

^{14}C 测年与 BP 在地质年龄中的使用约束

薛子俭

中国科学杂志社, 北京 100717

摘要: ^{14}C 测年方法问世近 60 年来, 通过不断引入新技术和应用实践而日臻完善, 精度也逐步提高, 在诸多科学领域中, 尤其在晚更新世以来的第四纪沉积物测年中得到越来越广泛的应用。然而, 作为 ^{14}C 年龄单位符号的 BP 在地质文献中被误用的现象也相当普遍。在简要回顾 ^{14}C 测年的基础上, 通过大量的实例分析, 论证了 BP 与 ^{14}C 年龄之间不可分割的相依关系, 认为将 BP 用于和 ^{14}C 测年无关的任何情况都是不合适的; 从定义、测年方法及时间尺度方面对 BP 在地质学中的使用提出了约束。

关键词: ^{14}C 测年; BP 的使用; 地质年龄。

中图分类号: P533

文章编号: 1000-2383(2007)S2-0141-06

收稿日期: 2007-06-20

Radiocarbon Dating and Constraints on Usage of BP in Geological Age

XUE Zi-jian

Science in China Press, Beijing 100717, China

Abstract: Radiocarbon dating method, with its commencement marked by the publication of the first radiocarbon dates in the journal *Science* in the year 1949, has got a considerable improvement in the past 60 years and found an increasing acceptance in many fields, especially in Quaternary geology. In recent years, various misusages of BP, abbreviated from "Before Present" as a main part of the unit of radiocarbon dating, have brought about much confusion among relevant researchers. In this paper, following a brief review on the radiocarbon determination and its calibration, an attempt is made to propose some constraints on usage of BP in terms of definition, type of dating method concerned, and time scale. A close study of radiocarbon dating definition leads the author to consider it unreasonable to apply BP to the fields which have nothing to do with radiocarbon dating.

Key words: radiocarbon dating; usage of BP; geological age.

1949 年 12 月, 以美国芝加哥大学 W F Libby 教授为首的研究组在 *Science* 杂志上发表了第一篇关于 ^{14}C 测年的论文 (Arnold and Libby, 1949), 以此为标志, 具有划时代意义的 ^{14}C 测年法便宣告诞生。该方法的创立被人们誉为“20 世纪最伟大的科学发现之一”、“放射性碳素的革命”, 方法创始人 W F Libby 因此荣获 1960 年度的诺贝尔化学奖 (Higham, 2002a)。在近 60 年的应用实践中, ^{14}C 测年法通过不断引入新技术而逐步得到完善和发展, 其测算精度也逐步提高。目前, 该技术已可对炭屑、骨器、头发、植物残骸和种子、动物残体、微体化石、

甲骨、古藏经卷、水样中无机碳和有机碳成分等进行年龄测定, 广泛应用于考古学、地质学、海洋学、大气科学和古气候学等领域 (仇士华和蔡莲珍, 1997; Higham, 2002a), 尤其在晚更新世以来的第四纪沉积物测年研究中更显示出其独特优势。然而, 随着 ^{14}C 测年法的广泛应用, 作为 ^{14}C 年龄单位标志性符号的“BP”以不同形式被误用或滥用的现象也越来越普遍, 致使许多情况下的使用都有悖于其原始含义。这种态势的日益蔓延已经在相关领域的科研成果交流中造成混乱, 不能不引起我们足够的关注。本文试图在简要回顾 ^{14}C 年龄测定、计算、校正等过程

的基础上,对“BP”的使用予以约束.笔者对文中所涉及的内容的了解十分有限,不当之处在所难免,恳请读者指正.

