关注。

将铀系衰变的不平衡过程应用于测年, 主要成功体现在对珊瑚礁及纯净未风化洞穴碳酸岩的测年。对深海沉积物和动物化石测年也取得成效, 为 3.5~4 万 a B.P. 全球海平面升降和气候变化的研究提供了时标^[33]。我国 35 万年来的古人类进化和旧石器考古年表主要是通过铀系法建立的^[19]。铀系组分法对年轻火山岩定年已有极大的潜力^[22]。近年铀系法的突破是热电离质谱 (Thermal Ionization Mass Spectrometer, 简称 TIMS) 铀系法^[22]。TIMS 铀系法使得测年精度提高了 1~2 个数量级, 所需样品量和测量时间却大大减少。但 20 世纪 90 年代末, MC-ICP-MS 开始用于 ²³⁰Th 测年^[23], 其比 TIMS 更省时、省样、提高精度的空间且有进行微区测年的前景, 现在甚至有 ICP-MS²³⁰Th 测年法代替 TIMS 的趋势。

²¹⁰Pb 为铀系的衰变子体, 其半衰期适合于现代人类活动时间尺度环境过程的示踪, 在流域侵蚀和现代沉积研究中具有很好的示踪价值^[24]。Goldberg (1963)^[25]首次利用 ²¹⁰Pb 作为格陵兰冰芯计年。近 30 年来, ²¹⁰Pb 广泛用于现代沉积速率的测定, 取得了很好的进展, 显示出 ²¹⁰Pb 在百年时间尺度上的沉积物计年价值。

5.2 宇宙成因核素

¹⁴C 测年是全新世及晚更新世最常用、一般也最可信的方法, 其理论严格, 技术成熟, 而且适用于 ¹⁴C 测年的样品品种多并容易找到^[26-30]。夏商周年表的年龄框架就是通过 ¹⁴C 年龄测定建立的^[17]。¹⁴C 测年法近年来的发展^[8,28,29]主要表现在三个方面: ① ¹⁴C 常规测定技术向高精度发展比较成熟, 现代碳样的测定精度可达到 2%。其 ¹⁴C 年龄 (非日历年龄) 误差可达到 ± 20 a; ② 加速器质谱技术使得测定的时间短、功效高、样品用量低, 使得颗粒重量仅 0.01~0.2 μ g 的花粉^[29]的测定成为可能; ③ 高精度 ¹⁴C 树木年龄校正曲线的建立, 使 ¹⁴C 日历年龄误差只有 ± 10 a 左右^[8,30], 日历年龄上限可达到 7000 aBP。1993 年公布的高精度树轮年年龄校正曲线, 日历年龄上限可达 10000 aBP, 对万年以上的 ¹⁴C 日历年龄数据, 目前研究工作可望将校正范围延伸至 2 万 aBP。

¹⁰Be 和 ²⁶Al 等宇宙成因核素作为第四纪计时器, 可能是 AMS 研究热点。沈承德等^[31]通过洛川黄土剖面中 ¹⁰Be 浓度的研究, 认为 ¹⁰Be 可作为黄土剖面相对时标。在格陵兰和极地冰芯中观察到, 在 35000 ± 1500 aBP, ¹⁰Be 浓度有峰值^[32]。这个 ¹⁰Be 峰与近年来地中海 CT85-5 钻孔沉积物 ¹⁰Be 峰^[33]及其它从深海沉积物中获取的 ¹⁰Be 峰在时间上是属于同期的, 可作为 Reibeck 时标。目前, 通过研究控制初始 ¹⁰Be 浓度的各种因子及海洋沉积物 ¹⁰Be/⁹Be 值, 完善了深海沉积物及锰结核的 ¹⁰Be 的测年方法^[34], 由于 ²⁶Al 的产生行为与 ¹⁰Be 相似^[35], 这方面也用 ²⁶Al/¹⁰Be 的值。¹⁰Be 和 ²⁶Al 已被成功用来测定地表暴露、埋藏和沉积年龄, 估计风化-侵蚀速率, 探讨各种地表过程^[35], 适用于距今万年至数百万年的地质历史时期。如 Gosse 等^[36]通过测量美国怀俄明 Fremont 湖盆冰川漂砾中石英的含量, 获得了该区冰川发育极盛期的 ¹⁰Be 年龄, 较好地重建了该区末次冰川作用的历史。

