

94–9 ka 察尔汗盐湖的气候环境演化过程

魏海成, 樊启顺, 安福元, 山发寿, 马海州, 袁 秦, 秦占杰

中国科学院青海盐湖研究所, 盐湖地质与环境实验室, 青海西宁 810008

摘 要: 本文依托柴达木盆地中东部察尔汗盐湖沉积中心 102 m 长钻孔(ISL1A)岩芯, 应用 AMS¹⁴C 和不平衡 U 系测年方法建立了年龄-深度框架, 对岩芯开展了元素地球化学分析, 利用主成分分析提取影响察尔汗盐湖沉积物化学组成的 2 个主控因子: 入湖径流量因子和湖泊蒸发量因子, 结合孢粉、粒度、沉积物中石盐含量等环境代用指标, 分析讨论察尔汗盐湖晚更新世湖泊波动与环境变化过程。结果表明: 察尔汗古湖在晚更新世经历多次淡化期和咸化期, 94–52 ka 期间察尔汗古湖为微咸水-半咸水湖, 湖泊入湖径流量较大, 湖区植被为草原/荒漠草原植被; 约 52 ka 各指标均反映了察尔汗古湖环境发生了显著变化, 湖泊入湖径流量减小, 蒸发量增加, 湖泊由咸水湖退缩演化为盐湖, 湖区植被由草原/荒漠草原演替为荒漠草原/荒漠。34–24 ka 期间察尔汗盐湖入湖径流量增加, 湖泊有所扩张, 但湖水盐度较高; 24–9 ka 期间在冷干气候背景下, 湖泊退缩演化为干盐湖。环境指标所指示的察尔汗盐湖波动演化过程得到了柴达木盆地及其周边地区其他环境变化记录的支持。

关键词: 柴达木盆地; 元素地球化学; 孢粉; 环境变化; 晚更新世

中图分类号: K928.43; X14 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2016.02.07

Chemical Elements in Core Sediments of the Qarhan Salt Lake and Palaeoclimate Evolution during 94–9 ka

WEI Hai-cheng, FAN Qi-shun, AN Fu-yuan, SHAN Fa-shou, MA Hai-zhou, YUAN Qin, QIN Zhan-jie

Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Qinghai Provincial Key Laboratory for Geology and Environment of Salt Lake, Xining, Qinghai 810008

Abstract: A 102 m long drill core (ISL1A) was obtained from the Qarhan Salt Lake in central eastern Qaidam Basin, northeastern Tibetan Plateau. An age-depth model was established with AMS ¹⁴C and ²³⁰Th dating. Chemical elements analysis was carried out for the core sediments, and two important factors including runoff of the lake and evaporation were identified using Principal Component Analysis. The chemical elements analysis results were combined with pollen analysis, grain size and percentage of halite in the sediments so as to reveal the evolution of the Qarhan Salt Lake during Late Pleistocene. The result indicates that the paleo-Qarhan Lake experienced several desalt and salinization stages. During 94–52 ka, environmental proxies indicated freshwater to oligohaline conditions of the paleo-Qarhan Lake, the runoff and detrital input to the lake were relatively high and the steppe/desert steppe vegetation developed around the lake. After 52 ka, lake level decreased significantly in volume and salinity compared with previous periods of the Late Pleistocene, and desert steppe/desert vegetation developed around the lake. The increasing of runoff of the lake diluted the water body from a hyper-saline concentration to a brackish concentration during 34–24 ka. However, it is further noted that the range of lake expansion was limited during this stage. During 24–9 ka, cold and dry climate prevailed in the basin and the Qarhan Salt Lake finally evolved into a dry playa. These environmental changes and the variations of the lake level reflected by the environmental proxies of Qarhan Salt Lake sediments are supported by other environmental

本文由国家自然科学基金青年基金项目(编号: 41301045; 41302024)资助。

收稿日期: 2015-07-20; 改回日期: 2015-11-05。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 魏海成, 男, 1983 年生。博士, 副研究员。主要从事盐湖沉积与环境变化研究。通讯地址: 810008, 青海省西宁市新宁路 18 号。E-mail: hcwei@isl.ac.cn。

change records in Qaidam Basin as well as adjacent areas.

Key words: Qaidam Basin; geochemical elements; pollen; environmental change; Late Pleistocene

盐湖沉积蕴含了丰富的环境变化信息,开展盐湖沉积环境变化研究对于认识湖泊演化历史、古气候重建及盐类资源富集规律具有十分重要的科学意义(张彭熹, 1987; 顾兆炎等, 1998; 魏乐军等, 2002)。柴达木盆地是我国重要的盐湖分布区,丰富的钾、硼、锂等盐类资源是我国重要的战略资源。柴达木盆地位于青藏高原东北部,由西北部阿尔金山,东北部祁连山脉以及南部昆仑山脉围绕而成,盆地平均海拔 2800 m,面积为 $1.2 \times 10^5 \text{ km}^2$,流域面积达 $2.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ (Chen et al., 1985)(图 1A)。察尔汗盐湖位于柴达木盆地中东部,沉积了巨厚的第四系湖相沉积物和上部蒸发盐层,在上部盐层中赋存有大量的富钾卤水资源,是我国重要的液体钾盐矿床之一。近几十年来,众多学者对察尔汗盐湖开展了大量的盐类矿物学、古气候以及湖泊演化方面的研究工作(Chen and Bowler, 1986; 张彭熹, 1987; 黄麒和陈克造, 1990)。然而,由于缺乏长序列、高分辨率环境记录,对晚更新世以来察尔汗盐湖环境变化认识仍然十分不足,尤其是察尔汗盐湖晚更新世高湖面发生阶段、成盐时代等存在不同的观点(Chen et al., 1985; 梁青生和黄麒, 1995; 张虎才等, 2007;

Lai et al., 2014; Madsen et al., 2014)。近年来,中国科学院青海盐湖研究所研究人员依托察尔汗盐湖沉积中心 102 m 长的湖泊钻孔(ISL1A)岩芯从湖泊成盐年代(Fan et al., 2014a)、沉积物中风成组分(An et al., 2012)、自生碳酸盐氧同位素(Fan et al., 2014b)、孢粉记录(Wei et al., 2015)等方面开展了察尔汗古湖晚更新世环境变化研究,取得了重要的进展。

本文通过对 ISL1A 孔岩芯开展元素地球化学研究,结合孢粉、粒度和石盐含量等环境变化代用指标,讨论察尔汗盐湖晚更新世湖泊波动演化历史。

察尔汗盐湖($36^\circ 37' 36''$ — $37^\circ 12' 33''\text{N}$, $94^\circ 42' 36''$ — $96^\circ 14' 35''\text{E}$)是柴达木盆地最大的干盐湖,东西长达 168 km,南北宽 20~40 km,面积达 5856 km^2 ,最低处海拔为 2675 m(Chen and Bowler, 1986)。察尔汗盐湖是柴达木盆地第四系沉积中心,连续沉积了超过 3000 m 的湖相沉积物。根据水文地质及地球化学特征察尔汗盐湖由西向东划分为别勒滩区段、达布逊区段、察尔汗区段和霍布逊区段。目前察尔汗干盐滩共有 18 条发源于昆仑山脉的河流补给,有 10 个现代盐湖分布(图 1B)。根据察尔汗气象站记录,察尔汗盐湖年均温 5.33°C ,年均降水量仅为

