

河西走廊西部全新世气候环境变化的 元素地球化学记录

李小强^{1,2}, 刘汉斌^{2,3}, 赵克良¹, 纪明⁴, 周新郢¹

(1. 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 中国科学院脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京 100044; 2. 中国科学院地球环境研究所, 西安 710075; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中科院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘 要: 通过河西走廊西部地区条湖剖面沉积物元素地球化学分析, 结合高精度 AMS-¹⁴C 测年, 探讨研究区 ~11400-1060 cal BP 期间的气候环境演变过程。研究结果显示, ~11400-9400 cal BP 期间, 条湖处于高水位且流域内化学风化作用较强, 气候条件相对温暖湿润; ~9400-8100 cal BP 期间, 湖泊水位下降, 化学风化作用减弱, 指示了干旱的气候条件; ~8100-5800 cal BP 气候相对湿润, 其中最湿润时段出现在 ~8100-7200 cal BP 之间; ~5800-4800 cal BP 期间, 气候转干。~4800 cal BP 以后人类活动增强, 导致区域荒漠化加剧。

关键词: 河西走廊; 条湖; 全新世; 地球化学元素; Rb/Sr; Fe/Mn

中图法分类号: P532; **文献标识码:** A; **文章编号:** 1000-3193(2013)01-110-11

1 前 言

全新世是地质历史时期与现代接轨的最新时段, 其气候环境变化研究是理解现代气候变化机制以及预测未来变化趋势的重要依据, 也成为过去全球变化研究 (PAGES) 的重要内容之一^[1-2]。石笋、泥炭、玛珥湖沉积等高分辨率材料研究表明, 亚洲季风区全新世气候变化过程基本一致, 可简单概括为早全新世季风强盛, 气候温暖湿润, 中晚全新世季风衰退, 气候转干^[3-7]。但关于亚洲季风边缘区和西风区全新世气候环境变化过程, 特别是湿度变化历史还没有清楚的认识^[7-8]。

河西走廊是亚洲季风边缘地区的典型代表之一, 其全新世气候环境变化研究存在诸多分歧^[9-10]。石羊河终间湖猪野泽 SJC 剖面孢粉记录显示适宜期出现在早全新世, 中全新世气候干燥, 晚全新世气候转湿^[9]。而猪野泽 QTL 剖面粒度、碳酸盐等指标记录研究显示适宜期出现在中全新世, 早、晚全新世气候干旱^[10]。洪水河剖面多指标记录揭示腾格里沙漠南缘中全新世气候湿润, 晚全新世气候转干^[11]。黑河下游东居延海孢粉记录研究表明早中全新世期气候一直处于干旱状态, 较湿润气候出现在中全新世晚期, 晚全新世气

收稿日期: 2012-04-28; 定稿日期: 2012-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41001062, 41172161, 41102113) 资助

作者简介: 李小强, 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所研究员。Email: lixiaoqiang@ivpp.ac.cn

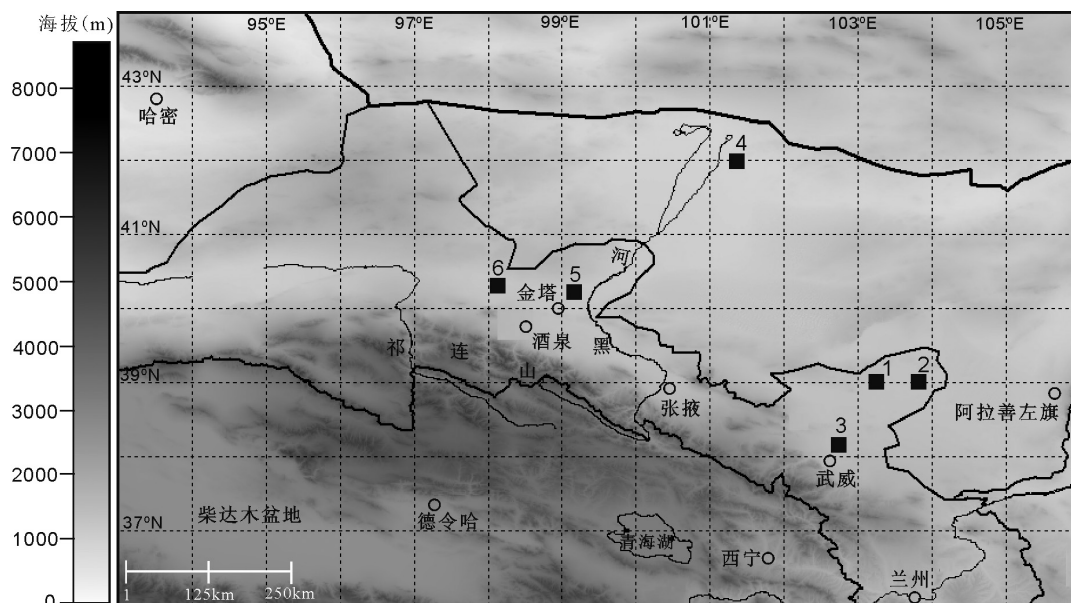


图 1 条湖剖面的地理位置及文中涉及的河西走廊地区其他研究剖面:

Fig. 1 Geographic location of Tiaohu and other Hexi Corridor sites referred to in the text

