

天山北缘安集海河组湖相灰岩氧碳 同位素变化的古环境意义

李 骞^{1,2}, 田孝茹^{1,2}, 胡瀚文^{1,2}, 郭召杰^{1,2}

(1. 北京大学 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871;

2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘 要: 渐新统安集海河组代表了天山新生代快速隆升之前北缘的湖相沉积, 其顶部至上覆沙湾组沉积相变反映了天山隆升对周缘地区环境的影响。对安集海河剖面进行了实地测量, 并对安集海河组湖相灰岩夹层进行系统采样, 通过沉积相分析、氧碳同位素测定, 还原安集海河组时期湖泊环境特征及末期的演变。结果表明: 安集海河组整体属于典型的深湖和半深湖亚相沉积, 顶部为滨湖沉积; 该组 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 $\delta^{13}\text{C}$ 值整体较高, $\delta^{18}\text{O}$ 值在中部偏高, 下部和上部相似而较中部稍低, 顶部显著偏负, $\delta^{13}\text{C}$ 值在中部明显偏负, 下部变化较大但比中部稍高, 上部显著偏正; 区域气候资料与大气环流模拟表明, 该时期氧碳同位素变化不受降水来源和季风等因素的影响。综合沉积相分析与氧碳同位素试验结果, 安集海河组大部分时期气候以温暖湿润为主, 末期接近沙湾组时期气温出现明显下降, 气候变为干旱寒冷; 全球平均气温在安集海河组末期未出现显著变化, 因此, 这一区域气候变化可能更多地与印度—亚欧板块碰撞远程效应导致的天山活化隆升有关。

关键词: 古环境变化; 安集海河组; 新生代; 湖相灰岩; 氧碳同位素; 沉积相; 构造隆升; 天山

中图分类号: P66; X141

文献标志码: A

Paleo-environmental Significance of Oxygen and Carbon Isotopic Records in Lacustrine Limestone from Anjihaihe Formation, Northern Tianshan

LI Qian^{1,2}, TIAN Xiao-ru^{1,2}, HU Han-wen^{1,2}, GUO Zhao-jie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution of Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Oligocene Anjihaihe Formation in northern Tianshan represents lacustrine sedimentary before the rapid uplift of Tianshan in Cenozoic. The variation of sedimentary facies at the top of Anjihaihe Formation and overlying Shawan Formation indicates the influence of the uplift of Tianshan. Field measurement was carried out in Anjihaihe section, and lacustrine limestone was sampled from Anjihaihe Formation for sedimentary facies analysis and oxygen and carbon isotopes analysis. The lacustrine environment during Oligocene was reconstructed. Results reveal that Anjihaihe Formation is mostly formed in semi-deep to deep lacustrine environment and in shore environment at the top. $\delta^{18}\text{O}$ values and $\delta^{13}\text{C}$ values in Anjihaihe Formation are relatively higher than normal lakes; $\delta^{18}\text{O}$ values of the middle part are slightly higher than those of lower and

收稿日期: 2016-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272239)

作者简介: 李 骞(1993-), 男, 陕西渭南人, 理学博士研究生, E-mail: liqianpku@pku.edu.cn。

通讯作者: 郭召杰(1963-), 男, 山东单县人, 教授, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: zgjuo@pku.edu.cn。

upper parts; at the top of Anjihaihe Formation, $\delta^{18}\text{O}$ values drift negatively significantly. On the other hand, $\delta^{13}\text{C}$ values are much higher in the upper and top than those in the middle and lower parts with few exceptions. Regional climatic data and simulation of atmospheric circulation indicate that the variation of isotope in Oligocene is not the result of air mass change and monsoons. Given the data of oxygen and carbon isotopes, along with sedimentary facies analysis, it is concluded that Anjihaihe Formation is characterized by a warm and humid environment while the subsequent top part witnesses an obvious fall in temperature and the climate turns cool and dry. Considering that global climate shows no distinct change at the end of Anjihaihe Formation, this regional change may be to a large degree relate to the active uplift of Tianshan caused by the far field effect of India-Eurasia Plate collision during Cenozoic.

Key words: paleoenvironment change; Anjihaihe Formation; Cenozoic; lacustrine limestone; oxygen and carbon isotopes; sedimentary facies; tectonic uplifting; Tianshan

0 引言

新生代印度—亚欧板块碰撞引起的青藏高原隆升深刻影响了中亚的气候环境^[1-6]。受这一构造事件影响,天山晚新生代活化隆升^[7-11],周缘环境发生显著变化^[12-16]。天山北缘新生代地层层序保存完整,较好地记录了沉积环境的演变,为研究陆内造山过程及环境演变提供了良好条件。

前人对该地区新生代以来的沉积环境、盆山关系与印度—亚欧板块碰撞的联系等方面进行了较多研究,取得了一系列有益的成果^[1,12-13,15,17]。邓松涛等对塔西河剖面上的安集海河组、沙湾组、塔西河组、独山子组和西域组的土壤碳酸盐进行氧碳同位素测定,结果表明该地区始新世—渐新世为湿润温暖气候,晚渐新世为干旱寒冷气候^[12];Charreau等对金沟河剖面 and 奎屯河剖面的土壤碳酸盐和湖相碳酸盐进行氧碳同位素分析,发现在 23~25 Ma 和大约 16 Ma 湖相时期, $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值发生明显变化,并推断其主要由蒸发和湖盆开放闭合改变引起^[15];董欣欣等对金沟河湖相沉积剖面晚渐新世的介形亚纲动物群和石膏沉积物进行了研究,发现喜冷水的介形种 *Candona* cf. *Neglecta* 和 *Pseudocandona albicans* 在 23.8 Ma 取代了喜温水的介形种 *Ilyocypris bradyi* 和 *Ilyocypris*,从而成为主导物种,指示了这一时期气温的下降,同时沉积物中石膏的显著增加指示了亚洲干旱的加剧^[17];Hendix等对天山北麓玛纳斯剖面的裂变径迹研究表明,北天山开始隆升的时间约在 24 Ma^[1];Kent-Corson等对青藏高原北边界 13 条新生代沉积剖面进行了氧碳同位素研究,将古近纪氧同位素平均值的下降解释为区域平均海拔的上升,认为新近纪氧碳同位

素值的同时增加是由于研究区域的造山过程和海退过程的启动,这些过程会增加盆地的封闭性、干旱程度并降低盆地温度,这些变化与区域构造背景和沉积记录相吻合,并且与印度—亚欧板块碰撞导致的青藏高原隆升密切相关^[13]。

碳酸盐矿物的氧碳同位素组成分析是一种成熟的地质研究方法,被广泛应用到古气候、古环境的研究中^[18-21]。学者们通常认为湖相原生碳酸盐沉积物,尤其是细粒沉积物是在均衡状态下沉淀的,沉积时氧碳同位素一般与水体达到平衡,可以用来重建古环境信息^[19-20]。

