

# 青藏高原北部中新统五道梁群湖相沉积碳氧同位素变化及古气候旋回

吴珍汉 吴中海 胡道功 彭 华 张耀玲

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

**摘要:**通过对中新统五道梁群湖相沉积进行全岩心钻探和碳氧同位素测试,获得青藏高原北部中新世早期古环境变化和古气候旋回的重要地质记录。五道梁群约 150 m 湖相沉积以灰岩、白云质灰岩与泥灰岩为主,仅在深度 50.0~51.0 m 出现湖相沉积间断,上下均为连续湖相沉积。深度 140~145 m 湖相沉积碳氧同位素剧烈变化,碳同位素( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ )出现 2 次最低峰值,氧同位素( $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ )出现 2 次最高峰值;深度 140.7 m 湖相沉积碳同位素( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ )和氧同位素( $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ )同时出现极低值,对应于渐新世/中新世界线深海沉积记录的 Mi-1 全球古气候事件。深度 140.7~142 m 湖相沉积碳氧同位素记录了 Mi-1 期后 7 次 1.2 Ma 天文周期的古气候旋回,深度 62.6~69.86 m 湖相沉积碳氧同位素记录了 9 次周期约 17.4 ka 的古气候旋回。根据湖相沉积碳氧同位素记录的古气候旋回,推断青藏高原北部五道梁盆地中新世早期古大湖发育时期为(24.1±0.6) Ma~(14.5±0.5) Ma,年均气温变化范围为 19~21°C,平均约 20.0°C。

**关键词:**五道梁群;湖相沉积;碳氧同位素;古气候旋回;中新世早期;青藏高原

**中图分类号:**P532,P597 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2009)05-0966-10

湖泊和海洋沉积的碳氧稳定同位素是古气候环境的重要地质记录。前人对通过深海钻探岩心的碳氧稳定同位素分析,高分辨率揭示了新生代不同时期及第四纪全球古气候的变化过程<sup>[1-3]</sup>,对青藏高原第四纪湖泊沉积与全新世冰心也进行过钻探、碳氧稳定同位素测试和古气候环境分析<sup>[4-5]</sup>,但对青藏高原形成演化具有重要意义的中新世早期五道梁群湖相沉积<sup>[6,7]</sup>,迄今仍然缺乏古环境钻探及碳氧稳定同位素分析。为此,笔者选择青藏高原北部五道梁盆地古大湖沉积中心,对中新统五道梁群湖相沉积地层进行了全岩心钻探,钻孔编号为 ZK1,钻探位置为五道梁北山(北纬 35°14'18.4",东经 93°05'22.8",海拔 4666 m)(图 1);开钻时间为 2006 年 7 月 7 日,终孔时间为 2006 年 8 月 15 日;钻孔穿透了五道梁群湖相沉积地层,终孔深度为 154.0 m,钻孔岩心取心率达 75%左右。通过对五道梁群湖相沉积钻探岩心

进行系统取样及碳氧稳定同位素分析,能够良好地揭示青藏高原北部中新世古大湖<sup>[8]</sup>的形成环境及古气候旋回,同时为五道梁群湖相沉积及中新世古大湖发育时代提供重要的年代学约束。

## 1 钻孔岩性变化与古沉积环境

根据钻探岩心编录资料,地表向下 0.0~1.0 m 深度为第四纪残坡积物;深度 1.0~151.3 m 为五道梁群湖相沉积,岩性以灰岩、白云质灰岩与泥灰岩为主,夹厚度不同的泥岩;其间在深度 50.0~51.0 m 出现湖相沉积间断,形成棕红色残坡积物,夹薄层钙华碎片,湖相沉积间断上、下均为连续湖相沉积(图 2)。在沉积间断面以上,深度 1.0~6.9 m 为白云质岩夹泥灰岩,7.0~10.1 m 为泥灰岩,10.2~12.5 m 为灰岩夹白云质灰岩,12.6~13.9 m 为白云质灰岩,14.0~19.5 m 为灰岩夹白云质灰岩,19.6~27.0 m 为

收稿日期:2009-03-25;改回日期:2009-06-23

基金项目:科技部国际科技合作项目(2006DFB211330,2001CB711001)及中国地质调查局地质大调查项目(1212010711510)资助。

作者简介:吴珍汉,男,1965年生,博士,研究员,长期从事青藏高原区域地质调查与大陆动力学研究工作;

E-mail:wuzhenhan@yahoo.com.cn.

