

放射性核素 $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 、 ^{137}Cs 测定 巴丹吉林沙漠湖泊岩心的年代及沉积速率

刘斯文¹⁾, 储国强²⁾, 赖忠平³⁾

1) 国家地质实验测试中心, 北京, 100037;

2) 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京, 100029; 3) 中国地质大学地球科学学院, 武汉, 430074

内容提要:巴丹吉林沙漠发育了世界上独一无二的沙漠丘间湖泊群, 100 多个永久性的丘间湖泊分布于沙漠的东南部。沙漠湖泊岩心是干旱地区重要的气候、环境档案, 然而受沙漠湖泊发育极端环境的影响, 岩心测年面临很大挑战。本文选择巴丹吉林沙漠南缘的阿尔吉林和敦德吉林丘间湖泊进行钻探, 获取无扰动岩心, 利用核素($^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 、 ^{137}Cs)进行测年, 并计算其沉积速率。结果表明: ① 核素($^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 和 ^{137}Cs)测年能够获取巴丹吉林沙漠现代丘间湖泊岩心的可靠年代。② 巴丹吉林沙漠丘间湖泊岩心 Ar-1 的 CRS 模式测年结果为 $102 \pm 8\text{a}$, 沉积速率分布范围为 $0.13 \sim 0.33 \text{ cm/a}$, 岩心 Dd-1 的 CRS 模式测年结果为 $123 \pm 2\text{a}$, 沉积速率分布范围为 $0.18 \sim 0.70 \text{ cm/a}$ 。③ 沙漠岩心沉积速率的空间分布具有自沙漠腹地向边缘递增的趋势, $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ -CRS 平均沉积速率分布范围为 $0.16 \sim 0.57 \text{ cm/a}$, ^{137}Cs 沉积速率分布范围为 $0.05 \sim 0.6 \text{ cm/a}$ 。未来, 对于沉积速率空间变化的可能影响因素, 如高大沙山的围限、阻挡效应、 ^{137}Cs 的分子扩散效应以及古地震影响等应予以关注。

关键词: $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$; ^{137}Cs ; CRS; 湖泊岩心; 巴丹吉林沙漠

$^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 和 ^{137}Cs 年代学方法被广泛应用于全球各类湖泊沉积物约 120 年来的年代测定, 自 20 世纪 60 年代以来已发展成为现代湖泊沉积物测年的成熟方法 (Goldberg, 1967; Robbins & Edgington, 1975; Krishnaswamy et al., 1971; Wan Guojiang, 1997; Chu Guoqiang et al., 2005), 然而, 对地球上极端环境地区发育的湖泊, 如沙漠湖泊和两极湖泊的沉积物测年研究报道很少, 原因在于上述湖泊沉积物受大气沉降 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 通量极低 (Appleby, 2008; Preiss, 1996)、地貌环境屏障以及复杂的沉积过程 (Liu Siwen et al., 2012) 影响等因素的限制, 测年非常困难。沙漠湖泊是沙漠地区气候、环境记录的重要载体 (Wünnemann et al., 2007), 尤其是年轻湖泊沉积记录能够与器测气象记录对比。然而, 极端干旱的环境条件和强烈的风沙作用使沙漠地区连续的湖泊记录非常稀少, 这使得沙漠湖泊岩心成为干旱区气候和环境变化研究难得的材料。巴丹吉林沙漠是地球上唯一的在沙海中发育湖泊群的沙漠 (Yang Xiaoping et al., 2010; Dong Zhibao et

al., 2013), 随着近年来对沙漠湖泊沉积物环境、气候变化记录研究的持续深入 (Liu Siwen et al., 2013; 2015; Wang Fei et al., 2015) 和巴丹吉林沙漠科学问题的探索 (Chen Jiansheng et al., 2006), 利用现代湖泊沉积岩心“将今论古”, 认识沙漠地区过去的气候、水文变化逐渐受到重视 (Herzschuh et al., 2006; Roule et al., 2013), 测定现代湖泊沉积岩心的年代成为亟需解决的关键问题。

Appleby (2008) 认为沙漠地区的 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 大气沉降通量极低, 测年结果具有不可预测性, 尤其是 $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 测年在沙漠湖泊岩心中的应用存在不确定性 (Herzschuh et al., 2006), 很难建立完整的岩心年代框架^①。然而, 对于旱区湖泊岩心的测年另一些研究则表明, 核素 $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 和 ^{137}Cs 测年具有一定的适用性 (Flower et al., 2006; Jenny et al., 2002; Chen Fahu et al., 2006), 最近 Liu Siwen et al. (2012; 2014) 和 Roule et al. (2013) 对巴丹吉林沙漠东南部丘间湖泊的测年研究证实了, 尽管巴丹吉林沙漠 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 的沉降通量较低, 但仍旧能

注: 本文为中国地质科学院基本科研业务费项目 (编号 YYWF201525); 国家地质实验测试中心基本科研业务费 (编号 2013CSJ02、2015CSJ02) 项目资助成果。

收稿日期: 2016-03-11; 改回日期: 2016-07-22; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 刘斯文, 男, 1980 年生。博士, 副研究员。第四纪地质学专业, 从事沙漠沉积物测年、古气候相关工作。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄 26 号; Email: siwenzliu@126.com。

够进行测年,并能获得理想的测年结果,但前提是获取良好的无扰动岩心。尽管如此,由于已发表的巴丹吉林沙漠湖泊沉积岩心的核素(²¹⁰Pb、¹³⁷Cs)年代较少,很难凭单个钻孔的数据推测整个沙漠湖泊的沉积速率。而在实际研究中,沙漠湖泊的沉积速率水平是经常用到的基础指标,因此,通过对沙漠中不同位置的多个丘间湖泊进行测年,研究其沉积速率的空间分布,对于推算整个沙漠的丘间湖泊沉积速率具有重要意义。

本文选择巴丹吉林沙漠东南部丘间湖泊群中的阿尔吉林和敦德吉林两个丘间湖泊作为研究对象,旨在通过无扰动岩心的²¹⁰Pb_{ums}和¹³⁷Cs年代学方法建立湖泊岩心的年代框架,推算其沉积速率。并与已发表的丘间湖泊岩心测年数据进行对比,探讨沙漠湖泊沉积速率的空间分布规律及沉积速率水平。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