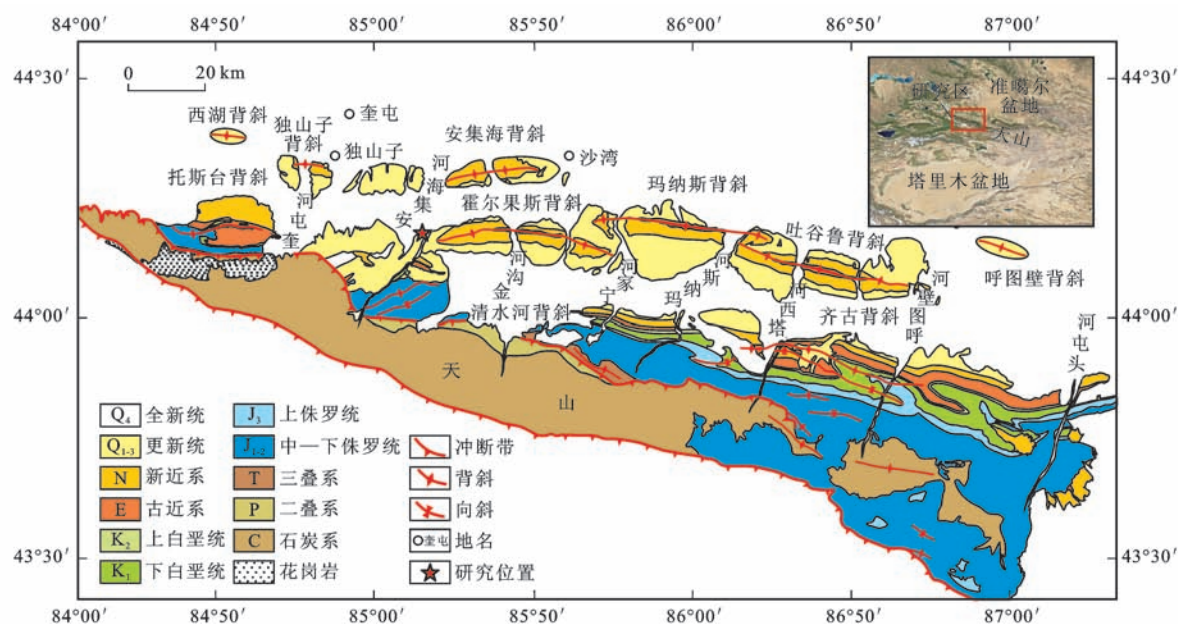
前人对天山北缘新生界地层氧碳同位素的研究尺度和范围较大,涉及的地层较多,但缺乏组内精细变化研究。安集海河组时期处于新生代天山活化隆升沉寂到启动的过渡时期^[22-23],这一时期的环境演变研究有助于理解青藏高原隆升的远程效应对中亚造山带周缘环境变化的影响。本文对该组不同层位的湖相灰岩夹层进行采样,以氧碳同位素测定为主要手段并结合剖面沉积相分析,反映安集海河组时期的环境演变。

1 区域地质背景

天山造山带是中亚造山带的重要组成部分,其增生拼贴过程主要完成于晚古生代,由西伯利亚、塔里木—卡拉库姆、哈萨克斯坦—伊犁等古板块(或微陆块,或岛弧)的不同时期碰撞拼合和构造叠加形成^[24-35]。新生代以来,受印度—亚欧板块碰撞远程效应的影响,天山构造带活化隆升,逐渐形成现今的内陆造山带及其两侧的再生前陆盆地^[1,36-39]。这一远程效应在不同地区的启动时间存在差异,北天山的隆升主要发生在 24~25 Ma 以来^[1,22,40]。

天山北缘新生界由下到上包括:古新统一始新统紫泥泉子组($E_{1-2}z$)、渐新统安集海河组(E_3a)、下中新统沙湾组(N_1s)、中中新统塔西河组(N_1t)、上中新统独山子组(N_2d)和第四系西域组(Q_{1x})。一系列发源于天山并向北流入准噶尔盆地的近平行河流(图 1)

切穿这些地层,形成良好的天然剖面,为野外地质工作提供了极大便利。本文对其中安集海河南端出露的渐新统安集海河组进行了实地测量与采样分析。



图件引自文献[5],有所修改

图 1 天山北缘地质简图

Fig. 1 Simplified Geologic Map of Northern Tianshan

季军良等在金沟河剖面进行的古地磁测量定年研究显示,安集海河组年龄为 23.3~28.0 Ma^[23]。根据地震及测井资料以及区域横向对比,该组有约 200 m 厚的地层未出露地表。以磁性地层学得到的沉积速率推算,安集海河组的底界应为 32.7 Ma,基本涵盖了整个渐新统,这一结果与季军良等的研究结果^[23]基本一致。在安集海河剖面的测量显示,安集海河组总长约 420 m,较为完整。金沟河剖面与安集海河剖面相距约 20 km,沉积厚度基本一致,因此,将安集海河剖面上该组时限定为 23.3~32.7 Ma 是合理的。

2 岩石学和岩相学分析

2.1 野外地层观察

安集海河组整体以灰色和灰绿色的泥岩、粉砂质泥岩为主,夹薄层或中层灰白、黄白色泥晶介壳灰岩,偶见鲕粒灰岩夹层和黄色含硫薄层。泥岩、粉砂质泥岩为钙质胶结,部分含腹足类化石。沉积物颗粒很细,露头叶片状风化剥落严重。顶部约 20 m 的沉积物粒度逐渐变粗,碳酸盐岩夹层增多;薄层或中层的钙质胶结粉砂岩、粗砂岩与介壳灰岩、鲕粒灰岩的互层出现。接近沙湾组的层位出现红色砂岩夹

层。根据安集海河剖面的地层岩性观察和剖面测量,本文绘制了安集海河组岩性地层柱状图(图 2)。由岩性观察推断:安集海河组大部分属于典型的深湖和半深湖亚相沉积,湖水较深,湖底为缺氧还原环境;顶部水体明显变浅,出现滨湖沉积。邓松涛等在塔西河剖面也观察到顶部出现粗砂岩、泥岩和粉砂岩的互层,并发育板状层理和波状层理^[12],这些反映了沉积环境由深水湖相到浅水滨湖相的明显转变。

2.2 样品采集、观察与鉴定

本文在安集海河剖面共采集不同层位的湖相碳酸盐岩样品 24 个,并在含腹足类化石的岩层中用微钻挑出腹足类壳体。将这 25 个样品磨片研磨至 200 目(孔径 0.074 mm)以备后续观察和试验。

为确定安集海河组碳酸盐岩样品的矿物成分,本文对部分样品进行了 X 射线衍射试验,衍射试验结果(表 1)显示:除个别样品含少量白云石外,其余样品中主要的碳酸盐矿物为方解石。从样品薄片可以看出(图 3):样品岩性为生物碎屑灰岩和泥晶石灰岩、粉晶石灰岩,其中的方解石颗粒都极细(10^{-6} m 级),没有明显重结晶现象。样品生物碎屑种类丰富,可见藻类、介形虫、瓣鳃类等生物化石。图 4 为

