

根据湖相沉积碳氧同位素估算青藏高原古海拔高度

吴珍汉¹⁾, 赵逊²⁾, 叶培盛¹⁾, 吴中海¹⁾, 胡道功¹⁾, 周春景¹⁾

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081; 2) 中国地质科学院, 北京, 100037

内容提要:青藏高原湖相沉积碳氧同位素、海拔高度与年均气温存在函数关系。对青藏高原南部 14 个不同海拔高度的第四纪湖相沉积露头, 在剖面不同部位采集了 35 个湖相沉积样品, 结合海拔高度与年均气温的相关分析, 建立了湖相沉积碳氧同位素古海拔高度计。再对青藏高原南部、青藏高原北部、东昆仑南部和柴达木盆地不同地点出露的渐新世、中新世早中期、上新世—早更新世湖相沉积地层, 分别取样进行碳氧同位素分析, 计算不同时期的古年均气温和古海拔高度。结果表明, 青藏高原大部分地区中新世早中期整体隆升至海拔约 4000m 高度, 五道梁—东昆仑南部中新世早中期整体隆升至海拔约 3500m 高度, 柴达木盆地中新世早中期隆升至海拔约 2500m 高度。这些资料对认识青藏高原隆升时代和气候环境演化具有重要意义。

关键词: 湖相沉积; 碳氧同位素; 年均气温; 古海拔高度; 青藏高原

青藏高原隆升与东亚大陆构造地貌演化、全球气候环境变化存在密切关系, 成为国际地球科学领域关注的前沿性科学问题。前人根据古植物(徐仁, 1981)、古树叶化石热焓(Spicer et al., 2003)、古环境变化(李吉均等, 1979; 张青松等, 1981)、磷灰石裂变径迹测年(钟大赉等, 1996; 肖序常等, 2000)、区域构造演化(Dewey et al., 1988; Ratschbacher et al., 1994; Yin et al., 2000; Tapponnier et al., 2001)、地堑盆地初始裂陷(Coleman et al., 1995; Harrison et al., 1995; Blisniuk et al., 2001)、火山岩岩石地球化学(Turner et al., 1996; Ding et al., 2003)及青藏高原周缘盆地沉积速率变化(Metivier et al., 1998), 从不同角度分析青藏高原的隆升时代和隆升过程, 取得不同的认识。迄今为止, 对青藏高原的隆升时代还存在很大争议。

研究青藏高原隆升的有效方法包括碳氧同位素分析。碳氧同位素是古气候、古环境和古海拔高度的重要示踪元素。Quade 等(1995)分析了喜马拉雅地区古土壤碳氧同位素与海拔高度的相关关系及产生机理, 建立了古海拔高度计, 发现喜马拉雅山脉中新世中晚期快速隆升的重要证据。David 等(2006)与 DeCells 等(2006)根据古土壤与湖相沉积碳氧同位素变化, 估算了渐新世—中新世的古海拔高度, 测出伦坡拉盆地在 35Ma 前已经隆升至海

拔 4000m 高度。湖泊沉积的碳氧同位素对古气候与古环境的变化反应灵敏(陈诗越等, 2004)。青藏高原渐新世、中新世发育大量湖相沉积(图 1), 中新世早中期和晚更新世在青藏高原腹地分别发育过面积超过 $1 \times 10^5 \text{ km}^2$ 的巨型古大湖(吴珍汉等, 2006a; 吴中海等, 2004); 湖相沉积主要类型包括砂砾石、粉砂、黏土、泥灰岩、泥岩、白云岩、白云质灰岩及少量灰岩(Wang et al., 2002; Liu et al., 2003)。富含碳酸盐湖相沉积的碳氧同位素是青藏高原隆升和气候环境变化的重要地质记录(薛滨等, 1997)。兹根据湖相沉积碳氧同位素—年均气温—海拔高度的相关关系, 建立古海拔高度计, 估算青藏地区不同时期的古海拔高度, 分析青藏高原的隆升过程。

1 现今海拔高度与平均气温的相关关系

青藏高原不同地区的现今海拔高度与年均气温、月均气温都存在良好的相关关系。根据青藏高原及邻区 20 世纪 60 年代至 70 年代的气象观测资料(表 1), 对青藏高原南部和青藏高原北部的年均气温(T_p)、6 月份平均气温(T_j)与现今海拔高度(H)的相关关系分别进行统计分析, 得到不同的相关方程, 对应于不同的相关曲线(图 2、3)。

注: 本文为科技部国际合作项目(编号 2006DFB211330)及地调局青藏高原综合研究与 INDEPTH-IV 项目联合资助的成果。

收稿日期: 2007-06-14; 改回日期: 2007-07-28; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 吴珍汉, 男, 1965 年生。博士, 研究员, 主要从事青藏高原区域地质调查与大陆动力学研究工作。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号, 中国地质科学院科技处; Email: wuzhenhan@yahoo.com.cn。

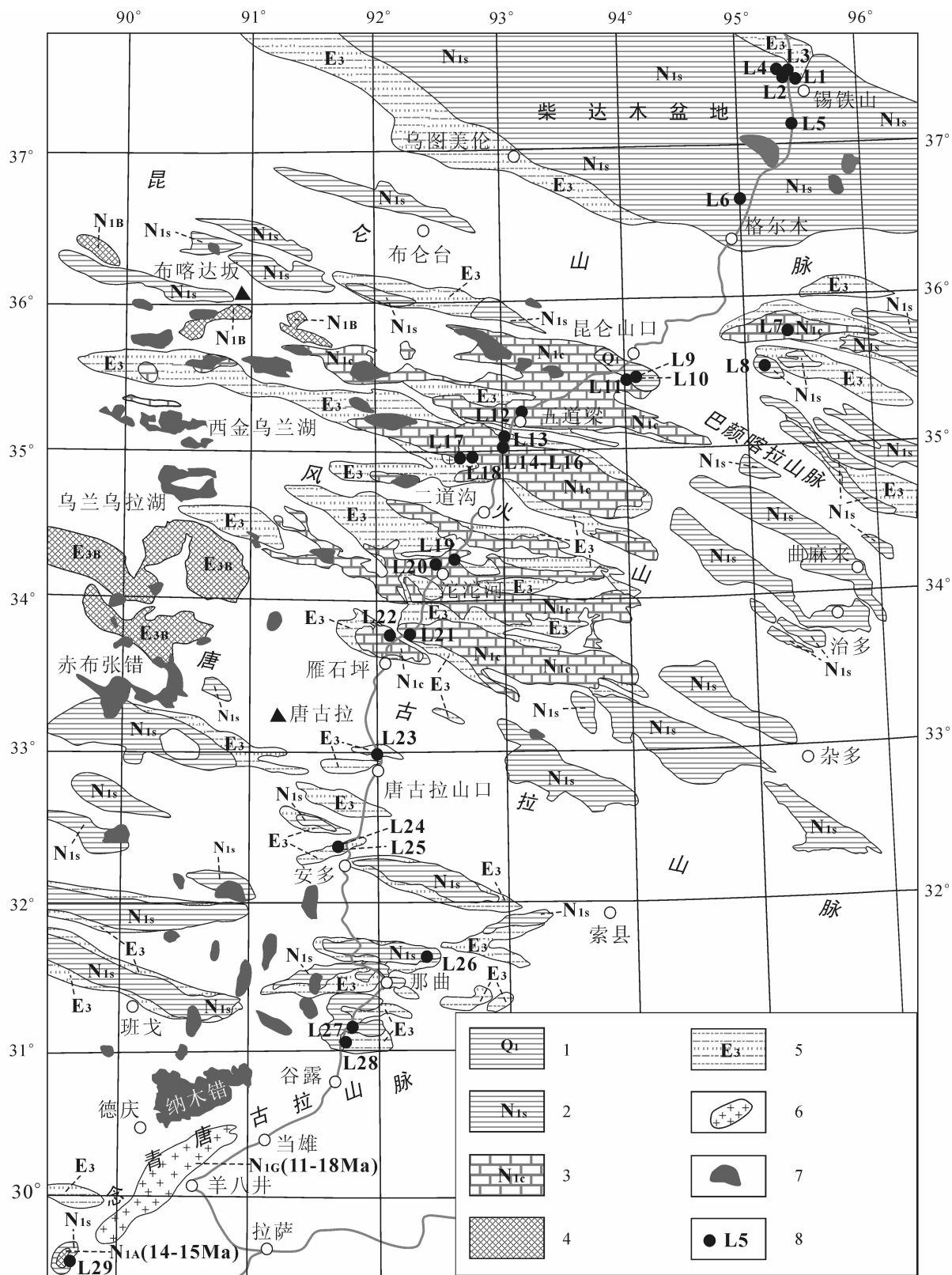


图1 青藏高原中段晚新生代沉积地层分布与取样位置图

Fig. 1 Sketch map of Oligocene and Miocene strata and sampling locations in middle section of the Tibetan Plateau
 1—早更新世碎屑沉积; 2—早中新世碎屑沉积; 3—早中新世碳酸盐岩; 4—渐新世—中新世中基性火山岩; 5—渐新世砖红色碎屑岩;
 6—渐新世—中新世中酸性侵入岩; 7—现代湖泊; 8—取样点及编号