1 ^{14}C 测年方法简述

1.1 ^{14}C 测年的基本原理

^{14}C 测年法,又称放射性碳法,是同位素地质年龄测定方法之一,其得以进行的基础是自然界中广泛存在的放射性碳同位素 ^{14}C .进入高空大气层的宇宙射线导致大量中子的形成,大气层中丰富的 ^{14}N 在这些中子的轰击下通过反应式 $^{14}_7\text{N} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{14}_6\text{C} + ^1_1\text{H}$ 形成 ^{14}C ,它们迅速而均匀地扩散到大气中,与氧结合形成二氧化碳($^{14}\text{CO}_2$),这种二氧化碳向下扩散,并与大气层中的其他二氧化碳混合后被生物通过光合作用、呼吸、觅食等生命活动吸收进入其组织、外壳或骨骼.生物活着的时候,随着生命活动的进行,其体内 ^{14}C 的浓度与大气中 ^{14}C 的浓度保持着平衡.生物死亡以后,同位素交换及 ^{14}C 补充便告停止,生物体内的 ^{14}C 通过反应式“ $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + \beta + \nu$ ”衰变形成 ^{14}N 而不断减少.生物死亡的时间越久,其体内残留的 ^{14}C 含量越少.人们就是通过测定样品中残留的 ^{14}C 的浓度或放射强度,并经过对比和计算求得其年龄的(Bradley, 1999; Higham, 2002a)^①.

1.2 ^{14}C 年龄的计算

^{14}C 放射强度(简称 ^{14}C 强度)是指每克碳每分钟的衰变量或所释放出的 β 粒子计数(dpm/gC).从样品中测得的 ^{14}C 强度是计算其年龄的基础.人们通常采用下面的衰变方程计算样品的常规 ^{14}C 年龄:

$$t = 8033 \ln(A_{\text{SN}}/A_{\text{ON}}) \text{ ②},$$

式中,8033 代表半衰期取 5568 年时 ^{14}C 的平均寿命; t 为 ^{14}C 年龄(单位:年); A_{SN} 为样品的 ^{14}C 强度; A_{ON} 为现代标准(1950 年)的 ^{14}C 强度(Stuiver and Polach, 1977).

上面提到的现代标准(也称现代碳标准),即放射性碳测年国际标准,通常是指由 1955 年生长在法国的甜菜(sugar beet)制成的草酸 I 代(Oxalic Acid

I, 简称 HOx I, 该标准记作 NBS-Ox I). 将其 ^{14}C 强度校正到 1950 年的水平,然后再取其 95% 校正为国际绝对碳标准强度,即 1890 年树轮按衰变因素推算到 1950 年的 ^{14}C 强度(Stuiver and Polach, 1977),以此作为现代 ^{14}C 强度的对比标准.之所以选取 1890 年树轮作为国际绝对碳标准,是因为它生长在工业革命之前,没有受到“化石燃料影响”,其 ^{14}C 强度与当时大气层的 ^{14}C 强度保持平衡,基本代表了“纯净”大气层中的 ^{14}C 强度状况(Stuiver and Polach, 1977; Higham, 2002b).至于 1950 年被作为 ^{14}C 测年过程中的时间参考标准,在一定程度上是随意的,但基于下面两点考虑,在国际范围还是得到了普遍认可:(1)以此纪念世界上第一篇 ^{14}C 测年论文的发表以及 ^{14}C 校正曲线的建立;(2)将这种标准选在 20 世纪 50 年代后期开始的大规模的空间核试验之前,因为此后大气中的 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值因核试验的影响发生了巨大变化(Taylor, 1987)^③.

现代碳标准的选定意味着 1950 年(1950 AD)自然成为 ^{14}C 年龄的起点(0 aBP). ^{14}C 法所测定的年龄实质上就是从 1950 年后推到样品停止与大气进行碳交换的时间^④,通常表示为 BP (Before Present, years before 1950 AD)^⑤.

在 1972 年召开的第 8 届国际放射性碳测年大会上,“现代百分比”(percent Modern, pM)曾被引入 ^{14}C 年龄的计算(Stuiver and Polach, 1977).其计算公式是:pM = $A_{\text{SN}}/A_{\text{ON}} \times 100\%$,参数 A_{SN} 和 A_{ON} 的含义与上面衰变方程中相同.运用此式可以算出样品相对于现代标准的 ^{14}C 强度百分比,从 ^{14}C 衰变曲线(图 1)得到样品所经历的半衰期数,再由半衰期计算出样品的年龄.可以看出,其实质仍然是从样品与现代标准之间的 ^{14}C 强度比值入手,将 1950 年的 ^{14}C 强度水平作为对比的标准.由上述可得出如下关系:0 aBP = 100pM = 95% NBS-Ox I = 1950AD^⑤.

