科 学 通 报
第 42 卷 第 22 期 Chinese Science Bulletin 1997 年 11 月

【特邀论文】

巴里坤湖晚第四纪沉积物铀系年龄研究

马志邦 刘嘉麒
(中国科学院地质研究所,北京,100029)

摘要 应用铀系组分法测定湖泊沉积物的年龄是新的尝试. 样品的各组分用不同浓度的溶剂提取,测试$^{230}Th/^{232}Th$和$^{234}U/^{232}Th$比值. 分析结果表明,所有数据点有良好的线性关系,在溶解样品过程中没有发生铀和钍的同位素分馏效应. 经过论证,三组分与二组分数学关系式等价;根据组分法模式测定的铀系年龄,$B_1$94 孔以 18~66~144 kaBP 为时间格架,反映了孔深 25 m 以上沉积物古气候古环境演变历史. 该结果与同岩芯的古地磁年龄近于一致,结合稳定同位素$\delta^{18}O$和$\delta^{13}C$数据与 SPECMAP 曲线可对比.

关键词 巴里坤湖 沉积物 组分法模式 铀系年龄

湖泊沉积物中记录着丰富的古环境和古气候信息,提取这些珍贵信息,定年和确定时间序列是不可缺少的. 然而,在干旱半干旱地区形成的湖泊,它的特征是其容量和水位都经历过很大的波动,沉积过程与深海沉积物相比多变不稳定. 这种复杂的自然环境往往使样品成为开

才有可能为描述咸水入侵过程中地下水化学环境的演化提供科学手段.

致谢 本工作为国家自然科学基金(批准号:49232040)重点资助项目.

参 考 文 献

1 Custodio E. 咸水入侵,水文地质为人类服务. 见:国际水文地质学家协会第 18 届大会论文集. 北京:地质出版社, 1987. 75~100
2 Breuck W De. Salt water intrusion meetings 1968~1983: A review, International Hydrological Program, Ghent, 1983
3 薛禹群,谢春红,吴吉春,等. 山东龙口-莱州地区的海水入侵. 地质学报,1992,66(3):280~291
4 Bear J. Hydraulics of Ground Water. New York: McGraw-Hill, 1979
5 Xue Yuqun, Wu Jichun. Sea-water intrusion in the coastal area of Laizhou Bay, China: 1. Distribution of sea-water intrusion and its hydrochemical characteristics. Ground Water, 1993, 31(4): 532~537
6 Wu Jichun, Xue Yuqun. Sea-water intrusion in the coastal area of Laizhou Bay, China: 2. Sea-water intrusion monitoring. Ground Water, 1993, 31(5): 740~746
7 Anderson P F, White Jr H O, Mercer J W, et al. Numerical modeling of ground water flow and seawater transport in Northern Pinellas County. Florida, Herndon, V A: GeoTrans, Inc, 1985
8 Xue Yuqun, Xie Chunhong, Wu Jichun, et al. A three-demensional miscible transport model for sea water instrusion in China. Water Resources Research, 1995, 31(4): 903~912
9 吴吉春,薛禹群,谢春红,等. 描述海水入侵含水层中交换阳离子运移行为的数学模型. 科学通报,1996,41(1): 90~93

(1997-06-23 收稿,1997-08-15 收修改稿)

放体系，难以找到适合定年方法(铀系)假定前提的测定对象，或者数量稀少，这就增加了利用放射性同位素年代学方法测定年龄的难度．因此，寻找有代表性样品是湖泊沉积物定年要解决的关键问题．

近些年来，不少学者[1~6]选择沉积物中富含碳酸盐的湖积泥灰岩、石盐结晶体、石灰华、上水石、蜗牛化石等采用稀酸淋滤法测定铀系年龄，取得了有成效的结果．同时，还应用两组分混合线模式开展了泥炭样品年龄的探索性研究[7]，对于碳酸盐含量较高的湖积物测年，无疑也是适应的．

