

我国西北夏季风边界千年尺度变化的证据^①

——来自盐池和猪野泽盐类矿物分析结果

李育 张成琦 周雪花 王岳

(兰州大学资源环境学院 兰州大学干旱区水循环与水资源研究中心 兰州 730000)

摘要 我国夏季风西北缘是响应长尺度气候变化最为敏感的区域之一,但夏季风边界变化与千年尺度气候变化之间的关系尚不明确,相关研究仍缺乏足够证据。夏季风西北缘湖泊沉积物中盐类矿物种类与含量的时空变化,有助于推测气候变化特征。盐池和猪野泽分别位于祁连山北麓的河西走廊中段和东段,是研究长时间尺度亚洲夏季风影响区西北边界变化的关键区域。研究全新世千年尺度下,夏季风西北边界的变化对夏季风西北缘气候变化过程的影响,对明确季风边缘区千年尺度季风变化机制,预测未来长尺度气候变化有重要意义。因此,本文选择盐池古湖泊盐池剖面(YC),猪野泽青土湖01、02剖面(QTH01、QTH02)等三个剖面,开展全新世千年尺度下,亚洲季风西北边界地区湖泊沉积物盐类矿物时空变化对比研究。结果显示:QTH01、QTH02剖面盐类矿物以碳酸盐为主,硫酸盐类矿物仅零星出现,而YC剖面硫酸盐类矿物含量相对较高,同时出现了氯化物型矿物,全新世气候特征整体较猪野泽更为干旱。末次冰期和早全新世,三个剖面受季风输送水汽影响明显,碳酸盐类矿物能较好沉积,季风边界在这一时期向北扩张,推进到祁连山中段地区;中全新世QTH01、QTH02剖面受夏季风影响减弱,湖泊退缩,碳酸盐类矿物含量达到峰值,YC剖面则表现出极端干旱的气候特征,硫酸盐类矿物因“盐效应”含量下降,此时夏季风西北部水汽输送边界位于石羊河流域和盐池流域之间;晚全新世盐池和猪野泽均以风成沉积为主,气候干旱,碳酸盐类矿物难以保存,硫酸盐和氯化物矿物含量出现高值,说明夏季风西北边界进一步向南迁移。综上所述,盐类矿物含量变化能良好反应夏季风西北缘全新世气候变化特征,同时证明,在全新世千年尺度上,夏季风西北边界在盐池流域和石羊河流域之间存在变化。

关键词 盐类矿物 千年尺度 季风边界 全新世

第一作者简介 李育 男 1981年出生 博士 教授 季风边缘区长时间尺度气候变化 E-mail:liyuy@lzu.edu.cn

中图分类号 P462.4⁺1 **文献标识码** A

0 引言

我国夏季风西北缘气候受亚热带季风系统和纬度西风带的共同影响^[1-2],是响应长尺度气候变化最为敏感的区域之一^[3-7],已成为过去全球变化研究的热点地区,已有诸多工作开展。季风变化研究对古气候重建有重要意义,针对不同时间尺度的大量研究已取得一定成果。鹿化煜等^[8]通过对洛川黄土剖面磁化率和粒度的研究,分析了2500 ka来东亚季风变化的周期特征;丁仲礼等^[9]曾以黄土记录为基础,探讨了第四纪东亚季风变化的动力机制;于学峰等^[10]选取若尔盖地区高分辨率泥炭记录,重建了青藏高原东部全新世冬夏季风演化序列;汪永进等^[11-12]通过我国季风区多个石笋记录的精确同位素测试结果,讨

论了东亚季风千年和轨道尺度变化,认为中国洞穴石笋高分辨率记录对了解亚洲季风气候驱动机制有巨大潜力;Chen *et al.*^[13]通过亚洲内陆干旱区与季风区的湿度错位相变化研究,提出亚洲季风区、中亚干旱区全新世千年尺度气候变化过程存在差异,认为这种差异主要受控于亚洲季风和西风带气流全新世演化模式的不同,并据此提出千年尺度上全新世气候变化的西风模式和季风模式;Feng *et al.*^[14]综合我国干旱、半干旱区近期气候变化研究成果,分别总结了新疆地区、青藏高原北部、内蒙古高原及黄土高原西北部全新世千年尺度气候变化特征,认为我国干旱、半干旱区中全新世适宜期(8~5 ka B.P.)是对气候变化延迟响应的结果。植被,生态和水循环变化有助于深化我们对全球气候变影响自然过程的认识,Li *et al.*^[15]重建了猪

^①国家自然科学基金项目(批准号:41371009)与兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(编号:LZUJBK-2013-127)联合资助
收稿日期:2014-03-14;收修改稿日期:2014-06-10

野泽全新世千年尺度环境变化,同时探讨了季风边缘区气候变化与东亚季风和西风带的关系;Liang *et al.*^[16]结合树轮数据与气候、水文和历史文献资料,证实了中国北方 1920s 到 1930s 早期干旱灾害的存在,并论证了在中国干旱、半干旱地区运用树轮记录识别大规模干旱事件的可能性;Ma 和 Fu^[17]模拟得到了我国干旱、半干旱地区地表水文变量的年际变化特征;吴建国和吕佳佳^[18]模拟并分析了气候变化对我国干旱区分布范围的影响,认为我国荒漠化范围将增加,干旱胁迫总体上减弱。我国夏季风西北缘气候变化研究虽已受到关注,东亚季风和西风带对气候变化的驱动机制也引起广泛讨论^[19-22],但相比于我国东南地区^[12, 23-25],该区域受亚洲季风和西风带气流共同影响,边界条件复杂,全新世千年尺度气候变化研究仍缺乏足够证据。在诸多研究中,夏季风边界变化与气候变化驱动机制之间关系的研究是一个重要科学问题。已有相关研究多为十年尺度上对现代气象资料的分析 and 模拟^[26-27],缺乏全新世千年尺度的讨论;Zhao *et al.*^[2]曾综述了 30 个全新世孢粉记录的植被与气候变化研究结论,指出我国夏季风边界地区千年尺度气候变化受季风、西风、地形等因素共同影响,Feng *et al.*^[14]在综合大量沉积记录的基础上,探讨了全新世期间夏季风边界地区对气候变化响应的规律及差异,但这些研究均未涉及夏季风边界界线变化的讨论;张兰生^[28]研究了北方季风尾闾区全新世以来不同时期 250 mm 等降水线的空间变化,指出其在万年、千年、十年尺度下,变化幅度分别为 800 km、400 km 和 200 km,但并未讨论界线变化对气候变化的响应方式。因此,夏季风西北部水汽输送边界变化的气候学证据仍较为缺乏,在全新世千年尺度下,研究夏季风西北边界的变化对于干旱、半干旱区气候变化过程的影响,对完善千年尺度季风变化历史,预测未来长尺度气候变化有重要意义。

我国夏季风边界地区存在的大量晚第四纪湖泊沉积记录,如博斯腾湖^[29],巴里坤湖^[30],艾丁湖^[31],呼伦湖^[22],岱海^[32],猪野泽^[33],吉兰泰盐湖和查哈诺尔湖盆^[34-35],及周边部分青藏高原高寒区湖泊记录,如松西错^[36],色林错^[37],青海湖^[38-40],茶卡盐湖^[41]等,均广泛存在盐类矿物沉积。盐类矿物是碱金属、碱土金属的卤化物,硫酸盐,碳酸盐,重碳酸盐及少量硼酸盐、硝酸盐等矿物的总称^[42],不同种类盐类矿物的含量差异,能够揭示湖区的降水、湖水的盐度和温度等环境特征^[43-46],常用于气候环境变化的研究。

其中,碳酸盐类矿物在古气候重建中能较灵敏的记录区域气候环境的类型,特点和变化规律^[47],Rhodes *et al.*^[48]将沉积物中碳酸盐含量与部分矿物及有机地化指标相结合,重建了 Lake Manas 晚更新世以来环境演变情况;Wei *et al.*^[49]的研究证明了碳酸盐中氧同位素对夏季风的指示意义;陈敬安等^[50-51]通过对洱海、程海湖泊沉积物的精细采样研究,认为温度及其引起的相关变化控制了沉积物碳酸盐含量,湖泊内生碳酸钙沉淀因子可视为气候冷暖变化的良好代用指标;我国盐湖硫酸盐类矿物共 25 种^[52],其中,芒硝是干冷环境下沉积的硫酸盐矿物,越冷越易沉积^[53-54],刘成林等^[55]通过罗布泊盐湖钙芒硝包裹体特征,重建了更新世晚期罗布泊夏季古气温,此外,孙青等^[56]研究了 9 个硫酸盐型盐湖表层(0~10 cm)沉积物中的长链烯酮,发现咸水湖和盐湖中长链烯酮不饱和度与湖泊水体温度相关性较好,可能会成为湖泊沉积物重建古温度的重要替代指标。我国盐湖资源与生态环境备受关注^[57],研究其他盐类矿物,如钾盐,硝酸盐等,对完善我国盐湖成盐理论体系,合理开发利用和保护盐湖资源与环境具有明显的理论意义和应用价值,郑大中等^[58]通过研究钾盐矿床的物质来源,发现富钾热液是找寻钾盐矿床的重要指示;郑喜玉^[59]全面总结了乌尊布拉克湖特色盐类硝酸钾盐的形成环境、物质成分和沉积特征,其对硝酸钾盐的形成演化机理的探讨,扩展了我国盐湖研究的新领域。因此,根据湖泊沉积物中盐类矿物种类与含量的时空变化,可推测干旱、半干旱区全新世千年尺度气候变化特征。