巴丹吉林沙漠是中国第3大沙漠,发育在阿拉善地块西部(Zhang Jin et al., 2007)的沉积盆地之

中,面积约49000km²(Zhong Decai, 2003),研究区位置如图1所示。巴丹吉林沙漠东南部共有约142个丘间湖泊,这些湖泊面积都较小,以浅水湖为主,最大湖泊水深16米,最小湖泊水深仅1m。沙漠东南部及南部边缘基本为面积较小的淡水湖泊(偶有咸水湖泊发育,如巴丹西湖),湖泊发育在高大沙山两侧。沙漠腹地及西北部为面积较大的咸水湖泊。巴丹吉林沙漠周围的气象记录显示该地区年平均降雨量<90mm,降雨主要集中于每年的6~8月份,年平均潜在蒸发量>2500mm(Dong Zhibao et al., 2013; Yang Xiaoping et al., 2003)。

1.2 采样和分析

本文选取巴丹吉林沙漠东南部的敦德吉林、阿尔吉林2个沙漠丘间湖泊作为研究对象。在湖泊钻探之前,测定了每个湖泊的面积和最大水深,实测参数如表3所示。利用孔径为7cm的重力钻,在湖泊中心位置于2007年分别获取了2个湖泊的6支无扰动沉积岩心。

岩心获取后将其密封运回实验室进行切割拍照。观察切割后的岩心新鲜面,选取其中的2支Ar-1、Dd-

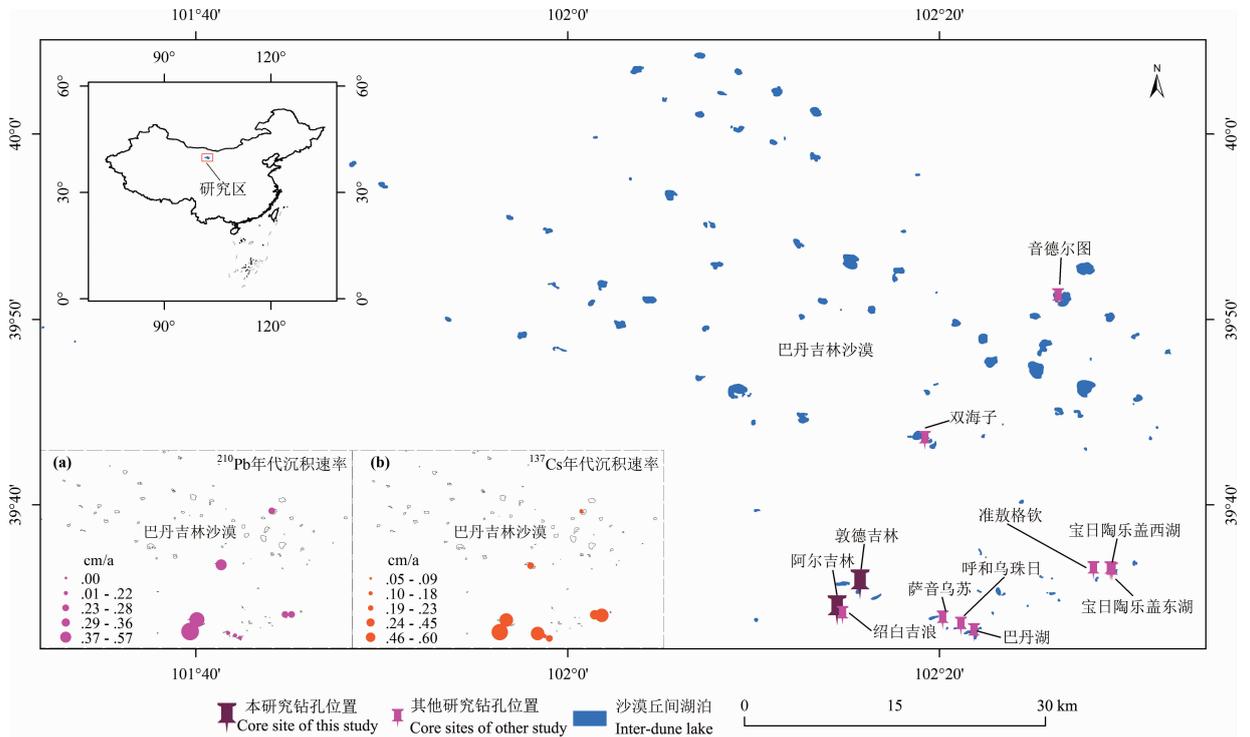


图1 研究区位置、巴丹吉林沙漠湖泊岩心钻孔位置及估算沉积速率空间分布

Fig. 1 Location map of study area and drilled sites and estimating sedimentation rates spatial distribution

(a) 基于巴丹吉林沙漠湖泊岩心²¹⁰Pb的CRS计年模式推算的沉积速率空间分布;

(b) 基于巴丹吉林沙漠湖泊岩心¹³⁷Cs计年推算的沉积速率空间分布

(a)—is sedimentation rates spatial distribution; (b)—is sedimentation rates spatial distribution estimated from ¹³⁷Cs dating result and depth of the inter-dune lake from the Badain Jaran Desert

1 用于 $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 和 ^{137}Cs 测年。按照 Sanchez-Cabeza & Ruiz-Fernández(2012)综述的 $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 测年样品前处理方法以及 Liu Siwen et al. (2012)对沙漠湖泊岩心的研究,估算 ^{210}Pb 在岩心中达到放射性平衡需要的深度,基于此选取每支岩心顶部 20 ~ 30cm 长度,在实验室用圆形钢片以 1cm 间距对岩心进行分割。切割好的样品封装入 50ml 的透明 PET 瓶中,称重,冷冻干燥。称量冷冻干燥后的样品,计算每个样品的含水量和干密度,样品用于 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 以及其他放射性同位素的测量。测试工作在中国科学院地质与地球物理研究所低放射(γ 和 β 射线)强度测量实验室进行,使用的设备为法国堪培拉欧洲系统测量公司(EURISYS MEASURES)生产的 EGPC100P15R 低背景多道能谱分析系统。标准源标定样品由中国原子能科学院提供。 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 比活度的最低检测值分别为 0.002dpm/g 和 0.01dpm/g。

将 2~3g 样品装入直径为 1cm 的透明塑料试管中,密封放置 20 天以上,使得样品中的 ^{226}Ra — ^{222}Rn 达到长期的放射性平衡,然后将样品放入低背景多道 γ 能谱分析系统的高纯锗(HPGe)井型探头中进行 γ 射线能谱测量,测量时间约为 48 小时。湖泊沉积物中的 ^{210}Pb 的比活度通过测量 ^{226}Ra 的比活度获得。在能谱仪上, ^{226}Ra 的比活度通过测量其子核 ^{214}Pb 和 ^{214}Bi 放射的光子数实现(能量为 295keV,353keV 和 609keV)。 ^{137}Cs 在能量 663keV

处测定。

1.3 岩心年代及沉积速率计算

湖泊岩心的 ^{137}Cs 年代以 1963 年全球蓄积峰为计年标志^②, $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 年代分别采用 CIC 和 CRS 模式计算(Appleby & Oldfield, 1978; Appleby, 2001; Binford et al., 1993)。

