

刘彧,刘金涛,刘承帅,等. 大气成因放射性宇生核素 ^{10}Be 指示土壤演化:机理与进展[J].地球科学进展,2024,39(6):565-575. DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2024.046. [LIU Yu, LIU Jintao, LIU Chengshuai, et al. Meteoric cosmogenic radionuclide ^{10}Be trace the soil evolution: mechanism and progress[J]. Advances in Earth Science, 2024, 39(6): 565-575. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2024.046.]

大气成因放射性宇生核素 ^{10}Be 指示土壤演化: 机理与进展*

刘彧^{1,2},刘金涛³,刘承帅¹,罗维均^{1,2},程安云^{1,2},王世杰^{1,2}

(1.中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室,贵州 贵阳 550081;

2.中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站,贵州 普定 562100;

3.河海大学 水灾害防御全国重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:在全球变化背景下,我国土壤面临严重的污染、侵蚀和退化问题,正在威胁生态系统稳定性和粮食安全。如何量化土壤的形成演化(时间和速率等)是地球科学领域的重要科学问题。大气成因放射性宇生核素 ^{10}Be (以下简称大气 ^{10}Be)是天然示踪剂,其在土壤中的含量受成土时间、地表侵蚀和化学风化等土壤演化过程综合控制,是定量示踪千万年来土壤形成演化过程的有效手段,具有广阔的应用前景。首先系统梳理了 ^{10}Be 在地球大气层的生成、传输、沉降以及在土壤中累积和迁移过程的最新研究进展,指出大气 ^{10}Be 长期沉降速率及其在风化带中迁移性的精确估算,是该研究领域亟待解决的重要难题;其次评述了大气 ^{10}Be 用于估算成土时间、成土速率、指示土壤侵蚀及在坡地运移等方面的方法,提出深入调查区域地质和环境过程并对模型参数和结果进行合理约束,是应用大气 ^{10}Be 技术的关键前提。我国加速器质谱分析技术和能力的快速发展,将有力推动大气 ^{10}Be 技术在土壤演化定量研究中的广泛应用,帮助解决环境生态系统演变预测及耕地土壤保育等难题。

关键词:大气 ^{10}Be ;土壤;成土时间;成土速率;侵蚀速率

中图分类号: P597+.3;P934

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2024)06-0565-11

1 引言

高能初级宇宙射线轰击大气中的N、O和Ar等原子发生核反应形成的 ^{14}C 、 ^{10}Be 和 ^{26}Al 等核素被称为大气成因宇生核素(Meteoric Cosmogenic Nuclide, MCN),而碰撞后能量降低的次级宇宙射线与地表岩石或矿物中的Si、O、K和Ca等元素发生核反应形成的 ^{14}C 、 ^{10}Be 、 ^{26}Al 和 ^{36}Cl 等核素则被称为就地成因宇生核素(in-situ Terrestrial Cosmogenic Nuclide, TCN)^[1]。依据是否有放射性,宇生核素又可分为稳

定宇生核素(如 ^3He 和 ^{21}Ne 等)和放射性宇生核素(如 ^{10}Be 和 ^{14}C 等)。根据不同半衰期(千年—百万年不等), ^{10}Be 、 ^{14}C 和 ^{26}Al 等宇生核素近几十年来被广泛用于定量研究地貌面(岩石、土壤和沉积物)年龄^[2-6]以及原地或流域侵蚀速率^[7-9]等关键信息,已经发展成为地质和地貌学领域一项重要的测年及示踪手段。

土壤作为不可再生资源,是我国可持续发展战略核心之一。进入20世纪50年代以来,高强度人类活动和气候变化造成的土壤污染、土壤的加速侵

收稿日期:2024-03-18;修回日期:2024-05-15.

* 基金项目:国家自然科学基金项目(编号:42330712);环境地球化学国家重点实验室自主部署项目(编号:SKLEG2024104);中国科学院“西部之光”人才培养引进计划资助。

作者简介:刘彧,副研究员,主要从事宇生核素地质年代学及地貌演化研究. E-mail: liuyu@mail.gyig.ac.cn

蚀和退化正在威胁生态系统稳定性和粮食安全。所以,科学量化成土时间和速率成为研究土壤污染物富集、迁移和转化过程,以及科学评价土壤资源可持续性的关键。目前,常采用的方法是对土壤矿物进行放射性同位素测年,比如铁氧化物的U系和(U-Th)/He法、锰氧化物的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法以及有机质 ^{14}C 法等^[10]。但由于物质迁移、转化和生物扰动等过程始终贯穿于土壤的演化历史,这种开放和复杂性超出了常规测年技术的适用范围,因此使土壤精确定年问题一直难以解决。例如,有研究尝试用有机碳 ^{14}C 对黑土进行定年^[11-12],但有机碳可能是不同来源碳的混合物,而且生物扰动也可能引入新碳/老碳,使研究层位成为不同年龄土壤的混合物^[13]。此外 ^{14}C 因半衰期短(5 730年^[14])测年范围只有5万年,因此对更老的土壤演化研究无能为力。

放射性 ^{10}Be 因半衰期长(1.39 Ma^[1]),可定年和示踪千万年($10^2\sim 10^7$ 年)来的土壤形成演化过程^[15]。该方法按研究对象可分为2类:母岩就地成因法^[16]和土壤大气成因法^[17]。母岩就地成因法的优点是模型简单、影响因素少,缺点是受岩性制约、样品前处理较复杂且只能估算成土“毛”速率^[18]。土壤大气成因法受大气成因放射性宇生核素 ^{10}Be (以下简称大气 ^{10}Be)长期沉降速率及其在风化带中化学迁移性的制约^[19-20],因而模型更复杂,影响因素更多,但该方法的前处理更简单并且应用范围更广,不仅可估算土壤滞留(成土)年龄^[17,22]、成土“净”速率^[23]和土壤侵蚀速率^[24-25],还可指示土壤扰动^[26]及示踪坡地土壤运移^[27-28]等情况,基本囊括了土壤研究的核心参数和内容。此外,该方法本身存在的制约因素(如 ^{10}Be 继承性影响及在土壤中的迁移),均已发展出相对成熟的解决方法^[15,21]。故而,大气 ^{10}Be 具有更广阔的应用潜力。

目前,国内主要用大气 ^{10}Be 对黄土进行地球环境示踪和古气候研究,获得了许多创新和重要成果^[29-35]。但受实验分析条件和学科壁垒影响,运用 ^{10}Be 进行土壤形成演化的研究寥寥无几^[36-37]。因此,本文总结和介绍了近年来 ^{10}Be 在大气层生成、传输和沉降以及在土壤研究中的最新且重要进展,旨在推动国内今后相关工作的开展。

2 大气中 ^{10}Be 的生成、运移和沉降

2.1 ^{10}Be 的生成

大气 ^{10}Be 是高能初级宇宙射线与氮原子、氧原子发生散裂反应形成,全球平均产率为

$0.021\text{ atoms}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ ^[38],是岩石就地成因 ^{10}Be 平均产率的 10^3 倍^[39]。宇宙射线通量和 ^{10}Be 生成量与地磁纬度、地磁场强度、太阳活动以及高程有关^[40]。受磁刚度影响,高纬地区的宇宙线通量强度高, ^{10}Be 生成率是低纬地区的1倍以上,对 ^{10}Be 生成量起决定作用,但到磁纬 60° 左右,产率就基本不再发生变化^[38]。核素产率还与太阳活动强度有关,太阳的周期性变化(变化周期约为11年)会引起地磁场的变化,直接影响到达大气层的宇宙射线通量^[41]。此外,不同高度大气层的 ^{10}Be 产率也有明显差异,大气底部的核素产率要低于上层大气,99%的大气成因核素形成于海拔3 000 m以上(主要是在对流层上部和平流层)^[38]。