猪野泽和盐池均位于祁连山北麓,是现代亚洲季风边缘区,对气候变化响应敏感,是研究长时间尺度亚洲夏季风影响区北部边界变化的关键区域。猪野泽所在的石羊河流域位于河西走廊东段,现代季风水汽输送可以达到该流域上游位置,而据已有现代气候学研究^[60-62],现代亚洲夏季风的水汽输送并不能达到位于河西走廊中段的盐池流域。对比研究全新世千年尺度下,猪野泽和盐池对气候变化响应特征的差异,对研究长时间尺度亚洲夏季风界线变化有重要意义。因此,本文选择盐池古湖泊盐池剖面(YC),猪野泽青土湖 01、02 剖面(QTH01、QTH02)等三个全新世剖面,进行 XRD 矿物组成和年代学分析,开展全新世千年尺度下,亚洲季风北部边界地区湖泊沉积物盐类矿物时空变化对比研究,同时结合盐类矿物对气候变化的响应特征,明确猪野泽和盐池全新世气候变化与

亚洲季风之间的关系,探讨夏季风西北界线变化,期为季风边缘区全新世千年尺度季风变化机制研究提供证据。

1 研究区概况

按我国自然地理区划^[63],猪野泽和盐池均位于我国西北内陆干旱区(图1),所在流域均呈现南高北低地势,自南向北可大致划分为三个气候区:南部祁连山高寒半干旱湿润区(海拔5 000~2 000 m,年降水量300~600 mm,年蒸发量700~1 200 mm),中部走廊平原干旱区(海拔2 000~1 500 m,年降水量150~300 mm,年蒸发量1 300~2 000 mm)和北部温暖干旱区(海拔1 500~1 300 m,年降水量小于150 mm,年蒸发量2 000~2 600 mm)^[64-65]。河西走廊地区大气降水以 HCO_3^- - Ca^{2+} 型(或 Ca^{2+} - Mg^{2+} 型)为主,流域上游海拔大于3 500 m的地区,地下水化学成分与降水相似,矿化度小于0.3 g/L,所含离子以 HCO_3^- , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主;海拔3 500~2 000 m地区,矿化度升高至0.5~1.0 g/L,地下水水化学特征趋于复杂, HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 是其主要成分。由此可见,海拔变化导致了流域内降水和蒸发的差异,使全流域地下水化学特征由南至北,呈现淡水带—咸水覆盖下的淡水—微咸水带和咸水带的变化特征^[66-67]。

河西走廊位于祁连山北麓,是现代亚洲季风影响范围的北部边界,该区域的古湖泊沉积记录可以用来研究长尺度季风边界变化问题。猪野泽位于河西走

廊东段,是石羊河流域的终端湖,位于祁连山山前构造断陷盆地——民勤盆地,地理坐标介于 $38^\circ 40' \sim 39^\circ 20' \text{N}$, $103^\circ 10' \sim 104^\circ 20' \text{E}$,海拔1 200~1 400 m,处于巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠交汇地带。民勤盆地内有冲积平原、湖沼平原和低山丘陵、沙漠等多种地形^[68],存在大量第四纪松散沉积物,最厚可达300 m,地层中风成,湖相和冲积相沉积物相互交错^[69-70]。猪野泽湖盆在历史时期曾形成统一大湖,但由于气候变化和石羊河中游农业的发展^[33],退缩成许多干小湖盆^[71-72]。目前除在猪野泽湖盆东北部的白碱湖尚有少量积水外,其余湖盆全部干涸^[73]。河西走廊中段的盐池,是黑河流域马营河和丰乐河的终端湖,处于黑河中游冲积平原,为祁连山中段南缘的山前凹陷盆地,地理坐标大致为 $39^\circ 43' \sim 39^\circ 45' \text{N}$, $99^\circ 10' \sim 99^\circ 22' \text{E}$ 。湖盆西端紧闭,东端开阔,中心海拔1 195 m,凹地中间与边缘部分相对高差为15~20 m,被戈壁和沙漠环绕,为酒泉—张掖盆地的最低部分。盐池干涸前黑河上游及周边干燥剥蚀山地和戈壁的大量碎屑物质在其中沉积,目前盐池已经完全干涸,湖盆沉积了近百米厚的第四纪河湖相沉积物,这些沉积物是反映祁连山中段沉积环境和气候变化的良好材料。但相对于古环境研究较为成熟的猪野泽^[15, 33, 74-75],盐池古气候研究相对较少。

2 材料与方法

本文选择盐池古湖泊YC剖面,猪野泽QTH01、

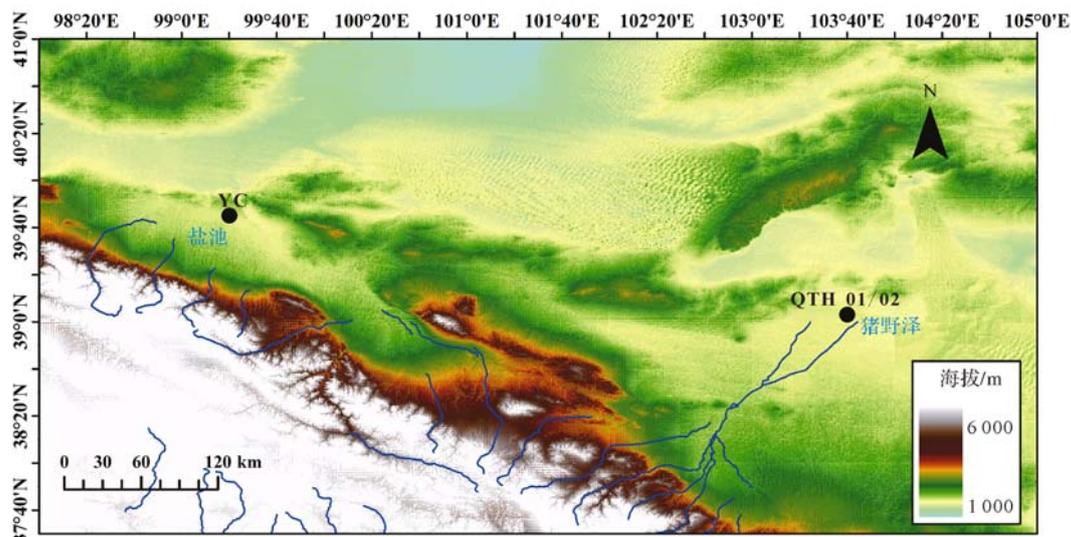


图1 猪野泽和盐池经纬度及高程示意图(黑色实心圆显示了QTH01、QTH02和YC剖面位置)

Fig.1 Map showing latitudes, longitudes and elevations in the Zhuyezhai and Yanchi Lake (Black solid circles indicate the locations of the QTH01, QTH02 and YC sections)

QTH02 剖面等三个全新世剖面,进行年代学和 XRD 矿物分析对比研究。各剖面基本信息见表 1,研究区位置、周围地形及剖面所处位置见图 1,图 2 显示了 3 个剖面岩性及年代变化。

QTH01 和 QTH02 剖面位于猪野泽湖盆中心,为探井剖面。QTH01 剖面顶部 0~165 cm 为黄色和褐色的黏土或砂质黏土沉积物,受人类活动干扰较大;165~230 cm 为棕色冲积相粉砂质黏土;230~315 cm 为粉砂质泥炭层,含有植物残体和软体动物壳体;315~450 cm 由灰色粉砂,黏土和碳酸盐组成,是典型的湖相沉积层位;450~495 cm 为青灰色砂层,含有破损的软体动物壳体;495~603 cm 为富含碳酸盐的灰色粉砂湖相沉积层;603~641 cm 为灰色或黄色砂层,分选较好。QTH02 剖面岩性特征与 QTH01 相似。YC 剖面顶部 0~25 cm 是现代风成沉积;25~68 cm 为灰

褐色泥沼沉积物;68~133 cm 为灰绿色及褐色湖泊沉积物,夹杂有少量砂层;133~415 cm 主要由粉砂质灰绿色及褐色湖泊沉积物组成,其中在 257~279 cm 有一砂层。