1—Early Pleistocene detrital deposits; 2—Early Miocene detrital deposits; 3—Early Miocene carbonate rocks; 4—Oligocene-Miocene volcanic rocks; 5—Oligocene brownish-red detrital deposits; 6—Oligocene-Miocene granite; 7—present lake; 8—sampling location and its number

表 1 青藏高原及邻区现今海拔高度和气温资料一览表

Table 1 Present-day elevation and mean temperature of the Tibetan Plateau and vicinity

地名	纬度	经度	现今海拔高度(m)	年均气温(°C)	6月份平均气温(°C)
青藏高原南部及邻区					
重庆	29°35'	106°28'	261	18.3	27.6
成都	30°40'	104°04'	506	16.1	27.0
雅安	29°57'	103°00'	601	15.9	25.7
察隅	28°38'	97°27'	2050	11.6	21.7
波密	29°52'	95°46'	2750	8.3	18.3
巴塘	30°00'	99°09'	2580	11.2	22.2
林芝	29°36'	94°36'	3000	8.6	19.6
康定	30°03'	101°58'	3100	7.1	
昌都	31°11'	96°59'	3241	7.6	19.8
甘孜	31°37'	99°59'	3560	7.3	16.9
拉萨	29°42'	91°08'	3658	7.1	21.1
日喀则	29°16'	88°54'	3836	6.4	22.4
丁青	31°25'	95°35'	3900	4.7	15.6
江孜	28°51'	89°38'	4040	4.4	19.3
理塘	30°03'	100°17'	3960	4.1	13.7
当雄	30°30'	91°05'	4200	2.4	15.3
定日	28°42'	87°14'	4300	0.6	
噶尔	32°30'	80°05'	4278	0.2	
班戈错	31°48'	89°40'	4400	-2.3	
那曲	31°29'	92°03'	4507	-2.2	12.9
安多	32°16'	91°42'	4610	-4.6	11.2
青藏高原北部及邻区					
郑州	34°43'	113°39'	110	14.3	26.2
西安	34°18'	108°56'	397	13.3	25.2
兰州	36°03'	103°53'	1517	8.9	25.5
西宁	36°37'	101°47'	2261	5.9	21.0
格尔木	36°25'	94°38'	2808	5.2	17.8
诺木洪	36°24'	96°27'	2860	4.4	21.7
香日德	36°01'	97°53'	2920	3.9	16.0
共和	36°17'	100°23'	3200	3.2	17.9
玉树	33°00'	97°00'	3800	3.0	14.9
都兰	36°18'	98°05'	4100	0.8	16.9
扎陵湖	35°00'	97°30'	4285	-0.7	
曲麻莱	34°08'	95°56'	4500	-2.5	
西大滩	35°44'	94°13'	4350	-2.0	
五道梁	35°13'	93°05'	4612	-5.6	5.6
沱沱河	34°12'	92°26'	4533	-4.0	7.6
楚玛尔河	35°20'	93°18'	4520	-6.2	
通天河	33°40'	92°03'	4550	-4.4	

资料来源:(1)年均气温来自于吴征镒,1980;汤懋苍等,1998;(2)6月份平均气温来自于中国科学院地理科学与自然资源研究所,2006,中国自然资源数据库(www.naturalresources.csdb.cn)。

青藏高原南部现今海拔高度(H)与年温(T_p)相关系数 $R^2 = 0.9762$ (图 2a),相关曲线方程为:

$$H = -9.3229 T_p^2 - 76.249 T_p + 4398.3$$

$$= -9.3229(T_p + 4.0893)^2 + 4554.2 \quad (1)$$

青藏高原南部现今 6 月份均温(T_j)与海拔高度(H)相关系数 $R^2 = 0.9232$ (图 2b),相关曲线方程为:

$$H = -12.65 T_j^2 + 221.56 T_j + 3698.4$$

$$= -12.65 (T_j - 8.7573)^2 + 4668.53 \quad (2)$$

青藏高原北部现今海拔高度(H)与年温(T_p)相关系数 $R^2 = 0.9682$ (图 3a),相关曲线方程为:

$$H = -7.582 T_p^2 - 168.98 T_p + 3905.9$$

$$= -7.582 (T_p + 11.144)^2 + 4847.50 \quad (3)$$

青藏高原南部现今 6 月份均温(T_j)与海拔高度(H)相关系数 $R^2 = 0.9504$ (图 3b),相关曲线方程为:

$$H = -11.856 T_j^2 + 158.70 T_j + 4046.5$$

$$= -11.856 (T_j - 6.693)^2 + 4577.60 \quad (4)$$

2 湖相沉积碳氧同位素与海拔高度的相关关系

青藏高原南部沿金沙江、澜沧江、雅鲁藏布江及支流第四纪发育规模不同的古湖泊,青藏高原南部乌郁盆地、羊卓雍错及亚东峡谷第四纪不同时期也发育古湖泊,在不同高度形成厚度不等的第四纪湖相沉积,以砂砾石、粉砂、黏土为主,局部夹泥炭层。对 14 个不同海拔高度的第四纪湖相沉积剖面,选择黏土层和泥炭层,在不同层位分别取样,共采集 35 个湖相沉积样品;采集的样品大部分为晚更新世湖相沉积,部分为早中更新世湖相沉积。对湖相沉积样品,在中国科学院地质与地球物理研究所稳定同位素实验室,使用 MAT-253 质谱仪,按照标准程序,进行碳同位素和氧同位素分析测试,分析结果(PDB 值)如表 2。

对青藏高原南部第四纪湖相沉积的碳氧同位素与取样部位的海拔高度进行统计分析,发现两者之间具有良好的相关关系(图 4)。青藏高原南部第四纪湖相沉积碳同位素($\delta^{13}C(\text{‰})$)与海拔高度(H/m)的相关系数 $R^2 = 0.9067$ (图 4a),相关曲线方程为:

$$H = -10.353 \delta^{13}C - 367.72 \delta^{13}C + 1972.9$$

$$= -10.353 (\delta^{13}C + 17.76)^2 + 5238.44 \quad (5)$$

青藏高原南部第四纪湖相沉积氧同位素($\delta^{18}O(\text{‰})$)与海拔高度(H/m)的相关系数 $R^2 = 0.8233$ (图 4b),相关曲线方程为:

$$H = 6.0808 \delta^{18}O - 77.586 \delta^{18}O + 472.38$$

$$= 6.081 (\delta^{18}O - 6.38)^2 + 224.90 \quad (6)$$

青藏高原第四纪湖相沉积的碳氧同位素与现今海拔高度呈良好相关关系,不是偶然现象。湖相沉积的碳氧同位素与湖泊发育期气温存在函数关系,而气温与海拔高度密切相关(图 2),因此湖相沉积

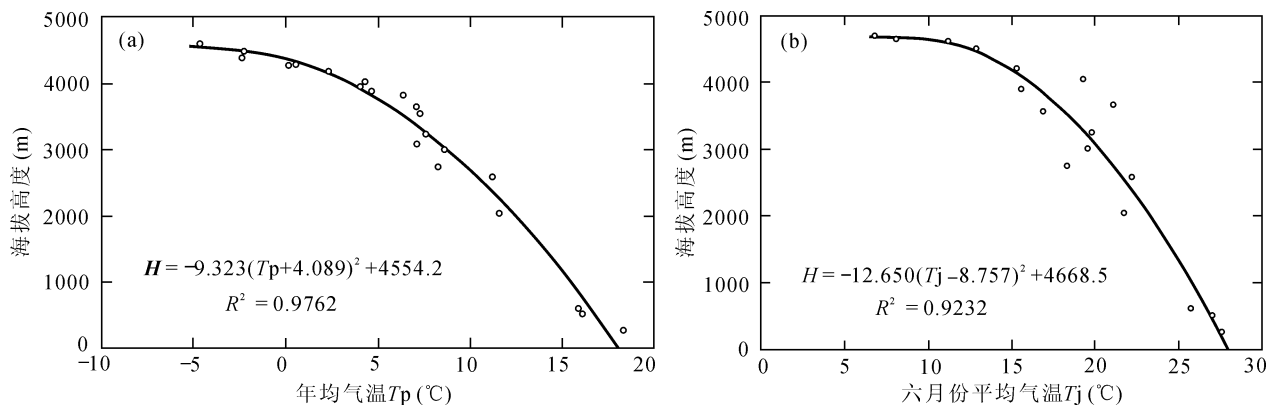


图2 青藏高原南部现今平均气温与海拔高度相关关系图

Fig. 2 Diagram of present elevation vs. mean temperature in the southern Tibetan Plateau and vicinity