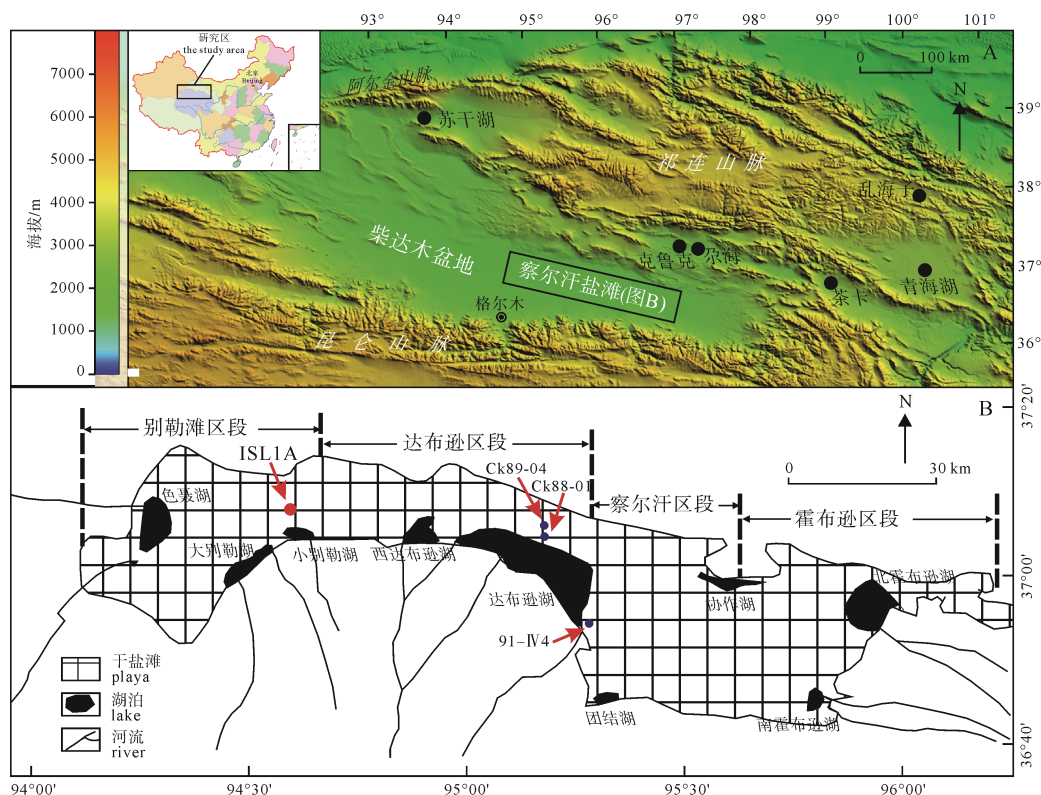


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Location of the study area

A-察尔汗盐湖在柴达木盆地的位置; B-察尔汗盐湖及 ISL1A 孔位置

A-map of Qaidam Basin showing the location of Qarhan Salt Lake; B-map of Qarhan Salt Lake and location of core ISL1A

24 mm, 潜在蒸发量为 3564 mm(于升松等, 2009)。察尔汗盐湖流域植被按不同海拔呈带状分布, 2700~3600 m 之间主要由荒漠和盐生植物组成, 主要有蒿叶猪毛菜(*Salsola abrotanoides*)、细枝盐爪爪(*Kalidium gracile*)、盐穗木(*Halostachys caspica*)、膜果麻黄(*Ephedra przewalskii*)、唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)等; 禾本科、莎草科植物主要分布在察尔汗盐湖南部地下水出露的冲积扇缘带, 沿着河道有芦苇(*Phragmites australis*)、眼子菜(*Potamogeton distinctus*)等水生植物分布; 3600~4100 m 之间主要为高寒草原, 主要有针茅属(*Stipa*)、蒿属(*Artemisia*)、灌木亚菊(*Ajania fruticulosa*)、紫菀木(*Asterothamnus centrali-asiaticus*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)、铁线莲(*Clematis florida*)等, 4100 m 以上主要为垫状驼绒藜(*Ceratoides compacta*)等荒漠植被。

1 材料与方法

1.1 钻孔岩芯及年代测试

本文研究材料为察尔汗盐湖西部别勒滩区段长 102 m 的钻孔(ISL1A)岩芯(37°3′50″N, 94°43′41″E)。ISL1A 孔岩芯 0—51.1 m 主要为石盐层, 以及含石盐的粉砂粘土层; 51.1—102 m 为粉砂粘土层及黑色淤泥层(图 2)。ISL1A 孔的年代共采集 11 个碳 14 加速器质谱(AMS¹⁴C)和 11 个铀系年代样品。本钻孔的 AMS¹⁴C 年代样品由北京大学核物理与核技术国家重点实验室完成, 铀系年代样品由中

国科学院地质与地球物理研究所铀系年代实验室完成测定。铀系年代样品包括 8 个钻孔上部 0—46 m 盐类样品和 3 个钻孔下部富含碳酸盐的湖相沉积物样品, 钻孔下部 3 个不纯碳酸盐的湖相沉积样品应用铀系 L/R 等时线模式测定(Fan et al., 2014a)。ISL1A 孔岩芯深度-年代模型选用由上述方法测定的 10 个年代建立, 具体已在其他文章中进行了详细讨论(Fan et al., 2014a, b; Wei et al., 2015), 本文沿用上述年代框架(图 2)。

1.2 实验室测试

本研究共采集该钻孔岩芯的 99 件样品用于化学元素测定、192 件盐类矿物样品、282 件粒度样品、143 件孢粉样品。化学元素在中国科学院青海盐湖研究所用 Axios PW4400/40 X-射线荧光光谱仪测量与分析。石盐(NaCl)含量在中国科学院青海盐湖研究所用 X-pert Pro X-射线衍射仪测量与分析。粒度样品在中科院青海盐湖研究所采用英国马尔文 2000 激光粒度分析仪测定, 测量范围为 0.01~3000 μm, 测量重复误差<1%。孢粉分析工作在中国科学院青海盐湖研究所孢粉实验室完成。孢粉提取采用传统的酸碱处理+重液提取的方法, 每个样品陆生花粉统计数超过 300 粒。

2 研究结果

2.1 ISL1A 孔岩芯元素地球化学分析结果

X-射线荧光光谱仪共分析 20 种化学元素, 含量较高的常量元素主要包括硅(Si)、铝(Al)、铁(Fe)、磷(P)、钾(K)、钙(Ca)、锰(Mn)、钛(Ti)等元素, 微量元素主要包括铷(Rb)、锶(Sr)。其他微量元素 Zn、Cr、Ni、Cu、Ce、Pb、Dy、As、Co、Cs 等含量低且在钻孔岩芯中不连续出现。本文主要对 Si、Al、Fe、P、K、Ti、Mn、Rb、Ca 和 Sr 元素含量变化进行分析讨论。其中 Si 含量最高为 212.00 g/kg, 最低为 18.50 g/kg, 平均值为 136.71 g/kg; 其次为 Ca 含量最高为 207.08 g/kg, 最低为 23.07 g/kg, 平均值为 68.18 g/kg。以下按平均含量依次为 Al 44.97 g/kg、Fe 29.27 g/kg、K 17.96 g/kg、Ti 2.74 g/kg、Sr 0.64 g/kg、Mn 0.57 g/kg、P 0.42 g/kg、Rb 0.10 g/kg。上述元素含量在整个钻孔中变化显著, 反映了湖泊环境的多次变化过程, 总体上划分为 7 个演化阶段(图 3)。Si、Al、Fe、P、K、Ti、Mn、Rb 变化趋势极为相似, 101.95~51.64 m, 30.07~23.13 m 段整体平均含量较高, 51.64~30.07 m, 23.13~1.24 m 段平均含量较低。Ca 和 Sr 含量曲线波动整体一致, 在 101.95~92.13 m 段, 51.64~30.07 m 段含量较高。

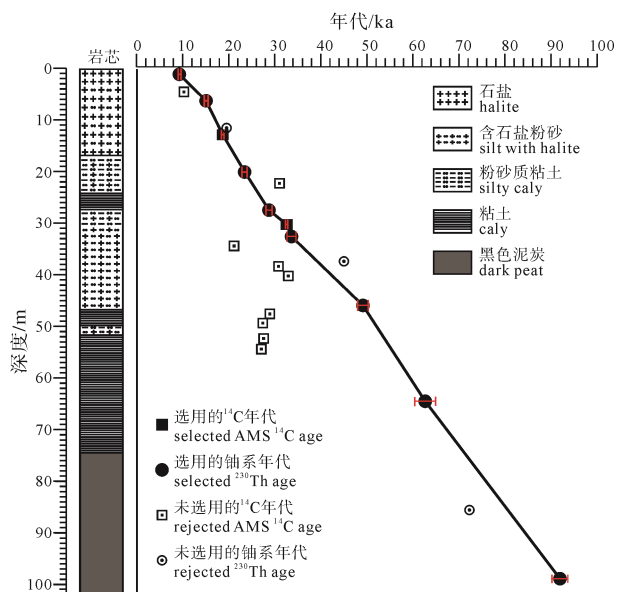


图 2 ISL1A 孔岩性和基于铀系和 AMS¹⁴C 定年方法建立的年代-深度模型

Fig. 2 Lithology and age-depth model based on U/Th and AMS¹⁴C dating of core ISL1A