2.2 ^{10}Be 的运移和沉降

现代全球大气中宇生核素的质量, ^{10}Be 为260 t,仅次于稳定核素 ^3He (3 200 t)^[42]。 ^{10}Be 生成后会氧化形成 ^{10}BeO 或水解形成 $^{10}\text{Be}(\text{OH})_2$,吸附到大气气溶胶后通过干湿(粉尘、雪和降水)沉降到达地表。从空间上看, ^{10}Be 的运移和沉降具有明显的纬度地带性规律^[43]:在中低纬地区, ^{10}Be 沉降的时空变化与纬度、地磁场强度、太阳活动、大气环流和降水相关;在高纬地区,太阳活动控制了 ^{10}Be 沉降的年际变化,纬度和降水影响很小。但对于长期暴露的地表(>20 ka),地磁场强度和太阳活动对 ^{10}Be 的长期沉降速率影响较小($\pm 10\%$)^[38,43-44]。

全球干湿沉降比例从<0.1到2.0左右,干沉降只占到 ^{10}Be 总产量的不到5%^[43],所以现代 ^{10}Be 的运移和沉降与大气和降水变化紧密相关。前人曾尝试综合现代降水中的 ^{10}Be 来估算一个具有全球普适性的“平均值”以方便应用^[45-46],但用局部沉降数据来推算全球平均值,还存在很大问题。首先,当前大气混合模型预测的 ^{10}Be 运移方式各有不同,从有限混合到完全混合,再到各种比例混合^[47]。其次,局地大气环流会影响局地降雨并可能导致某地的实际通量与由简单空气模型估算的通量发生偏离^[15]。第三,对流层和平流层交换的气候和季节效应^[48],使 ^{10}Be 短期(年际尺度)沉降速率可能会发生剧烈变化^[45,49]。此外,观察还发现降雨有“稀释效应”和“加积效应”:内陆高海拔、近岸和岛屿环境以“稀释效应”为主, ^{10}Be 沉降通量主要受控于 ^{10}Be 从平流层进入低层大气的速率,与降水量无关;而内陆低海拔则以“加积效应”为主, ^{10}Be 沉降通量与降水量呈正相关^[50]。所以,降水对某地 ^{10}Be 通量有何确切影响目前尚未达成共识。

沉降到地表的¹⁰Be成分较复杂,不仅包含气溶胶中大气生成的¹⁰Be,还有来自于黄土或因土壤侵蚀而“再循环”的¹⁰Be粉尘^[15]。因此,为精确估算降水中初始¹⁰Be,必须校正再循环粉尘的含量。因同属Be同位素且具有相似的地球化学行为,目前常用⁷Be来估算再循环的¹⁰Be含量。放射性⁷Be半衰期只有53天^[51],因此基本没有再循环的⁷Be粉尘。如果初始的大气¹⁰Be/⁷Be值(R)已知,那么每单位降水的大气¹⁰Be浓度 $^{10}\text{Be}_m$ (atoms/cm³)与初始和再循环的核素关系^[15]如下:

$$^{10}\text{Be}_m = ({}^7\text{Be}_{\text{dry}}/P + {}^7\text{Be}_{\text{wet}}) \cdot R + Q_{\text{dust}} \cdot C_{\text{dust}} \quad (1)$$

式中: P 为降水量(cm/a), ${}^7\text{Be}_{\text{dry}}$ 和 ${}^7\text{Be}_{\text{wet}}$ 分别为干、湿组分中的⁷Be浓度(atoms/cm³), Q_{dust} 为粉尘中大气¹⁰Be浓度(atoms/cm³), C_{dust} 为每单位降水中粉尘浓度(mg/cm³)。通过瑞士、美国和新西兰等地的数据发现,再循环的大气成因¹⁰Be贡献范围可达6%~24%^[15,46]。然而,¹⁰Be和⁷Be含量受大气不同层位停留时间及交换程度的制约,¹⁰Be/⁷Be值可能随大气的垂直运动而发生波动。所以,还可通过土壤成分的一个指标——Al含量来校正再悬浮的¹⁰Be^[52]:

$$[^{10}\text{Be}]_{\text{corr}} = [^{10}\text{Be}]_{\text{bulk}} - ([\text{Al}]_{\text{leach}} \cdot [^{10}\text{Be}]_{\text{soil}}) / (\text{Eff} \cdot [\text{Al}]_{\text{soil}}) \quad (2)$$

式中: $[^{10}\text{Be}]_{\text{corr}}$ 是校正后的¹⁰Be浓度(atoms/m³), $[^{10}\text{Be}]_{\text{bulk}}$ 是样品¹⁰Be浓度(atoms/m³), $[\text{Al}]_{\text{leach}}$ 是从气溶胶中淋滤出的Al含量(g/m³), $[^{10}\text{Be}]_{\text{soil}}$ 是再循环土壤粉尘的¹⁰Be浓度(atoms/g), Eff (Acid leaching efficiency)是气溶胶酸淋滤出Al的效率(一般为51%±6%^[53]), $[\text{Al}]_{\text{soil}}$ 是土壤Al的质量百分含量(%)。该方法比⁷Be法更简便,但当研究区有远距离强外源输入时(比如沙尘暴)也不适用。我国北方沙尘天气较多,在应用大气¹⁰Be进行土壤研究时要重点关注再循环¹⁰Be的校正。

从时间角度来讲,现代降水中的¹⁰Be浓度只能代表短期沉降速率,而理论上只有¹⁰Be长期平均沉降速率才可用于计算和示踪土壤演化研究。所以,前人常通过监测当地几个月或数年的¹⁰Be平均沉降速率以代表其长期沉降速率^[15],但是该方法估算的长期沉降速率仍可能存在20%的误差^[54]。因¹⁰Be沉降通量的年际变化一般较小^[55],所以每年或多年平均¹⁰Be沉降通量常被用于估算长期沉降速率^[15]。Graly等^[15]总结了全球不同地区的实测数据,建立了中低纬度地区¹⁰Be沉降通量 $^{10}\text{Be}_{\text{flux}}$ (10⁴ atoms/cm²)与降水量 P (cm/a)的归一化曲线(经降尘校正):

$$^{10}\text{Be}_{\text{flux}} = P \times \left\{ 1.44 / [1 + \exp(30.7 - L) / 4.36] \right\} + 0.63 \quad (3)$$

式中: $L(0^\circ \sim 50^\circ)$ 为纬度,用该式计算的 $^{10}\text{Be}_{\text{flux}}$ 可简略代表该地¹⁰Be的长期沉降速率 F_{10} [atoms/(cm²·a)],大大节约了长期观测的时间、人力和经济成本。除新疆、青海和内蒙古西部等降水量非常低的西北部地区(¹⁰Be干沉降占主导)以外,该方法基本适用于我国绝大部分地区。但该曲线的均方根误差为1750 atoms/cm³,对在较高纬度地区(40°~50°)计算的短期¹⁰Be沉降量误差贡献为10%,而在较低纬度地区(10°~30°)可达20%^[15]。

此外,¹⁰Be长期沉降速率还可用土壤和河流量来估算。在侵蚀和风化时间尺度(10³~10⁴年)上,大气¹⁰Be通量与河流沉积和溶解的¹⁰Be通量平衡,在这种稳定条件下,河口的¹⁰Be通量可代表该时段内流域的¹⁰Be沉积通量^[56]。而对一个已知年龄、无侵蚀的土壤剖面,假设核素无流失,那么¹⁰Be含量可以反映10³~10⁵年内该地的平均沉降通量^[57]。但是土壤¹⁰Be可能存在流失,致使其通量仍可能被低估。如果土壤年龄 t 已知,那么大气¹⁰Be长期沉降速率 F_{10} [atoms/(cm²·a)]为^[15]:

$$F_{10} = (I - I_t) \cdot \lambda / (1 - e^{-\lambda t}) \quad (4)$$

式中: λ 是¹⁰Be的衰变常数 $4.9975 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$, I 是土壤¹⁰Be总含量(atoms/cm²), I_t 是继承性(再循环)¹⁰Be的含量(atoms/cm²)。对冰芯和深海沉积物的分析显示,¹⁰Be长期平均沉降率变化可能也很大,在万年时间尺度上,¹⁰Be的通量变化可超过50%^[58]。因此,如何合理、有效地估算¹⁰Be长期沉降速率仍是目前大气¹⁰Be研究的重点和难点之一。