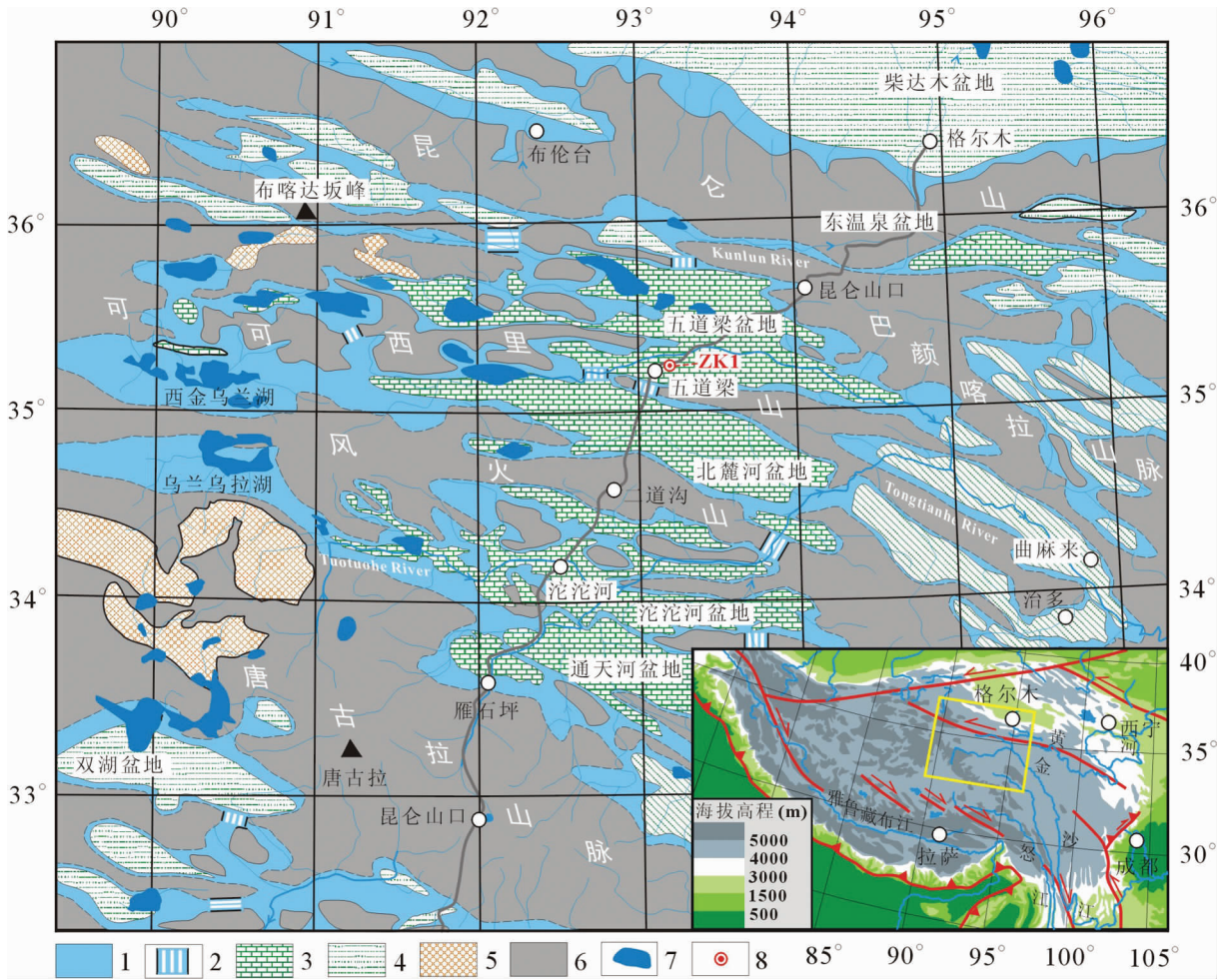


图 1 青藏高原腹地中新世早期古大湖分布图

(据 Wu et al.<sup>[8]</sup>改编)

1—中新世早期古大湖区; 2—中新世早期古湖水连接通道; 3—中新世早期碳酸盐岩(白云岩、白云质灰岩、灰岩、泥灰岩); 4—中新世早期碎屑岩(砂岩、泥岩、砾岩夹泥灰岩); 5—中新世玄武岩; 6—中新世早期剥蚀区; 7—现代湖泊; 8—钻孔; ZK1 表示五道梁群钻孔编号, 虚线表示中新世早期古大湖边界

Fig.1 Sketch map showing the distribution of Early Miocene lakes in central Tibetan Plateau

1—Early Miocene lakes; 2—Connecting channel of Early Miocene lakes; 3—Early Miocene carbonate rocks (dolomite, dolomitic limestone, limestone and marl); 4—Early Miocene clastic rocks (sandstone, marl, conglomerate intercalated with marl); 5—Miocene basalt; 6—Early Miocene denudation area; 7—Modern lake; 8—Drill hole; ZK1 signifies serial number of drill hole in Wudaoliang Group, whereas dash line indicates boundary of Early Miocene lake

白云质灰岩夹灰岩, 27.1~28.4 m 为灰岩和白云质灰岩互层, 28.5~32.8 m 为白云质灰岩夹灰岩, 32.9~34.4 m 为灰岩, 34.5~36.4 m 为白云质灰岩, 36.5~48.0 m 为灰色灰岩与灰棕色灰岩互层夹白云质灰岩与泥灰岩。1.5~4.0 m、39.7~42.0 m、48.0~50.0 m 缺乏岩心记录(图 2)。

在湖相沉积间断面以下, 深度 51.1~63.5m 为灰棕色灰岩、灰白色灰岩和白云质灰岩互层夹泥岩,

63.6~67.2 m 为灰棕色泥岩夹灰岩, 67.2~67.3 m 为钙质砂岩, 67.4~70.7 m 为灰棕色灰岩, 70.8~73.1 m 为泥灰岩和泥岩互层, 73.2~79.1 m 为泥灰岩、泥岩夹白云质灰岩、泥质灰岩, 79.2~82.1 m 为灰岩夹泥灰岩, 82.2~98.0 m 为白云质灰岩夹灰岩, 98.1~115.2 m 为灰岩、白云质灰岩互层夹泥灰岩, 115.3~125.1 m 为白云质灰岩夹灰岩, 125.2~138.5 m 为灰岩夹白云质灰岩和泥灰岩。139.9~142.6m 为灰白色、

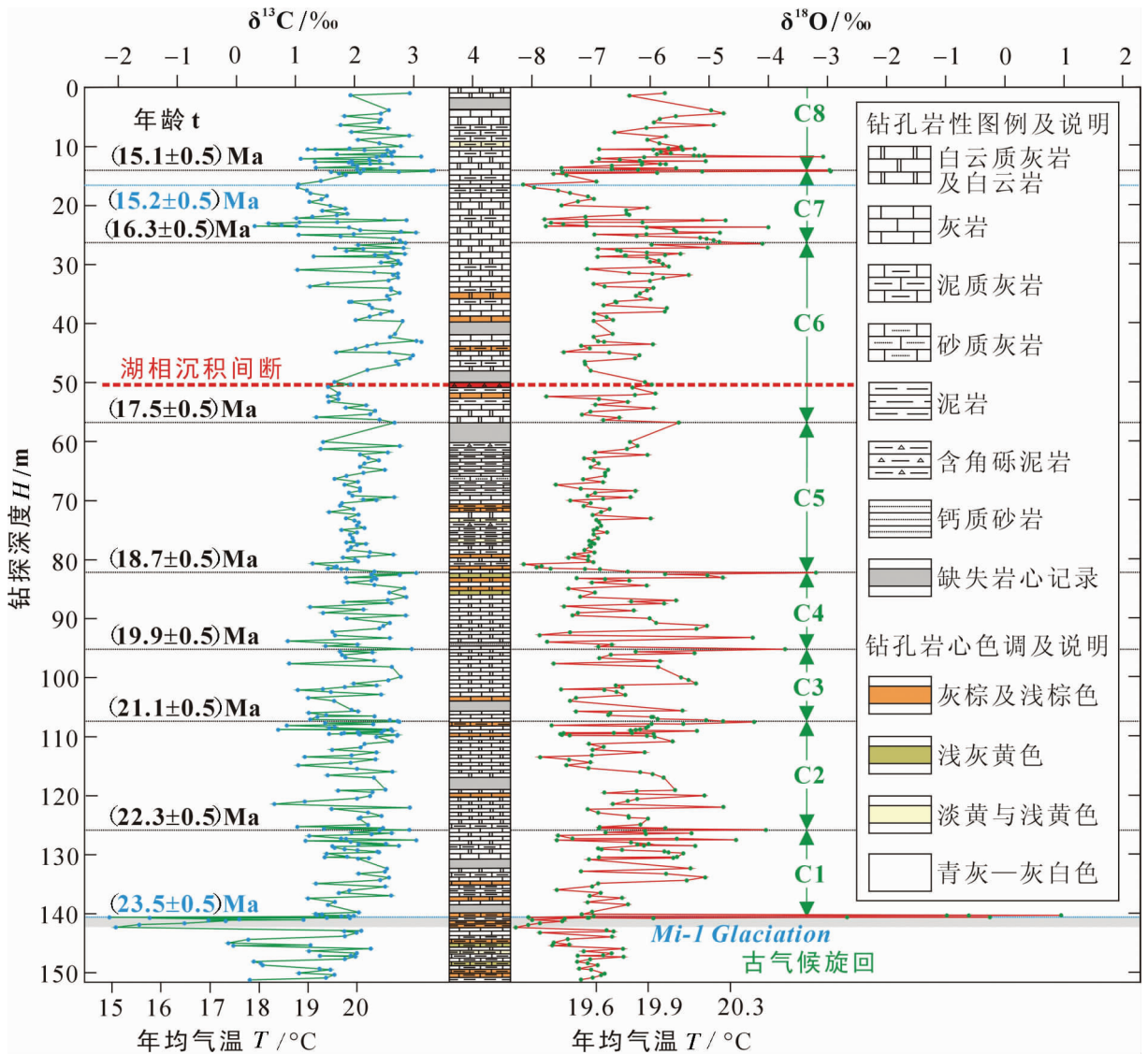


图2 五道梁群湖相沉积柱状剖面与沉积时代 (C1-C8表示中新世早期8个古气候旋回及编号)