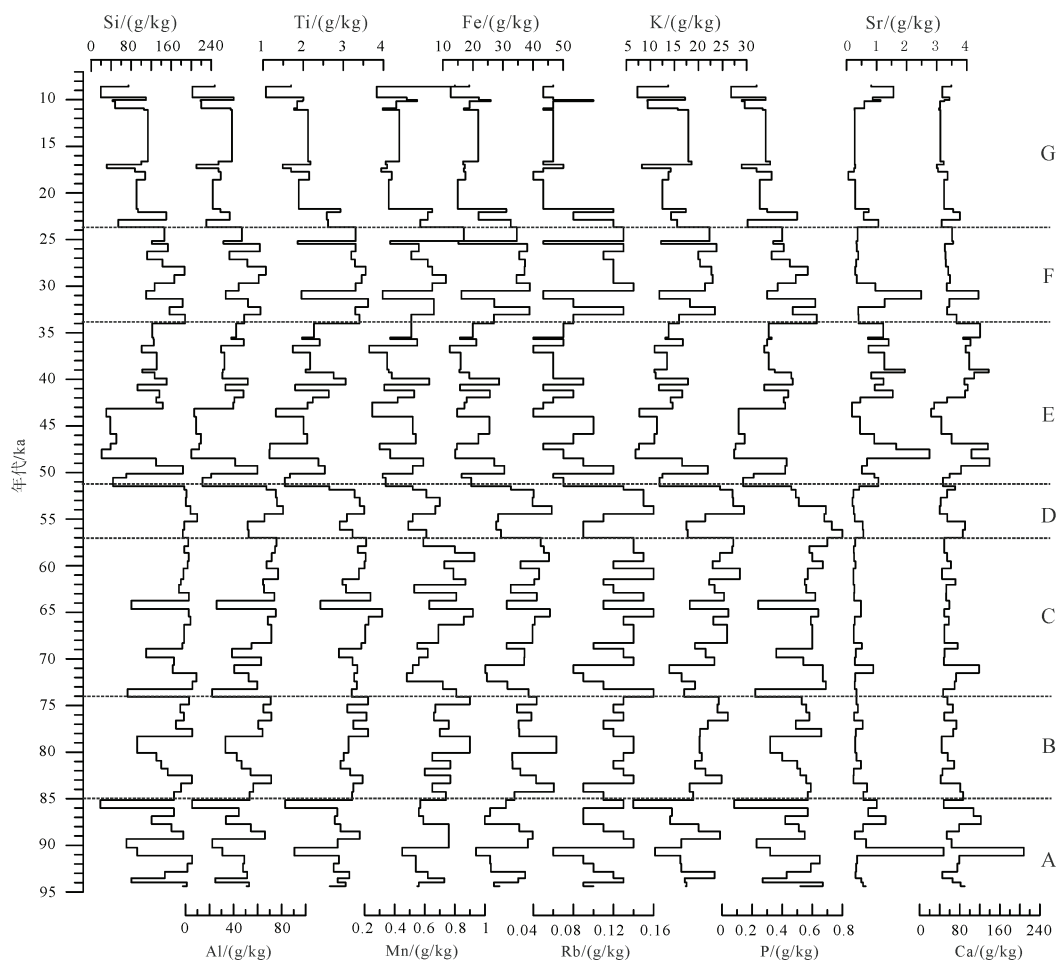


图3 察尔汗盐湖 ISL1A 孔岩芯元素含量变化

Fig. 3 Elements content in sediment core of ISL1A in the Qarhan Salt Lake

2.2 ISL1A 孔岩芯其他环境指标分析结果

石盐百分含量变化十分显著, 102.13—51.54 m 段百分含量平均值为 5.9%; 51.54—0.50 m 段百分含量平均值为 42.5%。ISL1A 孔岩芯中值粒径 2.18—75.85 μm , 其中 $<2 \mu\text{m}$ 组分百分含量为 0.6%~40.3%, 平均 12.5%; 2—10 μm 组分百分含量为 9.4%~66.4%, 平均 34.9%; 10~70 μm 组分百分含量为 11.3%~74.5%, 平均 46.5%; $>70 \mu\text{m}$ 组分百分含量为 0.1%~63.1%, 平均 4.4%。ISL1A 孔孢粉研究结果(Wei et al., 2015)显示孢粉组合中蒿属(*Artemisia*)、藜科(*Chenopodiaceae*)和麻黄属(*Ephedra*)花粉占绝对优势。其中蒿属花粉含量 7.0%~63.2%, 平均 31.2%; 藜科花粉含量 4.3%~53.4%, 平均 24.1%; 麻黄属花粉含量 0~26.6%, 平均 7.1%。ISL1A 孔中有盘星藻(*Pediastrum*)孢子出现, 含量在 0~90.5%之间变化。

3 讨论与分析

3.1 ISL1A 孔岩芯元素地球化学环境指示意义

湖泊沉积物主要来源于流域侵蚀带来的外来组分和湖泊自身物理吸附、化学沉淀和生物吸收产生的内生沉淀。根据湖泊沉积物中地球化学元素含

量变化特征, 提取有效的气候环境信息是研究过去环境变化的重要手段(王永等, 2004; Jin et al., 2006)。目前较为常见的方法是应用元素含量的和或比值方法放大元素指标对气候环境变化的响应或者削弱各扰动因素的影响, 提高准确性和灵敏度。众多学者尝试应用 Fe/Mn, Mg/Al, Mg/Ca, Si/P, Zr/Rb 等比值反映湖泊盐度及湖泊水位变化(罗建育和陈镇东, 1998; Zhu et al., 2002; 陈诗越等, 2003)。在盐湖演化研究中韩淑娟和钟巍(1990)等采用 Sr/Ba, Fe/Cl, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 对新疆巴里坤湖地球化学元素分析, 得到三个高值和低值区间; 陈克造等(1990)采用地球化学气候指标 C 值: $\Sigma(\text{Fe}+\text{Mn}+\text{Al}+\text{Cr}+\text{Co}+\text{Ni})/\Sigma(\text{K}+\text{Na}+\text{Ca}+\text{Mg}+\text{Sr}+\text{Ba})$ 来反映察尔汗盐湖气候干湿变化。余素华和文启忠(1995)认为 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 比值反映碎屑岩和蒸发岩在湖泊沉积物中的变化, 从而反演湖泊淡化与咸化期。此外, 化学风化指数 ($\text{CIA} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$) 和成分变异指数 ($\text{ICV} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3$) 被应用来判别源区化学风化的强度(Nesbitt and Yong, 1982; Cox et al., 1995)。Rb、Sr 元素在赋

存矿物和表生地球化学行为方面存在显著差异,因此 Rb/Sr 比值作为环境代用指标被成功应用于黄土古气候研究(Chen et al., 1999)。随之 Rb/Sr 比值也被作为环境代用指标广泛应用于湖泊环境变化研究, Sr 随着流域岩石与土壤化学风化程度的增强容易被淋失迁移进入湖盆, Rb 则残留在原地的岩石与土壤中,从而导致相应时期湖泊沉积物 Rb/Sr 比值减小(沈吉等, 2001)。而另一些学者认为较低的 Rb/Sr 比值反映了流域较弱的化学风化作用和较强的物理搬运作用(Kalugin et al., 2005)。Xu 等(2010)对青海湖沉积物表层 Rb/Sr 比值的研究揭示了流域物理风化和化学风化作用对青海湖沉积物 Rb/Sr 比值有着相反的影响,沉积物中陆源碎屑组分对沉积物 Rb/Sr 比值有着重要影响,陆源碎屑成分含量与 Rb/Sr 比值呈正相关关系。青海湖钻孔岩芯 Rb、Sr 元素含量分析结果同样显示在末次冰期(32—19.8 ka)期间 Rb 含量较高,而 Sr 含量低;在中早全新世(10.5—8.0 ka)期间 Rb 含量显著降低, Sr 含量显著升高,指示了末次冰期和全新世期间青海湖流域化学风化和粉尘活动强度的变化过程(Jin et al., 2015)。陈敬安等(2013)通过对不同气候背景湖泊沉积物中不同赋存状态的 Rb、Sr 变化特征进行了研究,指出在利用湖泊沉积物 Rb、Sr 地球化学记录反演古气候/古环境变化时,需综合考虑湖盆流域地质地理背景和湖泊自身特点,选用合适的研究方法,才能得出可靠的结论。综上所述,沉积物中地球化学元素受多种环境因素的影响,不同元素地球化学行为有所差异,而且不同类型湖泊的地质地理背景和水文、气候、植被条件等也各有差异,应用单个元素加或比值的线性处理方法不适于处理地球表层复杂的非线性地球化学过程(陈敬安等, 1999)。

