

黄土剖面古土壤和生物化石¹⁴C测年对比

杨明生¹, 张虎才^{1,2}, 丁 虎^{1,3}, 雷国良¹, 樊红芳¹,
常凤琴¹, 李 斌¹, 张文翔¹, 牛 洁¹, 陈 玥¹

1. 中国西部环境教育部重点实验室、兰州大学资源环境学院, 甘肃兰州 730000
2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏南京 210008
3. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要: 精确、可靠测定古土壤和生物化石年代是重建环境变化过程、探讨人地关系的关键。研究古土壤中不同组分年代的异同对于分析土壤中碳附存状态和碳储存库十分重要。对甘肃省榆中县境内兴隆山典型黄土剖面采集的动物化石、土壤无机质、土壤有机质3个样品进行常规¹⁴C和AMS测年,发现同一地层相同点样品不同组分的测年结果相差悬殊,样品无机质比其有机质年龄(3 682±70)a 偏老 2 624 a。对其¹⁴C测年可靠性对比分析发现,常规¹⁴C和AMS对骨骼和牙齿化石测年相差仅为13 a,校正为日历年后几乎相等,认为实验室产生的误差很小,而碳的来源、组成及其“死碳”混入的比例是影响测年结果的主要因素。化石年龄与土壤有机质年龄之间的差别,揭示该剖面可能存在持续时间达千年以上的沉积间断。由于同一层位骨化石、土壤有机质、土壤无机质¹⁴C测年结果差异,在进行化石年代确定、考古及古文明研究、生态植被恢复、土壤无机碳储存库研究中,年龄的界定应选择相应的测年数据。

关键词: 黄土及古土壤;生物化石;有机质;无机质;常规¹⁴C及AMS测年。

中图分类号: P53

文章编号: 1000-2383(2005)05-0589-08

收稿日期: 2005-05-17

¹⁴C Dating of Paleosol and Animal Remains in Loess Deposit: A Comparative Study

YANG Ming-sheng¹, ZHANG Hu-cai^{1,2}, DING Hu^{1,3}, LEI Guo-liang¹, FAN Hong-fang¹,
CHANG Feng-qing¹, LI Bin¹, ZHANG Wen-xiang¹, NIU Jie¹, CHEN Yue¹

1. National Laboratory of Western China's Environmental Systems, MOE; College of Earth Sciences and Environments, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China
2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences (CAS), Nanjing 210008, China
3. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: Dating paleosol and animal remains accurately and reliably is of crucial importance in reconstructing environmental change processes and researching the relationship between natural environments and human evolution. Dating different components in the same specimen and differentiating their ages is also important for tackling problems such as carbon storage state and soil carbon sources. Conventional ¹⁴C and AMS dating on animal remains (fossil bone and teeth) and inorganic and organic soil matter from a typical loess section at Xinglong Mountain, Yuzhong County, Gansu Province reveal that three different substances in the specimen from the same sampling position possess different ¹⁴C ages; the age of inorganic matter is 2 624 years older than that of organic matter, which is dated at (3 682±70)a. According to the reliability analysis of these ¹⁴C ages, laboratory error is negligible, but the ¹⁴C resources, the component of ¹⁴C and the proportion of “dead carbon” are the main factors influencing ¹⁴C dating results. It is only possible to date the geological events correctly and reliably by analyzing the reasons generating these differences and the age comparison of different substances may provide information on pa-

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40371117);中国科学院“百人计划”和中国科学院西安地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室基金项目(SKLLQG0514)。

作者简介: 杨明生(1976-),男,兰州大学资源环境学院自然地理专业环境变化方向硕博连读研究生。E-mail: yanggyb03@st.lzu.edu.cn

leoclimate and paleoenvironment. A 2000 year difference between the ^{14}C ages of fossil and organic soil matter might indicate that a sediment gap exists, which is very important when reconstructing paleoclimate by loess section.

Key words: loess and paleosol; animal remains; organic matter; inorganic matter; conventional ^{14}C and AMS dating.

中国黄土是最丰富的晚新生代地质环境演化的信息库,它记录了百万年甚至更老地质历史时期以来中国大陆的古气候、新构造运动、古地理等多方面的变化过程和重大地质事件;同时,它也记录了与全球性古气候、古环境演化进程同步发展的全过程(石建省等,1998),因而中国黄土高原是全球变化研究的天然实验场(朱照宇和丁仲礼,1994).对中国黄土的研究受到广泛的关注,无论是进行全球变化项目还是进行人文考古方面的研究,对地质生物和气候突变年代的确定是至关重要的.目前,年轻地质体系的年代测定方法很多,例如常规 ^{14}C 及AMS测年、激光微区 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年、裂变径迹(FT)法、铀系不平衡TIMS法、光释光(OSL)测年方法等(陈文奇等,1999).对黄土—古土壤地质事件年代的确定,大多数研究者使用 ^{14}C 或AMS测年方法,并且获得了大量可靠的年龄结果.随着 ^{14}C 测年实验室设备的改进、精密仪器的使用、测年方法和手段的提高,已能精确地获得实验样品的年龄.本文就黄土剖面同一地层层位的古土壤和生物化石的 ^{14}C 测年数值进行对比分析,从而探讨同一层位不同物质样品的年龄所代表的意义.

