

文章编号 1001-8166(2007)03- 08

系列¹⁴C 样品贝叶斯法日历年龄校正研究进展^{*}

尹金辉, 郑勇刚, 刘粤霞, 卢演侑

(中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 系列¹⁴C 样品贝叶斯法日历年龄校正研究已成为当前¹⁴C 年代学中一个热点, 系统综述了时序已知、时序间隔已知和时序间隔近似已知系列¹⁴C 样品日历年龄校正研究的历史、原理、计算方法及其在树轮、泥炭、地层等领域上应用进展, 对影响系列样品贝叶斯分析获得¹⁴C 日历年龄区间的主要因素以及未来发展方向作了归纳。大量事例研究结果表明系列样品贝叶斯分析的实质在于贝叶斯方法从统计的角度灵活地把地层信息以概率方式加入到¹⁴C 日历年龄校正过程中, 获得比单个¹⁴C 年代校正精度更高的日历年龄。

关键词: ¹⁴C 校正; 贝叶斯分析; 摇摆匹配

中图分类号: P597+.3 **文献标识码:** A

1 引言

¹⁴C 测年法广泛用于测定发生在晚更新世期间重大地质事件的年代, 把¹⁴C 年龄转换成日历年龄是¹⁴C 样品年龄测定过程中一个重要环节, 每个使用¹⁴C 年龄的学者都会涉及到的问题^[1]。由于日历年龄校正曲线呈锯齿状不规则波动, 造成一个样品¹⁴C 年龄测定值转换成日历年的年龄后, 日历年龄误差区间比对应的¹⁴C 年龄区间有时可能要大许多倍, 甚至还会出现一个¹⁴C 年龄对应多个日历年龄区间的情形。据统计, 当¹⁴C 年龄误差为 ± 20 a 时, 校正后的日历年龄误差约为 ± 100 a; 若¹⁴C 年龄误差为 ± 50 a 时, 校正后的日历年龄误差可达到 ± 160 a^[2]。很明显, 即使我们实现了单个样品的高精度测年, 也比较困难获得高精度的地层年代, 这将阻碍百年尺度的快速气候变化等方面的研究。

为了克服由于¹⁴C 校正过程引起日历年龄误差变宽, 满足高精度的考古和地质事件测年需要, 人们一直在探索缩小日历年龄区间的方法, 系列样品贝叶斯分析法就是其中之一。在 20 世纪 60 年代日历年龄校正曲线初步建立时, Ferguson 等^[3] 利用日历

年龄校正曲线的波动特征, 首次开展了浮动树轮系列样品的摇摆匹配法¹⁴C 测年的工作, 与单个数据的转换相比, 获得的误差明显地减小, 引起了人们的注意。系列样品摇摆匹配法 (Wiggle-matching dating, 如图 1 所示) 亦称曲线拟合 (curve fitting), 就是在测年对象上 (木头是最理想的测年样品) 连续地采集一系列离散样品组成系列样品, 将系列样品的¹⁴C 年龄按日历年龄顺序连接成一小段曲线, 然后与高精度日历年龄校正曲线进行系列样品摇摆匹配 (曲线拟合) 以减小日历年代的误差, 从而获得高精度日历年代。

后来, Clark 等^[4]、Clark 等^[5] 以及 Clark 等^[6] 也尝试了这种方法。在这个阶段的系列样品摇摆匹配法主要解决考古遗址年龄, 多数研究者使用目测法将浮动树轮系列与校正曲线进行图形上匹配, 凭观察者的眼睛来判断合适的拟合位置, 存在一定的主观性; 虽然有少量学者使用基于最小二乘法统计方法, 但由于在这个时期研究者没有采用统一标准方法, 研究的结果难以相互比较, 以致难以被广泛接受, 而处于停顿。1986 年国际通用的 INTCAL86 高精度日历年龄校正曲线建立后^[7-9], 上述方法又开

* 收稿日期: 2006-05-21, 修回日期: 2007-01-15。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“海原断裂带全新世古地震高精度测年和强震事件时间序列”(编号: 40202015) 资助。

作者简介: 尹金辉 (1969-) 男, 湖北罗田人, 副研究员, 主要从事地质灾害事件与第四纪地质年代学研究。E-mail: yjhdzs@hotmail.com

长期气候变化的模拟。

综合全面的大气海洋环流模式 (CGCMs) 被认为是当前最完全的气候模式,充分用于了解气候系统变化规律和探询气候异常发生机理,已经成为研究人类社会对气候异常反馈的地球系统模式的基础^[4]。这类模式对地球系统进行了非常细致的描述,包括更多反馈和过程,因而能够揭示更多时间、空间尺度上的地球系统的特征,既适合全球尺度也适合区域尺度上的研究。但这类模式正是由于它的复杂性,对计算能力的要求很高,无法进行长期的气候研究,局限于进行年代际和百年际尺度上的平衡态和敏感性实验。