采用主成分分析、相关分析、聚类分析等多元统计方法分析湖泊沉积物化学元素行为特征上的联系性以及含量变化的主控因子,提取与辨识多种地球化学元素反映的气候环境变化信息(陈敬安等, 1999),被广泛应用于湖泊沉积物元素地球化学研究(罗超等, 2008; 张宏亮等, 2009)。

本文应用 SPSS 19 软件对 ISL1A 孔岩芯的 10 种元素测定结果进行多元统计主成分分析。结果显示第一主成分方差贡献率为 65.15%, 第二、三主成分方差贡献率分别为 16.2%和 10.7%, 前三个主成分累积方差贡献率为 92.1%。表明前三个主成分的数值变化基本可以代表 10 个原始变量的变化。在主成分载荷矩阵中(表 1), 第一主成分因子 F1 载荷值较大(绝对值 ≥ 0.79)的有 Si、Al、Fe、P、K、Ti、Mn、Rb。以上元素表生环境下地球化学性质稳定,

赋存在陆源碎屑矿物中。刘兴起等(1995)对察尔汗盐湖 91-IV4 孔沉积物中地球化学元素在不同化学相中赋存状态研究表明,上述元素在残渣态中所占比例高,以碎屑矿物的形式被机械搬运至湖泊中沉积。因此,推断 F1 组分主要反映了流域径流的侵蚀搬运能力,而流域侵蚀、搬运能力取决于流域径流量大小。主成分 F2 因子方差贡献率为 16.2%, 载荷值较大(绝对值 ≥ 0.62)的有 Ca、Sr。地表岩石和沉积物中的 Ca、Sr 元素极易被淋失迁移至湖泊中,湖泊中 Ca 沉积主要受湖水理化性质,蒸发作用的控制。随着湖泊蒸发量增加, Ca、Sr 伴随碳酸盐类物质在湖泊中沉积,互相置换形成类质同像矿物,因此二者具有很好的相关性。前人研究表明 Ca 元素一般与湖泊沉积物中总碳酸盐含量具有对应关系,在干旱区湖泊中,碳酸盐含量的增加指示湖泊蒸发量大于入湖径流量(李世杰等, 1998),而在湖泊成盐阶段碳酸盐较高的层位代表湿润气候条件下湖泊相对淡化时期的沉积(Chen et al., 1985)。因此,推断 F2 因子主要反映湖泊蒸发量变化和湖区有效湿度的信息。主成分 F3 因子方差贡献率为 10.7%, 元素载荷值绝对值均小于 0.5, 因此 F3 因子反映信息微弱且环境信息复杂,可能反映区域环境背景及尘暴、洪涝等极端气候事件的信息。综上所述,本文对主成分分析结果中的第一因子和第二因子所反映的入湖径流量、湖泊蒸发量和湖区有效湿度变化特征进行讨论。

3.2 ISL1A 孔岩芯其他环境指标指示意义

湖泊完整的正向演化过程中,随着矿化度的不断增加,蒸发盐类的结晶顺序一般为碳酸盐、硫酸盐、氯化物盐。因此,湖泊中石盐沉积是湖泊进入盐湖阶段的重要标志。湖泊沉积物粒度是重建湖泊水动力和水位变化的重要指标,湖泊沉积物粒度从湖岸至湖心粒径逐渐减小,因此湖心沉积物粒度垂向变化反映湖泊的水位波动。在长时间尺度(百年、千年)上湖泊沉积物粒度增大指示湖泊水位退缩、气

表 1 主成分载荷矩阵表
Table 1 Component matrix of elements in sediment core of ISL1A

元素名称	F1	F2	F3
Si	0.84	0.419	-0.319
Al	0.902	0.278	-0.197
Fe	0.896	-0.183	0.342
P	0.805	0.452	-0.287
K	0.941	-0.045	-0.033
Ti	0.947	0.112	0.066
Mn	0.791	-0.102	0.475
Rb	0.835	-0.249	0.414
Ca	-0.299	0.867	0.294
Sr	-0.512	0.625	0.497

候干旱, 粒度变细指示湖泊扩张, 气候湿润。此外, 干旱半干旱区湖泊还接受粉尘物质的输入而直接在湖泊中沉降, 因此使得湖泊沉积物粒度组分呈多源性和环境信息的多解性(孙千里等, 2001)。对 ISL1A 孔岩芯粒度特征和来源研究发现沉积物 2—10 μm 部分以湖成组分为主, 而 10—70 μm 和 > 70 μm 部分中可能含有风沙活动的信息(安福元等, 2013), 因

此本文选用 ISL1A 孔沉积物粒度中(2—10 μm)组分为环境指标讨论察尔汗古湖湖面变化特征。

蒿属、藜科和麻黄属三种花粉属于西北干旱-半干旱区典型种类, 但其对应植物在生态习性、表土花粉散布特征上各有差异。蒿属植物主要分布于温带草原-荒漠草原, 其花粉具有超代表性, 降水量 200~500 mm 之间的区域表土中蒿属花粉百分含量