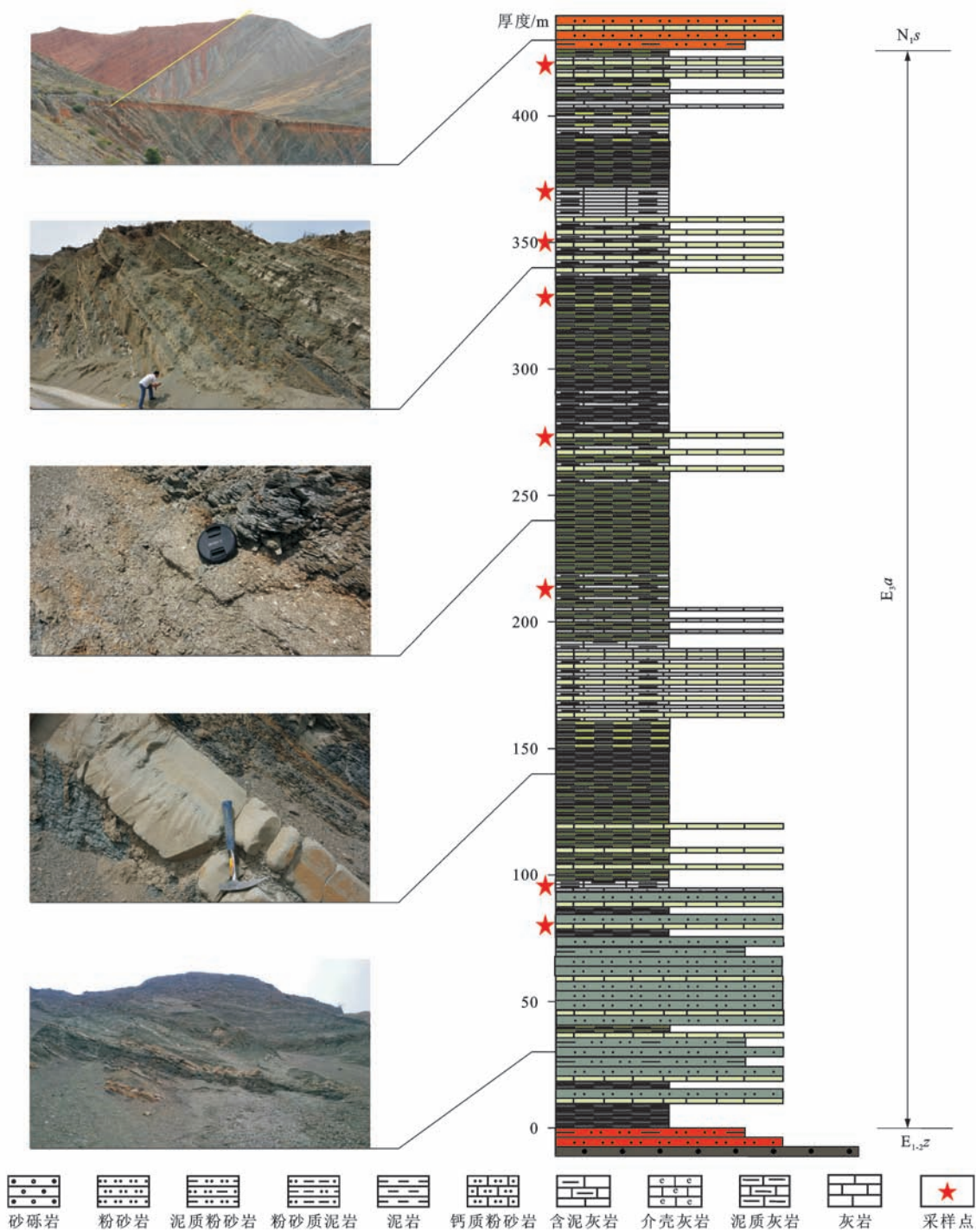


图 2 安集海河组野外剖面照片及岩性地层柱状图

Fig. 2 Lithostratigraphic Histogram and Field Profile Photos of Anjihaihe Formation

部分样品手标本。

3 氧碳同位素试验

3.1 样品处理与试验方法

氧碳同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成。测试采用 GasBench II 连续流法, 质谱仪为 MAT253。称量约 100 μg 碳酸盐样品加入到 12 mL

反应瓶中, 每次最多测量样品数为 88 个, 其中 18 个为标样(样品 GBW04416、GBW04417、GBW04405 和 GBW04406)。使用高纯氦气(纯度为 99.999%, 流速为 100 mL · min⁻¹)进行 600 s 的排空处理。排空后, 加入 5 滴 100% 无水磷酸置于 72 °C 加热盘中反应并平衡(方解石反应及平衡时间大于 4 h)。样品与磷酸反应且平衡后的 CO₂ 气体经过 70 °C 的熔硅毛细管柱(规格为 Poraplot Q, 型号

表 1 样品 X 射线衍射结果
Tab. 1 XRD Results of Samples

样品编号	AJ14-5	AJ14-5	AJ15-3	AJ15-6	AJ15-9	AJ16-1	AJ17-2	AJ19-1
石英体积分数/%	9	14	10	9	16	22	11	12
云母体积分数/%	6	5	10	19	9	15	7	27
高岭石体积分数/%						4	3	
方解石体积分数/%	85	77	76	72	74		68	31
白云石体积分数/%		4			1		10	26
石膏体积分数/%								4
黄铁矿体积分数/%			1			4	1	
石墨体积分数/%								
含铁锰方解石体积分数/%			2			54		
金红石体积分数/%			1					
黄铜矿体积分数/%						1		

为 25 m×0.32 mm)而与其他杂质气体分离,进入到 MAT253 质谱仪进行测定。一般 18 个标样 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 $\delta^{13}\text{C}$ 值测试精度均高于 0.1‰。

3.2 试验结果

安集海河组样品方解石矿物氧碳同位素测试结果(表 2)表明: $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-11.6\text{‰} \sim -2.5\text{‰}$,平均值为 $-6.7\text{‰} \pm 2.4\text{‰}$; $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-6.9\text{‰} \sim 4.1\text{‰}$,平均值为 $-0.8\text{‰} \pm 3.0\text{‰}$ 。根据数据分布特点,并结合地层岩性变化,可将该组分为 4 部分:顶部(400~420 m)、上部(330~400 m)、中部(200~330 m)和下部(0~200 m)。

安集海河组样品氧碳同位素变化趋势(图 5)表明: $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围较大且 4 个部分的特征明显,中部整体偏高,下部和上部相似且较中部稍低,顶部显著偏负; $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同部位也差别明显,中部显著偏负,下部变化较大但比中部稍高,上部显著偏正,顶部下边的 4 个样品与上部接近,顶部最上边的 2 个样品出现显著的负向漂移。 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 $\delta^{13}\text{C}$ 值在密集采样的层位都出现了迅速波动的特点。

4 讨 论

4.1 成岩作用

成岩过程中,随着埋藏深度的增加、温度的升高以及与地下水交换作用的加强,碳酸盐岩会发生溶解重结晶作用,这在很大程度上会改变其原有的氧碳同位素组成^[15,41]。因此,在进行同位素数据解释之前,有必要确定样品的同位素组成能够代表原始的沉积记录。

薄片观察显示,样品中方解石都呈灰泥或泥晶状态,没有明显后期重结晶现象出现,说明样品同位

表 2 方解石矿物氧碳同位素测试结果

Tab. 2 Test Results of Oxygen and Carbon Isotopes of Calcite

样品编号	部位	岩性	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 值/‰	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值/‰
AJ13-1	顶部	泥晶石灰岩	-10.9	-5.9
AJ13-2		灰泥质鲕粒石灰岩	-11.6	-6.9
AJ14-1		灰泥质生粒石灰岩	-7.5	-0.2
AJ14-2		灰泥质生粒石灰岩	-7.4	0.6
AJ14-4		泥晶石灰岩	-11.2	0.6
AJ14-5		泥晶石灰岩	-10.1	-0.4
AJ15-1	上部	含泥鲕粒石灰岩	-5.6	3.8
AJ15-2		含灰泥生粒石灰岩	-7.3	0.7
AJ15-3		泥晶石灰岩	-4.6	0.4
AJ15-5		含泥鲕粒石灰岩	-5.2	4.1
AJ15-6		含介壳泥晶石灰岩	-7.5	0.8
AJ15-7		含泥生粒石灰岩	-5.9	2.0
AJ15-8		含泥生粒石灰岩	-6.9	0.9
AJ15-9		泥质石灰岩	-5.7	0.6
AJ15-15		含泥生粒石灰岩	-7.7	-1.0
AJ16-1	中部	泥质石灰岩	-2.5	-5.6
AJ17-2		泥晶石灰岩	-5.0	-3.2
AJ19-1		含介壳泥晶石灰岩	-3.9	-3.3
AJ12-6	下部	泥晶质生粒石灰岩	-7.3	-3.1
AJ12-5		灰泥质生粒石灰岩	-6.1	-0.1
AJ12-4		泥质生粒石灰岩	-4.7	-2.9
AJ12-3		灰泥质鲕粒石灰岩	-6.2	4.0
AJ20-2B		灰泥质生粒石灰岩	-6.2	-3.3
AJ20-3		灰绿色钙质胶结泥岩	-3.4	-2.9