中等复杂程度的地球系统模式 (EMICs) 在简单模式和综合全面的模式 (CGCMs) 之间架起了一座桥梁。EMICs 对地球系统进行了相当完备的描述,几乎包括所有的组成部分,同时为了尽可能多的模拟气候系统各组成部分之间的反馈,EMICs 主要使用参数化方式适度地简化了气候系统中各种过程和细节描述,从而可以模拟长期时间尺度的气候变化。这样,EMICs 在一定程度上比概念性模式更接近 GCMs,具有更多 GCMs 的特征,但又获得了与简单模式相当的计算效率。因而,EMICs 是简单模式和 GCMs 的补充,一定程度上具备了二者的比较优势,却又克服二者的比较劣势。近年来 EMICs 在地球系统模拟中的优势逐渐显露出来,成为地球系统模拟的有力工具。图 1 形象地给出了 3 类模式在地球系统模式中的位置。

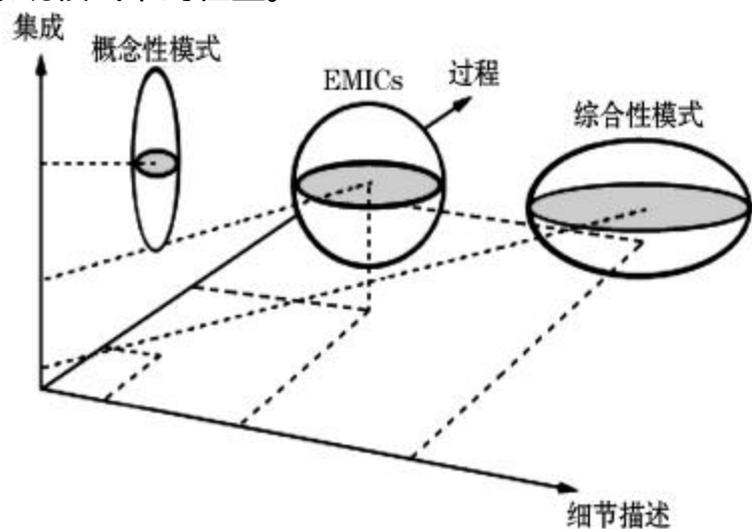


图 1 EMICs 的图解定义(改自 Claussen^[5])

Fig.1 Pictorial definition of EMICs

目前,EMICs 在气候系统研究中的重要地位得到了广泛的重视,对 EMICs 的开发和应用也得到了进一步加强,从而把 EMICs 主要对自然地球系统的描述逐步转向了对整个地球系统的描述,将 EMICs

对历史气候变化规律的研究转向了对历史、现在和未来气候全面的研究。迄今,国外主要活跃着十几个 EMICs,并且不断地有新的 EMIC 出现。国内亦逐步认识到 EMICs 的重要性,开始进行这方面的开发与应用工作。

本文主要从基本组成、应用领域这两个方面讨论这些目前国际上比较流行的 EMICs。

2 中等复杂程度的地球系统模式——EMICs

中等复杂程度的地球系统模式 (EMICs) 是一类复杂程度介于简单模式和综合全面但非常复杂的大气环流模式 (GCMs) 之间的地球系统模式。目前,EMICs 主要用来描述自然地球系统,没有直接描述人类和自然的相互作用,而是将人类活动作为一种外在的驱动力,通过参数化的方法引入到模式中来。但必须指出,有少数 EMICs 已经在模式中加入社会经济模块,这样就以积极互动的方式而不是参数化的方式在模式中描述了人类圈,这些 EMICs 更接近完备意义上的地球系统模式,这也是 EMICs 未来的一个发展方向。

2.1 EMICs 的结构和基本组成

我们在表 1 中列出了目前世界上非常活跃的 13 个中等复杂程度的地球系统模式 (EMICs)。同时,我们将各个 EMIC 的主要组成部分列在表 1 中,从表中可以清楚地看出所有的模式都包括了大气、海洋、海冰和生物圈模块,而且大部分模式还包括冰川模块,这样的构成非常接近完备的地球系统的概念。

在 EMICs 中,大气模块主要采用的是能量水汽平衡模式 (EMBM),能量水汽平衡模式,包括一定的动力机制 (DEMBM)、准地转模式 (QG)、统计动力学模式 (SDM) 和大气环流模式 (GCM)。大气模块的水平分辨率通常比较粗糙,尤其是对于最简单的能量水汽平衡模式来说,一般都是采用纬向平均的方式进行计算。在垂直方向上, L_n 表示了垂直的层数。如 CLIMBER-2,其大气模块采用的是一个 $22.5^\circ \times 7.5^\circ$ 的二维统计动力学模式,但在计算长波辐射时将大气分为 16 层(这样一般被称为 2.5D)。同时为了简化计算,大部分 EMICs 对于大气内部的诸多过程及反馈(比如云、地面风场等)进行了预先指

关领域年代中的应用。BCal程序是由设菲尔德大学 Buck 教授领导的科研小组编写出可以完成复杂分段贝叶斯¹⁴C 年龄分析软件。马宏骥等^[22]自编了国内首个可以完成¹⁴C 系列样品日历年代校正的 CalibPKU 程序,与 OxCal 软件相比,增加了长系列样品计算方法,弥补了 OxCal 程序不足。

