

宇宙核素地学研究的应用现状与存在问题

李英奎¹, Jon Harbor¹, 刘耕年², 周力平², 崔之久²

(1. 普渡大学地球与大气科学系, 美国印第安那州 47906; 2. 北京大学环境学院, 北京 100871)

摘要: 宇宙核素技术已广泛应用于地学研究的诸多领域, 用来直接获取地质、地貌体的暴露年龄或埋藏时代, 揭示本地、小流域、大区域范围的地表过程演化特点和速率。简述其在冰川地貌、构造地貌、岩石风化、侵蚀与风化壳(土壤)形成、流域侵蚀与搬运过程、阶地、台地以及喀斯特地貌等方面的研究现状。同时, 探讨来自其本身物理特性、样品所处地质、地貌条件及样品制备和测量等方面的尚存问题和不确定性。

关键词: 宇宙核素; 冰川地貌; 构造地貌; 流域侵蚀与演化

中图分类号: P931; P597

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2005)04-00146-07

Applications and Limitations of In-situ Cosmogenic Nuclides in Earth Sciences

LI Ying-kui¹, Jon Harbor¹, LIU Geng-nian², ZHOU Li-ping², CU I Zhi-jiu²

(1. Department of Earth and Atmospheric Sciences, Purdue University, West Lafayette, IN 47907-1397, USA;

2. College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Cosmogenic nuclide techniques have been used widely in various Earth science areas to measure surface exposure ages, burial events, and to reveal the style and rates of landscape evolution processes across a wide range of spatial and temporal scales. The authors summarize current applications and research methods in several specific Earth science areas, including glacial chronology and geomorphology, tectonic geomorphology, site-specific weathering, erosion and regolith/soil production, watershed and sediment transported processes, alluvial, and fluvial and beach landforms. Uncertainties and limitations that derive from the physical properties of cosmogenic nuclides, geomorphic conditions of sampling places, and from sample preparation and measurement methods are also discussed.

Key words: Cosmogenic nuclide; glacial geomorphology; tectonic geomorphology; watershed erosion and landscape evolution

1 引言

近年来, 宇宙核素技术已广泛应用于地学研究领域, 成为地表过程研究的重要手段。一方面, 这一技术可用于不同气候、岩性、矿物条件的多种物质, 有效克服了某些技术手段(如: ^{14}C)在测年物质方面的局限。同时, 其具有相对广泛的测年范围, 可用来解决由上新世到全新世的广泛地学问题^[1]。更为重要的是, 由于核素形成与地表过程紧密相关, 这一技术能够直接测定地质、地貌体的暴露年龄或埋藏时代, 并有效度量地表过程演化的相关特征和速率^[1, 2]。因此, 合理总结和评价其现有应用状况对更好地应用这一技术进行地学研究至为关键。另一方面, 由于其自身形成机理和测量技术等方面的不确定性以及样品所处位置地质、地貌条件的影响, 这一技术在具体应用中还存在很多局限, 仍然有许多问题不能解决或只能部分解决。本文将在宇宙核素技术现有应

用的基础上, 概括其在地学研究中的总体状况, 并就其中一些重要的过程或领域加以详细描述, 进而探讨其在本身物理特性、样品所处地质、地貌条件及样品制备和测量等方面的尚存问题和不确定性。

2 宇宙核素技术的应用现状

2.1 冰川年代学和冰川地貌学

冰川年代学和冰川地貌学是目前宇宙核素地学应用最为深入、广泛的领域。首先, 冰川侵蚀地貌(如冰川磨光面等)能够有效限定其表面侵蚀和暴露历史, 是进行宇宙核素产生率测定和校正的理想场所, 因此, 在宇宙核素研究的起步阶段, 许多研究利用冰川侵蚀地貌测定和校正宇宙核素的产生率^[3, 4]。其次, 宇宙核素技术能够克服其他测年方法在冰川作用区域测年物质和测年范围等方面的局限, 具有确定冰川活动时间序列的巨大潜力^[1, 5]。同时, 在侵蚀速率很低的情况下,

* 收稿日期: 2005-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助(项目号: 90102016, 40271014)

作者简介: 李英奎(1970-), 男, 博士, 2001年北京大学环境学院毕业, 现为美国普渡大学地球与环境科学系访问学者, 主要从事地表过程、环境及GIS等方面研究。

能够测定十分古老的冰川活动事件^[5,6]。目前,利用这一方法已经在许多冰川活动地区建立了相应的冰川年代序列^[6~12],为全球气候变化研究提供了重要的数据基础。另外,合理利用冰川地貌表面的核素继承可以有效揭示冰川侵蚀作用的特征并评估冰川的侵蚀量(深度)^[5,13]。如:在Cordilleran冰盖地区,Briner和Swanson^[13]利用宇宙核素³⁶Cl的继承对羊背石的迎冰面和背冰面的冰川侵蚀量和侵蚀速率进行了研究,并探讨了冰川磨蚀和拔蚀作用的过程和机制。这说明了宇宙核素技术在冰川侵蚀机制方面研究的巨大潜力。最后,冰川年代学和冰川侵蚀过程的研究为利用宇宙核素方法进行更加复杂、综合的冰川地貌学研究奠定了基础。例如:Fennoscandian冰盖地区冰川保护地形的识别可以为建立更加合理有效的冰盖模型提供了必要的边界条件和检验手段^[14,15]。又如:北美Baffin岛和极地加拿大地区冰川年代学的宇宙核素研究已经使该地区的许多冰川发育模型得到了重新评估,同时,进一步深入和细化了该地区的冰川发育历史和过程^[16,17]。

