

文章编号: 1000-0550 (2005) 03-0507-07

临夏盆地 13 ~ 4.4 Ma 湖相沉积物颜色记录的 气候变化探讨

宋春晖¹ 白晋锋² 赵彦德¹ 金洪波¹ 孟庆泉¹

1(兰州大学西部环境教育部重点实验室 & 资源环境学院 兰州 730000) 2(太原理工大学 太原 030024)

摘要 利用高分辨率的代用资料来恢复古气候环境变化是当前过去全球变化研究的重要内容。通过对临夏盆地 13 ~ 4.4 Ma 时段稳定湖泊沉积物以 10 cm 间隔连续采得的 2 060 块样品进行颜色测定与分析, 获得该时段湖相沉积物高分辨率颜色指标变化序列。通过沉积物颜色与成分分析, 并与氯离子、CaCO₃、风成石英砂含量和孢粉组合以及北太平洋 ODP885/886 孔的风成粉沙通量变化曲线对比, 认为稳定湖相沉积物颜色指标是研究古气候变化的辅助性代用指标, 并揭示了该地区在 8 Ma 和 6.2 Ma 左右存在两次重大的气候变干转型事件。

关键词 湖相沉积物 颜色 气候变化 晚第三纪

第一作者简介 宋春晖 男 1959 年出生 教授 沉积学

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

1 前言

利用高分辨率的代用资料来恢复古气候环境变化是当前过去全球变化研究的重要内容^[1]。近三十年来, 利用沉积物粒度、磁化率、氧同位素和孢粉等指标很好的揭示了古气候变化, 特别是促进了短时期高分辨率气候变化研究取得了重大进展。然而长时期的高分辨率气候变化研究进展十分缓慢, 其主要原因之一是这些指标在应用研究时所需大量人力、财力以及实验繁琐而且缓慢, 难以进行大量高密度分析研究, 因而到目前长时期气候变化只有低分辨率宏观气候变化趋势, 它限制了对长时期气候变化规律深层次的认识。因此寻找用量少、灵敏度高、方法简单快速和费用低的新气候代用指标, 就成为长时期高分辨率气候变化研究技术途径上的关键突破点。利用沉积物颜色指标研究古气候变化是近年来古环境研究中又一新的探索方法, 研究表明色度指标可作为第四纪沉积物高分辨率气候指标^[2~6], 例如利用黄土—古土壤颜色 CIEL * a * b * 表色系统中的 L 数据进行分析来揭示的千年尺度气候波动^[7], 利用土壤颜色 (色相) 作为夏季风变化代替指标在对夏季风不稳定性研究中取得良好效果^[8]。但目前该方法主要用于土壤、黄土和古土壤颜色与气候关系的研究, 而其它沉

积环境沉积物颜色与气候变化缺乏研究。最近 Aziz 等对西班牙东北部 Teruel 盆地晚中新世冲积扇缘至湖相沉积物利用色度指标进行古气候研究, 揭示了晚中新世存在 Milankovitch 天文气候周期, 并以此利用色度指标的时间序列分析提出对目前广泛应用的古地磁年表 (GPTS)^[9] 晚中新世时段 (特别是其 C5 和 C4r) 进行修正^[10], 已初步显示出沉积物色度指标在古气候研究中的作用。湖泊沉积具有沉积连续、沉积速率大、分辨率高、信息量丰富的特点, 而且湖泊的地理覆盖面很广, 远远超过冰芯、黄土^[11], 所以一旦证实湖泊沉积物颜色指标可作为反映气候替代性指标, 由于其研究具用量少、灵敏度高、方法简单快速和费用低的特点, 因此在长时期高分辨率气候变化研究中具广泛的应用前景。

临夏盆地是青藏高原与黄土高原衔接带上的一个新生代盆地 (图 1), 处于东部季风区、西北干旱区及青藏高原旱区三大自然带的交汇地带, 对气候变化非常敏感^[12]。国家八五“攀登”计划青藏项目对其从地貌和年代综合测试方面做了大量扎实的工作, 取得了青藏高原构造隆升研究的重大进展^[13~15], 建立了 29 Ma 以来有高精度年代控制的较连续沉积序列^[16]。该盆地 29 ~ 1.7 Ma 一直处于封闭古湖状态^[17], 沉积以低能湖相细粒沉积物为主^[16, 18], 是研究

气候变化的理想地区。前期研究主要侧重于通过岩性变化确定了青藏高原构造隆升的大致过程^[13,14],同时也进行了低分辨率(样品间距大)气候环境指标(孢粉、常量和微量元素)的研究^[19~23]。我们野外调查发现临夏盆地以稳定细粒湖相沉积为主的 13~4.34 Ma 段地层,发育的不同尺度和各种形式沉积韵律旋回记录着有关古气候变化信息,并且这些不同尺