1.3 ^{14}C 年龄的校正

^{14}C 年龄的测定和计算基于两个重要假设:(1)大气中的 ^{14}C 强度一直保持在 1950 年的水平没有变化;(2) ^{14}C 的半衰期计算准确无误(Higham, 2002b)^⑥.事实上,大气中的 ^{14}C 浓度随时间是有一

①Radio-carbon dating. <http://www.mnsu.edu/emuseum/archaeology/dating>

②该公式引自 Stuiver and Polach (1977), Willem G Mook et al. (1999) 对 ^{14}C 年龄计算过程中的参数和符号重新定义.本文并不计算 ^{14}C 年龄,只是通过 ^{14}C 年龄的计算引出 BP 的含义.考虑到本文叙述的方便,这里仍引用了 Stuiver and Polach (1977) 的资料.

③Why 1950? http://en.wikipedia.org/wiki/Before_Present

④The C-14 Decay Curve. http://www.sciencecourseware.org/VirtualDating/files/RC_1.html

⑤Radiocarbon calibration. http://dwb.unl.edu/Teacher/NSF/C03/C03Links/units_ox.ac.uk/departments/rlaha/orau/01_Q4.htm

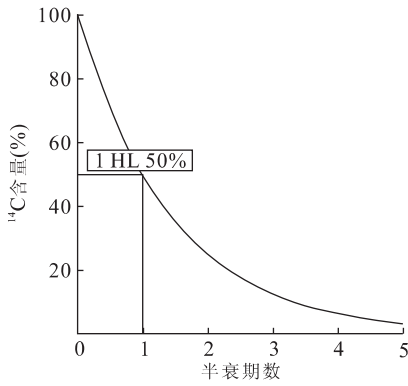


图 1 ¹⁴C 衰变曲线图(译自脚注④)

Fig. 1 ¹⁴C decay curve

些变化的,并且最早由 Libby 计算出的¹⁴C 半衰期(5 568 ± 30 a)也经过后人的进一步研究修正为 5 730 ± 40 a,因而由上述方法得到的¹⁴C 年龄并不是真正的日历年龄.为了能够将¹⁴C 年龄转换成日历年龄,人们建立了树轮年龄校正曲线.树木每年一轮的木质都真实记录了形成时大气中的¹⁴C 强度,据此可以测算出树轮的¹⁴C 年龄;另外,树木的年轮与日历年龄是对应的.将树轮的¹⁴C 年龄和日历年龄分别放在纵横坐标上便可得出一条¹⁴C—树轮年龄对照曲线,现从 1993 年发布的高精度树轮年龄校正曲线中取出一段示于图 2 (Stuiver and Becker, 1993).随着研究的继续和深入,人们将不同年龄段、时间上相互衔接的树轮进行拼接,使该曲线的时间尺度不断延长,精度也逐步得到提高.通过这样的对照曲线就可以把样品的¹⁴C 年龄转换为日历年龄,目前使用这种方法校正的时限达到了 10 000 年;对于万年以上的¹⁴C 年龄则可以通过热离子质谱法测定的珊瑚的 U—Th 年龄和纹泥法测定的年龄进行校正,校正的时限可达 20 000 年(仇士华和蔡莲珍, 1997).根据时间尺度,经过这种校正的¹⁴C 年龄通常表示为 cal. BP, cal. AD 或 cal. BC (Stuiver and Becker, 1993)®,其相互关系见图 3.

1.4 ¹⁴C 年龄的表示

考虑到 BP (Before Present) 的含义在应用中已经变得模糊并且¹⁴C 年龄的起始时间日益久远, Flint and Deevey(1962)曾建议将 BP 的含义由“Before Present”重新定义为“Before Physics”,将 BP 表示的年龄转换为 AD 或 BC 尺度的年龄.该建议曾得到过一些响应,但没能在实际应用中真正推广