4 时序间隔已知系列样品贝叶斯分析

这是系列样品贝叶斯分析中一个特例,也是应用最为成功的范例,广泛应用于树木、纹泥等测年对象上,可以准确地数出任意两个年轮(纹层)样品的日历年龄间隔,在这种情况下,时序间隔已知系列样品贝叶斯校正计算方法如下^[20]:

$x_j - x_{j-1} = \Delta_j$, 此处 Δ_j 为样品日历年龄间隔,即样品间的树轮数, $j=2, 3, \dots, n$ 。

对于上式,只要计算出 x_1 后,其他样品 x_j 日历年龄很容易地获得。对日历年龄 x_j 如果没有其他先验条件下,则 $p(x_j)$ 可假定为:

$$p(x_j) = \begin{cases} 1 & 0 < x_j < \Delta_j; j = 2, 3, \dots, n \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$p(x) = p(x | \mu_2, \dots, \mu_n) \times p(x_1) \prod_{j=2}^n \left\{ \frac{1}{\Delta_j} \exp \left[-\frac{(x_j - \mu_j)^2}{2 \Delta_j^2} \right] \right\}$$

此处, $\mu_j = x_1 + \Delta_j$, 设定 $x_1 = 0$, x_1 的后验概率分布为:

$$p(x | x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{\Delta_1} \exp \left[-\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{2 \Delta_1^2} \right] \prod_{j=2}^n \left\{ \frac{1}{\Delta_j} \exp \left[-\frac{(x_j - \mu_j)^2}{2 \Delta_j^2} \right] \right\} \quad (1)$$

由(1)式可以看出,这 n 个日历年龄的后验分布 x_1, x_2, \dots, x_n 具有相同的分布形状。对上式归一化后,即得到系列样品中每个样品日历年龄的后验分布,对后验分布做区间估计,就得到该样品的置信区间,通过外推,就能得到最外层的高精度日历年龄。

在应用上,只要在需要确定事件的剖面上能发现如树木这样的样品时,就可以采用时序间隔已知系列样品贝叶斯分析法获得高精度的日历年龄,这样应用在考古事件年龄测定上例子已多得胜不可数,其他领域也略有涉及,如 Atwater 等^[23]对地震断裂带上形成的树木开展了时序间隔已知的高精度¹⁴C 测年,获得了高精度的古地震事件年龄。Friedrich 等^[24]从德国东部到意大利北部平原之间广大地区采集的晚冰期树木,由树轮宽度指数建立

的气候变化记录与 GRIP¹⁸O 和 GISP₂ ECM 记录是同步的,由系列样品贝叶斯分析¹⁴C 测年确定老 Dryas 气候下降最大持续时间不超过 25~30 年结果。

在我国,1996 年 5 月启动的夏商周断代工程也采用了系列考古样品¹⁴C 测年方法,在确定了我国历史上夏、商、西周 3 个朝代的年代框架发挥了重要作用,这是国内¹⁴C 测年研究的一个进步^[25]。蔡莲珍等^[26]采用贝叶斯统计对我国二里头考古遗址¹⁴C 样品作了有益尝试,对不同先验条件对结果精度的影响作了分析。刘若新等^[27]通过对长白山火山掩埋的树木进行了摇摆匹配法测年,确定火山喷发年代为 AD 1215 ±15,总误差不超过 15 年的理想结果,后来马宏骥使用 OxCal 对这批数据重新计算,日历年代误差可进一步减小到 8 年^[28]。张雪莲等^[29]在确定陕西扶风县黄堆乡发掘出云塘、齐镇两处建筑基址年代时,再次证实了贝叶斯法在确定考古事件年代上有效性。

5 时序间隔近似已知的系列样品贝叶斯分析

泥炭沉积物含有丰富的气候替代指标如孢粉、植物纤维素、同位素等,成为研究全新世气候变化信息记录重要载体,¹⁴C 测年法广泛应用于泥炭沉积物的年龄测定中,因而,建立精确可靠的年龄标尺是以泥炭沉积物进行气候重建研究的关键内容之一,一直备受古气候研究学者的关注。

泥炭沼泽表面上生长的植物体记录的大气中¹⁴C 浓度波动情况与建造¹⁴C 校正曲线的树轮记录几乎相同,因此在¹⁴C 日历年龄校正曲线上发现大气¹⁴C 浓度变化引起的摆动,同样的记录也会在泥炭沉积系列样品上反映出来。系列泥炭样品之间日历年龄间隔并不像树轮样品那样准确已知,但如果一段泥炭内的沉积速率保持恒定,那么样品之间距离间隔也近似于样品间日历年间隔,这样,从泥炭等地层中采集一系列紧密间隔的样品按其在地层中先后顺序将¹⁴C 年代连接起来,组成近似于一小段校正曲线,然后与标准校正曲线进行匹配,从而求出各样品的最佳日历年龄区间。

对于泥炭系列样品不仅可以前面已经介绍的考虑采样位置和邻近¹⁴C 年代信息的时序已知系列样品贝叶斯分析方法,获得准确的系列样品日历年龄。还可以使用下面将介绍的深度—年龄模型来获得泥炭系列样品的日历年龄的贝叶斯计算方法。