注:样品按地层由上到下排列;下标 V-PDB 表示同位素值是参照国际标准物质 V-PDB 计算出来的。

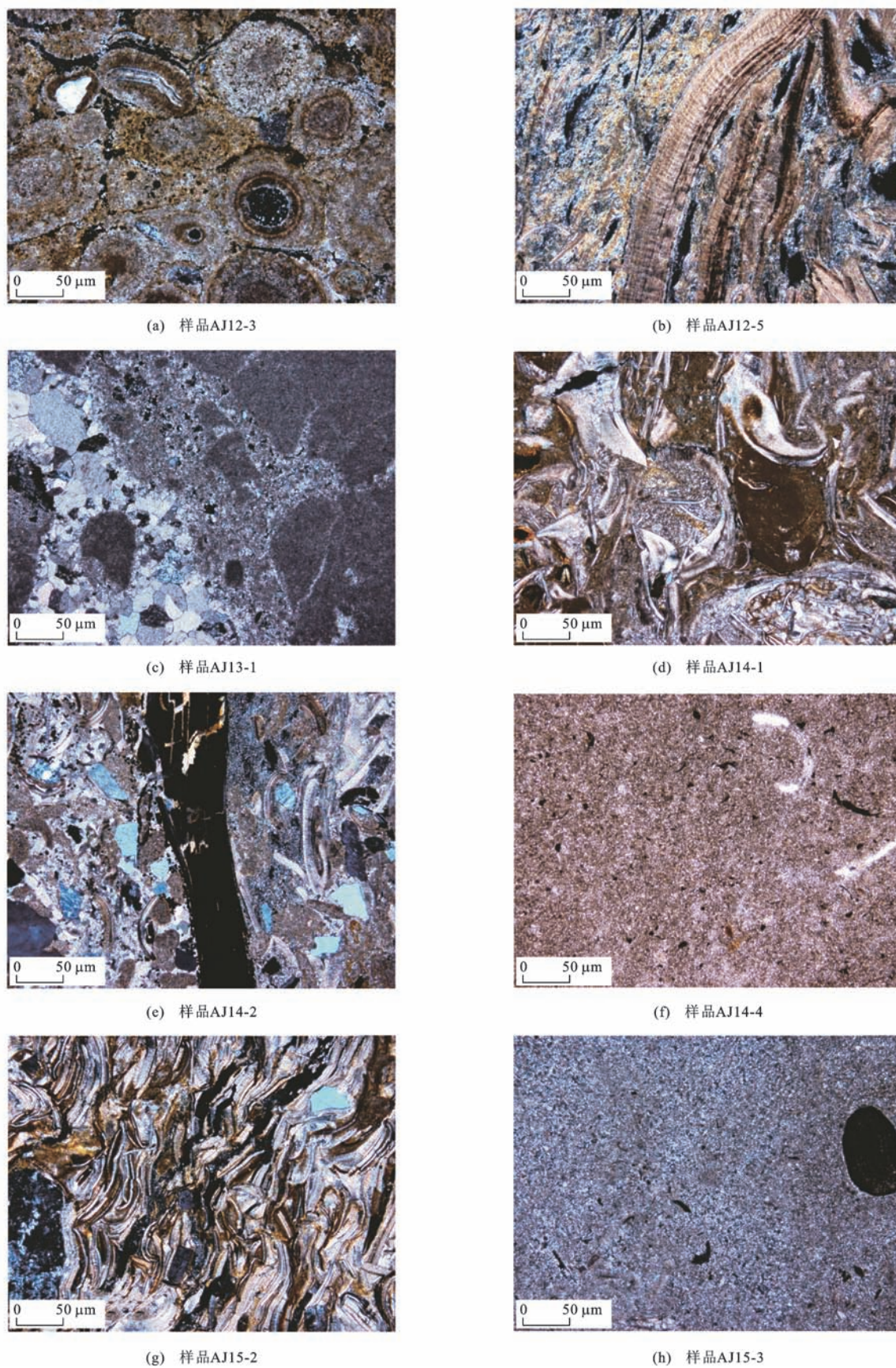


图3 样品薄片显微照片

Fig. 3 Microphotographs of Samples

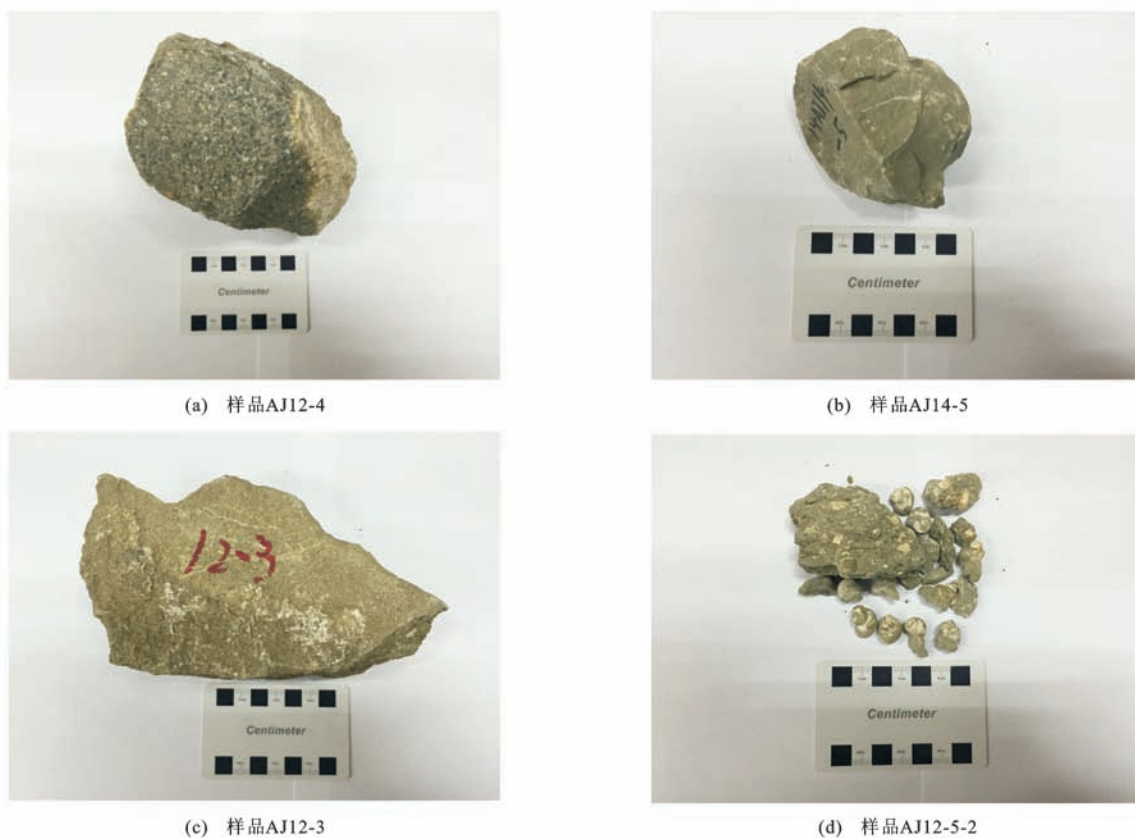


图 4 样品手标本

Fig. 4 Hand Specimens of Samples

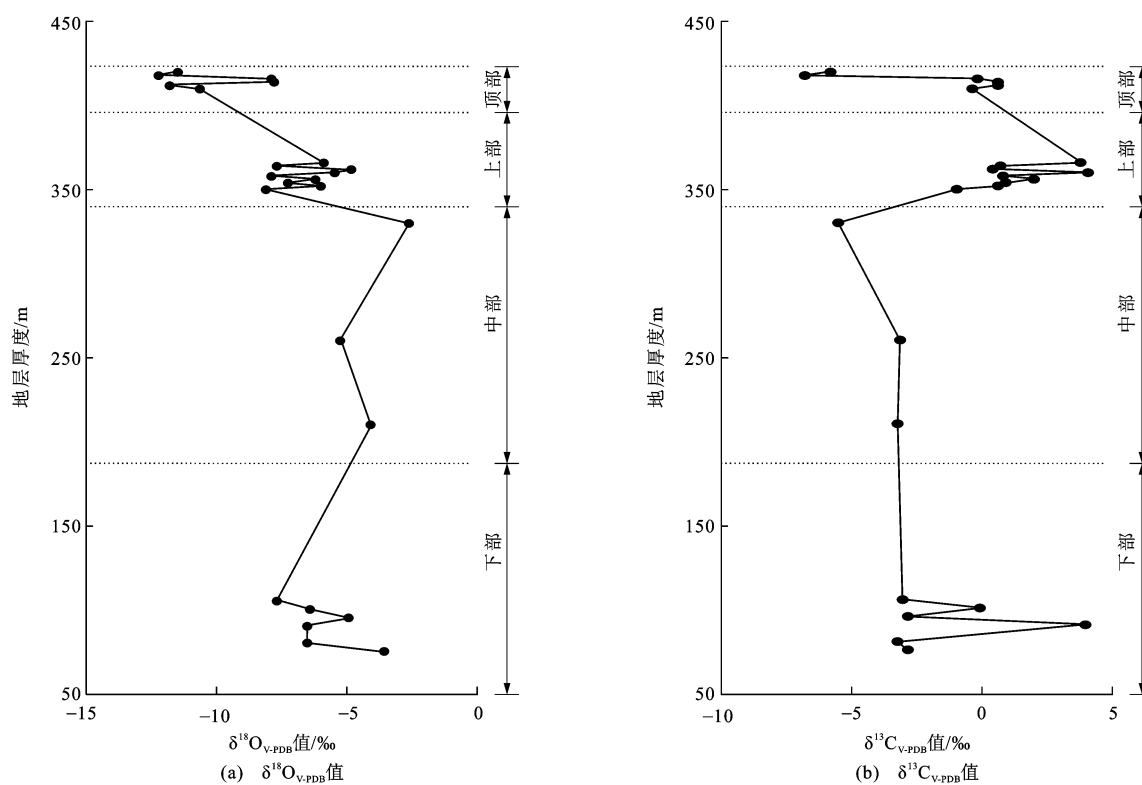


图 5 样品氧碳同位素变化趋势

Fig. 5 Variation Trends of Oxygen and Carbon Isotopes of Samples

素特征没有经历后期液体影响。Hendrix 等在玛纳斯剖面(距安集海河剖面约 40 km)的裂变径迹数据显示,该地区新生界埋藏深度不超过 2 km,埋深较浅,后期成岩作用很弱^[1,15]。受分馏作用影响,地下水(淡水)的氧同位素组成很低,一般认为 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值低于 -15.4‰ 可能是成岩作用改造的结果^[15]。本文样品中没有出现低于 -15.4‰ 的氧同位素数据。在一些明显受成岩作用影响的地区,同位素组成会表现出随深度变化的趋势^[15],在安集海河剖面的样品没有发现这种趋势。另外,安集海河剖面上的腹足类壳(样品 AJ12-5-2)和其围岩(样品 AJ12-5)的 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在明显差异,分别为 -3.6‰ 和 -6.1‰ 。若存在后期成岩作用,二者的 $\delta^{18}\text{O}$ 值应该趋于相同,因此,可以断定此次研究所用的样品没有经历明显的后期成岩作用,其氧碳同位素值代表了原始的沉积记录。