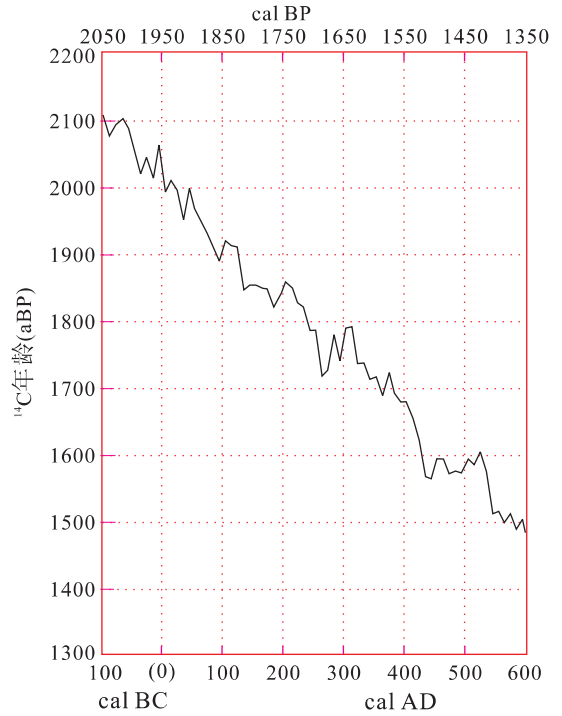


图 2 ¹⁴C 年龄校正曲线图(译自 Stuiver and Becker, 1993)

Fig. 2 ¹⁴C age calibration curve

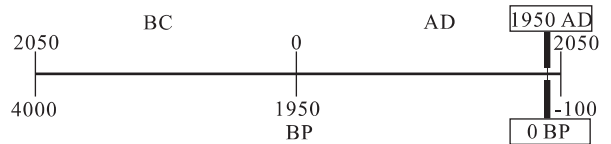


图 3 BP 与 BC 或 AC 年龄关系图®

Fig. 3 A sketch showing the relationship between BP and BC or AD ages

开来.不论“Before Present”还是“Before Physics”,实际上都是旨在明确定义 1950 AD 这个¹⁴C 年龄的确切起点.综上所述,笔者尝试就¹⁴C 年龄的表达作如下归纳:(1) BP 是表示未经校正的¹⁴C 年龄的单位,代表着确切的时间界限,其严格意义上的表达形式应该是¹⁴C aBP 或¹⁴C kaBP;(2) 经过校正的¹⁴C 年龄,其单位形式是 cal. BP, cal. AD 或 cal. BC.

2 BP 的使用约束

2.1 使用功能约束

在实际应用中, BP 常常被单纯取其“距今”之意来表达地质历史上某一时间点.严格说来,这种做法是不可取的.一方面, BP 是作为¹⁴C 年龄单位产生的,而不是作为公共意义上的时间符号产生的;另一

©What about AD, BC, BCE and BP Ages? http://www.science-courseware.org/VirtualDating/files/RC_3.html

方面, BP 的本质功能在于定义¹⁴C 年龄的确切起点, 而不是笼统地表示“距今”的时间. 宽容一点地说, 即使在一些情况下需要借用 BP 的“距今”之意表示一定地质时期内的某一时间点, 也必须在¹⁴C 年龄含义的范畴内进行, 具体地说, 必须在文字中或者表达形式上使¹⁴C 年龄的属性得到明确体现, 在与¹⁴C 测年毫不相干的情况下单独使用 BP 是没有任何意义的. 下面通过几个实例分析说明.

例 1 High $\delta^{13}\text{C}$ stable isotope values in the calcite deposited from ca. "8 500" to ca. "7 500 yr ago" are interpreted as reflecting periods of high rainfall. The wet phase was interrupted by two periods of multi-century duration characterized by relatively cool and dry winters centered at ca. "8 200" and ca. "7 500 yr ago", highlighted by low $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values... In northern Sicily, the traditional elements of the Neolithic appear at ca. "7 700 yr ago".

例 2 This paper presents a spatial reconstruction of climate in East Africa at "6 000 ¹⁴C yr B. P. " ... Both methods have been applied to 32 fossil pollen spectra dated at "6 000 ¹⁴C yr B. P. " ... Results show that the temperature lapse rate was less steep at "6 000 ¹⁴C yr B. P. " than it is today.

例 3 After "15 000 cal yr BP", a mixture of *Nothofagus* forest and shrubland/steppe developed. ... A shift to a surface-fire regime occurred at "7 500 cal yr BP" at the wet site and at "4 400 cal yr BP" at the dry site, preceding the expansion of *Austrocedrus* by 1 000—1 500 yr.