矿物种类及相对百分含量测定使用 X 射线衍射方法。样品经玛瑙研钵研磨至 100 目左右,加入凹槽的检测片上,使用载玻片不同方向刮去多余样品,同时确保样品表面平整且与检测片表面水平。之后使用荷兰帕纳科公司的 X'Pert Pro 型粉晶 X 射线衍射检测。该仪器 X 射线发生器最大输出功率 3 kW,陶瓷 X 光管最大功率 2.2kW (Cu 靶),测角仪半径为 135~320 mm,发散狭缝包括固定狭缝和索拉狭缝,测定误差±5%。其中矿物种类及相对百分含量的最终确定,通过在该仪器自带的软件 X'Pert High Score Plus 分析后得出。

表 1 QTH01,QTH02,YC 剖面地理位置、海拔及采样信息

Table 1 The locations, elevations and sample methods of QTH01, QTH02 and YC sections

剖面名称	地理位置	海拔/m	采集深度/cm	采集方式
QTH01	39°03' N 103°40' E	1 309	641	湖相层间隔 2 cm,其余层位间隔 5 cm 采样
QTH02	39°03' N 103°40' E	1 309	641	间隔 2 cm 采样
YC	39°45' N 99°20' E	1 200	415	间隔 5 cm 采样

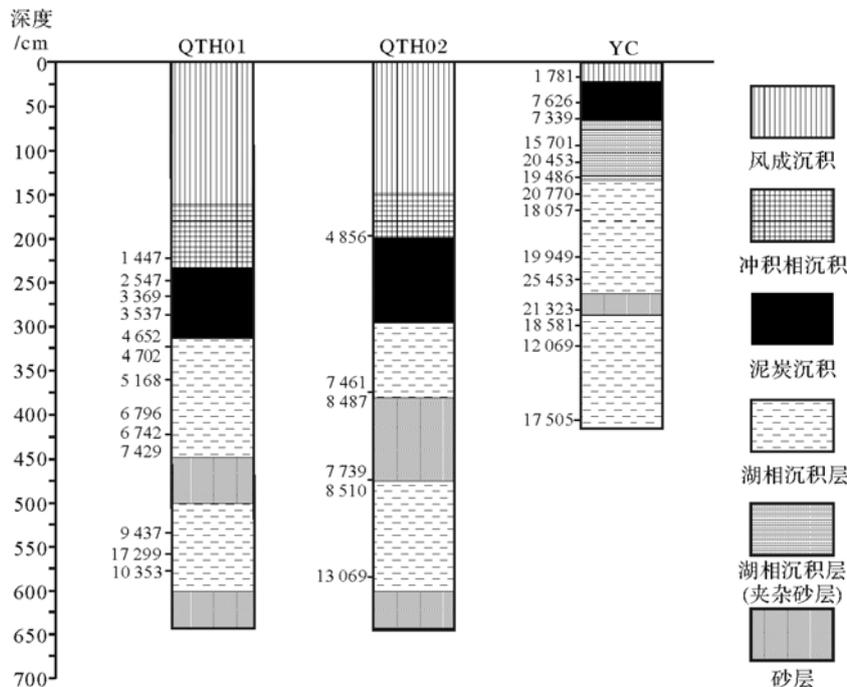


图 2 QTH01、QTH02 和 YC 剖面岩性和校正后的¹⁴C 年代结果(cal yr B.P.)

Fig.2 Lithology and the calibrated ¹⁴C dates (cal yr B.P.) for the QTH01, QTH02 and YC sections

3 结果

根据 QTH01, QTH02 和 YC 剖面矿物组成分析结果, QTH01, QTH02 剖面盐类矿物类型主要由碳酸盐矿物和硫酸盐矿物组成, YC 剖面主要由碳酸盐矿物, 硫酸盐矿物及氯化物矿物组成。为了更好地总结 QTH01, QTH02 和 YC 剖面盐类矿物含量变化规律, 同时避免年代框架对结果的影响, 结合岩性和年代数据, 将各剖面划分为 A(晚冰期及早全新世, 约 13 000 ~ 7 400 cal yr. B.P.)、B(中全新世, 约 7 400 ~ 3 000 cal yr. B.P.) 和 C(晚全新世及现代, 约 3 000 ~ 0 cal yr. B.P.) 三个时段(各剖面 A、B、C 时段对应深度见表 2), 同时选择各剖面存在最为普遍、含量最高的五种碎屑矿物: 石英、钠长石、白云母、斜绿泥石和钙长石, 来表征碎屑矿物平均含量变化, 并分时段计算主要碎屑矿物, 碳酸盐矿物、硫酸盐矿物和氯化物矿物含量变化及各矿物种类不同时段含量变化, 最终得到 QTH01, QTH02 和 YC 剖面全新世千年尺度盐类矿物和主要碎屑矿物含量变化结果(图 3), 及不同种类矿物 A、B 段平均含量变化结果(表 3)。

由图 3 可以看出, QTH01, QTH02 和 YC 剖面不同盐类矿物类型和主要碎屑矿物含量变化情况存在差异。QTH01 剖面主要碎屑矿物平均含量在 60% 以上, 最高达到 97%, 是矿物组成的主要成分。其含量在 A 时段末期和 B 时段(225 ~ 450 cm)有明显低值, 平均含量 29%, 最高也仅为 63%; 在其余层位, QTH01 剖面主要碎屑矿物含量均较高, A 时段高值区(450 ~ 641 cm)平均百分含量达到 73.25%, 但仍略低于 C 时段高值区(0 ~ 225 cm)的 85.9%。QTH01 剖面碳酸盐类矿物含量在 A 时段平均含量仅为 16.45%, 且主要集中在 470 ~ 570 cm, 此层位碳酸盐平均含量达到 23.1%; 在主要碎屑矿物含量明显较低的 B 时段(225 ~ 450 cm), 碳酸盐类矿物在此大量富集, 平均含量达到 51.4%, 并在 401 cm 处出现全剖面最高值 81%; 在 C 时段(0 ~ 225 cm), 碳酸盐类矿物含量明显减少, 除在 22.5 cm 处出现较高值 27% 外, 其余层位多在 5% 以下。硫酸盐类矿物仅在 QTH01 剖面零星存在, 全剖面平均含量仅为 0.8%, 最高值 8% 出现在 551 cm。QTH02 剖面各矿物类型变化规律与 QTH01 剖面相似。全剖面主要碎屑矿物平均含量为 52.2%, 最高达 93%。其含量在 A 时段(405 ~ 640 cm)较为稳定, 平均含量 54.3%; 在 B 时段(190 ~ 405 cm) 300 ~ 400 cm 和 250 cm 左右出现两次低值,

其中 300 ~ 400 cm 平均含量低至 25.4%, 而 251 cm 处仅为 7%; C 时段(0 ~ 190 cm) 含量再次升高, 平均含量 78.5%, 最高值达到 93%。QTH02 剖面碳酸盐类矿物在 A 时段平均含量为 24.5%, 进入 B 时段后含量突然升高, 在 300 ~ 400 cm 平均含量高达 58.8%, 251 cm 处为 68%, 为两个明显高值, 对应主要碎屑矿物的低值区。C 时段碳酸盐类矿物含量极低, 仅在 75 cm 处略微升高, 达到 10%。而硫酸盐类矿物同样仅在个别层位出现, 全剖面平均含量为 0.8%, 561 cm 处出现最高值 11%。YC 剖面主要碎屑矿物平均含量高达 83.2%, 最高值 97%, 其含量整体变化并不明显, 只是在 A 时段初期 330 ~ 415 cm 含量略低, 平均含量为 72.1%, 最高值为 87%, 此外, 主要碎屑矿物在地表(约 10 cm 处)存在低值, 7.5 cm 处出现最低值 44%。与 QTH01, QTH02 剖面不同的是, YC 剖面碳酸盐矿物含量相对较低, A 时段平均含量仅为 4.78, 并且在 A 时段初期 330 ~ 355 cm 最高, 平均含量达到 14.6%, 同时在 347.5 cm 处出现全剖面最高值 25%, 此后逐渐降低, B 时段碳酸盐矿物平均含量降至 4%, 而 C 时段仅达到 3%。硫酸盐类矿物在 YC 剖面广泛存在, 只是在 A 时段中期 125 ~ 330 cm 含量较低, 平均含量 1.39%, 在 A 时段早期(330 ~ 415 cm)和晚期(73 ~ 125 cm)含量相对较高, 碳酸盐类矿物平均含量分别达到 10.4% 和 7.2%, 且在 337.5 cm 处出现全剖面最高值 27%。接近地表的 C 时段碳酸盐类矿物含量较高, 平均含量达 8.2%, 明显高于 B 时段的 4.2%。此外, YC 剖面还出现了零星存在的氯化物矿物, 并且在地表 0 ~ 10 cm 含量较高, 7.5 cm 处更是高达 39%。同时, 在 YC 剖面 407.5 cm 和 12.5 cm 处, 分别存在含量达 17% 和 10% 的硼酸盐类矿物。