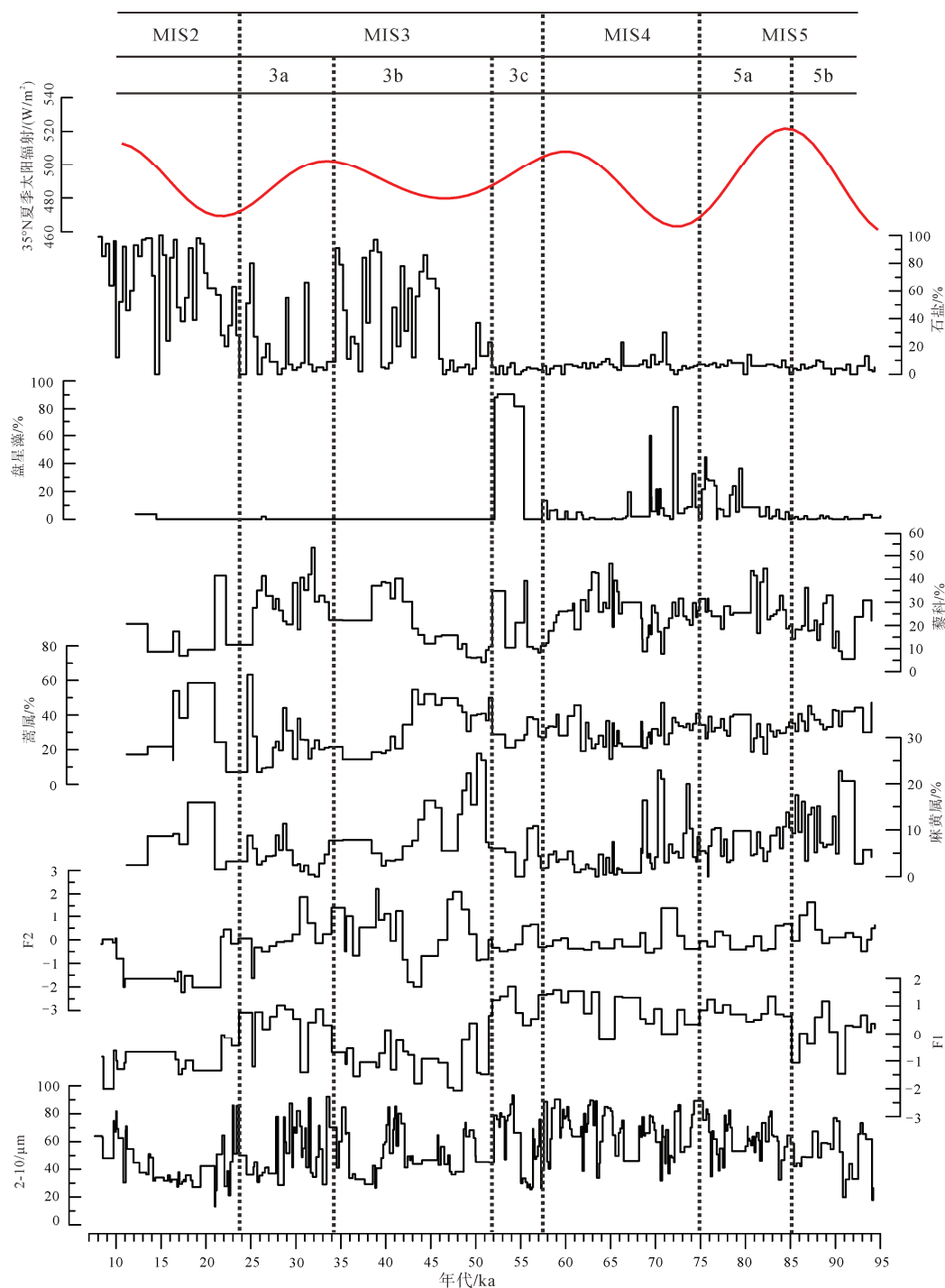


图 4 察尔汗盐湖 ISL1A 孔岩芯各环境代用指标变化图

Fig. 4 Environmental proxies changes in sediment core of ISL1A in Qarhan Salt Lake

从下往上依次为粒度组分百分含量(2—10 μm), 元素含量变化主成分因子值(F1、F2), 孢粉百分含量(麻黄属、蒿属、藜科和盘星藻属), 石盐百分含量及 35°N 夏季太阳辐射(W/m^2)

Including grain-size (2—10 μm), curves of factor scores (F1, F2), pollen percentages(*Ephedra*, *Artemisia*, *Chenopodiaceae*, *Pediastrum*), content of halite and Insolation at 35°N averaged over the months of June, July and August

较高;而藜科植物的较多种类更耐干旱、耐盐碱,表土花粉研究表明在柴达木盆地、新疆诸盆地、河西走廊等区域含量较高,降水量在 50~338 mm 的区域绝大多数表土样点中藜科花粉百分含量高达 50% 以上;麻黄属植物根系发达,在荒漠、戈壁环境中生长,多指示极端干旱的气候条件和较低的地下水位。降水量低于 200 mm 的区域表土样点麻黄属花粉含量显著增加(Zheng et al., 2008; Wei et al., 2011)。因此上述 3 类植物花粉对区域气候特征(尤其是降水量)具有较为明确的指示意义。此外、盘星藻(*Pediastrum*)属于绿藻类生物,广布于世界众多湖泊中。盘星藻作为湖泊环境的指示器在古环境研究中用来指示湖泊水体的温度、富营养化程度或者 pH 值(Weckström et al., 2010),以及湖泊水位变化(Whitney and Mayle, 2012)。虽然盘星藻种类繁多,生态习性有所差别,但是目前观察研究证实盘星藻类只能在淡水或微咸水中生存。柴达木盆地东部克鲁克湖表层沉积物研究发现盘星藻含量随着湖泊深度的增加而增加(Zhao et al., 2007)。张华等(2004)也指出盘星藻生存的水深一般不超过 15 m。因此,盘星藻是研究察尔汗古湖水体特征和湖面波动的理想生态指标。本文采用蒿属、藜科和麻黄属百分含量以及盘星藻属含量为环境代用指标讨论察尔汗盐湖植被与水文条件变化过程。

3.3 94—9 ka 察尔汗古湖波动演化过程

入湖径流量是控制湖面变化的重要因素,入湖径流量决定径流机械侵蚀搬运作用强弱。ISL1A 孔粒度组分中的细粒组分(2—10 μm)含量变化与 Si、Al、Fe、P、K、Ti、Mn、Rb 具有相似的变化趋势,表明细粒组分反映的湖泊水位变化与元素主成分因子 F1 反映的入湖径流量变化具有一致性(图 4)。因此在本研究中 F1 因子值大小结合沉积物粒度组分的变化能反映湖泊扩张与退缩过程。入湖径流又是湖泊周围陆生植物花粉的重要输送动力(Xu et al., 2005),湖泊沉积物孢粉反映湖盆气候变化过程(温度、降水)。因此,本文通过 ISL1A 孔岩芯元素地球化学主成分因子值结合孢粉(Wei et al., 2015)、粒度、石盐含量(安福元等, 2013)以及 35°N 夏季太阳辐射强度(Laskar et al., 2004),多指标交叉检验,讨论察尔汗古湖晚更新世湖泊波动演化历史(图 4)。

3.3.1 94—52 ka BP 阶段

本阶段总体沉积物粒度细粒组分含量较高, F1 因子值较高,指示流域径流量较大,湖面较高。孢粉组合中蒿属和藜科花粉占绝对优势,盘星藻间断出现,指示湖区植被为草原-荒漠草原,古湖为半咸水-淡水。本阶段古湖有多次波动: 94—85 ka 期间,

沉积物细粒组分含量略低, F1 因子指示的径流量减小, F2 因子指示的湖泊蒸发作用增强。孢粉组合中麻黄属花粉含量较高,盘星藻少量不连续出现,指示气候暖偏干,湖泊咸化; 85—74 ka 期间,沉积物细粒组分含量增加, F1 因子值增大, F2 因子值减小,指示的径流量增加,湖泊蒸发量减小,湖泊扩张。孢粉组合中蒿属花粉含量较高,指示草原植被在湖区发育,盘星藻含量增加且连续出现,指示流域为温湿气候,湖水淡化,出现高湖面期。74—63 ka 期间沉积物细粒组分含量波动减小, F1 因子值波动下降, F2 因子值有所上升,指示径流量减小,湖泊水位下降。麻黄属花粉含量显著增加,湖区植被荒漠组分增加,湖区有效湿度降低。该阶段盘星藻仍然连续出现,指示湖水盐度较低。63—58 ka 期间 F1 因子值上升, F2 因子值降低,沉积物细粒组分含量显著增加,指示径流量增加,湖泊蒸发量减小。孢粉组合中蒿属花粉含量显著增加,指示湖区植被由荒漠草原向草原植被发展,气候温偏湿; 58—52 ka 期间,湖泊发生快速的两期波动。早期 F1 因子值降低, F2 因子值升高,指示径流量减小,湖泊迅速咸化。沉积物粒度组分含量也显著减少,麻黄属花粉含量显著增加,盘星藻消失。后期 F1 因子值迅速升高, F2 因子值降低,盘星藻大量出现,指示径流量增加,古湖出现快速淡化期。柴达木盆地东北缘尕斯库勒湖岸堤光释光年代记录显示 85—72 ka, 63—55 ka 期间出现高湖面(Fan et al., 2012),与柴达木盆地东部相毗邻的青海湖古湖岸堤光释光年代结果也表明青海湖在深海氧同位素 5 阶段(MIS5)阶段晚期出现高湖面(Madsen et al., 2008),因此,该阶段湖面的扩张可能与区域降水量增加有关。

3.3.2 52—34 ka BP 阶段

本阶段湖区环境变化剧烈,沉积物粒度中细粒组分显著减少,石盐析出, F1 因子值显著减小,指示径流量显著减小。F2 因子值在 52—48 ka, 48—43 ka 和 43—34 ka 期间呈现升高降低升高的波动变化,指示湖泊在此期间经历碳酸盐-盐岩阶段的反复波动,最终退缩咸化进入盐湖阶段。本阶段盘星藻消失,麻黄属花粉迅速增加,指示湖区发育荒漠植被,气候干旱。值得注意的是 52—43 ka 期间蒿属花粉含量显著增加,本阶段蒿属花粉增加可能是由于气候干旱导致径流量减小,季节性河流增加,季节性裸露的河道和河漫滩中的隐域性蒿属植物花粉被大量搬运至湖泊中(Wei et al., 2015)。ISL1A 孔中自生碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 记录同样指示该阶段察尔汗湖区气候干旱(Fan et al., 2014b)。察尔汗盐湖 ZK88-01、ZK89-04 钻孔中原生石盐流质包裹体的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 同