1 剖面地理位置及样品实验

榆中盆地为NW—SE向展布的断陷菱形盆地,四面环山,南面兴隆山、马山,北面北山,东西两翼为黄土覆盖的低山丘陵,地势南高北低,盆地最低处为SE—NW流向的大河(图1).本文研究的剖面位于榆中盆地兴隆山洪积扇上的黄土沉积中($35^{\circ}49'539''\text{N}$, $104^{\circ}05'909''\text{E}$),该剖面古土壤、黄土层次清晰,有很好的层序序列.所研究剖面总厚度为4.55 m,其中上部80 cm为天然剖面,下部3.75 m为人工开挖剖面.在对剖面进行观察对比的基础上,自上而下共连续采集样品460个.在剖面上部80~100 cm处采得大量包括羊、马骨骼和牙齿化石,并有陶片和石器多件.同时发现,骨骼化石具有明显的人类加工、打击破碎的痕迹,可能为人类在食肉的同时也碎骨取髓.对采得样品密封封存,运输、保存过程中均严格避免后期人为污染.

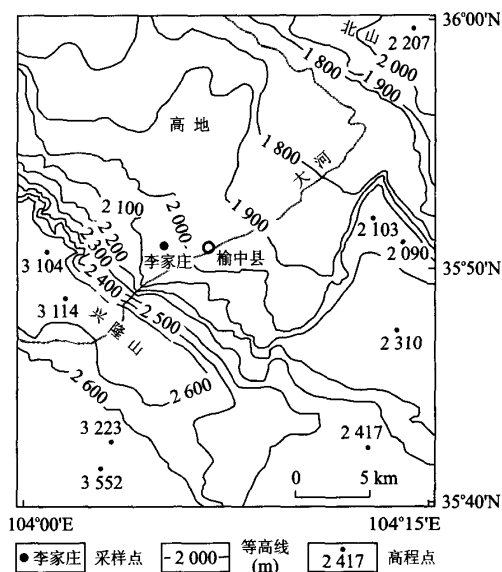


图1 剖面位置(单位:m)

Fig. 1 Location of studied section

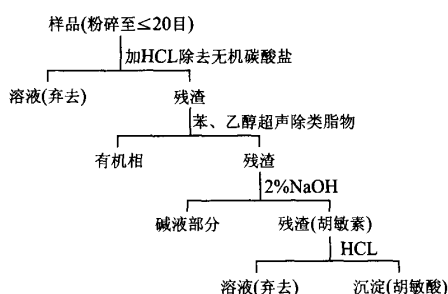


图2 样品胡敏素和胡敏酸提取流程(刘嘉麒等,1994)

Fig. 2 Humic and humic acid extraction procedures of the specimens

为了探讨该剖面土壤形成年代和化石年代,并探讨不同样品测年的可靠性和准确性,对所采集的同一层位牙齿、骨头和土壤样品分别在不同实验室进行测年,骨头骨胶质样品、土壤有机质和无机碳酸盐样品在兰州大学 ^{14}C 年代实验室(实验室编号:Lug;半衰期 $\lambda_c = (5\ 568 \pm 40)\text{a}$)测定,对古土壤样品采用酸—碱—酸流程提取胡敏素和胡敏酸(图2).第二部分动物牙齿化石样品由德国基尔大学测年实验室用AMS方法测定(实验室编号Kia;半衰期

表 1 不同样品(组分)¹⁴C 测年结果

Table 1 ¹⁴C dating result

样品编号	测年材料	测年方法	¹⁴ C 年龄/a	¹⁴ C 校正年龄/a
Lug-04-49	inorganic carbon	常规测年法	6 306±80	7 395±85
Lug-04-49	organic carbon	常规测年法	3 682±70	4 175±175
Lug-03-89	bone	常规测年法	2 248±50	2 245±95
Kia 23774	teeth(collagen)	加速器测年	2 235±30	2 240±90
Kia 23774	teeth(no-soluble-rest)	加速器测年	1 815±40	1 760±60

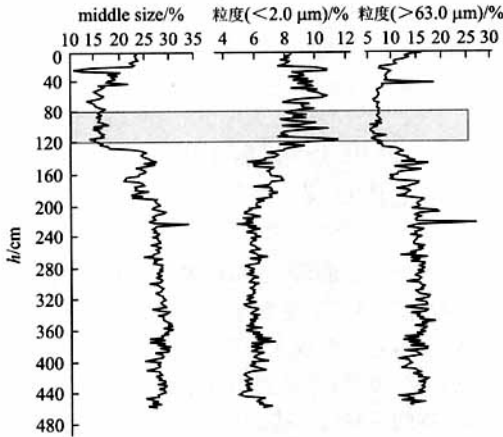


图 3 剖面粒度实验结果及采样位置(阴影部分)