由表 3 可进一步发现, QTH01 和 QTH02 剖面盐类矿物种类及其含量变化规律较为相似, 但与 YC 剖面存在一定差异。就盐类矿物种类而言, QTH01 和 QTH02 剖面盐类矿物均以方解石、文石为主的碳酸盐占大多数, 尤其是方解石, 从 A 到 B 时段含量显著升高, C 时段虽重新降低, 但在两剖面 B 时段平均含量均达到 30% 以上, 文石在 A、B 时段较为富集, C 时段极少存在, 白云石在三个时段含量变化不大, 而铁白云石仅在 A 时段少量出现; QTH01 和 QTH02 剖面同时有含少量硫酸盐, 石膏和黄铁钠矾在 B、C 时段较为普遍, A 时段并不存在。同时 QTH01 剖面硫酸盐种类较 QTH02 剖面略显丰富, 含有多种 QTH02 剖面未出现的矿物, 其中氯铅芒硝仅在 C 时段有少量

存在,重钾矾,酸性铵矾则只在 A 时段存在,基铁矾含量从 A 到 C 有所下降,而 QTH02 剖面含有 QTH01 剖面不存在的白钠镁矾,且在 A 时段平均含量达到相对较高的 1.2%。两剖面均不含氯化物等其他盐类矿物。YC 剖面碳酸盐含量相对较低,文石和铁白云石在 B 时段消失,而含量相对较高的硫酸盐矿物以石膏含量最高,在 A 时段达到 4%,B 时段有所下降,为 3.2%,C 时段最低,仅为 1.2%。同时 A 时段还含有少量氯铅芒硝和铁镍矾,虽然在 B、C 段消失,但 B、C 段出现了芒硝,无水芒硝和磷硫铁矿等 A 时段不曾出现的硫酸盐矿物类型,其中无水芒硝在 C 时段平均含量达到 5.4%。YC 剖面还出现了氯化物型矿物,虽然在 A 时段仅存在平均百分含量为 0.41%的岩盐,但其含量在 B、C 时段逐步升高,分别达到 2%和 4.8%,同时 C 时段还出现了平均含量达 5.4%的冰晶石和少量钠柱石。由此可见,三剖面碳酸盐类矿物均以方解石为主,同时含有文石,白云石和铁白云石;QTH01 和 QTH02 剖面硫酸盐类矿物仅零星存在,而 YC 剖面硫酸盐类矿物,尤其是石膏,含量较高,并出现了氯化物型矿物。

表 2 QTH01,QTH02,YC 剖面 A、B、C 时段对应深度
Table 2 The corresponding depth of time periods A, B and C in the QTH01, QTH02 and YC sections

剖面名称	时段 A/cm	时段 B/cm	时段 C/cm
QTH01	430~640	225~430	0~225
QTH02	405~640	190~405	0~190
YC	73~415	25~73	0~25

4 讨论

通过对三个剖面盐类矿物种类及含量变化进行对比研究,我们发现,位于河西走廊东段猪野泽的 QTH01、QTH02 剖面盐类矿物种类与含量变化规律,与位于河西走廊中段盐池古湖泊 YC 剖面存在明显差异。QTH01、QTH02 剖面盐类矿物均以方解石、文石为主的碳酸盐为主,硫酸盐类矿物仅零星出现,而 YC 剖面硫酸盐类矿物含量相对较高,同时出现了氯化物型矿物。盐类矿物的沉淀需要长期干旱的气候、盐水补给、可控制盐水浓度的封闭环境及适宜盐岩保存等特定自然地理与地质环境和气候条件^[79]。因此,猪野泽和盐池湖泊沉积物中盐类矿物种类与含量

表 3 QTH01,QTH02,YC 剖面盐类矿物及主要碎屑矿物平均百分含量变化
Table 3 The average percentage changes of saline minerals and main detrital minerals in the QTH01, QTH02 and YC sections

矿物平均含量/%	QTH01			QTH02			YC				
	A	B	C	A	B	C	A	B	C		
主要碎屑矿物	石英	24.3	9.9	28.7	21.4	15.8	28.0	21.1	16.6	19.4	
	钠长石	17.6	6.2	16.1	19.4	9.1	23.8	10.4	9.1	10.4	
	白云母	14.9	3.8	26.5	9.7	3.7	5.2	28.5	32.2	20.4	
	斜绿泥石	4.2	2.7	7.4	2.7	5.3	10.0	13.5	17.9	7.4	
	钙长石	9.6	5.1	7.3	1.1	1.1	11.2	10.4	9.7	12.2	
碳酸盐	方解石	9.3	39.0	4.2	13.2	31.9	2.4	1.4	2.2	0.0	
	文石	6.7	13.2	0.0	10.5	15.2	0.0	0.7	0.0	0.0	
	白云石	0.4	0.1	2.0	0.8	0.0	0.4	2.0	1.4	3.4	
	铁白云石	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
硫酸盐	石膏	0.0	0.0	1.2	0.0	0.3	0.0	4.1	3.2	1.2	
	芒硝							0.0	0.0	1.6	
	氯铅芒硝	0.0	0.0	0.0				0.1	0.0	0.0	
	无水芒硝							0.0	0.0	5.4	
	重钾矾	0.2	0.0	0.0							
	黄铁钠矾	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	1.4				
	白钠镁矾				0.9	0.0	0.0				
	酸性铵矾	0.4	0.0	0.0							
	基铁矾	0.1	0.0	0.1							
	铁镍矾							0.4	0.0	0.0	
	磷硫铁矿							0.0	1.0	0.0	
	氯化物	岩盐							0.4	2.0	4.8
		冰晶石							0.0	0.0	5.4
钠柱石								0.0	0.0	0.6	

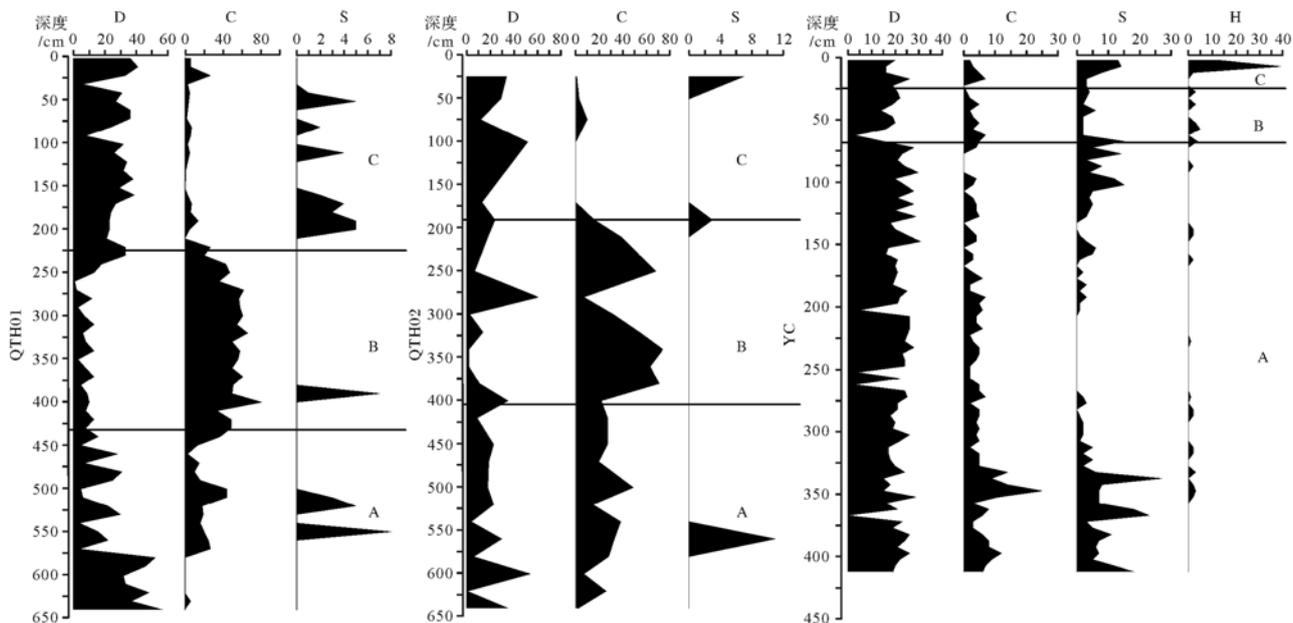


图3 QTH01、QTH02和YC剖面主要碎屑矿物和不同类型盐类矿物百分含量变化

其中“D”代表主要碎屑矿物，“C”代表碳酸盐类矿物，“S”代表硫酸盐类矿物，“H”代表氯化物型矿物

Fig.3 The values of main detrital minerals and different types of saline minerals in the QTH01, QTH02 and YC sections

“D” represents the main detrital minerals, “C” represents the carbonate minerals, “S” represents the sulfate minerals, and “H” represents the haloid minerals