宇宙核素技术在冰川年代学和冰川地貌学的研究中仍然具有许多不确定性。首先,在冰川年代学研究中,一般选择具有冰川擦痕表面的地貌形态,并由此限定岩石表面的侵蚀状态。但是,这些地貌形态很可能是由于受到冰碛物或其他物质的覆盖才具有较好的保存表面,而并不一定代表岩石表面的侵蚀速率微弱。果真如此,则说明这些具有冰川擦痕的岩石表面并不具备长期、持续暴露的历史,由此得到的暴露年龄将与其实际暴露时间有很大差异^[18]。其次,许多研究表明,在利用宇宙核素进行冰碛物暴露年代测定时应特别小心。一方面,冰碛物表面的不断侵蚀可以使原来被覆盖的砾石到达表面,由此得到的暴露年龄将大大年轻于冰碛物的实际形成年龄。另一方面,一些砾石也可能来自较老沉积物的二次改造,从而造成暴露年代偏老的情况^[19]。因此,对冰碛物暴露年代的测定需要采用多样品方法。一般而言,对较老和较大规模的冰碛物需要使用6~7个样品,对较小规模的冰碛物,也需要使用1~4个样品进行暴露年龄的测量。同时,在进行测年结果解释时,倾向于使用最大的样品暴露年龄代表冰碛物的实际形成年代^[20,21]。

2.2 构造地貌学

宇宙核素技术可用于许多构造地貌形态和过程(如:断层、火山、区域构造运动等)的研究。目前,宇宙核素技术已经成为活动断层研究的重要手段,断层的活动年代和运动速率都可以通过这一方法加以确定。例如:已有研究利用测定错断河流阶地中的²⁶Al和¹⁰Be浓度得到了青藏高原东北部昆仑山断层的全新世滑动速率^[22]。又如:Jackson等^[23]利用石英岩中的¹⁰Be研究了新西兰Otago中部地区的断层活动速率和周期性发育过程。

宇宙核素技术对火山岩的研究主要集中于确定不同位置和高度的核素产生率以及火山岩的形成年代。一方面,由于火山岩表面的侵蚀特征和暴露历史比较容易评估,同时,其年代也可以通过其他技术手段加以确定,因此,火山岩表面成为某些宇宙核素(如:³⁶Cl,³He等)产生率测定和校正的主要对象^[24,25]。另一方面,利用宇宙核素技术也可以测定火山岩的形成年代。目前,已在许多地区建立了火山岩的形成年代及火山喷发历史^[26,27]。

宇宙核素技术还能用来揭示区域构造运动的幅度和特征。现有研究主要利用构造运动形成的阶地或洞穴中的沉积

物的宇宙核素测量确定区域构造运动的特征及其抬升或下切速率。如:通过弗吉尼亚新河流域洞穴序列沉积物的宇宙核素研究,Granger等^[28]探讨了该流域第四纪期间的下切速率,并探讨了区域构造的倾斜运动特征。Leland等^[29]通过裸露基岩的宇宙核素研究探讨了喜马拉雅地区印度河流域的下切和构造运动特征。

2.3 本地侵蚀、风化、和风化壳/土壤形成过程

本地(site-specific)侵蚀、风化及风化壳/土壤的形成过程是地貌演化研究的重要内容。目前,宇宙核素技术可能是唯一能够进行基岩表面长期($> 10^3 \sim 10^4$ ka)侵蚀速率量化研究的方法和手段^[30]。另外,风化壳/土壤表面的侵蚀或沉积速率也可以通过宇宙核素方法加以确定^[31]。同时,在一定的前提假设基础上,还可以对基岩表面的风化速率和风化壳/土壤的形成速率进行评估^[32,33]。

在假定基岩表面的核素浓度达到动态侵蚀平衡的条件下,基岩表面的侵蚀速率可以直接通过宇宙核素浓度加以确定。这一结果通常代表基岩表面可能的最大侵蚀速率(针对蜕变成因的宇宙核素)。例如:通过美国西部山区裸露基岩侵蚀速率的研究,Small等^[30]发现山地环境的基岩风化、侵蚀速率并不象想象的那样比其他环境快。其他地区的研究也得到了类似结论,尤其是那些水分缺乏的地区^[6,29,34,35]。研究同时表明,具有一定风化壳/土壤覆盖的基岩可能比裸露基岩的风化速率更为迅速,这主要是因为裸露基岩表面往往缺乏风化所需要的必要水分条件^[32]。另外,利用宇宙核素方法也能够检验一些地表过程发育的理论和假说。如:基于宇宙核素方法,Heimath等^[33]建立了一个定量评估土壤形成速率的模型,这一模型表明在坡面处于动态平衡的条件下,土壤厚度是坡面曲率的函数,因此,可以使用坡面曲率预测和评估土壤的厚度,并可利用二者之间的关系评估坡面是否达到了平衡状态。针对风化壳和土壤本身,核素浓度-深度曲线提供了解决其本地侵蚀或沉积速率的有力手段^[1]。例如:利用¹⁰Be的浓度-深度分布曲线,Braucher等^[31]对红土侵蚀速率以及其中“石线”的形成机制进行了详细研究。