1994 年在巴里坤湖打钻($B_1$94 孔)，取芯长度为 70.19 m．为恢复和重建该湖 150 ka 来的古气候时间标尺，我们对孔深 25 m 以上这段岩芯取控制层位进行铀系年龄测定，获得初步结果．

1　岩性与样品

巴里坤湖位于新疆东部天山北麓的巴里坤盆地内，海拔 1 580m，是一个近于封闭的地堑式内陆湖泊．据前人研究[8]，晚更新世以来该湖沉积了连续完整、纹层清晰、分辨率高的湖积层．$B_1$94 孔位于湖的西北部(43°40′N，92°47′E)，钻孔资料得知，岩性主要以细粉砂、粉砂、淤泥、粘土为主，夹有少量粗砂和砾石．岩芯取出后在室内分割，以每隔 8 cm 间距从 2.38～25.18 m 共取样品 279 块．用于测年的岩芯段见图 1．

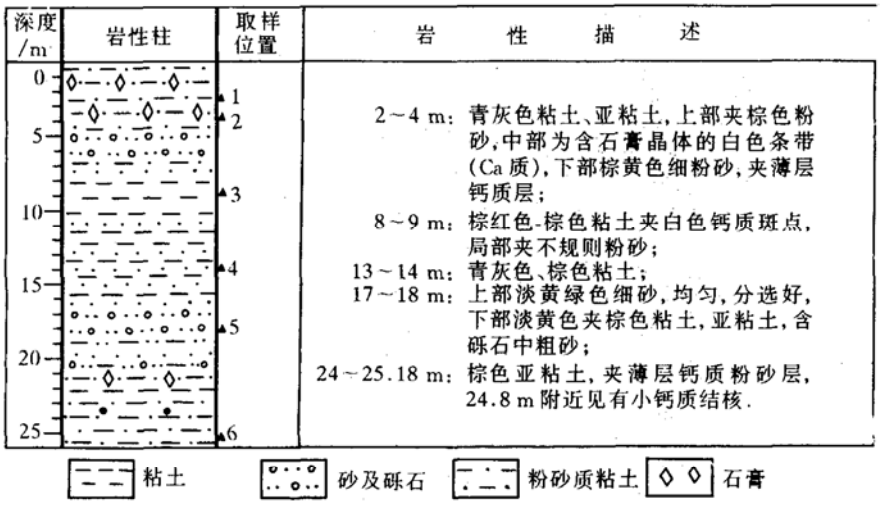

图 1　巴里坤湖 $B_1$94 孔 0～26 m 岩芯柱状图

2　测定年龄的组分法

在巴里坤湖岩芯中，不少层位富含碳酸盐，为铀系测定年龄提供了可能．假设碳酸盐中初始^{230}Th 和^{232}Th 含量忽略不计，所有的^{230}Th 都是由^{238}U 放射系产生的，测定碳酸盐的年龄，就代表了该层位沉积物的年龄．但是，在湖泊沉积物中这些碳酸盐极其不纯，含有不同数量的碎屑物质，它被碳酸盐胶结在一起．显然，分析全岩不能得到有意义的年龄．为了测定年代必须把自生碳酸盐相和其他非碳酸盐相分开，而简单的化学和物理方法很难把它们截然分离．一般采用不同浓度的溶剂提取，与此同时，非碳酸盐相的^{230}Th 也被萃取进入溶解的碳酸盐相

中. 这样就引进了来自非碳酸盐相的^{230}Th,不符合铀系定年的假定前提. 为消除这种影响,我们设立三组分模式进行校正.