3 土壤中¹⁰Be的留存与积累

在土壤剖面中,水解的¹⁰Be在自然pH水平下活性强,易吸附在土壤颗粒上,或与Fe、Al氧化物或氢氧化物、泥质或碳酸盐岩等次生矿物共沉淀^[59]。不同于母岩就地成因¹⁰Be,其完全留存在石英晶格中,是一个“封闭体系”,而土壤是一个复杂的“开放体系”,¹⁰Be只在一定的矿物和化学条件下才能保存,与土壤的物理化学性质(颗粒粒度、酸碱性、阳离子交换量以及有机质含量)相关^[15]。如果土壤呈酸性(pH<4),会导致部分Be进入溶液而流失^[60],在pH>4的条件下Be(OH)₂和有机Be复合物才较稳定^[61]。所以实际应用中,必须考虑这些参数来合理评估土壤¹⁰Be流失,这对成土年龄和速率计算至关重要。此外,频繁的氧化还原反应会影响土壤胶体稳定性并引起¹⁰Be迁移,氧化性好的土壤更有利于保留¹⁰Be^[62]。然而,土壤的水文条件是¹⁰Be能否保留

在土壤中的决定因素之一,我国多地表土 ^{10}Be 浓度调查表明降雨是关键控制因素,当降雨量超过 $1\ 200\ \text{mm/a}$ 时,表土 ^{10}Be 浓度与降雨量呈负相关^[63],湿润的土壤易导致 ^{10}Be 流失并进入地下水和河流系统。我国南方地区降雨量较大,尤其是广东、闽西、赣东和浙南等地可超过 $1\ 600\ \text{mm/a}$,可能引起土壤表层 ^{10}Be 不同程度的流失,进行土壤年龄和侵蚀速率研究时需特别注意 ^{10}Be 流失率的校正。

在重力和水力作用下,沉降在土壤表面的 ^{10}Be 会在剖面中进行垂向或横向迁移再分布,其浓度和含量与深度的关系反映了土壤滞留时间、发育程度、垂向混合以及地表侵蚀程度等关键信息,是 ^{10}Be 用于土壤演化研究的基本原理(图1)。在侵蚀较快的山坡或年轻的土壤剖面, ^{10}Be 浓度将随深度增加呈指数减小^[64]。如果土壤发育程度较高,淀积层(B层)富含泥质,那么 ^{10}Be 浓度会在整个土壤剖面的 $1\sim 3\ \text{m}$ 深度范围内达到最大值^[65](图1)。这一方面是

因为,更小的颗粒具有更大的单位质量表面积,可以促进离子交换^[66];另一方面,土壤中的 ^{10}Be 还可进入因风化而新形成的黏土矿物晶格中,土壤B层和C层中 ^{10}Be 总量的 $42\%\sim 92\%$ 可来自于次生黏土矿物^[59]。

土壤中 ^{10}Be 的迁移主要有2种方式:一是物理移动,即 ^{10}Be 吸附在土壤颗粒上,随着侵蚀过程和生物活动等引起的土壤颗粒移动而移动,这种吸附或沉淀的 ^{10}Be 与溶解的 ^{10}Be 通过溶解—沉淀或吸附—解吸作用进行反应和交换,称为反应态 ^{10}Be ($[^{10}\text{Be}]_{\text{rea}}$);另一种是化学移动,即化学溶解造成 ^{10}Be 进入土壤溶液而流失,称为溶解态 ^{10}Be ($[^{10}\text{Be}]_{\text{dis}}$)^[67]。如图1所示,可用质量平衡方程^[67]来表征土壤中的 ^{10}Be :

$$F_{10} = E \cdot [^{10}\text{Be}]_{\text{rea}} + Q \cdot [^{10}\text{Be}]_{\text{dis}} \quad (5)$$

式中: E 为地表侵蚀速率 $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$, Q 为流出剖面的水量(即溶解态 ^{10}Be 流失率, m/a)。因此, ^{10}Be 迁移能否精确定量是限制其应用的一个关键因素。与 ^9Be 类似,因是同一种元素具有相同的地球化学

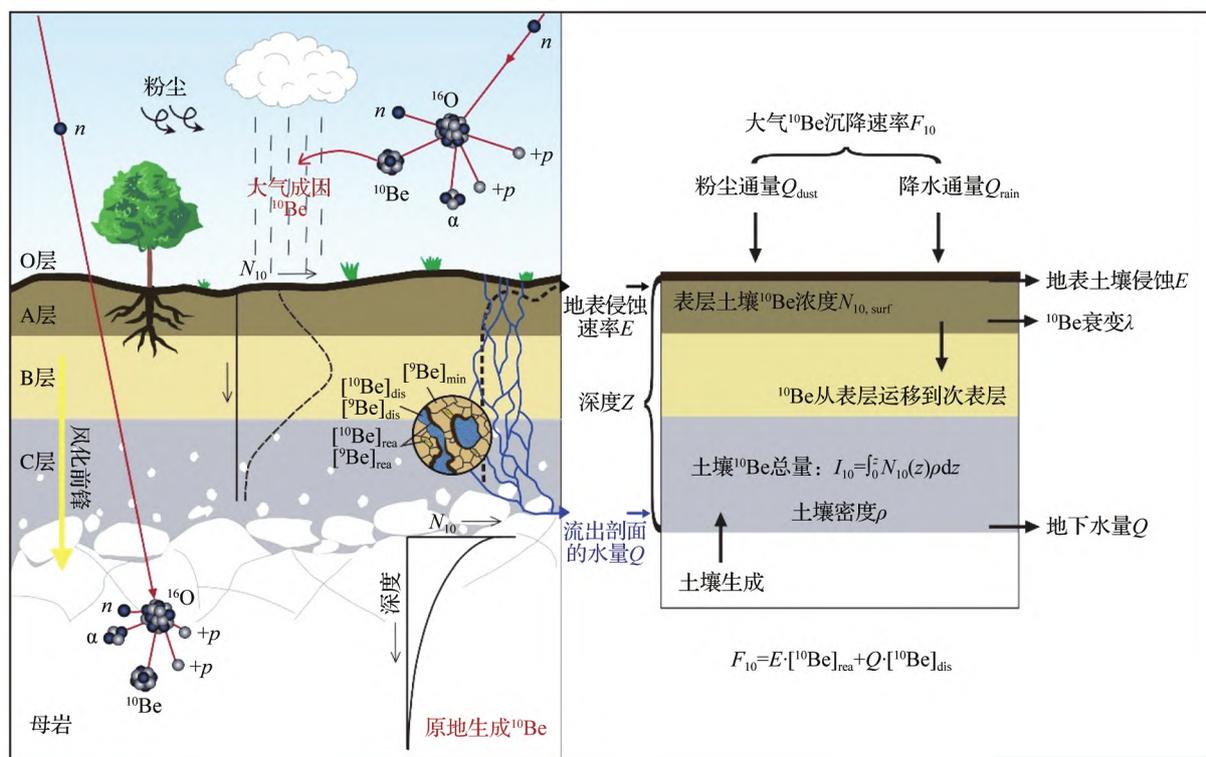


图1 ^{10}Be 的生成及在土壤中的分布和运移模型(据参考文献[61,67]修改)

Fig. 1 ^{10}Be production, distribution and transportation in the soil profile (modified after references [61,67])

