

文章编号: 1000-0550(2007) 03-0409-08

临夏盆地晚新生代沉积物元素特征与古气候变迁

宋春晖 鲁新川 邢强 孟庆泉 夏伟民 刘平 张平

(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)

摘要 青藏高原东北临夏盆地发育较完整的晚新生代地层, 特别 13~4.34 Ma 段以稳定低能细粒湖相沉积为主、发育的不同尺度和各种形式沉积韵律旋回记录着古气候变化信息。本文通过对临夏盆地稳定细粒湖相沉积物元素地球化学特征及其变化序列研究, 结合其它气候指标, 揭示 13~4.4 Ma 时段气候演化经历了四个阶段: 13~12 Ma 期间气候湿润、12~7.8 Ma 期间气候以湿润为主夹短暂干旱事件、7.8~6.2 Ma 期间气候以干旱为主、6.2~4.4 Ma 期间气候进一步干旱加剧, 并认为 7.8 Ma 左右的气候转型可能与冬季风加强有关, 而 6.2 Ma 以来的有规律的高频气候波动可能与现代季风形成有关。

关键词 元素 古气候 湖相沉积物 临夏盆地 晚新生代

第一作者简介 宋春晖 男 1959 年出生 教授 沉积学 E-mail: songchh@lzu.edu.cn

中图分类号 P512.2 P534.63 **文献标识码** A

1 前言

全球环境变化一直是众多学者研究的焦点问题, 并且运用多种方法(氧同位素、磁化率、孢粉、沉积物粒度等)对其进行有意义的研究。喜马拉雅山脉和青藏高原巨大的高度及广阔的分布对亚洲气候有着重要影响^[1-4]。随着研究不断深入和范围的扩大, 对青藏高原周边地区研究表明 8 Ma 左右北太平洋粉尘通量有较大的增加^[5]、印度洋沉积速率增加^[6]、南亚巴基斯坦和尼泊尔植被由 C₃型(森林和灌丛植被类型)转变为 C₄型(草原植被类型)^[7,8]、中国南海有孔虫快速的降低^[9]、黄土高原风成红粘土开始堆积^[10-15], 他们被认为是与亚洲内陆干旱化的发生或东亚冬季风的形成有关, 并且认为青藏高原的隆升可能是主要影响因素之一。同时有的学者认为风成堆积开始更早始于 22 Ma^[16]。可见对亚洲季风或干旱化开始的时间和演化过程存在不同的认识, 而这些问题涉及对全球新生代以来一系列环境生态事件序列和亚洲当代环境形成的理解。由于上述记录主要是来自风成黄土、红粘土和海洋沉积物, 而陆相湖泊沉积物, 尤其是封闭或半封闭湖泊沉积物具有连续、敏感和高分辨特点, 是气候和环境演化的敏感指示器, 因此在研究恢复重建古气候演化、全球变化和区域差异方面湖泊沉积物具有其他陆地记录不可替代的优

势^[17,18]。

临夏盆地位于青藏高原的东北部, 是青藏高原与黄土高原衔接带上的一个晚新生代断陷盆地(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, 对气候变化极为敏感, 成为研究青藏高原隆升和气候演变的理想场所^[19]。前人对其地貌、古生物化石和地层年代测试等方面进行了大量扎实的研究, 取得了上新世以来青藏高原隆升方面重大进展^[3,20-22]。该盆地 29~3.6 Ma 为一半封闭古湖状态^[22], 并且沉积较连续^[20-22], 特别 13~4.4 Ma 段地层以稳定低能细粒湖相沉积为主、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^[23]。因此, 本文通过对临夏盆地 13~4.4 Ma 稳定湖相沉积物高密度常量元素分析, 结合其它气候环境指标, 探讨该地区 13~4.4 Ma 古气候变化, 为亚洲内陆干旱化和东亚冬季风形成和演化的研究提供依据。

2 地层与沉积相

临夏盆地中央地区, 13~4.4 Ma 时段地层包括东乡组、柳树组、何王家组(图 1, 图 3)。东乡组下段(13.07~12.60 Ma)由灰色砂质细砾岩、砂岩以及褐红色、兰灰色粉砂岩和泥岩组成。上段(12.61~7.78 Ma)为紫红色泥岩与兰灰色泥灰岩韵律互层, 夹钙质粉砂岩; 柳树组下段(7.78~7.16 Ma)由褐黄色块状泥岩夹数条兰灰色泥灰岩或泥岩构成。上段(7.16