Blaauw 等^[30]提出一种完成泥炭沉积物系列¹⁴C

样品深度—年龄模型的日历年龄校正最佳拟合和置信区间计算方法。这种计算方法是：由于泥炭并没有表现出像树轮那样具有每年纹层结构的特征，但对于取样间隔不大，使用曲线斜率即堆积速率(α/cm)和它在日历年龄轴上截距(β)这两个参数来描述泥炭深度和日历年代之间线性关系，因此泥炭系列样品的每个采样层的深度通过选择不同的堆积速率参数 α 和在日历年龄轴截距参数 β 替代其日历年龄，计算公式为：

$$\text{样品日历年龄} = \alpha \times (\text{样品采样深度} - \text{平均深度}) + \text{平均日历年龄} + \beta$$

此处平均日历年龄是系列中所有 ^{14}C 年代平均值相对应的日历年代，调节 α 参数使整个系列样品

在日历轴上移动。 α 值大表示堆积速率低，将扩大系列样品在日历轴上区间，同样地， α 值小将压缩系列样品在日历轴上区间。高的 β 值，表示更往日历轴的右边移动，小的 β 值，表示更往日历轴的左边移动(图 2)。选取一定的 α 和 β 值后，系列样品 ^{14}C 年龄和样品间距被转换成相应的日历年龄和日历年龄间隔(图 2a、2b) 然后与 ^{14}C 日历年龄校正曲线进行匹配(图 2c、2d)。为最佳地匹配系列样品 ^{14}C 年龄与校正曲线，参数的取值范围尽可能地包含所有的选择值，如 $5 < \alpha < 5$; $-200 < \beta < 200$ ，以小步长改变参数 α 和 β 取值，系统地调整参数 α 和 β 值，最终完成多达几万个组合尝试。

评估泥炭系列样品 ^{14}C 年龄与校正曲线之间匹

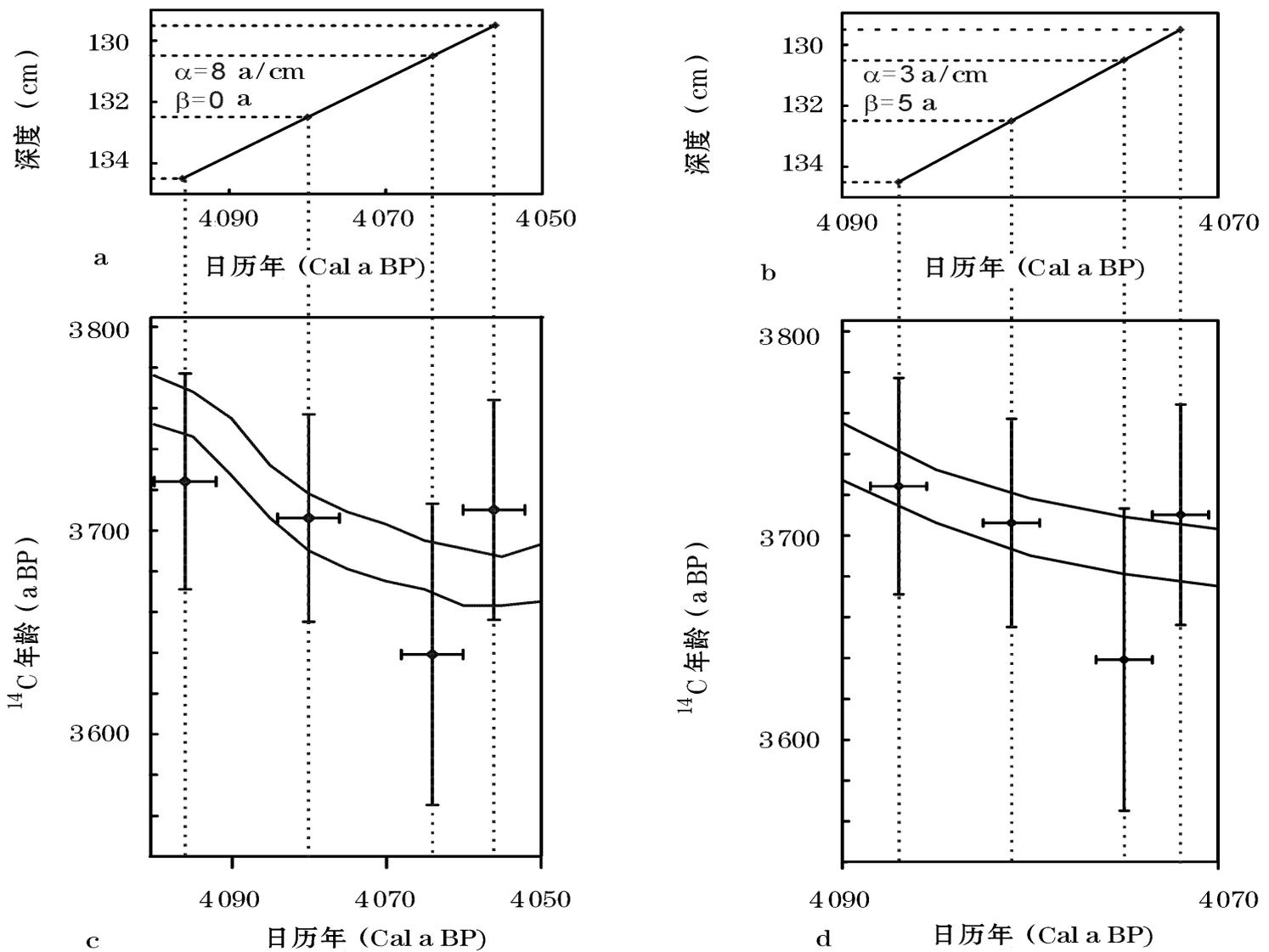


图 2 泥炭系列样品沉积速率恒定的日历年龄校正方法图^[30]