例 4 班公错、松木希错“3. 9~3. 2 kaBP”出现干旱事件; 色林错“4. 2 kaBP”后, 青海湖 3 kaBP 以来出现干旱化趋势.

例 5 据中国湖北神农架山宝洞内两根石笋的 23 个 U/Th 年龄和 532 个 $\delta^{18}\text{O}$ 测试数据, 建立了末次冰期“95~56 kaBP”时段平均分辨率为 80 a 的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列. 该记录可与南京葫芦洞 $\delta^{18}\text{O}$ 记录作良好拼接, 从而完整地揭示“95 kaBP”以来东亚夏季风环流千年尺度气候变化特征, 其变化趋势与 65°N 太阳辐射曲线类似.

上面各例中引号中的内容都是代表过去某一时间点或时间段的数值和单位, 在句子中充当类似状语的作用. 不同的是, 例 1 巧妙地避免了对 BP 的误用; 例 2 和例 3 分别借用未经校正和经过校正的¹⁴C 年龄, 表达形式规范, 属于对 BP 的合理使用; 例 4 和例 5 中所使用的 BP 并不是¹⁴C 年龄的表达方式, 并且全文内容和¹⁴C 测年没有关系, 属于对 BP 的误用.

2.2 测定方法约束

就“年龄”的一般意义而言, 它代表的是某一事件发生或某一事物形成以来所经历的时间, 不需要

附加“BP”之类的成分进行修饰或限定(薛子俭, 2007). 然而, 如前所述,¹⁴C 年龄的计算和表示有其特殊性, BP 是其完整单位不可缺少的标志, 用以表示 1950AD 这一零点位置. 其他测年方法没有这种约定, 它们的年龄单位中也没有对 BP 的这种功能要求, 因而将 BP 用于¹⁴C 年龄之外的其他地质年龄都是不适当的. 然而, 在相关的文献或文稿中, 对 BP 的这种误用十分常见. 下面从这个意义上对 BP 的恰当使用和不当使用各举几例进行分析.

例 6 The second interstadial, identified by a rendzina soil and dated by "ESR" between 74 and 85 000 "yr", was drier and cooler. ... The upper cambisol yielded "radiocarbon ages" of 28 000—30 000 "¹⁴C yr BP", and the middle interstadial was ESR dated at 44 000 yr ago.

例 7 Here, we record "luminescence dates" for three dune sites in the Waikerie district of the northwestern Murray Basin. They range from, respectively, 151—25. 3 "ka", 157—33. 3 "ka", and a basal age of 59. 6 "ka", with sand movement also indicated around 1906 and 1933 CE.

例 8 We present a provenance study based on "⁴⁰Ar/³⁹Ar" dates of individual hornblende grains from 20 samples taken at 600 to 700 yr spacing between "10 500 and 22 000 yr B. P. ", from Orphan Knoll core EW9303—GGC31.

例 9 The travertine contains structures from growth induced by bacteria, and such structures have been dated by "²³⁰Th/U mass spectrometry". The resulting ages from both sites imply growth episodes of short duration, with growth rates up to 5 mm yr⁻¹, at 99, 800±1300 "yr B. P. " (2 ζ ; n=8) and 105, 900±1300 "yr B. P. " (2 ζ ; n=7).

例 10 ... 认为色林错拔湖 30~70 m 的阶地形成于中、晚更新世, “热释光年龄约 27. 3~269. 7 kaB. P. ” ... 另外, 不久前报道拉萨西北约 85 km、海拔 4 200 m 的河谷山坡上发现的人类手印、足印和火塘遗迹(“光释光年龄”为 21. 1±2. 1, 21. 7±2. 1 和 20. 6±2. 9 "kaB. P. "), 暗示进入末次盛冰期时人类并未离开高原.

例 11 应用 ESR 测年技术对采自乌鲁木齐河源区上望峰、下望峰与高望峰的冰碛物进行了测年, 上望峰冰碛年代为(35±3. 5) "kaBP"; 下望峰冰碛 3 个年代分别为(171. 1±17) "kaBP", (176±18) "kaBP", (184. 7±18) "kaBP"; 高望峰冰碛年代为(459. 7±46) "kaBP".