位素在 50—30 ka 期间明显偏重, 指示察尔汗古湖蒸发量大于补给水量, 处于稳定析盐阶段(张保珍等, 1990)。青藏高原东北部乱海子钻孔多指标环境记录也同样显示 45 ka BP 以后气候趋于干旱, 湖泊有蒸发岩沉积(Mischke et al., 2005)。

3.3.3 34—24 ka BP 阶段

本阶段沉积物中石盐含量显著减少, 陆源碎屑细粒组分显著增加, F1 因子值增大, 指示入湖径流量增加, 湖面有所上升; 花粉组合以蒿属和藜科花粉为主, 指示草原-荒漠草原植被在湖区重新发育, 气候温偏湿, 本段未发现盘星藻类, 说明湖水盐度仍然较高, 察尔汗盐湖湖面扩张幅度较小。

3.3.4 24—9 ka BP 阶段

本阶段大量石盐析出, F1 因子值和 F2 因子值均显著降低。在盐湖早期阶段由于蒸发作用增强湖泊沉积物中碳酸盐含量升高, 随着盐湖成盐演化的正向发展, 碳酸盐的含量逐渐降低, 本阶段 F2 因子值变小表明察尔汗古湖进入盐湖后期阶段。因此, 本阶段湖区气候寒冷干燥, 察尔汗盐湖补给水锐减, 形成干盐湖。察尔汗盐湖 ZK88-01、ZK89-04 钻孔中原生石盐流质包裹体的氢、氧同位素及 Mg/Na 值同样显示 21—15 ka 期间平均温度比现今低约 6~7℃(张保珍等, 1995)。亚洲中部季风影响区众多古气候记录显示 25.5—15.4 ka 期间湿度显著降低, 气候干旱(Herzschuh, 2006)。

3.4 柴达木盆地晚更新世湖泊波动的气候模式

西北内陆干旱区湖泊多由发源于周围高山区的河流补给, 因此湖泊沉积物环境记录可能包含荒漠区之外的气候变化信息(Yang and Scuderi, 2010)。柴达木盆地湖泊入湖径流多发源于周围山脉, 径流量的变化包含了盆地周围山脉的气候变化信息。苏干湖(Zhang et al., 2010)年纹层孢粉、自生碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 、摇蚊等环境指标研究表明上述环境指标之间存在差异性, 自生碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 、摇蚊等环境指标可能反映周围山脉冰雪融水带来的入湖径流变化信息, 而孢粉反映湖区周围的有效湿度信息。柴达木盆地东北部克鲁克湖钻孔岩芯研究显示全新世千年尺度的湖面变化主要由入湖径流量控制, 而入湖径流起源的周围山脉降水最终反映东亚夏季风强度的变化(Zhao et al., 2010)。前人研究认为柴达木盆地周围山脉的上升气流与盆地的下沉气流形成的局部环流使盆地与周围山脉的气候出现差异(Zhao et al., 2007)。位于东亚季风尾闾区的柴达木盆地东缘茶卡盐湖沉积物在晚冰期(17.2—11.4 ka)出现高湖面与周围山脉冰雪融水量增加导致入湖径流量增加有关, 而盆地内察尔汗盐湖、小柴旦盐湖及昆特依盐湖在晚冰

期并未出现反映湖泊扩张的陆源碎屑沉积, 可能归因于盆地内干旱气候下强烈蒸发作用抵消了由入湖径流带来的水量(Liu et al., 2008)。综上所述, 柴达木盆地湖泊沉积记录了流域内气候变化的综合信息, 湖泊的扩张与退缩取决于入湖径流量和蒸发量的关系, 入湖径流量与流域降水量以及温度变化引起的冰雪融水量相关, 而蒸发量取决于盆地内温度和有效湿度。盆地内部有效湿度与入湖径流量变化之间可能存在差异性, 对于山-盆大气环流引起的气候差异以及对全球气候变化的响应机制仍需深入开展研究工作。

4 结论

(1) ISL1A 孔岩芯元素主成分分析表明察尔汗古湖 Si、Al、Fe、P、K、Ti、Mn、Rb 元素含量变化主要受入湖径流量(流域侵蚀搬运作用)变化的控制, Ca、Sr 元素含量变化受湖泊自生碳酸盐沉降作用控制, 指示湖泊蒸发作用和湖区有效湿度的变化。

(2) ISL1A 孔环境代用指标综合分析表明, 察尔汗古湖在晚更新世出现多次湖水淡化-咸化, 湖泊扩张-退缩剧烈波动。在 85—74 ka, 63—58 ka, 34—24 ka 期间湖泊扩张, 出现高湖面, 湖区植被为草原-荒漠草原, 其中 34—24 ka 期间察尔汗古湖盐度较高, 扩张幅度较小。94—85 ka 湖泊矿化度升高, 湖区气候暖偏干。52—34 ka 期间湖泊显著退缩演化为盐湖, 24—9 ka 期间在冷干气候背景下, 湖泊逐渐演化为干盐湖, 湖区植被为荒漠草原-荒漠植被。ISL1A 孔环境变化记录证实了前人提出的柴达木盆地高山深盆、震荡干化模式成盐理论(张彭熹, 1987), 而气候干湿交替波动是湖泊震荡演化成盐的重要控制因素。

(3) 察尔汗盐湖波动演化过程包含了周围山脉和盆地内气候变化的信息, 二者在气候变化特征在不同时段可能存在差异性, 对于盆地内局部大气环流模式以及对全球气候变化的响应机制仍需深入开展工作。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 41301045 and 41302024).

参考文献:

安福元, 马海州, 魏海成, 樊启顺, 韩文霞. 2013. 柴达木盆地察尔汗湖相沉积物的粒度分布模式及其环境意义[J]. 干旱区地理, 36(2): 212-220.

- 陈敬安, 曾艳, 王敬富, 杨永琼, 杨海全, 计永雪. 2013. 湖泊沉积物不同赋存状态 Rb、Sr 地球化学记录研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 32(4): 408-417.
- 陈敬安, 万国江, 陈振楼, 黄荣贵. 1999. 洱海沉积物化学元素与古气候演化[J]. 地球化学, 28(6): 562-570.
- 陈克造, BOWLER J M, KELTS K. 1990. 四万年来青藏高原的气候变迁[J]. 第四纪研究, 10(1): 21-31.
- 陈诗越, 王苏民, 金章东, 沈吉. 2003. 青藏高原中部湖泊沉积物中 Zr/Rb 值及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 23(4): 35-38.
- 顾兆炎, 赵惠敏, 王振海, 袁宝印. 1998. 末次间冰期以来新疆巴里坤湖蒸发盐的沉积环境记录[J]. 第四纪研究, 18(4): 328-334.
- 韩淑娣, 钟巍. 1990. 新疆巴里坤湖 ZK 0024 孔微量元素变化的古气候意义[J]. 地理科学, 10(2): 150-158.
- 黄麒, 陈克造. 1990. 七十三万年来柴达木盆地察尔汗盐湖古气候波动的形式[J]. 第四纪研究, 10(3): 205-212.
- 李世杰, 区荣康, 朱照宇, 李炳元. 1998. 24 万年来西昆仑山甜水海湖岩芯碳酸盐含量变化与气候环境演化[J]. 湖泊科学, 10(2): 58-65.
- 梁青生, 黄麒. 1995. 青海察尔汗盐湖达布逊区段和别勒滩区段的成盐年代[J]. 沉积学报, 13(3): 126-131.
- 刘兴起, 于升松, 邵明显. 1995. 察尔汗盐湖 91-IV4 孔沉积地层元素地球化学的研究[J]. 湖泊科学, 7(4): 321-326.
- 罗超, 彭子成, 杨东, 刘卫国, 贺剑峰, 刘桂建, 张彭熹. 2008. 多元地球化学指标指示的 32 ~ 9 ka B.P. 罗布泊地区环境及其对全球变化的响应[J]. 地球化学, 37(2): 139-148.
- 罗建育, 陈镇东. 1998. 台湾大鬼湖沉积物元素分布所反映的古环境意义[J]. 湖泊科学, 10(3): 13-18.
- 沈吉, 张恩楼, 夏威夷. 2001. 青海湖近千年来气候环境变化的湖泊沉积记录[J]. 第四纪研究, 21(6): 508-513.
- 孙千里, 周杰, 肖举乐. 2001. 岱海沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 21(1): 93-95.
- 王永, 赵振宏, 林景星. 2004. 罗布泊 AK1 孔沉积物地球化学组成与古气候[J]. 地球学报, 25(6): 653-658.
- 魏乐军, 郑绵平, 蔡克勤, 葛文胜. 2002. 西藏洞错全新世中期盐湖沉积的古气候记录[J]. 地学前缘, 9(1): 129-135.
- 于升松, 谭红兵, 刘兴起, 曹广超. 2009. 察尔汗盐湖资源可持续利用研究[M]. 北京: 科学出版社.
- 余素华, 文启忠. 1995. 试论青藏高原第四纪沉积地球化学演化与环境变迁[J]. 海洋地质与第四纪地质, 15(4): 97-106.
- 张保珍, 范海波, 张彭熹, LOWENSTEIN T K, SPENCER R J. 1990. 察尔汗盐湖石盐的流质包裹体氢氧稳定同位素分析及其地球化学意义[J]. 沉积学报, 8(1): 3-17.
- 张保珍, 张彭熹, LOWENSTEIN T K, SPENCER R J. 1995. 青藏高原末次冰期盛冰阶的时限与干盐湖地质事件[J]. 第四纪研究, 15(3): 193-201.
- 张宏亮, 李世杰, 于守兵, 申慧彦, 沈德福. 2009. 青藏高原全新世环境变化的兹格塘错元素地球化学沉积记录[J]. 山地学报, 27(2): 248-256.
- 张虎才, 雷国良, 常凤琴, 樊红芳, 杨明生, 张文翔. 2007. 柴达木盆地察尔汗贝壳堤剖面年代学研究[J]. 第四纪研究, 27(4): 511-521.
- 张华, 郑卓, 王建华, 王斌, 邓韞, 邹和平. 2004. 海南岛近 2500a 来盘星藻记录的周期性气候变化[J]. 热带地理, 24(2): 109-112.
- 张彭熹. 1987. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京: 科学出版社.