Fig.2 Schematic explanation of wiggle matching assigning calendar ages to a sequence of ^{14}C dated peat levels^[30]

配好坏有 2 种方法。第一种是最小二乘法，通过改变 α 和 β 取值，寻求系列中所有的 ^{14}C 年龄与校正曲线间的 ^{14}C 年龄差值平方和，最小值作为最佳解^[10, 31, 32]。第二种为最大似然概率值 (Maximum likelihood)，首先计算每个层位上 ^{14}C 年龄的日历年龄密度(与单个 ^{14}C 校正方法一样)，调整一次参数

和 β 值，计算出本次系列样品各日历年龄值，然后从各样品的日历年龄密度上查出相应概率大小，相乘所有概率(P)，比较不同 α 和 β 值下的 P 值大小，找出最大 P 值，代表系列年代日历年龄的最佳拟合年龄。

Blaauw 在上述基础上编写了一个杂交蒙特卡

罗贝叶斯统计方法,可以计算出泥炭系列样品的日历年龄,在普通个人计算机只需要10分钟就可以完成40个泥炭样品的后验概率分布计算,获得高精度的泥炭样品的日历年龄^[33]。

在原理上,时序间隔近似已知的系列样品贝叶斯分析实质上与树轮系列样品贝叶斯分析非常类似。对一个采样时间间距较长的系列,多个研究结果表明,此时把整个岩芯仍假定为线性堆积速率是过于简单,经常导致一个不太令人满意的系列样品贝叶斯分析结果,在这种情况下,地层岩石指标(如出现炭屑峰、岩性变化、泥炭中大化石组成的变化、腐殖化程度、C/N比、孢粉浓度变化或总密度等指数变化)出现明显变化地方,常暗示沉积间断或沉积速率发生变化,依据这些指标把整个岩芯划分为几个亚层,在亚层内部假设近似恒定堆积速率,在亚层接触处可能出现沉积间断和/或不同堆积速率变化,然后进行分段系列样品贝叶斯分析,通常能获得一个令人满意的高精度¹⁴C系列样品贝叶斯分析,其它复杂生长模型假设并需要^[31,33,34,37]。

在应用上,1990年Clymo等^[36]尝试把贝叶斯方法应用在第四纪泥炭生长模型上。Kilian等^[37]在进行泥炭样品的系列样品¹⁴C测年时,发现了贮存库效应,这是单个样品很难辨别出事情。研究结果表明,已抬升沼泽泥炭的¹⁴C年代与¹⁴C校正曲线的形状不匹配,¹⁴C年代看起来要老几百年代,纠正过贮存库校正后,与校正曲线极好地匹配,如果把包含贮存库效应的年代仍进行校正,将获得一个错误的年表^[34,37,38]。Speranz等^[32]在限定捷克Pancavska Louka泥炭剖面上中亚北方期到早亚大西洋期气候转换的年代时,采用时序间隔近似已知方法成功解决了单个¹⁴C年龄日历年龄校正正在约2500~2450 a BP时间段(“Hallstatt平台”)获得的日历年龄精度差的难题,系列样品分析结果精度完全满足于复杂的古生态谱分析的时间控制要求。

6 影响系列样品贝叶斯分析减小日历年龄区间的主要因素

系列样品贝叶斯分析减小日历年龄区间实质是贝叶斯方法从统计的角度灵活地把地层信息以概率方式引入到日历年龄校正过程中,使分析结果变得更加精确。综合已开展过系列样品贝叶斯分析法研究成果,影响其成功与否的主要因素有:

6.1 先验分布的精确程度。

校正是将¹⁴C同位素标尺转换到日历年过程,

系列样品日历年龄校正并不改变¹⁴C年代的测量值,与经典的单个样品日历年龄校正最大区别是引入先验分布(在这里就是系列样品日历年代之间的关系),把先验信息或假设作为约束以概率形式加入到贝叶斯概率日历年龄计算过程中^[16,17,39],这种校正过程是对¹⁴C年龄和相应的地质信息做了一次综合检验,地层信息成为系列样品日历年龄排序的依据,如地层样品的上下关系表示了日历年代上的早晚关系,经过系列样品的排序和计算,位于上层样品的日历年代一定晚于位于下层的样品,对无法满足匹配拟合条件的数据和信息如上层样品¹⁴C年代早于下层样品年龄部分将做出舍弃处理。在统计学上,几个相互独立事件同时发生的概率等于各事件发生的概率之积,因此,贝叶斯日历年龄校正与单样品校正相比,有3个主要的优点:

(1)获得的年代消除了大气的¹⁴C的波动引起的偏差;