假定湖泊沉积物由自生相的碳酸盐C(可溶L_1)、碎屑物质D(碎屑相R)和中间过渡组分即胶结物M(可溶L_2)组成, 用不同浓度的酸溶解样品时,L_1,L_2和R组分中,各核素将组成如下方程:

$$^{232}Th_{L_1} = a_1\,^{232}Th_C + b_1\,^{230}Th_M + c_1\,^{232}Th_D, \tag{1}$$

$$^{230}Th_{L_1} = a_1\,^{230}Th_C + b_1\,^{230}Th_M + c_1\,^{230}Th_D, \tag{2}$$

$$^{234}U_{L_1} = a_1\,^{234}U_C + b_1\,^{234}U_M + c_1\,^{234}U_D, \tag{3}$$

$$^{238}U_{L_1} = a_1\,^{238}U_C + b_1\,^{238}U_M + c_1\,^{238}U_D, \tag{4}$$

$$^{232}Th_{L_2} = a_2\,^{232}Th_C + b_2\,^{232}Th_M + c_2\,^{232}Th_D, \tag{5}$$

$$^{230}Th_{L_2} = a_2\,^{230}Th_C + b_2\,^{230}Th_M + c_2\,^{230}Th_D, \tag{6}$$

$$^{234}U_{L_2} = a_2\,^{234}U_C + b_2\,^{234}U_M + c_2\,^{234}U_D, \tag{7}$$

$$^{238}U_{L_2} = a_2\,^{238}U_C + b_2\,^{238}U_M + c_2\,^{238}U_D, \tag{8}$$

$$^{232}Th_R = a_3\,^{232}Th_C + b_3\,^{232}Th_M + c_3\,^{232}Th_D, \tag{9}$$

$$^{230}Th_R = a_3\,^{230}Th_C + b_3\,^{230}Th_M + c_3\,^{230}Th_D, \tag{10}$$

$$^{234}U_R = a_3\,^{234}U_C + b_3\,^{234}U_M + c_3\,^{234}U_D, \tag{11}$$

$$^{238}U_R = a_3\,^{238}U_C + b_3\,^{238}U_M + c_3\,^{238}U_D. \tag{12}$$

上述方程应满足两个条件:

(1) $a_1+a_2+a_3=1$, L_1: $a_1>>a_2+a_3$; $b_1+b_2+b_3=1$, L_2: $b_2>>b_1+b_3$; $c_1+c_2+c_3=1$, R: $c_3>>c_1+c_2$.

(2) 在碳酸盐相C中,$^{232}Th_C=0$.

将方程联立,代入应满足的条件,运算后可解出碳酸盐相的$^{230}Th/^{234}U$比值为

$$\left(\frac{^{230}Th}{^{234}U}\right)_C = \left[\left(\frac{^{230}Th}{^{232}Th}\right)_{L_1} - \left(\frac{^{230}Th}{^{232}Th}\right)_R\right] \Big/ \left[\left(\frac{^{234}U}{^{232}Th}\right)_{L_1} - \left(\frac{^{234}U}{^{232}Th}\right)_R\right], \tag{13}$$

同理,铀同位素比值为

$$\left(\frac{^{234}U}{^{238}U}\right)_C = \left[\left(\frac{^{234}U}{^{232}Th}\right)_{L_1} - \left(\frac{^{234}U}{^{232}Th}\right)_R\right] \Big/ \left[\left(\frac{^{238}U}{^{232}Th}\right)_{L_1} - \left(\frac{^{238}U}{^{232}Th}\right)_R\right]. \tag{14}$$

不难看出,如果以$^{230}Th/^{232}Th$对$^{234}U/^{232}Th$作图,直线的斜率就是$^{230}Th/^{234}U$,同样$^{234}U/^{232}Th$对$^{238}U/^{232}Th$图中从直线的斜率可以得到$^{234}U/^{238}U$比值. 如果在样品溶解过程中不发生铀和钍的同位素分馏,该比值就代表了去掉碎屑污染的碳酸盐的同位素比值,将它们代入封闭体系碳酸盐年龄计算公式(15),即可求得样品的年龄.

$$\frac{^{230}Th}{^{234}U} = \frac{^{238}U}{^{234}U}(1-e^{-\lambda_{230}t}) + 1.435\,2\left(1-\frac{^{238}U}{^{234}U}\right)\times[1-e^{-(\lambda_{230}-\lambda_{234})t}], \tag{15}$$

式中 λ_{234}，λ_{230}分别为^{234}U和^{230}Th的衰变常数.