1. 猪野泽 SJC 剖面 (SJC section in Zhuyezhai)^[9]; 2. 猪野泽 QTL 剖面 (QTL section in Zhuyezhai)^[10]; 3. 腾格里沙漠南缘洪水河剖面 (Hongshuihe section in the southern Tengger Desert)^[11]; 4. 黑河下游东居延海沉积剖面 (Eastern Juyan Palaeolake sediment)^[12];
5. 条湖剖面 (本文) (Tiaohu section (this study)); 6. 花海剖面 (Huahai section)^[13]

候转干^[12]。玉门花海古湖泊沉积物变化显示中全新世气候湿润,其后湖泊萎缩干涸^[13]。

河西走廊地区全新世气候环境研究的差异,主要是缺乏高分辨沉积记录以及高精度气候环境指标和年代标尺,仍然需要更多的研究记录予以确定。湖泊沉积物是湖泊及其流域气候环境变化信息的有效载体,湖盆周围的陆源物质是其最主要来源^[14]。湖泊沉积物形成过程中,陆源碎屑、不溶残积物质以及可溶性物质含有的元素常常发生活化迁移以及重组等地球化学过程,并反映到沉积物的元素化学组成变化上。干旱-半干旱地区封闭湖泊的地球化学元素含量变化,可敏感的反应湖泊水体环境的变化过程^[15]。已成为重建气候环境演化的重要手段之一^[16-21]。

本文在已有研究基础上^[22-23],选择河西走廊西部的条湖湖相沉积作为研究对象(图 1),运用元素地球化学指标记录,结合高精度 AMS-¹⁴C 测年,重建河西走廊西部地区全新世气候环境变化历史,为认识我国西北内陆干旱区气候环境演化特征与规律,探讨人类活动与环境变化的关系等提供科学数据。

2 研究区概况

河西走廊位于祁连山以北,合黎山、龙首山以南,乌鞘岭以西,东西长约 1200km,南北宽约 100~200km,地势平坦,平均海拔在 1500m 左右。该区属温带荒漠气候,许多地方年降水量不足 200mm。受祁连山冰雪融水补给,区内由东向西依次分布石羊河、黑

河和疏勒河三大河系，沿河冲积平原形成大片绿洲，其余广大地区受风力剥蚀等影响，分布着大面积戈壁和沙漠。

甘肃河西走廊中、西段北山山前平原广泛分布灰棕漠土，又称灰棕色荒漠土或漠钙土^[24]。灰棕漠土的地球化学元素背景值主要是母质风化的结果。Fe, Al, Ca, Mg, Na, Sr, Rb 等元素的土壤背景值分别为 Fe: $2.91-2.86 \times 10^4$ ppm; Al: $6.41-6.39 \times 10^4$ ppm; Ca: $4.52-4.17 \times 10^4$ ppm; Mg: $1.28-1.21 \times 10^4$ ppm; Na: $1.86-1.82 \times 10^4$ ppm; Sr: 379–328 ppm; Rb: 91–89 ppm^[25]。

河西走廊西部巴丹吉林沙漠南缘地区存在许多全新世时期形成的湖泊，目前大多已经干涸，被风沙所掩埋，条湖是黑河流域弱水段在酒泉市金塔县鼎新镇附近形成的一个古湖泊，于 AD 700 年左右干涸^[26]。条湖以东地区存在许多早期人类活动遗址，已开展了植物指标记录、元素地球化学和同位素研究，重建了研究区早期农业和青铜冶炼活动^[27]及其对环境的适应与影响^[23, 28]。

3 研究材料与方法

3.1 沉积剖面与年代

条湖剖面 ($40^{\circ}15'42.2''N$, $99^{\circ}18'25.6''E$ ，海拔 1188m) 位于条湖的中心，为人工挖掘的一个竖井剖面，厚度 650cm。根据沉积物特征将剖面分为两部分，上部 0-440cm 为风成砂夹杂河流相粗砂堆积，下部 440-650cm 为发育良好的湖相沉积，其中 440-630cm 为湖相粘土层，630-650cm 为细砂层，635-637cm 夹杂一层炭屑层 (图 2)。剖面 440cm 以上的风成砂与河流相粗砂混杂堆积很可能是唐代中期 (约 AD700 年左右) 条湖干涸以后，由水力或风力搬运到地势较低洼的湖心所致。

在湖湘沉积序列的 451cm、499cm、569cm、636cm 等 4 处挑选出 1 个植物残体和 3 个炭屑用于 AMS-¹⁴C 年代测定，样品前处理和测定均在澳大利亚核科学与技术组织 (ANSTO) AMS-¹⁴C 加速器实验室完成。根据 Reimer 等 (2009)^[29] 的方法对所测年代进行日历年校正 (表 1)。利用线性内插和外推方法获得条湖剖面 440-650cm 之间约为 11400-1060 cal BP 的一套沉积 (图 2)。

3.2 地球化学元素分析方法

条湖 440-650cm 间的湖相沉积以 4cm 间距开展元素地球化学研究，共分析元素样

表 1 条湖剖面 AMS-¹⁴C 测年结果
Tab.1 AMS ¹⁴C dating results of the Tiaohu section

深度 (cm)	样品类型	实验室 编号	¹⁴ C 年龄 (BP)	校正年龄 (cal BP, 2σ)	中值 (cal BP, 2σ)
451	植物残体	OZK611	1470 ± 90	1241-1555	1398
499	炭屑	OZK612	3010 ± 60	3059-3360	3210
569	炭屑	OZK613	4520 ± 90	4872-5329	5100
636	炭屑	OZK614	9360 ± 70	10373-10756	10565