4.2 湖泊的封闭与开放

湖泊的封闭与开放和湖泊自身的地形、气候条件及地质背景等因素有关。开放性湖泊与封闭性湖泊的湖相碳酸盐沉积物氧碳同位素值特征差别显著:封闭性湖泊的湖相碳酸盐沉积物 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 $\delta^{13}\text{C}$

值主要取决于湖水注入与蒸发的相对大小,通常认为两者的相关系数大于 0.7;开放性湖泊的湖相碳酸盐沉积物 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要取决于汇水的组成,通常认为两者相关系数小于 0.7。开放性湖泊的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化通常较小,其指示短期的温度变化及注入-蒸发平衡。现代湖泊河流系统研究表明,开放性湖泊的水体滞留时间短,其碳酸盐沉积物氧碳同位素值代表了汇水河流的权重平均,因此,可以指示区域降水组成^[19]。

本文对安集海河组整体以及各部分分别进行氧碳同位素值相关性投图(图 6),得到这一时期湖泊的特点。由于中部数据较少,故和下部合并投图。结果显示:安集海河组整体相关性(相关系数为 0.115)以及各部分相关性(相关系数自下而上分别为 0.511、0.531 和 0.604)很弱,均远小于封闭-开放性湖泊的界限(0.7)。由此推断,安集海河组时期为开放性湖泊,其氧碳同位素组成代表区域降水特征,进而可以指示区域气候条件。虽然顶部地层相关性仍然较小,但相比于上部和中、下部地层明显增大,说明在安集海河组末期湖泊封闭性有所增强,反映了这一时期盆地水文地质条件有明显改变^[19]。另外,