2.4 流域侵蚀与沉积物搬运过程

流域侵蚀、搬运和沉积过程的特点和速率是理解和研究大区域地貌过程演化的关键环节,宇宙核素方法为这一问题的定量研究提供了重要技术手段。在合理的假设条件下,流域出口的沉积物核素浓度可以用来反映整个流域的平均侵蚀状况^[2,36~38]。这些假设条件包括:(1)用于核素分析的目标矿物在整个流域相对均匀分布;(2)流域侵蚀速率较高,核素浓度主要反映流域的侵蚀状况,核素自身衰变的影响可以忽略;(3)在较长时间尺度上,流域内部的沉积物滞留或沉积作用比较微弱,可以近似忽略^[2,36~38]。符合上述条件的流域,其长期平均侵蚀速率可通过流域出口沉积物的宇宙核素浓度加以确定^[2,36~38]。如果核素的浓度较高,则代表相对缓慢的流域侵蚀过程。反之,较低的宇宙核素浓度代表了较快的流域侵蚀速率^[36,37]。

目前,基于宇宙核素的流域侵蚀速率研究已在不同气候带和地貌条件下的许多流域展开,研究的尺度也从面积较小($1 \sim 10 \text{ km}^2$)的小流域^[36~39]到较大的中等流域($10^2 \sim 10^5 \text{ km}^2$)^[40,41]不等。在实际应用中,小流域通常更能够满足流域侵蚀速率研究所要求的各种前提条件,而在进行较大流域的侵蚀速率研究中,需要综合考虑来自流域岩性、地形不均

习性以及内部侵蚀、沉积特征的影响^[39]。不同流域尺度的侵蚀速率研究大大促进了区域地表过程演化研究的拓展和深化。如: Granger 等^[38]通过美国加利福尼亚两个小流域的侵蚀速率研究, 提出流域长期侵蚀速率与流域平均坡度的指数关系。进一步研究表明, 流域侵蚀速率还与其所处地貌演化的阶段有关。在接近侵蚀平衡的条件下, 不同坡度的流域将具有相近的侵蚀速率^[39]。Vance 等^[41]在喜马拉雅地区的横河流域上游进行了快速抬升区域的流域侵蚀速率研究, 并与其他区域的相关研究对比, 提出了流域地势高差与侵蚀速率之间的对数线性关系, 指出不同气候和构造条件的流域侵蚀速率差异可达3个数量级。

宇宙核素技术在进行流域侵蚀速率研究中仍然存在一些问题需要加以注意。一方面, 由于侵蚀过程的选择性溶解可能造成流域出口沉积物的石英矿物富集(针对¹⁰Be 和²⁶Al), 从而造成一定的误差^[32, 37]。针对这一问题, Riebe 等^[42]通过不同气候条件的22个花岗岩流域的研究表明由于石英矿物富集对最终结果造成的影响一般在12%之内。另一方面, 由于宇宙核素一般具有较长的半衰期和较低的产生率, 其所反映的侵蚀速率一般只能代表流域的长期平均侵蚀速率, 不能反映短期、突变的变化速率和人类活动的加速侵蚀过程^[2]。

2.5 洪积、河流和海(湖)岸地貌

宇宙核素技术可以用来测定河流阶地、洪积扇、海(湖)岸阶地^[43~47]等多种地貌形态的暴露年龄。这些地貌形态暴露年龄的测定有助于揭示与其相关的气候变化特征或区域构造运动状况(参见2.2节)。例如: Trull 等^[44]利用宇宙核素方法对美国加利福尼亚死谷的湖岸阶地进行了暴露年龄测定, 恢复了这些阶地所对应的古湖岸线, 并与全球气候变化进行了对比。Schildgen 等^[45]利用宇宙核素方法对Colorado深切谷地的河流填充阶地进行了研究, 探讨了冰川作用与河流地貌演化的关系。

必须指出, 利用宇宙核素方法对这些地貌形态暴露年龄的研究比较复杂。由于这些地貌形态中的测年物质(沉积物)往往继承了来自源区或搬运过程中的一些核素, 因此, 测年结果会有较大的不确定性和误差。如: Liu 等^[46]对Arizona南部山麓洪积物的研究表明, 由于宇宙核素继承的影响, 洪积物表面的³⁶Cl暴露年龄测定结果明显老于相映的¹⁴C和土壤的测年结果。由此可见, 尽管可以利用宇宙核素技术确定上述地貌体的暴露年龄并由此建立相应的年代序列, 研究中也应针对核素的可能继承状况进行详细评估并加以有效排除。针对这一问题, 通过Wyoming地区河流阶地宇宙核素的研究, Hancock 等^[47]提出了一个有效评估宇宙核素继承的方法。这一方法充分利用宇宙核素的浓度-深度分布曲线, 沉积物的平均核素继承量可以通过实测核素的浓度-深度分布曲线与理论曲线的差异加以评估。这一方法适用于地貌体形成后保存完好, 没有发生明显的表面扰动和混合作用的情况下。如果地貌体在形成后表面发生了扰动和混合, 这一方法将难以进行宇宙核素继承量的有效评估。

2.6 其他地貌过程

宇宙核素技术将能够应用于更为广泛的研究领域。目前, 这一方法已经开始在喀斯特地貌、风沙地貌、黄土和冰缘地貌等领域开展了一些应用并展示出巨大的应用潜力。如: 通过洞穴沉积物的宇宙核素研究可以确定沉积物的埋藏年龄, 并由此推断洞穴的形成时代, 探讨区域水系发育和构造

运动特征^[28]; 风成沙丘样品的宇宙核素研究可以用来探讨了风积过程的特点和速率^[43]; 冰川成因黄土样品的宇宙核素分析可以用来探讨黄土与冰期变化的相互关系^[43]等。相信随着这一技术的不断发展完善, 其地学应用将不断得以扩展和深化。