的时空变化,指示了湖泊演化对气候变化的响应过程,使其成为古气候古环境信息的良好载体。

矿物本身溶解度或标准平衡常数决定了矿物沉淀的难易程度,而碳酸盐溶解度一般小于硫酸盐,可优先沉淀,故碳酸盐的富集代表了相对湿润的环境^[80]。猪野泽 QTH01、QTH02 剖面碳酸盐矿物在 A 时段普遍存在,同时伴随着碎屑矿物的大量沉积(图 3),说明在全新世早期,石羊河流域受夏季风影响,上游降水较多,终端湖猪野泽扩张,径流携带了流域沿途沉积物在终端湖沉积,使湖水离子浓度升高,碳酸盐类矿物易于沉淀;B 时段,夏季风减弱,气候较早全新世更为干旱,湖泊开始退缩,湖水中各离子浓度进一步升高,碳酸盐类矿物含量达到全新世峰值。而在湖水离子浓度升高,碳酸盐类矿物大量析出沉淀的同时,入湖径流和降水对猪野泽的淡水补给并未明显减弱,所以除零星出现的硫酸盐类矿物外,QTH01、QTH02 剖面未见其他盐类矿物;而在晚全新世(C 时段),气候极端干旱,流域降水减少,入湖径流显著减弱,沉积物以风成沉积为主,湖泊急剧退缩甚至干涸,碳酸盐类矿物含量迅速降低。此时沉积的碎屑矿物,应当是猪野泽周边巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠表层沉积物在风力搬运下就近沉积的结果^[81-82]。YC 剖

面碳酸盐含量相对较低,除在 A 时段初期含量略高外,其余层位含量绝大多数在 5% 以下,而 QTH01、QTH02 剖面零星存在的硫酸盐类矿物,却广泛存在,说明在全新世期间,盐池气候整体上较猪野泽更为干旱。在 YC 剖面底部,A 时段初期,以方解石、白云石为主的碳酸盐类矿物和以石膏为主的硫酸盐类矿物均较好沉积,代表了晚冰期初期的相对干旱气候;晚冰期至早全新世,夏季风逐渐增强,湖泊扩张,湖水离子浓度下降,硫酸盐类矿物含量急剧降低;A 时段晚期,即早、中全新世过渡期,湖泊开始退缩,硫酸盐类矿物含量重新升高;进入中全新世(B 时段),湖泊退缩明显,沉积物类型由原来的湖相沉积物转变为细粒泥沼相沉积物,但硫酸盐类矿物含量却有所下降。这是因为湖水离子浓度进一步升高,离子间的相互作用增强,会降低其有效浓度(即“盐效应”),减少了离子间相互碰撞的机会^[83],不利于石膏,无水芒硝等硫酸盐类矿物的形成。进入晚全新世,湖泊发育停滞,沉积物以现代风成沉积为主。YC 剖面表层硫酸盐含量出现高值,同时出现了最高含量达 39% 的氯化物矿物。卤水系统中,硫酸盐类矿物石膏沉淀的卤水浓度是海水的 5 倍,而氯化物矿物岩盐沉淀时的卤水浓度更是达到海水的 11~15 倍^[84],这样的盐类矿物组合

指示了极端干旱的环境。

晚冰期以来,伴随着北半球大陆冰盖的迅速消退,格陵兰冰芯和 Cariaco 盆地的钻孔记录均指示了北大西洋地区温度升高的气候特征^[85-86]。亚洲夏季风的强弱与北半球强烈的太阳辐射密切相关,受低纬度轨道尺度太阳辐射变化和赤道复合带位置变化的综合作用^[87],夏季日辐射在 10 ka 左右达到最大值^[88],使亚洲夏季风迅速推进,季风区边界向西北扩张。同时,晚冰期以来的石笋记录,季风区湖泊记录和青藏高原区湖泊记录证明^[89-96],夏季风在晚冰期开始增强,在早、中全新世期间依然强盛。中全新世之后,夏季太阳辐射强度减弱,季风区边界向东南迁移^[97]。而气候特征受西风带控制的区域,在进入全新世后,虽然西风环流被强烈的太阳日辐射增强,但由于高纬度地区仍然被冰盖覆盖,中纬度地区温度较低,大量冰盖融水注入北大西洋,温盐环流减弱^[98-100],低 SST 抑制海面蒸发,本区干旱气候在早全新世并未改变,高海拔冰盖对太阳辐射响应的滞后效应是造成早全新世相对干旱的主要原因^[88];随着高纬度地区冰盖消融、温度上升,北大西洋 SST 升高和区域气旋活动加强,这一区域中全新世有效湿度达到最大值^[13]。据此,Chen *et al.*^[13] 根据亚洲内陆干旱区与季风区的湿度错位相变化,提出了千年尺度上全新世气候变化的西风模式和季风模式,已被全新世气候模拟和现代气候学研究所证实^[101-102],西风带控制的干旱区与季风边缘区末次冰期以来湖泊沉积记录的气候变化过程也显示出类似差异^[103-104]。

猪野泽位于现代亚洲季风界限西北边缘区,QTH01、QTH02 剖面盐类矿物含量变化指示的气候变化特征呈现明显的季风区特征,其中早全新世季风影响最为强烈,中、晚全新世逐步减弱。盐池地理位置处于猪野泽西北方向,YC 剖面末次冰期和早全新世期间盐类矿物含量变化指示的气候特征同样具有季风区特征,呈现较为湿润的特点;但以石膏为主的硫酸盐类矿物在这一时期较好的沉淀情况,说明其受夏季风影响并不明显,夏季风强度较猪野泽明显减弱。而中、晚全新世 YC 剖面表现出湖泊强烈退缩,气候极端干旱的特征,说明随着夏季风的减弱,季风边界已不能延伸至此处;由于 YC 剖面同样位于西风带影响的东南边缘,西风对其气候变化过程影响较弱,携带的水汽很难到达,使得盐池地区这一时段气候特征与中亚干旱区湖泊全新世演化过程差异明显。因此,盐池流域晚冰期及早全新世气候变化特征受夏

季风影响,说明季风边界在这一时期曾北扩至此,此后随着夏季风的减弱,西北部水汽输送边界在中、晚全新世退出盐池流域;而地理位置更偏东南的猪野泽,在整个全新世均受到夏季风水汽输送的影响,说明在全新世千年尺度,夏季风西北边界在盐池流域和石羊河流域之间存在变化,产生了南北向移动。

5 结论

通过对亚洲季风西北边界地区不同位置的三个剖面进行盐类矿物时空变化对比研究,我们发现,QTH01、QTH02 剖面盐类矿物以方解石、文石为主的碳酸盐为主,硫酸盐类矿物仅零星出现,而 YC 剖面硫酸盐类矿物含量相对较高,同时出现了氯化物型矿物,说明其全新世气候特征整体较猪野泽更为干旱。末次冰期和早全新,三个剖面受季风输送水汽影响明显,碳酸盐类矿物能较好沉积,季风边界在这一时期向北扩张,推进到祁连山中段地区;中全新世 QTH01、QTH02 剖面受夏季风影响减弱,湖泊退缩,碳酸盐类矿物含量达到峰值,YC 剖面则表现出极端干旱的气候特征,硫酸盐类矿物因“盐效应”含量下降,此时夏季风西北部水汽输送边界位于石羊河流域和盐池流域之间;晚全新世盐池和猪野泽均以风成沉积为主,气候干旱,碳酸盐类矿物难以保存,硫酸盐和氯化物矿物含量出现高值,说明夏季风西北边界进一步向南迁移。本项研究证明,在全新世千年尺度下,夏季风西北边界在盐池流域和石羊河流域之间存在变化,这一事实对明确夏季风西北缘千年尺度季风变化机制,预测未来长尺度气候变化有重要意义。

参考文献 (References)

- 1 Vandenberghe J, Renssen H, Huissteden K, et al. Penetration of Atlantic westerly winds into Central and East Asia[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(17/18): 2380-2389.
- 2 Zhao Y, Yu Z C, Chen F H. Spatial and temporal patterns of Holocene vegetation and climate changes in arid and semi-arid China[J]. *Quaternary International*, 2009, 194(1/2): 6-18.
- 3 Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, et al. Holocene-Late Pleistocene climatic ice core records from Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Science*, 1989, 246(4929): 474-477.
- 4 Feng Z D, Thompson L G, Mosley-Thompson E, et al. Temporal and spatial variations of climate in China during the last 10 000 years[J]. *The Holocene*, 1993, 3(2): 174-180.
- 5 D'Arrigo R D, Jacoby G C, Pederson N, et al. Mongolian tree-rings, temperature sensitivity and reconstructions of Northern Hemisphere temperature[J]. *The Holocene*, 2000, 10(6): 669-672.