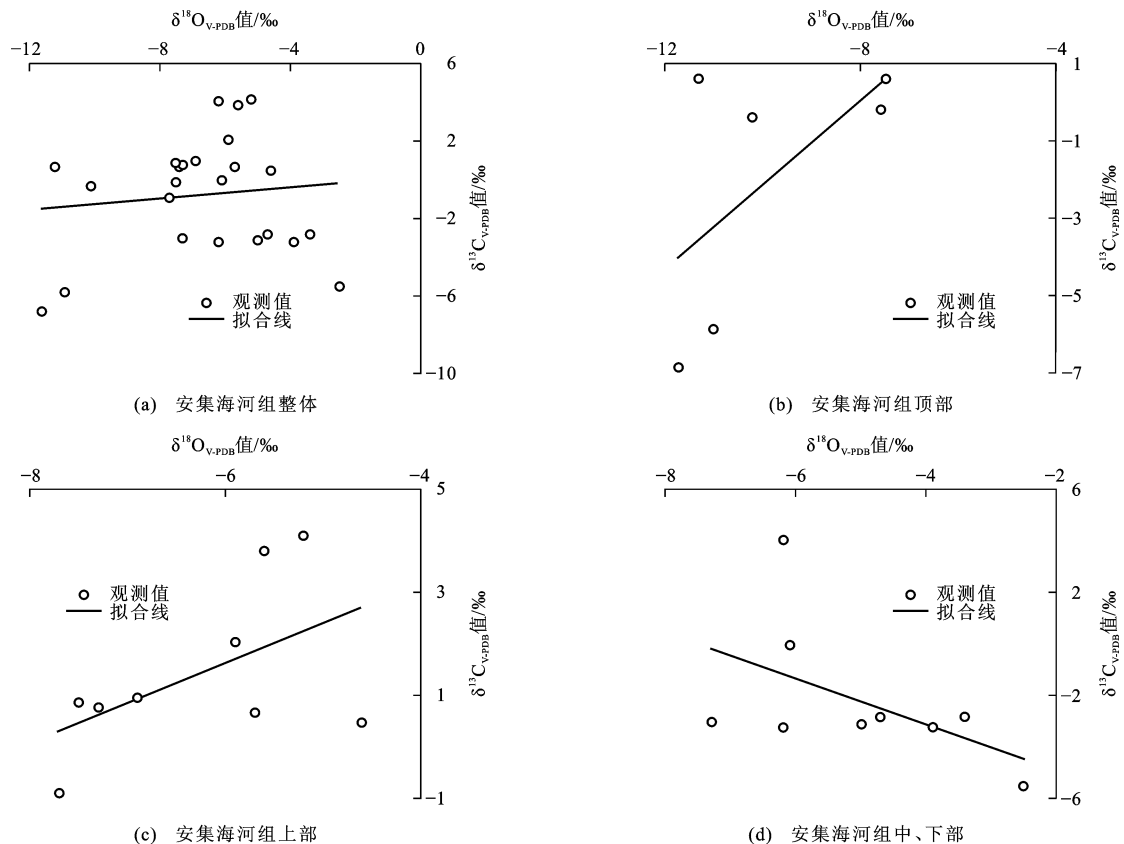


图 6 样品氧碳同位素相关关系

Fig. 6 Correlational Relationships Between Oxygen and Carbon Isotopes of Samples

在这 4 组投图中,只有中、下部数据点呈负相关,其他 3 组数据为正相关,这可能由于氧碳同位素值的相关性很差,由这些数据点得出的相关性正负关系不具有实际意义。

4.3 氧同位素变化的环境解释

开放性湖泊碳酸盐沉积物的氧同位素特征主要取决于汇入湖泊的河水,即区域降水。而降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值主要受区域年平均温度、降水来源、季风等因素控制。大量现代降水研究显示:中、高纬度地区,年降水的氧同位素值随温度的升高,每摄氏度增加 0.6‰ ^[18,20];平衡状态下,氧同位素值在碳酸盐矿物和水之间的分馏随温度的升高,每摄氏度降低 0.24‰ ;两者的综合效应使得氧同位素值随温度的升高,每摄氏度增加 0.36‰ ^[20,42]。

天山及周缘盆地降水主要受盛行西风带控制,降水来自于大西洋的水汽^[13,43]。青藏高原的隆升虽然会对区域气团运移造成一定影响,但不会对安集海河组时期该地区降水来源及降水同位素组成造成明显改变^[13,44-45]。此外,大气循环模拟显示该地区降水的氧同位素值不受季风影响^[13,46]。综上所述,该地区降水的氧同位素值变化不受降水来源改变或季风控制,而是温度影响的结果。

作为对比,降雨同位素全球台网(Global Network of Isotopes in Precipitation)数据显示,天山北缘现代(1986~2003 年)年平均降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-10.70\text{‰} \pm 1.52\text{‰}$,且夏季 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著高于冬季,8 月份平均值为 -5.40‰ ,12 月份平均值为 -20.58‰ ^[47]。安集海河组下部、中部和上部 $\delta^{18}\text{O}$ 值相比于顶部明显偏高(表 3),尤其是中部 $\delta^{18}\text{O}$ 值(平均为 -3.8‰)。 ^{18}O 的富集说明该时期区域平均温度较高,河水蒸发旺盛,重同位素富集。该时期的深湖沉积相特征表明此时降水较多,湖水较深。这一特征体现在该组地层的下部、中部和上部,尤其以中部突出,指示安集海河组前期气候的温暖湿润。另外,从下部到中部再到上部, $\delta^{18}\text{O}$ 值出现了先上

升后下降的变化特征,反映了当时气温经历了先上升而后有所下降的过程。

顶部 $\delta^{18}\text{O}$ 值出现了显著的负漂移,反映气温在此时出现较大幅度的下降。地层观察显示安集海河组顶部为滨湖相,湖水明显变浅,反映此时降水显著减少。因此,安集海河组顶部的沉积特征与氧同位素值共同表明,此时的气候已经由之前的温暖湿润转变为寒冷干旱。

4.4 碳同位素变化的环境解释

湖水中碳同位素组成与其碳来源、湖泊水文条件有关^[21,48]。现代湖泊水体资料显示,湖泊 $\delta^{13}\text{C}$ 值与注入湖泊的河流、地下水的 $\delta^{13}\text{C}$ 值接近,一般约为 -10‰ ^[21,48-49]。湖泊中碳酸盐矿物相对湖水溶解碳的分馏系数很小,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以很好地反映湖水的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。温度对湖相碳酸盐沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 值影响也不大,温度每升高 1℃ , $\delta^{13}\text{C}$ 值仅增加 0.035‰ ^[21,48-49]。生物作用对碳同位素的分馏有很大影响。通常,湖泊中植物光合作用优先吸收 ^{12}C ,会导致湖水中 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高^[48]。

安集海河组整体 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高,为 $-6.9\text{‰} \sim -4.1\text{‰}$,平均值为 $-0.8\text{‰} \pm 3.0\text{‰}$ 。中、下部相比于上部和顶部的 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏低。这可能是由于中、下部为深水沉积的还原环境,湖泊中水生植物分布相对较少,光合作用对水体的影响有限,导致湖水的 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏低。但中、下部的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相比现代湖泊(-10‰)偏高,可能是该时期温度较高、蒸发旺盛导致的。上部和顶部的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高,反映了该时期湖水变浅,湖泊水生植物的光合作用对水体的影响较大,导致水体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高。

邓松涛等对塔西河剖面的研究显示,该剖面安集海河组的土壤碳酸盐样品 ^{18}O 富集,碳同位素相比于新生界其他组偏重,代表了适宜 C_3 植物生长的温暖湿润环境^[12]。这一结论与本文显示的该组代表的整体环境特征相同,但未能体现组内顶部发生的显著变化。

4.5 构造作用

影响区域温度的因素包括地理位置(纬度、海拔)和全球气候条件等。随着纬度与海拔的升高,地区平均气温下降。全球气温记录显示,渐新世早期全球冰川发育持续到 $26 \sim 27\text{ Ma}$ 时期。此后,温度经历快速上升后,保持到约 15 Ma 时期^[50]。安集海河组时期环境由温暖湿润到寒冷干旱的改变发生在末期(约 24 Ma)^[23],该时期全球平均温度较为稳定。又由于这一气候变化伴随沉积相的改变,可以

表 3 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围与均值

Tab. 3 Distribution Range and Mean Values of

$\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$

位置	顶部	上部	中部	下部
$\delta^{18}\text{O}$	$-11.6\text{‰} \sim -7.4\text{‰}$	$-7.7\text{‰} \sim -4.6\text{‰}$	$-5.0\text{‰} \sim -2.5\text{‰}$	$-7.3\text{‰} \sim -3.4\text{‰}$
值	$(-9.8\text{‰} \pm 1.9\text{‰})$	$(-6.2\text{‰} \pm 1.1\text{‰})$	$(-3.8\text{‰} \pm 1.2\text{‰})$	$(-5.7\text{‰} \pm 1.4\text{‰})$
$\delta^{13}\text{C}$	$-6.9\text{‰} \sim 0.6\text{‰}$	$-1.0\text{‰} \sim 4.1\text{‰}$	$-5.6\text{‰} \sim -3.2\text{‰}$	$-3.3\text{‰} \sim 4.0\text{‰}$
值	$(-2.0\text{‰} \pm 3.4\text{‰})$	$(1.3\text{‰} \pm 1.6\text{‰})$	$(-4.0\text{‰} \pm 1.4\text{‰})$	$(-1.3\text{‰} \pm 2.9\text{‰})$