(a)一年均气温与海拔高度相关关系；(b)一六月份平均气温与海拔高度相关关系

(a)—Relationship between annual temperature and elevation; (b)—Relationship between elevation and average temperature in June

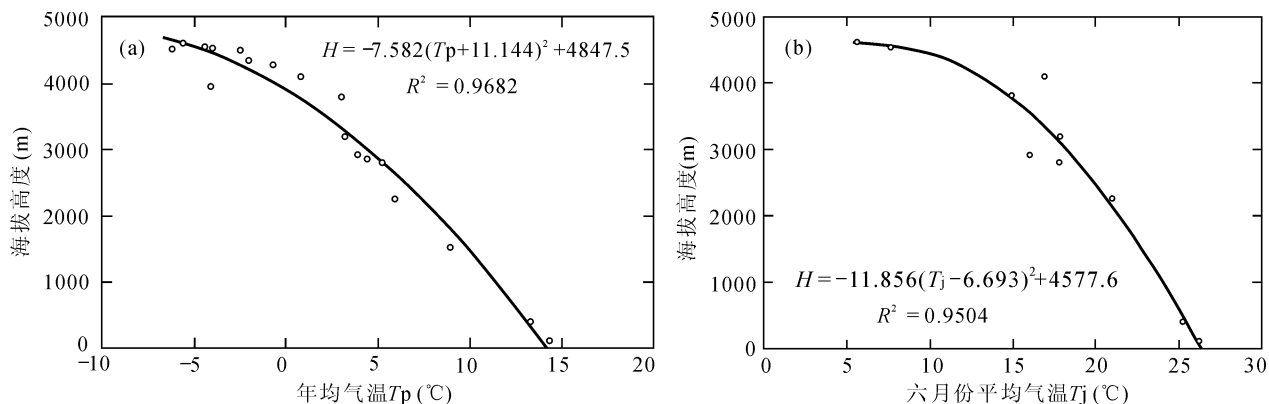


图3 青藏高原北部现今平均气温与海拔高度相关关系图

Fig. 3 Diagram of present elevation vs. mean temperature in the northern Tibetan Plateau and vicinity

(a)一年均气温与海拔高度相关关系；(b)一六月份平均气温与海拔高度相关关系

(a)—Relationship between annual temperature and elevation; (b)—Relationship between elevation and average temperature in June

的碳氧同位素应该与湖泊发育期的古海拔高度呈现函数关系。青藏高原南部第四纪不同时期湖相沉积的碳氧同位素与现今海拔高度都存在函数关系,说明第四纪古海拔高度变化不大,现今海拔高度与早中更新世(Q_{1-2})、中晚更新世(Q_{2-3})及晚更新世(Q_3)的古海拔高度相近。

3 根据湖相沉积碳氧同位素估算古海拔高度

3.1 湖相沉积碳氧同位素古海拔高度计

根据西藏纳木错晚更新世—全新世湖泊演化与气候变化的观测资料,晚更新世古大湖发育于间冰期温暖气候环境(吴中海等,2004)。青藏高原南部沿河谷分布的第四纪湖相沉积,普遍发育棕黄色或浅黄色黏土层,也指示湖泊发育期间的温暖古气候

环境。根据古今植被对比(黄赐璇等,1983)和冰芯氧同位素比值(姚檀栋等,1997),青藏高原晚更新世间冰期古气温比现今年均气温高约 5°C 。由于中晚更新世年均气温(T)比现今年均气温(T_p)高 5°C ,因此 $T_p = T - 5^{\circ}\text{C}$ 。考虑中晚更新世海拔高度与现今海拔高度(H)相近,代入(1)式,得到中晚更新世年均气温(T)与海拔高度的函数关系:

$$H = -9.3229(T - 0.9107)^2 + 4554.2 \quad (7)$$

对青藏高原南部中新世早中期古气温,Spicer et al. (2003)根据乌郁盆地古植物叶片热焓,估算乌郁盆地约15Ma古海拔高度为 $4638 \pm 847 \text{ m} \sim 4689 \pm 895 \text{ m}$,年均气温为 $6.8 \pm 3.4^{\circ}\text{C} \sim 8.1 \pm 2.3^{\circ}\text{C}$,正好位于青藏高原南部6月份的气温曲线的上部,因此拟用现今6月份气温曲线比拟中新世早中期古年均气温(T_n)。现今6月份平均气温(T_j)

比现今年均气温(T_p)高约 11°C (图 2), 而中晚更新世年均气温比现今年均气温(T_p)高 5°C 。根据这种关系得出的中晚更新世古年均气温(t): $T_j = T_n = T_p + 11^\circ\text{C} = t + 6^\circ\text{C}$; 代入(2)式, 得到晚更新世古

年均气温(t)与海拔高度的函数关系:

$$H = -12.65 (t - 2.7573)^2 + 4668.53 \quad (8)$$

联合(5)、(7)式, 建立青藏高原南部古年温(T)与碳同位素的函数关系:

表 2 青藏高原南部第四纪湖相沉积碳氧同位素组成一览表

Table 2 Carbon and Oxygen isotopes of Quaternary lacustrine deposits of southern Tibetan Plateau

样品编号	取样位置/部位	岩性描述	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ (PDB)	高度/纬度
BD4-30-1	小中甸/L	Q ₂₋₃ 灰白色黏土	-2.116±0.003	-14.008±0.008	3225m 27°33'
BD4-30-2	小中甸/M	Q ₂₋₃ 灰白色黏土	-1.668±0.005	-13.680±0.008	
BD4-30-3	小中甸/U	Q ₂₋₃ 灰白色黏土	-3.461±0.002	-14.575±0.006	
BD4-30-4	中甸盆南/L	Q ₁₋₂ 浅黄色黏土	-4.083±0.006	-15.236±0.008	3303m 27°45'
BD4-30-5	中甸盆南/U	Q ₁₋₂ 浅黄色黏土	-3.806±0.009	-15.027±0.005	
BD5-1-1	奔子兰/L	Q ₂₋₃ 浅黄色黏土	-1.423±0.006	-14.875±0.004	2086m 28°13'
BD5-1-2	奔子兰/M	Q ₂₋₃ 紫色黏土	-0.739±0.005	-12.632±0.007	
BD5-1-3	奔子兰/U	Q ₂₋₃ 浅黄色黏土	-1.256±0.006	-14.178±0.012	
BD4-24-4	奔子兰南	Q ₂₋₃ 灰白色黏土岩	-2.080±0.004	-14.741±0.008	3002m 28°05'
BD5-1-4	奔子兰/U	Q ₂₋₃ 浅黄色黏土	-1.242±0.007	-13.810±0.003	2096m 28°13'
BD5-1-5	奔子兰/M	Q ₂₋₃ 紫色黏土	-0.673±0.004	-10.995±0.009	
BD5-1-6	奔子兰/L	Q ₂₋₃ 浅黄色黏土	-1.329±0.008	-13.462±0.005	
BD5-1-7	澜沧江东岸/U	Q ₃ 浅棕色砂土	-0.018±0.008	-12.115±0.006	2102m 28°36'
BD5-1-8	澜沧江东岸/L	Q ₃ 浅棕色砂土	-0.937±0.008	-13.396±0.007	
BD5-2-1	左贡西北/L	Q ₃ 浅黄色含砂黏土	-6.824±0.003	-17.636±0.006	3995m 29°57'
BD5-2-2	左贡西北/U	Q ₃ 浅棕色含砂黏土	-7.023±0.003	-18.025±0.008	
BD5-3-1	波密西侧/U	Q ₄ 灰白色砂土	-0.649±0.005	-11.272±0.004	2564m 29°57'
BD5-3-2	波密西侧/L	Q ₄ 灰白色砂土	-0.615±0.014	-10.912±0.007	
BD5-4-1	林芝县南/U	Q ₂₋₃ 青灰砂质黏土	-4.014±0.006	-15.265±0.005	2986m 29°33'
BD5-4-2	林芝县南/L	Q ₂₋₃ 青灰色黏土	-3.886±0.004	-14.685±0.003	
BD5-4-3	林芝县南/U	Q ₂₋₃ 青灰色黏土	-4.762±0.003	-16.026±0.003	
BD5-4-4	林芝县南/L	Q ₂₋₃ 灰绿色黏土	-4.568±0.007	-15.896±0.006	
BD5-4-15	墨竹工卡西/U	Q ₃ 灰白色黏土	-4.932±0.005	-16.236±0.010	3755m 29°48'
BD5-4-26	墨竹工卡西/L	Q ₃ 浅黄色黏土	-5.842±0.004	-16.867±0.008	
BD5-7-3	浪卡子盆南/U	Q ₂₋₃ 棕黄色黏土	-6.866±0.004	-17.856±0.004	4557m 28°52'
BD5-7-4	浪卡子盆南/L	Q ₂₋₃ 棕黄色黏土	-9.300±0.006	-19.902±0.006	
BD5-7-5	浪卡子盆南/M	Q ₂₋₃ 棕黄色黏土	-8.814±0.007	-19.026±0.006	
BD5-7-7	羊湖盆南/U	Q ₃ 灰色黏土	-9.120±0.004	-20.366±0.008	4458m 29°01'
BD5-7-8	羊湖盆南/M	Q ₃ 灰色黏土	-10.617±0.006	-20.854±0.006	
BD5-7-9	羊湖盆南/L	Q ₃ 灰色黏土	-8.644±0.005	-19.871±0.008	
BD5-9-1	那曲城北	Q ₃ 青灰色砂质黏土	-10.904±0.002	-20.316±0.004	4510m 31°30'
D7-8-4	乌郁盆地/U	灰黑色泥炭 Q ₁₋₂	-8.52±0.006	-20.55±0.015	4354m 29°41'
D7-8-4	乌郁盆地/M	黑色泥炭 Q ₁₋₂	-8.57±0.005	-20.58±0.010	
D7-8-5	乌郁盆地/M	黑色泥炭 Q ₁₋₂	-8.39±0.006	-19.66±0.011	
D7-8-6	乌郁盆地/L	黑色泥炭 Q ₁₋₂	-8.28±0.006	-19.53±0.012	