Fig.2 Stratigraphic column of lacustrine sediments along drill hole ZK1 in Wudaoliang Group, showing sedimentary epoch (C1-C8 indicate eight early Miocene paleoclimatic cycles and their serial number)

浅黄色、棕色、浅棕色泥岩和泥灰岩互层, 142.7~147.8 m 为灰岩夹泥灰岩, 147.9~151.3 m 为浅棕色、灰白色、灰黄色泥灰岩(图2)。深度 151.4~154.0 m 为暗紫色、紫红色砾岩和含砾砂岩, 属古新统一始新统风火山群红层顶部地层。深度 57.0~60.2 m、104.5~105.6 m、117.0~119.0 m、130.9~132.5 m、138.5~139.8 m 缺失岩心。

ZK1 钻探资料显示, 青藏高原北部五道梁盆地中新世早期古大湖沉积厚度约为 150 m (含缺失岩心记录部分和残坡积夹层), 深度 50.0~51.0 m 残坡积物指示湖水干枯环境与湖相沉积间断, 湖相沉积

间断前后大部分时期为深湖环境, 沉积灰岩和白云质灰岩; 部分时间为浅湖环境, 沉积泥岩和泥灰岩, 缺乏滨湖砂砾岩沉积, 指示钻孔部位为青藏高原北部中新世早期古大湖(五道梁古湖盆)沉积中心。

## 2 湖相沉积碳氧同位素测试流程

五道梁群湖相沉积富含碳酸盐矿物或为碳酸盐岩, 测定湖相沉积碳、氧同位素实质是测定碳酸盐碳、氧稳定同位素组成。由于碳酸盐碳、氧稳定同位素组成与温度存在函数关系, 因此通过对五道梁群湖相沉积 ZK1 钻孔岩心进行比较密集采样和对样

品碳、氧稳定同位素进行系统测试分析,能够获得分辨率比较高的古气候记录,为分析青藏高原中新世早期古环境变化过程提供重要资料。从 ZK1 钻孔岩心共采集 460 件湖相沉积样品,大部分岩心段取样间距为 10~30 cm,部分岩心(中厚层白云岩和白云质灰岩)取样间距为 50 cm(表 1),局部岩心取样密度为 2~10 cm(表 2)。五道梁群 ZK1 钻孔岩心稳定碳、氧同位素测试全部送中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室,样品同位素测试由张福松研究员协助完成。

样品碳、氧稳定同位素测试采用磷酸法。实验室测试流程:(1)将样品粉碎,研磨至 150 目,90°C/10 小时烘干;(2)样品在 300~350°C 的真空中,加热抽空 2 小时,除去有机质;(3)将纯磷酸在真空中添加

五氧化二磷,直至其比重为 1.85,正磷酸配制完成;(4)将 10~50 mg 样品和 5 mL 正磷酸同时装在真空反应器两端,90°C 抽至高真空;(5)取下反应器并倾斜放置,使样品与正磷酸充分混合;(6)放入水浴摇床(25°C 恒温 12 小时保持化学反应);(7)反应完毕,将反应管接至真空纯化系统,获取高真空,脱水 and 除氮、硫及其他杂质,制备成纯净的二氧化碳;(8)将纯净的二氧化碳转移至稳定同位素质谱仪上,测定其同位素比值。测试采用标准为国家一级标准 GDW4405,使用仪器质谱型号为 MAT-253。

青藏高原北部钻孔 ZK1 五道梁群湖相沉积样品(深度 1.01~150.3 m)取样深度、岩石组成及稳定碳氧同位素测试数据详见相关研究报告<sup>[9]</sup>,表 2 为深度 140.0~145.0 m 五道梁群下部样品的稳定碳氧同位素

表 1 五道梁北中新统湖相沉积地层 ZK1 钻孔 62.6~69.86 m 岩心碳氧同位素组成  
Table 1 Carbon and oxygen isotopes of Miocene lacustrine strata at the depth of 62.6~69.86 m in drill core ZK1

样号	深度/m	岩性描述	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\sigma/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\sigma/\text{‰}$
D0001	62.60	灰色泥岩	1.980	0.008	-7.018	0.009
D0002	62.82	浅棕色灰岩	2.225	0.005	-7.124	0.008
D0003	63.04	灰色泥灰岩	2.099	0.005	-6.908	0.006
D0004	63.26	灰棕色灰岩	2.424	0.002	-6.944	0.006
D0005	63.48	白云质灰岩	1.830	0.004	-7.204	0.007
D0006	63.70	浅棕色泥岩	2.184	0.003	-6.874	0.006
D0007	63.92	浅棕色泥岩	2.116	0.007	-6.967	0.008
D0008	64.14	灰棕色泥岩	2.101	0.004	-7.020	0.005
D0009	64.36	浅棕色灰岩	2.262	0.007	-7.371	0.009
D0010	64.58	含角砾泥灰岩	2.508	0.004	-6.695	0.006
D0011	64.80	浅棕色泥岩	2.156	0.004	-6.756	0.006
D0012	65.02	灰棕色泥岩	2.157	0.001	-6.749	0.004
D0013	65.24	灰棕色泥灰岩	2.029	0.005	-7.074	0.007
D0014	65.46	浅棕色泥岩	2.140	0.004	-6.739	0.007
D00151	65.68	灰棕色含砾泥岩	1.552	0.005	-7.458	0.009
D0016	65.90	棕褐色泥岩	1.671	0.002	-7.134	0.006
D0017	66.12	浅棕色砂质泥灰岩	2.034	0.001	-6.930	0.005
D0018	66.34	浅棕色砂质灰岩	2.039	0.001	-7.208	0.004
D0019	66.56	浅灰棕色泥岩	1.987	0.002	-7.162	0.005
D0020	66.78	灰棕色含砾泥岩	1.812	0.002	-7.598	0.005
D0021	67.00	青灰色灰岩	2.139	0.008	-7.525	0.00
D0022	67.22	钙质细砂岩	2.101	0.004	-7.194	0.008
D0023	67.44	灰棕色灰岩	2.288	0.007	-6.459	0.009
D0024	67.66	灰棕色灰岩	2.095	0.008	-6.251	0.009
D0025	67.88	灰白色灰岩	1.989	0.005	-7.120	0.008
D0026	68.10	浅棕色泥岩	1.900	0.008	-7.086	0.009
D0027	68.32	浅棕色泥灰岩	1.963	0.004	-6.922	0.007
D0028	68.54	浅棕色泥灰岩	1.938	0.008	-7.042	0.008
D0029	68.76	浅棕色泥灰岩	1.810	0.008	-7.213	0.009
D0030	68.98	灰棕色灰岩	2.668	0.009	-6.325	0.010
D0031	69.20	灰棕色灰岩	2.315	0.008	-6.553	0.009
D0032	69.42	灰棕色灰岩	2.164	0.009	-6.790	0.011
D0033	69.64	棕色灰岩	2.752	0.008	-7.530	0.009
D0034	69.86	白云质灰岩	2.522	0.006	-6.723	0.008