要说明的是用三组分处理样品时，每个样品都要做一个全溶样(W)，当 W 的同位素比值发生变化时，每个组分的各同位素比值也相应变化，也就是说各组分的数据点应以 W 点旋转并落在与全溶点组成的直线上. 另外，稀酸溶解样品的主要成分是碳酸盐，它的$^{230}Th/^{232}Th$比值大于全溶点的该比值，应落在全溶点右上方的Ⅰ区间，残渣部分主要是碎屑物质，$^{230}Th/^{232}Th$比值小于全溶点，应落在 W 左下方的Ⅲ区间(图 2). 实验证明这种设想是合理的.

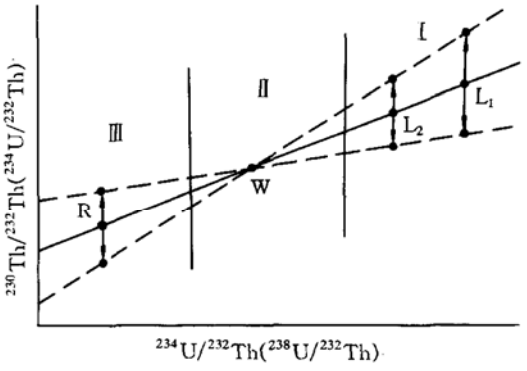

图 2　三组分模式设想示意图

从理论上证明三组分与二组分[7]($L_1 = L_2$)数学关系式等价，实验中部分样品用二组分处理.

3　实验方法

3.1　样品预处理

将样品烘干，清除表面污物后研磨至＜100 目. 如果样品混有少量碎石颗粒尽量挑选干净，弃去.

3.2　溶样

以＜3*N* HCl 作为溶剂，避免在溶解样品时发生 Th 同位素分馏. (ⅰ)准确称取 2～3 g 粉末样品，置马弗炉 500℃烘烧 2 h；(ⅱ)烘烧后的样品置于烧杯中，加 0.1*N*(0.5*N*，1*N*)HCl 不断搅拌，若 pH＞3 时，再加适量同样浓度的酸，直至 pH＜1，溶样时间控制在 20 min 内；(ⅲ)离心分离样品溶液，清液取出后根据样品中 U 和 Th 含量高低及用样量大小加入适量^{232}U-^{228}Th示踪剂，煮沸后加 1～2mL H_2O_2，平衡 2h 以上；(ⅳ)烘干稀酸不溶残渣，称重后重复(ⅱ)～(ⅲ)步骤，直至分出 2～3 个组分. 最后剩余的不溶物加 HCl + HF 全部溶解，$HClO_4$驱赶 SiF4 和 HF，加示踪剂静置.

3.3　U 和 Th 的分离与纯化

在稀酸提取样品的各溶液(相)中，加 16 mg $FeCl_3$做载体，pH = 7～8，U 和 Th 的氢氧化物与 $Fe(OH)_3$共沉淀. 取出 $Fe(OH)_3$沉淀物，以 8*N* HCl 体系倾入 Ag 1×W(100～200 目)阴离子树指交换柱，分离 U 和 Th.

U 的纯化：蒸干洗脱下来的 U 溶液，异丙醚萃取除 Fe，TTA 制源.

Th 的纯化：Th 液中加 16 mg $FeCl_3$溶液，pH = 8～9，沉淀，离心，以 4*N* HCl 体系倾入 Ag 50×W (100～200 目)阳离子树脂交换柱，4.5*N* H_2SO_4洗脱 Th，蒸干，0.1*N* HNO_3取出，TTA 制源备测量.

3.4　α 谱测量

U 和 Th 同位素 α 谱由改装后的国产四路 α 谱仪完成，真空度(2～4)×1.33 Pa，能量分辨率约 50 keV. 数据获取后要进行同位素校正，本底扣除以及短半衰期^{228}Th的衰变等多种因素的校正[9].

4 结果和讨论

采用上述程序测定了6个样品的年龄. 分析数据列在表1. W代表全溶样品, L_1, L_2, L分别代表0.1, 1和0.5N HCl溶解样品, R代表最后剩余的不可溶残渣.