(2)在日历年代计算过程中应用了概率理论中贝叶斯统计方法;

(3)一般地,经日历年龄校正后可以大大减小日历年代的置信区间,结果将更加精确。

因此,贝叶斯统计为我们提供一种依据先验条件挑选出最可能的日历年代的概率方法,正确使用,贝叶斯分析在解释一组¹⁴C年龄结果方面成为一个强有力的工具,获得比经典统计方法更多信息的一种方式^[40]。

当然任何方法都不是万能的,都会有它的局限性,贝叶斯方法也不例外。不少学者对先验条件在贝叶斯统计学中的使用提出质疑,这一争议在贝叶斯统计学产生之日就存在,已有几百年的历史了。把地层信息变换成概率,先验条件应反映客观现实,如果先验条件与客观现实不符,那么贝叶斯方法计算的结果就会发生偏离。这个问题尽管在使用贝叶斯分析¹⁴C年代初期已经仔细考虑过,但在应用时仍经常被忽略^[40]。在贝叶斯数据处理过程中,一般把先验描述为无效信息和在原则上没有作强烈假定,事实证明这个无效信息的先验条件在事实上作了隐含的假定,对最终结果有相当大的影响^[41],先验条件在使用中非常重要,在任何贝叶斯分析中先验概率的选择总是最难事情,选择合适的先验条件最好应与相关研究领域的专家进行密切地沟通^[40]。

因此,为了得到可靠的拟合结果,精确的¹⁴C测定和可靠的地质信息是必要的基础,先验信息的正确与否对计算¹⁴C系列样品的年代至关重要,如果

一组系列样品的地质信息有多种处理的可能性,贝叶斯法获得的精度虽然很高,但准确性却很低或不符合事实的结果。

6.2 校正曲线的形状与误差

日历年龄校正曲线是进行¹⁴C 年龄到日历年龄转换的基础,系列样品贝叶斯分析测年的成功取决于研究时段期间¹⁴C 校正曲线的形状、分辨率和¹⁴C 年龄测量的误差密切相关,到目前为止,发表的系列样品高分辨率测年虽然多数集中在¹⁴C 校正曲线主要摆动时期,但获得的精度却是非常高^[34,37,38,42]。

6.3 系列样品日历年龄的间隔。

如果想得到一组比较合理的校正结果,必须很好地组织样品。使用 OxCal 程序很容易证实,在¹⁴C 年龄测量误差固定的情况下,日历年龄的置信区间随取样间隔加大而增大,但取样间隔比较小的情况下,系列中间样品的日历年龄置信区间随¹⁴C 年龄测量误差的变化比较平缓。

6.4 系列样品的长度

系列样品贝叶斯分析的一个不利条件是采集¹⁴C 年代样品过多,造成系列样品的测量是件耗时间并且很昂贵的工作。一般说来,一个系列在时间上要有足够长的跨度,至少要超过校正曲线扭摆波动的周期,在校正曲线的平台段,则至少有一端需延伸至平台以外。对于考古分期系列样品,在一个分期中要有一定数量的样品,最好在 5~6 个以上,且各期的样品数量不要相差很大^[43]。

7 贝叶斯校正的改进方向

贝叶斯校正越来越多地受到考古学家和使用¹⁴C 年龄的相关领域研究者的关注,摆在¹⁴C 学家和统计学专家面前迫切需要处理的挑战问题,主要有:

7.1 开发出新一代贝叶斯校正软件

开发出适合于所有情形下的贝叶斯校正软件将是一项难以完成任务,但一个应用广泛、用户友好界面、集合了更多工具,易于建立各种模型的贝叶斯校正软件仍可以期待的。

7.2 更模糊的先验分布

Nicholls 等^[44]对经常使用的贝叶斯校正先验分布进行分析后,为避免当前的一些缺陷提出更适合的替代方案,对这些新的先验分布仍在讨论中,迄今为止,在已公开的软件还没有实现这些理念。

7.3 正态分布模型是否正确?

Nicholls 等^[44]对日历年龄校正曲线模型是否正确这个命题做了许多研究,在¹⁴C 日历年龄校正过

程中依据的一个重要统计公式是正态分布:

$$y \sim N(\mu(\cdot), \sigma)$$

此处, $y \pm \sigma$ 是由¹⁴C 实验室提供的测定值,是有机样品死亡时日历年龄, $\mu(\cdot)$ 是高精度¹⁴C 校正曲线。正态分布模型是否正确,我们是否使用其他分布(如学生 t 分布)进行概率分析? 仍值得深入研究。

综上所述,系列样品贝叶斯法高精度日历年龄校正研究已成为当前¹⁴C 年代学研究中热点问题,并不断地扩展到其他第四纪年代学研究中^[45],与国外研究相比,国内对于这类方法的研究应用还属起步阶段,在我国地学相关学科的年代学研究中尚未见泥炭沉积物的年龄—深度模型这方面研究的报道,有待今后进一步探索。

参考文献(References):