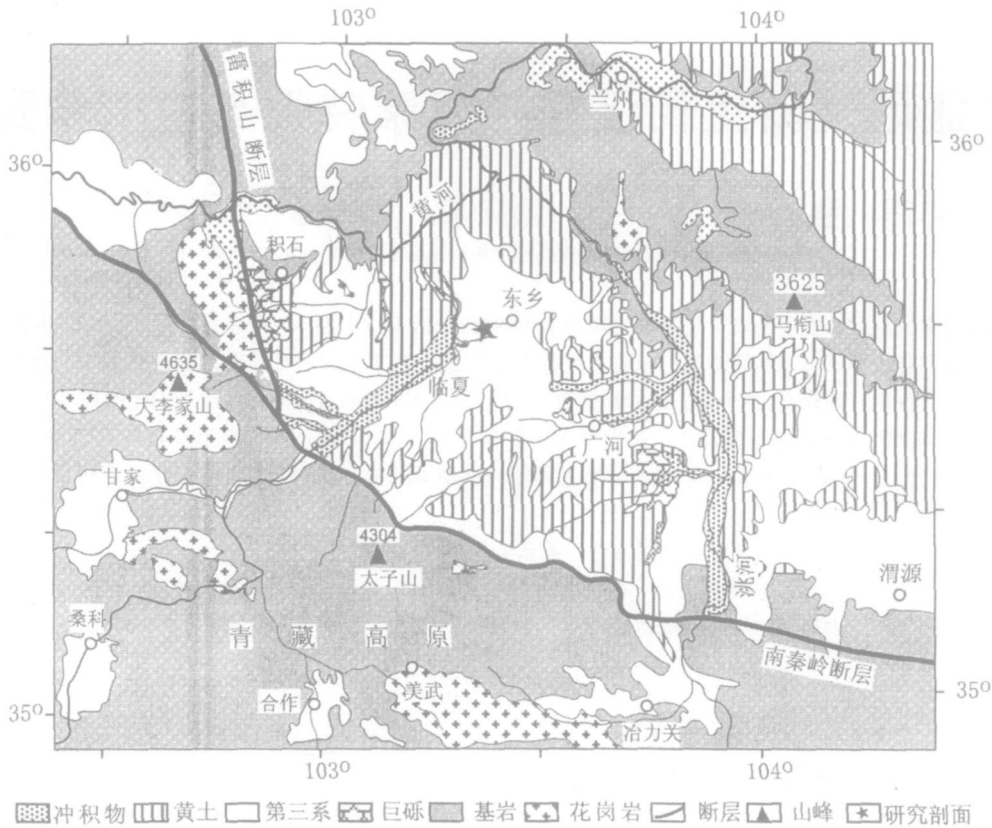


图 1 临夏盆地地质图

Fig 1 The geological map of Linxia Basin

~ 6.25 Ma) 为褐黄色粉砂岩与泥岩韵律互层, 夹细砂岩; 何王家组下段 (6.25~ 6.16 Ma) 是灰黄色钙质胶结砂砾岩, 上段 (6.16~ 4.4 Ma) 主要为褐黄色泥岩夹褐红色粉砂岩, 含大量钙结核和泥灰岩团块。根据岩性、粒度曲线、沉积结构和构造等特征, 该研究层段可划分为湖泊、辫状河流、湖泊三角洲 3 种沉积相^[23]。

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 93%, 主要由厚层泥岩、粉砂岩夹细砂岩和泥灰岩组成, 地层横向延伸稳定, 具水平层理、沙纹层理或块状构造, 含介形虫和硅藻。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则以褐黄、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~ 6.16 Ma), 占研究时段剖面厚度的 2%, 主要由向上变细变薄的透镜状砾岩、砂砾岩和砂岩组成。砾岩具颗粒支撑、中-差分选, 砾石呈叠瓦状排列和底部发育冲刷面的河流沉积特征。

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%, 由砂质细砾岩、砂岩和粉砂质泥岩或泥岩组成, 夹泥灰岩。砂质砾岩和砂岩为透镜状、颗粒支撑、块状构造。泥灰岩、粉砂质泥岩和泥岩横向分布稳定, 具浅湖相特征。因此临夏盆地中央地区 13~ 4.4 Ma 期间主要为稳定的单一低能细粒湖相连续沉积, 是进行陆相湖泊沉积物研究古气候与环境变迁的良好载体。

3 样品采集与分析结果

采样剖面选择于临夏盆地古湖盆中央地区构造影响和岩性变化相对小、已获得完整连续高密度磁性地层年代资料的毛沟剖面上部 203.5 m (13~ 4.43 Ma)^[20, 21], 时间标尺是根据方小敏等 (1997) 和 Fang 等 (2003) 对该剖面五套高密度古地磁平行样品相互验证结果^[20, 21], 样点年代由沉积速率获得。在开挖新鲜剖面基础上自下而上进行系统、间距为 0.5 m 的采样, 在岩性变化处加密为 0.1 m, 共获得 453 块样品。对全部样品首先进行 200 目以下分析组分的提取, 然

后在兰州大学西部环境教育部重点实验室利用荷兰菲利谱公司 Magik PW 2403 型 X 射线荧光光谱仪进行元素测量。通过测试 GSD9 十二次得到分析的相对偏差约 1%、精度误差除 $\text{Na}_2\text{O} < 5\%$ 外, 均 $< 2\%$ 。

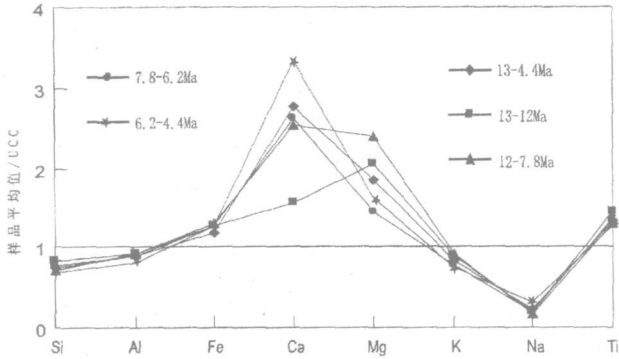


图 2 临夏盆地毛沟剖面湖相沉积物元素平均含量的 UCC 标准化图

Fig. 2 The UCC normalized map of average elemental content for lacustrine sediments of the Maogou section in Linxia basin