品 49 个, 在中科院地球环境研究所使用波长色散 XRF 仪 (PANalytical EA Almelo, 荷兰) 完成测试。每个样品用量为 5g, 恒温 60℃ 下烘干 24h 之后, 在玛瑙研钵中研磨直至完全过筛 (筛孔目数为 200 目, 74 μm)。以硼酸作固定剂, 在 SL201 型半自动压样机上以 29TN 的压力下成圆饼状。测量结果选用 28 个国际标准参考样品校正, 在 GSS-8 标准下通过平行分析测试精度的检验。测试的常量元素有 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P, Mn, Ti 等, 相对标准偏差在 1%–2% 之间。微量元素有 Cu, As, Pb, Zn, Ni, Co, Ga, V, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, Cr 等, 相对标准偏差 <5%。

3.3 代用指标及其环境指示意义

湖泊沉积物元素地球化学特征及其比值已成为古气候研究的有效代用指标^[30]。Rb 和 Sr 都是典型的分散元素, 在自然界中主要以类质同像的形式分布于各类造岩矿物中。Rb 主要分散在含 K 的矿物中, 如钾长石、黑云母等; 而 Sr 在含 Ca 的矿物中富集, 包括碳酸盐和含 Ca 硅酸盐 (斜长石、角闪石、辉石等)^[31]。含 K-Rb 矿物地球化学性质稳定, Ca-Sr 矿物极易被风化分解, 所以风化过程会使 K-Rb 在原地富集, 而 Ca-Sr 离子分离并流失^[32]。在湖泊沉积中, Rb/Sr 比值是一种常用的反映流域化学风化强度的替代指标^[33], 湖泊沉积中的 Rb/Sr 比值与流域内化学风化程度、碎屑物质来源以及水动力条件密切相关, 可作为气候环境变化的有效指标^[34-35]。水流或风力会将地表风化形成物质搬运到湖泊中, 所以湖泊沉积物中的 Rb/Sr 比值受到地表物理风化和化学风化的共同影响。根据含 Rb, Sr 矿物的性质, 如果 Rb/Sr 比值受控于物理风化, 那么湖泊沉积物中就会有较多的陆地碎屑岩物质, 则沉积物中 Rb 的含量增加, Rb/Sr 比值较高; 如果 Rb/Sr 比值受控于化学风化, 则沉积物中 Sr 的含量较高, Rb/Sr 比值较低^[35]。

Fe, Mn 都是变价元素, 其比值的变化基于它们对不同氧化-还原条件的敏感性。当 Fe 自流域被搬运到湖泊静止水体时, 由于被氧化而沉淀在浅水区; 化学性质比较稳定的 Mn 元素被搬运到水体更深的还原环境沉积, 致使溶解态的 Fe 和 Mn 发生分异。所以 Fe/Mn 比值可以反映湖泊水位的变化, 高 Fe/Mn 比值指示了较低的湖泊水位^[11]。

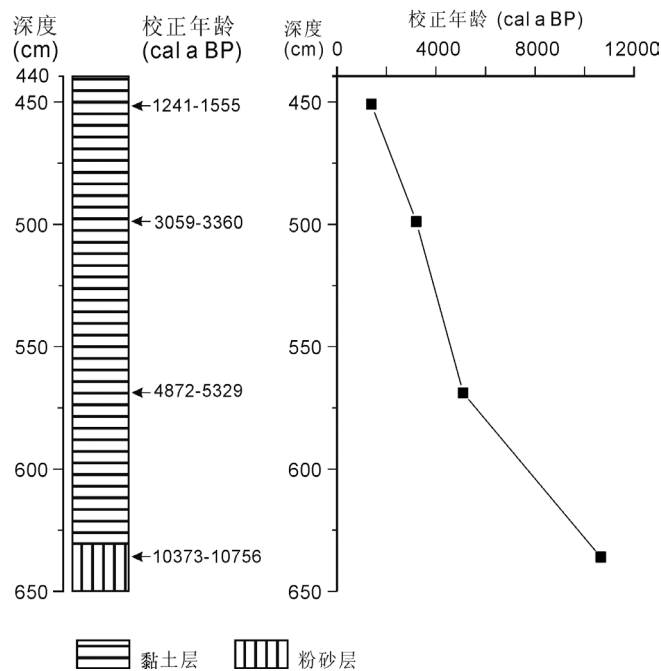


图 2 条湖剖面年代 - 深度模式

Fig.2 Age-depth mode of the Tiaohu section

4 研究结果

根据常量元素和微量元素浓度数值绘制成剖面元素变化图谱。常量元素浓度用百分比表示,而微量元素浓度含量较低,其单位用 ppm 表示。根据元素含量变化聚类分析结果以及 Rb/Sr 与 Fe/Mn 比值可将剖面分为 7 个阶段(图 3)。

阶段 I (650-622cm, ~11400-9400 cal BP): 常量元素 Mn (1035.6ppm, 平均值, 下同)、 Al_2O_3 (12.7%), MgO (4.3%), CaO (9.3%), K_2O (2.6%) 以及微量元素 Zn (76ppm)、Rb (110.1ppm), Sr (385.6ppm) 等含量较高,几乎为整个剖面的最高值。Rb/Sr 比值在 0.23-0.35 之间,平均为 0.3。Fe/Mn 比值在 29.8-50.7 之间,平均为 41.1。