3 宇宙核素技术的局限和不确定性

尽管宇宙核素技术在地学应用种已经取得了很大进展, 其在地学中的应用仍处于不断发展和完善阶段, 需要大量具体、深入的工作以降低其不确定性, 克服其应用局限。宇宙核素方法的局限和不确定性总体可以概括为三个方面: (1) 核素本身的物理特性; (2) 采样点的地质、地貌条件; (3) 样品制备过程以及AMS的测量精度。下面将就这些方面分别加以论述。

3.1 核素本身物理特性

宇宙核素技术的迅猛发展对其本身物理参数的精度提出了更高要求, 除放射性核素的衰变参数(半衰期)外, 其不确定性主要来自宇宙核素产生率及其随空间位置和时间而变化。另外, 某些核素的扩散损失以及其它“非宇宙”成因核素造成的较高背景值在某些情况下也成为制约其应用的重要因素。

3.1.1 核素产生率的空间变化

核素产生率随地理位置(经纬度)和高度的变化而不同, 实际应用中通常是以某一位置和高度为基准建立其空间变化的尺度因子(Spatial scaling factor)。由于核素产生率在高纬地区(> 60°)相对稳定^[1], 因此, 常以高纬度和海拔高度位置的核素产生率作为空间尺度因子确定的基准。目前, 应用最广泛的空间尺度因子是Lal于1991年^[48]提出基于对称地球磁场的模型, 在实际应用中一般具有10%~20%的不确定性。从模型的应用效果来看, 核素产生率随高度变化的模型比水平模型更为精确些, 尤其是针对中、高纬度地区。同时, 由于没有充分考虑气压和经度变化对核素产生率的影响, 其水平变化模型具有较大的不确定性^[1]。

考虑气压变化的影响, Stone (2000)^[49]首先对Lal模型进行了修正, 在计算过程中使用气压代替海拔高度, 并评估了原有研究中的核素产生率及其不确定性(尤其是针对南极地区)。Dunai^[50]对Lal模型进行了更大的修正, 并提出了一个新的空间尺度因子模型。这一模型主要在Lal模型的基础上考虑了地球磁场非对称特性对宇宙射线的影响。两个模型的差异主要表现在中、低纬度地区。如: 在纬度为20~40°地区的海平面高度, 新模型计算的核素产生率比Lal模型低18%左右, 而在高海拔地区, 新模型得到的核素产生率比Lal模型高30%左右。Desilets和Zreda^[51]对上述两个模型进行了比较和评价, 指出了两个模型的共同缺陷, 并在综合分析1950年以来大量不同纬度和高度地区观测数据的基础上提出了一个更为细化的空间尺度因子模型, 但是, 到目前为止, 这一模型尚未得到广泛应用。

综上所述, 尽管宇宙核素产生率空间变化的研究已经取得了很大进展, 但仍然很难得到更加精确的精度(< 10%), 特别是针对中、低纬度地区, 核素产生率的空间尺度因子模型具有更大的不确定性, 需要进行更加深入的研究。

3.1.2 核素产生率随时间的变化

目前, 宇宙核素技术的地学应用主要基于核素产生率随

时间变化保持恒定的假设。然而,许多研究表明核素产生率随时间的变化而变化^[1,52],因此,实际应用中使用的核素产生率只能看作其在一定时段内的平均值。核素产生率随时间变化规律的深入研究将有利于提高这一技术在地学应用中的精度,减少其不确定性。核素产生率随时间的变化主要成因于到达地球表面的宇宙射线随时间的变化。影响核素产生率时间变化的主要因素包括^[1]:(1)宇宙射线本身强度的变化;(2)星际磁场及太阳系对宇宙射线的影响;(3)地球磁场的变化,包括对称和不对称性磁场强度、磁轴变化等因素的影响;(4)地球大气层对宇宙射线遮挡的变化;(5)采样点所处地貌体表面特征随时间的变化(地貌演化)等。现有研究表明,过去80万年(800 ka)以来宇宙核素产生率随时间的变化可达 $\pm 15\%$ ^[52]。同时,针对不同的核素和地理位置(主要是纬度),其产生率也明显不同^[52]。

3.1.3 核素扩散损失及“非宇宙”成因核素的影响

除上述讨论的宇宙核素产生率随空间和时间的变化外,针对某些核素,扩散损失以及“非宇宙”成因核素的影响也是制约其实际应用的重要方面。宇宙核素的扩散损失主要针对 ^3He 。研究表明,由于在橄榄石和斜辉石等矿物中, ^3He 的扩散速率较低,因此,它能够成功应用于富含此类矿物的火山岩的暴露年龄和侵蚀速率研究^[27,53]。然而, ^3He 在石英矿物中具有较高的扩散速率和损失,从而大大限制了其应用领域和范围^[54]。具体而言, ^3He 的扩散损失与气候条件有关。在气候温暖地区较高,在较为寒冷地区较低(在 $< 1\text{Ma}$ 的时间范围内 $< 10\%$)。同时, ^3He 的扩散损失也与样品的暴露时间有关。一般来说,在 $1\sim 10$ 万年之内, ^3He 的扩散损失较小,而当暴露时间 > 100 万年之后,其扩散损失可达 40% 以上^[54]。因此,使用 ^3He 解决暴露时间较短的地学问题更加适宜。