上面各例中引号中的内容是各种测年方法及相应的年龄单位. 从中可以看出, 例 6 对不同测年方法的年龄单位的使用相当严格, 即使在同一段落的上下句中, 对不同类型的年龄有区别地使用了不同的表示方法; 例 7 中出现的是释光年龄, 避免了 BP 的误用; 例 8—11 中出现了⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄、²³⁰Th/U

年龄、热释光年龄、光释光年龄以及 ESR 年龄,却全部使用了¹⁴C 年龄这一特殊情况的表示方法,应当引以为戒。

2.3 时间尺度约束

多数常规¹⁴C 测年方法目前所能够测得的最小¹⁴C 强度大约是现代标准的 0.2%,相当于 9 个半衰期(表 1)。若按目前国际普遍采用的¹⁴C 半衰期(5730±40 a)计算,大约为 5 万年,这就是常规¹⁴C 测年方法所适用的时间范围。20 世纪 70 年代,加速器质谱技术引入¹⁴C 测年(仇士华和蔡莲珍,1997),使¹⁴C 测年的时间范围扩展到 7 万年。因此可以说,就目前的技术水平而言,超过 7 万年的年龄不可能属于¹⁴C 年龄,自然也不应该采用¹⁴C 年龄的表示方法。下面就是几个在时间尺度方面误用 BP 的例子。

表 1 ¹⁴C 半衰期与残留百分比对照表

Table 1 Correlation between half-lives and percentage of ¹⁴C remaining

半衰期	母体残留分数	百分比 (%)
0	1=1	100
1	1/2=1/2	50
2	1/2×1/2=1/4	25
3	1/2×1/2×1/2=1/8	12.5
4	1/2×1/2×1/2×1/2=1/16	6.25
5	1/2×1/2×1/2×1/2×1/2=1/32	3.13
6	1/2×1/2×1/2×1/2×1/2×1/2=1/64	1.56
7	1/2×1/2×1/2×1/2×1/2×1/2×1/2=1/128	0.78
8	1/2×1/2×1/2×1/2×1/2×1/2×1/2×1/2=1/256	0.39
9	1/2×1/2×1/2×1/2×1/2×1/2×1/2×1/2×1/2=1/512	0.2

注:此表译自脚注④,表名为本文作者所加

例 12 对采自上述典型断裂段内与断裂右旋剪切活动相关的样品进行了磷灰石裂变径迹测年(简称 FT 测年),同时以所测单颗粒年龄及围限径迹长度,选择 Laslet 退火模式完成样品所经热历史的反演计算得出:断裂带在(“5.5±1.5)和(2.1±0.8) MaBP”,有过 2 次明显的断层剪切错动。断裂中南段元江—元阳一带在“3.6~3.8 MaBP 及 1.6~2.3 MaBP”发育 2 期山体快速隆升,这与红河断裂中新世末以来存在上述二次右旋正断位错事件相对应。

例 13 值得注意的是,11 和 15 号样品在“25~30 MaBP”快速冷却后,经历一段时间平稳,温度保持在 50~60℃左右,但达“5~6 MaBP”左右又有一次幅度较小的冷却事件。

例 14 从图可以看出,“21.3~20.2, 16.0~13.3 及 8.7~6.9 MaBP”是 QA-I 剖面粒度较粗的时期,与该序列的风尘沉积速率变化大致一致。

例 15 The paleomagnetic age scale of BDP-96-1

constrains the upper age of the Neobaikalian uplift/subsidence phase in the Baikal-Sayan region at ca. “2.5 MaBP”. The coincident timing of the paleoclimatic and tectonic events recorded in Lake Baikal sediments suggests a close causal link between regional tectonics and climate and indicate that the late Pliocene uplift contributed to the initiation of the early glaciation in southeast Siberia between “2.8 and 2.6 MaBP” by creating an elevated terrain with lower snowline, favorable for alpine glaciation, and by changing the heat balance of the region.