注:由中国科学院地质与地球物理研究所碳氧同位素实验室 2008 年 8 月 20 日测试。

表 2 五道梁北中新统湖相沉积地层 ZK1 钻孔 140~145 m 深度  
岩心碳氧同位素组成

Table 2 Carbon and oxygen isotopes of Miocene lacustrine strata in  
drill core ZK1 at the depth of 140~145 m

样号	深度/m	岩性描述	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\sigma/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\sigma/\text{‰}$
D1399	140.0	灰白色泥灰岩	2.091	0.006	-6.986	0.008
D1401	140.1	灰白色泥灰岩	1.454	0.002	-7.161	0.006
D1402	140.2	泥灰岩	1.775	0.005	+0.956	0.007
D1403	140.3	棕色泥岩	1.382	0.004	-0.985	0.008
D1404	140.4	泥灰岩	1.901	0.005	-0.596	0.008
D1405	140.5	泥灰岩	1.997	0.005	-6.946	0.007
D14070	140.7	棕色泥岩	-2.159	0.001	-8.062	0.005
D14072	140.72	棕色泥灰岩	-1.741	0.002	-7.565	0.006
D14074	140.74	浅棕色泥灰岩	-1.480	0.005	-5.935	0.007
D14075	140.75	浅棕色泥岩	0.496	0.007	-6.962	0.009
D14076	140.76	浅棕色泥灰岩	0.963	0.003	-7.436	0.006
D14077	140.77	泥灰岩	0.335	0.001	-7.219	0.004
D14078	140.78	灰棕互层泥灰岩	0.065	0.002	-7.033	0.003
D14080	140.80	灰白互层泥灰岩	1.156	0.008	-2.665	0.009
D14085	140.85	棕灰互层泥灰岩	1.525	0.006	-0.259	0.008
D14090	140.90	泥灰岩	1.528	0.002	-7.015	0.008
D14091	140.91	薄层状泥灰岩	1.706	0.003	-7.171	0.007
D14092	140.92	灰色泥灰岩	1.556	0.008	-7.238	0.009
D14093	140.93	棕色泥岩	1.898	0.003	-7.164	0.005
D14094	140.94	灰白色泥灰岩	1.761	0.002	-7.047	0.005
D14095	140.95	浅棕色泥灰岩	1.952	0.007	-7.061	0.008
D1410	141.0	浅黄色泥灰岩	1.913	0.003	-7.037	0.009
D1412	141.2	浅黄色泥灰岩	-0.460	0.002	-7.986	0.009
D1414	141.4	棕色泥灰岩	0.191	0.005	-7.482	0.007
D1418	141.8	棕色泥岩	-0.872	0.008	-7.864	0.008
D1421	142.1	棕色泥岩	-1.634	0.007	-8.079	0.007
D1425	142.5	棕色泥岩	-2.055	0.005	-8.289	0.006
D1430	143.0	棕色泥岩	2.115	0.006	-6.743	0.009
D1432	143.2	青灰色灰岩	1.837	0.001	-6.624	0.003
D1435	143.5	青灰色灰岩	2.017	0.008	-7.872	0.008
D1440	144.0	灰岩	1.832	0.006	-6.630	0.007
D1445	144.5	青灰色灰岩	0.211	0.005	-7.398	0.006
D1450	145.0	棕色泥岩	-0.133	0.006	-7.602	0.006

注:由中国科学院地质与地球物理研究所碳氧同位素实验室 2008 年 8 月 20 日测试。

测试数据,样品每完成 20 件左右,便随机抽取其中 1 件样品进行复测;由于复测样品和正常测试样品的测试分析数据相差小于 5%,因此仅采纳正常测试数据,复测样品碳氧同位素数据未列入相关表格。

### 3 五道梁群碳氧同位素变化及古气候旋回

钻孔 ZK1 不同深度五道梁群湖相沉积的稳定碳同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ ) 和稳定氧同位素 ( $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 随深度增加呈现出比较明显的周期性变化(图 2)。深度 1~26 m 五道梁群顶部湖相沉积碳氧同位素

( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ 和  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 波动幅度较大,对应于比较剧烈的古气候变化;碳同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ ) 变化范围为 0.308~3.456,氧同位素 ( $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 变化范围为 -7.493~-2.969。深度 26~80 m 五道梁群上部湖相沉积碳氧同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ 和  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 的波动幅度相对较小,对应于相对比较平稳的古气候变化;碳同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ ) 变化范围为 1.250~3.152,氧同位素 ( $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 变化范围为 -7.729~-4.098。深度 80~140 m 五道梁群下部湖相沉积碳氧同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ 和  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 的波动幅度都比较大,氧同位素

( $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 出现 4 次高峰值 (82.3 m, -3.318; 95.3 m, -3.699; 107.5 m, -4.235; 127.4 m, -4.546), 对应于 4 期比较剧烈的长周期古气候变化。深度 140~145 m 湖相沉积碳同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ ) 出现最小值 (-2.055~-2.159), 氧同位素 ( $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 达最大值 (+0.956)。五道梁群湖相沉积岩心的碳氧同位素组成 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$  和  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 与岩石类型不存在明显的对应关系, 不同深度相同岩石类型经常具有不同碳氧同位素组成, 不同深度不同岩石类型经常呈现相似的碳氧同位素组成 (图 2 和表 1~2), 湖相沉积碳氧同位素变化与古气候环境、古气温演化存在密切关系<sup>[4,7]</sup>。