- [1] Stuiver M, Kra R S, eds. Calibration issue [J]. Radiocarbon, 1986, 28: 805-1030.
- [2] McCormac F G, Baillie M G L. Radiocarbon to calendar date conversion: Calendrical bandwidths as a function of radiocarbon precision [J]. Radiocarbon, 1993, 35(2): 311-316.
- [3] Ferguson C W, Huber B, Suess H E. Determination of the age of Swiss lake dwellings [J]. Zeitschrift für Naturforschung, 1966, 21a: 1173-1177.
- [4] Clark R M, Renfrew C. A statistical approach to the calibration of floating tree-ring chronologies using Radiocarbon dates [J]. Archaeometry, 1972, 14: 5-19.
- [5] Clark R M, Sowray A. Further statistical methods for the calibration of floating tree-ring chronologies [J]. Archaeometry, 1973, 15: 255-266.
- [6] Clark R M, Morgan R A. An alternative statistical approach to the calibration of floating tree-ring chronologies: Two sequences from the Somerset Levels [J]. Archaeometry, 1983, 25: 3-16.
- [7] Pearson G W, Pilcher J R, Baillie M G L, et al. High-precision ¹⁴C measurements of Irish oaks to show the natural ¹⁴C variations from AD 1840-5210 BC [J]. Radiocarbon, 1986, 28: 911-934.
- [8] Stuiver M, Pearson G W. High-precision calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950-500 BC [J]. Radiocarbon, 1986, 28: 805-838.
- [9] Pearson G W, Stuiver M. High-precision calibration of the radiocarbon time scale, 500-2500 BC [J]. Radiocarbon, 1986, 28: 839-862.
- [10] Pearson G W. Precise calendrical dating of known growth period samples using a 'curve fitting' technique [J]. Radiocarbon, 1986, 28: 292-299.
- [11] Weninger B. High-precision calibration of archaeological radiocarbon dates [M]. Acta Interdisciplinaria Archaeol IV. Nitra, 1986: 11-53.
- [12] Baillie M G L, Pilcher I R. Make a date with a tree [J]. New Sci-

- entist 1988, 117:48-51.
- [13] Baillie M G L. Checking back on an assemblage of published radiocarbon dates[J]. Radiocarbon, 1990, 32:361-366.
- [14] Clymo R S, Oldfield F, Appleby P G, et al. The record of atmospheric deposition on a rainwater-dependent peatland [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1990, B 327:331-338.
- [15] Manning S W, Weninger B. A light in the dark: Archaeological wiggle matching and the absolute chronology of the close of the Aegean Late Bronze Age[J]. Antiquity, 1992, 66:636-663.
- [16] Buck C E, Litton C D, Kenworthy J B, et al. Combining archaeological and radiocarbon information: A Bayesian approach to calibration [J]. Antiquity, 1991, 65:808-821.
- [17] Buck C E, Litton C D, Smith A F M. Calibration of radiocarbon results pertaining to related archaeological events[J]. Journal of Archaeological Science, 1992, 19:497-512.
- [18] Buck C E, Christen J A, Kenworthy J B, et al. Estimating the duration of archaeological activity using ¹⁴C determinations [J]. Oxford Journal of Archaeology, 1994, 13:229-240.
- [19] Christen J A. Summarizing a set of radiocarbon determination: A robust approach [J]. Applied Statistics, 1994, 43:489-504.
- [20] Christen J A, Litton C D. A Bayesian approach to wiggle matching [J]. Journal of Archaeological Science, 1995, 22:719-725.
- [21] Bronk Ramsey C. Radiocarbon calibration and analysis of stratigraphy: The OxCal program [J]. Radiocarbon, 1995, 37(2):425-430.
- [22] Ma Hongji, Guo Zhiyu. Calibration of a series of ¹⁴C dates in project of Ma-Shang-Zhou chronology [J]. Nuclear Techniques, 2000, 23(3):150-154. [马宏骥, 郭之虞. 夏商周断代工程中¹⁴C系列样品的树轮校正[J]. 核技术, 2000, 23(3):150-154.]
- [23] Atwater B, Stuiver M, Yamaguchi D K. Radiocarbon test of earthquake magnitude at the Cascadia subduction zone [J]. Nature, 1991, 353:156-158.
- [24] Friedrich M, Kromer B, Kaiser K F. High-resolution climate signals in the Bolling-Allerod Interstadial (Greenland Interstadial 1) as reflected in European tree-ring chronologies compared to marine varves and ice-core records [J]. Quaternary Science Reviews, 2001, 20(11):1223-1232.
- [25] Guo Zhiyu, Liu Kexin, Lu Xiangyang. The use of AMS radiocarbon dating for Xia-Shang-Zhou chronology [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2000, 172:724-731.
- [26] Cai Lianzhen, Qiu Shihua. Calibration of a series of ¹⁴C dates by Bayesian statistics [J]. Archaeology, 1999, 3:277-283. [蔡莲珍, 仇士华. 贝叶斯统计应用于碳十四系列样品年代的日历年龄校正 [J]. 考古, 1999, 3:277-283.]
- [27] Liu Ruoxin, Qiu Shihua, Cai Lianzhen, et al. The date of last large eruption of Changbaishan Tianchi volcano and its significance [J]. Science in China (Series D), 1998, 41(1):69-74. [刘若新, 仇士华, 蔡莲珍, 等. 长白山天池火山最近一次大喷发年代研究及其意义 [J]. 中国科学: D 辑, 1997, 27(5):437-441.]
- [28] Guo Zhiyu. AMS radiocarbon dating and its application [C]. Chen Wenji, eds. Age determination of Young Geological Systems (continue). Beijing: Seismological Press, 1999. [郭之虞. 加速器质谱¹⁴C测年及其应用 [C]. 陈文寄主编. 年轻地质体系的年代测定(续). 北京:地震出版社, 1999.]
- [29] Zhang Xuelian, Qiu Shihua. The study for radiocarbon dates of Yuntang and Qizhen building foundations within the Zhouyuan site [J]. Archaeology, 2004, 4:78-84. [张雪莲, 仇士华. 周原遗址云塘、齐镇建筑基址¹⁴C年代研究 [J]. 考古, 2004, 4:78-84.]
- [30] Blaauw M, Gerard B M H, Dmitri M, et al. A numerical approach to ¹⁴C wiggle-match dating of organic deposits: Best fits and confidence intervals [J]. Quaternary Science Reviews, 2003, 22:485-500.
- [31] Kilian M R, van Geel B, van der Plicht J. ¹⁴C AMS wiggle matching of raised bog deposits and models of peat accumulation [J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19:1011-1033.
- [32] Bronk R C. Development of the radiocarbon program OxCal [J]. Radiocarbon, 2001, 43(2A):355-363.
- [33] Van Geel B, Mook W G. High-resolution ¹⁴C dating of organic deposits using natural atmospheric ¹⁴C variations [J]. Radiocarbon, 1989, 31:151-156.
- [34] Speranza A, van der Plicht J, van Geel B. Improving the time control of the Subboreal/Subatlantic transition in a Czech peat sequence by ¹⁴C wiggle-matching [J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19:589-604.
- [35] Blaauw M, Christen J A. Radiocarbon peat chronologies and environmental change [J]. Applied Statistics, 2005, 54:805-816.
- [36] Clymo R S, Oldfield F, Appleby P G, et al. The record of atmospheric deposition on a rainwater-dependent peatland [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1990, B327:331-338.
- [37] Kilian M R, van der Plicht J, van Geel B. Dating raised bogs: new aspects of AMS ¹⁴C wiggle matching, a reservoir effect and climatic change [J]. Quaternary Science Reviews, 1995, 14:959-966.
- [38] Kilian M R, van Geel B, van der Plicht J. ¹⁴C AMS wiggle matching of raised bog deposits and models of peat accumulation [J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19:1011-1033.
- [39] Buck C E, Higham T F G, Lowe D J. Bayesian tools for tephrochronology [J]. The Holocene, 2003, 13:639-647.
- [40] Christopher B R. Comment on "The Bayesian statistics for ¹⁴C dates of chronologically ordered samples: A critical analysis" [J]. Radiocarbon, 2000, 42:199-202.
- [41] Peter S, Werner R. The Bayesian statistics for ¹⁴C Dates of chronologically ordered samples: A critical analysis [J]. Radiocarbon, 2000, 42:183-198.
- [42] Mauquoy D, Engelkes T, Groot M H M, et al. High-resolution records of late Holocene climate change and carbon accumulation in two north-west European ombrotrophic peat bogs [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2002, 186:275-310.