表1 样品各组分的U和Th同位素分析数据

序号	实验室编号	层位及原编号	深度/cm	分析项	同位素比值			
					$^{234}U/^{238}U$	$^{230}Th/^{232}Th$	$^{230}Th/^{234}U$	$^{234}U/^{232}Th$
1	95U-1	sect.3 3	238	W	1.57±0.06	1.74±0.07	0.75±0.04	2.32±0.16
				L	1.64±0.05	2.16±0.10	0.42±0.03	5.39±0.17
				R	1.33±0.02	1.54±0.09	1.08±0.05	1.42±0.06
2	95U-2	sect.7 17	358	W	1.64±0.02	8.62±0.44	0.64±0.03	10.85±0.69
				L	1.66±0.02	11.78±0.52	0.26±0.01	39.02±1.81
				R	1.28±0.06	4.80±0.10	1.41±0.06	1.68±0.07
3	95U-3	sect.13 77	878	W	1.14±0.03	0.96±0.07	0.84±0.05	1.15±0.07
				L	1.19±0.04	0.97±0.05	0.70±0.03	1.38±0.07
				R	1.09±0.04	0.72±0.08	1.05±0.09	0.68±0.06
4	95U-5	sect.18 139	1 386	W	1.08±0.05	0.95±0.03	0.82±0.03	1.17±0.05
				L_1	1.10±0.05	1.20±0.06	0.79±0.03	1.70±0.08
				L_2	1.19±0.04	1.15±0.06	0.78±0.04	1.48±0.07
				R	1.03±0.05	0.80±0.03	1.02±0.05	0.78±0.04
5	95U-6	sect.28 190	1 782	W	1.03±0.04	0.84±0.04	0.82±0.04	1.03±0.04
				L	1.32±0.08	1.10±0.05	0.89±0.04	1.30±0.07
				R	1.10±0.04	0.66±0.04	1.04±0.05	0.64±0.04
6	95U-7	sect.38 278	2 501	W	1.10±0.07	0.81±0.04	0.86±0.06	0.95±0.06
				L_1	1.12±0.04	1.32±0.06	0.82±0.03	1.61±0.07
				R_1	1.01±0.07	0.78±0.04	0.96±0.06	0.75±0.05
				L_2	1.08±0.05	1.10±0.05	0.84±0.04	1.24±0.06
				R_2	1.05±0.08	0.60±0.04	1.24±0.04	0.70±0.06

根据表1数据绘制了$^{230}Th/^{232}Th$对$^{234}U/^{232}Th$和$^{234}U/^{232}Th$对$^{238}U/^{232}Th$图(图3). 用最小二乘法处理得到图3每条直线的斜率, 该斜率就是去掉碎屑污染后的$^{230}Th/^{234}U$(图3(a), (b))和$^{234}U/^{238}U$(图3(c), (d))比值, 分别代入公式(15)获得碳酸盐的年龄. 6个样品碳酸盐相的铀钍同位素比值和年龄值列在表2.

表2 碳酸盐相的6个样品同位素比值和年龄值

实验室编号	同位素比值及相关系数				年龄
	$^{234}U/^{238}U$	r	$^{230}Th/^{234}U$	r	/ka
95U-1	1.76±0.08	0.99	0.15±0.03	0.99	17±4
95U-2	1.67±0.02	0.99	0.16±0.03	0.94	18±4
95U-3	1.28±0.04	0.99	0.38±0.05	0.96	51±8
95U-5	1.20±0.06	0.98	0.46±0.04	0.99	66±8
95U-6	1.25±0.07	0.90	0.65±0.06	0.97	109±18
95U-7	1.18±0.04	0.99	0.74±0.05	0.98	144±20

测定沉积物年龄最基本的前提是: (ⅰ)碳酸盐相为自生相, 代表沉积物形成的年代; (ⅱ)碳酸盐相保持封闭体系, 也就是说该相中不存在初始的^{230}Th. 因此, 在沉积物中只有自生碳酸盐才具有年龄意义. 据矿物学研究, $B_1$94孔粒级大于200目的细粒物质中的碳酸盐矿物多呈针状、尖角状自形或半自形, 具自生矿物特征[1)], 表明碳酸盐是自生的. 用该物质测定