根据大气 ^{10}Be 在风化带中累积和迁移规律,本文提及的土壤均指包含腐泥岩层(C)的广义土壤; $[^{10}\text{Be}]_{\text{dis}}$ 和 $[^9\text{Be}]_{\text{dis}}$ 分别是溶解态 ^{10}Be 和 ^9Be 浓度, $[^{10}\text{Be}]_{\text{rea}}$ 和 $[^9\text{Be}]_{\text{rea}}$ 分别是反应态 ^{10}Be 和 ^9Be 浓度, $[^9\text{Be}]_{\text{min}}$ 是残留矿物中 ^9Be 浓度, N_{10} 是 ^{10}Be 总浓度; n 和 p 分别代表中子和质子
According to the accumulation and migration of meteoric ^{10}Be in the weathering zone, the soil mentioned in this article all containing saprolite layer (C); $[^{10}\text{Be}]_{\text{dis}}$ and $[^9\text{Be}]_{\text{dis}}$ respectively represent the concentrations of dissolved ^{10}Be and ^9Be , $[^{10}\text{Be}]_{\text{rea}}$ and $[^9\text{Be}]_{\text{rea}}$ respectively represent the concentrations of reactive ^{10}Be and ^9Be , $[^9\text{Be}]_{\text{min}}$ represents the concentration of residual mineral ^9Be , and N_{10} is the ^{10}Be total concentration; n and p represent neutron and proton

行为,土壤中的⁹Be主要来自母岩矿物的化学风化,所以常用土壤中稳定核素⁹Be的化学质量损失 $m_{\text{Be, flux}}$ (atoms/cm²)来估算和校正¹⁰Be的化学流失(相对于稳定元素Ti)^[21]:

$$m_{\text{Be, flux}} = \rho \cdot C_{\text{Be, p}} \cdot \int_0^{L_w} \frac{\tau_{\text{Be}}(z)}{[\varepsilon_{\text{Ti}}(z) + 1]} dz \quad (6)$$

式中: ρ 是母岩的密度(mg/kg); $C_{\text{Be, p}}$ 是⁹Be的浓度(mg/kg); L_w 是整个土壤剖面的厚度(m); $\tau_{\text{Be}}(z)$ 是⁹Be的传质系数; $\varepsilon_{\text{Ti}}(z)$ 是土壤深度 z 处的应力,即衡量母岩转化为土壤时的体积变化。此外, $m_{\text{Be, flux}}$ 还可分别对⁹Be每个化学部分(交换态、反应性无定型氢氧化态、晶体氧化态和残渣态)进行定量分析来获得。⁹Be和¹⁰Be在土壤中有相似的地球化学行为,反应态⁹Be(反应性无定型氢氧化态和晶体氧化态)与¹⁰Be浓度呈正相关,所以可用校正后的⁹Be含量($I_{\text{Be}} + m_{\text{Be, flux}}$)与测试的⁹Be含量(I_{Be})的比值来校正¹⁰Be含量 $I_{\text{Be}}^{\text{[21]}}$:

$$I_{\text{Be}}^{\text{[21]}} = I_{\text{Be}} \cdot \left(\frac{I_{\text{Be}} + m_{\text{Be, flux}}}{I_{\text{Be}}} \right) \quad (7)$$

式中: $I_{\text{Be}}^{\text{[21]}}$ 为校正后的土壤¹⁰Be含量。

研究揭示⁹Be质量损失只有在低于15%时,才可有效估算¹⁰Be的最大可能流失量,将土壤¹⁰Be总含量的误差校正到10%以内^[23]。此外,母岩原生矿物风化释放的⁹Be主要位于风化前锋,此处次生矿物较少;而¹⁰Be通过干湿沉降到达土壤顶部,主要吸附于次生矿物中。这种空间分布位置不同可能引起不同核素在不同层位的保留程度不同,用⁹Be流失率来校正¹⁰Be可能会高估¹⁰Be流失率,对土壤年龄计算带来误差^[23]。所以,如何精确评估¹⁰Be在土壤中的化学迁移是目前大气¹⁰Be应用遇到的另一个瓶颈。今后可尝试用实验方法定量模拟¹⁰Be在土壤中的垂直和横向迁移,以更好地约束和解释¹⁰Be数据。

4 ¹⁰Be在土壤研究中的应用

4.1 估算土壤年龄

如果某地大气¹⁰Be长期沉降速率 F_{10} 已知且不随时间变化,在地表无侵蚀的情况下($E=0$),土壤剖面中积累的¹⁰Be总量 I_{10} 是物理和化学过程中¹⁰Be流失率 L_{10} (a⁻¹)和时间 t (a)的函数^[23]:

$$I_{10} = \frac{F_{10}}{\lambda + L_{10}} [1 - e^{-(\lambda + L_{10})t}] \quad (8)$$

如前所述, F_{10} 可由公式(3)进行简便估算。而土壤¹⁰Be总量 I_{10} 是土壤容重 ρ (g/cm³)、剖面深度 z (cm)及其¹⁰Be浓度 N_{10} (atoms/g)的积分^[24]:

$$I_{10} = \int_0^z N_{10}(z) \rho dz \quad (9)$$

实际研究中,可用刻槽法对完整的土壤剖面(表面到母岩)按一定深度间隔进行采样,并在不同采样深度用环刀法测试土壤容重 ρ 。然后在实验室内将土壤吸附的¹⁰Be用酸洗脱后进行纯化和沉淀,制靶供加速器质谱(Accelerator Mass Spectrometry, AMS)测试,即可得到不同深度的¹⁰Be浓度,将其带入公式(9)可计算得到土壤¹⁰Be总量 I_{10} 。

假设 $L_{10}=0$,可用 I_{10} 估算土壤年龄 t ,这个年龄也可理解为土壤剖面的暴露年龄或者土壤的滞留年龄^[65]:

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - \lambda \cdot \frac{I_{10}}{F_{10}}) \quad (10)$$

因物理侵蚀或化学淋滤导致¹⁰Be可能存在流失($L_{10} \neq 0$),所以该年龄仅代表土壤的最小年龄,误差来自于采样深度、¹⁰Be沉降速率以及继承性大气¹⁰Be^[65]。如果已知地表侵蚀速率为 E (cm/a)且不随时间变化,那么上述土壤年龄计算公式^[61]为:

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - \lambda \cdot \frac{I_{10}}{F_{10} - \rho_s EC_{10,s}}) \quad (11)$$

式中: $C_{10,s}$ 为表层土壤的¹⁰Be浓度(atoms/cm³), ρ_s 为表层土壤容重(g/cm³)。无论环境干燥或湿润,在¹⁰Be低流失率情况下,得到的土壤年龄误差最小。而在¹⁰Be高流失率或更干燥环境下,次生矿物积累速率更低使年龄误差可达25%^[62]。

依据大气¹⁰Be估算的土壤年龄或留存时间通常在 $10^4 \sim 10^5$ 年范围内^[15],在崩塌活跃的山坡上不到 10^3 年^[68],而在构造稳定的平原地带可达 10^6 年^[17]。在稳态侵蚀下,若以全球平均风化速率0.1 mm/a估算,土壤的平均留存时间约为47 ka^[69]。

4.2 估算成土速率

从母岩风化释放的⁹Be不仅可用于评估上覆土壤¹⁰Be的化学流失,部分⁹Be还会与大气¹⁰Be混合,吸附在矿物表面或成为具有“反应性”的Be库。Be库的同位素组成,即¹⁰Be/⁹Be值($^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$)_{rea}可反映土壤中2种同位素的通量^[23]。这是因为土壤⁹Be含量相对于母岩⁹Be含量代表了风化产物的质量损失。相反,对¹⁰Be来说,在稳定表面¹⁰Be含量是时间的函数,而在侵蚀表面¹⁰Be含量是侵蚀速率的函数,制约着土壤存留时间。所以,土壤和母岩的元素质量平衡关系可代表长期成土过程中的平均风化速率。假设土壤厚度稳定不变,可用土壤¹⁰Be/⁹Be推算母岩风化速率,并且该风化速率可以近似等同于成土“净”速率^[23]。