阶段 II (622-606cm, ~9400-8100 cal BP): Mn (820.8ppm) 和 Sr (261.8ppm) 含量明显降低,而 P (586.4ppm), SiO_2 (55.4ppm) 含量增加。MgO (3.5%), CaO (7.6%) 含量有所减少。Rb/Sr 与 Fe/Mn 比值都明显增加,平均值分别达到 0.41 和 47.4。

阶段 III (606-576cm, ~8100-5800 cal BP): Mn (1043.3ppm) 和 Sr (346.5ppm) 含量增加明显,同时 MgO (3.9%), CaO (8.6%), Fe_2O_3 (6.7%), Rb (117.6ppm) 含量略有增加。Rb/Sr 与 Fe/Mn 比值同时降低,平均分别为 0.33 和 44.8,其中 8100-7100 cal BP 之间出现最低值分别为 0.24 和 36.4。

阶段 IV (576-556cm, ~5800-4800 cal BP): Mn (871.7ppm), CaO (7.4%), Sr (299.5ppm) 含量降低。As (24.6ppm), Zr (200.4ppm) 含量增加。Rb/Sr 比值比阶段 III 略有增加,平均值为 0.4。Fe/Mn 比值增加明显,平均达到 53.9。

阶段 V (556-504cm, ~4800-3400 cal BP): Cu (41.1ppm), As (24.3ppm), Pb (26.6ppm), Zn (76.9ppm), Ni (71.2ppm), Rb (123.1ppm), Mn (911.5ppm), Al_2O_3 (13.7%) 等元素在本带同时增加,并存在波动。Sr (261.1ppm) 含量明显减少。其中,4200-3700 时段, Rb/Sr 比值出现峰值,达 0.56,平均值为 0.4。Fe/Mn 比值同样出现峰值,达到 59。

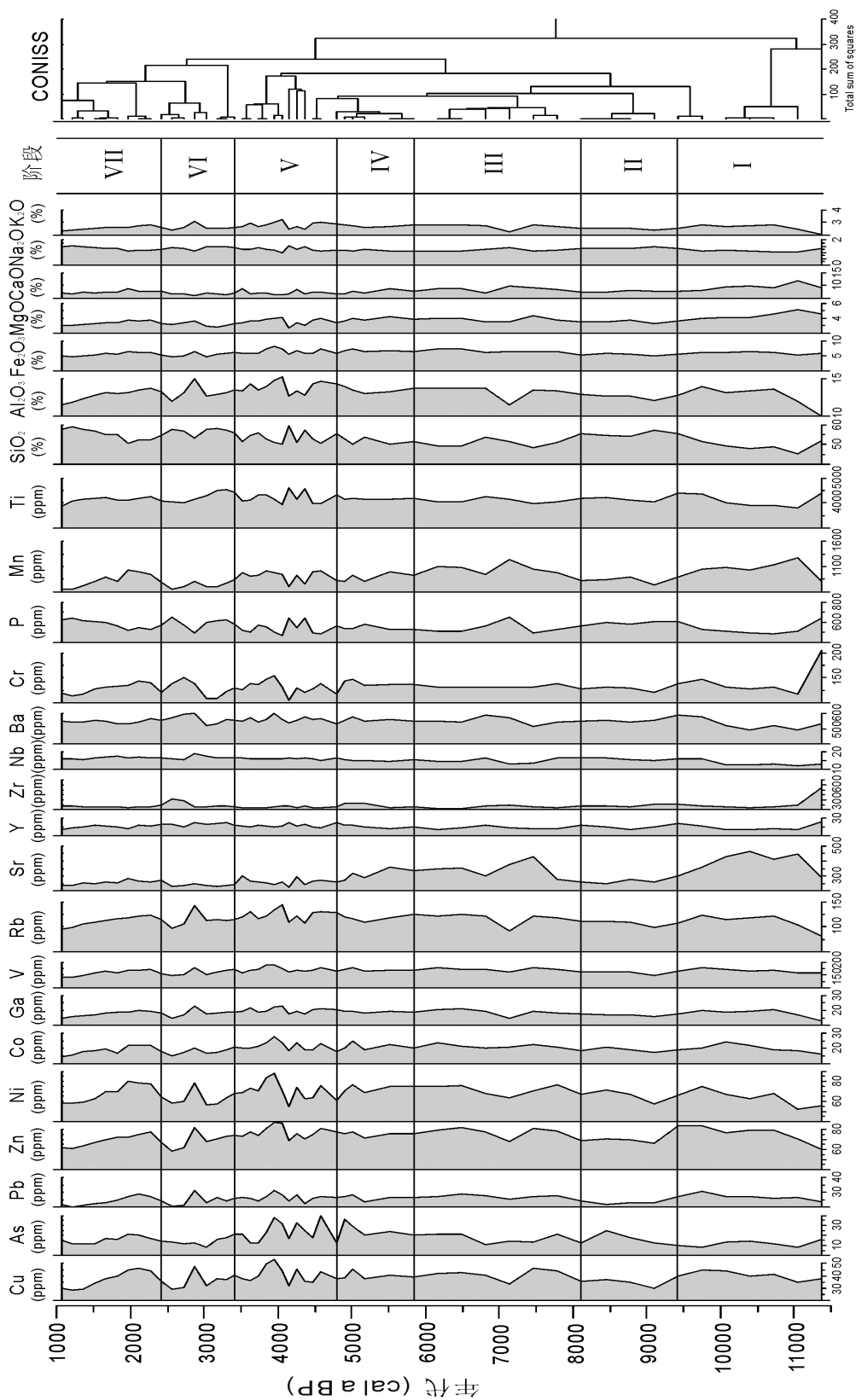
阶段 VI (504-476cm, ~3400-2400 cal BP): Cu (35.7ppm), As (13.5ppm), Pb (24.5ppm), Zn (68.6ppm), Ni (63ppm), Rb (114.3ppm), Mn (728.9ppm) 等元素较阶段 V 明显减少。同时 Sr (241.8ppm) 含量进一步降低。Rb/Sr 在 0.42-0.58 之间,平均为 0.47。Fe/Mn 在 47.6-56.5 之间,平均为 52.4。