1) 袁宝印等. 湖泊和沙漠绿洲的环境演化课题研究工作总结. 1996

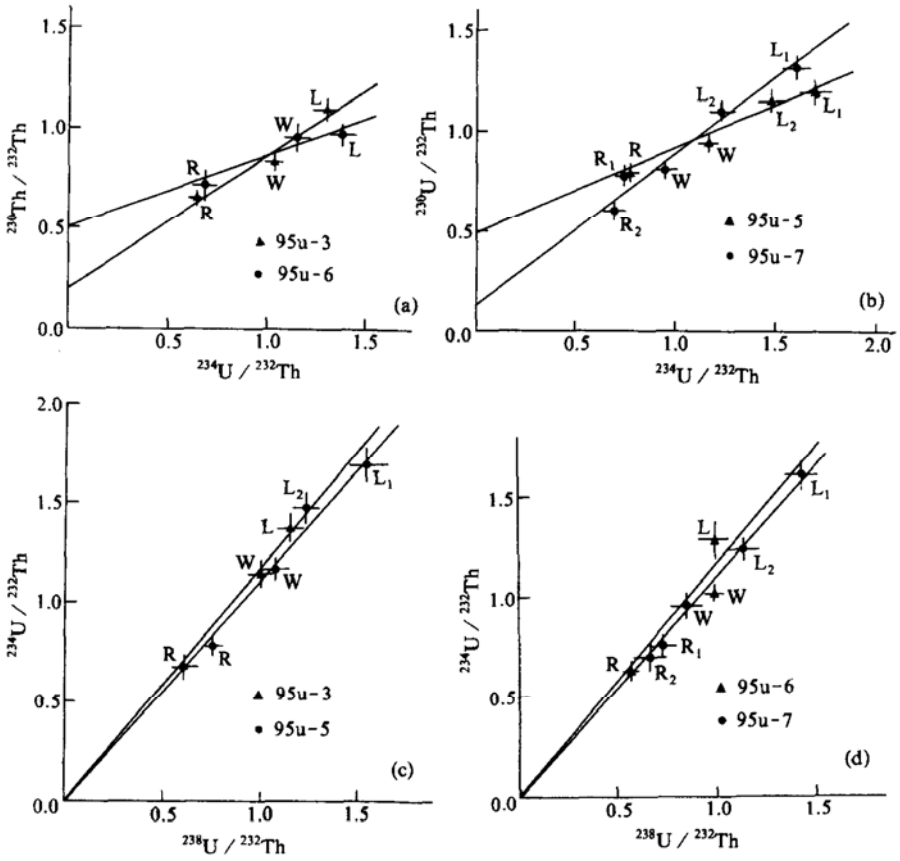

图 3　沉积物样品的$^{230}Th/^{234}U$和$^{234}U/^{238}U$图

年龄，基本能满足定年方法所要求的前提.

在实验中，从数学关系导出的各数据点均落在一条直线上(图 3)，表明在样品溶解过程中没有发生铀和钍的同位素分馏效应，也说明组分法设想是符合实际情况的. 如 95U-5 样品，用 0.1*N* HCl 溶解时，$^{230}Th/^{232}Th$和$^{234}U/^{232}Th$比值分别为 1.20 和 1.70，当提高溶剂浓度用 1*N* HCl 溶解时，带入的^{232}Th量增多，$^{230}Th/^{232}Th$比值下降为 1.15，而$^{234}U/^{232}Th$比值也降低至 1.48. 这种同位素比值增高或降低的落点趋势是沿着直线的斜率上下移动. 同样，对于残渣相，也得到类似的结果.