Fig. 3 Grain-size of studied section and sampling position

$\lambda_c = (5\ 568 \pm 40)a$, 各样品测年结果参见表 1. 为了探讨与化石相关的环境变化问题,在兰州大学西部环境教育部重点实验室沉积物与粒度实验室对剖面 460 个土壤样品做了粒度实验分析,实验仪器为英产 MALVERN MS-2000 全自动激光粒度仪,实验结果见图 3.

2 不同物质组分年龄测定的影响因素

自然界中由于宇宙射线的作用,大气中具有含放射性¹⁴C 的二氧化碳.植物通过光合作用,含有¹⁴C 的二氧化碳同时被植物吸收,在这种作用过程中,带有¹⁴C 的植物营养料又进入动物及人类组织中.因此,所有的生物也都含有¹⁴C,通过碳的交换循环,¹⁴C也在溶解于海水的碳酸盐类中保持平衡.这就为通过测定动植物或沉积物中¹⁴C 来测定样品年代提供了物质保障.¹⁴C 法测年的基本原理是(Geyh and Schleicher, 1991),如果某一含碳物质一旦停止与外界发生碳交换,例如有机体(动物或植物)死亡或碳酸盐沉积过程中断,那么有机碳或无机碳酸盐中

的¹⁴C 就得不到新的补充,原始的放射性¹⁴C 按指数规律减少并遵循 $I = I_0 e^{-\lambda t}$. 其中 I_0 为处于交换运动中碳的放射性浓度(即样品形成时的¹⁴C 浓度), I 为停止交换 t 年后样品中碳的放射性浓度(即当前样品的¹⁴C 浓度), t 为样品形成并与外界停止¹⁴C 交换后距今的年龄, λ 为放射性¹⁴C 的衰变常数.因此,根据含碳样品中¹⁴C 衰减的程度,可推知样品“死亡”的年龄: $t = (1/\lambda) \ln(I_0/I)$. 测年中当前样品的¹⁴C 浓度可以通过仪器测定获得,而初始¹⁴C 浓度则假设为与样品和外界停止¹⁴C 交换时的大气¹⁴C 的浓度相同,且最近几万年以来大气¹⁴C 浓度没有发生变化,样品形成时的¹⁴C 浓度就与现代大气¹⁴C 浓度相同.由于 20 世纪 50 年代全球核实验开始不断进行,大气¹⁴C 浓度发生显著改变,因此在实际测年的过程中均以 1950 年¹⁴C 浓度为原始大气¹⁴C 浓度.

近年来,随着研究的深入和测量技术的提高,已经能够准确测量大气中¹⁴C 浓度,并且发现大气中¹⁴C 浓度随太阳黑子活动、地球磁场和地球表面碳循环等的变化而变化(Stuiver *et al.*, 1991). 结合树轮年代学的研究,通过对多个连续和相互重叠树轮样品中¹⁴C 浓度的测定,已经确定了 11.86 ka 的大气¹⁴C 浓度变化(Stuiver *et al.*, 1998). 11.86 ka 以前¹⁴C 浓度的变化,则通过珊瑚和陆相沉积碳酸盐的²³⁰Th 测年和¹⁴C 测年的对比研究(Bard, 1998; Burr *et al.*, 1998; Edwards *et al.*, 1998; Schramm *et al.*, 2000; Yokoyama *et al.*, 2000),大洋浮游有孔虫和冰心的交叉校正以及极地冰心和沉积物中的³⁶Cl 和¹⁰Be 的浓度对比(Beer *et al.*, 1994; Frank *et al.*, 1997; Bard, 1998; Muscheler *et al.*, 2000) 直接或间接给出. 研究结果揭示过去 50 ka 中大气¹⁴C 浓度曾发生过显著的变化,通常测定的¹⁴C 年代只有经过校正(¹⁴C 初始浓度变化校正和半衰期校正)后,才可以和其他测年方法获得的日历年代进行对比. 通过树轮及其他沉积物研究所获得的大气¹⁴C 浓度随时间变化的记录,则是对测定的¹⁴C 年代进