³⁶Cl 断代法^[37]是近几十年发展起来的第四纪地质事件测年的新方法。Phillips 等建立了火山岩的 ³⁶Cl 断代法^[38], 应用 ³⁶Cl 断代法研究了美国西部冰川堆积物的年代学^[39]。³⁶Cl 测年的关键问题是测年技术。加速质谱法的应用提高了 ³⁶Cl 的测试精度, 也使 ³⁶Cl 断代法成为第四纪重要的年代学研究方法。在我国 ³⁶Cl 已有一定的发展, 中国科学院盐湖研究所和中国地质大学 (北京) 建立了 ³⁶Cl 制样实验室, 中国原子能科学研究院建立了 Cl/Cl 加速质谱室。

5.3 核辐射方法

热释光 (Thermoluminescence dating, 简称 TL)、光释光 (Optic Stimulated Luminescence, 简称 OSL) 和电子自旋法 (Electron Spin Resonance, 简称 ESR) 等方法的测年原理并非直接基于放射性核素的衰变过程, 而是依赖于样品中石英、长石等在放射性射线辐射下的累积效应^[3]。

结晶固体的释光 (磷光) 现象被用来作为测年技术已有 40 多年历史。20 世纪 70 年代, 它作为一种新的测年技术测出无碳标本的年龄, 弥补了¹⁴C 测年技术的缺陷^[40,41]。释光测年中的一个重要因子是辐射剂量^[41], 它直接影响到测年结果。

热释光测年 (TL) 方法^[41-43]可用于确定陶器烧制的时代和确定烧过的燧石最后一次受热时间, 也可测定深海沉积物、黄土和河湖相粉砂沉积的时代以及埋藏土壤埋藏时代。但对这些沉积物进行精确测年尚有不少问题需探讨, 首先面临的就是热释光的晒退效应问题, 另外沉积物的元素、矿物组成、粒度以及地下水的变动等许多因素也影响测年精度。目前, 选用单矿物、选取特定波长范围的 TL 信号, 有可能提高 TL 法测沉积物年龄的精度并拓展其测年范围^[43]。

OSL 法^[44-46]是 TL 法测年的新进展。它排除了 (至少降低) TL 法中残余信号的干扰。近年的突出进展是单片技术^[47]的应用, 解决了传统光释光测年的许多问题, 它的应用为快速沉积不均匀晒退的沉积物, 如洪积物、冰积物及风暴沉积物等的年代测定提供可能性。沉积物 OSL 测年方法按所用激发光源可分为绿光释光 (GLSL) 和红外释光 (IRSL) 两种技术。对于同一个含有石英和钾长石碎屑矿物的沉积物样品同时进行绿光释光 (GLSL) 和红外释光 (IRSL) 测年并对比结果, 可获得 OSL 测年可靠性的一种自检。赵华等^[46]对郑州邙山黄土剖面的马兰黄土作了实验发现 GLSL 和 IRSL 测得年龄在 1~2 σ 标准差内一致。光释光 (OSL) 技术在晚第四纪水悬浮碎屑沉积物的年龄测定方面具有巨大的潜力, 对沙漠黄土边界带湖相沉积物的年龄测定也可取得理想效果^[48]。近年发展的特征波长光释光测定年龄的技术——选频光释光测年方法^[49], 可以使测年结果的互比在同一样品中进行, 这既是一种自我鉴定, 同时也保证了年龄数据的可靠。

电子自旋法 (ESR) 测年的范围很广, 包括骨骼、牙齿、软体动物壳体、磷灰岩晶体、石灰华、钟乳石、火山玻璃和长石晶体、石膏晶体及取自断裂带的变形石英颗粒等。ESR 法主要优点是所需样品的规格小 (约 0.25 g) 及可测物质年龄范围广 (数百万年), 因而随着该方法的发展, 它有可能覆盖¹⁴C 的较老界限和其它同位素技术如 K-Ar 法年轻极限间的时间间隔。用 ESR 法可验证一些古地磁年龄。ESR 法对第四纪冰碛物的测年^[50]具有重要的意义, 据测年结果所建的沉积序列可与深海氧同位素阶段进行对比, 对海岸风成沙的测年也具有可能性^[51]。