将 453 块样品分析统计的各元素平均值与上部陆壳 (UCC) 元素平均含量比较 (图 2), 临夏盆地 13 ~ 4 Ma 期间沉积物元素具 Ca Mg Fe 和 Ti 富集 (特别 Ca 和 Mg) 以及 Na Si K 和 Al 亏损的特征。临夏盆地 13 ~ 4.4 Ma 期间沉积物元素分析结果见图 3 从该图可以看出 Al_2O_3 、 TFeO 、 SD_2 、 K_2O 和 TiO_2 变化趋势一致, 而它们与 CaO 和 TiO_2 变化趋势呈负相关, 并且诸元素含量波动具阶段性大致相同变化的特点 (图 3A-H)。根据元素含量变化差异、趋势和阶段特点, 将元素变化序列可划分为 13 ~ 12 12 ~ 7.8 7.8 ~ 6.2 和 6.2 ~ 4.4 Ma 四个段, 各元素含量范围及其平均值见表 1, 其中 CaO 含量变化范围最大 (34.909% ~ 1.028%), 最大值与最小值之间相差近 34 倍。

4 元素地球化学指示的气候意义讨论

研究表明^[24 25], 表生带中各化学元素的迁移聚集受到气候、地形、源区物质化学成分的初始差异和化学元素自身特点的影响, 因此元素含量在沉积物中的波动特征可一定程度地反映沉积时的环境条件。假定在同一剖面中各地层单元的沉积环境和源区物质化学元素本身性质不变, 那么化学元素的淋溶、迁移和聚积在很大程度上与古气候变化有关系, 因此地层中化学元素氧化物的变化是探讨气候变化的有效指标之一。湖泊沉积物中的 Fe Mg Ca Ti Na K 等元素含量的变化对于指示气候冷暖干湿波动有重要意

义^[26]。钠是化学性质活泼的元素, 在暖湿气候条件下最容易产生淋溶迁移^[27], 地层中钠含量的增加反映出古气候向干冷趋势发展^[25]; 铁、铝两者化学性质比较相近, 都比较稳定而不易迁移, 铝、全铁、钛、钾、硅含量低时, 反映了气候转干、降水减少、化学和生物作用减弱^[24 25]; 钙是活动性相当强的元素, 硅酸盐中的钙都可形成可溶性的碳酸氢钙而进入水溶液被运移带走, 只有部分钙可形成硅酸盐和硫酸盐被短时间留在风化壳中。镁离子的氧化程度和电价都很稳定, 所以在迁移过程中形式简单。临夏盆地 13 ~ 4.4 Ma 沉积物元素平均含量与上部陆壳比较 (图 2), 显然钙、镁相对富集, 钙和镁两元素是化学性质中等活泼或较强、性质接近的碱土金属, 只有在相对暖湿的气候条件下, 风化壳中钙、镁才被较多地淋溶迁移, 在盆地中湖水位上升, 碳酸盐多溶于水, 仅少量保存于湖底沉积物中。而在干燥气候环境下, 湖水浓缩, 湖水中 Ca^{2+} 浓度增大, 形成沉积物碳酸盐相对富集。CaO MgO 反映了碱土金属 Ca 与 Mg 的分异程度及其比值的变化主要反应钙的变化, 所以它也是反映了风化过程中迁移能力和迁移程度。赵泉鸿等^[28]通过在已知环境水体中所做的活介形虫壳体中 Mg/Ca 比值与温度和盐度关系的实验结果表明, 无论在盐度稳定或盐度显著变化的条件下, 介形虫壳体 Mg/Ca 比值均与水温呈正相关, 即 Mg/Ca 与气候的冷暖成正比; 富集系数 ($Y_1 = (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TFeO} + \text{TiO}_2) / \text{SD}_2$) 和淋失系数 ($Y_2 = (\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{MgO}) / \text{SD}_2$) 被用来说明在气候作用下表生地球化学元素迁移和聚集规律^[29]。

根据上述讨论, 表生带中化学元素能反映沉积物化学风化作用的强弱, 而化学风化的强弱主要与环境的干湿有关。临夏盆地 13 ~ 4.4 Ma 沉积物化学元素四个阶段的变化与该区环境演化如下:

(1) 13 ~ 12 Ma 期间, 元素含量曲线波动平缓 (图 3), 其中 TiO_2 、 Al_2O_3 、 TFeO 、 K_2O 、 SD_2 都处于较高值, 如 TiO_2 和 SD_2 平均值为研究时段最大者 (表 1), 而 CaO 和 CaO MgO 为整个剖面的最小值, 其平均值分别为 6.514% 和 1.523 (图 3 表 1)。 TiO_2 、 Al_2O_3 、 TFeO 均属风化壳难迁移物质, 在湖相沉积物中含量相对高, 表明源区气候湿润、化学风化较强; 而 CaO 和 CaO MgO 含量低可能与气候湿润、大量水系汇入盆地有关。该时段为稳定湖泊三角洲沉积, 并且孢粉资料^[30]显示此时主要以针叶林为主, 同时邻区河西走廊酒泉盆地 13.0 ~ 11.15 Ma 孢粉组合也反映气候