阶段 VII (476-440cm, ~2400-1060 cal BP): Cu (37.1ppm), As (15.8ppm), Ni (68.4ppm), Sr (256.4ppm), Mn (830.6ppm) 等含量增加明显。Rb/Sr 在 0.4-0.47 之间,平均为 0.43。Fe/Mn 在 43.9-54.6 之间,平均为 48.1。两者比值都较阶段 VI 降低。

5 讨论与结论

条湖剖面中, Rb 含量较为稳定,在 81.3-144.4ppm 之间变化; Sr 含量波动较大,在 226-464.5ppm 之间变化(图 3)。将 Rb/Sr 比值与 Rb 和 Sr 分别进行相关性分析,与 Rb 的相关系数为 0.48,与 Sr 的相关系数为 -0.84(图 4)。可见条湖沉积物中 Rb/Sr 比值主

图 3 条湖剖面常量元素与微量元素变化
Fig.3 Major elements and trace elemental changes in the Tiaohu section



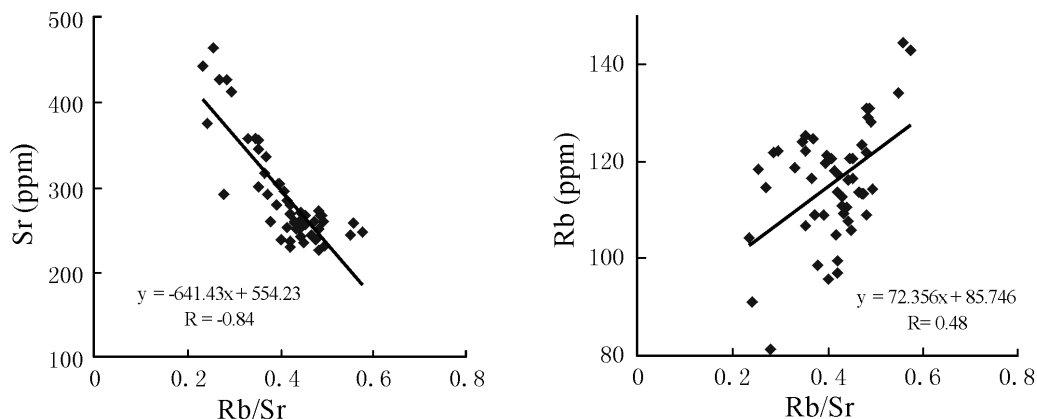


图 4 Rb/Sr 比值与 Rb 和 Sr 的相关性
Fig.4 Correlations between Rb/Sr ratios and Rb, Sr

要受控于 Sr 含量的变化,即剖面 Rb/Sr 比值的变化主要反映了条湖流域内化学风化的强度,较高的 Rb/Sr 比值说明流域内的化学风化强度较弱,指示干旱的气候条件。

条湖剖面地球化学元素指标较完整记录了河西走廊西部地区全新世气候环境变化过程。在早全新世早期 (~11400-9400 cal BP), 条湖剖面 Rb/Sr 与 Fe/Mn 比值几乎为整个剖面的最低 (图 5), 说明流域内化学风化作用较强且湖泊处于高水位, 指示了相对湿润的气候条件。

条湖周边地区古气候记录也支持早全新世早期气候湿润。石羊河下游猪野泽 SJC 剖面孢粉记录揭示研究区在早全新世 (11600-7100 cal BP) 气候湿润^[9]。花海地区在 10470-8870 cal BP 之间气候由干转湿^[12]。巴丹吉林沙漠早全新世湖面升高^[40]。河西走廊早全新世湿润气候与这一时期格陵兰地区温度升高以及亚洲季风增强相对应^[36-37] (图 5)。全新世早期北半球太阳辐射量增强所引起的降水以及冰雪融水增加可能是河西走廊地区气候湿润的主要原因。

早全新世晚期 (~9400-8100 cal BP), 条湖剖面中 Rb/Sr 与 Fe/Mn 比值升高, 同时 MgO、CaO 等活性组分降低, 说明研究区化学风化强度减弱、湖泊水位下降, 指示气候转干。黑河下游居延海孢粉记录也显示该时段气候比较干旱^[11]。猪野泽 SJC 剖面孢粉记录显示 8800-8200 cal BP, 7900-7800 cal BP 气候相对干旱^[9], 而 QTL 剖面多指标记录显示干旱的气候条件出现在 9500-7000 cal BP 之间^[10]。