- 6 Jacoby G C, D'Arrigo R D, Davaajants T. Mongolian tree rings and 20th-century warming[J]. *Science*, 1996, 273(5276): 771-773.
- 7 Li J J, Feng Z D, Tang L Y. Late Quaternary monsoon patterns on the Loess Plateau of China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1988, 13(2): 125-135.
- 8 鹿化煜, 安芷生, 刘洪滨, 等. 洛川黄土记录的最近 2500ka 东亚冬夏季风变化周期[J]. *地质论评*, 1998, 44(5): 553-558. [Lu Huayu, An Zhisheng, Liu Hongbin, et al. Periodicity of East Asian winter and summer monsoon variation during the past 2500 ka recorded by loess deposits at Luochuan on the central Chinese Loess Plateau[J]. *Geological Review*, 1998, 44(5): 553-558.]
- 9 丁仲礼, 余志伟. 第四纪时期东亚季风变化的动力机制[J]. *第四纪研究*, 1995, 2(1): 63-74. [Ding Zhongli, Yu Zhiwei. Forcing mechanisms of paleomonsoons over East Asia[J]. *Quaternary Sciences*, 1995, 2(1): 63-74.]
- 10 于学峰, 周卫健, Franzen L G, 等. 青藏高原东部全新世冬夏季风变化的高分辨率泥炭记录[J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2006, 36(2): 182-187. [Yu Xuefeng, Zhou Weijian, Franzen L G, et al. High-resolution peat records for Holocene monsoon history in the eastern Tibetan Plateau[J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2006, 36(2): 182-187.]
- 11 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224, 000 years[J]. *Nature*, 2008, 451(7182): 1090-1093.
- 12 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian Monsoon; links to solar changes and North Atlantic climate[J]. *Science*, 2005, 308(5723): 854-857.
- 13 Chen F H, Yu Z C, Yang M L, 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(3/4): 351-364.
- 14 Feng Z D, An C B, Wang H B. Holocene climatic and environmental changes in the arid and semi-arid areas of China: a review[J]. *The Holocene*, 2006, 16(1): 119-130.
- 15 Li Y, Wang N, Cheng H Y, et al. Holocene environmental change in the marginal area of the Asian monsoon: a record from Zhuye Lake, NW China[J]. *Boreas*, 2009, 38(2): 349-361.
- 16 Liang E Y, Liu X H, Yuan Y J, et al. The 1920s drought recorded by tree rings and historical documents in the semi-arid and arid areas of northern China[J]. *Climatic Change*, 2006, 79(3/4): 403-432.
- 17 Ma Z, Fu C. Interannual characteristics of the surface hydrological variables over the arid and semi-arid areas of northern China[J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 37(3): 189-200.
- 18 吴建国, 吕佳佳. 气候变化对我国干旱区分布及其范围的潜在影响[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(2): 199-206. [Wu Jianguo, Lü Jiajia. Potential effect of climate change on the distribution and range of arid regions[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(2): 199-206.]
- 19 An C B, Feng Z D, Barton L. Dry or humid? Mid-Holocene humidity changes in arid and semi-arid China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(3/4): 351-361.
- 20 李育, 王乃昂, 李卓仑, 等. 石羊河流域全新世孢粉记录及其对气候系统响应争论的启示[J]. *科学通报*, 2011, 56(2): 161-173. [Li Yu, Wang Nai'ang, Li Zhuolun, et al. Holocene palynological records and their responses to the controversies of climate system in the Shiyang River drainage basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(2): 161-173.]
- 21 Zhao Y, Yu Z C, Zhao W W. Holocene vegetation and climate histories in the eastern Tibetan Plateau; controls by insolation-driven temperature or monsoon-derived precipitation changes? [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(9/10): 1173-1184.
- 22 Wen R L, Xiao J L, Chang Z G, et al. Holocene precipitation and temperature variations in the East Asian monsoonal margin from pollen data from Hulun Lake in northeastern Inner Mongolia, China[J]. *Boreas*, 2010, 39(2): 262-272.
- 23 An Z S, Porter S C, Kutzbach J E, et al. Asynchronous Holocene optimum of the East Asian monsoon[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(8): 743-762.
- 24 He Y, Theakstone W H, Zhang Z L, et al. Asynchronous Holocene climatic change across China[J]. *Quaternary Research*, 2004, 61(1): 52-63.
- 25 Shao X H, Wang Y J, Cheng H, et al. Long-term trend and abrupt events of the Holocene Asian monsoon inferred from a stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record from Shennongjia in Central China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(2): 221-228.
- 26 Ma Z G, Fu C B, Dan L. Decadal variations of arid and semi-arid boundary in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(3): 574-581.
- 27 Yang J P, Ding Y J, Chen R S, et al. The interdecadal fluctuation of dry and wet climate boundaries in China in recent 50 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(6): 655-661.
- 28 张兰生, 史培军, 侯乐峰. 中国北方季风区全新世不同时期降水变化及其区域分异规律研究[M]// 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: 147-154. [Zhang Lansheng, Shi Peijun, Hou Lefeng. Research on precipitation change and its distributive pattern of monsoon edge area in northern China during Holocene[M]// Zhang Lansheng. Research on Historical Evolution Law of Living Environment in China. Beijing: Ocean Press, 1993: 147-154.]
- 29 张成君, 郑绵平, Prokopenko A, 等. 波斯腾湖碳酸盐和同位素组成的全新世古环境演变高分辨记录及与冰川活动的响应[J]. *地质学报*, 2007, 81(12): 1658-1671. [Zhang Chengjun, Zheng Mianping, Prokopenko A, et al. The palaeoenvironmental variation from the high-resolution record of the Holocene sediment carbonate and isotopic composition in Bosten Lake and responding to glacial activity[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(12): 1658-1671.]
- 30 薛积彬, 钟巍. 新疆巴里坤湖全新世环境记录及区域对比研究[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(4): 610-620. [Xue Jibin, Zhong Wei. Holocene climate change recorded by lacustrine sediments in Barkol Lake and its regional comparison[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 610-620.]
- 31 李秉孝, 蔡碧琴, 梁青生. 吐鲁番盆地艾丁湖沉积特征[J]. *科学通报*, 1989, 34(8): 608-610. [Li Bingxiao, Cai Biqin, Liang Qing-