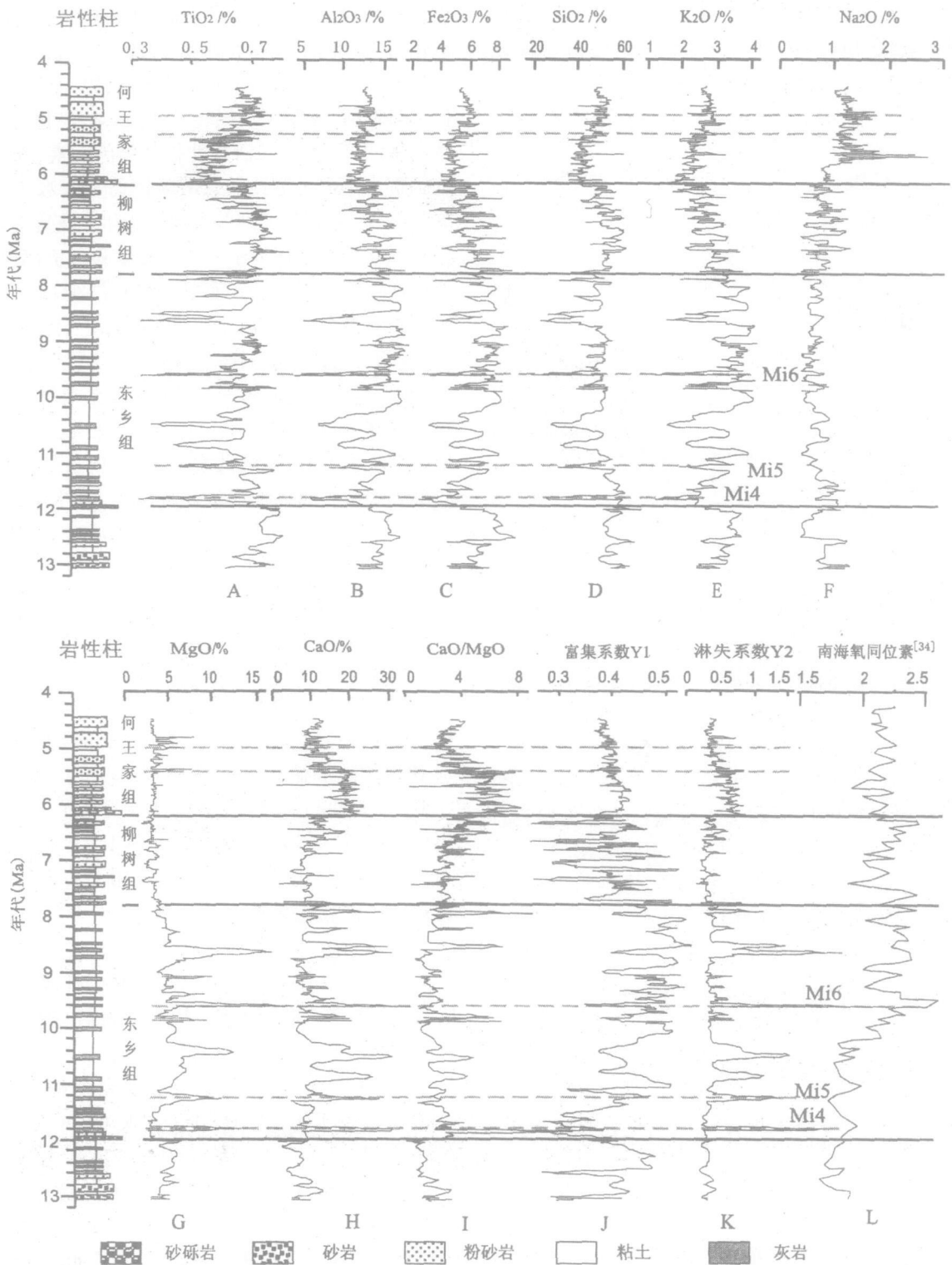


图3 临夏盆地毛沟剖面湖相沉积物主元素、CaO/MgO、淋滤富集系数和南海氧同位素^[33]

Fig 3 The major elements, CaO/MgO ratios, eluviated and enriched coefficient of the lacustrine sediments of the Maogou section in Linxia Basin compared with the Oxygen isotope records in the South China Sea

属半湿润特点^[31]。综合说明此时气候条件相对湿润,可能是 14M a前后全球气候大降温过后的升温期。

(2) 12~ 7.8 M a期间, TD_2 、 SD_2 、 $TFeO$ 、 Al_2O_3 、 K_2O 平均含量相对较高, 而 CaO 、 CaO/MgO 平均值相对较小(表 1), 所以地球化学性质总体代表气候为湿润环境, 这与孢粉组合反映植被类型以温暖湿润为主^[30]一致。但此期间元素曲线局部具有较大变幅特征(图 3), 由于该段是稳定的湖相沉积(排除了沉积环境变化对元素变化的影响), 依据铝、全铁、钛、钾、硅含量低和钙增加时反映气候转干、降水减少^[24-25], 说明此期间在湿润环境下可能存在短暂气候变干事件。这种特点在淋失系数也存在明显反映(图 3), 即淋失系数变化很大(0.4~ 2.9)。其中元素含量变化反映的 11.9、11.2、9.6 和 8 M a干旱事件(图 3)分别与深海氧同位素揭示的中新世变冷事件 M_{ik} 、 M_{ib} 、 M_{ib} 、 M_{ib} ^[32-34] 很好对应, 其中 9.6 M a的干旱事件也与南海氧同位素^[34] 明显变化相一致(图 3L)。