在 8200 BP 左右, 格陵兰冰芯记录揭示北半球高纬度地区温度明显降低, 其幅度可达 Younger Dryas 冷事件的一半^[41]。亚洲夏季风强也出现明显减弱^[3, 36] (图 5)。北半球在 ~8000-8400 BP 之间总体表现为凉干并且多风的气候^[41]。格陵兰冰芯记录中的陆源 K⁺、Mg⁺、Ca⁺ 等离子浓度在 7800-8800 BP 明显升高, 指示来自陆地粉尘通量的增多^[38, 39]。条湖剖面 9400-8100 cal BP 时期的元素记录也对这一冷干气候有较好的指示 (图 5)。

中全新世早期 (~8100-5800 cal BP), 条湖剖面 Rb/Sr 与 Fe/Mn 比值降低, MgO、CaO 等含量增加, 说明流域内化学风化作用增强, 湖泊水位升高, 指示了相对温暖湿润的气候。Rb/Sr 与 Fe/Mn 比值显示 ~8100-7200 cal BP 是研究区全新世最温湿的阶段之一。亚洲季风边缘区多数沉积记录揭示中全新世早期气候条件相对湿润。中全新世晚期 (~5800-

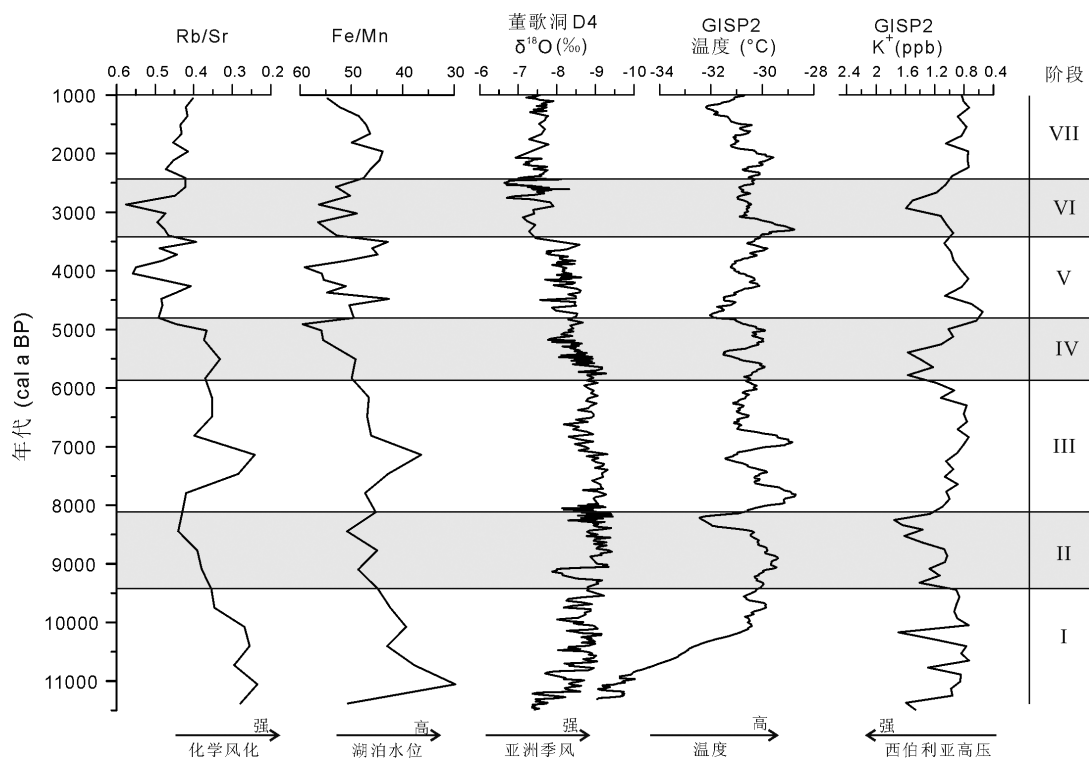


图 5 条湖剖面 Rb/Sr、Fe/Mn 比值、亚洲季风区董歌洞石笋氧同位素记录^[36]、
格陵兰 GISP2 冰芯温度^[37]和 K⁺ 浓度^[38-39] 对比图

Fig.5 Comparison diagram of Rb/Sr and Fe/Mn ratios in the Tiaohu section, ¹⁸O records of stalagmite in Dongge Cave from the Asian monsoon region, the temperature and K⁺ concentration in the GISP2

4800 cal BP)，条湖剖面 Rb/Sr 比值较前一阶段略有增加，说明化学风化减弱不明显。而 Fe/Mn 比值明显升高，指示湖泊水位降低，研究区湿度有所下降。祁连山敦德冰芯等记录揭示中国全新世大暖期鼎盛阶段出现在 7200-6000 BP^[42]。腾格里沙漠南缘全新世最暖湿期出现在 7290-6380 BP 之间^[35]，岱海地区在 7900-4450 cal BP 之间气候温暖湿润^[43]。毛乌素沙地、浑善达克沙地以及科尔沁沙地在 ~8000-6000 BP 之间为沙丘固定期^[44-45]。