除宇宙核素的主要形成机制外,某些核素还可以部分形成于U和Th等元素的衰变,这种“非宇宙”成因的核素常被称为放射性成因核素^[18]。尽管放射性成因的核素只占整个核素产生率的很小部分,并常常作为核素测量的背景值对待,但是,在某些情况下,其可以达到相当比重,从而限制和影响其具体应用。如:在理论上宇宙核素 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 的产生率比值应该在60左右,但由于更多放射性成因 ^{26}Al 的影响,在某些研究中可以得到明显高于这一理论值的比率^[55]。所幸目前对许多核素的放射性成因研究已取得了很大进展,因此,在实际应用中可以合理评估和排除这一因素的影响^[18,54]。

3.2 地质、地貌条件

任何样品都具有其特定的地质、地貌条件。这些条件的复杂性可以造成测量和确定样品表面侵蚀、沉积速率、暴露年龄及埋藏历史等问题的困难和不确定性。影响宇宙核素的主要地质、地貌条件包括山峰、坡面等对宇宙核素的遮挡;土壤、泥炭、雪、冰、风化壳等临时性沉积物的覆盖;样品宇宙核素的继承及复杂的暴露—埋藏历史和沉积物表面的扰动等。

3.2.1 几何遮挡和表面覆盖

宇宙核素分析的理想采样点来自水平平面,然而,实际采样过程中,采样点通常都具有一定的坡度条件,或者地表形态不规则,从而对宇宙射线的辐射造成部分遮挡,这些遮挡统称为几何遮挡(Geometric shielding)^[1]。坡面的遮挡效应主要包括高于样点的坡面部分对宇宙射线辐射的遮挡、坡度对宇宙射线入射角和有效面积的影响等方面^[1,56]。同时,水平遮挡物(如环绕的山峰、漂砾等)也对采样点所受的宇宙

射线具有明显的遮挡效应^[1,56,57]。

对宇宙射线的遮挡还来自冰、雪、风化壳、土壤、植被和泥炭等物质对采样点表面的覆盖。其遮挡效应可以通过假设样品表面覆盖了一层具有一定密度和厚度的物质加以评估,只是在样品的整个暴露历史中,表面覆盖的厚度和密度都不断发生变化。由此可见,如果样品在暴露过程中曾经经历了零星的表面覆盖,其表面的宇宙核素产生率将降低,由此得到的暴露年龄将比实际暴露年龄偏小,而对表面侵蚀速率的评估将偏大^[1,17,57]。

3.2.2 核素继承和复杂暴露—埋藏历史

尽管对样品表面核素继承的有效评估将有助于解决更为复杂的地学问题,但仍然是制约宇宙核素方法应用的一个重要局限。同时,样品可能经历的复杂暴露—埋藏历史更增加了宇宙核素方法的地学应用难度。目前,单纯利用宇宙核素技术还很难确定样品所经历的暴露、侵蚀、沉积和埋藏事件的次数和时间。

3.2.3 沉积物表层扰动

沉积物的表层扰动可能成因于生物扰动、风力作用及土壤蠕动等不同过程。沉积物表面的充分混合将导致宇宙核素浓度随深度变化的均一化^[57],即不同深度样品的宇宙核素浓度与沉积物表面的浓度一致。一般而言,沉积物的表层扰动将使其表面的核素浓度有所降低。但是,在某些情况下,具有不同核素浓度的外部物质可以整体混入沉积物剖面中(如冰冻泥流过程),从而根据混入物质核素浓度的大小,沉积物混合部位的核素浓度与简单连续侵蚀和沉积物混合形成的核素浓度相比偏高或偏低^[57]。

3.3 测量和样品制备过程的误差

宇宙核素地学应用的迅速发展主要归功于AMS技术的发展。目前,AMS技术已经能够测量敏感度为 $10\sim 15$ 的宇宙核素浓度^[58]。尽管如此,宇宙核素在测量过程中仍然不可避免地存在着一定的误差。一般而言,AMS的宇宙核素浓度测量误差可以控制在 5% 之内^[1],但由于种种原因,不同核素的测量精度有所不同,例如:目前对 ^{10}Be 核素的测量精度较高,而 ^{26}Al 的测量精度相对较低。

宇宙核素浓度的测量误差还来自样品的制备过程(包括物理和化学过程)。现有研究一般将其误差评估为 5% 以内^[14]。在样品制备过程中尤其需要有效排除大气成因宇宙核素的可能“污染”。目前,大多数用于地学研究的形成于岩石表面的宇宙核素都能够产生于大气之中。同时,对许多核素而言,大气成因的核素往往具有高于岩石表面产生核素几个数量级的产生率^[18]。如: ^{10}Be 在大气中的产生率可达岩石表面平均产生率的 10^3 倍以上。因此,在样品制备过程中,需要采取严格的步骤和手段以确保大气成因的宇宙核素没有对样品本身产生的核素产生“污染”^[1]。

4 结 语

本文主要对宇宙核素方法在地学应用中的局限和不确定性进行了概括和总结,并重点探讨了其测年范围及其影响因素。宇宙核素方法的现存问题主要包括核素本身的物理特性、采样点所处的地质、地貌条件以及样品制备过程和AMS测量等方面的不确定性。另外,在需要进行大量样品分析时,较高的样品测量成本也常常成为限制宇宙核素方法广泛应用的重要因素。理解宇宙核素方法的测年范围对有效应用这