上面各例中引号中的内容所标示的年龄值明显超出¹⁴C 测年所适用的时间范围,并且其中 BP 所出现的形式也不是¹⁴C 年龄单位,属于典型的误用。当然,这些误用不仅在于超出¹⁴C 测年的时间范围,而且测年方法及使用功能方面也显然不属于 BP 所适用的情况。这里之所以作为一类单独列出,是想更直观地给予提醒:对于超出 7 万年的年龄,要警惕可能出现的对 BP 的误用。

3 结语

如同许多其他科学计量单位和符号都有各自特定的内涵和使用范围一样,明确的¹⁴C 年龄单位属性及确切的时间点标志便构成了 BP 的特定内涵,该内涵就决定了其严格的使用范围。笔者认为,在脱离¹⁴C 测年背景的情况下单独使用 BP 表示年龄或时间点都是不合适的。诚然,BP 的使用不论在国内还是国际相关文献中都是十分常见的,但其中的不当使用却俯拾皆是,本文所举的例子不过是沧海之一粟。在一些第四纪地质文献或稿件中,几乎凡遇年龄必用 BP,其准确性可想而知。在一定意义上说,BP 如此不正常地频繁出现只能说明对其误用、滥用程度之严重,而不应该成为既成事实迫使我们放弃基本的原则。本文对 BP 使用情况的分析以及所提出的看法仍然限于“矫枉”的程度,而远远没有“过正”。对这种偏差的纠正不可能一蹴而就,然而有两条基本的原则应当坚持:(1)BP 作为地质年龄的一种单位符号有其专属性,它只能作为¹⁴C 年龄的单位出现,而不是其他时间尺度内所有年龄的共同符号;(2)只有在和¹⁴C 年龄相关联的情况下才可以使用 BP 表示过去某一段时间或时间点,而不考虑时间尺度用它表示普通意义上的“距今”都是不正确的。笔者相信,如果上述情况在实际应用中能够得到足够的注意,那么背离 BP 含义的种种不正确使用

就会大大减少。

致谢:作者衷心感谢殷鸿福院士对本文撰写的鼓励和支持,感谢贵刊编辑及审稿专家对本文的指导。中国地质大学(武汉)谢树成教授、中国科学院地理科学与资源研究所邵雪梅研究员为本文提供重要资料,并对文稿提出宝贵意见;中国科学院地质与地球物理研究所郭正堂研究员及吕厚远研究员、中国科学院南京地理与湖泊研究所沈吉研究员、南京大学鹿化煜教授审阅本文初稿,提出修改意见或补充文献资料;中国科学院地球环境研究所李小强研究员、赵克良博士及中国科学院文献情报中心曹菁编辑在资料搜集中给予大力支持;中国科学杂志社张洁制作了文中插图。作者对上述给予真诚帮助的朋友们一并致以诚挚的谢意。

References

- Arnold, J. R., Libby, W. F., 1949. Age determinations by radiocarbon content: Checks with samples of known age. *Science*, 110: 678—680.
- Bradley, R. S., 1999. *Paleoclimatology: Reconstructing climates of the Quaternary*. Academic Press, San Diego, 50—52.
- Flint, R. F., Deevey, Jr. E. S., 1962. Editorial statement. *Ra-*

diocarbon, 4: v—vi.

- Higham, T., 2002a. The ^{14}C method. Radiocarbon WEB-info, <http://www.c14dating.com/int.html>.
- Higham, T., 2002b. Modern standard. Radiocarbon WEB-info, <http://www.c14dating.com/agecalc.html>.
- Qiu, S. H., Cai, L. Z., 1997. Recent advancement in radiocarbon dating. *Quaternary Sciences*, 17(3): 222—229.
- Stuiver, M., Polach, H., 1977. Discussion: Reporting of ^{14}C data. *Radiocarbon*, 19(3): 355—363.
- Stuiver, M., Becker, B., 1993. High-precision decadal calibration of the radiocarbon time scales, AD1950—6000BC. *Radiocarbon*, 35(1): 35—65.
- Taylor, R. E., 1987. *Radiocarbon dating: An archaeological perspective*. Academic Press, Orlando, Florida, 97—98.
- Xue, Z. J., 2007. Some improper expressions in the papers of Earth sciences. *Chinese Journal of Scientific and Technical Periodicals*, 18(4): 702—705.

附中文参考文献

- 仇士华, 蔡莲珍, 1997. ^{14}C 测年技术新进展. *第四纪研究*, 17(3): 222—229.
- 薛子俭, 2007. 地球科学论文中几种不当表达之分析. *中国科技期刊研究*, 18(4): 702—705.