条湖剖面 ~4800 cal BP 以后元素地球化学记录中 Cu、As、Pb、Zn、Ni 等 5 种元素含量开始增高，尤其在 4200-3700 cal BP 间出现峰值，Rb/Sr 比值也升高，与气候变化的趋势出现反向关系，与条湖以东的火石梁和缸缸洼遗址早期青铜冶炼活动相对应^[27]。同时，条湖剖面阶段 VI、VII 元素地球化学变化也分别指示了西周时期 (~3000-2700 cal BP) 以及汉代 (~2100-1900 cal BP) 先民的冶炼活动^[22]。条湖剖面在 4200-3700 cal BP，3400-2400 cal BP 时段 Rb/Sr 与 Fe/Mn 比值升高，并出现异常高值，更多指示早期冶炼和农业活动导致植被盖度的降低和土壤侵蚀的加强^[23, 28]，导致区域荒漠化程度的加剧，并对条湖沉积物中元素地球化学组成产生重要影响。

河西走廊地区特殊的地理位置及地貌条件决定了其复杂的气候环境变化过程。条湖剖面元素地球化学记录所揭示的全新世气候变化可能受亚洲季风和西风的影响。河西走廊西部早全新世早期气候湿润与亚洲典型季风和西风区较为一致，中全新世早期湿润的

气候也与亚洲夏季风强盛期相对应。但在早全新世晚期以及中全新世晚期出现的两次短尺度干旱阶段,难以简单的用季风衰退来解释,可能受西风环流以及西伯利亚高压共同作用的影响。中全新世以后河西走廊地区人类活动加强是导致植被盖度降低、土壤侵蚀以及区域干旱化程度增强的重要原因。

参考文献

- [1] Bond G, Heinrich H, Broecker W, et al. Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic Ocean during the last glacial period[J]. *Nature*, 1992, 360: 245-249
- [2] Renssen H, Seppä, Heirich O. The spatial and temporal complexity of the Holocene thermal maximum[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2: 411-414
- [3] Wang YJ, Cheng H, Edwards RL. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu cave, China[J]. *Science*, 2001, 294(5550): 2345-2348
- [4] Dominik F, Stephen JB, Manfred M, et al. Holocene forcing of the indian monsoon recorded in a stalagmite from southern Oman[J]. *Science*, 2003, 300(5626): 1737-1739
- [5] Hong YT, Hong B, Lin QH, et al. Inverse phase oscillations between the East Asian and Indian Ocean summer monsoons during the last 12000 years and paleo-El Niño[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 231(3-4): 337-346
- [6] Wang SY, Lü HY, Liu JQ, et al. The early Holocene optimum inferred from a high-resolution pollen record of Huguangyan Maar Lake in southern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(20): 2829-2836
- [7] Chen FH, Yu ZC, Yang ML, et al. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27: 351-364
- [8] Herzschuh U. Palaeo-moisture evolution in monsoonal Central Asia during the last 50,000 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25: 163-178
- [9] Chen FH, Cheng B, Zhao Y, et al. Holocene environmental change inferred from a high-resolution pollen record, Lake Zhuyeze, arid China[J]. *The Holocene*, 2006, 16(5): 675-684
- [10] Long H, Lai ZP, Wang NA, et al. Holocene climate variations from Zhuyeze terminal lake records in East Asian monsoon margin in arid northern China[J]. *Quaternary Research*, 2010, 74: 46-56
- [11] Zhang HC, Ma YZ, Wunnemann B, et al. A Holocene climatic record from arid Northwestern China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology*, 2000, 162: 389-401.
- [12] Herzschuh U, Tarasov P, Wunnemann B, et al. Holocene vegetation and climate of the Alashan Plateau, NW China, reconstructed from pollen data[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Paleoecology*, 2004, 211: 1-17
- [13] 王乃昂, 李卓仑, 李育, 等. 河西走廊花海剖面晚冰期以来年代学及沉积特征研究 [J]. *沉积学报*, 2011, 29 (3) : 552-560
- [14] 王苏民, 张振克. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展 [J]. *科学通报*, 1999, 44 (6) : 579-587
- [15] 张虎才. 元素表生地球化学特征及理论基础 [M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1997
- [16] 韩淑妮, 袁玉江. 新疆巴里坤湖 35000 年来古气候变化序列 [J]. *地理学报*, 1990, 45 (3) : 350-362
- [17] 顾兆炎, 刘嘉麟, 袁宝印, 等. 湖相自生沉积作用与环境——兼论西藏色林错沉积物记录 [J]. *第四纪研究*, 1994, 14 (2) : 154-161
- [18] 张虎才, 马玉贞, 李吉均, 等. 腾格里沙漠南缘全新世古气候变化初步研究 [J]. *科学通报*, 1998, 43 (12) : 1252-1258
- [19] 陈敬安, 万国江. 洱海沉积物元素与古气候演化 [J]. *地球化学*, 1999, 6: 562-570
- [20] 史基安, 郭雪莲, 王琪, 等. 青海湖 QH1 孔晚全新世沉积物稀土元素地球化学与气候环境关系探讨 [J]. *湖泊科学*, 2003, 15 (1) : 28-34
- [21] Wunnemann B, Steffen Mischke, Chen FH. A Holocene sedimentary record from Bostern Lake, China[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2006, 234: 223-238