- [43] Guo Zhiyu , Ma Hongji. How to consider and employ calibration method of a series of ^{14}C dates [N] . China Cultural Relics News , 2002-06-21 . [郭之虞 , 马宏骥 . 如何看待与使用系列样品 ^{14}C 年代校正方法 [N] . 中国文物报社 : 中国文物报 , 2002-06-21 .]
- [44] Nicholls G , Jones M . Radiocarbon dating with temporal order constraints [J] . Journal of the Royal Statistical Society : Series C (Applied Statistics) , 2001 , 50(4) 503-521
- [45] Rhodes A E J , Ramsey C B , Outram C Z . Bayesian methods applied to the interpretation of multiple OSL dates : High precision sediment ages from old Scatness Broch excavations , Shetland Isles [J] . Quaternary Science Reviews , 2003 , 22 : 1 231-1 244 .

Summarization on the Development of Calendrical Calibration by Bayesian Analysis on Series of Radiocarbon Dates

YIN Jin-hui , ZHENG Yong-gang , LIU Yue-xia , LU Yan-chou

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

Abstract : In the past several decades Bayesian statistical technique has been used to the analysis of radiocarbon calibration for high accuracy of dating results. This technique is expected to improve the imprecise calendar ages when ^{14}C data are individually calibrated in the plateaux and wiggles of ^{14}C calibration curve. Many successful cases have showed that Bayesian analysis could obtain more reliable chronology by incorporating stratigraphic information with radiocarbon ages. The historical progress , principle and calculation method aspects of Bayesian analysis were reviewed here for application in radiocarbon dating , and some archaeological and geological examples , such as sequences with known order , known age gaps and approximate gaps extracted from tree ring , peat and related deposits , were used to show its ability and reliability to reduce the uncertainties in radiocarbon dating. Finally the effect factor and future developments of Bayesian analysis on serial chronology were also introduced.

Key words : Radiocarbon calibration ; Bayesian analysis ; Wiggle-matching.