6 其他定年法

岩石漆中的显微层理有可能记录了古气候干湿变化的信息, 而显微层理的结构是地貌面新老的一种反映, 因此, 岩石漆用于年龄测定具有重要的地质意义。目前, 岩石漆测年法是一种仍在尝试阶段的相对测年方法。周本刚等^[52] (1999) 利用特殊的超薄片磨制技术, 初步建立了天山北麓晚更新世以来岩石漆显微层理的标准层序, 在经过年代校正后, 给出了该层序的大致年代控制。

氨基酸分析已在过去 20~30 年里发展成为第四纪沉积物对比和年龄测定的一种方法, 是以其所含不同的有机成分为依据的。该法测年的一大优点是便宜和迅速, 可以分析许多样品。它已用于骨骼、软体动物、珊瑚、有孔虫和木头。

以上各种测年方法的共同点是由于科学技术的提高, 如 Ar-Ar 激光显微探测技术等, 使得测年的精度、功效显著提高而样品的用量却有了显著的降低, 且应用领域不断的拓展。但在当前使用的这些方法也都还不十分完善。第四纪学者还在不断地应用新技术来提高测年的可靠性, 发展新的测年方法。而在实际应用中, 为进行较高精度的测年, 不仅要有丰富的地质工作经验、应用新技术, 还需在测年许可范围内, 尽可能的选择多种互相独立且适当的方法进行对比测年, 并注意保持样品新鲜且具代表性, 确保测试环境无污染, 从而提高测试结果的可信度。

致谢: 地质力学学报的编辑对本文的修改提了宝贵的意见, 在此致意诚挚的谢意!

参 考 文 献

- [1] 刘嘉麒, 王文远. 第四纪地质与第四纪年表 [J]. 第四纪研究, 1997, (3): 193~202.
- [2] John A. Catt. 第四纪事件的测年 [J]. 国外第四纪地质, 1992, (2): 50~77.
- [3] 陈铁梅. 第四纪测年的进展与问题 [J]. 第四纪研究, 1995, (2): 182~191.
- [4] 刘嘉麒, 刘东生, 储国强, 等. 玛珥湖与纹泥年代学 [J]. 第四纪研究, 1996, (4): 353~358.
- [5] Fritts H C. *Trees Rings and Climate* [M]. London: Academic Press, 1976. 376~412, 534.
- [6] 邵雪梅. 树轮年代学的若干进展 [J]. 第四纪研究, 1997, (3): 265~271.
- [7] Luckman B H. Dendrochronology and global change [A]. In: Dean J S, Meko D M, Swetnam T W eds. *Tree Rings: Environment and Humanity* [C]. Tucson: Department of Geosciences, The University of Arizona, 1996. 3~24.
- [8] 仇士华, 蔡连珍. ^{14}C 测年技术进展 [J]. 第四纪研究, 1997, (3): 222~229.
- [9] Kroner B, Becker B. German oak and pine ^{14}C calibration, 7200~9439 B C [J]. *Radiocarbon*, 1993, 35: 125~135.
- [10] 储国强, 刘嘉麒, 孙青, 等. 新疆克里雅河洪泛事件与树轮记录的初步研究 [J]. 第四纪研究, 2002, 22 (3): 253~257.
- [11] 朱日祥, 岳乐平, 白立新. 中国第四纪古地磁学研究进展 [J]. 第四纪研究, 1995, (2): 162~173.
- [12] 聂高众, 刘嘉麒, 郭正堂. 渭南黄土剖面十五万年以来的主要地层界线 and 气候事件—年代学方面的证据 [J]. 第四纪研究, 1996, (3): 221~231.
- [13] Kukla G, Heller F, Liu X M, et al. Pleistocene climate in China dated by magnetic susceptibility [J]. *Geology*, 1998, 16, 811~814.
- [14] Harland W B, Cox A V, Llewellyn P G, et al. *A Geologic Time Scale* [M]. Cambridge Press, 1982. 100~125.
- [15] 刘椿, 金增信, 朱日祥, 等. 中国最早人类化石地层年龄的测定——巫山下更新统磁性地层学研究 [J]. 第四纪研究, 1991, (3): 221~228.
- [16] 李徐生, 杨达源. S_2 以来下蜀黄土沉积序列磁化率记录与深海氧同位素记录的对比 [J]. 南京大学学报 (自然科学), 2001, 37 (6): 766~772.
- [17] 马醒华, 孙知明, 胡守云. 哥德堡事件在湖泊沉积物中的记录 [J]. 第四纪研究, 1994, (2): 175~182.
- [18] 王保贵, 侯红明, 汤贤贵, 等. 东南极普里兹湾 NP93-2 柱样古地磁结果 [J]. 南极研究 (中文版), 1996, 8 (1): 47~52.
- [19] 陈铁梅. 我国旧石器考古年代学的进展与评述 [J]. 考古学报, 1988, (3): 357~367.
- [20] 穆志国, 卡尔宾柯 M. I. 激光显微探针 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年系统 [J]. 科学通报, 1994, 39 (8): 734~737.
- [21] 丁林. 裂变径迹定年方法的进展及应用 [J]. 第四纪研究, 1997, (3): 272~280.
- [22] 彭子成. 第四纪测年的新技术——热电质谱铀系法的发展近况 [J]. 第四纪研究, 1997, (3): 258~264.
- [23] 程海. 铀系年代学新进展——ICP MS ^{230}Th [J]. 第四纪研究, 2002, 22 (3): 292.
- [24] 万国江. 现代沉积的 ^{210}Pb 计年 [J]. 第四纪研究, 1997, (3): 230~239.