(3) 7.8~ 6.2 M a期间, 相对前期(表 1): Al_2O_3 由 14.159% 减小到 13.396%、 $TFeO$ 从 6.464% 减小至 5.726%、 K_2O 由 3.174% 减小为 2.6%, 并且他们含量曲线呈明显减少趋势(图 3B、C、E)。铝、铁、钾含量低时, 反映了气候转干、降水减少^[24-25], 表明此段气候逐渐变干; SD_2 相对含量有所增加(图 3D, 表 1), 这与风成石英砂的增加有关, 因为临夏盆地风成石英砂在 8 M a左右达到高峰值^[35]; CaO 从 10.624% 增加到 10.989% 以及 CaO/MgO 从 2.231 增加为 3.543(表 1), CaO/MgO 曲线也增加趋势(图 3I), 进

一步验证了气候是逐渐变干的过程。另一方面临夏盆地孢粉资料显示此时结束了森林植被发育, 草本植物特别是旱生、半旱生的蒿属和藜科大发展, 植被类型为干草原植被^[30], 同时本区的沉积物粒度^[36] 和色度^[23] 特征也证明了 7.8 M a左右气候具干旱化特征。

(4) 6.2~ 4.4 M a期间, 尤其是 6.2 M a左右是一明显的转折点, 所有元素含量在此时都发生巨变, 铝、全铁、钛、钾、硅明显急骤变小, 钙、钠急骤增大(图 3)。 CaO/MgO 比值从 3.543 增加到 4.136(表 1), 这些都表明气候干旱程度的进一步加剧。6.2~ 4.4 M a元素含量变化又可进一步分为三个时段(图 3): 6.2~ 5.3 M a 钛、铝、铁、硅、钾明显的急骤变小, 而 CaO/MgO 和 CaO 以及 Na_2O 值增大, 同时钠已达到峰值(在 5.75 M a最大值为 2.702%), 说明此时气候极端干旱。此时的极端干旱事件在青藏高原周边地区及全球范围内均有体现, 如“墨西拿碳偏移”(Messinian carbon shift)^[39,40]、“古地磁 6 时碳偏移”(Chron 6 carbon shift)^[36]、北极冰盖扩张^[37] 和南极冰盖扩展至最大^[40]、北非出现强烈干旱^[41]、地中海发生“盐度”危机^[42]、柴达木盆地出现成盐期^[43] 等; 5.3~ 5.0 M a 相对前期 CaO 和 CaO/MgO 值减小, 说明此时的干旱程度有所降低。这与中亚和东亚湿润气候反映的印度洋沉积物堆积速率减小, 中国北方和北太平洋沉积通量减少^[44] 相对应; 5.0~ 4.4 M a, TiO_2 、 K_2O 、 Al_2O_3 、全 FeO 再次呈减小趋势, CaO 和 CaO/MgO 值呈明显增加(图 3), 表明气候变干, 这与麦西尼亚盐度危机一致。

表 1 临夏盆地毛沟剖面元素含量范围及平均值(单位: %)

Table 1 The spectrum and average of elements of the M aogou section in Linxia Basin(%)

		TD_2	SD_2	$TFeO$	Al_2O_3	MgO	CaO	K_2O	Na_2O	CaO/MgO
13~ 4.4 M a	最大值	0.819	67.538	8.79	18.116	18.881	34.909	4.124	2.702	11.706
	最小值	0.314	18.855	2.35	3.709	1.812	1.028	1.168	0.328	0.235
	平均值	0.656	48.895	5.882	13.366	4.062	11.551	2.789	0.849	3.176
13~ 12 M a	最大值	0.793	64.417	8.79	16.693	6.374	12.422	3.646	1.247	3.214
	最小值	0.604	48.523	4.3	11.256	2.697	2.449	2.312	0.328	0.617
	平均值	0.722	55.412	6.366	13.868	4.504	6.514	3.012	0.762	1.524
12~ 7.8 M a	最大值	0.788	67.538	8.528	18.116	18.881	34.909	4.124	1.148	11.706
	最小值	0.314	18.855	2.35	3.709	2.459	1.276	1.168	0.362	0.452
	平均值	0.644	48.281	6.464	14.159	5.268	10.624	3.174	0.618	2.231
7.8~ 6.2 M a	最大值	0.819	61.618	8.755	17.521	4.834	24.196	3.714	1.404	8.044
	最小值	0.428	34.102	3.062	7.981	1.812	1.485	1.282	0.371	0.439
	平均值	0.674	50.831	5.726	13.396	3.174	10.989	2.600	0.771	3.543
6.2~ 4.4 M a	最大值	0.783	60.33	7.085	14.732	7.972	24.327	3.233	2.702	8.24
	最小值	0.483	34.985	3.804	7.981	1.812	1.028	1.789	0.748	0.235
	平均值	0.640	46.373	5.330	12.413	3.574	14.061	2.525	1.182	4.136