注:(1)U、M、L表示湖相沉积剖面取样部位:U—剖面上部,M—剖面中部,L—剖面下部;(2)湖相沉积时代根据地貌部位、层位关系、岩层产状及部分测年资料进行综合判别。

$$H = -9.3229 (T - 0.9107)^2 + 4554.2$$

$$= -10.353 (\delta^{13}\text{C} + 17.76)^2 + 5238.44$$

$$T = [1.11 (\delta^{13}\text{C} + 17.76)^2 - 73.39]^{1/2} + 0.91 \quad (9)$$

与碳同位素的函数关系:

$$H = -12.65 (t - 2.7573)^2 + 4668.53$$

$$= -10.353 (\delta^{13}\text{C} + 17.76)^2 + 5238.44$$

$$t = [0.82 (\delta^{13}\text{C} + 17.76)^2 - 45.05]^{1/2} + 2.76 \quad (10)$$

联合(5)、(8)式, 建立青藏高原南部古年温(t)

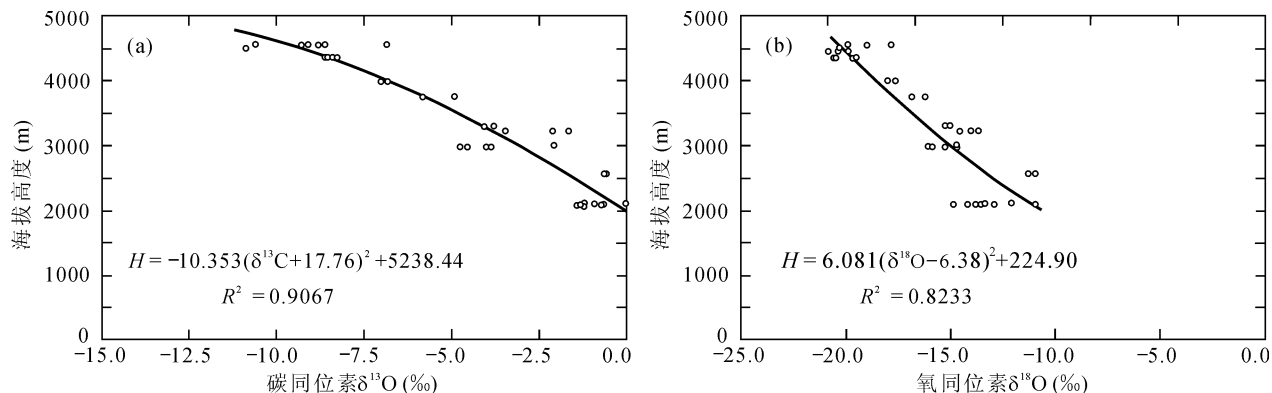


图4 青藏高原南部第四纪湖相沉积碳氧同位素与海拔高度相关关系图

Fig. 4 Diagram of Carbon and Oxygen isotopes of Quaternary lacustrine deposits vs. elevation of southern Tibetan Plateau

(a)—碳同位素与海拔高度相关关系; (b)—氧同位素与海拔高度相关关系

(a)—Relationship between carbon isotope and elevation; (b)—Relationship between oxygen isotope and elevation

联合(6)、(7)式,建立青藏高原南部古年温(T)与氧同位素的函数关系:

$$\begin{aligned} H &= -9.3229(T - 0.9107)^2 + 4554.2 \\ &= 6.081(\delta^{18}\text{O} - 6.38)^2 + 224.90 \\ T &= [-0.65(\delta^{18}\text{O} - 6.38)^2 + 464.37]^{1/2} \\ &+ 0.91 \end{aligned} \quad (11)$$

联合(6)、(8)式,建立青藏高原南部古年温(t)与氧同位素的函数关系:

$$\begin{aligned} H &= -12.65(t - 2.7573)^2 + 4668.53 \\ &= 6.081(\delta^{18}\text{O} - 6.38)^2 + 224.90 \\ t &= [-0.48(\delta^{18}\text{O} - 6.38)^2 + 351.28]^{1/2} \\ &+ 2.76 \end{aligned} \quad (12)$$

考虑古纬度变化,青藏高原腹地主要地块中新世早中期古纬度范围(吴珍汉等,2006b)与青藏高原南部第四纪湖相沉积取样部位的现今纬度范围相近;依据深海沉积氧同位素资料,渐新世中晚期全球气温与中新世早中期相近(Schackleton,1984)。根据现今6月份气温曲线(图2b)与中新世早中期古年均气温曲线的相似性,结合(2)式,得出青藏高原南部渐新世中晚期与中新世早中期古海拔高度(H 或 E)的计算公式:

$$\begin{aligned} H &= -12.65(T - 8.7573)^2 + 4668.53 \\ E &= -12.65(t - 8.7573)^2 + 4668.53 \end{aligned} \quad (13)$$

根据现今6月份气温曲线(图3b)与中新世早中期古年均气温曲线的相似性,考虑东昆仑中新世早中期古纬度与现今青藏高原北部相近,结合(4)式,得出东昆仑中新世早中期古海拔高度(H 或 E)的计算公式:

$$\begin{aligned} H &= -11.856(T - 6.693)^2 + 4577.60 \\ E &= -11.856(t - 6.693)^2 + 4577.60 \end{aligned} \quad (14)$$

上新世全球气温仅比中新世早中期略低(Schackleton,1984),因此可近似采用(13)、(14)式,分别估算青藏高原南部和青藏高原北部的上新世古海拔高度。

考虑柴达木盆北比青藏高原北部纬度高约1度,而纬度每升高1度,年均温降低0.63℃,因此古海拔高度(H 或 E)估算公式为:

$$\begin{aligned} H &= -11.856(T - 6.063)^2 + 4577.60 \\ E &= -11.856(t - 6.063)^2 + 4577.60 \end{aligned} \quad (15)$$

应用公式(9)–(12),可以根据湖相沉积的碳氧同位素($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$),计算青藏高原新生代中晚期年均气温,再依据公式(13)–(15),估算青藏高原新生代中晚期古海拔高度,从而建立了青藏高原湖相沉积碳氧同位素古海拔高度计。

3.2 新生代中晚期湖相沉积及碳氧同位素分析

青藏高原大面积出露新生代中晚期湖相沉积地层,包括渐新世雅西错群、中新世早中期五道梁群、上新世布隆组和早更新世羌塘组、中晚更新统及相当层位的地层单元。中新世早中期五道梁群湖相沉积以灰白色泥灰岩、泥岩、白云质灰岩和白云岩为主,磁性地层年龄为23.5~16.0Ma(Wang et al., 2002)。渐新世雅西错群以砖红色砂岩、砂砾岩、泥灰岩为主,含膏盐层,磁性地层年龄为33.7~30.0Ma(Wang et al., 2002; Liu et al., 2003)。上新世与早更新世湖相沉积以泥灰岩、泥岩和砂岩为主,中晚更新世湖相沉积以砂、粉砂和黏土为主。

在青藏高原中段,对渐新世、中新世早中期、上新世一早更新世不同时代的湖相沉积地层露头,选择不同层位富含碳酸盐的泥灰岩和白云质灰岩,分别取样(图1);在青藏高原内部采集了51个湖相沉