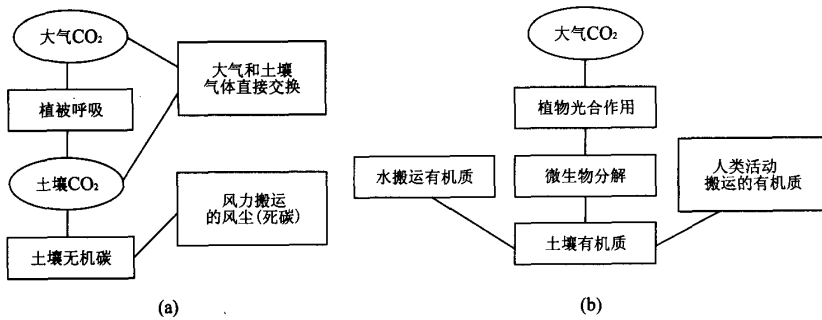


图 4 黄土古土壤无机碳来源(a)和有机碳来源(b)

Fig. 4 Sources of inorganic carbon (a) and source of organic carbon (b) in loess-paleosol

行校正而使之成为日历年代的基础。

黄土是第四纪普遍分布的风积物,其成分以石英为主,其次是长石、白云母和碳酸盐等,间有软体动物的硬壳和极少量有机物。在黄土—古土壤中,其次生碳酸盐组成包括:(1)由植被在光合作用中吸收大气中的 CO_2 ,后经呼吸过程放出 CO_2 ,放出的 CO_2 与黄土古土壤进行碳交换,留在古土壤中;(2)大气和土壤气体直接交换,土壤 CO_2 最后被吸收而进入土壤中;(3)在黄土堆积过程中,由风携带而来的黄土颗粒中所含的碳酸盐物质保留下来组成古土壤的无机碳(图4a)。因此,影响古土壤次生碳酸盐的初始 ^{14}C 浓度由土壤 CO_2 的 ^{14}C 浓度和黄土颗粒 ^{14}C 的浓度共同决定。

黄土—古土壤中有机质的组分来源相对较复杂,其来源主要包括:(1)植物光合作用吸收大气中的 CO_2 后,植物死亡经微生物分解残留在古土壤或植物经动物利用后,动物死亡经微生物分解残留在古土壤中;(2)由水近距离搬运而来的有机质沉积下来后残留在古土壤中;(3)由人类活动所造成的人为土壤加入,最后其有机质留在土壤中,均成为古土壤有机质组分(图4b)。因此,影响古土壤有机质测年的 ^{14}C 的初始浓度不仅与源地自生有机质的 ^{14}C 浓度有关,也与异地源的有机质 ^{14}C 浓度有关。由于夏季温度较低和暴雨较少,现代和全新世黄土土壤中缺乏钙结核(郭正堂,1990),黄土—古土壤中淋溶作用很小,上下物质交换很弱。根据 ^{14}C 产生和运动规律以及碳循环模型(沈承德等,1990),可得到无钙结核黄土中放射性 ^{14}C 的地球化学迁移过程(图4),它们清楚地展示了影响 ^{14}C 年龄测定的几个因素的作用途径。

3 同一层位不同物质样品 ^{14}C 年龄对比分析及其意义

在 ^{14}C 测年法的假设中,要求含碳物质“脱离碳交换贮存库”。事实上很难有绝对脱离碳交换贮存库的含碳标本,它们都或多或少受到周围环境和后期作用的影响。显然,样品受干扰越少、越接近于假设条件,标本的年龄就越接近真实年龄。要提高测年数据的可靠性,一方面可以从 ^{14}C 方法本身的实验技术上尽可能地分组测定年龄,如可溶于碱的部分与不溶于碱的部分年龄的比较以及有机质纤维素年龄和木质素年龄的比较。另一方面,与地层学、孢粉分析、考古学以及其他年代学方法配合使用(中国科学院贵阳地球化学研究所,1977)。随着测年技术的提高、测年方法的改进、加速器等精密仪器的使用,各实验室对测量的大量数据进行比较,认为不同的测年方法对测年结果无明显的影响。

由表1可以看出,3个同层位样品的测年结果相差悬殊,在数值上动物骨胶质和牙齿样品年龄最小,几乎可视为相同。其次是土壤有机质年龄,最老的是土壤无机质年龄,通过对测年过程的可靠性和精确性控制分析可以肯定,所获得的测年值都是准确而可靠的,只不过它们分别反映了各自大致的真实年龄。

牙齿化石样品的年龄代表的是牙齿脱离与外界碳交换后距今的“年龄”。样品采集点动物牙齿、骨骼和少量陶片一起埋藏,牙齿埋藏后成了与外界脱离碳交换的封闭库。由于牙齿坚固、紧密,起到了很好的绝缘密封作用,使得牙齿内部的骨胶质几乎不受到外界碳入侵的影响,不与土壤中的碳进行交换,内部骨胶质中 ^{14}C 很好地记录了牙齿埋藏年龄。对于