根据五道梁群湖相沉积稳定碳同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ ) 和稳定氧同位素 ( $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 的周期性变化, 能够鉴别出青藏高原北部中新世早期 8 个古气候旋回 (图 2)。如果以氧同位素 ( $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 和碳同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ ) 高峰值 (大暖期) 作为古气候旋回边界, 那么旋回 C1 底边界深度为 140.2 m,  $\delta^{13}\text{C} = 1.775\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = 0.956\text{‰}$  (表 2); 旋回 C1 顶界/C2 底界深度为 127.4 m,  $\delta^{13}\text{C} = 3.030\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -4.546\text{‰}$ ; 旋回 C2 顶界/C3 底界深度为 107.5 m,  $\delta^{13}\text{C} = 2.765\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -4.235\text{‰}$ ; 旋回 C3 顶界/C4 底界深度为 95.3 m,  $\delta^{13}\text{C} = 2.982\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -3.699\text{‰}$ ; 旋回 C4 顶界/C5 底界深度为 82.3 m,  $\delta^{13}\text{C} = 3.052\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -3.318\text{‰}$ ; 旋回 C5 顶界/C6 底界深度为 57.0 m,  $\delta^{13}\text{C} = 2.682\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -5.524\text{‰}$ ; 旋回 C6 顶界/C7 底界深度为 26.5 m,  $\delta^{13}\text{C} = 2.854\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -4.098\text{‰}$ ; 旋回 C7 顶界/C8 底界深度为 14.2 m,  $\delta^{13}\text{C} = 3.360\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -2.987\text{‰}$ 。旋回 C8 湖相沉积氧同位素 ( $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 没有出现顶部高峰值, 说明钻孔部位五道梁群顶部湖相沉积没有记录到 C8 旋回顶部边界。

在每个长周期古气候旋回内部, 还发育数量不等的短周期古气候旋回。为了揭示五道梁群湖相沉积记录的短周期古气候变化, 需要对 ZK1 钻孔岩心加密取样。兹选择深度 62.6~69.86 m、厚度 7.26 m 的湖相沉积岩心, 进行加密取样, 实际取样间距为 2~4 cm; 共采集 34 个样品, 并进行了稳定碳同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ ) 和稳定氧同位素 ( $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 分析, 获得 C5 旋回中晚期较高分辨率的碳氧同位素变化曲线, 良好地记录了 C5 中晚期 9 次短周期古气候旋回 (表 1、图 3)。

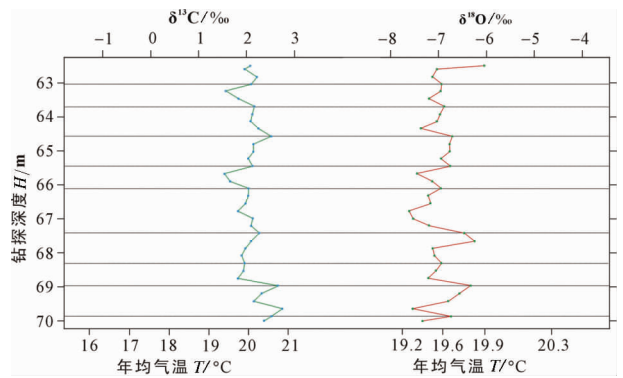


图 3 钻孔 ZK1 深度 62.6~69.86 m 湖相沉积岩心碳氧同位素变化曲线图

Fig.3 C/O isotope change of lacustrine strata at the depth of 62.6~69.86 m in drill core ZK1

依据青藏高原建立的湖相沉积碳氧同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$  和  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) (相对国际标准 PDB 值) 与年均气温 ( $T/^\circ\text{C}$ ) 统计相关关系<sup>[7]</sup>, 可以根据五道梁群湖相沉积各样品  $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$  和  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$  (PDB 值) 估算古年均气温 ( $T/^\circ\text{C}$ ), 进而分析青藏高原北部中新世早期古大湖发育的古气温条件。根据湖相沉积碳氧同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$  和  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 估算年均气温 ( $T$ ) 的公式<sup>[7]</sup>:

$$T = [1.11 (\delta^{13}\text{C} + 17.76)^2 - 73.39]^{1/2} + 0.91 \quad (1)$$

$$T = [-0.65 (\delta^{18}\text{O} - 6.38)^2 + 464.37]^{1/2} + 0.91 \quad (2)$$

应用公式 (1) 与 (2), 估算中新世早期古年平均气温 ( $T$ ), 标注于图 2 下方作为横坐标。结果显示, 中新统五道梁湖相沉积不同时期, 年均气温呈现周期性变化, 年均气温 ( $T$ ) 变化总体范围为 19~21 $^\circ\text{C}$ , 平均约 20.0 $^\circ\text{C}$ , 接近于藏南林芝 (海拔约 3000 m) 与江孜 (海拔约 4000 m) 及藏东昌都 (海拔约 3240 m) 现今 6 月份的月平均气温 (19.3~19.8 $^\circ\text{C}$ ), 指示五道梁群湖相沉积期间温暖湿润环境, 说明青藏高原北部中新世早期古大湖发育具有良好的古气候条件<sup>[8]</sup>。

#### 4 气候地层学对比分析及年代学意义

将 ZK1 钻孔五道梁群湖相沉积碳氧同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$  和  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) (相对国际标准 PDB 值) 曲线 (图 2) 与深海钻探远洋沉积碳氧同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$  和  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 曲线<sup>[2,3]</sup>, 进行气候地层学对比, 为分析五道梁群沉积时代提供重要证据。

五道梁群湖相沉积底部 140~145 m 深度, 为薄

层状泥灰岩和泥岩夹灰岩，湖相沉积颜色垂向变化频繁，包括青灰色、灰白色、浅棕色、棕色，发育多个灰白色与棕色泥灰岩韵律层(表 2)，对应于古气候环境的周期性剧烈波动；湖相沉积碳同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ ) 出现 2 次最低峰值，氧同位素 ( $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 出现 2 次最高峰值(图 4)，具有渐新世末期—中新世初期深海远洋沉积碳氧同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$  和  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 的变化特征<sup>[3]</sup>。钻孔 ZK1 深度 140.7 m,  $\delta^{13}\text{C} = -2.159\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -8.062\text{‰}$ ；钻孔 ZK1 深度 142.5 m,  $\delta^{13}\text{C} = -2.055\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -8.289\text{‰}$ ，湖相沉积碳同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ ) 和氧同位素 ( $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 均达到或接近最低值(表 2、图 4)，对应于远洋沉积碳氧同位素记录的渐新世/中新世界线及 Mi-1 冰期<sup>[2,3]</sup>。因此，拟将 ZK1 钻孔 140.7 m 棕色泥岩定为渐新世/中新世界线，时代为  $(23.5 \pm 0.5)\text{Ma}$ ；由于 C1 旋回底边界 ( $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$  最大值) (深度 140.2 m 或深度 140.85 m) 离 Mi-1 冰期顶部边界 (深度 140.7 m) 仅 0.15~0.5 m，远小于渐新世/中新世界线年龄误差 ( $\pm 0.5\text{ Ma}$ ) 对应的湖相沉积厚度，所以在误差范围内可以将 C1 旋回底边界年龄定为  $(23.5 \pm 0.5)\text{Ma}$ 。