其中 CIC 计算公式为:

$$t_x = \lambda^{-1} \ln(C_0/C_x) \quad \text{公式(1)}$$

其中 t 代表岩心年龄(a), λ 是 ^{210}Pb 的衰变系数(0.03114 a^{-1}), x 是岩心深度(cm), C_0 是沉积物—水界面的过剩 ^{210}Pb 比活度($^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$), C_x 是 $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 在沉积岩心某一深度的 x 的比活度。

CRS 模式的计算公式为:

$$t_x = \lambda^{-1} \ln(A_0/A_x) \quad \text{公式(2)}$$

其中 A_0 表示岩心中 $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 的存量(Bq/cm^2), A_x 是 x 深度之下的 $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 存量(Bq/cm^2)。

岩心沉积速率(mm/a)分别采用 ^{137}Cs 年代和 $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 计年结果结合深度或质量深度(cm 或 g/cm^2)分别计算。

2 结果

2.1 ^{137}Cs 测年

岩心 Ar-1 的 ^{137}C 比活度(Bq/kg)随深度(cm)的分布如表 1 和图 2 所示,为单峰模式, ^{137}Cs 最大蓄积峰出现在岩心 8~9cm 深度处,其比活度分布范围为 18~19 Bq/kg ,该峰值可以作为 1963 年时

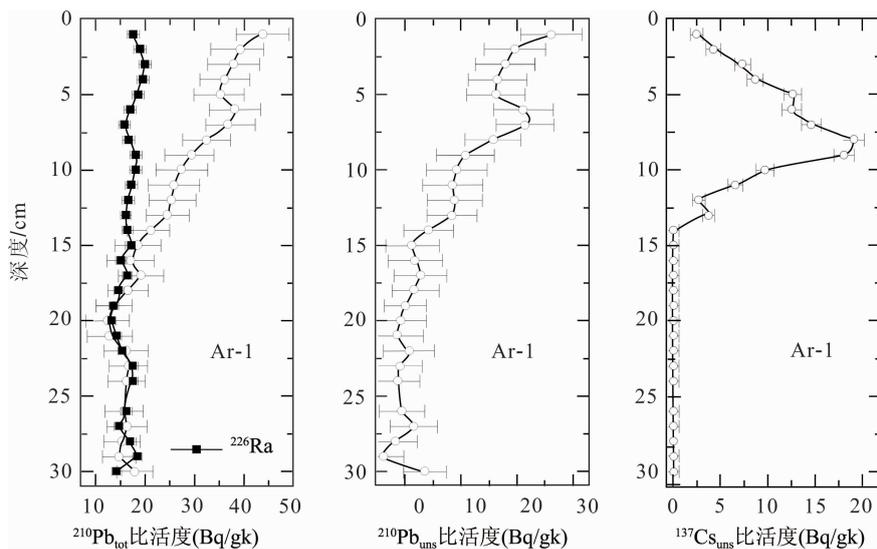


图 2 巴丹吉林沙漠丘间湖泊岩心 Ar-1 核素(^{226}Ra 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 和 ^{137}Cs)比活度垂向分布

Fig. 2 Fallout radionuclide activities of ^{226}Ra , $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$, $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ and ^{137}Cs vs depth in the sediment core Ar-1 from the inter dune lake of the Badain Jaran Desert

标。在13cm处有次级峰,峰值为3 Bq/kg。14~30cm深度处 ^{137}Cs 比活度的分布范围为0.04~0.05 Bq/kg,该段可视为 ^{137}Cs 初始沉积之前的背景值。13cm处的蓄积峰可能代表1954年全球 ^{137}Cs 初始沉降水平。以1963年时标计算岩心的沉积速率为0.18cm/a(0.14g/cm²a),以1954年时标计算岩心的沉积速率为0.25cm/a。

岩心Dd-1的 ^{137}Cs 比活度(Bq/kg)随深度(cm)的分布如图3所示,单峰模式,最大蓄积峰出现在19cm处,比活度为12.1Bq/kg,该峰值可以作为1963年时标。岩心末端28cm处 ^{137}Cs 比活度为1.4Bq/kg,该比活度明显大于Ar-1底部的 ^{137}Cs 背景值,可能由于沉积速率较高,28cm处样品中的 ^{137}Cs 尚未达到放射性平衡。以1963年为时间标志计算岩心Dd-1的沉积速率为0.43cm/a(0.18g/cm²a)。

2.2 $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 测年

恒定初始含量模式CIC(Constant initial concentration)和恒定供给通量CRS(Constant rate

of supply)模式是 $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 计年两种常用的计算模式。CIC模式假定湖泊沉积过程中的 $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 是按一定速率供给的,因此,其随着沉积通量的变化而变化,该模式适用于沉积速率变化很小的湖泊岩心。该种模式下,通常 $\ln(^{210}\text{Pb}_{\text{uns}})$ 与深度(质量深度)具有显著的线性关系。而CRS则假设 ^{210}Pb 的供给率、通量是恒定的,常适用于计算沉积速率有变化的湖泊岩心。

岩心Ar-1的 ^{226}Ra 比活度(Bq/kg)(表1)随深度(cm)的分布如图2,总体稳定,变化较小,平均值为17.11Bq/kg,分布范围为13.73~20.04Bq/kg。岩心的过剩 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$)比活度垂直分布(0.03~26.13 Bq/kg)特征与总 $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ (13.76~43.82 Bq/kg)相似,呈近似指数分布,表明其沉积过程总体稳定,沉积速率在一定时期内是变化的。按照CIC和CRS模式计算的 $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 年代结果如图3。岩心Ar-1的CIC模式年代为122a,CRS年代在16~17cm达到102~134a,但其误差范围也从 $\pm 8\text{a}$ 增加到 $\pm 28\text{a}$,因此,CRS模式可信年代取误差较小的 $\pm 8\text{a}$ 所在层位,有效年代为 $102\pm 8\text{a}$ 。

表1 巴丹吉林沙漠丘间湖泊岩心Ar-1的干密度、质量深度及 ^{226}Ra 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 和 ^{137}Cs 比活度分布

Table 1 Activities of the ^{226}Ra 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ and the dry density, mass depth in Core Ar-1 from the inter dune lake of the Badain Jaran Desert