从矿物学角度看,岩石风化过程就是原生不稳定矿物不断破坏和分解,次生矿物不断形成的过程。所以风化速率计算较复杂,涉及风化壳中原生矿物和次生矿物含量,以及其中的 ^9Be 和 ^{10}Be 含量。在同位素稳态条件下,即 $(^{10}\text{Be}/^9\text{Be})_{\text{rea}}$ 不随时间变化,因侵蚀对同位素比值无影响,所以无需得知侵蚀速率 E 便可直接计算母岩风化速率 $W[\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})]^{[23]}$:

$$W = (1 - f_s)k_w X_p M_t \quad (12)$$

$$= \frac{1 - f_s}{f_s^{9\text{Be}} [^9\text{Be}]_p} \cdot \left[\frac{F_{10}}{r_{\text{rea},ss}} - (L_{10} + \lambda) I_{9,\text{rea}} \right]$$

式中: f_s 为原生矿物风化变为次生矿物的系数, $1 - f_s = 0.47^{[62]}$; k_w 为化学风化流失(可描述为溶解速率常数, a^{-1}); X_p 为土壤中原生矿物的浓度; M_t 为土壤中原生矿物和次生矿物的总质量(g/m^2); $[^9\text{Be}]_p$ 为母岩风化出来进入土壤的 ^9Be 含量(mol/g); $f_s^{9\text{Be}}$ 为母岩风化的 ^9Be 在次生矿物中的系数,其计算公式 $^{[23]}$ 为:

$$f_s^{9\text{Be}} = \frac{\frac{[^9\text{Be}]_{\text{rea}}}{[^9\text{Be}]_p} \cdot \frac{[X_t]_p}{[X_t]_r}}{1 - \frac{[^9\text{Be}]_{\text{min}}}{[^9\text{Be}]_p} \cdot \frac{[X_t]_p}{[X_t]_r}} \quad (13)$$

式中: $[^9\text{Be}]_{\text{rea}}$ 为吸附在矿物表面或参与沉淀的反应态 ^9Be 浓度, $[^9\text{Be}]_{\text{min}}$ 为母岩不完全风化而残留在原生矿物中的 ^9Be 浓度, $[X_t]_p$ 和 $[X_t]_r$ 是一个稳定元素 X_t (如Zr或Ti)分别在母岩和土壤中的浓度。在核素流失率低的情况下, $f_s^{9\text{Be}}$ 非常接近1。 $I_{9,\text{rea}}$ 是反应态 ^9Be 总量(mol/m^2), $r_{\text{rea},ss}$ 是同位素稳态下反应态 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 值 $^{[23]}$:

$$r_{\text{rea},ss} = \frac{F_{10}}{f_s^{9\text{Be}} k_w X_p M_t [^9\text{Be}]_p + (L_{10} + \lambda) I_{9,\text{rea}}} \quad (14)$$

该方法虽可详细描述母岩风化成土过程并较精确地计算风化速率,但计算复杂且需要测试的参数多,可操作性较差。因此,Heimsath等 $^{[6]}$ 给出的利用土壤下伏母岩中就地成因 ^{10}Be 和 ^{26}Al 来估算成土速率的方法更加简便,被广泛应用于南、北美洲和澳洲等地区 $^{[16,70-71]}$ 。大量研究证实,该方法得到的成土速率与其他方法的结果相近,是一种较可靠的定量研究工具 $^{[69]}$ 。但此方法也有自身局限性,即对矿物(石英)及其粒径(0.2~0.5 mm)有严格要求。石英是现今就地成因宇生核素法最理想、应用最广泛的矿物,其物质成分和晶体结构简单、物化性质稳定使大气 ^{10}Be 难以渗入而原地生成 ^{10}Be 又不易淋失;是地表常见矿物之一,同时具有 ^{10}Be 、 ^{26}Al 和 ^{21}Ne 靶核,且这些核素在石英中的产率已较明确 $^{[72]}$ 。此外,因需用 HF/HNO_3 反复淋滤以消除石英外表和裂

隙中的大气 ^{10}Be 以及其他杂质矿物,就地成因法要求石英颗粒粒径较大($>0.2 \text{ mm}$),因此酸性花岗岩和中、粗砂岩是较理想的母岩。更重要的是,就地成因法只关注母岩的物理、化学、生物风化作用,风化带中母岩风化侵蚀出的碎石块(腐泥岩)继续分解和经成壤作用后才能称为土壤,所以母岩的侵蚀速率只能代表部分成土速率。

腐泥岩同时也在继续风化、崩解并进行成壤作用,其表面积比母岩更大,理论上腐泥岩的成土速率应该更大,但这部分贡献前人未曾关注。特别是在腐泥岩层较厚的土壤剖面其量不应被忽略,需要今后深入研究进行探讨。而大气成因法是用土壤颗粒吸附的大气 ^{10}Be 含量来反映成土速率,其含量还与地表侵蚀和化学流失相关,可代表更加精确的成土“净”速率。此外,因大气 ^{10}Be 浓度高,只需要1 g土壤进行富集和提纯,前处理方法更简单,在普通化学实验室即可完成。但是就地成因 ^{10}Be 浓度低,不仅需要更大的样品量(约20 g纯石英且Al浓度 $<200 \mu\text{g}/\text{g}$)来减小AMS分析误差,还有繁琐的预处理和实验步骤、实验周期更长,对实验室要求更高(超净室)。

4.3 估算土壤侵蚀速率

假设土壤侵蚀稳定且不随时间变化,已知土壤年龄 t 可计算土壤侵蚀速率 $E^{[65]}$:

$$E = \frac{(F_{10} - \lambda \cdot I_{10}) \cdot C_{10,v}}{1 - e^{-\lambda t}} \quad (15)$$

式中: $C_{10,v}$ 是侵蚀土壤层中大气 ^{10}Be 浓度(atoms/cm^3)。

如果土壤 ^{10}Be 总量处于稳态(^{10}Be 侵蚀和衰变的量等于沉降量),那么土壤层的侵蚀速率 $E^{[65]}$ 为:

$$E = \frac{F_{10} - \lambda \cdot I_{10}}{C_{10,s}} \quad (16)$$

上述计算土壤侵蚀速率的公式都是基于 ^{10}Be 浓度随时间均匀变化,但下列几种情况除外:①地貌主要通过深侵蚀过程被改造(如浅层滑坡),这些偶然发生的事件会消除大量的 ^{10}Be ,以致残存的 ^{10}Be 含量更多反映的是自上次侵蚀事件以来时间内的累积量,而与侵蚀速率无关;②侵蚀速率近期发生了很大变化(通常受人为作用影响),那么短期和长期的侵蚀速率都会影响土壤中的 ^{10}Be 含量;③土壤年龄非常小,侵蚀层的大气 ^{10}Be 浓度会继续逐渐增加,那么这些侵蚀层中的现代 ^{10}Be 浓度会低估土壤的长期侵蚀量。在这些情况下,虽然仍可用大气 ^{10}Be 估算侵蚀速率,但是需要运用不同的时空模型解释数据 $^{[65]}$ 。

4.4 示踪坡地土壤运移

Campforts 等^[28]提出了坡地上¹⁰Be运移的二维模型,来模拟土壤¹⁰Be在山坡上的垂向和横向再分布情况,为坡地的土壤运移和侵蚀过程提供了详细的数学计算和表达。模型包含2个部分:一是¹⁰Be