五道梁群湖相沉积上部(深度 26.5~14.2 m)，碳氧同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$  和  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 在经历 C5 和 C6 旋回相对稳定的古气候环境之后，进入古气候剧烈波动阶段(C7 旋回)，由上下 2 个高峰值和中部宽缓低值区组成(图 2)，对应于深海远洋沉积碳氧同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$  和  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 记录的中新世中期哥伦比亚河谷火山喷发引起的全球气候剧烈波动<sup>[2]</sup>；钻孔

ZK1 深度 16.7~17.0 m 为 C7 旋回碳氧同位素极低值区，湖相沉积  $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$  和  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$  分别为 1.032~1.051 和 -7.963~-8.163(图 2)，对应部位的深海远洋沉积时代为约  $(15.2 \pm 0.5)\text{Ma}$ <sup>[2]</sup>，因此拟将五道梁钻孔 ZK1 深度约 16.7 m 碳氧同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$  和  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 极低值部位时代定为  $(15.2 \pm 0.5)\text{Ma}$ (图 2)。

深海钻探远洋沉积碳氧同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$  和  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 记录的最显著周期为 1.2Ma 天文(轨道)周期(obliquity cycle)，对应于新生代长周期变化和长周期古气候旋回<sup>[3]</sup>。钻孔 ZK1 五道梁群湖相沉积碳氧同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$  和  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 记录的 7 次长周期变化，对应于 7 次周期为 1.2 Ma 的古气候旋回(C1~C7)。深度 140~80 m 的湖相沉积氧同位素 ( $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 4 次高峰值(深度 82.3 m,  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰} = -3.318$ ；深度 95.3 m,  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰} = -3.699$ ；深度 107.5 m,  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰} = -4.235$ ；深度 127.4m,  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰} = -4.546$ )，对应于 4 期天文暖期，指示 4 个受天文周期控制的古气候旋回(C1~C4)。如果以渐新世/中新世界线  $(23.5 \pm 0.5)\text{Ma}$  为参考基准点，那么这 4 次氧同位素 ( $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 高峰期对应年龄分别为  $(22.3 \pm 0.5)\text{Ma}$ (C1/C2 界线，深度 127.4 m)、 $(21.1 \pm 0.5)\text{Ma}$ (C2/C3 界线，深度 107.5 m)、 $(19.9 \pm 0.5)\text{Ma}$ (C3/C4 界线，深度 95.3m)、 $(18.7 \pm 0.5)\text{Ma}$ (C4/C5 界线，深度 82.3m)(图 2)。深度 82.3~16.7 m 湖相沉积碳氧同位素记录了 3 次周期为 1.2 Ma 的古气候旋回(C5~C7)，如果仍将碳氧同位素 ( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$  和  $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ ) 极高值对应的天文暖期作为标志，那么  $(18.7 \pm$

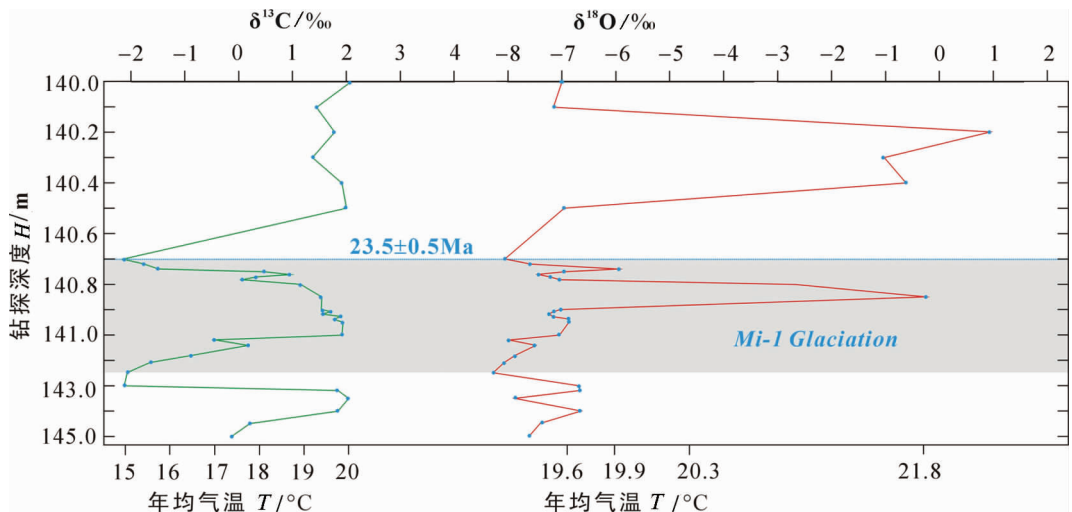


图 4 中新世湖相沉积地层 ZK1 钻孔 140~145 m 深度岩心碳氧同位素曲线

Fig.4 Carbon and oxygen isotope change of lacustrine strata in drill hole ZK1 at the depth of 140~145 m

0.5)Ma 对应深度为 57.0 m (旋回 C6/C5 界线), (17.5±0.5)Ma 对应深度为 26.5 m (旋回 C7/C6 界线); (15.1±0.5)Ma 对应深度为 14.2 m (旋回 C7/C8 界线), 与 C7 旋回碳氧同位素极低值发育时代 (15.2±0.5)Ma 呈现良好的对应关系(图 2)。

鉴于五道梁群顶部湖相沉积并未记录到上一个暖期(13.9±0.5Ma)的碳氧同位素( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ 和 $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ )高峰值(图 2), 因此推断五道梁盆地古大湖结束时代为 15~14 Ma 或 (14.5±0.5)Ma。钻孔 ZK1 底部 145~151.3 m 湖相沉积虽然进入了(23.5±0.5)Ma 前 1 个天文周期, 但没有出现渐新世末气候暖期对应的碳氧同位素( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ 和 $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ )高峰值, 因此钻孔 ZK1 部位开始沉积五道梁群湖相地层的时代应该晚于(24.7±0.5) Ma, 推断五道梁盆地古大湖开始发育时代为 23.5~24.7 Ma 或(24.1±0.6)Ma。

根据碳氧同位素记录和气候地层对比得出的五道梁群湖相沉积时代与相关地质事件同位素年龄资料基本符合。在青藏高原北部, 部分新生代晚期基性火山岩(玄武岩)呈平行不整合覆盖在五道梁群湖相沉积地层之上, 说明火山喷发发生于古大湖结束后。在昆仑山南部木孜塔格西南蚕眉山地区, 中新统湖相沉积地层上覆玄武粗面安山岩, 火山岩全岩 K-Ar 法年龄为(12.81±0.40)Ma~(14.51±0.23)Ma<sup>[10]</sup>(表 3), 代表蚕眉山地区五道梁群沉积上限年龄。双湖盆地西边界断裂穿切并错断五道梁群湖相沉积地层, 断裂破碎带新生矿物绢云母和白云母的 Rb-Sr 等时线年龄为(13.5±1.5)Ma<sup>[11]</sup>(表 3), 说明双湖盆地中新世早期湖相沉积结束时代早于 (13.5±1.5)Ma。根据这些测年资料, 综合推断青藏高原北部五道梁