品编号	深度 (cm)	干密度 (g/cm ³)	质量深度 (g/cm ²)	^{226}Ra (Bq/kg)	$u(^{226}\text{Ra})$ (Bq/kg)	$^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ (Bq/kg)	$u(^{210}\text{Pb}_{\text{tot}})$ (Bq/kg)	$^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ (Bq/kg)	$u(^{210}\text{Pb}_{\text{uns}})$ (Bq/kg)	^{137}Cs (Bq/kg)	$u(^{137}\text{Cs})$ (Bq/kg)
A07-01	1	0.63	0.63	17.70	1.25	43.82	5.33	26.13	5.47	2.47	0.67
A07-02	2	0.62	1.25	19.02	1.27	38.65	5.32	19.63	5.47	4.27	0.78
A07-03	3	0.95	2.20	20.04	1.28	37.91	5.20	17.88	5.36	7.34	0.82
A07-04	4	0.97	3.16	19.60	1.24	36.16	5.05	16.56	5.20	8.69	0.87
A07-05	5	0.76	3.92	18.64	1.22	34.93	5.09	16.29	5.24	12.65	0.94
A07-06	6	0.68	4.60	17.07	1.24	38.22	5.20	21.15	5.34	12.56	1.02
A07-07	7	0.71	5.31	15.88	1.21	37.30	4.99	21.41	5.14	14.60	1.03
A07-08	8	0.87	6.18	16.73	1.20	32.46	4.83	15.73	4.98	19.11	1.11
A07-09	9	0.67	6.85	18.19	1.20	28.98	5.00	10.79	5.14	18.06	1.07
A07-10	10	0.79	7.64	18.17	1.21	27.44	5.26	9.27	5.40	9.72	0.93
A07-11	11	0.83	8.47	17.31	1.22	25.84	5.22	8.53	5.36	6.58	0.78
A07-12	12	0.83	9.30	16.67	1.26	25.58	4.73	8.91	4.89	2.71	0.67
A07-13	13	0.67	9.97	16.22	1.12	24.60	4.31	8.38	4.45	3.74	0.63
A07-14	14	1.02	10.98	16.52	1.12	20.74	4.26	4.22	4.41	0.05	0.58
A07-15	15	1.13	12.12	17.23	1.14	18.59	4.62	1.36	4.76	0.05	0.58
A07-16	16	1.06	13.17	15.20	1.12	17.08	4.75	1.89	4.88	0.05	0.58
A07-17	17	1.44	14.61	16.48	1.03	19.24	4.61	2.76	4.72	0.05	0.58
A07-18	18	1.34	15.96	14.69	0.95	16.59	4.11	1.90	4.22	0.05	0.58
A07-19	19	1.16	17.12	13.73	0.93	13.76	3.66	0.03	3.77	0.04	0.58

注: $u(f)$ 表示f量的绝对误差

岩心Dd-1的 ^{226}Ra 比活度(Bq kg⁻¹)(表2)随深度(cm)的分布如图4,与岩心Ar-1中 ^{226}Ra 比活度分布范围和特征相似,分布范围为13.8~17.5Bq/kg,平均值为15.6Bq/kg。岩心Dd-1中过剩 ^{210}Pb

($^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$)比活度垂直分布(0.03~38.5 Bq/kg)特征与总 $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ (13.71~54.5 Bq/kg)相似,呈近似指数分布,沉积速率在一定时期是变化的。岩心Dd-1的 $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ 及 $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 垂直分布与岩心

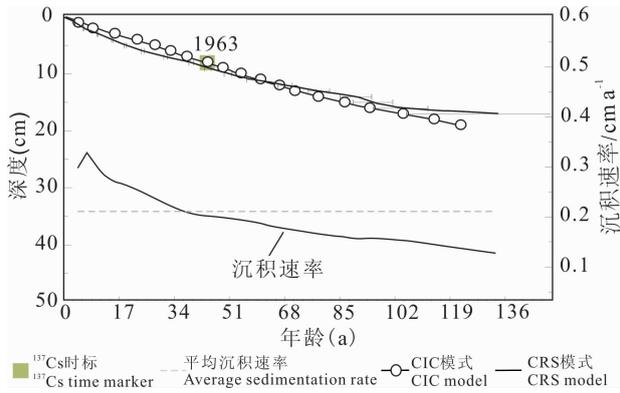


图 3 巴丹吉林沙漠丘间湖泊岩心 Ar-1 的²¹⁰Pb 的 CIC、CRS 模式、¹³⁷Cs 计年结果及推算沉积速率

Fig. 3 ²¹⁰Pb chronology results obtained for the Ar-1 core from the Badain Jaran inter-dune lake using the CIC, CRS model together with the 1963 depth determined by ¹³⁷Cs and estimated sedimentation rates basing on dating results

表 2 巴丹吉林沙漠丘间湖泊岩心 Dd-1 中²²⁶Ra、²¹⁰Pb_{tot}、²¹⁰Pb_{uns}和¹³⁷Cs 的干密度、质量深度及比活度分布

Table 2 Activities of the ²²⁶Ra、²¹⁰Pb_{tot}、²¹⁰Pb_{uns} and the dry density, mass depth in Core Dd-1