度和形式的沉积韵律旋回主要表现在颜色、结构(粒度)和物质成分等岩性特征变化方面,而这些变化可以用颜色指标较准确的定量描述出来。因此本文试图对临夏盆地 13~4.34 Ma 段稳定细粒湖相沉积物进行高分辨率色度指标变化序列研究,探讨封闭或半封闭稳定内陆湖相沉积物颜色指标变化的古气候意义。

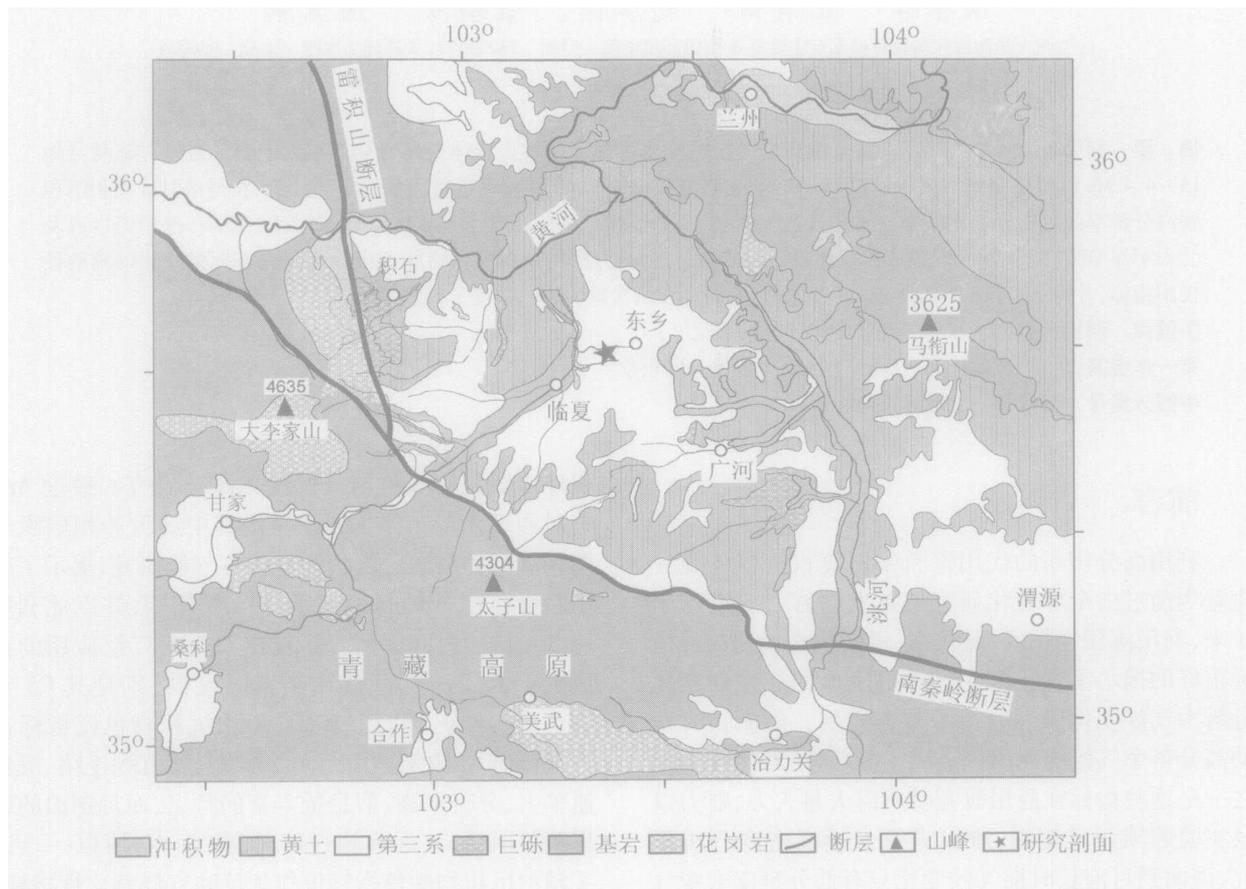


图 1 临夏盆地地质图

Fig 1 The geological map of Linxia Basin

2 地层和沉积相分析

研究剖面位于临夏盆地构造相对稳定的古湖盆中央地区(图 1),是原实测地磁极性事件完整连续的毛沟剖面^[16]。研究时段选择该剖面上部的东乡组、柳树组、何王家组,其年代为 13~4.4 Ma^[16]和岩性特征见表 1。根据岩性、粒度曲线、沉积结构和构造等特征,将该研究时段地层划分为 9 个岩相(表 2)以及湖泊、辫状河流、湖泊三角洲 3 种沉积相。