References:

- AN Fu-yuan, MA Hai-zhou, WEI Hai-cheng, FAN Qi-shun, HAN Wen-xia. 2013. Grain-size distribution patterns of lacustrine sediments of Qarhan area and its environmental significance [J]. Arid Land Geography, 36(2): 212-220(in Chinese with English abstract).
- AN Fu-yuan, MA Hai-zhou, WEI Hai-cheng, LAI Zhong-ping. 2012. Distinguishing aeolian signature from lacustrine sediments of the Qaidam Basin in northeastern Qinghai-Tibetan Plateau and its palaeoclimatic implications[J]. Aeolian Research, 4: 17-30.
- CHEN Jing-an, WAN Guo-jiang, CHEN Zhen-lou, HUANG Rong-gui. 1999. Chemical elements in sediments of Lake Erhai and palaeoclimate evolution[J]. Geochimica, 28(6): 562-570(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jing-an, ZENG Yan, WANG Jing-fu, YANG Yong-qiong, YANG Hai-quan, JI Yong-xue. 2013. The geochemical records of Rb and Sr of different forms in lake sediments[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 32(4): 408-417 (in Chinese with English abstract).
- CHEN Jun, AN Zhi-sheng, HEAD J. 1999. Variation of Rb/Sr ratios in the Loess-Paleosol sequences of central China during the Last 130,000 years and their implications for monsoon paleoclimatology[J]. Quaternary Research, 51: 215-219.
- CHEN Ke-zao, BOWLER J M, KELTS K. 1990. Palaeoclimatic evolution within the Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau in the last 40 000 years[J]. Quaternary Sciences, 10(1): 21-31(in Chinese with English abstract).
- CHEN Ke-zao, BOWLER J M. 1985. Preliminary study on sedimentary characteristics and evolution of palaeoclimate of Qarhan Salt Lake in Qaidam Basin[J]. Science in China (Series B), 11: 1218-1231.
- CHEN Ke-zao, BOWLER J M. 1986. Late Pleistocene evolution of salt lakes in the Qaidam Basin, Qinghai Province, China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 54: 87-104.
- CHEN Shi-yue, WANG Su-min, JIN Zhang-dong, SHEN Ji. 2003. Variation of Zr/Rb ratios in lacustrine sediments of the central Tibetan Plateau and its environment implications[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 23(4): 35-38(in Chinese with English abstract).
- COX R, LOWE D R, CULLERS R L. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59: 2919-2940.
- FAN Qi-shun, MA Hai-zhou, CAO Guang-chao, CHEN Zong-yan,

- CAO Sheng-kui. 2012. Geomorphic and chronometric evidences for high lake level history in Gahai Lake and Toson Lake of northeastern Qaidam Basin, northeastern Qinghai - Tibetan Plateau[J]. *Journal of Quaternary Science*, 27(8): 819-827.
- FAN Qi-Shun, MA Hai-zhou, MA Zhi-bang, WEI Hai-cheng, HAN Feng-qin. 2014a. An assessment and comparison of 230 Th and AMS ^{14}C ages for lacustrine sediments from Qarhan Salt Lake area in arid western China[J]. *Environmental Earth Science*, 71(3): 1227-1237.
- FAN Qi-Shun, MA Hai-zhou, WEI Hai-cheng, SHAN Fa-shou, AN Fu-yuan, XU Li-min, MADSEN D B. 2014b. Late Pleistocene paleoclimatic history documented by an oxygen isotope record from carbonate sediments in Qarhan Salt Lake, NE Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 85: 202-209.
- GU Zhao-yan, ZHAO Hui-min, WANG Zhen-hai, YUAN Bao-yin. 1998. Evaporation salt records of environment response to climate change in Barkol Lake Basin, northwestern China[J]. *Quaternary Sciences*, 18(4): 328-334(in Chinese with English abstract).
- HAN Shu-ti, ZHONG Wei. 1990. Palaeoclimate signification from trace element variation in Barkol Lake in Xingjiang[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 10(2): 150-158(in Chinese with English abstract).
- HERZSCHUH U. 2006. Palaeo-moisture evolution in monsoonal Central Asia during the last 50,000 years[J]. *Quaternary Science Review*, 25: 163-178.
- HUANG Qi, CHEN Ke-zhao. 1990. Palaeoclimatic fluctuation fashion of Qarhan Salt Lake in Qaidam Basin in the past 730 000 years[J]. *Quaternary Sciences*, 3: 205-212(in Chinese with English abstract).
- JIN Zhang-dong, AN Zhi-sheng, YU Ji-min, LI Fu-chun, ZHANG Fei. 2015. Lake Qinghai sediment geochemistry linked to hydroclimate variability since the last glacial[J]. *Quaternary Science Reviews*, 122: 63-73.
- JIN Zhang-dong, CAO Jun-ji, WU Jing-lu, WANG Su-min. 2006. A Rb/Sr record of catchment weathering response to Holocene climate change in Inner Mongolia[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31: 285-291.
- KALUGIN I, SELEGEI V, GOLDBERG E, SERET G. 2005. Rhythmic fine-grained sediment deposition in Lake Teletskoye, Altai, Siberia, in relation to regional climate change[J]. *Quaternary International*, 136(1): 5-13.
- LAI Zhong-ping, MISCHKE S, MADSEN D B. 2014. Paleoenvironmental implications of new OSL dates on the formation of the "Shell Bar" in the Qaidam Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Paleolimnology*, 51: 197-210.
- LASKAR J, ROBUTEL P, JOUTEL F, GASTINEAU M, CORREIA A, LEVRARD B. 2004. A long term numerical solution for the insolation quantities of the Earth[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 428: 261-285.
- LI Shi-jie, QU Rong-kang, ZHU Zhao-yu, LI Bing-yuan. 1998. A carbonate content record of late Quaternary climate and environment changes from lacustrine core TS95 in Tianshuihai Lake Basin, northwestern Qinghai-Xizang Plateau (Tibet) Plateau[J]. *Journal of Lake Sciences*, 10(2): 58-65(in Chinese with English abstract).
- LIANG Qing-sheng, HUANG Qi. 1995. Salt-forming ages of the Dabusun and Bieletan regions in Qarhan playa, Qinghai[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 13(3): 126-131(in Chinese with English abstract).
- LIU Xing-qi, DONG Hai-liang, RECH J A, MATSUMOTO R, YANG Bo, WANG Yong-bo. 2008. Evolution of Chaka Salt Lake in NW China in response to climatic change during the Latest Pleistocene-Holocene[J]. *Quaternary Science Reviews*, 27: 867-879.
- LIU Xing-qi, YU Sheng-song, SHAO Ming-yu. 1995. Element geochemistry of sediment in the core of 91-IV4 in Qarhan Salt Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 7(4): 321-326(in Chinese with English abstract).
- LUO Chao, PENG Zi-cheng, YANG Dong, LIU Wei-guo, HE Jian-feng, LIU Gui-jian, ZHANG Peng-xi. 2008. Paleoclimate of LoP Nur and the response to global change by geochemical elements multi-analysis[J]. *Geochimica*, 37(2): 139-148(in Chinese with English abstract).
- LUO Jian-yu, CHEN Zhen-dong. 1998. Paleoenvironmental records from the elemental distributions in the sediments of Great Ghost Lake in Taiwan, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 10(3): 13-18(in Chinese with English abstract).
- MADSEN D B, MA Hai-zhou, RHODE D, BRANTINGHAM P J, FORMAN S L. 2008. Age constraints on the late Quaternary evolution of Qinghai Lake, Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Research*, 69: 316-325.
- MADSEN D, LAI Zhong-ping, SUN Yong-juan, RHODE D, LIU Xiang-jun, BRANTINGHAM P J. 2014. Late Quaternary Qaidam lake histories and implications for an MIS 3 "Greatest Lakes" period in north-west China[J]. *Journal of Paleolimnology*, 51: 161-177.
- MISCHKE S, HERZSCHUH U, ZHANG C, BLOEMENDAL J, RIEDEL F. 2005. A Late Quaternary lake record from the Qilian Mountains (NW China): lake level and salinity changes inferred from sediment properties and ostracod assemblages[J]. *Global and Planet Change*, 46: 337-359.
- NESBITT H W, YONG G M. 1982. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299: 715-717.
- SHEN Ji, ZHANG En-lou, XIA Wei-lan. 2001. Records from lake sediments of the Qinghai Lake to mirror climatic and environmental changes of the past about 1 000 years[J]. *Quaternary Sciences*, 21(6): 508-513(in Chinese with English abstract).
- SUN Qian-li, ZHOU Jie, XIAO Ju-le. 2001. Grain-size characteristics of Lake Daihai sediments and its paleoenvironmental significance[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*,