从全溶的$^{230}Th/^{234}U$比值来分析(表 1 中 95U-1 的 W)，样品中子体元素^{230}Th与母体元素^{234}U之比为 0.75，按^{230}Th的半衰期推算，年龄大于 150 ka. 经组分法处理，可溶相中的$^{230}Th/^{234}U$比值只有 0.42，即碳酸盐相的年龄远小于 150 ka. 不难看出，对这类不纯碳酸盐样品测年，校正碎屑污染是必要的.

表 1 数据还显示了另一个趋势，当把样品做为整体处理时，代表年龄的$^{230}Th/^{234}U$比值均<1(W)，用 0.1*N*(1*N*)HCl 提取样品后，剩余的碎屑相(R)中该比值都>1. 说明铀钍核素主要赋存于碎屑相，或者说碎屑相是由较老物质组成的.

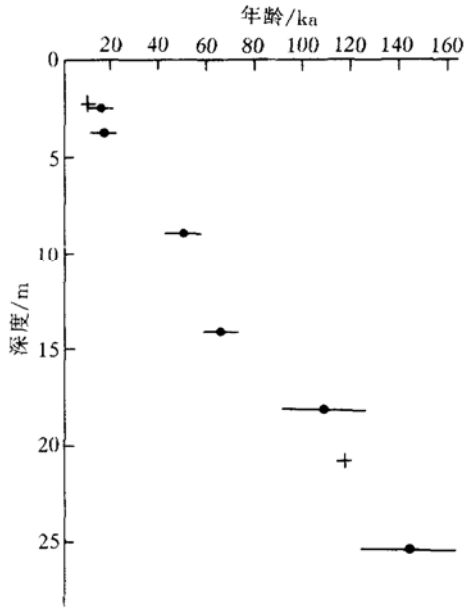

图4 年龄数据随岩芯深度的关系

●——铀系年龄，+——古地磁年龄

然而，更有意思的是，在岩芯 2.24～2.36 m 和 20.30～20.58 m，古地磁年龄[1)]分别为 10.67～11.24 和 112.3～117.9 kaBP(图 4)．测年方法不同，原理和前提都有别，获得误差范围内近于一致的年龄结果，表明铀系组分法是合理的，年龄数据是可信的．

巴里坤湖沉积物铀系年龄数据表明，$B_1$94 孔自地表至 25 m 记录了 144 ka 年以来古气候波动和环境演变历史．结合稳定同位素 $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{13}C$ 结果，年龄数据与黄土地层层序有清晰的对比关系，通过与 SPECMAP 曲线[10]对比，二者也相当吻合．在深度 3.58 m 和 13.86 m处，铀系年龄分别为(18±4)和(66±8) kaBP，相当于深海沉积物氧同位素第 2 和第 4 阶段；(144±20) kaBP 大体上对应于深海沉积物氧同位素第 6 阶段的上部，深度为 25.01 m．根据 66～144 ka 所对应的岩芯厚度，采用线性内插法进行深度－时间转换，获得的年龄值与 SPECMAP 曲线第 5 阶段 5a～5e 均有较好的响应关系，佐证了所测年龄的可信性，也不排除剖面中上部个别年龄偏老的可能性．

从以上论述可知，采用组分法测定湖泊沉积物的铀系年龄是一次大胆尝试．取自不同层位样品分析结果表明，组分法在满足铀系假定前提条件下，也许是测定湖相不纯碳酸盐年龄最有效的方法．

从理论上证明三组分与二组分是等价的，各组分数据点在一条直线上展开并具有良好的线性关系，表明我们设立的假定前提是符合实际情况的，年龄值是可信赖的．

应用组分法获得的年龄基本与地层顺序吻合，与古地磁年龄近于一致．结合稳定同位素 $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{13}C$ 结果与 SPECMAP 曲线对比，二者也有相当好的对应关系．它为测定 300 ka 以来这段地质时代的湖相沉积物年龄提供了有效途径，也为解决较为复杂体系的定年提供了有价值的思路．

湖泊的沉积机理和演变过程是复杂的，受多种因素制约．对不同地域和不同年代的湖泊沉积物测年，要做细致的分析研究．

致谢 工作中得到夏明研究员的指导并对本文提出修改意见，王振海博士提供岩芯柱状图及进行有益的讨论，聂高众副研究员复核年龄数据，作者在此深表谢忱．本工作为国家自然科学重大基金(批准号：4921101)资助项目．