- sheng. Sedimentary characteristics of Aydingkol Lake in Turpan Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 1989, 34(8): 608-610.]
- 32 沈吉,王苏民,朱育新,等. 内蒙古岱海古水温定量恢复及其古气候意义[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2001,31(12):1017-1023. [Shen Ji, Wang Sumin, Zhu Yuxin, et al. Quantitative re-establishment palaeo-water temperature of Daihai Lake, Inner Mongolia[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2001, 31(12): 1017-1023.]
- 33 陈发虎,朱艳,李吉均,等. 民勤盆地湖泊沉积记录的全新世千年尺度夏季风快速变化[J]. 科学通报,2001,46(17):1414-1419. [Chen Fahu, Zhu Yan, Li Jijun, et al. Abrupt Holocene changes of the Asian monsoon at millennial- and centennial scales: evidence from lake sediment document in Minqin Basin, NW China [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(17): 1414-1419.]
- 34 李容全. 内蒙古高原湖泊与环境变迁[M]. 北京:北京师范大学出版社,1990. [Li Rongquan. Lakes and Environmental Changes in Inner Mongolia Plateau[M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 1990.]
- 35 郑喜玉,张明刚,董继和. 内蒙古盐湖[M]. 北京:科学出版社,1992. [Zheng Xiyu, Zhang Minggang, Dong Jihe. Salt Lake in Inner Mongolia[M]. Beijing: Science Press, 1992.]
- 36 Gasse F, Arnold M, Fontes J C, et al. A 13, 000-year climate record from western Tibet[J]. Nature, 1991, 353(6346): 742-745.
- 37 Morinaga H, Itota C, Isezaki N, et al. Oxygen-18 and carbon-13 records for the last 14, 000 years from Lacustrine carbonates of Siling-Co (Lake) in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Geophysical Research Letters, 1993, 20(24): 2909-2912.
- 38 沈吉,刘兴起,Matsumoto R,等. 晚冰期以来青海湖沉积物多指标高分辨率的古气候演化[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2004,34(6):582-589. [Shen Ji, Liu Xingqi, Matsumoto R, et al. A high-resolution climatic change since the Late Glacial Age inferred from multi-proxy of sediments in Qinghai Lake[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2004, 34(6): 582-589.]
- 39 Madsen D B, Ma H Z, Rhode D, et al. Age constraints on the late Quaternary evolution of Qinghai Lake, Tibetan Plateau[J]. Quaternary Research, 2008, 69(2): 316-325.
- 40 Liu X J, Lai Z P, Fan Q S, et al. Timing for high lake levels of Qinghai Lake in the Qinghai-Tibetan Plateau since the last interglaciation based on quartz OSL dating[J]. Quaternary Geochronology, 2010, 5(2/3): 218-222.
- 41 Liu X Q, Dong H L, Rech J A, et al. Evolution of Chaka Salt Lake in NW China in response to climatic change during the Latest Pleistocene - Holocene[J]. Quaternary Science Reviews, 2008, 27(7/8): 867-879.
- 42 孙小虹. 罗布泊盐湖盐类矿物特征、成因与成钾作用[D]. 北京:中国地质科学院,2013. [Sun Xiaohong. Characteristics and genesis of salt minerals, and potash formation in the Lop Nur playa[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2013.]
- 43 Sarg J F. The sequence stratigraphy, sedimentology, and economic importance of evaporite - carbonate transitions: a review[J]. Sedimentary Geology, 2001, 140(1/2): 9-34.
- 44 Sinha R, Raymahashay B C. Evaporite mineralogy and geochemical evolution of the Sambhar Salt Lake, Rajasthan, India[J]. Sedimentary Geology, 2004, 166(1/2): 59-71.
- 45 Crowley J K. Mapping playa evaporite minerals with AVIRIS data: A first report from Death Valley, California[J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 44(2/3): 337-356.
- 46 Bryant R G, Sellwood B W, Millington A C, et al. Marine-like potash evaporite formation on a continental playa: case study from Chott el Djerid, southern Tunisia[J]. Sedimentary Geology, 1994, 90(3/4): 269-291.
- 47 王云飞. 青海湖、岱海的湖泊碳酸盐化学沉积与气候环境变化[J]. 海洋与湖沼,1993,24(1):31-35. [Wang Yunfei. Lacustrine carbonate chemical sedimentation and climatic-environmental evolution—a case study of Qinghai Lake and Daihai Lake[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1993, 24(1): 31-35.]
- 48 Rhodes T E, Gasse F, Lin R F, et al. A Late Pleistocene-Holocene lacustrine record from Lake Manas, Junggar (northern Xinjiang, western China)[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1996, 120(1/2): 105-121.
- 49 Wei K, Gasse F. Oxygen isotopes in lacustrine carbonates of West China revisited: implications for post glacial changes in summer monsoon circulation[J]. Quaternary Science Reviews, 1999, 18(12): 1315-1334.
- 50 陈敬安,万国江,陈振楼,等. 洱海沉积物化学元素与古气候演化[J]. 地球化学,1999,28(6):562-570. [Chen Jing'an, Wan Guojiang, Chen Zhenlou, et al. Chemical elements in sediments of Lake Erhai and palaeoclimate evolution[J]. Geochemica, 1999, 28(6): 562-570.]
- 51 陈敬安,万国江,汪福顺,等. 湖泊现代沉积物碳环境记录研究[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2002,32(1):73-80. [Chen Jing'an, Wan Guojiang, Wang Fushun, et al. A study on modern lake sedimentary carbon environmental records[J]. Science China(Seri. D): Earth Sciences, 2002, 32(1): 73-80.]
- 52 郑喜玉,张明刚,徐昶,等. 中国盐湖志[M]. 北京:科学出版社,2002:3-29. [Zheng Xiyu, Zhang Minggang, Xu Chang, et al. Chinese Salt Lakes[M]. Beijing: Science Press, 2002: 3-29.]
- 53 郑绵平,赵元艺,刘俊英. 第四纪盐湖沉积与古气候[J]. 第四纪研究,1998(4):297-307. [Zheng Mianping, Zhao Yuanyi, Liu Junying. Quaternary saline lake deposition and paleoclimate[J]. Quaternary Sciences, 1998(4): 297-307.]
- 54 Wang N A, Zhang J M, Cheng H Y, et al. The age of formation of the mirabilite and sand wedges in the Hexi Corridor and their paleoclimatic interpretation [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(14): 1439-1445.
- 55 刘成林,陈永志,陈伟十,等. 罗布泊盐湖更新世晚期沉积钙芒硝包裹体特征及古气候意义探讨[J]. 矿物学报,2006,26(1):94-98. [Liu Chenglin, Chen Yongzhi, Chen Weishi, et al. Studies of fluid inclusions in glauberite of middle upper Pleistocene strata and their paleoclimatic significance in Lop Nur salty lake, Xinjiang, NW China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2006, 26(1): 94-98.]
- 56 孙青,储国强,李圣强,等. 硫酸盐型盐湖中的长链烯酮及古环境

- 意义[J]. 科学通报, 2004, 49(17): 1789-1792. [Sun Qing, Chu Guoqiang, Li Shenqiang, et al. Long chain ketene in sulfate type salt lake and its paleo-environment significance[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(17): 1789-1792.]
- 57 郑绵平. 中国盐湖资源与生态环境[J]. 地质学报, 2010, 84(11): 1613-1622. [Zheng Mianping. Salt lake resources and eco-environment in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(11): 1613-1622.]
- 58 郑大中, 郑若锋. 论钾盐矿床的物质来源和找矿指示[J]. 盐湖研究, 2006, 14(4): 9-17. [Zheng Dazhong, Zheng Ruofeng. Material sources and prospecting indicators of potassium deposits[J]. Journal of Salt Lake Research, 2006, 14(4): 9-17.]
- 59 郑喜玉. 乌尊布拉克湖硝酸钾盐沉积特征[J]. 盐湖研究, 2000, 8(1): 41-45. [Zheng Xiyu. Sedimentary features of sylvite nitrate in Lake Wuzunbulake[J]. Journal of Salt Lake Research, 2000, 8(1): 41-45.]
- 60 Li Y, Wang N A, Chen H B, et al. Tracking millennial-scale climate change by analysis of the modern summer precipitation in the marginal regions of the Asian monsoon[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 58: 78-87.
- 61 王可丽, 江灏, 赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 432-438. [Wang Keli, Jiang Hao, Zhao Hongyan. Atmospheric water vapor transport from westerly and monsoon over the Northwest China[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 432-438.]
- 62 李万莉, 王可丽, 傅慎明, 等. 区域西风指数对西北地区水汽输送及收支的指示性[J]. 冰川冻土, 2008, 30(1): 34-38. [Li Wanli, Wang Keli, Fu Shenming, et al. The interrelationship between regional westerly index and the water vapor budget in Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(1): 34-38.]
- 63 赵松乔. 中国综合自然地理区划的一个新方案[J]. 地理学报, 1983, 38(1): 1-10. [Zhao Songqiao. A new scheme for comprehensive physical regionalization in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1983, 38(1): 1-10.]
- 64 中国植被编辑委员会. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 195-197. [Chinese Vegetation Editorial Committee. Chinese Vegetation[M]. Beijing: Science Press, 1980: 195-197.]
- 65 黄大燊. 甘肃植被[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1997: 189-213. [Huang Dashen. Gansu Vegetation[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1997: 189-213.]
- 66 丁宏伟, 张举. 河西走廊地下水水化学特征及其演化规律[J]. 干旱区研究, 2005, 22(1): 24-28. [Ding Hongwei, Zhang Ju. Geochemical properties and evolution of groundwater beneath the Hexi Corridor, Gansu Province[J]. Arid Zone Research, 2005, 22(1): 24-28.]
- 67 白福, 杨小荟. 河西走廊黑河流域地下水化学特征研究[J]. 西北地质, 2007, 40(3): 105-110. [Bai Fu, Yang Xiaohui. Hydrochemical characteristics of groundwater of the Heihe Basin in the Hexi Corridor, Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 2007, 40(3): 105-110.]
- 68 赵强. 石羊河流域末次冰消期以来环境变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2005. [Zhao Qiang. Environment changes of the Shiyang River Drainage since the Last Deglaciation[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2005.]
- 69 陈隆亨, 曲耀光. 河西地区水土资源及其合理开发利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 6-46. [Chen Longhen, Qu Yaoguang. Water and Soil Resources and Its Exploitation and Utilization in Hexi Area[M]. Beijing: Science Press, 1992: 6-46.]
- 70 张克存, 屈建军, 马中华. 近50a来民勤沙尘暴的环境特征[J]. 中国沙漠, 2004, 24(3): 257-260. [Zhang Kecun, Qu Jianjun, Ma Zhonghua. Environmental characteristics of sandstorm in Minqin county in recent 50 years[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(3): 257-260.]
- 71 冯绳武. 民勤绿洲的水系演变[J]. 地理学报, 1963, 29(3): 241-249. [Feng Shengwu. The evolution of the drainage system of the Minchin oasis[J]. Acta Geographica Sinica, 1963, 29(3): 241-249.]
- 72 李并成. 猪野泽及其历史变迁考[J]. 地理学报, 1993, 48(1): 55-59. [Li Bingcheng. A study on the Zhuye Lake and its historical evolution[J]. Acta Geographica Sinica, 1993, 48(1): 55-59.]
- 73 隆浩. 季风边缘区全新世中期气候变化的古湖泊记录[D]. 兰州: 兰州大学, 2006. [Long Hao. Mid-Holocene climate variation from lake evidence of East Asian monsoon margin areas[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006.]
- 74 朱艳, 程波, 陈发虎, 等. 石羊河流域现代孢粉传播研究[J]. 科学通报, 2004, 49(1): 15-21. [Zhu Yan, Cheng Bo, Chen Fahu, et al. Spread of modern pollen in the Shiyang River drainage basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(1): 15-21.]
- 75 Zhao Y, Yu Z, Chen F, et al. Holocene vegetation and climate change from a lake sediment record in the Tengger Sandy Desert, northwest China[J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72(11): 2054-2064.
- 76 Long H, Lai Z P, Wang N A, et al. Holocene climate variations from Zhuyez terminal lake records in East Asian monsoon margin in arid northern China[J]. Quaternary Research, 2010, 74(1): 46-56.
- 77 李育, 王乃昂, 李卓仑, 等. 河西走廊盐池晚冰期以来沉积地层变化综合分析——来自夏季风西北缘一个关键位置的古气候证据[J]. 地理学报, 2013, 68(7): 933-944. [Li Yu, Wang Nai'ang, Li Zhuolun, et al. Comprehensive analysis of lake sediments in Yanchi Lake of Hexi Corridor since the late glacial[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(7): 933-944.]
- 78 李育, 王乃昂, 许清海, 等. 中国北方第四纪孢粉提取方法研究[J]. 沉积学报, 2007, 25(1): 124-130. [Li Yu, Wang Naiang, Xu Qinghai, et al. Investigation of Quaternary pollen and spores extraction methods in North China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(1): 124-130.]
- 79 卫管一, 张长俊. 岩石学简明教程[M]. 北京: 地质出版社, 1995. [Wei Guanyi, Zhang Changjun. Petrology Introductory Tutorial[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.]
- 80 李明慧, 易朝路, 方小敏, 等. 柴达木西部钻孔盐类矿物及环境意义初步研究[J]. 沉积学报, 2010, 28(6): 1213-1228. [Li Minghui, Yi Chaolu, Fang Xiaomin, et al. Evaporative minerals of the upper