一技术进行地学问题研究至关重要,虽然宇宙核素技术总体具有 $10^3 \sim 10^6$ 年的相对广泛的测年范围,并特别适合于地貌与第四纪地质学问题的研究。但是,不同宇宙核素具有不同的测年范围,这主要取决于核素本身物理特性(如:半衰期、核素产生率、测量误差等),同时,也与不同测年应用策略(如

暴露年龄和埋藏年龄)有关。了解宇宙核素的现存问题(局限和不确定性)和测年范围,可以有助于在实际应用过程中,针对具体的地学问题,选择适当的核素及应用模型进行问题的解决,提高这一方法的使用效率和解决实际问题的能力。

参考文献:

- [1] Gosse, J C, Phillips, F M. Terrestrial cosmogenic nuclides: theory and applications[J]. *Quaternary Sciences Review*, 2001, 20: 1475- 1560
- [2] Bieman, P, Steig, E J. Estimating rates of denudation using cosmogenic isotope abundances in sediment[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21: 125- 139
- [3] Nishiizumi, K, Winterer, E L, Kohl, C P, et al. Cosmic ray production rates of ^{10}Be and ^{26}Al in quartz from glacially polished rocks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(B12): 17907- 17915
- [4] Clark, D H, Bieman, P, Gillespie, A R. ^{10}Be and ^{26}Al production rates and a revised glacial chronology for the Sierra Nevada[J]. *Radiocarbon*, 1996, 38(1): 152
- [5] Fabel, D, Harbor, J. The use of in-situ produced cosmogenic radionuclides in glaciology and glacial geomorphology[J]. *Annals of Glaciology*, 1999, 28: 103- 110
- [6] Nishiizumi, K, Kohl, C P, Arnold, J R, et al. Cosmic ray produced ^{10}Be and ^{26}Al in Antarctic rocks: exposure and erosion history[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 104: 440- 454
- [7] Phillips, F M, Zreda, M G, Smith, S S, et al. Cosmogenic Chlorine-36 chronology for glacial deposits at Boddy Canyon, Eastern Sierra Nevada[J]. *Science*, 1990, 248: 1529- 1532
- [8] Gosse, J C, Klein, J, Evenson, et al. Beryllium-10 dating of the duration and retreat of the Last Pinedale Glacial sequence[J]. *Science*, 1995, 268: 1329- 1333
- [9] Phillips, F M, Zreda, M G, Benson, L V, et al. Chronology for Fluctuation in Late Pleistocene Sierra Nevada Glaciers and Lakes[J]. *Science*, 1996, 274: 749- 751
- [10] Briner, J P, Swanson, T W. Late Pleistocene cosmogenic ^{36}Cl glacial chronology of the Southwestern Alaska Mountains, Alaska[J]. *Quaternary Research*, 2001, 56: 148- 154
- [11] Barrows, T T, Stone, J O, Fifield, L K, et al. Late Pleistocene glaciation of the Kosciuszko Massif, Snowy Mountains, Australia[J]. *Quaternary Research*, 2001, 55: 179- 189
- [12] Owen, L A, Finkel, R C, Caffee, M W, et al. Timing of multiple late Quaternary glaciations in the Hunza Valley, Karakoram Mountains, northern Pakistan: defined by cosmogenic radionuclide dating of moraines[J]. *GSA Bulletin*, 2002, 114(5): 593- 604
- [13] Briner, J P, Swanson, T W. Using inherited cosmogenic ^{36}Cl to constrain glacial erosion rates of the Cordilleran ice sheet[J]. *Geology*, 1998, 26: 3- 6
- [14] Fabel, D, Stroeve, A P, Harbor, J. Landscape preservation under Fennoscandian ice sheets determined from in situ produced ^{10}Be and ^{26}Al [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 201: 397- 406
- [15] Stroeve, A P, Fabel, D, Hattestrand, C, et al. A relict landscape in the centre of Fennoscandian glaciation: cosmogenic radionuclide evidence of tors preserved through multiple glacial cycles[J]. *Geomorphology*, 2002, 44: 145- 154
- [16] Steig, E J, Wolfe, A P, Miller, G H. Wisconsinan refugia and the glacial history of eastern Baffin Island, Arctic Canada: coupled evidence from cosmogenic isotopes and lake sediments[J]. *Geology*, 1998, 26: 835- 838
- [17] Bieman, P R, Marsella, K A, Patterson, C, et al. Mid-Pleistocene cosmogenic minimum age limits for pre-Wisconsinan glacial surfaces in southwestern Minnesota and southern Baffin Island: a multiple nuclide approach[J]. *Geomorphology*, 1999, 27: 25- 39
- [18] Bieman, P R. Using in situ produced cosmogenic isotopes to estimate rates of landscape evolution: A review from the geomorphic perspective[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(B7): 13885- 13896
- [19] Hallet, B, Putkonen, J. Surface dating of dynamic landforms: young boulders and aging moraines[J]. *Science*, 1994, 265: 937- 940
- [20] Putkonen, J, Swanson, T. Accuracy of cosmogenic ages for moraines[J]. *Quaternary Research*, 2003, 59: 255- 261
- [21] Zreda, M G, Phillips, F M. Insights into alpine moraine development from cosmogenic ^{36}Cl buildup dating[J]. *Geomorphology*, 1995, 14: 149- 156
- [22] Van der Woerd, J, Ryerson, F J, Tapponnier, P. Holocene left-slip rate determined by cosmogenic surface dating on the Xidatan segment of the Kunlun fault (Qinghai, China)[J]. *Geology*, 1998, 26(8): 695- 698
- [23] Jackson, J, Ritz, J F, Siale, L, et al. Fault growth and landscape development rates in Otago, New Zealand, using in situ cosmogenic ^{10}Be [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 195: 185- 193