from the inter dune lake of the Badain Jaran Desert

样品编号	深度 (cm)	干密度 (g/cm ³)	质量深度 (g/cm ²)	²²⁶ Ra (Bq/kg)	<i>u</i> (²²⁶ Ra) (Bq/kg)	²¹⁰ Pb _{tot} (Bq/kg)	<i>u</i> (²¹⁰ Pb _{tot}) (Bq/kg)	²¹⁰ Pb _{uns} (Bq/kg)	<i>u</i> (²¹⁰ Pb _{uns}) (Bq/kg)	¹³⁷ Cs (Bq/kg)	<i>u</i> (¹³⁷ Cs) (Bq/kg)
D07-01	1.0	0.1	0.1	16.0	0.6	54.5	0.9	38.5	0.6	0.7	6.9
D07-02	2.0	0.2	0.3	15.3	0.6	48.3	1.0	33.1	0.6	1.1	4.2
D07-03	3.0	0.3	0.6	15.8	0.6	43.1	1.2	27.3	0.7	1.1	4.6
D07-04	4.0	0.5	1.1	17.0	0.6	41.2	1.2	24.1	0.6	1.2	4.1
D07-05	5.0	0.5	1.7	17.5	0.6	40.4	1.3	22.9	0.6	1.3	3.9
D07-06	6.0	0.5	2.2	17.3	0.6	34.4	1.5	17.1	0.6	1.7	3.0
D07-07	7.0	0.6	2.8	16.8	0.6	29.7	1.6	12.9	0.6	2.1	2.3
D07-08	8.0	0.4	3.2	16.7	0.6	30.3	1.6	13.7	0.6	2.1	2.4
D07-09	9.0	0.4	3.7	16.7	0.6	27.4	1.7	10.7	0.7	2.2	2.4
D07-10	10.0	0.4	4.1	16.2	0.6	28.3	1.6	12.1	0.6	2.7	1.9
D07-11	11.0	0.4	4.5	15.9	0.6	31.8	1.4	15.9	0.6	3.6	1.5
D07-12	12.0	0.4	4.9	16.2	0.6	32.6	1.4	16.5	0.6	4.0	1.4
D07-13	13.0	0.3	5.2	15.8	0.6	29.8	1.5	14.0	0.6	5.2	1.1
D07-14	14.0	0.5	6.2	16.1	0.6	25.2	1.8	9.2	0.7	6.2	1.0
D07-15	15.0	0.4	6.6	16.8	0.6	21.1	2.2	4.3	0.7	8.0	0.8
D07-16	16.0	0.6	7.2	17.1	0.5	22.8	2.0	5.6	0.6	10.8	0.7
D07-17	17.0	0.6	7.8	17.0	0.6	27.3	1.8	10.3	0.6	12.1	0.7
D07-18	18.0	0.5	8.3	16.5	0.6	26.2	1.8	9.6	0.7	9.2	0.8
D07-19	19.0	0.5	8.8	16.2	0.6	23.1	1.9	7.0	0.6	5.9	1.0
D07-20	20.0	0.5	9.3	15.0	0.6	20.3	2.0	5.3	0.7	4.5	1.2
D07-21	21.0	0.5	9.9	13.4	0.7	17.0	2.3	3.6	0.8	3.7	1.4
D07-22	22.0	0.7	10.6	13.2	0.7	14.3	2.7	1.1	0.8	2.8	1.7
D07-23	23.0	0.9	11.4	13.2	0.6	13.2	2.8	0.0	0.8	2.3	1.9
D07-24	24.0	0.9	12.3	13.1	0.6	13.1	2.8	0.1	0.8	2.2	2.0
D07-25	25.0	0.9	13.3	13.4	0.6	13.6	2.7	0.3	0.8	2.2	2.3
D07-26	26.0	0.9	14.2	13.4	0.6	15.2	2.5	1.7	0.8	2.1	2.4
D07-27	27.0	0.8	15.0	13.8	0.6	15.1	2.8	1.3	0.8	1.4	3.2

注:*u*(*f*)表示*f*量的绝对误差

(刘斯文等, 2015; Liu Siwen et al., 2012)。如 2.2 节对岩心 Ar-1 和 Dd-1 沉积速率的计算表明, 无论

Ar-1 总体相似, 但岩心 Dd-1 在 17cm 和 12cm 周围²¹⁰Pb_{tot}和²¹⁰Pb_{uns}比活度有较大的波动, 且岩心表层物质²¹⁰Pb_{uns}和²¹⁰Pb_{tot}比活度高于 Ar-1, 分别约为岩心 Ar-1 中的 1.2 和 1.5 倍。岩心 Dd-1 的 CIC 和 CRS 模式的²¹⁰Pb_{uns}年代如图 5。岩心 Dd-1 的 CIC 模式年代为 150a, CRS 年代在 16 ~ 17cm 达到 102 ~ 134a, 但其误差范围也从 ±2a 增加到 ±6a, 因此, CRS 模式可信年代取误差较小的 ±2a 所在层位, 有效年代为 123 ± 2a。

2.3 沉积速率

巴丹吉林沙漠湖泊分布于高大沙山丘间地中, 四周被高出湖平面几十至数百米的高大沙山环绕, 沙漠湖泊沉积环境封闭。已有研究表明巴丹吉林沙漠不同湖泊的岩心沉积速率变化相对稳定, 但沙漠中不同位置丘间湖泊的沉积速率也存在一定差异

是基于²¹⁰Pb_{uns}-CRS 的计年结果还是¹³⁷Cs 计年结果, 位于沙漠南缘的阿尔吉林比靠近沙漠腹地的敦

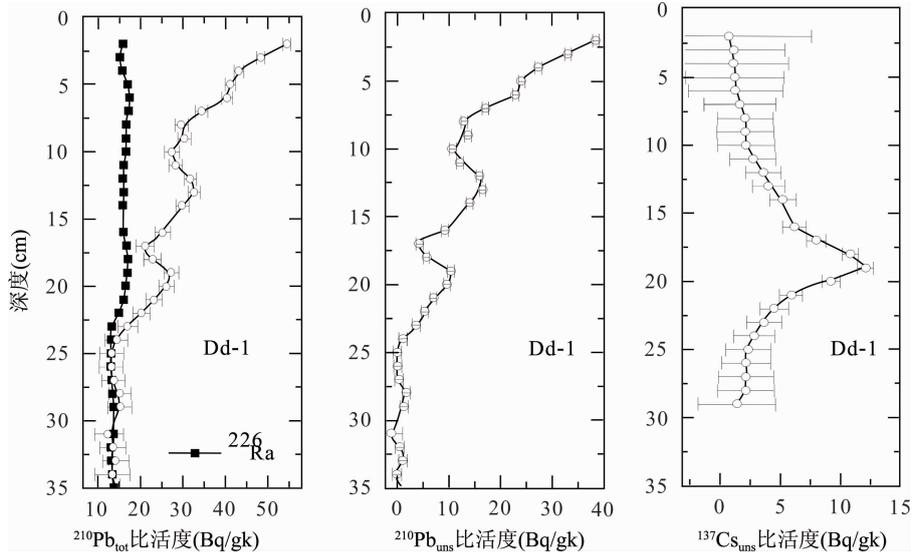


图4 巴丹吉林沙漠丘间湖泊岩心 Dd-1 核素(²²⁶Ra、²¹⁰Pb_{tot}、²¹⁰Pb_{ums}和¹³⁷Cs)比活度垂向分布

Fig. 4 Fallout radionuclide activities of ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb_{tot}, ²¹⁰Pb_{ums} and ¹³⁷Cs vs depth in the sediment core Dd-1 from the inter dune lake of the Badain Jaran Desert

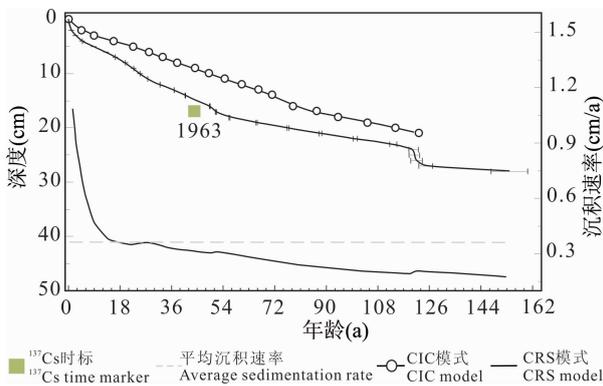


图5 巴丹吉林沙漠丘间湖泊岩心 Dd-1 的²¹⁰Pb_{ums}、CRS 模式、¹³⁷Cs 计年结果及推算沉积速率

Fig. 5 ²¹⁰Pb chronology results obtained from the Dd-1 core in the Badain Jaran inter-dune lake using the CIC, CRS model together with the 1963 depth determined by ¹³⁷Cs and estimated sedimentation rates basing on dating results