研究表明亚洲季风系统最早发生在南海^[45]。以冬季风和夏季风组合为特征的东亚季风环流的形成和发展直接受制于青藏高原的隆升,并对全球气候产生重大影响。黄土高原的黄土和红粘土风尘堆积序列是反映东亚季风系统形成演变的良好地质记录。自8Ma以来中国黄土高原风尘堆积,敏感地记录了过去东亚冬、夏季风的变迁^[2]。从图3临夏盆地沉积物元素含量变化序列显示,7.8Ma以前元素含量为大谷峰变化,气候特点以湿润条件为主,约7.8Ma开始元素含量出现规律性波动,即从7.8~6.2Ma的低频高幅过渡到6.2~4.4Ma的高频高振幅的曲线特征,这种规律性波动现象可能与季风系统的演化有关。约7.8Ma左右气候转变为以干旱化为主,可能是冬季风开始加强,这与此时青藏高原强烈隆升^[1,7]和黄土高原风成红粘土开始堆积^[10-15]相吻合。同时此时北太平洋ODP885/886站粉尘堆积增加^[5]、南亚巴基斯坦和尼泊尔植被由C₃型(森林和灌丛植被类型)转变为C₄型(草原植被类型)^[7,8]、中国南海有孔虫快速的降低^[9]等指示东亚冬季风的增强^[44]。临夏盆地在7.8Ma以前为湿润气候,受夏季风所控制^[46],之后随着青藏高原隆升到一定高度冬季风开始形成^[47],7.8~4.4Ma具元素含量变化频率逐渐加强的趋势,预示着季风逐渐加强^[36,46]。若7.8~6.2Ma的低频高振幅的曲线特征表明古季风的增强发展阶段,那么6.2Ma以后元素含量曲线呈现有规律的高频和稳定振幅特征(图3),可能反映稳定的现代季风形成。

5 结论

临夏盆地13~4.43Ma段沉积物记录着青藏高原东北边缘晚新生代气候变化。通过以上的讨论得出如下结论,

(1) 临夏盆地湖相沉积物元素相对于上部陆壳UCC元素平均值,表现为Ca、Mg、Fe、Ti富集和Na、Si、K、Al亏损,其中Ca、Mg较富集Na较亏损两种模式。

(2) 对临夏盆地毛沟剖面13~4.4Ma湖相沉积物化学元素研究表明:钛、铝、铁、硅、钾、钙、镁、钠对气候环境变化有一定的指示作用。在一定条件下稳定湖泊沉积物的TD₂、Al₂O₃、TFeO和SD₂含量与湿润气候成正相关,CaO、Na₂O和CaO/MgO值与干旱气候成正比。

(3) 临夏盆地13~4.4Ma期间气候演化经历了

四个阶段:13~12Ma气候相对湿润、12~7.8Ma气候以湿润为主夹短暂干旱事件、7.8~6.2Ma气候以干旱为主、6.2~4.4Ma气候进一步干旱化。其中7.8Ma左右的气候干旱化转型可能与冬季风加强有关,6.2Ma以来气候干旱化加剧以及有规律的高频气候波动可能与现代季风建立有关。

参考文献 (References)

- 1 Mohar P, England P, Martind J. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau and the Indian monsoon development. *Review of Geophysics* 1993, 34: 357-396
- 2 An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, Porter S C. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times. *Nature* 2001, 411: 62-66
- 3 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, Fang Xiaomin. Uplift of the Tibetan Plateau and environmental changes. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(23): 2117-2124]
- 4 施雅风, 汤懋基, 马玉贞. 青藏高原二期隆升与亚洲季风孕育探讨. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(3): 262-271 [Shi Yafeng, Tang Maoji, Ma Yuzhen. The discussion of Asian monsoon preparation and the second stage uplift of Qinghai-Tibet Plateau. *Science in China (Series D)*, 1998, 28(3): 267-271]
- 5 Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. Late Cenozoic eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift & cooling of the Northern Hemisphere. *Paleoceanography* 1998, 13: 215-224
- 6 Kroon S, Steens T, Troelstra S R. Onset of monsoonal related upwelling in the western Arabian Sea as revealed by planktonic foraminifers. *Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results* 1991, 117: 257-263
- 7 Quade J, Cerling T E, Bowman J R. Development of Asian monsoon revealed by marked ecological shift during the latest Miocene in northern Pakistan. *Nature* 1989, 342: 163-166
- 8 Burbank D W, Denry L A, Lanord C F. Reduced Himalayan sediment production 8 Myr ago despite an intensified monsoon. *Nature* 1993, 364: 801-804
- 9 Wang P X, Wang L J, Bian Y H. Late Quaternary paleoceanography of the South China Sea: Surface circulation and carbonate cycles 1999. *Marine Geology*, 1995, 127: 145-165
- 10 丁仲礼, 孙继敏, 朱日祥, 等. 黄土高原红粘土成因及上新世北方干旱化. *第四纪研究*, 1997, (2): 147-157 [Ding Zhongli, Sun Jimin, Zhu Rixiang, et al. Eolian origin of the red clay deposits in the Loess Plateau and implications for Pliocene climatic changes. *Quaternary Sciences* 1997, (2): 147-157]
- 11 孙东怀, 陈明扬, Show J 等. 晚新生代黄土高原风尘堆积序列的磁性层年代与古气候记录. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(1): 79-84 [Sun Donghuai, Chen Mingyang, Show J, et al. Magnetostigraphy and paleoclimate records of Late Cenozoic Eolian sequence in the Loess Plateau of China. *Science in China (Series D)*, 1998, 28(1):