积样品(表 3),在柴达木盆地采集了 17 个湖相沉积样品(表 4)。对各取样点的湖相沉积地层时代,根据野外产状、层位关系、岩性组合及孢粉资料(吴珍汉等, 2006b),结合磁性地层资料(Liu et al., 2003),进行综合判别(表 3、4)。将青藏高原不同地区采集的新生代中晚期 68 个湖相沉积样品,送中国科学院地质与地球物理研究所稳定同位素实验室,使用 MAT-253 质谱仪,按照标准程序,分别进行碳

同位素和氧同位素分析测试,测试样品的内检率达 10%。

将青藏高原中段新生代中晚期湖相沉积样品的取样位置、地理坐标、岩性特征及碳同位素组成(国际标准 PDB 值)详列于表 3,将青藏高原中段新生代中晚期湖相沉积样品的取样位置、地理坐标、岩性特征及氧同位素组成(国际标准 PDB 值)详列于表 4。

表 3 根据湖相沉积碳同位素估算青藏高原古海拔高度一览表

Table 3 Paleo-elevation inferred from Carbon isotope of lacustrine deposits of the Tibetan Plateau

样品编号	取样位置	地理坐标	现今海拔高度	样品描述	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ (PDB)	古年温 $T(\text{°C})$	海拔高度 $H(\text{m})$	古年温 $t(\text{°C})$	海拔高度 $E(\text{m})$
D6-19-4	温泉水库	35°44'46", 95°16'53"	3963m/L7	灰白色泥灰岩(N ₁)	-0.23	17.27	3251	17.15	3281
D6-19-5	温泉水库			灰白色泥灰岩(N ₁)	-0.70	16.71	3388	16.67	3397
D6-19-61	温泉水库			灰绿色黏土(N ₁)	-1.28	16.01	3548	16.09	3531
D6-19-62	温泉水库			灰绿色黏土(N ₁)	-1.31	15.98	3555	16.06	3537
D6-19-8	温泉水库			棕黄色泥灰岩(N ₁)	-0.31	17.18	3274	17.07	3301
D2-11-1	西藏大沟	35°35'02", 95°08'31"	4771m/L8	N ₁ 含黏土粉砂岩	-1.582	15.64	3629	15.78	3599
D2-12-1	昆仑山口	35°38'51", 94°05'44"	4761m/L9	N ₂ -Q ₁ 泥灰岩	-2.396	14.64	3829	14.95	3769
D2-12-2	昆仑山口	35°38'42", 94°05'24"	4786m/L10	N ₂ -Q ₁ 泥灰岩	-2.408	14.63	3831	14.93	3773
D2-12-3	昆仑山口			N ₂ -Q ₁ 粉砂泥灰岩	0.102	17.67	3149	17.27	3251
D2-12-6	昆仑山口	35°38'18", 94°03'58"	4780m/L11	N _{1wd} 青灰色泥灰岩	-0.820	16.57	3421	16.55	3426
D6-26-9	五道梁北	35°13'31", 93°05'14"	4666m/L12	中薄层灰岩(N ₁)	2.17	20.08	3047	19.51	3206
D6-26-10	五道梁北			白云质灰岩(N ₁)	2.21	20.13	3032	19.55	3195
D6-26-12	五道梁北			白云质灰岩(N ₁)	2.03	19.92	3092	19.38	3241
D2-15-6	五道梁北			N _{1wd} 砂质泥灰岩	2.039	19.93	3089	19.38	3241
D6-26-16	可可西里	35°04'55", 93°01'55"	4680m/L13	薄板状灰岩(N ₁)	1.36	19.14	3305	18.72	3413
D2-15-1	红梁河谷	35°03'53", 92°59'50"	4657m/L14	N ₁ 含黏土泥灰岩	0.145	17.72	3652	17.52	3679
D2-15-2	红梁河谷			N _{1wd} 青灰色粉砂岩	-0.380	17.09	3790	17.00	3809
D2-15-3	红梁河谷			N _{1wd} 黏土质灰岩	-0.725	16.68	3874	16.65	3881
D2-15-4	红梁河谷	35°03'14", 93°00'38"	4640m/L15	N ₁ 棕黄色黏土岩	0.342	17.95	3600	17.71	3655
D2-15-5	红梁河谷			N ₁ 青灰色泥灰岩	-0.651	16.77	3856	16.72	3866
D6-26-17	红梁河谷	35°02'51", 93°01'06"	4632m/L16	薄板砂泥灰岩 E ₃	1.03	18.76	3403	18.36	3502
D2-14-7	秀水河谷	34°57'34", 92°39'29"	4675m/L17	N ₁ 灰绿色泥灰岩	-4.234	12.30	4508	13.01	4440
D2-14-8	秀水河谷	34°57'31", 92°45'37"	4614m/L18	N ₁ 棕色粉砂泥灰岩	-3.913	12.72	4470	13.35	4402
D2-14-9	秀水河谷			N ₁ 灰绿色泥灰岩	-2.836	14.09	4309	14.49	4253
D2-14-10	秀水河谷			N ₁ 灰绿色黏土岩	-5.032	11.23	4591	12.13	4524
D2-14-11	秀水河谷			N ₁ 灰色粉砂泥岩	-0.998	16.35	3939	16.37	3935
D6-29-10	沱沱河北	34°15'57", 92°29'02"	4555m/L19	灰绿色砂土(E ₃)	-0.81	16.58	3894	16.56	3898
D6-29-11	沱沱河北			棕黄色泥灰岩(E ₃)	1.24	19.00	3341	18.60	3443
D6-29-12	沱沱河北			灰白色泥灰岩(E ₃)	3.33	21.41	2643	20.64	2882
D6-28-13	沱沱河北			浅黄色砂土(E ₃)	3.34	21.42	2604	20.65	2879
D5-10-8	沱沱河沿	34°13'34", 92°26'42"	4541m/L20	灰色泥灰岩(N ₁)	0.067	17.62	3675	17.44	3715
D5-10-9	沱沱河沿			灰色泥灰岩(N ₁)	0.176	17.75	3646	17.55	3691
D5-10-10	沱沱河沿			灰色泥灰岩(N ₁)	0.021	17.57	3686	17.40	3724
D5-10-11	沱沱河沿			灰色泥灰岩(N ₁)	0.239	17.83	3627	17.61	3677

续表 3

样品编号	取样位置	地理坐标	现今海拔高度	样品描述	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ (PDB)	古年温 $T(\text{°C})$	海拔高度 $H(\text{m})$	古年温 $t(\text{°C})$	海拔高度 $E(\text{m})$
D6-30-4	通天河沿	33°44'53", 92°10'19"	4650m/L21	青灰色泥灰岩(N_1^2)	-1.11	16.22	3964	16.26	3956
D6-30-5	通天河沿			浅黄色泥灰岩(N_1^2)	-3.08	13.79	4348	14.23	4290
D6-30-6	通天河沿			青灰色粉砂岩(N_1^2)	-1.12	16.21	3966	16.25	3958
BD5-10-4	通天河沿	33°44'09", 92°07'47"	4656m/L22	棕黄色黏土(N_2)	-5.763	10.20	4544	11.30	4441
BD5-10-5	通天河沿			棕黄色黏土(N_2)	-3.052	13.82	4090	14.26	4012
D2-17-1	唐古拉山口	32°57'44", 91°58'46"	5149m/L23	E_3 灰绿泥质粉砂岩	-1.155	16.16	3975	16.22	3964
D2-18-1	安多北山	32°22'00", 91°26'41"	5040m/L24	E_{3yx} 角砾状灰岩	-1.666	15.54	4087	15.70	4059
D2-18-2	安多北山			E_{3yx} 泥灰岩	-2.092	15.02	4172	15.25	4135
D2-18-3	安多北山	32°21'25", 91°37'00"	4871m/L25	E_{3yx} 青灰色泥灰岩	-2.178	14.91	4190	15.17	4148
D7-4-2	那曲东北	31°39'46", 92°22'00"	4519m/L26	灰绿色泥灰岩(N_1)	0.72	18.39	3495	18.09	3567
D7-4-1	那曲东北			棕黄色泥灰岩(N_1)	0.69	18.36	3502	18.06	3574
D7-4-3	那曲东北			青灰色泥灰岩(N_1^2)	0.24	17.83	3627	17.61	3677
D7-6-1	罗马南侧	31°08'34", 91°44'01"	4730m/L27	泥灰岩(N_1^{2-1})	-2.28	14.79	4208	15.07	4164
D7-6-3	罗马南侧			铁质泥灰岩(N_1^2)	-1.32	15.96	4012	16.05	3996
D2-19-2	罗马南侧			N_{1wd} 泥灰岩	-2.017	15.11	4158	15.34	4120
D2-19-1	罗马南侧			N_2 粉砂黏土	-7.276	7.88	4659	9.47	4662
D2-19-3	谷露盆北	31°05'30", 91°41'33"	4742m/L28	$\text{N}_2 - \text{Q}_1$ 棕色黏土	-4.794	11.55	4569	12.39	4502
D7-9-6	乌郁盆地	29°38'02", 89°35'45"	4213m/L29	灰白色泥灰岩 N_1^2	-1.82	15.35	4119	15.54	4087