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_T(t, x, z)}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial z} \left[-v_c \cdot s_{\text{clay}} \cdot \rho_b \cdot C_{s_{\text{clay}}}(t, x, z) + D_s(z) \frac{\partial C_T(t, x, z)}{\partial z} \right] \\ & - \frac{V_w}{R} \cdot \frac{\partial C_T(t, x, z)}{\partial t} - Q_s(z) \cdot \frac{\partial C_T(t, x, z)}{\partial x} - Q_{st} \cdot \frac{\partial C_T(t, x, z_{\text{top}})}{\partial x} \\ & - \lambda C_T(t, x, z) - V_{\text{soil},z}(z) \cdot \frac{\partial C_T(t, x, z)}{\partial z} \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $C_T(t, x, z)$ 是在时间 t (a)、沿斜坡距离 x (cm)、土壤深度 z (cm)处单位体积土壤大气¹⁰Be浓度(atoms/cm³), v_c 是黏土颗粒交换速度(cm/a), ρ_b 是干体积密度(g/cm³), $C_{s_{\text{clay}}}$ 是吸附在黏土上固相¹⁰Be浓度(atoms/g), $D_s(z)$ 是土壤深度 z 处的生物扰动系数(cm²/a), V_w 是孔隙水运移速度(cm/a), R 是无量纲阻滞系数, $Q_s(z)$ 是土壤蠕动通量(cm/a), Q_{st} 是单位截面耕作土壤通量(cm/a), λ 是¹⁰Be的衰变常数, $V_{\text{soil},z}(z)$ 是土壤颗粒沿山坡横向移动时经历的垂直运动速度(cm/a)。

该模型可预测不同土壤环境(不同粒径比例、高/低流失率)中¹⁰Be浓度和总量的变化,不仅有助于解释实际应用中的土壤¹⁰Be数据,还指出¹⁰Be用于示踪人类加速侵蚀的过程主要取决于¹⁰Be在土壤剖面中的迁移,例如在酸性土壤中,大部分¹⁰Be可能主要位于剖面下部而不受短期侵蚀的影响,使人类侵蚀过程难以被监测。值得注意的是,因侧向上腐泥岩层的输移比例相对很小可忽略^[73],该方法仅模拟了坡地上狭义土壤(不包含C层)的运移。

5 结论与展望

大气¹⁰Be是地球关键带一项极为重要的定量研究手段,可用于估算成土时间、成土速率和土壤侵蚀速率并示踪坡地土壤运移过程等关键信息。尽管对¹⁰Be长期沉降速率及其在风化带中迁移的认识仍有限,大气¹⁰Be依然为定量刻画土壤演化提供了一种新途径。上述方法一般均假设剖面处于理想状态,如同位素稳态、无侵蚀或侵蚀速率不变等,故实际应用要在详细调查研究区地质和环境过程的基础上,选择适宜的方法并对宇生核素结果进行合理评估和解释。

近年来,得益于国内AMS爆发式增长,许多实验室都具备大气¹⁰Be高精度分析能力(¹⁰Be/⁹Be值在 10^{-11} ~ 10^{-12} 范围分析精度可达1%),为今后土壤¹⁰Be

在土壤剖面的垂向和横向迁移,垂向主要是土壤颗粒(黏土迁移和生物扰动)的物理迁移,而横向主要是元素的化学迁移;二是山坡上¹⁰Be的通量和侧向迁移,例如土壤蠕动、地面径流和人为耕作侵蚀等。上述过程的数学表达式可总结为:

相关研究提供了重要的技术支撑。我国幅员辽阔,不同地区的地质和气候差异大,导致土壤类型多种多样且存在问题不尽相同,为今后¹⁰Be研究提供了丰富的研究对象。例如,东北黑土的侵蚀和退化威胁我国粮食安全,西南喀斯特地区水土流失严重出现石漠化威胁生态安全,长江以南地区土壤不同程度重金属污染危害人体健康等。这些问题涉及地质学、农学和环境科学等多领域,但伴随多学科不断交叉融合,大气¹⁰Be作为土壤形成演化研究的重要技术手段,因其重要的理论和应用研究价值,今后在我国将有巨大的研究潜力和应用前景。

参考文献(References):

- [1] DUNAI T J. Cosmogenic nuclides: principles, concepts and applications in the Earth surface sciences[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [2] SCHOENEMANN S W, BRYANT M M, LARSON W B, *et al.* A cosmogenic ¹⁰Be moraine chronology of arid, alpine Late Pleistocene glaciation in the Pioneer Mountains of Montana, USA[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2023, 317. DOI: 10.1016/j.quascirev.2023.108283.
- [3] ENGELBERG S, SAGY A, SHAAR R, *et al.* Northward propagation of the Gulf of Elat-Aqaba constrained by cosmogenic burial ages and magnetostratigraphy of onshore sediments[J]. *Tectonophysics*, 2024, 871. DOI:10.1016/j.tecto.2023.230178.
- [4] BHATTACHARJEE S, BOOKHAGEN B, SINHA R, *et al.* ²⁶Al and ¹⁰Be concentrations from alluvial drill cores across the Indo-Gangetic Plain reveal multimillion-year sediment-transport lag times[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2023, 619. DOI: 10.1016/j.epsl.2023.118318.
- [5] LIU Y, WANG S J, XU S, *et al.* New chronological constraints on the Plio-Pleistocene uplift of the Guizhou Plateau, SE margin of the Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Geochronology*, 2022, 67. DOI:10.1016/j.quageo.2021.101237.
- [6] CORBETT L B, BIERMAN P R, NEUMANN T A, *et al.* Measuring multiple cosmogenic nuclides in glacial cobbles sheds light on Greenland Ice Sheet processes[J]. *Earth and*