- 79-84]
- 12 Ding Z L, Sun J M, Liu T S *et al* Wind-blown origin of the Pliocene red clay formation in the central Loess Plateau, China. *Earth Planetary Science Letters*, 1998, 161: 135-143
 - 13 Ding Z L, Xiong S F, Sun J M, *et al* Pedostratigraphy and paleomagnetism of an approximately 7.0 Ma eolian loess-red clay sequence at Lingtai Loess Plateau, north-central Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 1999, 152: 49-66
 - 14 Ding Z L, Sun J M, Yang S L, Liu T S. Geochemistry of the Pliocene red clay formation in the Chinese Loess Plateau and implications for its origin, source provenance and paleoclimate change. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65: 901-913
 - 15 Sun D H, Shaw J, An Z S, *et al* Magnetostratigraphy and paleoclimatic interpretation of a continuous 7.2 Ma late Cenozoic E-lias sediments from the Chinese Loess Plateau. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(1): 85-88
 - 16 Guo Z T, Ruddiman W, Hao Q Z, *et al* Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 2002, 416: 159-163
 - 17 王苏民, 李建仁. 湖泊沉积——研究历史气候的有效手段. *科学通报*, 1991, 36(1): 54-56 [Wang S M, Li Jianren. Lacustrine sediments: an indicator of historical climatic variation: The case of Qinghai Lake and Daihai Lake. *Chinese Science Bulletin*, 1991, 36(1): 54-56]
 - 18 Chivas A R, Torgersen T, Bowler J M. Palaeoenvironments of salt lakes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1986, 54: 1-328
 - 19 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
 - 20 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 Xiaomin, Li Jijun, Zhu Junjie *et al*. Division and age dating of the Cenozoic strata of the Linxia Basin in Gansu, China. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(14): 1457-1471]
 - 21 Fang Xiaomin, Gazizone Camal, Rob Van der Voo, *et al*. Flexural subsidence by 29 Ma on the NE edge of Tibet from the magnetostratigraphy of Linxia Basin, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 210: 545-560
 - 22 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 Jijun, Fang Xiaomin, Pan Baotian *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]
 - 23 宋春晖, 白晋锋, 赵彦德, 等. 临夏盆地 13-4 Ma 湖相沉积物颜色记录与的气候变化探讨. *沉积学报*, 2005, 23(3): 507-513 [Song Chunhui, Bai Jinfeng, Zhao Yande, *et al*. The color of lacustrine sediments recorded climatic changes from 13 to 4 Ma in Linxia Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(3): 507-531]
 - 24 张虎才, 张林源, Mahaney W C. 兰州九州台黄土剖面元素地球化学研究. *地球化学*, 1991, 20(1): 79-86 [Zhang Hucui, Zhang Linyuan, Mahaney W C. Element geochemistry of the Jiuzhoutai loess section. *Geochimica*, 1991, 20(1): 79-86]
 - 25 赵锦慧, 王丹, 樊宝生, 等. 延安地区黄土堆积的地球化学特征与最近 13 万年东亚夏季风气候的波动. *地球化学*, 2004, 33(5): 495-500 [Zhao Jinhui, Wang Dan, Pan Baoshen, *et al*. Geochemical characteristics of the loess deposit at Yan'an and its implication to changes of East Asia summer monsoon during the past 130 ka. *Geochimica*, 2004, 33(5): 495-500]
 - 26 舒强, 钟巍, 熊黑钢, 等. 南疆尼雅地区 4000 a 来的地化元素分布特征与古气候环境演化的初步研究. *中国沙漠*, 2001, 21(1): 12-18 [Shu Qiang, Zhong Wei, Xiong Heigang, *et al*. Study on the characters of the geochemical elements and changes of paleoclimate since about 4000 a B. P. in Niya section. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(1): 12-18]
 - 27 靳鹤龄, 苏志珠, 孙忠. 浑善达克沙地全新世中晚期地层化学元素特征及其气候变化. *中国沙漠*, 2003(4): 366-371 [Jin Heliang, Su Zhizhu, Sun Zhong. Characters of chemical elements in strata of Middle and Late Holocene in Hunshandake desert and the indicating climatic changes. *Journal of Desert Research*, 2003(4): 366-371]
 - 28 赵泉鸿, 戴中宁, 任炽刚, 等. 活介形虫壳体中 Mg/Ca 比值与温度和盐度关系的实验. *科学通报*, 1994, 39(15): 1409-1412 [Zhao Quanhong, Dai Zhongning, Ren Chigang, *et al*. The experiment about relations between Mg/Ca ratios and temperature or salinity in the ostracode shell. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(15): 1409-1412]
 - 29 李云卓, 李保生, 高全洲, 等. 巴丹吉林格勒布剖面记录的 150 Ka 以来的常量化学元素波动. *中国沙漠*, 2005, 25(1): 8-25 [Li Yunzhuo, Li Baosheng, Gao Quanzhou, *et al*. Fluctuation of main chemical elements since 150 ka as indicated in Chagekebulu stratigraphical section, Badain Jaran Desert. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(1): 8-25]
 - 30 马玉贞, 李吉均, 方小敏. 临夏地区 30.6-5.0 Ma 红层孢粉植物群与气候演化记录. *科学通报*, 1998, 43(3): 301-304 [Ma Yuzhen, Li Jijun, Fang Xiaomin. A record of pollen flora and climatic evolution of Red Bed between 30.6 to 5.0 Ma BP, Linxia Basin. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43, 301-304]
 - 31 马玉贞, 方小敏, 李吉均, 等. 河西盆地晚第三纪—第四纪早期植被与气候变化. *中国科学 (D)*, 2004, 34(2): 107-116 [Ma Yuzhen, Fang Xiaomin, Li Jijun, *et al*. The vegetation and climate change during Neocene and Early Quaternary in Jiuqi Basin, China. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(5): 676-688]
 - 32 Miller K G, Wright J D, Fairbanks R G. Unblocking the ice house: Oligocene-Miocene isotope, eustasy, and margin erosion. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(B4): 6829-6848
 - 33 Billups K, Channell J E T, Zachos J. Late Oligocene to early Miocene geochronology and paleoceanography from the subantarctic South Atlantic. *Paleoceanography*, 2002, 17(1): 4-10
 - 34 汪品先, 赵泉鸿, 翦知泯, 等. 南海三千万年的深海记录. *科学通报*, 2003, 48(21): 2206-2215 [Wang Pingxian, Zhao Quanhong, Jian Zhimin, *et al*. Thirty million year deep-sea records in the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48, 2524-2535]