表 4 根据湖相沉积氧同位素估算青藏高原古海拔高度一览表

Table 4 Paleo-elevation inferred from Oxygen isotope of lacustrine deposits of the Tibetan Plateau

样品编号	取样位置	地理坐标	今海拔高度	样品描述	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ (PDB)	古年温 $T(\text{°C})$	海拔高度 $H(\text{m})$	古年温 $t(\text{°C})$	海拔高度 $E(\text{m})$
D5-14-10	镜铁山北	37°24'00", 95°28'26"	3330m/L1	E_3 暗紫色钙质黏土	-7.066	19.53	2427	19.02	2587
D5-14-11	镜铁山北	37°25'48", 95°26'58"	3250m/L2	N_1^1 青灰色泥灰岩	-7.939	19.11	2559	18.66	2696
D5-14-12	镜铁山北			N_1^1 青灰色泥灰岩	-8.406	18.86	2636	18.46	2756
D5-14-41	镜铁山北	37°26'57", 95°26'15"	3227m/L3	N_1 青灰色泥灰岩	-6.405	19.83	2331	19.28	2506
D5-14-42	镜铁山北			N_1 青灰色泥灰岩	-6.710	19.70	2372	19.16	2544
D5-14-15	镜铁山北			N_1 灰色黏土岩	-7.157	19.49	2440	18.99	2596
D5-14-16	镜铁山北			N_1 棕黄色黏土岩	-7.333	19.41	2466	18.92	2618
D8-4-1	镜铁山北			37°21'53", 95°29'30"	3150m/L4	钙质泥岩(N_1^1)	-7.27	19.44	2456
D8-4-4	镜铁山北	泥灰岩(N_1^1)	-7.06			19.54	2424	19.03	2584
D5-14-4	锡铁山南	37°08'55", 95°28'26"	2804m/L5	N_2 灰白色黏土	-7.599	19.28	2506	18.81	2651
D5-14-5	锡铁山南			N_2 灰白色黏土	-7.477	19.34	2488	18.86	2636
D5-14-6	锡铁山南			N_2 灰白色黏土	-7.123	19.51	2434	19.00	2593
D5-14-7	锡铁山南			N_2 灰白色黏土	-7.366	19.39	2472	18.90	2624
D5-14-9	锡铁山南			N_2 灰白色黏土	-6.326	19.87	2317	19.31	2497
BD5-14-1	格尔木北			36°37'24", 95°01'27"	2709m/L6	灰白色黏土($\text{N}_2 - \text{Q}_1$)	-5.281	20.30	2382
BD5-14-2	格尔木北	灰白色黏土($\text{N}_2 - \text{Q}_1$)	-6.057			19.98	2575	19.48	2639
BD5-14-3	格尔木北	灰白色黏土($\text{N}_2 - \text{Q}_1$)	-6.175			19.94	2497	19.37	2672
D6-26-9	五道梁北	35°13'31", 93°05'14"	4666m/L12	中薄层灰岩(N_1^1)	-6.87	19.63	3173	19.10	3315
D6-26-10	五道梁北			白云质灰岩(N_1^1)	-6.85	19.63	3173	19.11	3313
D6-26-12	五道梁北			白云质灰岩(N_1^1)	-6.87	19.63	3173	19.10	3315
D2-15-6	五道梁北			N_{1wd} 砂质泥灰岩	-7.021	19.56	3192	19.04	3331
D6-26-16	可可西里	35°04'55", 93°01'55"	4680m/L13	薄板状灰岩(N_1^1)	-4.07	20.74	2852	20.05	3055

续表 4

样品编号	取样位置	地理坐标	现今海拔高度	样品描述	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ (PDB)	古年温 $T(\text{°C})$	海拔高度 $H(\text{m})$	古年温 $t(\text{°C})$	海拔高度 $E(\text{m})$
D2-14-7	秀水河谷	34°57'34", 92°39'29"	4675m/L17	N ₁ 灰绿色泥灰岩	-6.927	19.60	3181	19.08	3321
D2-14-8	秀水河谷	34°57'31", 92°45'37"	4614m/L18	N ₁ 棕色粉砂泥灰岩	-12.496	16.17	3973	16.19	3970
D2-14-9	秀水河谷			N ₁ 灰绿色泥灰岩	-8.622	18.72	3413	18.36	3502
D2-14-10	秀水河谷			N ₁ 灰绿色黏土岩	-12.297	16.34	3941	16.32	3945
D2-14-11	秀水河谷			N ₁ 灰白色粉砂泥岩	-6.908	19.61	3179	19.09	3318
D2-15-1	红梁河谷	35°03'53", 92°59'50"	4657m/L14	N ₁ 含黏土泥灰岩	-13.165	15.61	4074	15.72	4055
D2-15-2	红梁河谷			N _{1wd} 青灰色粉砂岩	-0.285	21.78	2523	20.92	2797
D6-29-10	沱沱河北	34°15'57", 92°29'02"	4555m/L19	灰绿色砂土(E ₃)	-10.36	17.71	3655	17.48	3706
D6-29-11	沱沱河北			棕黄色泥灰岩(E ₃)	-8.40	18.86	3377	18.46	3478
D6-29-12	沱沱河北			灰白色泥灰岩(E ₃)	-8.546	18.79	3395	18.39	3495
D6-28-13	沱沱河北			浅黄色砂土(E ₃)	-7.40	19.37	3244	18.89	3370
D5-10-8	沱沱河沿	34°13'34", 92°26'42"	4541m/L20	灰色泥灰岩(N ₁)	-5.367	20.27	2992	19.64	3170
D5-10-9	沱沱河沿			灰色泥灰岩(N ₁)	-7.735	19.21	3286	18.75	3405
D5-10-10	沱沱河沿			灰色泥灰岩(N ₁)	-9.078	18.49	3470	18.14	3555
D5-10-11	沱沱河沿			灰色泥灰岩(N ₁)	-6.233	19.91	3095	19.34	3252
D6-30-4	通天河沿	33°44'53", 92°10'19"	4650m/L21	青灰色泥灰岩(N ₁ ²)	-10.69	17.49	3704	17.30	3745
D6-30-5	通天河沿			浅黄色泥灰岩(N ₁ ²)	-8.27	18.93	3359	18.52	3463
D6-30-6	通天河沿			青灰色粉砂岩(N ₁ ²)	-10.01	17.93	3604	17.67	3664
D2-17-1	唐古拉口	32°57'44", 91°58'46"	5149m/L23	E ₃ 灰绿泥质粉砂岩	-10.765	17.44	3715	17.26	3754
D2-18-1	安多北山	32°22'00", 91°26'41"	5040m/L24	E ₃ 角砾状灰岩	-11.352	17.03	3803	16.91	3828
D2-18-2	安多北山			E ₃ 灰白色泥灰岩	-7.898	19.13	3307	18.68	3423
D2-18-3	安多北山	32°21'25", 91°37'00"	4871m/L25	E _{3yx} 青灰色泥灰岩	-11.076	16.74	3862	17.08	3792
D7-4-2	那曲东北	31°39'46", 92°22'00"	4519m/L26	灰绿色泥灰岩(N ₁)	-9.77	18.08	3569	17.80	3634
D7-4-1	那曲东北			棕黄色泥灰岩 N ₁	-9.85	18.03	3581	17.75	3646
D7-4-3	那曲东北			青灰色泥灰岩 N ₂	-11.27	17.09	3790	16.96	3817
D7-6-1	罗马南侧	31°08'34", 91°44'01"	4730m/L27	泥灰岩(N ₂ ¹)	-7.80	19.18	3294	18.72	3413
D7-6-3	罗马南侧			铁质泥灰岩(N ₂ ¹)	-8.73	18.69	3420	18.31	3514
D2-19-2	罗马南侧			N _{1wd} 泥灰岩	-10.645	17.52	3697	17.33	3739
D2-19-1	罗马南侧			N ₂ 粉砂黏土	-16.329	12.28	4511	12.95	4446
D2-19-3	谷露盆北	31°05'30", 91°41'33"	4742m/L28	N ₂ -Q ₁ 棕色黏土	-13.183	15.59	4078	15.71	4057
D7-9-6	乌郁盆地	29°38'02", 89°35'45"	4213m/L29	灰白色泥灰岩(N ₁ ²)	-11.80	16.71	3868	16.64	3882