- 21(1): 93-95(in Chinese with English abstract).
- WANG Yong, ZHAO Zhen-hong, LIN Jing-xing. 2004. Pleoclimate and Geochemical Composition of AK1 Core Sediments in Lop Nur, Xinjiang[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(6): 653-658(in Chinese with English abstract).
- WECKSTRÖM K, WECKSTRÖM J, YLINIEMI L M, KORHOLA A. 2010. The ecology of *Pediastrum* (Chlorophyceae) in subarctic lakes and their potential as paleobioindicators[J]. *Journal of Paleolimnology*, 43: 61-73.
- WEI Hai-cheng, FAN Qi-shun, ZHAO Yan, MA Hai-zhou, SHAN Fa-shou, AN Fu-yuan, YUAN Qin. 2015. A 94-10 ka pollen record of vegetation change in Qaidam Basin, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 431: 43-52.
- WEI Hai-cheng, MA Hai-zhou, ZHENG Zhuo, PAN An-ding, HUANG Kang-you. 2011. Modern pollen assemblages of surface samples and their relationships to vegetation and climate in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 163: 237-246.
- WEI Le-jun, ZHENG Mian-ping, CAI Ke-qin, GE Wen-sheng. 2002. Early-middle Holocene palaeoclimate record from saline lake sediments in Tontso, Tibet[J]. *Earth Science Frontiers*, 9(1): 129-135(in Chinese with English abstract).
- WHITNEY V S, MAYLE F E. 2012. *Pediastrum* species as potential indicators of lake-level change in tropical South America[J]. *Journal of Paleolimnology*, 47: 601-615.
- XU Hai, LIU Bin, WU Feng. 2010. Spatial and temporal variations of Rb/Sr ratios of the bulk surface sediments in Lake Qinghai[J]. *Geochemical Transactions*, 11: 3.
- XU Qing-hai, LI Yue-cong, YANG Xiao-lan, XIAO Ju-le, LIANG Wen-dong, PENG Yan-jia. 2005. Source and distribution of pollen in the surface sediment of Daihai Lake, inner Mongolia[J]. *Quaternary International*, 136: 33-45.
- YANG Xiao-ping, SCUDERI L A. 2010. Hydrological and climatic changes in deserts of China since the late Pleistocene[J]. *Quaternary Research*, 73: 1-9.
- YU Sheng-song, TAN Hong-bing, LIU Xing-qi, CAO Guang-chao. 2009. Sustainable Utilization of Qarhan Salt Lake Resources[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- YU Su-hua, WEN Qi-zhong. 1995. Geochemical evolution and environment changes since Quaternary in Qing-Zang (Qinghai-Tibet) Plateau[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 15 (4): 97-106(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Bao-zhen, FAN Hai-bo, ZHANG Peng-xi, LOWENSTEIN T K, SPENCER R J. 1990. Hydrogen and Oxygen stable isotope analyses of fluid inclusions in halite in Charhan Salt Lake with geochemical implication[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 8(1): 3-17(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Bao-zhen, ZHANG Peng-xi, LOWENSTEIN T K, SPENCER R J. 1995. Time range of the great ice age of the last glacial stage and its related geological event of playa in the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 15(3): 193-201(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Hong-liang, LI Shi-jie, YU Shou-bing, SHEN Hui-yan, SHENG De-fu. 2009. Holocene environmental change record derived from elements in the sediment core of Zigetang Lake, Tibetan Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 27(2): 248-256(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Hua, ZHENG Zhuo, WANG Jian-hua, WANG Bin, DENG Yun, ZOU He-ping. 2004. Climate changes for last 2500 years based on *Pediastrum* record from Hainan Island[J]. *Tropical Geography*, 24(2): 109-112(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Hu-cai, LEI Guo-liang, CHANG Feng-qin, FAN Hong-fang, YANG Ming-sheng, ZHANG Wen-xiang. 2007. Age determination of Shell Bar section in Salt Lake Qarhan, Qaidam Basin[J]. *Quaternary Sciences*, 27(4): 511-521(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Ke, ZHAO Yan, YU Zi-cheng, ZHOU Ai-feng. 2010. A 2700-year high resolution pollen record of climate change from varved Sugan Lake in the Qaidam Basin, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 297: 290-298.
- ZHANG Peng-xi. 1987. Salt Lake in Qaidam Basin[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- ZHAO Cheng, YU Zi-cheng, ZHAO Yan, ITO E, KODAMA K P, CHEN Fa-hu. 2010. Holocene millennial-scale climate variations documented by multiple lake-level proxies in sediment cores from Hurler Lake, Northwest China[J]. *Journal of Paleolimnology*, 44: 995-1008.
- ZHAO Yan, YU Zi-cheng, CHEN Fa-hu, ITO E, ZHAO Cheng. 2007. Holocene vegetation and climate history at Hurler Lake in the Qaidam Basin, northwest China[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 145: 275-288.
- ZHENG Zhuo, HUANG Kang-you, XU Qing-hai, LU Hou-yuan, CHEDDADI R, LUO Yun-li, BEAUDOUIN C, LUO Chuan-xiu, ZHENG Yan-wei, LI Chun-hai, WEI Jin-hui, DU Chun-bin. 2008. Comparison of climatic threshold of geographical distribution between dominant plants and surface pollen in China[J]. *Science in China(Series D)*, 51(8): 1107-1120.
- ZHU Li-ping, CHEN Ling, LI Bing-yuan, LI Yuan-fang, XIA Wei-lan, LI Jian-guo. 2002. Environmental changes reflected by lake sediments of South Hongshan Lake, Northwest Tibet[J]. *Science in China (Series D)*, 45(5): 430-439.