注:括号内为均值。

推断导致变化的主因不是全球气候条件,而是区域海拔抬升与地形改变。国内外学者研究表明,印度—亚欧板块碰撞远程效应在约 24 Ma 传播到北天山,天山北麓开始隆升变形^[1,22,51],这一过程引起周围地区的抬升及地形改变。安集海河组末期的气候变化可能与天山新生代的活化隆升有直接关系。另外,安集海河组末期湖泊封闭性发生较大变化也可能与这一构造事件有关。

5 结 语

(1)安集海河组大部分属于典型的深湖和半深湖亚相沉积,以灰色与灰绿色泥岩、粉砂质泥岩为主,夹薄层介壳灰岩、泥晶石灰岩,化石丰富。顶部出现粗砂岩、泥岩和粉砂岩的互层,并发育板状层理和波状层理,反映水体明显变浅,出现滨湖沉积。沉积环境发生了由深水湖相到浅水滨湖相的明显转变。

(2)安集海河组 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 $\delta^{13}\text{C}$ 值整体偏高,可进一步划分为 4 个部分:顶部、上部、中部和下部。 $\delta^{18}\text{O}$ 值在中部偏高,下部和上部相似且较中部稍低,顶部显著偏负; $\delta^{13}\text{C}$ 值在中部明显偏负,下部变化较大但比中部稍高,上部显著偏正。

(3)综合沉积相分析与氧碳同位素结果,安集海河组时期气候以温暖湿润为主,末期接近沙湾组时气温出现明显下降,气候变为干旱寒冷。这一变化不受降水来源改变及季风和全球气候条件影响,而可能与印度—亚欧板块碰撞远程效应导致的天山活化隆升有关。

参 考 文 献:

References:

- [1] HENDRIX M S, DUMITRU T A, GRAHAM S A. Late Oligocene-Early Miocene Unroofing in the Chinese Tianshan: An Early Effect of the India-Asia Collision[J]. *Geology*, 1994, 22(6): 487-490.
- [2] 李 忠,王道轩,林 伟,等.库车坳陷中—新生界碎屑组相对物源类型及其构造属性的指示[J]. *岩石学报*, 2004, 20(3): 655-666.
LI Zhong, WANG Dao-xuan, LIN Wei, et al. Mesozoic-Cenozoic Clastic Composition in Kuqa Depression, Northwest China: Implication for Provenance Types and Tectonic Attributes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3): 655-666.
- [3] 方世虎,郭召杰,贾承造,等.准噶尔盆地南缘中—新生界沉积物重矿物分析与盆山格局演化[J]. *地质科学*, 2006, 41(4): 648-662.
- FANG Shi-hu, GUO Zhao-jie, JIA Cheng-zao, et al. Meso-Cenozoic Heavy Minerals' Assemblages in the Southern Junggar Basin and Its Implications for Basin-orogen Pattern[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2006, 41(4): 648-662.
- [4] 杜治利,王清晨,周学慧.中生代库车—南天山盆地系统隆升历史的裂变径迹证据[J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26(5): 399-408.
DU Zhi-li, WANG Qing-chen, ZHOU Xue-hui. Mesozoic and Cenozoic Uplifting History of the Kuqa-South Tianshan Basin-mountain System from the Evidence of Apatite Fission Track Analysis[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2007, 26(5): 399-408.
- [5] LI C X, GUO Z J, DUPONT-NIVET G. Late Cenozoic Tectonic Deformation Across the Northern Foreland of the Chinese Tianshan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(5): 1066-1073.
- [6] LICHT A, CAPPELLE M V, ABELS H A, et al. Asian Monsoons in a Late Eocene Greenhouse World[J]. *Nature*, 2014, 513: 501-506.
- [7] MOLNAR P, TAPPONNIER P. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision[J]. *Science*, 1975, 189: 419-426.
- [8] CLARK BURCHFIEL B, ROYDEN L H. Tectonic of Asia 50 Years After the Death of Emile Argand[J]. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 1991, 84(3): 599-629.
- [9] AVOUAC J P, TAPPONNIER P, BAI M, et al. Active Thrusting and Folding Along the Northern Tien Shan and Late Cenozoic Rotation of the Tarim Relative to Dzungaria and Kazakhstan[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1993, 98(B4): 6755-6804.
- [10] YIN A, NIE S, CRAIG P, et al. Late Cenozoic Tectonic Evolution of the Southern Chinese Tianshan[J]. *Tectonics*, 1998, 17(1): 1-27.
- [11] 郭令智,朱文斌,马瑞士,等.论构造耦合作用[J]. *大地构造与成矿学*, 2003, 27(3): 197-205.
GUO Ling-zhi, ZHU Wen-bin, MA Rui-shi, et al. Discussion on the Structural Coupling[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2003, 27(3): 197-205.
- [12] 邓松涛,吴朝东,顾 潇,等.晚新生代以来天山北缘沉积记录及其稳定同位素变化的环境意义[J]. *岩石学报*, 2008, 24(4): 689-698.
DENG Song-tao, WU Chao-dong, GU Xiao, et al. Sedimentary Records and Paleoenvironmental Significance of Stable Isotopic Evidences from the Late Cenozoic, Northern Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(4): 689-698.