3.3 根据碳氧同位素估算古海拔高度

对渐新世、中新世、上新世—早更新世的湖相沉积样品,根据碳同位素和公式(9)、(10)及氧同位素和公式(11)、(12),分别计算古年均气温,计算结果如表 3、4,其中, T 、 t 为根据不同相关曲线分别得出的古年均气温。再将古年均气温 T 、 t 代入公式(13)、(14)、(15),计算各样品形成时期的古海拔高度,计算结果如表 3、4。

对绝大多数样品,根据碳同位素数据从不同途径计算出的古年均气温值 T 与 t 基本相同,少数样品 T 与 t 之差达 0.4 ~ 0.5°C,仅 1 个样品 T 与 t 之差超过 1°C(表 3)。对大部分样品,根据氧同位素

数据从不同途径计算出的古年均气温值 T 与 t 也基本相同,部分样品 T 与 t 之差达 0.4 ~ 0.6°C(表 4)。根据碳氧同位素从不同途径计算出古年均气温 T 与 t 基本相同的事实,说明对青藏高原现今年均气温(T_p)、晚更新世年均气温(T)、中新世年均气温(T_n)相互关系的推断基本正确,即晚更新世年均气温(T)比现今年均气温(T_p)高 5°C($T = T_p + 5^\circ\text{C}$);中新世年均气温(T_n)与现今 6 月份平均气温(T_j)相近($T_n = T_j$),比中更新世年均气温(t)高 6°C($T_n = t + 6^\circ\text{C}$),比现今年均气温高 11°C($T_n = T_p + 11^\circ\text{C}$)。这对认识青藏高原古气候演化和古环境变迁具有重要意义。

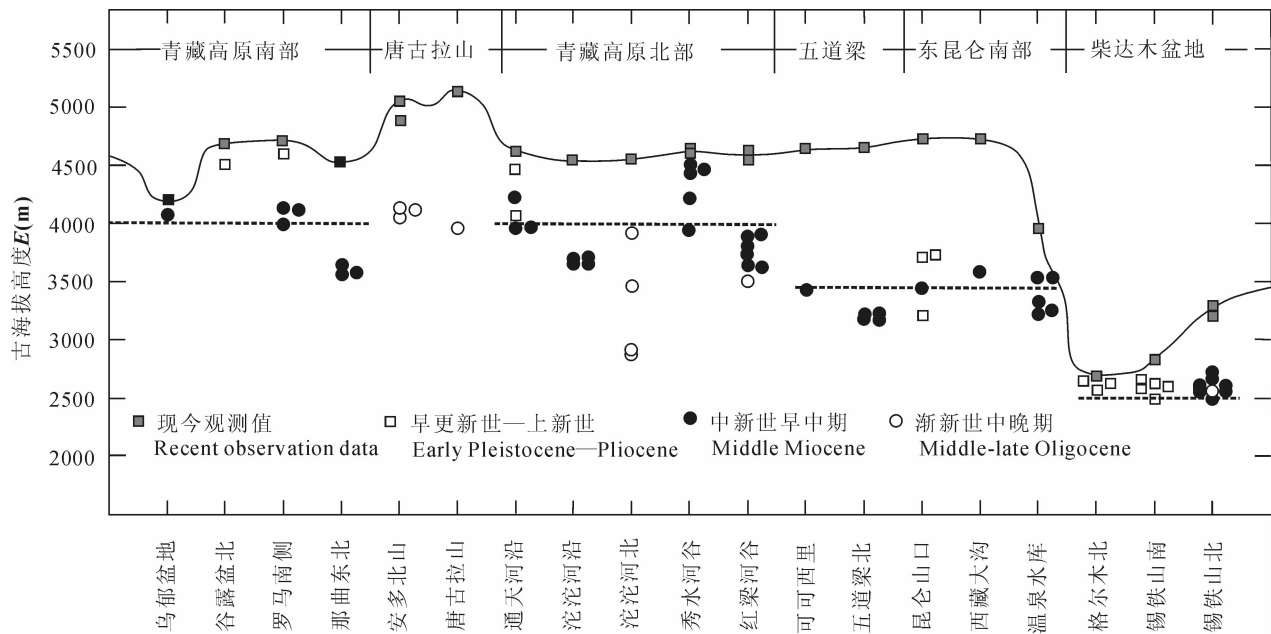


图5 青藏高原晚新生代古海拔高度分布图

Fig. 5 Diagram of middle-late Cenozoic paleo-elevation of the Tibetan Plateau

根据湖相沉积碳同位素和氧同位素分别计算出的古海拔高度基本相近,但也存在不同程度差异(表3、4)。由于青藏高原碳同位素与海拔高度的相关系数远大于氧同位素与海拔高度的相关系数,因此对青藏高原内部采集的湖相沉积样品,均采用碳同位素古海拔高度计,计算古年温与古海拔高度(表3);而根据氧同位素估算的古年温与古海拔高度(表4),仅供对比参考使用。柴达木盆地渐新世、中新世、上新世湖相沉积的碳同位素出现明显的低值异常,因此仅采用氧同位素及相关公式,估算古年均气温和古海拔高度(表4)。在分析古海拔高度变化时,统一采用根据古年均气温 t 计算出的古海拔高度 E 。

根据湖相沉积碳氧同位素估算的古海拔高度(表3、4),良好地揭示了青藏高原不同地区古海拔高度的变化过程,为分析青藏高原隆升过程提供了重要依据。青藏高原南部:乌郁盆地中新世中期的古海拔高度达4087m,略低于现今海拔高度4213m;谷露盆北—罗马盆地中新世早中期古海拔高度达3996~4164m,上新世—早更新世古海拔高度达4502~4662m,接近现今海拔高度;那曲盆地中新世早中期古海拔高度达3567~3677m,比现今海拔高度4519m低840~950m。青藏高原北部:通天河盆地中新世早中期古海拔高度为3956~4292m,上新世古海拔高度为4012~4441m;沱沱河盆地渐新世

古海拔高度为2879~3898m,中新世早中期古海拔高度为3677~3724m;秀水河中新世早中期古海拔高度为3935~4524m;红梁河渐新世古海拔高度为3502m,中新世早中期古海拔高度为3655~3881m;五道梁中新世早中期古海拔高度为3190~3241m;东昆仑中新世早中期古海拔高度为3281~3599m,上新世—早更新世古海拔高度为3426~3773m。柴达木盆地北缘(锡铁山北)渐新世古海拔高度为2587m,中新世早中期古海拔高度为2506~2756m,现今海拔高度为3150~3330m;柴达木盆地北部(锡铁山南)上新世古海拔高度为2497~2651m,现今海拔高度为2804m;柴达木盆地南部(格尔木北)上新世—早更新世古海拔高度为2581~2672m,略低于现今海拔高度2709m。

综合古海拔高度的估算资料,青藏高原不同地区渐新世古海拔高度差别较大,古地形起伏很大;经过渐新世晚期的剥蚀夷平(Wang et al., 2002; 吴珍汉等, 2006b),至中新世早中期不同地区古海拔高度差别大幅缩小,古地形起伏比较和缓。青藏高原南部中新世早中期古海拔高度平均约4000m,青藏高原北部(五道梁盆地除外)中新世早中期古海拔高度平均也约为4000m,五道梁盆地与东昆仑南部中新世早中期古海拔高度平均约3500m,柴达木盆地(北部)中新世早中期古海拔高度平均约2500m(图5)。青藏高原中新世早中期地貌呈现自南向北梯

次下降的阶梯状地貌,可可西里山脉两侧地貌面高差达500m,东昆仑北部山脉两侧地貌面高差达1000m(图5)。唐古拉山地区渐新世率先隆升至海拔约4000m的高度,经过渐新世晚期的剥蚀夷平,至中新世早中期可能与两侧邻区处于相似的古海拔高度。古海拔高度的估算结果表明,青藏高原中新世早中期整体隆升至海拔约4000m的高度;这与青藏高原中新世早中期发育巨型古大湖(吴珍汉等,2006a)的事实基本符合,为青藏高原不同地区中新世早中期热带亚热带植被同步消亡、暗针叶林同步繁盛(吴珍汉等,2006b)提供了合理的地质解释。

4 结论与讨论

青藏高原新生代中晚期湖相沉积碳氧同位素与海拔高度存在函数关系,依据湖相沉积碳氧同位素、海拔高度与年均气温的函数关系,能够建立有效的古海拔高度计。根据相关分析资料,青藏高原中新世早中期古年均气温与现今6月份平均气温相近,比现今年均气温高约 11°C ,晚更新世间冰期古气温比现今年均气温高约 5°C 。根据不同时期湖相沉积碳氧同位素,应用古海拔高度计,分别计算青藏高原不同地区渐新世、中新世早中期、上新世一早更新世的古海拔高度。结果表明,青藏高原大部分地区中新世早中期整体隆升至海拔约4000m的高度,五道梁—东昆仑南部中新世早中期古海拔高度平均约3500m,柴达木盆地(北部)中新世早中期古海拔高度平均约2500m,可可西里山与东昆仑北部山脉是青藏高原阶梯状地貌的重要分界线。