德吉林的沉积速率更高。以往研究对巴丹吉林沙漠湖泊沉积速率的研究(岩心空间位置分布如图1)结果总结如表3。基于²¹⁰Pb、¹³⁷Cs年代推算的已发表的巴丹吉林沙漠11个湖泊岩心沉积速率空间分布趋势如图1左下插图a和b。整体而言²¹⁰Pb_{ums}-CRS沉积速率(n=7)分布的范围为0.16~0.57cm/a,空间分布表现为自沙漠腹地向沙漠边缘沉积速率呈增加趋势。基于¹³⁷Cs测年计算的沉积速率(n=11)分布范围为0.05~0.6cm/a,具有与²¹⁰Pb_{ums}-CRS模式估算的沉积速率同样的空间分布特点,但相对于

CRS模式沉积速率(标准方差=0.14),¹³⁷Cs计年的沉积速率(标准差=0.19)变化幅度较大。

3 讨论

核素²¹⁰Pb_{ums}和¹³⁷Cs测年是两种独立的计年方式,¹³⁷Cs主要依靠人工放射核素的全球1963年蓄积峰时标进行定年,如果²¹⁰Pb_{ums}计年结果与¹³⁷Cs的1963年时标吻合,则说明计年结果可信。图3显示岩心Ar-1的CIC和CRS两种模式的计年代结果非常接近,而且²¹⁰Pb_{ums}计年结果与¹³⁷Cs的1963年时标位置完全吻合。CIC模式计算岩心Ar-1的沉(堆)积速率为0.14cm/a(0.12g/cm²a),CRS模式计算的沉(堆)积速率范围为0.13~0.33cm/a(0.13~0.21g/cm²a),岩心Ar-1的CRS模式的平均沉(堆)积速率为0.21cm a⁻¹(0.16g/cm²a),标准方差为0.05(0.03)。基于CIC和CRS模式²¹⁰Pb_{ums}年代计算的岩心Ar-1的沉(堆)积速率接近,而且与¹³⁷Cs的1963年时标计算的沉(堆)积速率0.18cm/a(0.14g/cm²a)接近。上述表明该岩心Ar-1的²¹⁰Pb_{ums}计年结果可靠。

图5显示岩心Dd-1的CIC、CRS两种模式的计年结果存在一定的差异,CIC模式计年结果老于CRS和¹³⁷Cs年代结果,但CRS模式计年结果与¹³⁷Cs的1963年时标所在层位的年代偏差仅为2a。造成这种情况的原因是:CIC计年模式受沉积岩心的沉积速率变化影响。CIC模式下计算岩心Dd-1

的沉(堆)积速率为 0.19cm/a(0.10g/cm² a), CRS 模式计算的沉(堆)积速率范围为 0.18~0.70cm/a (0.11~0.14 g/cm² a), 平均沉(堆)积速率为 0.29cm/a(0.12 g/cm² a)。CIC 模式计算的沉(堆)积速率明显低于 CRS 模式和¹³⁷Cs 计算的沉(堆)积速率,因此 CIC 模式不适用于 Dd-1 该类沉积速率变化较大的湖泊。由于基于¹³⁷Cs 的沉积速率仅考虑了 1963 年以上层位的年代,并未考虑 1963 年以下的年代,而 CRS 考虑了整支岩心的沉积年代。整体而言岩心上部沉积速率较高,因此,基于¹³⁷Cs 年代计算的沉积速率高于 CRS 模式下计算的沉积速率。

表 3 巴丹吉林丘沙漠丘间湖泊岩心核素(²¹⁰Pb_{uns}、¹³⁷Cs)测年沉积速率对比

Tab. 3 Comparison of sedimentation rates estimating from²¹⁰Pb_{uns} and ¹³⁷Cs dating results of inter dune lake sediment cores from the Badain Jaran Desert

湖泊名称	经度	纬度	水深(m)	盐度(g/L)	岩心长度(cm)	采样年代(年)	沉积速率(cm/a)		采样年份	数据来源
							²¹⁰ Pb-CRS	¹³⁷ Cs		
阿尔吉林	102°14.485'	39°34.319'	1.7	2	50	2007	0.21	0.18	2007	本文
敦德吉林	102°15.729'	39°35.714'	1	4.9	60	2007	0.36	0.43	2007	
宝日陶勒盖西湖	102°29.199'	39°36.452'	2.5	1.8	67	2010	0.22	0.09	2010	刘斯文等,2015
音德尔图	102°26.388'	39°51.179'	8	179.4	66	2010	0.16	0.09	2010	LiuSiwen et
双海子	102°19.216'	39°43.484'	7	173.6	100	2007	0.28	0.18	2007	al., 2012
准敖格钦	102°26.033'	39°35.255'	1.1	1.8	97	2005	0.19	0.23	2005	Rioual et
绍白吉浪	102°14.778'	39°34.037'	1.4	2	33	2005	0.57	0.60	2005	al., 2013
巴丹东湖	102°21.859'	39°33.120'	1.4	1.6	37	2005		0.13	2005	
萨音乌苏西湖	102°20.176'	39°33.804'	1.3	25	57	1999		0.44	1999	Young, 2006
呼和乌珠日	102°21.153'	39°33.464'			66	2006		0.05	2006	
宝日陶勒盖东湖	102°29.295'	39°36.391'	2.5	1.5	72	2005		0.45	2005	Young, 2006; Herzs- chuh et al., 2006

4 结论

(1)核素(²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs)测年能够获取巴丹吉林沙漠丘间现代湖泊岩心的可靠年代,并能估算不同岩心的沉积速率。

(2)岩心 Ar-1 的²¹⁰Pb_{uns}-CIC 模式和 CRS 模式计算的年代结果、沉积速率(0.21cm/a)相近,且与¹³⁷Cs 计年结果和沉积速率(0.18cm/a)吻合。岩心 Dd-1 的²¹⁰Pb_{uns}-CRS 模式计算的年代结果、沉积速率(0.36cm/a)与¹³⁷Cs 计年结果和沉积速率(0.43cm/a)吻合。²¹⁰Pb_{uns}-CRS 计年模式适用于巴丹吉林沙漠丘间湖泊岩心测年。而²¹⁰Pb_{buns}-CIC 测年结果存在偏差,²¹⁰Pb_{uns}-CIC 计年模式并不适用于沉积速率变化较大的沙漠湖泊。