- [13] KENT-CORSON M L, RITTS B D, ZHUANG G S, et al. Stable Isotopic Constraints on the Tectonic, Topographic, and Climatic Evolution of the Northern Margin of the Tibetan Plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 282(1/2/3/4): 158-166.
- [14] MIAO Y F, YAN X L, SHAO Y J, et al. Cenozoic Ephedraceae Adaptation to Global Cooling in Northwestern China[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2011, 3(5): 375-380.
- [15] CHARREAU J, KENT-CORSON M L, BARRIER L, et al. A High-resolution Stable Isotopic Record from the Junggar Basin (NW China): Implications for the Paleotopographic Evolution of the Tianshan Mountains[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 341/342/343/344: 158-169.
- [16] LIANG X, JI J L, LU J F, et al. Cenozoic Evolution of Sediments and Climate Change and Response to Tectonic Uplift of the Northeastern Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2014, 88(3): 949-962.
- [17] 董欣欣, 丁仲礼, 杨石岭, 等. 晚渐新世中亚降温与干旱化[J]. *科学通报*, 2013, 58(17): 1680.
DONG Xin-xin, DING Zhong-li, YANG Shi-ling, et al. Synchronous Drying and Cooling in Central Asia During Late Oligocene[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(17): 1680.
- [18] DANSGAARD W. Stable Isotopes in Precipitation[J]. *Tellus*, 1964, 16(4): 436-468.
- [19] TALBOT M R. A Review of the Palaeohydrological Interpretation of Carbon and Oxygen Isotopic Ratios in Primary Lacustrine Carbonates[J]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 1990, 80(4): 261-279.
- [20] LENG M J, MARSHALL J D. Palaeoclimate Interpretation of Stable Isotope Data from Lake Sediment Archives[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(7/8): 811-831.
- [21] 伊海生, 林金辉, 周恳恳, 等. 青藏高原北部新生代湖相碳酸盐岩碳氧同位素特征及古环境意义[J]. *古地理学报*, 2007, 9(3): 303-312.
YI Hai-sheng, LIN Jin-hui, ZHOU Ken-ken, et al. Carbon and Oxygen Isotope Characteristics and Palaeoenvironmental Implication of the Cenozoic Lacustrine Carbonate Rocks in Northern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(3): 303-312.
- [22] 郭召杰, 张志诚, 吴朝东, 等. 中、新生代天山隆升过程及其与准噶尔、阿尔泰山比较研究[J]. *地质学报*, 2006, 80(1): 1-15.
GUO Zhao-jie, ZHANG Zhi-cheng, WU Chao-dong, et al. The Mesozoic and Cenozoic Exhumation History of Tianshan and Comparative Studies to the Junggar and Altai Mountains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(1): 1-15.
- [23] 季军良, 朱敏, 王旭, 等. 准噶尔盆地南缘新生代地层时代研究[J]. *地层学杂志*, 2010, 34(1): 43-50.
JI Jun-liang, ZHU Min, WANG Xu, et al. Ages of the Cenozoic Strata on the Southern Margin of Junggar Basin, Northwestern China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2010, 34(1): 43-50.
- [24] GAO J, LI M S, XIAO X C, et al. Paleozoic Tectonic Evolution of the Tianshan Orogen, Northwestern China[J]. *Tectonophysics*, 1998, 287(1/2/3/4): 213-231.
- [25] CHARVET J, SHU L S, LAURENT-CHARVET S, et al. Palaeozoic Tectonic Evolution of the Tianshan Belt, NW China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2011, 54(2): 166-184.
- [26] HAN B F, GUO Z J, ZHANG Z C, et al. Age, Geochemistry, and Tectonic Implications of a Late Paleozoic Stitching Pluton in the North Tianshan Suture Zone, Western China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2010, 122(3/4): 627-640.
- [27] HAN B F, HE G Q, WANG X C, et al. Late Carboniferous Collision Between the Tarim and Kazakhstan-Yili Terranes in the Western Segment of the South Tianshan Orogen, Central Asia, and Implications for the Northern Xinjiang, Western China[J]. *Earth-science Reviews*, 2011, 109(3/4): 74-93.
- [28] LIU D D, GUO Z J, JOLIVET M, et al. Petrology and Geochemistry of Early Permian Volcanic Rocks in South Tianshan, NW China: Implications for the Tectonic Evolution and Phanerozoic Continental Growth[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2014, 103(3): 737-756.
- [29] COLEMAN R G. Continental Growth of Northwest China[J]. *Tectonics*, 1989, 8(3): 621-635.
- [30] SENGOR A M C, CIN A, ROWLEY D B, et al. Space-time Patterns of Magmatism Along the Tethysides: A Preliminary Study[J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(1): 51-84.
- [31] SENGOR A M C, NATALIN B A. Paleotectonics of Asia: Fragments of a Synthesis[M] // YIN A, HARRISON M. *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 486-641.
- [32] XIAO W, WINDLEY B F, BADARCH G, et al. Palaeozoic Accretionary and Convergent Tectonics of the

- Southern Altaids: Implications for the Growth of Central Asia[J]. *Journal of the Geological Society*, 2004, 161(3): 339-342.
- [33] KRONER A, WINDLEY B F, BADARCH G, et al. Accretionary Growth and Crust-formation in the Central Asian Orogenic Belt and Comparison with the Arabian-Nubian Shield [J]. *Geological Society of America Memoirs*, 2007, 200: 181-209.
- [34] CHARVET J, SHU L S, LAURENT-CHARVET S. Paleozoic Structural and Geodynamic Evolution of Eastern Tianshan (NW China): Welding of the Tarim and Junggar Plates[J]. *Episodes*, 2007, 30(3): 162-186.
- [35] 王 超, 陈 斌, 马星华, 等. 东天山三岔口地区早、晚古生代岩体成因及其对康古尔缝合带演化的意义[J]. *地球科学与环境学报*, 2015, 37(5): 52-70.
WANG Chao, CHEN Bin, MA Xing-hua, et al. Petrogenesis of Early and Late Paleozoic Plutons in Sanchakou Area of East Tianshan and Their Implications for Evolution of Kangur Suture Zone[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2015, 37(5): 52-70.
- [36] BULLEN M E, BURBANK D W, GARVER J I, et al. Late Cenozoic Tectonic Evolution of the Northwestern Tianshan: New Age Estimates for the Initiation of Mountain Building[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2001, 113(12): 1544-1559.
- [37] WARTES M A, CARROLL A R, GREENE T J. Permian Sedimentary Record of the Turpan-Hami Basin and Adjacent Regions, Northwest China: Constraints on Postamalgamation Tectonic Evolution[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2002, 114(2): 131-152.
- [38] LU H F, HOWELL D G, JIA D, et al. Rejuvenation of the Kuqa Foreland Basin, Northern Flank of the Tarim Basin, Northwest China[J]. *International Geology Review*, 1994, 36(12): 1151-1158.
- [39] 刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 等. 天山两侧前陆冲断系构造样式与前陆盆地演化[J]. *地球科学*, 1994, 19(6): 727-741.
LIU He-fu, LIANG Hui-she, CAI Li-guo, et al. Evolution and Structural Style of Tianshan and Adjacent Basins, Northwestern China[J]. *Earth Science*, 1994, 19(6): 727-741.
- [40] 张志诚, 郭召杰, 吴朝东, 等. 天山北缘侏罗系地层热历史演化及其地质意义: 磷灰石裂变径迹和镜质体反射率证据[J]. *岩石学报*, 2007, 23(7): 1683-1695.
ZHANG Zhi-cheng, GUO Zhao-jie, WU Chao-dong, et al. Thermal History of the Jurassic Strata in the Northern Tianshan and Its Geological Significance: Revealed by Apatite Fission-track and Vitrinite-reflectance Analysis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(7): 1683-1695.
- [41] GARZIONE C N, DETTMAN D L, HORTON B K. Carbonate Oxygen Isotope Paleoelevation: Evaluating the Effect of Diagenesis on Paleoelevation Estimates for the Tibetan Plateau[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 212(1/2): 119-140.
- [42] EICHER U, SIEGENTHALER U. Palynological and Oxygen Isotope Investigations on Late-glacial Sediment Cores from Swiss Lakes[J]. *Boreas*, 1976, 5(2): 109-117.
- [43] AIZEN V B, AIZEN E M. Features of Regime and Mass Exchange of Some Glaciers on Central Asia Periphery [J]. *Bulletin of Glacier Research*, 1994, 12: 9-14.
- [44] LIU X, YIN Z Y. Sensitivity of East Asian Monsoon Climate to the Uplift of the Tibetan Plateau[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, 183(3): 223-245.
- [45] KUTZBACH J E, PRELL W L, RUDDIMAN W F. Sensitivity of Eurasian Climate to Surface Uplift of the Tibetan Plateau[J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 177-190.
- [46] ABE M, KITO H A, YASUNARI T. An Evolution of the Asian Summer Monsoon Associated with Mountain Uplift: Simulation with the MRI Atmosphere-ocean Coupled GCM[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2003, 81(5): 909-933.
- [47] IAEA/WMO. Global Network of Isotopes in Precipitation[DB/OL]. (2015-05-07)[2016-01-05]. http://www.naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_gnip.html.
- [48] STUIVER M. Oxygen and Carbon Isotope Ratios of Fresh-water Carbonates as Climatic Indicators [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(27): 5247-5257.
- [49] MCKENZIE J A. Carbon Isotopes and Productivity in the Lacustrine and Marine Environment[M] // STUMM W. *Chemical Processes in Lakes*. New York: John Wiley and Sons, 1985: 99-118.
- [50] ZACHOS J, PAGANI M, SLOAN L, et al. Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present[J]. *Science*, 2001, 292: 686-693.
- [51] HENDRIX M, GRAHAM S, CARROLL A, et al. Sedimentary Record and Climatic Implications of Recurrent Deformation in the Tianshan: Evidence from Mesozoic Strata of the North Tarim, South Junggar, and Turpan Basins, Northwest China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1992, 104(1): 53-79.