尽管湖相沉积碳氧同位素对古海拔高度具有重要指示意义,但根据碳同位素和氧同位素对同一样品分别计算出的古海拔高度却存在不同程度的差别;由于经过海拔高度—年均气温、海拔高度—碳氧同位素、年均气温—碳氧同位素不同变量之间的多次统计分析和反复换算,导致难以定量分析古海拔高度的计算误差;同一时期不同阶段的古气候波动对湖相沉积碳氧同位素具有明显影响,从而影响对古海拔高度的估算精度;对柴达木盆地碳同位素的显著低异常,目前尚难以给予合理解释。由于这些因素,根据湖相沉积碳氧同位素计算古海拔高度,难免存在偏差,需要更多资料的补充和验证。

致谢:碳氧同位素由中国科学院地质与地球物理研究所稳定同位素实验室协助完成,西藏地勘局职工培训中心提供了野外用车,中国地质调查局基础部庄育勋主任与成都地质矿产研究所潘桂棠研究

员对相关研究工作给予了支持和指导。在此一并致谢。

参 考 文 献

- 陈诗越,王苏民,金章东,沈吉. 2004. 湖泊沉积物记录的藏中地区 2.8Ma 以来的环境演变历史. *地球化学*, 33(2): 159~164.
- 黄赐璇,王燕如,梁玉莲. 1983. 试从孢粉分析论西藏中南部全新世自然环境的演变. 见:中国科学院青藏高原综合科学考察队编, *西藏第四纪地质*. 北京:科学出版社, 179~192.
- 李吉均,文世宣,张青松等. 1979. 青藏高原隆升的时代、幅度和形式探讨. *中国科学(B辑)*, 9(6): 608~616.
- 汤懋苍,程国栋,林振耀主编. 1998. 青藏高原近代气候变化及对环境的影响. 广州:广东科技出版社, 253~259.
- 吴珍汉,吴中海,胡道功,赵逊,叶培盛. 2006a. 青藏高原腹地中新世早期古大湖的特征及其构造意义. *地质通报*, 25(7): 782~791.
- 吴珍汉,吴中海,叶培盛,胡道功,彭华. 2006b. 青藏高原晚新生代孢粉组合与古环境演化. *中国地质*, 33(5): 966~979.
- 吴中海,赵希涛,吴珍汉,周春景,严富华,麦舜学,朱大岗. 2004. 西藏纳木错约 120ka B. P. 以来的古植被、古气候与湖面变化. *地质学报*, 78(2): 242~252.
- 吴征镒主编. 1980. *中国植被*. 北京:科学出版社, 30~49.
- 薛滨,王苏民,夏威岚,吴敬禄,王云飞,钱君龙,胡守云,吴艳宏. 1997. 若尔盖 RM 孔揭示的青藏高原 900kaBP 以来的隆升和环境变化. *中国科学(D辑)*, 27(6): 543~547.
- 肖序常,李廷栋. 2000. 青藏高原的构造演化与升降机制. 广州:广东科学出版社, 237~270.
- 徐仁. 1981. 大陆漂移与喜马拉雅山上升的古植物学证据. 见:中国科学院青藏高原综合考察队编, *青藏高原隆升的时代、幅度和形式*. 北京:科学出版社, 8~18.
- 姚檀栋, Thompson L G, 施雅风. 1997. 古里雅冰心中末次间冰期以来气候变化记录研究. *中国科学(D辑)*, 27(5): 447~452.
- 张青松,李炳元,景可,等. 1981. 青藏地区上新世古地理和高原隆起. 见:中国科学院青藏高原综合科学考察队编, *青藏高原隆升的时代、幅度和形式问题*. 北京:科学出版社, 26~29.
- 钟大赉,丁林. 1996. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨. *中国科学(D辑)*, 26(4): 289~295.
- Blisniuk M P, Hacker R B, Glodny J, Ratschbacher L, Bi Siwen, Wu Zhenhan, McWilliams O M, Calvert A. 2001. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5Ma ago. *Nature*, 412: 628~632.
- Coleman M, Hodges K. 1995. Evidence for Tibetan Plateau uplifted before 14Myr ago from a new minimal age for east-west extension. *Nature*, 374: 49~52.
- David B Rowley, Brian S Currie. 2006. Paleo-altimetry of the late Eocene to Miocene Lunpola basin, central Tibet. *Nature*, 439: 677~681.
- Dewey J F, Shackleton R M, Chang Chengfa, Sun Yiyin. 1988. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A327, 379~413.
- DeCelles P G, Quade J, Kapp P, Fan M, Dettman D L, Ding L. 2006. High and dry in central Tibet during the Late Oligocene.

- Earth and Planetary Science Letters, doi: 10.1016/j.epsl.2006.11.001.
- Ding Lin, Kapp P, Dalai Zhong, Dan Wanming. 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: evidence for a transition from oceanic to continental subduction. *J. Petrol.*, 44(10): 1833~1865.
- Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, & Lovera O M. 1995. Activation of the Nyainqentanghla shear zone: implications for uplift of the southern Tibetan Plateau. *Tectonics*, 14(3): 658~676.
- Liu Zhifei, Zhao Xixi, Wang Chengshan, Liu Shun, Yi Haisheng. 2003. Magnetostratigraphy of Tertiary sediments from the Hoh Xil basin: implications for the Cenozoic tectonic history of the Tibetan Plateau. *Geophysical Journal International*, 154: 233~252.
- Metivier F, Gaudemer Y, Tapponnier P, Meyer B. 1998. Northeastward growth of the Tibet Plateau deduced from balanced reconstruction of two depositional areas: the Qaidam and Hexi Corridor basins, China. *Tectonics*, 17(6): 823~842.
- Quade J, Carter J M L, Ojha T P, Adam J, Harrison T M. 1995. Late Miocene environment change in Nepal and the northern Indian subcontinent: stable isotopic evidence from paleosols. *Geological Society of America Bulletin*, 107: 1381~1397.
- Ratschbacher L, Frisch W, Liu G. 1994. Distributed deformation in southern and western Tibet during and after the Indus-Asia collision. *Journal of Geophysical Research*, 99: 19917~19946.
- Schackleton N J. 1984. Oxygen isotope calibration of the onset of ice-rafting and history of glaciation in the North Atlantic region. *Nature*, 307: 620~623.
- Spicer R A, Harris N B W, Widdowson M, Herman A B, Guo S, Valdes P J, Wolfe J A, Kelley S. 2003. Constant elevation of southern Tibet over the past 15 Million years. *Nature*, 421: 622~624.
- Tapponnier P, Xu Z, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibetan Plateau. *Science*, 294: 1671~1677.
- Turner S, Arnaud N, Liu L, Rogers N, Hawkesworth C, Harris N, Kelley S, Van Calsteren P, Deng W M. 1996. Post-collision, shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau: implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts. *J. Petrol.*, 37: 45~71.
- Wang Chengshan, Liu Zifei, Yi Haisheng, Liu Shun, Zhao Xixi. 2002. Tertiary crustal shortening and Peneplanation in Hoh Xil region: implications for tectonic history of the northern Tibetan Plateau. *J. Asian Earth Sciences*, 20: 211~223.
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci. Lett.*, 28: 211~280.

Paleo-Elevation of the Tibetan Plateau inferred from Carbon and Oxygen Isotopes of Lacustrine Deposits

WU Zhenhan¹⁾, ZHAO Xun²⁾, YE Peisheng¹⁾, WU Zhonghai¹⁾, HU Daogong¹⁾, ZHOU Chunjing¹⁾

1) *Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing, 100081;* 2) *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

Abstract

Functional relationship exists among carbon and oxygen isotopes of lacustrine deposits, elevation and mean annual temperature in the Tibetan Plateau. Paleo-altimetry was established by statistical analyses on carbon and oxygen isotopes of 35 lacustrine samples from 14 outcrops at different elevations in the southern Tibetan Plateau. Such a paleo-altimetry was used for calculating paleo-annual temperature and paleo-elevation of the Tibetan Plateau based on carbon and oxygen isotopes of lacustrine sediments formed in the Oligocene, Early-Middle Miocene and Pliocene-Early Pleistocene. The results show that most areas of the Tibetan Plateau uplifted to ~4000m, the Wudaoliang Basin and the southern part of Kunlun Mts. to ~3500m and the Qaidam Basin to ~2500m in the Early-Middle Miocene. These data are of significance for better understanding uplifting process and environment change of the Tibetan Plateau.

Key words: lacustrine deposits; carbon and oxygen isotopes; mean annual temperature; paleo-elevation; the Tibetan Plateau