- [24] Ackerkott Jr, R P, Singer, B S, Guillo, H. Long-term cosmogenic ^3He production rates from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K-Ar dated Patagonian lava flows at 47°S[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 210: 119- 136
- [25] Zreda, M G, Phillips, F M, Elmore, D, et al Cosmogenic chlorine-36 production rates in terrestrial rocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 105: 94- 109
- [26] Zreda, M G, Phillips, F M, Kubik, P W, et al Cosmogenic ^{36}Cl dating of a young basaltic eruption complex, Lathrop Wells, Nevada[J]. *Geology*, 1993, 21: 57- 60
- [27] Kurz, M D, Colodner, D, Trull, T W, et al Cosmic ray exposure dating with in situ produced cosmogenic ^3He : results from young Hawaiian lava flows[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 97: 177- 189
- [28] Granger, D E, Kirchner, J W, Finkel, R C, et al Quaternary downcutting rate of the New River, Virginia, measured from differential decay of cosmogenic ^{26}Al and ^{10}Be in cave-deposited alluvium[J]. *Geology*, 1997, 25(2): 107- 110
- [29] Leland, J, Reid, M R, Burbank, D W, et al Incision and differential bedrock uplift along the Indus River near Nanga Parbat, Pakistan Himalaya, from ^{10}Be and ^{26}Al exposure age dating of bedrock straths[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 154: 93- 107
- [30] Small, E E, Anderson, R S, Repka, J L, et al Erosion rates of alpine bedrock summit surfaces deduced from in situ ^{10}Be and ^{26}Al [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 150: 413- 425
- [31] Braucher, R, Bourlès, D L, Colin F, et al Brazilian laterite dynamics using in situ-produced ^{10}Be [J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 1998, 163: 197- 205
- [32] Small, E E, Anderson, R S, Hancock, G S. Estimates of the rate of regolith production using ^{10}Be and ^{26}Al from an alpine hillslope[J]. *Geomorphology*, 1999, 27: 131- 150
- [33] Heimath, A M, Dietrich, W E, Nishiizumi, K, et al Cosmogenic nuclides, topography, and the spatial variation of soil depth[J]. *Geomorphology*, 1999, 27: 151- 172
- [34] Summerfield, M A, Stuart, F M, Cockburn, H A P, et al Long-term rates of denudation in the Dry Valleys, Transantarctic Mountains, southern Victoria Land, Antarctica based on in situ-produced cosmogenic ^{21}Ne [J]. *Geomorphology*, 1999, 27: 113- 129
- [35] Bieman, P R, Caffee, M. Slow rates of rock surface erosion and sediment production across the Namib Desert and Escarpment, Southern Africa[J]. *American Journal of Science*, 2001, 301: 326- 358
- [36] Brown, E T, Stallard, R F, Larsen, M C, et al Denudation rates determined from the accumulation of in situ-produced ^{10}Be in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 129: 193- 202
- [37] Brown, E T, Stallard, R F, Larsen, M C, et al Determination of predevelopment denudation rates of an agricultural watershed (Cayaguas River, Puerto Rico) using in-situ-produced ^{10}Be in river-borne quartz[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 160: 723- 728
- [38] Granger, D E, Kirchner, J W, Finkel. Spatially averaged long-term erosion rates measured from in situ-produced cosmogenic nuclides in alluvial sediment[J]. *Journal of Geology*, 1996, 104: 249- 257
- [39] Riebe, C S, Kirchner, J W, Granger, D E, et al Erosional equilibrium and disequilibrium in the Sierra Nevada, inferred from cosmogenic ^{26}Al and ^{10}Be in alluvial sediment[J]. *Geology*, 2000, 28(9): 803- 806
- [40] Schaller, M, Blankenburg, F V, Hovius, N, et al Large-scale erosion rates from in situ-produced cosmogenic nuclides in European river sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 188: 441- 458
- [41] Vance, D, Bickle, M, Ivy-Ochs, S, et al Erosion and exhumation in the Himalaya from cosmogenic isotope inventories of river sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 206: 273- 288
- [42] Riebe, C S, Kirchner, J W, Granger, D E. Quantifying quartz enrichment and its consequences for cosmogenic measurement of erosion rates from alluvial sediment and regolith[J]. *Geomorphology*, 2001, 40: 15- 19
- [43] Nishiizumi, K, Kohl, C P, Arnold, J R, et al Role of in situ cosmogenic nuclides ^{10}Be and ^{26}Al in the study of diverse geomorphic processes[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1993, 18: 407- 425
- [44] Trull, T W, Brown, E T, Marty, B, et al Cosmogenic ^{10}Be and ^3He accumulation in Pleistocene beach terraces in Death Valley, California, U. S. A. : Implications for cosmic-ray exposure dating of young surfaces in hot climates[J]. *Chemical Geology*, 1995, 119: 191- 207
- [45] Schildgen, T, Dethier, P, Bieman, P, et al ^{26}Al and ^{10}Be dating of late Pleistocene and Holocene fill terraces: a record of fluvial deposition and incision, Colorado Front Range[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2002, 27: 773- 787
- [46] Liu, B, Phillips, F M, Pohl, M M, et al An alluvial surface chronology based on cosmogenic ^{36}Cl dating, Ajo Mountains (Organ Pipe Cactus National Monument), Southern Arizona[J]. *Quaternary Research*, 1996, 45: 30- 37
- [47] Hancock, G S, Anderson, R S, Chadwick, O A, et al Dating fluvial terraces with ^{10}Be and ^{26}Al profiles: application to the Wind River, Wyoming[J]. *Geomorphology*, 1999, 27: 41- 60