- 400m sediments in a core from the Western Qaidam Basin, Tibet[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(6): 1213-1228.]
- 81 李恩菊. 巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠沉积物特征的对比研究[D]. 西安:陕西师范大学, 2011. [Li Enju. A comparative study of sediments characteristics between the Badain Jaran Desert and Tengger Desert[D]. Xi'an; Shanxi Normal University, 2011.]
- 82 Pye K. *Aeolian Dust and Dust Deposits* [M]. London: Academic Press, 1987: 29-62.
- 83 大连理工大学无机化学教研室. 无机化学[M]. 北京:高等教育出版社, 2001:154-172. [Staff Room of Inorganic Chemistry, Dalian University of Technology. *Inorganic Chemistry* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 154-172.]
- 84 Warren J K. *Evaporite Sedimentology: Importance in Hydrocarbon Accumulation*[M]. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1989: 1-37.
- 85 Lea D W, Pak D K, Peterson L C, et al. Synchronicity of tropical and high-latitude Atlantic temperatures over the last glacial termination [J]. *Science*, 2003, 301(5638): 1361-1364.
- 86 Rasmussen S O, Andersen K K, Svensson A M, et al. A new Greenland ice core chronology for the last glacial termination[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2006, 111(D6): D06102, doi: 10.1029/2005JD006079.
- 87 Berger A, Loutre M F. Insolation values for the climate of the last 10 million years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1991, 10(4): 297-317.
- 88 杨文光,郑洪波,谢昕,等. 南海北部陆坡沉积记录的全新世早期夏季风极强事件[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(3): 425-430. [Yang Wenguang, Zheng Hongbo, Xie Xin, et al. East Asian summer monsoon maximum records in Northern South China Sea during the Early Holocene[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(3): 425-430.]
- 89 Shen J, Liu X Q, Wang S M, et al. Palaeoclimatic changes in the Qinghai Lake area during the last 18, 000 years[J]. *Quaternary International*, 2005, 136(1): 131-140.
- 90 Liu X Q, Shen J, Wang S M, et al. Southwest monsoon changes indicated by oxygen isotope of ostracode shells from sediments in Qinghai Lake since the late Glacial[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(4): 539-544.
- 91 Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from southern Oman[J]. *Science*, 2003, 300(5626): 1737-1739.
- 92 Dykoski C A, Edwards R L, 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(1/2): 71-86.
- 93 Wang R L, Scarpitta S C, Zhang S C, et al. Later Pleistocene/Holocene climate conditions of Qinghai - Xizhang Plateau (Tibet) based on carbon and oxygen stable isotopes of Zabuye Lake sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 203(1): 461-477.
- 94 Morrill C, Overpeck J T, Cole J E, et al. Holocene variations in the Asian monsoon inferred from the geochemistry of lake sediments in central Tibet[J]. *Quaternary Research*, 2006, 65(2): 232-243.
- 95 Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J, et al. Influence of the inter-tropical convergence zone on the East Asian monsoon [J]. *Nature*, 2007, 445(7123): 74-77.
- 96 Zhu L P, Zhen X L, Wang J B, et al. A ~30, 000-year record of environmental changes inferred from Lake Chen Co, Southern Tibet[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2009, 42(3): 343-358.
- 97 安芷生, Porter S C, 吴锡浩, 等. 中国中、东部全新世气候适宜期与东亚夏季风变迁[J]. *科学通报*, 1993, 38(14): 1302-1305. [An Zhisheng, Potter S C, Wu Xihao, et al. The Holocene climatic optimum and East Asian monsoon transition in east and central China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(14): 1302-1305.]
- 98 Koç N, Jansen E, Hafliðason H. Paleooceanographic reconstructions of surface ocean conditions in the Greenland, Iceland and Norwegian seas through the last 14 ka based on diatoms[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1993, 12(2): 115-140.
- 99 Birks C J A, Koç N. A high-resolution diatom record of late-Quaternary sea-surface temperatures and oceanographic conditions from the eastern Norwegian Sea[J]. *Boreas*, 2002, 31(4): 323-344.
- 100 Dahl-Jensen D, Mosegaard K, Gundestrup N, et al. Past temperatures directly from the Greenland ice sheet[J]. *Science*, 1998, 282(5387): 268-271.
- 101 Li Y, Morrill C. Multiple factors causing Holocene lake-level change in monsoonal and arid central Asia as identified by model experiments[J]. *Climate Dynamics*, 2010, 35(6): 1119-1132.
- 102 Jin L Y, Chen F H, Morrill C, et al. Causes of early Holocene desertification in arid central Asia[J]. *Climate Dynamics*, 2012, 38(7/8): 1577-1591.
- 103 Xiao J L, Xu Q H, Nakamura T, 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(14/15): 1669-1679.
- 104 Herzsuh U. Palaeo-moisture evolution in monsoonal Central Asia during the last 50, 000 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(1/2): 163-178.

An Evidence of Millennial-Scale Summer Monsoon Boundary Change in the Northwest China—Analysis Results From Saline Minerals in Lake Sediments of Yanchi Lake and Zhuye Lake

LI Yu ZHANG ChengQi ZHOU XueHua WANG Yue

(College of Earth and Environmental Science, Center for Hydrologic Cycle and Water Resources in Arid Region, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Abstract: The northwest margin of summer monsoon in China is one of the most sensitive areas to response long-time scale climate change, but the related researches between summer monsoon boundary changes and millennial-scale climate change driving mechanism are still lack of sufficient evidence. The temporal and spatial variation of types and content of saline minerals in lake sediments could speculate the characteristics of climate change in the northwest margin of summer monsoon. Yanchi Lake is located in the northern Qilian Mountains and the central Hexi Corridor, while Zhuye Lake is located in the eastern Hexi Corridor, which is a key research area for the long-term northern boundary changes of the Asian summer monsoon. It has important significance for clarifying monsoon change mechanism under millennial-scale and predict long-time scale climate change to study how the motion of the northwest border of summer monsoon impact climate change process in the northwest margin of summer monsoon. In this paper, we chose YC section in Yanchi Lake and QTH01 and QTH02 sections in Zhuye Lake, which located at different positions of Hexi Corridor, to conduct a millennial-scale comparative study of temporal and spatial variation of types and content of saline minerals. The results revealed that saline minerals in QTH01 and QTH02 sections are mainly carbonate minerals like calcite and aragonite, and there are only sporadic sulfate minerals, while sulfate minerals content in YC section is relatively high, and there also exist chloride type minerals which indicated the more arid environment in Yanchi Lake than in Zhuye Lake. During the late glacial and early Holocene, all of the three sections were influenced by monsoon conveying water vapor, carbonate minerals well sedimentated, and monsoon boundary expanded to the middle region of Qilian mountains in this period. The summer monsoon effect weakened in middle Holocene, Zhuye Lake retreated with carbonate mineral contents reached peak values, and Yanchi Lake showed extreme drought climate characteristics and the content of sulfate minerals decreased because of the "salt effect". The northwestern border of summer monsoon should be between the Shiyang river drainage basin and the Yanchi drainage basin in middle Holocene. Yanchi Lake and Zhuye Lake were given priority to eolian deposition in late Holocene, carbonate minerals were difficult to conserve in such arid climate, sulfate and chloride mineral contents had high value, and the northwestern border of summer monsoon further retreated to south. In conclusion, the variations of salt mineral contents are well respond to Holocene climate change characteristics, and the northwestern border of summer monsoon swung between the Shiyang river drainage basin and the Yanchi drainage basin under millennial-scale during Holocene.

Key words: saline minerals; millennial-scale; summer monsoon boundary; Holocene