湖泊相分布于何王家组上段、柳树组、东乡组上

段,占研究时段剖面厚度的 95%,主要由厚层泥岩、粉砂岩夹细砂岩和泥灰岩组成,岩相组合为 S_k Sh₂ Fm、F₁和 P,地层横向延伸稳定。具水平层理、沙纹层理或块状构造,粒度曲线主要由悬浮总体组成,滚动和跳跃总体不发育。其中东乡组上段是以紫红色泥岩夹 10~50 cm 的兰灰色泥灰岩为特征,而柳树组上段和何王家组以褐黄、棕黄色钙质粉砂岩、泥岩夹细小泥灰岩团块为特征。

辫状河流相仅少量分布于何王家组底部(6.25~6.16Ma),占研究时段剖面厚度的 2%,主要由向

表 1 临夏盆地毛沟剖面 13~4.4 Ma 地层划分

Table 1 Stratigraphy division of Maogou cross section of 13-4.4 Ma in Lixia Basin

年代序列	地层划分	年代 /MaBP	厚度 /m	地层特征	
早上新世	何王家组	上段	4.4~6.16	63	褐黄色泥岩为主夹褐红色粉砂岩,含钙结核和泥灰岩团块
		下段	6.16~6.25	4	灰色钙质砂砾岩,透镜状,砾石 3-8cm,叠瓦构造,粗糙粒序层理
晚中新世	柳树组	上段	6.25~7.16	39	褐黄色粉砂岩与泥岩韵律互层,夹细砂岩,含钙质结核,具水平层理、小型交错层理
		下段	7.16~7.78	14	为褐黄色泥岩,夹兰灰色泥灰岩或泥岩条带,发育水平层理
	东乡组	上段	7.78~12.61	78	紫红色泥岩与兰灰色泥灰岩韵律互层,夹钙质粉砂岩,发育水平层理,含有介形虫
		下段	12.61~13.07	6	底部灰色砂质细砾岩和砂岩,上部褐红色、兰灰色水平纹层状粉砂岩和泥岩

表 2 临夏盆地毛沟剖面沉积岩相划分(据沉积盆地分析原理,1991 修改)

Table 2 Lithofacies classification of Maogou cross section in Lixia basin (modified from the Principle of Sedimentary Basin Analysis, 1991)

相符号	岩相	沉积构造	成因解释
Gm	砾石,颗粒支撑,中—差分选	块状构造,叠瓦构造,无或显微粒序	高流态,滞留沉积
Gp	砾石,颗粒支撑,中—差分选	粗糙斜层理,无或显微粒序	高流态,滞留沉积
Gl	薄层或透镜状砾,杂基支撑,差分选	粒序层理或无内部组构	小型河道充填
Sr	粉—粗砂,中—好分选	小型沙纹交错层理	低流态或湖泊沉积
Sh2	粉—细砂,中—好分选	平行层理	低流态或湖泊沉积
Sm	泥—粗砂,可含砾,中—差分选	块状构造,无或显微粒序	高密度流沉积
F1	粉砂、泥、细砂	水平层理,沙纹交错层理,波状层理	三角洲,河漫或湖泊沉积
Fm	粉砂、泥	块状构造	三角洲,河漫或湖泊沉积
p	泥灰岩	含粉砂和生物化石	湖泊沉积

上变细变薄的透镜状砾岩、砂砾岩和砂岩组成,岩相组合以 Gm 和 Gp 为主,缺少垂向加积的粉砂岩和泥岩,其中砾岩底部发育冲刷面,成分成熟度低,砾石排列具明显的叠瓦构造,分选较差至中等,粒度曲线由三个总体构成,滚动组分含量高且粗和细截点为突变,表明属典型的辫状河流河道沉积产物。

湖泊三角洲相仅分布于研究剖面下部东乡组的底部(13.07~12.61 Ma),占研究时段厚度的 3%,由灰色砂质细砾岩、砂岩和粉砂质泥岩、泥岩组成,岩相组合为 Gm、Gl、Sm、F1、Fm 和 P。其中泥灰岩、粉砂质泥岩和泥岩横向分布稳定,具浅湖相特征;砂岩和砂砾岩呈透镜状,分选好,磨圆中等,成分成熟度较高,具正粒序构造,粒度曲线与河流相一致,属湖泊三角洲沉积产物。