- Planetary Science Letters*, 2021, 554. DOI: 10.1016/j.epsl.2020.116673.
- [7] WITTMANN H, OELZE M, GAILLARDET J, *et al.* A global rate of denudation from cosmogenic nuclides in the Earth's largest rivers[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 204. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103147.
- [8] ZERATHE S, LITTY C, BLARD P H, *et al.* Cosmogenic ^3He and ^{10}Be denudation rates in the Central Andes: comparison with a natural sediment trap over the last 18 ka[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 599. DOI: 10.1016/j.epsl.2022.117869.
- [9] YANG Y, LANG Y C, XU S, *et al.* Combined unsteady denudation and climatic gradient factors constrain carbonate landscape evolution: new insights from in situ cosmogenic ^{36}Cl [J]. *Quaternary Geochronology*, 2020, 58. DOI: 10.1016/j.quageo.2020.101075.
- [10] CORNU S, MONTAGNE D, VASCONCELOS P M. Dating constituent formation in soils to determine rates of soil processes: a review[J]. *Geoderma*, 2009, 153(3/4): 293-303.
- [11] SONG Yunhong, LIU Kai, DAI Huimin, *et al.* The first report of the AMS ^{14}C age of Mollisol-Paleosol profile of Songliao Plain[J]. *Geology in China*, 2020, 47(6): 1 926-1 927. [宋运红, 刘凯, 戴慧敏, 等. 松辽平原典型黑土—古土壤剖面 AMS ^{14}C 年龄首次报道[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1 926-1 927.]
- [12] CUI Jingyi, GUO Licheng, CHEN Yulu, *et al.* Spatial distribution of ^{14}C age and depth of mollisol sections in the Songnen Plain during the Holocene[J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(5): 1 332-1 341. [崔静怡, 郭利成, 陈雨露, 等. 松嫩平原全新世黑土 ^{14}C 年龄—深度关系空间格局[J]. 第四纪研究, 2021, 41(5): 1 332-1 341.]
- [13] ZHANG G L, LONG H, YANG F. Understanding the formation time of black soils[J]. *The Innovation Geoscience*, 2023, 1(1). DOI: 10.59717/j.xinn-geo.2023.100010.
- [14] COOK G T, van der PLICHT J. RADIOCARBON DATING | conventional method [M]// *Encyclopedia of Quaternary science*. Amsterdam: Elsevier, 2007: 2 899-2 911.
- [15] GRALY J A, REUSSER L J, BIERMAN P R. Short and long-term delivery rates of meteoric ^{10}Be to terrestrial soils[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 302(3/4): 329-336.
- [16] HEIMSATH A M, DIETRICH W E, NISHIZUMI K, *et al.* The soil production function and landscape equilibrium[J]. *Nature*, 1997, 388: 358-361.
- [17] PAVICH M J, BROWN L, VALETTE-SILVER J N, *et al.* ^{10}Be analysis of a Quaternary weathering profile in the Virginia Piedmont[J]. *Geology*, 1985, 13(1): 39-41.
- [18] LIU Jintao, ZHAO Wei, LIU Yu. Modelling soil thickness evolution: advancements and challenges[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(2): 319-330. [刘锦涛, 赵薇, 刘彧. 土壤厚度演化模型理论方法研究进展[J]. 土壤学报, 2024, 61(2): 319-330.]
- [19] REUSSER L, GRALY J, BIERMAN P, *et al.* Calibrating a long-term meteoric ^{10}Be accumulation rate in soil[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(19). DOI:10.1029/2010GL044751.
- [20] BARG E, LAL D, PAVICH M J, *et al.* Beryllium geochemistry in soils: evaluation of $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ratios in authigenic minerals as a basis for age models[J]. *Chemical Geology*, 1997, 140(3/4): 237-258.
- [21] EGLI M, FITZE P. Formulation of pedologic mass balance based on immobile elements: a revision [J]. *Soil Science*, 2000, 165(5): 437-443.
- [22] BACON A R, RICHTER D D, BIERMAN P R, *et al.* Coupling meteoric ^{10}Be with pedogenic losses of ^9Be to improve soil residence time estimates on an ancient North American interfluvium[J]. *Geology*, 2012, 40(9): 847-850.
- [23] MAHER K, von BLANCKENBURG F. Surface ages and weathering rates from ^{10}Be (meteoric) and $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$: insights from differential mass balance and reactive transport modeling [J]. *Chemical Geology*, 2016, 446: 70-86.
- [24] SCHOONEJANS J, VANACKER V, OPFERGELT S, *et al.* Long-term soil erosion derived from in situ ^{10}Be and inventories of meteoric ^{10}Be in deeply weathered soils in southern Brazil [J]. *Chemical Geology*, 2017, 466: 380-388.
- [25] WYSHNYTZKY C E, OUMET W B, MCCARTHY J, *et al.* Meteoric ^{10}Be , clay, and extractable iron depth profiles in the Colorado Front Range: implications for understanding soil mixing and erosion[J]. *CATENA*, 2015, 127: 32-45.
- [26] HARDEN J W, FRIES T L, PAVICH M J. Cycling of beryllium and carbon through hillslope soils in Iowa[J]. *Biogeochemistry*, 2002, 60(3): 317-336.
- [27] JUNGERS M C, BIERMAN P R, MATMON A, *et al.* Tracing hillslope sediment production and transport with in situ and meteoric ^{10}Be [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2009, 114(F4). DOI:10.1029/2008JF001086.
- [28] CAMPFORTS B, VANACKER V, VANDERBORGHT J, *et al.* Simulating the mobility of meteoric ^{10}Be in the landscape through a coupled soil-hillslope model (Be2D) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 439: 143-157.
- [29] SHEN Chengde, LIU Tungsheng, BEER J, *et al.* ^{10}Be and the accumulation and evolution of loess [J]. *Science in China Series B: Chimica*, 1989, 19(7): 744-751. [沈承德, 刘东生, BEER J, 等. ^{10}Be 与黄土的堆积演化[J]. 中国科学B辑: 化学, 1989, 19(7): 744-751.]
- [30] SHEN C D, BEER J, TUNGSHENG L, *et al.* ^{10}Be in Chinese loess [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 109(1/2): 169-177.
- [31] SHEN Chengde, YI Weixi, LIU Tungsheng. Advance in ^{10}Be study in Chinese loess [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1995, 10(6): 590-596. [沈承德, 易惟熙, 刘东生. 中国黄土 ^{10}Be 研究进展 [J]. 地球科学进展, 1995, 10(6): 590-596.]
- [32] GU Z Y, LAL D, LIU T S, *et al.* Five million year ^{10}Be record in Chinese loess and red-clay: climate and weathering relation-

- ships [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 144 (1/2): 273-287.
- [33] ZHOU W J, PRILLER A, BECK J W, *et al.* Disentangling geomagnetic and precipitation signals in an 80-kyr Chinese loess record of ¹⁰Be [J]. *Radiocarbon*, 2007, 49(1): 137-158.
- [34] ZHOU W J, WARREN BECK J, KONG X H, *et al.* Timing of the Brunhes-Matuyama magnetic polarity reversal in Chinese loess using ¹⁰Be [J]. *Geology*, 2014, 42(6): 467-470.
- [35] ZHOU W J, KONG X H, DU Y J, *et al.* ¹⁰Be indicator for the matuyama-gauss magnetic polarity reversal from Chinese loess [J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50 (8). DOI: 10.1029/2022GL102486.
- [36] SHEN Chengde, SUN Yanmin, YI Weixi, *et al.* Distribution characteristics and soil production rate of ¹⁰Be in hilly and grassy slope soil [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 34(2): 139-144. [沈承德, 孙彦敏, 易惟熙, 等. 丘陵草坡土壤¹⁰Be分布特征及土壤生成速率[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2004, 34(2): 139-144.]
- [37] ZHOU Houyun, ZHU Zhaoyu. Researches on cosmogenic nuclides in soil and weathering profile [J]. *Tropical Geography*, 1999, 19(4): 365-370. [周厚云, 朱照宇. 土壤和风化壳的宇成核素研究[J]. 热带地理, 1999, 19(4): 365-370.]
- [38] MASARIK J, BEER J. An updated simulation of particle fluxes and cosmogenic nuclide production in the Earth's atmosphere [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D11). DOI:10.1029/2008JD010557.
- [39] GOSSE J C, PHILLIPS F M. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20(14): 1 475-1 560.
- [40] LIFTON N, SATO T, DUNAI T J. Scaling in situ cosmogenic nuclide production rates using analytical approximations to atmospheric cosmic-ray fluxes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 386: 149-160.
- [41] LIFTON N A, BIEBER J W, CLEM J M, *et al.* Addressing solar modulation and long-term uncertainties in scaling secondary cosmic rays for in situ cosmogenic nuclide applications [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 239(1/2): 140-161.
- [42] LAL D. Cosmogenic isotopes [M]// *Encyclopedia of ocean sciences*. Amsterdam: Elsevier, 2019: 253-262.
- [43] FIELD C V, SCHMIDT G A, KOCH D, *et al.* Modeling production and climate-related impacts on ¹⁰Be concentration in ice cores [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D15). DOI:10.1029/2005JD006410.
- [44] VONMOOS M, BEER J, MUSCHELER R. Large variations in Holocene solar activity: constraints from ¹⁰Be in the Greenland Ice Core Project ice core [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, 111 (A10). DOI: 10.1029/2005JA011500.
- [45] JORDAN C E, DIBB J E, FINKEL R C. ¹⁰Be/⁷Be tracer of atmospheric transport and stratosphere-troposphere exchange [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108 (D8). DOI:10.1029/2005JD006410.
- [46] MONAGHAN M C, KRISHNASWAMI S, TUREKIAN K K. The global-average production rate of ¹⁰Be [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 76(3/4): 279-287.
- [47] MCCracken K G. Geomagnetic and atmospheric effects upon the cosmogenic ¹⁰Be observed in polar ice [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2004, 109 (A4). DOI: 10.1029/2003JA010060.
- [48] LIU Xuke, FU Yunchong, ZHOU Weijian, *et al.* Cosmogenic nuclide ⁷Be and ¹⁰Be trace atmospheric vertical transmission: a review [J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35 (10): 1 016-1 028. [刘许柯, 付云翀, 周卫健, 等. 宇宙成因核素⁷Be和¹⁰Be示踪大气垂直传输交换研究进展[J]. 地球科学进展, 2020, 35(10): 1 016-1 028.]
- [49] BROWN L, STENSLAND G J, KLEIN J, *et al.* Atmospheric deposition of ⁷Be and ¹⁰Be [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(1): 135-142.
- [50] DENG K, WITTMANN H, von BLANCKENBURG F. The depositional flux of meteoric cosmogenic ¹⁰Be from modeling and observation [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 550. DOI:/10.1016/j.epsl.2020.116530.
- [51] HUH C A. Dependence of the decay rate of ⁷Be on chemical forms [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 171 (3): 325-328.
- [52] LIU X K, FU Y C, BI Y T, *et al.* Monitoring surface ¹⁰Be/⁷Be directly reveals stratospheric air intrusion in Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, 127. DOI:10.1029/2022JD036543.
- [53] YAMAGATA T, SUGIHARA S, MORINAGA I, *et al.* Short term variations of ⁷Be, ¹⁰Be concentrations in atmospheric boundary layer [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2010, 268(7/8): 1 135-1 138.
- [54] BACON A R, RICHTER D D, BIERMAN P R, *et al.* Coupling meteoric ¹⁰Be with pedogenic losses of ⁹Be to improve soil residence time estimates on an ancient North American interfluvium [J]. *Geology*, 2012, 40(9): 847-850.
- [55] HEIKKILÄ U, BEER J, ALFIMOV V. Beryllium-10 and beryllium-7 in precipitation in Dübendorf (440 m) and at Jungfraujoch (3 580 m), Switzerland (1998-2005) [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113 (D11). DOI: 10.1029/2007JD009160.
- [56] WITTMANN H, von BLANCKENBURG F, DANNHAUS N, *et al.* A test of the cosmogenic ¹⁰Be (meteoric)/⁹Be proxy for simultaneously determining basin-wide erosion rates, denudation rates, and the degree of weathering in the Amazon Basin [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2015, 120(12): 2 498-2 528.
- [57] REUSSER L, GRALY J, BIERMAN P, *et al.* Calibrating a long-term meteoric ¹⁰Be accumulation rate in soil [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37 (19). DOI: 10.1029/2010GL04