- [25] Goldberg F D, Koide M. Rates of sediment accumulation in the Indian Ocean [A]. In: Geiss J, Goldberg E D. eds. *Earth Science and Meteoritics* [C]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1963. 90~102.
- [26] 刘嘉麒, 陈铁梅, 聂高众, 等. 渭南黄土剖面的年龄测定及十五万年以来高分辨时间序列的建立 [J]. 第四纪研究, 1994, (3): 193~202.
- [27] 仇士华. 夏商周年表的制定与 ^{14}C 测年 [J]. 第四纪研究, 2001, 21 (1): 77~83.
- [28] 仇士华. 碳十四断代的加速器质谱计数方法 [J]. 考古, 1987, (6): 562~567.
- [29] Brown T A, Farwell G W, Grootes P M, et al. Radiocarbon AMS dating of pollen extracted from peat samples [J]. *Radiocarbon*, 1992, 34 (3): 550~556.
- [30] Skog G, Regnell J. Precision calendar-year dating of the elm decline in sphagnum-peat bog in southern Sweden [J]. *Radiocarbon*, 1995, 37 (2): 197~202.
- [31] 沈承德, 易惟熙, 刘东生. 高分辨 ^{10}Be 记录与黄土地层定年 [J]. 第四纪研究, 1994, (3): 203~213.
- [32] Raisbeck G M, You F, Boulers D, et al. Evidence for two intervals of enhanced ^{10}Be deposition in Antarctic ice during the last glacial period [J]. *Nature*, 1987, 326: 273~277.
- [33] Castagnoli G C, Albrecht A, Beer J, et al. Evidence for enhanced ^{10}Be deposition in Mediterranean sediments 35kyr B P [J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22 (6): 707~710.
- [34] 沈承德. 深海沉积物 ^{10}Be 记录研究 [J]. 第四纪研究, 1997, (3): 203~210.
- [35] 顾兆炎, 刘东生, D. Lal. ^{10}Be 和 ^{26}Al 在地表形成和演化研究中的应用 [J]. 第四纪研究, 1997, (3): 211~221.
- [36] Gosse J C, Klein J, Evenson E B, et al. Beryllium-10 dating of the duration and retreat of the last Pinedale glacial sequence [J]. *Science*, 1995, 268: 1329~1333.
- [37] 黄麒. ^{36}Cl 断代法 [J]. 第四纪研究, 1997, (3): 230~239.
- [38] Phillips F M, Leavy B D, Jannik N O, et al. The accumulation of cosmogenic chlorine-36 in rocks: A method for surface exposure dating [J]. *Science*, 1986, 231: 41~43.
- [39] Phillips F M, Zreda M G, Smith S S, et al. Cosmogenic chlorine-36 chronology for glacial deposits at Bloody Canyon, Eastern Sierra Nevada [J]. *Science*, 1990, 248: 1529~1532.
- [40] Kharita M H, Stokes R, Durrani S A. TL and PTL in natural fluorite previously irradiated with gamma rays and heavy ions [J]. *Radiation Measurements*, 1995, 24 (4): 469~472.
- [41] 李虎侯. 释光技术测定年龄的现状 [J]. 第四纪研究, 1997, (3): 240~257.
- [42] Zimmerman D W. Thermoluminescence from fine grains from ancient pottery [J]. *Archaeometry*, 1967, 10: 26~28.