可见,临夏盆地毛沟一带 13~4.4 Ma 期间(东乡组至何王家组)沉积连续,主要为稳定的单一低能细粒湖相沉积物为主。

3 样品采集与测试

为了获取沉积物原生色避免采取由于风化作用

影响使露头表面形成的次生色,首先对上述稳定湖相剖面表面进行彻底开挖清理至新鲜原生色面,在此基础上以 10 cm 等间隔(平均样点年龄间距约 4.2 kyr)进行高密度连续系统采样(个别地方加密),同时对采得样品现场用塑料袋进行密封以防止氧化,共采集实测样品 2060 块。

本文所色度指标与 Aziz 等^[10]研究利用的指标一致,用 CIE L*a*b*(1976 年)表色系统,它是使用 L*, a*, b* 三个参数描述任何均匀连续的颜色空间,其中 L* 代表明度,变化于黑(0)和白(100)之间, a* 变化于红和绿之间(+a* 描述红色的饱和程度, -a* 描述绿色的饱和程度), b* 变化于黄和蓝之间(+b* 描述黄色的饱和程度, -b* 描述蓝色的饱和程度),即 a* 代表红绿, b* 代表黄蓝^[24],彩度 C_{a*,b*} 是反映 a*, b* 共同作用特征的。使用的仪器是日本美能达公司的 SPAD-503 土色仪。它是基于 CIE 标准制造的,是目前最流行的分光测色仪之一。观察条件为 10 视野、D65 标准光源;光学条件为 8 方向照明扩散受光方(正反射成分除去);使用 CR-A74 白色校正板;标准偏差(E*_{ab})控制在 0.1

以内。所有样品经烘干和碾磨均匀后,在室温下,取 2~3 g 放于白色参照色板上,压实和压平后,随机取三个区域用土色仪进行测量,然后平均求得样品颜色的各个参数值。仪器可测定的 a^* 和 b^* 值均限于 ± 60 之间。

4 测试结果与讨论

通过上述对 2060 块沉积物色度指标的系统测试,获得临夏盆地 13~4.4 Ma 湖相沉积物高分辨率颜色指标变化序列(图 2),从图 2 可看出颜色指标 a^* 、 b^* 、 $C_{a^*b^*}$ 、 L^* 可明显分 3 个阶段,分别是 13~8 Ma, 8~6.2 Ma 和 6.2~4.4 Ma。其中 a^* 值和 b^* 值变化非常相似,而 $C_{a^*b^*}$ 值是反映 a^* 、 b^* 共同作用特征,因此三者曲线特征:在 13~8 Ma 变幅和数值较大,到 8 Ma 后变幅和数值都突然减小,至 6.2 Ma 后变幅进一步减小; L^* 值在变幅变化上与 a^* 和 b^* 相同,但在数值变化则相反,即 L^* 值在 13~8 Ma 变幅较大、数值相对小,到 8 Ma 后变幅突然减小而数值相对增加,至 6.2 Ma 后数值又相对减小。因此,临夏盆地 13~4.4 Ma 湖相沉积物高分辨率颜色指标变化序列反映在 8 Ma 和 6.2 Ma 左右可能存在某种转型事件。

由于沉积物(岩)的不同颜色取决于成分,并与形成的环境和古气候变化密切相关,因此我们对颜色测试的同样样品进行沉积物元素分析(X 射线荧光光谱仪测试)。通过湖泊沉积物颜色参数与元素含量相关性分析(表 3),表明沉积物颜色 a^* 和 b^* 值具有较好正相关性的是 Al、Si、K、Fe、Co、Rb、Th (其中相关系数最大的常量元素为 Fe,相关系数分别为 $p=0.582$ 、 $p=0.579$),而与 a^* 和 b^* 值具有

负相关性的是 Ca、Mg、La (其中负相关系数最大的常量元素为 Ca,相关系数分别是 $p=-0.509$ 、 $p=-0.473$);沉积物颜色的 L^* 值与常量元素 Ca 具有较好正相关性(相关系数是 $p=0.546$),而与 b^* 值具较好负相关的是 Al、K、Fe、Co、Rb、Th (其中负相关系数最大的常量元素为 Fe,相关系数是 $p=-0.614$)。因此湖泊沉积物中 Fe、Ca 含量在很大程度上影响了其颜色变化,这与 Jan P. Helmke 等依据对北大西洋深海 M23414 岩芯的红-绿颜色变化是由沉积物中含铁矿物所控制的结论^[25]基本一致。在研究区 13~4.4 Ma 时段主要为稳定湖泊沉积环境且物源区母岩一定,沉积物成分变化主要受风化作用类型和强度、沉积介质条件以及气候变化控制,而气候变化影响着风化作用类型和强度、沉积介质条件以及湖泊水位高低的变化。气候干旱使湖泊水位降低、介质浓度增大,形成湖相沉积物中的 CaCO_3 含量相对增加,导致湖相沉积物颜色的 a^* 和 b^* 值减小以及 L^* 值增大;气候湿润导致湖泊水位升高,使湖相沉积物中的 CaCO_3 含量相对减小,造成湖相沉积物颜色的 a^* 和 b^* 值增大以及 L^* 值减小。因此稳定湖相沉积物颜色指标能间接代表气候的变化。