群沉积和中新世早期古大湖结束时代为(13.5±1.5)Ma~(14.51±0.23)Ma, 与根据碳氧同位素记录和气候地层学对比得出的五道梁群顶部地层时代(14.5±0.5)Ma 基本符合。五道梁群湖相沉积不整合覆盖渐新世晚期逆冲推覆构造、斜冲断裂及同构造期侵入岩, 不整合面下伏构造岩与侵入岩的同位素测年资料为五道梁群湖相沉积下限年龄提供了重要的年代学约束。如东昆仑南部东大滩盆南被五道梁群湖相沉积不整合覆盖的渐新世晚期逆冲推覆构造前锋逆冲断层绿泥石片岩的<sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar 年龄为 (26.5±2.7)Ma(表 3), 风火山北部渐新世晚期逆冲推覆构造控制中酸性侵入岩的单颗粒锆石 U-Pb 年龄为(27.6±0.5)Ma<sup>[9]</sup>, 风火山花岗岩黑云母与钾长石单矿物<sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar 年龄为约 28.8Ma(表 3), 说明五道梁群湖相沉积暨古大湖发育时代晚于(26.5~28.8)Ma。根据碳氧同位素记录和气候地层学对比得到的五道梁群底部湖相沉积时代(24.1±0.6)Ma 还与 Wang et al<sup>[12]</sup>、Liu et al<sup>[13]</sup>报道的五道梁群底部磁性地层年龄 23.5 Ma 基本吻合。

## 5 五道梁群沉积速率与短周期古气候旋回

根据中新世早期湖相沉积与深海洋沉积碳氧同位素( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ 和 $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ )气候地层学对比分析相关成果, 青藏高原北部五道梁盆地渐新世末期(24.1±0.6 Ma)开始发育古大湖, 古大湖结束时间约为(14.5±0.5)Ma, 古大湖发育时间长达约 10 Ma, 五道梁盆地沉积中心中新世早期古大湖沉积平均速率为 0.015 mm/a。其间, 23.5~22.3 Ma 沉积速率为

表 3 青藏高原中新世早期古大湖顶面和底面相关年龄

Table 3 Isotopic ages of rocks over and beneath Early Miocene lacustrine strata in Tibetan Plateau

取样地点	接触关系与岩性	测年方法	年龄值/Ma	资料来源
东昆仑南部 S8 点	五道梁群下伏推覆构造前锋绿泥石片岩	绿泥石 <sup>39</sup> Ar- <sup>40</sup> Ar	26.5±2.7	文献[9]
风火山北麓 S5 点	古大湖底部剥表面之下花岗斑岩	单颗粒锆石 U-Pb	27.6±0.5	文献[9]
风火山北麓 S5 点	古大湖底部剥表面之下花岗斑岩	黑云母 <sup>39</sup> Ar- <sup>40</sup> Ar	28.84±0.15	文献[9]
风火山北麓 S5 点	古大湖底部剥表面之下花岗斑岩	钾长石 <sup>39</sup> Ar- <sup>40</sup> Ar	28.81±0.26	文献[9]
风火山南部 S6 点	古大湖底部剥表面之下正长斑岩	黑云母 <sup>39</sup> Ar- <sup>40</sup> Ar	28.86±0.70	文献[9]
木孜塔格西南蚕眉山	中新世地层顶部剥表面上覆玄武粗安岩	全岩 K-Ar	14.51±0.23	文献[10]
木孜塔格西南蚕眉山	中新世地层顶部剥表面上覆玄武粗安岩	全岩 K-Ar	12.81±0.40	文献[10]
木孜塔格西南蚕眉山	中新世地层顶部剥表面上覆玄武粗安岩	全岩 K-Ar	12.85±0.56	文献[10]
双湖盆地西边界正断层	切割中新世湖相沉积地层断层破碎带	白云母 Rb-Sr 等时线	13.5±1.5	文献[11]



表 4 五道梁盆地中新世早期湖相沉积速率

时间/Ma	23.5~22.3	22.3~21.1	21.1~19.9	19.9~18.7	18.7~17.5	17.51~5.1
深度/m	140.7~127.4	127.4~107.5	107.5~95.3	95.3~82.3	82.3~26.5	26.5~14.2
沉积速率/(mm/a)	0.011	0.0166	0.010	0.011	0.0465	0.010

0.011 mm/a, 22.3~21.1 Ma 沉积速率为 0.0166 mm/a, 21.1~19.9 Ma 沉积速率为 0.010 mm/a, 19.9~18.7 Ma 沉积速率为 0.011 mm/a, 18.7~17.5 Ma 沉积速率为 0.0465 mm/a, 17.5~15.1 Ma 沉积速率为 0.010 mm/a(表 4)。

对 C5 旋回晚期湖相沉积(深度 62.6~69.86 m)厚度 7.26 m 的钻探岩心,通过碳氧同位素高分辨率古气候分析,揭示出 9 个短周期古气候旋回。如果取平均沉积速率为 0.0465 mm/a(表 4),那么深度 62.6~69.86 m 湖相地层的沉积时间为 156.129 ka,每个短周期古气候旋回的平均持续时间约为 17.4 ka,接近 19 ka 偏心率周期(eccentricity cycle)<sup>[9]</sup>。根据碳同位素( $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ )、氧同位素( $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ )和公式(1)、(2),估算年均古气温( $T$ )变化范围分别为 19.5~21.0°C 与 19.2~19.9°C(图 3),反映湖相沉积期间古气候波动幅度不大,总体比较平稳,对应于温暖潮湿的古气候环境。

## 6 结 论

通过对青藏高原北部五道梁群湖相沉积进行全岩心钻探及碳氧同位素测试,良好地揭示了中新世早期湖相沉积序列和古气候环境变化,获得了青藏高原北部中新世早期古环境变化和古气候旋回的重要地质记录,气候地层学对比分析为中新世早期古大湖发育时代提供了重要依据。钻探编录资料显示,五道梁盆地中新世早期发育厚度约 150 m 的湖相沉积,以白云质灰岩、灰岩、泥灰岩为主,夹厚度不同的泥岩;深度 50.0~51.0 m 出现湖相沉积间断,上、下均为连续湖相沉积。五道梁群湖相沉积的碳氧同位素变化及气候地层学对比表明,深度 140.7~14.2 m 湖相沉积碳氧同位素记录了 Mi-1 期后 7 次长周期(1.2 Ma)古气候旋回,深度 62.6~69.86 m 湖相沉积碳氧同位素记录了 9 次短周期(17.4 ka)古气候旋回;五道梁盆地古大湖开始时代(24.1±0.6) Ma,结束时代(14.5±0.5) Ma,中新世早期古大湖发育时间长达约 10 Ma。五道梁群湖相沉积时期,青藏高原北