- [48] Lal, D. Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 104: 424- 439
- [49] Stone, J. O. Air pressure and cosmogenic isotope production[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(B 10): 23753 - 23759
- [50] Dunai, T. J. Scaling factors for production rates of in situ produced cosmogenic nuclides: a critical reevaluation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 176: 157- 169
- [51] Desilets, D., Zreda, M. On scaling cosmogenic nuclide production rates for altitude and latitude using cosmic-ray measurements[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 193: 213- 225
- [52] Masarik, J., Frank, M., Schafer, J. M., et al. Correction of in situ cosmogenic nuclide production rates for geomagnetic field intensity variations during the past 800, 000 years[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(17): 2 995- 3 003
- [53] Trull, T. W., Kurz, M. D., Jenkins, W. J. Diffusion of cosmogenic ^3He in olivine and quartz: Implications for surface exposure dating[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 103: 241- 256
- [54] Brook, E. J., Kurz, M. D. Surface-exposure chronology using in situ cosmogenic ^3He in Antarctic quartz sandstone boulders[J]. *Quaternary Research*, 1993, 39: 1- 10
- [55] Shama, P., Middleton, R. Radiogenic production of ^{10}Be and ^{26}Al in uranium and thorium ores: Implications for studying terrestrial samples containing low levels of ^{10}Be and ^{26}Al [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53: 709- 716
- [56] Dunne, J., Elmore, D., Muzikar, P. Scaling factors for the rates of production of cosmogenic nuclides for geometric shielding and attenuation at depth on sloped surfaces[J]. *Geomorphology*, 1999, 27: 3- 11
- [57] Schaller, M., Blankenburg, F. V., Veit, H., et al. Influence of periglacial cover beds on in situ cosmogenic ^{10}Be in soil sections[J]. *Geomorphology*, 2002, 49: 255- 267
- [58] Elmore, D., Phillips, F. M. Accelerator Mass spectrometry for measurement of long-lived radioisotopes[J]. *Science*, 1987, 236: 543- 550

(上接第57页)

点的负面影响, 将金湖特色同武夷山大观进行优势互补, 突出金湖湖光山色, 在规划景区时开通多条水上游览线路, 以船代车, 以水上游览观光、水上漂流、水上运动等项目地开展为主, 达到观赏、娱乐、度假一体的目的。

另外在安全疏散人群的最佳路径的选择分析时, 同样可以由网络分析实现。

3.4 叠加分析

叠加分析是GIS的特有功能, 也是GIS区别于其它信息系统的主要标志。它提供抽象的数据类型和对象类型叠加分析的数学模型, 将同一地区、同比例尺的二组或多组图形要素进行叠加。如利用区域的气候、水文、植被、交通等图形的叠加分析, 分析水库旅游环境及进行旅游环境评价。

在水库旅游开发中, 应当充分重视挖掘水文化的丰富内涵, 将水库建设前后的区域地形地貌图相叠加, 分析水库旅游可利用的资源。

将工程布置图、水文气象图、水环境图相叠加分析设置水体保健、水上游乐旅游项目的可能性, 同时验证水上运动等旅游项目, 如空中飞翔旅游等的科学性。

参考文献

- [1] 张成才. 空间分析理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004
- [2] 陈福义, 范保宁. 中国旅游资源学[M]. 北京: 中国旅游出版社, 2003
- [3] 陈安泽, 卢云亭, 陈兆棉. 国家地质公园建设与旅游资源开发[A]. 旅游地学论文集第八集[C]. 北京: 中国林业出版社, 2003
- [4] 崔越. 地貌旅游资源特征值与信息技术支持下的评价模型研究[D]. 北京: 北京大学, 2002
- [5] 岳怀仁. 风景旅游区经营与管理[M]. 张文等译. 北京: 中国旅游出版社, 2001
- [6] 周晓娟, 彭锋. 论城市滨水区水空间形态设计模式探讨[J]. 规划师, 2002, 18(12): 21- 25
- [7] 刘滨滨, 鲍鲁泉. 旅游地原著聚居模式在旅游接待点上规划设计上的应用[J]. 规划师, 2002, 18(4): 29- 32
- [8] 毛培琳, 李雷. 水景设计[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993

将现有交通图与地质地貌图与临近行政区域区划图相叠加, 可判断行政区的经济、社会发展影响力对到达水库交通便利度改善的关系。例如, 帮助分析临近的主要客源地与水库之间是否可以添加新的更短的交通路径。

另外, 将工程图与水库区域地形图相叠加, 确定电站生产建设区和周边旅游地区^[8], 电站建设区的少部分区域可以作为参观区, 叠加分析为规划好安全的旅游路径提供依据。例如, 梅口平湖景区金猫窥世是地质公园的标志性景点, 将地质地貌图和交通图相结合可确定在湖中观赏的最佳视点视域和航线。

4 结 语

地理信息空间分析技术在水库旅游规划与管理中的应用, 体现出其众多的优点和巨大的潜力, 保证了水库旅游规划与管理的准确性和精确性。

结合空间分析功能及GIS其他技术理论, 综合运用水库旅游规划, 充分发挥水库旅游价值, 建立完善的库区旅游规划体系, 必将为水库旅游规划提供更加科学的技术支持。