将临夏盆地沉积物颜色指标与前人在同一剖面进行沉积物 CaCO_3 含量^[19]、氯离子含量^[20]和 风成石英砂含量^[22]研究结果对比,图 2- 临夏盆地沉积物碳酸钙含量大约在 12、10、9 和 8 Ma 左右以及 6.6~4.5 Ma 有明显的高值说明在这些时期气候干旱,尤其在 6.6~4.5 Ma 碳酸钙含量平均值非常高,代表了极端干旱期。图 2- 临夏盆地沉积物氯离子含量平均值从 6.87 Ma 急剧增加,并持续至 4.5 Ma,而且含量波动非常大^[20],其中 6.2~5.8 Ma 受河流作用影响出现低

表 3 临夏盆地湖相沉积物颜色指标元素与元素颜色的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of sediment elements and colors

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Ti
a^*	-0.136	-0.189	0.586	0.284	0.510	-0.509	0.582	0.253
b^*	0.077	-0.504	0.399	0.437	0.384	-0.473	0.579	0.559
L^*	-0.003	0.382	-0.584	-0.370	-0.546	0.546	-0.614	-0.405
	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	La	Pb	Th
a^*	0.268	0.114	0.275	0.255	0.373	-0.552	0.202	0.584
b^*	0.119	0.133	0.408	0.428	0.265	-0.934	0.278	0.485
L^*	-0.238	-0.008	-0.418	-0.408	-0.253	0.701	-0.183	-0.575
	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Rb
a^*	-0.107	-0.120	-0.120	0.581	0.246	0.286	0.342	0.628
b^*	-0.131	0.038	-0.371	0.558	0.324	0.385	0.427	0.521
L^*	0.089	-0.007	0.154	-0.563	-0.242	-0.396	-0.389	-0.636

值, 5.8~4.5 Ma出现极高值, 代表了气候极端干早期。从图 2- 临夏盆地沉积物风成石英砂分别大约在 8 Ma、6~5 Ma出现两个高峰, 表明这两个时期本区风成石英砂堆积活动极强盛, 代表了气候干旱^[22]。由于沉积物色度 a^* 、 b^* 和 $C_{a,b,c}$ 的变化曲线基本一致, 而与 L^* 的曲线变化大致相反, 因此以 a^* 值为例 (图 2), a^* 值在 13~8 Ma以高值为主, 但其中出现的低值可以明显与碳酸钙出现的高值对应, 8 Ma以后数值和变幅突然减小以及 6.2~4.5 Ma变幅进一步减小与风成石英砂到 8 Ma时候达到第一个高峰值和 6.2 Ma以后的高峰值很好对比, 同时与碳酸钙含量在 8 Ma和 6.6~4.5 Ma以及氯离子平均含量值在 6.4~4.5 Ma高值对应。另一方面临夏盆地晚新生代沉积物孢粉组合研究表明: 13.0~8.5 Ma主要由柏科、红豆杉属、刺柏属、栎粉属、桦粉属、岑粉属、毛茛科、蓼科及灌木胡颓子粉属和忍冬粉属等组成, 植被类型为在较温暖湿润环境中发育的森林植被。8.5

~6.0 Ma主要由藜粉属、蒿粉属和禾本组成, 伴生分子为菊科、毛茛科及十字花科、伞形科、蓼科、桦粉属、栎粉属、柳粉属、岑粉属、柏科、杉科和刺柏属等, 植被类型为干旱环境中生长的干草原植被^[23]。需要指出上述大约 8 Ma气候变化的化学代用指标 - 碳酸钙和氯离子含量峰值虽然不明显, 但气候变化物理代用指标 (风成石英砂^[22]和孢粉组合^[23]) 明显指示了此时气候的干旱化, 因此这可能与湖泊水体浓缩过程造成沉积物中碳酸钙和氯离子含量增大对气候变化的响应具滞后性。因此临夏盆地湖相沉积物颜色指标 a^* 、 b^* 和 $C_{a,b,c}$ 的低值或 L^* 高值可能代表气候的干旱, 反之代表气候的湿润, 而它们变幅的大或小可能代表气候变化的波动或稳定性。综上分析, 临夏盆地湖相沉积物高分辨率颜色指标变化表明该区 13~4.4 Ma存在二次气候转型和三个气候变化阶段: 13~8 Ma气候以湿润为主, 但气候干湿变化波动大, 其中出现多次短暂干旱气候。8 Ma