- [22] 李小强, 纪明, Dondson J, 等. 河西走廊 4200 年以来青铜冶炼的元素地球化学记录 [J]. 湖泊科学, 2010, 22 (1): 103-109
- [23] Li XQ, Sun N, Dodson J, et al. The impact of early smelting on the environment of Huoshiliang in Hexi Corridor, NW China, as recorded by fossil charcoal and chemical elements[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2011, 305: 329-336
- [24] 郭景唐, 张国菁. 中国土壤剖面图谱 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991. 41-42
- [25] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 91-482
- [26] 李并成. 河西走廊汉唐古绿洲沙漠化的调查研究 [J]. 地理学报, 1998, 53 (2): 106-115
- [27] Dodson J, Li XQ, Ji M, et al. Early Bronze in two Holocene archaeological sites in Gansu, NW China [J]. *Quaternary Research*, 2009, 72 (3): 309-314
- [28] 孙楠, 李小强, 周新郢, 等. 甘肃河西走廊早期冶炼活动及影响的炭屑化石记录 [J]. 第四纪研究, 2010, 30 (2): 319-325
- [29] Reimer P, Baillie MG, Bard E, et al. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 2009, 51: 1111-1150
- [30] Russell JM, Johnson TC. A high-resolution geochemical record from Lake Edward, Uganda Congo and the timing and causes of tropical African drought during the late Holocene [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24: 1375-1389
- [31] Dash EJ. Strontium isotopes in weathering profiles, deep-sea sediments, and sedimentary rocks. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, 1969, 33: 1521-1552
- [32] Liu CQ, Zhang J, Li CL. Variations in CaCO₃ content and Sr isotope composition of loess and records of paleoclimatic fluctuation. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(16): 1512-1516
- [33] Jin ZD, Cao JJ, Wu JL, et al. A Rb/Sr record of catchment weathering response to Holocene climate change in Inner Mongolia [J]. *Earth Surf. Process. Landforms*, 2006, 31: 285-291
- [34] 金章东, 张恩楼. 湖泊沉积物 Rb/Sr 比值的古气候意义 [J]. 科学技术与工程, 2002, 2(3): 20-22
- [35] Xu H, Liu B, Wu F. Spatial and temporal variations of Rb/Sr ratios of the bulk surface sediments in Lake Qinghai [J]. *Geochemical Transactions*, 2010, 11: 3
- [36] Dykoski CA, Edwards RL, Cheng H, et al. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233: 71-86
- [37] Alley RB, Meese DA, Shuman CA, et al. Abrupt increase in Greenland snow accumulation at the end of the Younger Dryas event [J]. *Nature*, 1993, 362: 527-528
- [38] O'Brien SR, Mayewski PA, Meeker LD, et al. Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland ice core [J]. *Science*, 1995, 270: 1962-1964
- [39] Mayewski PA, Rohling EE, Stager JG, et al. Holocene climate variability [J]. *Quaternary Research*, 2004, 62: 243-255
- [40] Yang XP, Ma N, Dong J, et al. Recharge to the inter-dune lakes and Holocene climatic changes in the Badain Jaran Desert, western China. *Quaternary Research*, 2010, 73: 10-19
- [41] Alley RB, Mayewski PA, Sowers T, et al. Holocene climatic instability: A prominent, widespread event 8200 yr ago [J]. *Geology*, 1997, 25: 483-486
- [42] 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期气候与环境的基本特征 [A]. 见: 施雅风主编. 中国全新世大暖期气候与环境 [M]. 北京: 海洋出版社, 1992, 1-118
- [43] Xiao JL, Xu QH, Toshio Nakamura, et al. Holocene vegetation variation in the Daihai Lake region of north-central China: A direct indication of the Asian monsoon climatic history [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23: 1669-1679.
- [44] Mason JA, Lu HY, Zhou YL, et al. Dune mobility and aridity at the desert margin of northern China at a time of peak monsoon strength [J]. *Geology*, 2009, 37: 947-950.
- [45] Lu HY, Miao XD, Zhou YL, et al. Late Quaternary aeolian activity in Mu Us and Otindag sand-fields (North China) and lagged response to insolation forcing [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): L21716.

Holocene Climate and Environmental Changes Reconstructed from Elemental Geochemistry in the Western Hexi Corridor

LI Xiao-qiang^{1,2}, LIU Han-bin^{2,3}, ZHAO Ke-liang¹, JI Ming⁴, ZHOU Xin-ying¹

(1. Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins of Chinese Academy of Sciences, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044; 2. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xian 710075; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049; 4. Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract: A 210-cm-long laminated sediment core was collected from Tiaohu Lake in the western Hexi Corridor, and used to investigate the climate and environmental changes during ~11400-1060 cal BP, based on elemental geochemistry and precise AMS-¹⁴C dating. The level of Tiaohu Lake is high with intensified chemical weathering in the area indicating relatively warm and humid conditions from ~11400 to 9400 cal BP. The lake level dropped and the intensity of chemical weathering weakened, suggesting dry conditions between ~9400 and 8100 cal BP. During ~8100-5800 cal BP, the climate was relatively wet in the study area. One of the most humid periods occurred between 8100-7200 cal BP in the Holocene. The climate became dry in the area between ~5800 and 4800 cal BP. After ~4800 cal BP, increased human activities resulted in the severity level of desertification in the study area.

Keywords: Hexi Corridor; Tiaohu; Holocene; Elemental geochemistry; Rb/Sr; Fe/Mn