- 35 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 significance in Linxia basin middle Miocene. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20(3): 259-263]
- 36 Fan Majie, Song Chunhui, Detman D L, *et al*. Intensification of the Asian winter monsoon after 7.4 Ma: grain-size evidence from the Linxia Basin, northeastern Tibetan Plateau. *13.1 Ma to 4.3 Ma Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 248: 186-197
- 37 Hodell D A, Woodruff F. Variations in the strontium isotopic ratio of seawater during the Miocene: stratigraphic and geochemical implications. *Paleoceanography*, 1994, 9(3): 405-426
- 38 Vincent E, Berger W H. Carbon dioxide and polar cooling in the Miocene: the Monterey hypothesis. *Geophys Monograph*, 1985, 32: 455-468
- 39 Zachos J S, Shackleton N J, Revenaugh J S, *et al*. Flower B P. Climate response to orbital forcing across the Oligocene-Miocene boundary. *Science*, 2001, 292: 274-278
- 40 Vincent E, *et al*. Miocene oxygen and carbon isotope stratigraphy of the tropical Indian Ocean. *Mem. Geol. Soc. Am.*, 1985, 163: 103-130
- 41 Partidge T C. The evidence for Cenozoic Aridification in southern Africa. *Quaternary International*, 1992, 17: 105-110
- 42 Hsu K J, Montadert L, Bemouilli D. History of the Mediterranean salinity crisis. *Nature*, 1977, 267: 399-403
- 43 陈克造, Bowler J M. 柴达木盆地察尔汗盐湖的沉积特征及古气候演化初步研究. 中国科学(B), 1985, 5: 463-473 [Chen Kezao, Bowler J M. The preliminary studies of paleoclimatic evolution and sedimentation in the Chaertan Saline Lake in the Qaidam in China. *Science in China (Series B)*, 1985, 5: 463-473]
- 44 郑洪波, 黄相通, 刘锐, 强小科. 晚中新世以来亚洲季风阶段性演化的海陆记录. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 24(2): 103-109 [Zheng Hongbo, Huang Xiangtong, Liu Rui, Qiang Xiaoke. The evolution of the Asian monsoon since late Miocene: evidence from the continental and oceanic sediments. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2005, 24(2): 103-109]
- 45 Tao Shiyun, Chen Longxun. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China. In: Chang C P, and Krishnamurti T N, eds. *Monsoon Meteorology*. Oxford University Press, 1987: 60-92
- 46 刘东生, 郑锦平, 郭正堂. 亚洲季风季风系统的起源和发展及其两级冰和区域构造运动时代耦合性. 第四纪研究, 1998, 8: 194-203 [Liu Dongsheng, Zheng Jiping, Guo Zhengtang. Initiation and evolution of the Asian monsoon system: timely coupled with the ice-sheet growth and the tectonic movements in Asia. *Quaternary Sciences*, 1998, 8: 194-203]
- 47 陈隆勋. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991: 1-262 [Chen Longxun. *The Monsoon of East Asia*. Beijing: Meteorological Press, 1991: 1-262]

Late Cenozoic Element Characters and Paleoclimatic Change of the Lacustrine Sediments in Linxia Basin, China

SONG Chun-hui LU Xin-chuan XING Qiang MENG Qing-quan
XIA Weimin LU Ping ZHANG Ping

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

Abstract The late Cenozoic stratigraphy is widely distributed in the Linxia Basin in the southeastern part of the Tibetan Plateau, China. Especially in 13~4.34 Ma, the lacustrine sediments are mainly stably fine grain with low energy, the different time scales and sorts of sediment rhythms in this era record much paleoclimatic changes. On basis of research of the element geochemistry of these stably fine lacustrine sediments and sediment rhythmic series in the Linxia Basin, we find four stages of the paleoclimatic evolution throughout the whole time in this basin. Firstly, it is relatively humid at beginning during 13~12 Ma, and then it is still humid with some very short dry-events in the period of 12~7.8 Ma. It turns relatively drier than before in 7.8~6.2 Ma, and at last it becomes drier and drier with high frequency climate oscillations since 6.2 Ma. The climatic reforming in 7.8 Ma is thought as the possible result of the strength of the winter monsoon, and the regulated climatic changes since 6.2 Ma maybe relate to the modern monsoon.

Key words elements; palaeoclimate; lacustrine sediments; Linxia Basin; Late Cenozoic