(3)巴丹吉林的沙漠湖泊沉积岩心的沉积速率空间分布具有自沙漠腹地向沙漠边缘递增的趋势,²¹⁰Pb_{uns}-CRS 计年模式下,湖泊岩心沉积速率的变化范围为 0.16~0.57cm/a,¹³⁷Cs 计年模式下,沉

基于 CIC 和 CRS 模式²¹⁰Pb_{uns} 年代计算的岩心 Dd-1 的沉(堆)积速率以及基于¹³⁷Cs 计算的沉(堆)积速率,表明 CRS 计年模式所得年代较为可靠。对于沉积速率变差较大的湖泊利用 CIC 模式计算年代偏老。岩心¹³⁷Cs 沉积速率变差较大的原因,可能是沙漠边缘受近代地震影响^①所致(Hofmann, 1999),也可能是岩心中沉积后的¹³⁷Cs 分子扩散(Crusius & Anderson, 1995)所致。造成上述岩心沉积速率空间分布特征的主要因素可能是湖泊受高大沙山地形阻挡程度不同(Joshi et al., 1969),高大沙山对入湖物质的阻挡程度不同形成的(Liu Siwen et al., 2012)。

积速率的变化范围为 0.05~0.6 cm/a。沙漠岩心沉积速率的空间分布模式可能与钻孔在湖泊中的位置、丘间湖泊沉积物源被高大沙山的阻挡程度、¹³⁷Cs 沉积后扩散、甚至古地震扰动等相关,未来应关注这些因素,开展深入研究。

注 释

- ① Young A A. 2006. Lake-sediment records of recent climate variability in north-west China's dryland, a thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, University College London, UK
- ② UNSCEAR. 2000. ANNEX C: Exposures to the Public from Man-Made Sources of Radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Volume, 167.

References

- Appleby P G, Oldfield F. 1978. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ²¹⁰Pb to the sediment, *Catena*, 5: 1~8.

- Appleby P G. 2001. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: Last W M, Smol J P (Eds), Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Basin Analysis, Coring, and Chronological Techniques, vol. 1. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 171~203.
- Appleby P G. 2008. Three decades of dating recent sediments by fallout radionuclides: a review. *The Holocene*, 18 (1): 83~93.
- Binford M W, Kahl J S, Norton S A. 1993. Interpretation of ^{210}Pb profiles and verification of the CRS dating model in the PIRLA project lake sediment cores. Calculation and uncertainty analysis of ^{210}Pb dates for PIRLA project lake sediment cores. *Journal of Paleolimnology*, 9: 275~296.
- Chen Fahu, Huang Xiaozhong, Zhang Jiawu, Holmes J A, Chen, Jiahui. 2006. Humid little ice age in arid central Asia documented by Bosten Lake, Xinjiang, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 49(12): 1280~290.
- Chen Jiasheng, Zhao Xia, Sheng Xuefen, Wang Jiyang, Gu Weizu, Chen Liang. 2005. Using isotope geochemistry methods to probe the mega dune and lake water recharge in the Badain Jaran Desert. *Acta Geologica Sinica*, 79(4): 576. (In Chinese without English abstract)
- Chu Guoqiang, Gu Zhaoyan, Xu Bing, Liu Qiang, Sun Qing, Han Qingtai, Liu Jiaqi. 2005. Varvechronology and radiometric dating (^{137}Cs , ^{210}Pb) from the Sihailongwan Maar, Northeastern China. *Quaternary Sciences*, 02: 202~207. (In Chinese with English abstract)
- Crusius J, Anderson R. 1995. Evaluating the mobility of ^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{210}Pb from their distributions in laminated lake sediments. *Journal of Paleolimnology*, 13: 119~141.
- Dong Zhibao, Qian Guangqiang, Lv Ping, Hu Guangyin. 2013. Investigation of the sand sea with the tallest dunes on Earth: China's Badain Jaran Sand Sea. *Earth-Science Reviews*, 120: 20~39.
- Flower R J, Stickley C, Rose N L, Peglar S, Fathi A A, Appleby P G. 2006. Environmental changes at the desert margin: an assessment of recent paleolimnological records in Lake Qarun, Middle Egypt. *Journal of Paleolimnology*, 35: 1~24.
- Goldberg E D. 1967. Geochronology with ^{210}Pb in Radioactive Dating. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1963, 121~131.
- Herzschuh U, Kürschner H, Battarbee R, Holmes J. 2006. Desert plant pollen production and a 160-year record of vegetation and climate change on the Alashan Plateau, NW China. *Vegetation History and Archaeobotany*, 15: 181~190.
- Hofmann, J. 1996. The lakes in the SE part of the Badain Jaran Shamo, their limnology and geochemistry. *Geowissenschaften*, 14: 275~278.
- Jenny B, Valero-Garcés B L, Urrutia R, Kelts K, Veit H, Appleby P G, Geyh M. 2002. Moisture changes and fluctuations of the Westerlies in Mediterranean Central Chile during the last 2000 years: the Laguna Aculeo record (33500S). *Quaternary International*, 87: 3~18.
- Jin Aichun, Jiang Qingfen, Chen Ye, Zhang Guangsheng, Zhao Yongjie. 2010. ^{210}Pb and ^{137}Cs dating and modern sedimentation rate in the Wulungu Lake, Xinjiang. *Geoscience*, 02: 377~382. (In Chinese without English abstract)
- Joshi L U, Rangarajan C, Gopalakrishnan S. 1969. Measurement of lead 210 in surface air and precipitation. *Tellus*, 21: 107~112.
- Krishnaswamy S, Lal D, Martin J M, Meybeck M. 1971. Geochronology of lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 11: 407~414.
- Liu Siwen, Narentuya, Xia Bairu, Chu Guoqiang, Tian Mingzhong. 2012. Using $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ and ^{137}Cs to date recent sediment cores from the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China. *Quaternary Geochronology*, 12: 30~39.
- Liu Siwen, Liu Xiaoduan, Zeng Pusheng, Tian Mingzhong. 2013. A 200-year's environmental changes interdune lake sediment records from the Badain Jaran Desert and its environmental significance. *Acta Geologica Sinica*, 87(z1): 260. (In Chinese without English abstract)
- Liu Siwen, Chu Guoqiang, Jiang Yadong. 2014. Radionuclide dating (^{210}Pb , ^{137}Cs) of recent inter-dune saline lake sediment cores in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, Northwest China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 88(s1): 18~19.
- Liu Siwen, Huang Yuanying, Tan Keyan, Tian Mingzhong. 2015. Atmospheric Hg deposition during the past four centuries from the lacustrine sediment in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, Northwest China. *Geoscience*, 29(6): 1351~1359. (In Chinese with English abstract)
- Preiss N, Mélières M A, Pourchet M. 1996. A compilation of data on lead 210 concentration in surface air and fluxes at the air-surface and water-sediment interfaces. *Journal of Geophysical Research* 101 (D22), 28: 847~28,862.
- Rioual P, Lu Yanbin, Yang Handong, Scuderi L, Chu Guoqiang, Holmes J, Zhu Bingqi, Yang Xiaoping. 2013. Diatom - environment relationships and a transfer function for conductivity in lakes of the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China. *Journal of Paleolimnology*, 50: 207~229.
- Robbins J A, Edgington D N. 1975. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 39(3): 285~304
- Sanchez-Cabeza J, Ruiz-Fernández A. 2012. ^{210}Pb sediment radiochronology: An integrated formulation and classification of dating models. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 82: 183~200.
- Wan Guojiang. ^{210}Pb dating for recent sedimentation. 1997. *Quaternary Sciences*, 3: 230~239. (In Chinese with English abstract)
- Wang Fei, Sun Donghuai, Chen Fahu, Bloemendal J, Guo Feng, Li Zaijun, Zhang Yuebao, Li Baofeng, Wang Xin. 2015. Formation and evolution of the Badain Jaran Desert, North China, as revealed by a drill core from the desert centre and by geological survey. *Palaeogeography, Palaeoclimatology,*