骨骼化石利用常规¹⁴C方法测年获得的结果为(2 248±50)a((2 245±95)cal. a),利用AMS对化石牙齿胶原质的测年结果为(2 235±30)a((2 240±90)cal. a),而利用AMS对相同化石牙齿非骨胶原的测年结果为(1 815±40)a((1 760±60)cal. a),说明对于牙齿测年来讲,前者并未受到后期外来¹⁴C的影响,后者非骨胶原由于受到后期¹⁴C的影响而相对“年轻”。另一方面,常规测年和AMS对化石牙齿胶原质的测年结果十分吻合,二者之间的相对差值仅为13 a,说明不同实验室不同测年方法对样品年龄值的影响很小,相对差值仅为 5.78×10^{-3} ,而不同测年物质(骨胶原和非骨胶原)的年龄差值却很大,其差值为420 a,相对差值为18.75%。因此,在具体工作中,某些物质的测年值失真性很大,选择能反映地质事件年龄的测年物质非常重要。对所测结果进行考古对比分析,认为牙齿和骨骼化石测年结果是合理、可以接受的。1924年在甘肃民勤县沙井村发现了沙井文化,该期文化主要分布于甘肃的永登、古浪、武威、天祝、永昌、张掖与民勤等地,年代约为公元前800年至公元前600年,其年代与牙齿样品年龄较接近,具有一定的对比性。动物骨骼化石和石器、陶片在该采样点的集中出现说明2 235 cal. a时已经有人类活动,因此,牙齿、骨骼及少量陶片的发现有助于拓宽沙井文化的分布范围。

剖面所在的地理环境干燥,主要沉积是风成黄土,由实验数据算出剖面上部典型的黄土沉积速率0.357 9 mm/a,这一结果符合当时气候环境下的沉积速度,可与甘肃合水MJY-A土壤剖面进行比较,该剖面地理环境与榆中剖面的非常接近,其88~45 cm深度,¹⁴C年龄为3 100~1 500 a,沉积速率为0.393 7 mm/a(周群英等,2004);三角城剖面地理环境与榆中剖面也非常相似,其75 cm沉积厚度,¹⁴C年龄为(2 430±50)a,沉积速率为0.308 6 mm/a(张成君等,2004)。这3个剖面在大致相同的时间内,沉积的厚度和速率也大致相同,因此,牙齿样品年龄代表了其埋藏深度黄土的沉积年龄。

土壤样品有机质胡敏素和胡敏酸测出的年龄为(3 682±70)a((4 175±175)cal. a),比其中化石的年代约老1935 a,代表了混合有机碳年龄。古土壤层富含有机质,其形成是一个不断进行积累和交换的过程,它不断吸收新的含碳物质(如根生长、溶解于水中的有机成分的渗透、微生物影响以及土壤动物活动等)。张甘霖等(2004)曾对人为土壤有机碳进行

过¹⁴C测年,采样点甘肃武威:深度0~20 cm,总有机碳8.9 g/kg,年龄为(2 690±150)a;宁夏永宁:深度0~22 cm,总有机碳7.39 g/kg,¹⁴C年龄为(3 560±190)a。后者比前者老870 a,说明人为对土壤有机质¹⁴C年龄影响很大。

土壤样品中的有机质组分是十分复杂的,要提取样品当时的植被和动物及微生物死后保存下来的有机质,而清除样品中次生吸附的外来的有机质并非易事甚至是不可能的,因为这类物质同源地有机质有类似的化学性质。因此,根据胡敏素和胡敏酸组分测出的样品有机碳年龄就不能单纯用来代替当时植被生长的年龄,而对其测量值所代表的意义需进行系统的碳来源分析。然而,同一样品不同有机组分的¹⁴C测年结果可提供关于样品化学封闭体系方面的重要信息,对于评估样品¹⁴C年龄测定值的可靠程度极其重要(Yin *et al.*, 1997)。

样品有机质年龄与牙齿样品年龄的差值1 935 a在环境变化上也得到体现。由剖面样品的粒度实验结果(图3)分析,在剖面150~80 cm范围内,土壤粘粒含量急剧增大,达到最大值,粒径<63.0 μm的颗粒含量急剧减小,达到最小值,反映了当时的气候有较大的波动,气候异常。据研究,在5 000~3 000 a是全球异常洪水事件多发的时期,也是全新世大暖期濒临结束、全球进入气候波动加剧的时期,在西欧、西亚、两河流域和印度河流域等都有气候发生突变的记录,我国祁连山敦德冰心记录中,4 900~2 900 a虽然偏暖,但此间出现5次冷暖的交替,黄河中上游流域在这期间发生了特大洪灾(杨晓燕和夏正楷,2001; An, 2004; 杨晓燕等,2004)。剖面80~0 cm范围内,中值粒径<2.0 μm和粒径>63.0 μm组分含量的变化较为平缓,反映了这段时间内气候波动小,环境气候变化平稳。腾格里沙漠南缘过渡区全新世8 000~3 000 a期间的古气候演变序列显示了这一期间先振荡性的升温—持续高温、湿度增大—高山冰进的低温期(Zhang, *et al.*, 1998),腾格里沙漠南缘与甘肃榆中仅距200 km左右,其古气候演变序列与研究剖面年代学及粒度实验结果所反映的古环境变化(气候平稳—气候异常—气候平稳)正好吻合。气候在5 000~3 000 a的波动可能导致该剖面沉积的黄土、古土壤被冲刷而缺失或当时出现延续时间达2 000 a的沉积间断,当时由于该区毗邻兴隆山,动物众多,种类丰富,人类活动于这个地区,形成了该区广布的文化遗迹。土壤有机质年龄比同层位骨