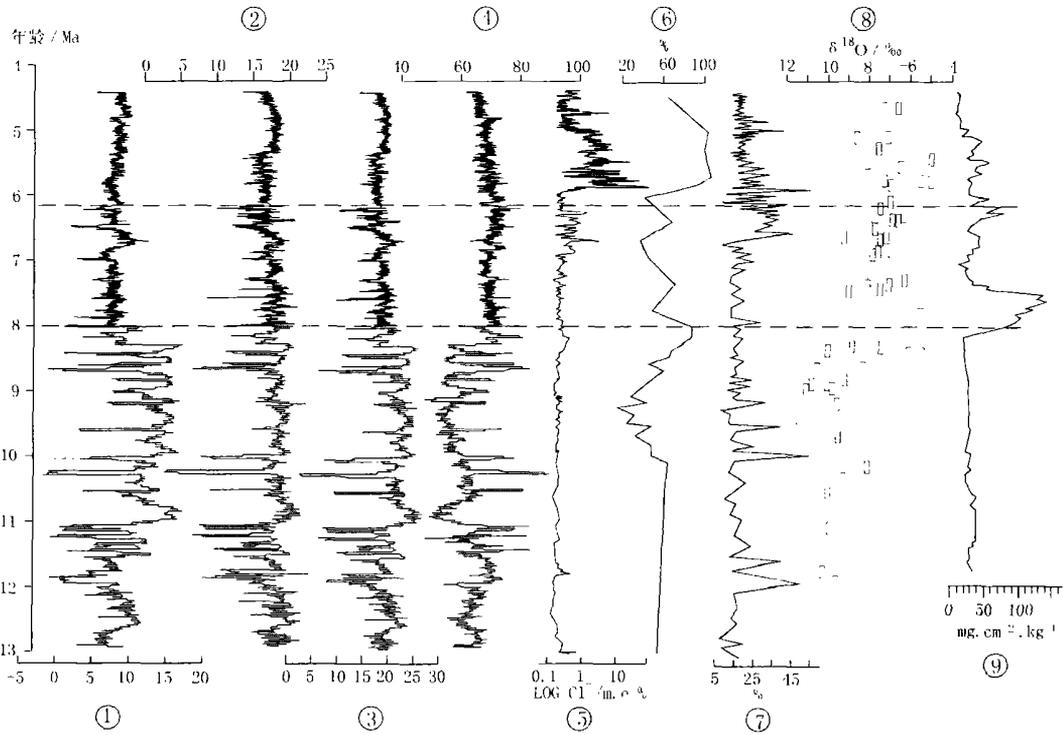


图 2 临夏盆地湖相沉积物颜色指标变化序列及其与氯离子、风成石英砂、CaCO₃、巴基斯坦土壤碳酸盐中氧同位素和北太平洋 ODP885/886孔风成粉沙堆积比率对比

色度指标 a^* ; 色度指标 b^* ; 色度指标 C_{a+b+c} ; 色度指标 L^* ; 氯离子含量; 风成石英砂含量; 碳酸钙含量; 巴基斯坦古土壤碳酸盐氧同位素曲线; 北太平洋 ODP885/886孔风成粉沙堆积比率曲线

Fig 2 The sequences of lake sediment color, chlorine ion, aeolian quartz and calcite in Linxia Basin, ¹⁸O of soil carbonate in Pakistan and sedimentation rate of airborne silt from ODP885/886 drill in North Pacific Ocean

以后气候转型, 8~6.2 Ma 气候以干旱为主, 虽然其中出现极为短暂的湿润气候, 但相对稳定。至 6.2 Ma 以后气候干旱化进一步加剧, 6.2~4.4 Ma 气候特点比上个阶段更加稳定, 可能与东亚季风(北西向冬季风)形成有关。

区域上目前研究表明我国黄土高原风成红粘土的下限年龄达到 8~7 Ma, 说明我国北方干旱化 8 Ma 左右开始形成。在青藏高原南部依据巴基斯坦北部波特瓦尔高原西瓦利克沉积中古土壤碳酸盐氧同位素所反映的生态环境在约 7.4~7 Ma 时产生由 C3 森林植被向 C4 草原植被的快速转型变化^[26](图 2-)。北太平洋 ODP885/886 孔的风成粉沙通量^[27]在 8~7.4 Ma 和 6.3~6 Ma 大幅增加(粉尘来自亚洲内陆干旱区), 代表了两次气候极端干旱事件(图 2-)。这些与青藏高原东北缘临夏盆地湖相沉积物色度指标揭示的 8 Ma 和 6.2 Ma 左右两次重大的气候变干的转型事件一致, 而这二次气候的转型可能与东亚季风(北西向冬季风)形成和发展有关。