参 考 文 献

1 Ivanovich M, Harmon R A. Uranium-series Disequillibrium: Applications to Earth, Marine, and Environmental Sciences Second edition, Oxford, 1992. 566～569

1) 刘嘉麒等．高分辨率古气候的时间标尺课题研究工作总结．1996

科 学 通 报
第 42 卷 第 22 期 Chinese Science Bulletin 1997 年 11 月

【研究简报】

NA 列的广义 Jamison 型加权和的强稳定性

王岳宝 刘许国 梁 琼
(湛江师范学院数学系，湛江 524048)

关键词 NA 列 加权和 强稳定性

Joag-Dev 和 Proschan[1]提出了 NA(Negative Association)的概念，近年来，Matula[2]，Roussas[3]，Su[4]等人在这方面有过很多工作. 本文将讨论 NA 列广义 Jamison 型加权和的强稳定性.

Jamison 等人[5]证明了如下结果：

定理 A 设$\{e_i\}$是 i.i.d.列，$\{a_i\}$是正数列，满足条件

$$E|e_1| < \infty, \quad Ee_1 = 0, \tag{1}$$

$$A_n \triangleq \sum_{i=1}^{n} a_i \uparrow \infty, \quad n \to \infty, \tag{2}$$

$$N(n) \triangleq \#\{i: A_i a_i^{-1} \leqslant n\} = O(n), \quad n \geqslant 1, \tag{3}$$

则

$$T_n \triangleq A_n^{-1} \sum_{i=1}^{n} a_i e_i \xrightarrow{\text{a.s.}} 0, \quad n \to \infty. \tag{4}$$

反之，若式(3)不满足，则存在 i.i.d.列$\{e_i\}$满足式(1)和(2)，但式(4)不成立.

Chen 等人[6]对于(ⅰ) A_n 未必等于 $\sum_{i=1}^{n} a_i$, $n \geqslant 1$; (ⅱ) $\{a_i\}$ 未必同号; (ⅲ) $N(n) =$

2 Luo S D, Ku T L. U-series isochron dating: a generalized method employing total-sample dissolution. Geochim Cosmochim Acta, 1991, 55(2): 555 ~ 564
3 Phillips F M, Ku T L, Huang Qi, et al. $^{230}Th/^{234}U$ and ^{36}Cl dating of evaporite deposits from the Western Qaidam Basin, China: implications for glacial-period dust export from Central Asia. Geological Society of America Bulletin, 1993, 105: 1 606 ~ 1 616
4 Szabo B J, Bush C A. Uranium-series dating of carbonate (tufa) deposits associated with Quaternary fluctuations of Pyramid Lake, Nevada. Quaternary Research, 1996, 45(3): 271 ~ 281
5 Marcel C H, Ghaleb B, Gariepy C, et al. U-series dating by the TIMS technique of Land Snails from Paleosols in the Canary lslands. Quaternary Research, 1995, 44(2): 276 ~ 282
6 Ludwing K R, Titterington D M. Calculation of $^{230}Th/^{234}U$ isochrons, ages and errors. Geochim Cosmochim Acta, 1994, 58: 5 031 ~ 5 042
7 夏 明，张承蕙，马志邦. 铀系方法测定泥炭年龄的研究. 中国第四纪研究，1989, 8(1): 17 ~ 25
8 韩淑媞，袁玉江. 新疆巴里坤湖 35 000 年来古气候变化序列. 地理学报，1990, (3): 350 ~ 362
9 夏 明. 铀系国际标准样鉴定结果讨论. 地质科学，1984, (1): 13 ~ 25
10 Imbrie J, Hays J, Martinson D, et al. The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the Marine Delta ^{18}O record. In: Milankovitch and Climate, part 1. Reidel Publishing Company, 1984. 269 ~ 305

(1997-03-26 收稿，1997-07-14 收修改稿)