骼和牙齿化石年龄老正好可以比较满意地得以解释。

土壤样品无机碳的 ^{14}C 测年过程中,其公式 $I = I_0 e^{-\lambda t}$ 中的 I (即当前 ^{14}C 浓度)受到“死碳”的影响,“死碳”混入比例的大小直接影响到测年值反映土壤样品沉积年代的准确程度。“死碳”混入比例的引入或计算可用下述方法在计算 ^{14}C 年代时直接进行校正。假设“死碳”混入比例为 X , 则 ^{14}C 年代计算公式为: $I = I_0(1 - X)\exp(-\lambda t)$ (各字母代表的意义与前述相同), 由此可导出混入“死碳”比例为: $X = (I_0 - I/\exp(-\lambda t))/I_0$, 其中 t 可采用其他非 ^{14}C 测年法精确测出。

中国北部沙漠、戈壁广布,黄土分布不但面积广,而且厚度也大,是世界上最大的大气粉尘源之一。亚洲粉尘每年的释放量约 800 Tg, 占到全球的一半。据王亚强等(2004)研究,中国粉尘源区碳酸盐含量呈现自西向东逐渐降低趋势,塔克拉玛干沙漠的碳酸盐含量平均值为 11.84%, 库姆塔格沙漠为 8.03%, 河西走廊戈壁的平均值为 8.16%, 巴丹吉林沙漠为 4.64%, 乌兰布和沙漠为 1.72%, 腾格里沙漠为 2.57%, 毛乌素沙漠的平均值为 0.88%, 内蒙古中部干草原地区的平均值为 3.02%, 浑善达克沙地平均值为 0.56%, 科尔沁沙地的平均值仅为 0.13%。甘肃榆中盆地位于西北黄土高原腹地,受到西北沙尘暴的强烈影响,沙尘天气集中发生在春冬季节。该研究盆地沙尘主要受河西走廊戈壁、巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠影响,又因在干旱地区大气降水和植被对土壤碳酸盐的贡献较弱,沙尘携带的碳酸盐是组成土壤样品无机碳的主要部分,“死碳”引入的比例可以作为参考对测年结果进行校正。在无“死碳”引入的理想状态下,土壤碳酸盐测年结果反映土壤沉积后脱离与大气 CO_2 碳交换的年代,但由于“死碳”的引入,使得样品中 I 值(即当前的 ^{14}C 浓度)变小,由 ^{14}C 测年公式计算的样品年龄偏大。考虑死碳混入以及对土壤有机质年龄,可推测土壤样品无机碳测年结果 $(6\ 306 \pm 80)\text{a}$ ($(7\ 395 \pm 85)\text{cal. a}$) 偏老于古土壤沉积年龄约 1 000~2 000 a。

4 讨论与结论

研究表明,目前 ^{14}C 测年精度很高,其误差在几年范围内,但对同一层位使用不同物质样品的测年结果却相差悬殊。因此在使用 ^{14}C 测年数据时需全面系统分析样品中碳的来源,根据其代表的不同

同年代意义正确使用。

在干旱黄土区,骨头或牙齿化石较好地记录了动物出现或人类活动的年代,可用于生物考古和人类文明考古的年代界定。古土壤样品中有机质 ^{14}C 测年值,记录的是混合有机碳的年龄,其值可大致确定当时植被生态系统的存在年代。化石年龄与同层位土壤有机质年龄之间的差别,意味着黄土—古土壤界面处可能存在沉积间断,故在一定条件下包含化石的古土壤有机质年龄并不一定代表化石或人类活动存在的年龄,这在环境考古和古人类与环境之间关系及相互影响研究中十分重要。无机碳测年值根据其“死碳”混入比例,可以确定地层沉积年龄。同时,这一研究对于探讨土壤中碳储存及来源也有重要的意义,因为有可能将土壤中具有不同年龄的碳作为某一时期碳总储量而计算。

在年轻黄土地质体(年龄 $< 50\ 000\ \text{a}$)的定年中, ^{14}C 或 AMS 法是大多数研究者使用的较为重要的方法之一。黄土—黄土古土壤地层中其物质来源的特殊性(即沙尘暴的影响)、干旱区环境气候对成土作用的独特性(即降雨少而对地质体中 ^{14}C 浓度影响弱)决定了用 ^{14}C 或 AMS 法测年时误差不可避免,有时可能会较大。由于在研究工作中并不一定每次都能发现或得到诸如牙齿或其他自然封闭体提供较好的“脱离碳交换贮存库”的含碳物质,因此在黄土—古土壤层序定年时,若使用无机碳酸盐 ^{14}C 或 AMS 法测年,要充分考虑其外源“死碳”的引入,对样品实测年龄进行“死碳”校正。

致谢:徐齐治、曹继秀老师在实验设计、测定过程中给予大力帮助并审阅了本文,特此致谢!