可见, 湖泊沉积物的颜色指标可以作为研究古气候变化的辅助性代用指标。需要指出的是湖泊沉积物颜色变化与气候关系的分析仅是初步工作, 由于影响湖相沉积物颜色的因素复杂如沉积物的介质条件、物质组成等, 要正确理解和认识湖泊沉积物颜色指标与气候的关系和机制, 需要进一步大量的研究工作和验证。

参考文献 (References)

- Oldfield P. Past Global Changes (PAGES): Status report and implementation Plan, Global Change Report, No. 45. Sweden, Stockholm: IGBP, 1998, 1~112
- Cortijo E, Yiou P, Labeyrie L, *et al*. Sedimentary record of rapid climatic variability in the North Atlantic Ocean during the last glacial cycle. *Paleoceanography*, 1995, 10: 911~926
- Hughen K A, Overpeck J T, Peterson L C, *et al*. Rapid climate changes in the tropical Atlantic region during the last deglaciation. *Nature*, 1996, 380: 51~54
- Rodbell D T, Seltzer G O, Anderson D M, *et al*. A 15000-year record of El Niño-driven alluviation in southwestern Ecuador. *Science*, 1999, 283: 516~520
- Porter S C. High-resolution paleoclimatic information from Chinese eolian sediments based on grayscale intensity profiles. *Quaternary Research*, 2000, 53: 70~77
- Yang Shengli, Fang Xiaomin, Li Jijun, *et al*. Transformation functions of soil color and climate. *Science in China (Series D)*, 44(Supp.): 218~226
- 黄维, 剑志民, Buhning C. 南海北部 ODP 1144 站颜色反射率揭示的千年尺度气候波动. *海洋地质与第四纪地质*. 2003, 23(3): 6~10 [Huang Wei, Jian Zhimin, Buhning C. The millennial-scale climate fluctuations revealed by the records of color reflectance from ODP site 1144 in the Northern South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(3): 6~10]
- 方小敏, 潘保田, 管东红, 等. 兰州约 60ka 以来夏季风千年尺度不稳定性研究. *科学通报*, 1999, 44(4): 436~439 [Fang X M, Pan B T, Guan D H, *et al*. A 60,000-year less-paleosol record of millennial-scale summer monsoon instability from Lanzhou, China. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(24): 2264~2266]
- Cande S C, Kent D V. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 6093~6095.
- Aziz, H A, Dam J, Hilgen F J, Krijgsman W. Astronomical forcing in Upper Miocene continental sequences: implications for the Geomagnetic Polarity Time Scale. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 222: 243~258
- 王苏民. 湖泊沉积的信息原理与研究趋势. 见: 张兰生. 中国生存环境历史演变规律研究. 北京: 海洋出版社, 1993. 22~31 [Wang S M. The Principle of Lacustrine Information and the Trend of Study. In: Zhang Lansheng ed. *The Study of the Evolution of Existent Environment in China*. Beijing: Ocean Press, 1993. 22~31]
- Li Jijun, Feng Zhaodong, Tang Lingyu. Late Quaternary monsoon patterns on the Loess Plateau of China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1988, 13: 125~135
- 李吉均, 方小敏, 马海州, 等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起. *中国科学 (D 辑)*, 1996, 26(4): 316~322 [Li J J, Fang X M, Ma H Z, *et al*. Geomorphological and environmental evolution in the upper reaches of the Yellow River during the Late Cenozoic. *Science in China (Series D)*, 1996, 39(4): 380~390]
- 李吉均, 方小敏. 青藏高原隆起与环境变化研究. *科学通报*, 1998, 43(15): 1568~1574 [Li Jijun and Fang Xiaomin. Uplift of the Tibetan Plateau and environmental changes. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(23): 2117~2124]
- 施雅风, 汤懋苍, 马玉贞. 青藏高原二期隆升与亚洲季风孕育关系探讨. *中国科学 (D 辑)*, 1998, 28(3): 263~271 [Shi Y F, Tang M C, Ma Y Z. The two period uplift of Tibetan Plateau with Asia monsoon formation. *Science in China (Series D)*, 1998, 28(3): 263~271]
- 方小敏, 李吉均, 朱俊杰, 等. 甘肃临夏盆地新生代地层绝对年代测定与划分. *科学通报*, 1997, 42(14): 1457~1471 [Fang X M, Li J J, Zhu J J, *et al*. The absolute dating and demarcation of the Cenozoic stratigraphy in the Linxia basin, China. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(14): 1457~1471]
- 李吉均, 方小敏, 朱俊杰, 等. 临夏盆地新生代地层古地磁年代与模式序列. 见: 青藏项目专家委员会编. 青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究 (1994). 北京: 科学出版社, 1995. 41~53 [Li J J, Fang X M, Zhu J J, *et al*. Paleomagnetic chronology and type sequence of the Cenozoic stratigraphy in the Linxia basin. In: Expert Committee of the Tibet Project ed. *Study of Evolution Process, Environmental Change and Ecological System of the Tibet Plateau*