- Palaeoecology, 426: 139~158.
- Wünnemann B, Hartmann K, Janssen M, Zhang Hucui. 2007. Responses of Chinese desert lakes to climate instability during the past 45000 years. *Developments in Quaternary Sciences*, 9: 11~24.
- Yang Xiaoping, Liu Tungsheng, Xiao Honglang. 2003. Evolution of megadunes and lakes in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China during the last 31000 years. *Quaternary International*, 104: 99~112.
- Yang Xiaoping, Ma Nina, Dong Jufeng, Zhu Bingqi, Xu Bing, Ma Zhibang, Liu Jiaqi. 2010. Recharge to the inter-dune lakes and Holocene climatic changes in the Badain Jaran Desert, western China. *Quaternary Research*, 73 (1): 10~19.
- Zhang Jin, Li Jinyi, Li Yanfeng, Ma Zongjin. 2007. The Cenozoic Deformation of Alxa block in central Asia-Question on the Northeastern Extension of the Altyn Tagh Fault in Cenozoic Time. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1481~1497. (In Chinese with English abstract).
- Zhong Decai. 2003. Dynamic evolution of modern desert in China. Beijing: China Map Publishing House. (in Chinese).
- Zhou Aifeng, Qiang Mingrui, Zhang Jiawu, Chen Fahu, Zhong Yanxia, Chen Jianhui, Xiao Shun. 2008. Comparison of varve chronology and ^{210}Pb , ^{137}Cs dating from the Sugan Lake sediment. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 206: 15~18. (in Chinese with English abstract).
- ### 参 考 文 献
- 陈建生, 赵霞, 盛雪芬, 汪集畅, 顾慰祖, 陈亮. 2005. 同位素地球化学方法研究巴丹吉林沙漠高大沙山与湖泊水补给源. *地质学报*, 79(4): 576.
- 储国强, 顾兆炎, 许冰, 刘强, 孙青, 汉景泰, 刘嘉麒. 2005. 东北四海龙湾玛珥湖沉积物纹层计年与 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 测年. *第四纪研究*, 02: 202~207.
- 金爱春, 蒋庆丰, 陈晔, 张广胜, 赵永杰. 2010. 新疆乌伦古湖的 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 测年与现代沉积速率. *现代地质*, 02: 377~382.
- 刘斯文, 刘晓端, 曾普胜, 田明中. 2013. 巴丹吉林沙漠湖泊岩心 200 年环境变化记录及其意义. *地质学报*, 87(z1): 260.
- 刘斯文, 黄园英, 张玲金, 谭科艳, 田明中. 2015. 内蒙古巴丹吉林沙漠 400 年来大气沉降 Hg 的湖泊沉积记录. *现代地质*, 29 (6): 1351~1359.
- 万国江. 现代沉积的 ^{210}Pb 计年. 1997. *第四纪研究*, 3: 230~239.
- 钟德才, 2003. 中国现代沙漠动态演变图. 北京, 中国地图出版社.
- 张进, 李锦轶, 李彦峰, 马宗晋. 2007. 阿拉善地块新生代构造作用——兼论阿尔金断裂新生代东向延伸问题. *地质学报*, 81 (11): 1481~1497.
- 周爱锋, 强明瑞, 张家武, 陈发虎, 钟艳霞, 陈建徽, 肖舜. 2008. 苏干湖沉积物纹层计年和 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 测年对比. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 206: 15~18.

Determination of Age and Sedimentation Rates Using Radionuclide ($^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ and ^{137}Cs) Dating in Inter-dune Lakes of the Badain Jaran Desert, China

LIU Siwen¹⁾, CHU Guoqiang²⁾, LAI Zhongping³⁾

1) *National Research Center for Geoanalysis, Beijing, 100037;*

2) *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;*

3) *Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan, 430074*

Abstract

A unique inter-dune lake group containing over 100 permanent lakes developed in the southeast of the Badain Jaran Desert. Inter-dune lake sediments are important climatic and environmental archives in the dryland, but dating these sediments using radionuclides (^{210}Pb , ^{137}Cs) is impeded by the extreme environment in the desert, such as low flux of radionuclides caused by rare precipitation. Two lakes in the southeast of the Badain Jaran Desert, Arerjilin and Dundejilin, were drilled and undisturbed core sediments were obtained for dating with $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$ and ^{137}Cs . Results show that: ① reliable ages of inter-dune lake sediments can be obtained by radionuclides (^{210}Pb , ^{137}Cs) dating; ② dating results of Core Ar-1 and Dd-1 are $102 \pm 8\text{a}$ and $123 \pm 2\text{a}$ respectively based on CRS model, and sedimentation rates of these two cores ranged from 0.13 to 0.33 cm/a, and from 0.18 to 0.70 cm/a respectively. ③ Sedimentation rates of inter-dune lake sediments increased from the center to the margin of the desert spatially, and average sedimentation rates ranged from 0.16 to 0.57 cm/a if estimated from 7 CRS ages of inter-dune lake sediments, and from 0.16 to 0.57 cm/a if estimated from 11 ^{137}Cs ages of inter-dune lake sediments. In the future, much attention should be paid on the possible impacting factors on sedimentation rates of inter-dune lake sediments, such as barrier effect of mega-dunes, ^{137}Cs molecular diffusion and even paleo-earthquakes.

Key words: $^{210}\text{Pb}_{\text{uns}}$; ^{137}Cs ; CRS; inter-dune lake sediment; the Badain Jaran Desert