References

- An, C. B., Feng, Z. D., Tang, L. Y., 2004. Environmental change and cultural response between 8 000 and 4 000 cal. yr B. P. in the western Loess Plateau, northwest China. *Journal of Quaternary Science*, 19(6): 529—535.
- Bard, E., 1998. Geochemical and geophysical implications of the radiocarbon calibration. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 62(12): 2025—2038.
- Beer, J., Joos, C. F., Lukaszczuk, C., et al., 1994. ^{10}Be as an indicator of solar variability and climate. In: Nesme-Ribes, E., ed., *The solar engine and its influence on terrestrial atmosphere and climate*. Vol. I. NATO ASI Springer, Berlin, 221—233.

- Burr, G. S., Beck, J. W., Taylor, F. W., et al., 1998. A high resolution radiocarbon calibration between 11 700 and 12 400 calendar years B. P. derived from ²³⁰Th ages of corals from Espirito Santo island, Vanuatu. *Radiocarbon*, 40(3): 1093–1105.
- Chen, W. J., Ji, F. J., Wang, F., 1999. Age dating of young geological systems (sequel)—New method, new advancement. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Edwards, R. L., Beck, J. W., Burr, G. S., et al., 1998. A large drop in atmospheric ¹⁴C/¹²C and reduced melting in the Younger Dryas, documented with ²³⁰Th ages of corals. *Science*, 260: 962–967.
- Geyh, M. A., Skhlechter, H., 1991. Absolute age determination. Springer, New York.
- Frank, M., Schwarz, B., Baumann, S., et al., 1997. A 200 kyr record of cosmogenic radionuclide production rate and geomagnetic field intensity from ¹⁰Be in globally stacked deep-sea sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 149(1–4): 121–129.
- Guiyang Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1977. ¹⁴C-age dating methods and their application. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Guo, Z. T., Feidorlofu, N., 1990. Accumulation and corrosion of CaCO₃ of the loess and paleosol in the central loess plateau, China. In: Liu, D. S., ed., *Loess Quaternary Geology Global Change*, 1: 93–97.
- Levin, I., Graul, R., Trivett, N. B. A., 1995. Long-term observations of atmospheric CO₂ and carbon isotopes at continental sites in Germany. *Tellus*, 47B: 23–24.
- Liu, J. Q., Chen, T. M., Nie, G. Z., 1994. Datings and reconstruction of the high resolution time series in the Weinan loess section of the last 150 000 years. *Quaternary Science*, (3): 193–202 (in Chinese with English abstract).
- Muscheler, R., Beer, J., Wagner, G., et al., 2000. Changes in deep-water formation during the Younger Drayas event inferred from ¹⁰Be and ¹⁴C records. *Nature*, 408: 567–570.
- Schramm, A., Mordechai, S., Goldstein, S. L., 2000. Calibration of the ¹⁴C time scale to >40 ka by ²³⁴U-²³⁰Th dating of Lake Lisan sediments (last glacial Dead Sea). *Earth and Planetary Science Letters*, 175: 27–40.
- Shen, C. D., Yi, W. X., Zhou, W. J., et al., 1990. ¹⁴C carbon cycle and global change. In: Liu, D. S., ed., *Loess Quaternary Geology Global Change*, 2: 27–34 (in Chinese).
- Shi, J. S., Li, Z. H., Wei, M. J., et al., 1998. Loess and paleoclimate change. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Stuiver, M., Braziunas, T. F., Becker, B., et al., 1991. Climatic, solar, oceanic and geomagnetic influences in late-glacial and Holocene atmospheric ¹⁴C/¹²C change. *Quaternary Research*, 35: 1–24.
- Stuiver, M., Reimer, P. J., Bard, E., et al., 1998. Intcal198 radiocarbon age calibration, 24 000–0 cal a. *Radiocarbon*, 40(3): 1041–1083.
- Voelker, A. H. L., Sarnthein, M., Groot, P. M., et al., 1998. Correlation of marine ¹⁴C ages from the Nordic seas with the GISP2 isotope record; Implication beyond 25 ka B. P. *Radiocarbon*, 40(1): 517–534.
- Wang, Y. Q., Cao, J. J., Zhang, X. Y., et al., 2004. Carbonate content and carbon and oxygen isotopic composition of surface soil in the dust source regions of China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1: 113–117 (in Chinese with English abstract).
- Xia, Z. K., Chen, F. Y., Chen, Y., et al., 2001. Environmental background of evolution from the paleolithic to neolithic culture in Nihewan basin, North China. *Science in China (Ser. D)*, 9: 779–788.
- Xia, Z. K., Yang, X. Y., 2003. Preliminary study on the flood events about 4 ka B. P. in North China. *Quaternary Science*, (23) 6: 667–674 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. Y., Xia, Z. K., 2001. Summarizing the environmental archaeology development in China. *Progress in Geography*, (16) 6: 761–768 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. Y., Xia, Z. K., Cui, Z. J., et al., 2004. Environmental settings of archaeological sites depositional processes and distribution at Guanting basin. *Acta Geographica Sinica*, (59) 3: 455–461 (in Chinese with English abstract).
- Yin, J. H., Pen, G., Jiao, W. Q., et al., 1997. A preliminary study on the radiocarbon dating of different organic fraction separated from peat. *Seismology and Geology*, 3: 227–280.
- Yokoyama, Y., Esat, T. M., Lambeck, K., et al., 2000. Last ice age millennial scale climate changes recorded in Huon Peninsula corals. *Radiocarbon*, 42(3): 383–401.
- Zhang, C. J., Chen, F. H., Shang, H. M., et al., 2004. The paleoenvironmental significance of organic carbon isotope in lacustrine sediments in the arid China: An example from Sanjiaocheng palaeolake in Minqin. *Quaternary*