- 4751.
- [58] FINKEL R C, NISHIZUMI K. Beryllium 10 concentrations in the Greenland Ice Sheet Project 2 ice core from 3~40 ka [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, 102(C12): 26 699-26 706.
- [59] BARG E, LAL D, PAVICH M J, *et al.* Beryllium geochemistry in soils: evaluation of $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ratios in authigenic minerals as a basis for age models[J]. *Chemical Geology*, 1997, 140(3/4): 237-258.
- [60] BERGGREN D, MULDER J. The role of organic matter in controlling aluminum solubility in acidic mineral soil horizons [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(20): 4 167-4 180.
- [61] WILLENBRING J K, von BLANCKENBURG F. Meteoric cosmogenic Beryllium-10 adsorbed to river sediment and soil: applications for Earth-surface dynamics [J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 98(1/2): 105-122.
- [62] THOMPSON A, CHADWICK O A, BOMAN S, *et al.* Colloid mobilization during soil iron redox oscillations [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(18): 5 743-5 749.
- [63] CHEN P, YI P, CZYMZIK M, *et al.* Relationship between precipitation and ^{10}Be and impacts on soil dynamics [J]. *CATENA*, 2020, 195. DOI:10.1016/j.catena.2020.104748.
- [64] PAVICH M J, BROWN L, HARDEN J, *et al.* ^{10}Be distribution in soils from Merced River Terraces, California [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50(8): 1 727-1 735.
- [65] GRALY J A, BIERMAN P R, REUSSER L J, *et al.* Meteoric ^{10}Be in soil profiles-a global meta-analysis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(23): 6 814-6 829.
- [66] BROWN E T, EDMOND J M, RAISBECK G M, *et al.* Beryllium isotope geochemistry in tropical river basins [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(4): 1 607-1 624.
- [67] von BLANCKENBURG F, BOUCHEZ J, WITTMANN H. Earth surface erosion and weathering from the ^{10}Be (meteoric) ^9Be ratio [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 351/352: 295-305.
- [68] MACKEY B H, ROERING J J, MCKEAN J A. Long-term kinematics and sediment flux of an active earthflow, Eel River, California [J]. *Geology*, 2009, 37(9): 803-806.
- [69] STOCKMANN U, MINASNY B, McBRATNEY A B. How fast does soil grow? [J]. *Geoderma*, 2014, 216: 48-61.
- [70] HEIMSATH A M, FINK D, HANCOCK G R. The 'humped' soil production function: eroding Arnhem Land, Australia [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(12): 1 674-1 684.
- [71] OWEN J J, AMUNDSON R, DIETRICH W E, *et al.* The sensitivity of hillslope bedrock erosion to precipitation [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(1): 117-135.
- [72] LIU Yu, WANG Shijie, LIU Xiuming. New advance of cosmogenic nuclides dating in geochronology research [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(4): 386-397. [刘彧, 王世杰, 刘秀明. 宇宙成因核素在地质年代学研究中的新进展 [J]. 地球科学进展, 2012, 27(4): 386-397.]
- [73] RIEBE C S, HAHM W J, BRANTLEY S L. Controls on deep critical zone architecture: a historical review and four testable hypotheses [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(1): 128-156.

Meteoritic Cosmogenic Radionuclide ^{10}Be Trace the Soil Evolution: Mechanism and Progress*

LIU Yu^{1,2}, LIU Jintao³, LIU Chengshuai¹, LUO Weijun^{1,2},
CHENG Anyun^{1,2}, WANG Shijie^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. Puding Karst Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding Guizhou 562100, China; 3. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Soil is currently facing serious pollution, erosion, and degradation owing to global change, threatening the ecosystem stability and food security of China. Quantifying soil formation and evolution (time, rate, etc.) is a critical scientific issue in Earth sciences. Meteoritic radioactive isotope ^{10}Be (hereinafter referred to as meteoric ^{10}Be) serves as a natural tracer, and its inventory in soil is controlled by soil age, surface erosion, and chemical weathering processes. Therefore, meteoric ^{10}Be is an effective tool for quantitatively tracing soil formation and evolution over ten million years and has broad application prospects. First, this study summarizes and reviews the latest progress in the production, delivery, and deposition of meteoric ^{10}Be in the Earth atmosphere, as well as its accumulation and migration in the soil profile. Reasonable estimation of the long-term deposition rate of meteoric ^{10}Be and its migration to weathering zones are important challenges that urgently require resolution. Second, this study introduces the main methods used by meteoric ^{10}Be to estimate the soil formation (residence) age and formation rate, indicating soil erosion and transportation on hill slopes. The key premise for applying meteoric ^{10}Be technology is an understanding of the geological and environmental processes in the study area and a rational assessment of the calculation model. With the rapid development of accelerator mass spectrometry analysis capabilities in China, the widespread application of meteoric ^{10}Be technology in quantitative research on soil evolution has helped solve problems such as predicting environmental ecosystem evolution and soil conservation on arable land.

Key words: Meteoric ^{10}Be ; Soil; Soil residence age; Soil formation rate; Erosion rate.

* **Foundation item:** Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42330712); Autonomous Strategy Project of the State Key Laboratory of Environmental Geochemistry (Grant No. SKLEG2024104); Chinese Academy of Sciences "Light of West China" Program.

First author: LIU Yu, Associate professor, research areas include cosmogenic nuclide geochronology and landscape evolution.

E-mail: liuyu@mail.gyig.ac.cn