- [43] 卢演涛. 活动构造测年方法和年代学研究的现状与问题 [A]. 国家地震局地质研究所. 现今地球动力学研究及其应用 [M]. 地震出版社, 1994. 380~388.
- [44] Huntley D J, Godfrey-Smith D I, Thewalt M L W. Optical dating of sediments [J]. *Nature*, 1985, 313: 105~107.
- [45] Aitken M J. Optical dating [J]. *Quaternary Science Review*, 1992, 11: 217~231.
- [46] 赵华, 卢演涛. 黄土细粒样品红外释光与绿光释光测年对比研究 [J]. 第四纪研究, 1998, (3): 287.
- [47] 赖忠平, 周杰, 卢演涛, 等. 绿光释光测年中基于单片技术的再生/附加法 [J]. 地质力学学报, 1999, 5 (4): 89~93.
- [48] 赖忠平, 张景昭, 卢演涛. 沙漠黄土边界带湖相沉积糜地湾剖面红外释光测年 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21 (1): 75~80.
- [49] 李虎侯. 选频光释光——特征波长光释光测定年龄的技术 [J]. 核电子学与探测技术, 2001, 21 (3): 176~179.
- [50] 易朝路, 焦克勤, 刘克新, 等. 冰碛物 ESR 测年与天山乌鲁木齐河源末次冰期系列 [J]. 冰川冻土, 2001, 23 (4): 389~393.
- [51] 业渝光, 刁少波, 和杰, 等. 中国海岸风成沙 ESR 测年的研究 [J]. 海洋与湖沼, 1995, 26 (5): 488~493.
- [52] 周本刚, 柳覃卓, 张裕明. 天山北麓岩石漆显微层序的初步建立及其年代学意义 [J]. 地震地质, 1999, 21 (4): 301~308.

NEW PROGRESS IN QUATERNARY DATING RESEARCH

SUN Hong-yan, LI Zhi-xiang, TIAN Ming-zhong

(*Faculty of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: The Quaternary plays an important role in the geological history because it is closely related to the human beings. Therefore highly reliable and precise Quaternary dating is needed. Now geologists have improved and developed many Quaternary dating methods. This paper discusses some recent advances in the Quaternary dating in respect to rock stratigraphy, biology, magnetic stratigraphy, archaeology and isotope dating. The main progress of these methods is as follows: the dating precision and efficiency have been raised markedly while the required dosage of a dated sample is reduced significantly because of the development of technologies, such as the Ar-Ar laser microprobe dating; and these dating methods can be used in wider research fields. For example, the ESR method has been used in dating of tills and the sequences established according to the dating results may correlate with the deep sea oxygen isotope stages. However, it is necessary to have plenty of geological experience, choose appropriate dating methods according to the features of the samples and use as many appropriate methods as possible for comparative dating to improve the reliability of dating.

Key words: Quaternary; dating; dating progress; dating precision