部年均古气温变化范围为 19~21°C,平均约 20.0°C,对应于温暖湿润环境,说明中新世早期古大湖发育具有良好的古气候条件。

青藏高原中新世早期古大湖消亡可能与全球气候变冷存在密切关系。自 C7 旋回末期(约 15 Ma)开始,全球古气候在经历剧烈变化之后,气温大幅下降,至约 13 Ma 开始形成南极冰盖<sup>[2]</sup>。青藏高原中新世早期已经隆升至海拔 4000~4500 m 高度<sup>[7]</sup>,对全球气候变化具有非常敏感的反应;全球气候变冷必然导致青藏高原大幅降温,逐步形成不利于古大湖发育的高寒气候环境,导致中新世早期古大湖于(14.5±0.5) Ma 干枯消亡。由于钻探过程中少数层位缺失岩心,加上对钻探岩心的取样密度偏大,因此很可能会遗漏一些比较重要的古气候记录,影响五道梁群湖相沉积与深海沉积碳氧同位素变化的对比精度。论文相关结论和有关认识还有待于今后更多资料的验证。

## 参考文献(References):

- [1] Shackleton N J. Oxygen isotope calibration of the onset of ice-rafting and history of glaciation in the North Atlantic region [J]. Nature, 1984, 307:620-623.
- [2] Zachos James, Mark Pagani, Lisa Sloan, et al. Trends, Rhythms, and Aberrations in global climate 65 Ma to present [J]. Science, 2001, 292: 686-693.
- [3] Palik Heiko, Richard D Norris, Jens O Herrle, et al. The heartbeat of Oligocene climate system [J]. Science, 2006, 314:1894-1898.
- [4] 陈诗越,王苏民,金章东,等.湖泊沉积物记录的藏中地区 2.8Ma 以来的环境演变历史[J].地球化学,2004,33(2):159-164.  
Chen Shiyue, Wang Sumin, Jin Zhangdong, et al. Environment change of central Tibet since 2.8Ma recorded by lacustrine deposits [J]. Geochemistry, 2004, 33(2): 159-164 (in Chinese with English abstract).
- [5] 姚檀栋, Thompson L G, 施雅风. 古里雅冰心中末次间冰期以来气候变化记录研究[J]. 中国科学(D 辑), 1997, 27(5):447-452.  
Yao Tangdong, Thompson L G, Shi Yafeng. Climate variation since the last interglaciation recorded in the Guliyu ice core [J]. Science in China (Series D), 1997, 40 (6):662-668.
- [6] 吴珍玙, 吴中海, 胡道功, 等. 青藏高原腹地中新世早期古大湖的

- 特征及其构造意义[J].地质通报, 2006, 25(7):782-791.
- Wu Zhenhan, Wu Zhonghai, Hu Daogong, et al. Features of Early Miocene large paleolakes in the interior of the Qinghai-Tibet Plateau and their tectonic significance [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(7):782-791 (in Chinese with English abstract).
- [7] 吴珍汉, 赵逊, 叶培盛, 等. 根据湖相沉积碳氧同位素估算青藏高原古海拔高度[J]. 地质学报, 2007, 81(9):1277-1288.
- Wu Zhenhan, Zhao Xun, Ye Peisheng, et al. Paleo-elevation of the Tibetan Plateau inferred from carbon and oxygen isotopes of lacustrine deposits [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81 (9):1277-1288 (in Chinese with English abstract).
- [8] Wu Zhenhan, Patrick J Barosh, Wu Zhonghai, et al. Vast Early Miocene lakes of the central Tibetan Plateau [J]. Bulletin of Geological Society of America, 2008, 120 (9/10):1326-1337, Doi: 10.1130/B26043.1.
- [9] 吴珍汉, 吴中海, 胡道功, 等. 青藏高原新生代构造演化与隆升过程[M]. 北京: 地质出版社, 2009:153-169.
- Wu Zhenhan, Wu Zhonghai, Hu Daogong, et al. Cenozoic Tectonic Evolution and Uplift Process of the Tibetan Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009:153-169 (in Chinese with English summary).
- [10] 李金冬, 柏道远, 王生辉. 藏北蚕眉山地区火山岩和夷平面时代[J]. 地质通报, 2004, 23(7): 670-675
- Li Jindong, Bai Daoyuan, Wang Shenghui. Ages of volcanic rocks and planation surface in the Canmei mountain area, north Tibet [J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23 (7):670-675 (in Chinese with English abstract).
- [11] Blisniuk M Peter, Hacker R Bradley, Glodny Johannes, et al. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5Ma ago [J]. Nature, 2001, 412:628-632.
- [12] Wang Chengshan, Liu Zifei, Yi Haisheng, et al. Tertiary crustal shortening and Paneplanation in Hoh Xil region: implications for tectonic history of the northern Tibetan Plateau [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2002, 20:211-223.
- [13] Liu Zhifei, Zhao Xixi, Wang Chengshan, et al. Magnetostratigraphy of Tertiary sediments from the Hoh Xil basin: implications for the Cenozoic tectonic history of the Tibetan Plateau [J]. Geophysical Journal International, 2003, 154: 233-252.

## Carbon and oxygen isotope changes and palaeoclimate cycles recorded by lacustrine deposits of Miocene Wudaoliang Group in northern Tibetan Plateau

WU Zhen-han, WU Zhong-hai, HU Dao-gong, PENG Hua, ZHANG Yao-ling

(Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Carbon and oxygen isotopes in drill core of Wudaoliang Group have well recorded Early Miocene environment changes and palaeoclimate cycles in northern Tibetan Plateau. The Wudaoliang Group as thick as ~ 150 m consists mainly of limestone, dolomite limestone and marl, with a discontinuity occurring at the depth of 50.0-51.0 m in the drill core. Carbon and oxygen isotopes change considerably at the depth of 140-145 m, where both maximal  $\delta^{18}\text{O}$  and minimal  $\delta^{13}\text{C}$  occur two times.  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  reach to the minimum at the depth of 140.7 m, corresponding to global cooling Mi-1 recorded by the deep-sea drilling of oceanic deposits at the Miocene/Oligocene boundary. Seven eccentricity cycles of 1.2 Ma are recorded between 140.7 m and 14.2 m in depth, and 9 minor cycles of 17.4 ka are recorded from 69.86 m to 62.60 m in depth. It is further inferred that Early Miocene lake in northern Tibetan Plateau initiated at  $(24.1 \pm 0.6)$  Ma and ended at  $(14.5 \pm 0.5)$  Ma according to Palaeo-climate cycles recorded by carbon and oxygen isotope changes of lacustrine deposits, and that annual temperatures changed from  $19^\circ\text{C}$  to  $21^\circ\text{C}$  ( $\sim 20^\circ\text{C}$  on average) in Wudaoliang basin in Early Miocene.

**Key words:** Wudaoliang Group; lacustrine deposits; carbon and oxygen isotopes; palaeoclimate cycle; Early Miocene Tibetan Plateau

**About the first author:** WU Zhen-han, male, born in 1965, senior researcher and doctor, long engages in regional geological survey and continental dynamics research in Tibetan Plateau; E-mail: wuzhenhan@yahoo.com.cn.