- Science*, 24(1): 88—94 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. L., He, Y., Gong, Z. T., 2004. Characteristics of organic carbon distribution in anthropogenic soils and its implication on carbon sequestration. *Quaternary Science*, 24(2): 149—159 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. C., Ma, Y. Z., Li, J. J., et al., 1998. The Holocene paleoclimatic change in southern vicinity of Tengger Desert. *Chinese Science Bulletin*, 44(16): 550—555.
- Zhou, Q. Y., Huang, C. C., Pang, J. L., 2004. Study in relationship between the pedogenetic environment changes and human impact in the Holocene soil of the Loess Plateau in the upper reaches of Jinghe. *Arid Land Geography*, 27(4): 43—51 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Z. Y., Ding, Z. L., 1994. Quaternary paleoclimate and new tectonic change in the Loess Plateau, China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 陈文奇, 计凤桔, 王非, 1999. 年轻地质体系的年代测定(续)——新方法、新进展. 北京: 地质出版社.
- 郭正堂, N. 菲多罗夫, 1990. 中国中部黄土和古土壤中碳酸钙的聚集和溶蚀. 见: 刘东生. 黄土、第四纪地质、全球变化, 第 1 辑, 93—97.
- 刘嘉麒, 陈铁梅, 聂高众, 等, 1994. 渭南黄土剖面的年龄测定及十五万年来高分辨时间序列的建立. 第四纪研究, (3): 193—202.
- 沈承德, 易惟熙, 周卫健, 等, 1990. ^{14}C 、碳循环及全球变化. 见: 刘东生编. 黄土、第四纪地质、全球变化, (第 2 辑), 27—34.
- 石建省, 李铮华, 魏明建, 等, 1998. 黄土与古气候演化. 北京: 地质出版社.
- 王亚强, 曹军骥, 张小曳, 等, 2004. 中国粉尘区表土碳酸盐含量与碳同位素组成. 海洋地质与第四纪地质, 24(1): 113—117.
- 夏正楷, 杨晓燕, 2003. 我国北方 4 ka 前后异常洪水事件的初步研究. 第四纪研究, 23(6): 667—674.
- 杨晓燕, 夏正楷, 2001. 中国环境考古学研究综述. 地球科学进展, 16(6): 761—768.
- 杨晓燕, 夏正楷, 崔之久, 等, 2004. 青海官亭盆地考古遗存堆积形态的环境背景. 地理学报, 59(3): 455—461.
- 张成君, 陈发虎, 尚华明, 等, 2004. 中国西北干旱区湖泊沉积物中有机质碳同位素组成的环境意义——以民勤盆地三角城古湖泊为例. 第四纪研究, 24(1): 88—94.
- 张甘霖, 何跃, 龚子同, 2004. 人为土壤有机碳的分布特征及其固定意义. 第四纪研究, 24(2): 149—159.
- 中国科学院贵阳地球化学研究所 ^{14}C 实验室, 1977. ^{14}C 年龄测定方法及其应用. 北京: 科学出版社.
- 周群英, 黄春长, 庞奖励, 2004. 泾河上游黄土高原全新世成壤环境演变与人类活动影响. 干旱地理, 27(4): 43—51.
- 朱照宇, 丁仲礼, 1994. 中国黄土高原第四纪古气候与新构造演化. 北京: 地质出版社.