- Beijing: Science Press, 1995. 41~53]
- 18 李吉均, 方小敏, 潘保田, 等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响. 第四纪研究, 2001, 21(5): 381~391 [Li J J, Fang X M, Pan B T, *et al* Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai - Xizang Plateau and its impacts on environments in surrounding area Quaternary Sciences, 2001, 21(5): 381~391]
 - 19 方小敏, 李吉均, 朱俊杰, 等. 临夏盆地约 30Ma 以来 CaCO₃ 含量变化与气候演变. 见: 青藏项目专家委员会编. 青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究. 北京: 科学出版社, 1995. 55~65 [Fang X M, Li J J, Zhu J J, *et al* CaCO₃ and climate change since 30 Ma in the Linxia basin In: Expert Committee of the Tibet Project ed Study of Evolution Process, Environmental Change and Ecological System of the Tibet Plateau Beijing: Science Press, 1995. 55~65]
 - 20 方小敏, 奚晓霞, 李吉均, 等. 中国西部晚中新世气候变干事件的发现及其意义. 科学通报, 1997, 42(23): 2521~2524 [Fang X M, Xi X X, Li J J, *et al* The arid events of the late Miocene in the west of China Chinese Science Bulletin, 1997, 42(23): 2521~2524]
 - 21 钟巍, 李吉均, 朱俊杰, 方小敏. 近 7.0~0.73MaBP 期间甘肃临夏盆地古气候演变的沉积物地球化学记录. 干旱区资源与环境, 1998, 12(1): 36~43 [Zhong Wei, Li Jijun, Zhu Junjie, Fang Xiaomin The geochemical record of paleoclimate during about 7 - 0.73 Ma in Linxia basin, Gansu province. Journal of Arid and Resources and Environment, 1998, 12(1): 36~43]
 - 22 王建力, 方小敏. 临夏盆地晚中新世以来的风沙沉积及环境意义. 地理科学, 2000, 20(3): 259~263 [Wang Jianli, Fang Xiaomin Eolian sand deposition and its environmental signification in Linxia basin since middle Miocene Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(3): 259~263]
 - 23 马玉贞, 李吉均, 方小敏. 临夏地区 30.6~5.0Ma 红层孢粉植物群与气候演化记录. 科学通报, 1998, 43(3): 301~304 [Ma Y Z, Li J J, Fang X M. Pollen assemblage in 30.6 - 5.0 Ma redbeds of Linxia region and climate evolution Chinese Science Bulletin, 1998, 43(3): 301~304]
 - 24 汤顺青主编. 色度学. 北京: 北京理工大学出版社, 1990 [Tang Shunqing Chroma Science Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990]
 - 25 Jan P. Helmke, Henning A Bauch. Glacial interglacial relationship between carbonate components and sediment reflectance in the north Atlantic. Geology Marine Letters, 2001, 21: 16~22
 - 26 Quade J, Cerling T E, Bowman J R. Development of Asian Monsoon revealed by mark ecological shift during the latest Miocene in Northern Pakistan Nature, 1989, 342: 163~166
 - 27 Snoeckx H, Rea D K, Jones C E, *et al* Aeolian and silica deposition in the central North Pacific: Results from leg 145 sites 885/886. Proc. Ocean Drill Program. Science Results, 1995, 145: 219~230

The Color of Lacustrine Sediments Recorded Climatic Changes from 13 to 4.5 Myr in Linxia Basin

SONG Chun-hui¹ BA I J in-feng² ZHAO Yan-de¹ JING Hong-bo¹ MENG Qing-quan¹

¹ (Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education of China) & College of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000) ² (Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024)

Abstract It is an important content that recovering paleoclimatic environment change by using high-resolution substitute proxy. The paper established a high-resolution sequence of the color records of the lacustrine sediments from 13 to 4.5Ma through the measurement of continuous 2060 samples collected in Linxia basin at an interval of 10cm. Based on the analyses of sediment color with the sediment composition, and compare the color records with the content variation curves of chloride ion, aeolian quartz, calcium carbonate and pollen in the Linxia basin as well as aeolian silt from ODP885/886 drill in North Pacific Ocean, the relationship between the color records of lacustrine sediments and climate changes are discussed, and the two climatic shifts about 8 and 6.2 Myr are revealed.

Key words the color records of lacustrine sediments, climatic change, Neogene