

祁连山周边内流区湖泊沉积物与人类活动研究

高铭君¹, 李 育^{1,2}, 张占森¹, 周雪如¹, 李海焯¹, 段俊杰¹, 薛雅欣¹

(1. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000; 2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 人类活动与全新世环境变化的耦合过程与机理已成为地球科学领域的研究热点。湖泊沉积物储存了丰富的环境信息, 已成为反演过去气候变化的良好材料。目前古环境代用指标指示人类活动的研究多通过单一湖泊进行讨论, 缺乏一定的整体区域研究, 且通过古环境代用指标辨识该区域人类活动的研究相对较少, 指示人类活动的古环境代用指标具有不确定性。本文分析了祁连山周边内流河流域14个终端湖泊的岩性、年代和古环境代用指标数据, 重建了该区域全新世以来的气候变化, 探索了全新世以来气候变化与人类活动的耦合关系。初步结果如下: 全新世以来祁连山及周边地区终端湖泊中有机质多为水生和陆生植物混合来源; 祁连山地区早中全新世气候温暖湿润, 晚全新世以来气候干旱化明显; 古环境代用指标变化与沉积相变化密切相关, 不同沉积相对应的代用指标指示意义差异较大, 2.0 cal ka BP以来湖泊沉积相的变化开始受到人类活动影响, 距今200 a左右开始, 人类活动对区域环境变化起主导作用。

关键词: 祁连山; 内流区; 湖泊沉积相; 古环境代用指标; 人类活动

DOI: 10.11821/dlxb202305009

1 引言

工业革命以来, 人类活动对环境的影响已扩展到整个地球系统, 引发了全球变暖, 水资源匮乏, 森林覆盖减少, 沙尘暴频发等一系列全球性环境问题^[1-3], 这些现象的出现使得探究人类活动与全新世环境变化的耦合过程与机理成为地球科学领域的研究热点^[4]。人类活动受全新世气候变化强烈影响, 人类在适应环境变化的同时也给周边环境造成了一定程度的影响^[5]。作为研究高分辨率气候变化的主要载体, 湖泊沉积物存储了大量环境信息, 且沉积具有连续性, 所含气候信息的时间尺度长, 地理覆盖区域广, 是重建古气候变化的有效手段^[6]。通过研究湖泊沉积物中有机地化指标的变化特征, 有助于了解沉积物复杂的来源及其搬运、沉积过程, 为分析沉积物影响因素和变化机制, 探讨沉积物代用指标中所蕴含的人类活动信息提供理论依据。近年来, 研究者主要集中于利用古环境代用指标进行古气候重建方面, 如重建降水、温度和植被等变化^[7-8]。绝大部分学者认为全新世以来气候变化主要受自然因子驱使, 然而, 其中古环境代用指标如孢粉、磁化率(MS)、稳定同位素等表明人类活动在全新世时期就已经影响了环境变化^[9-11]。尤其是全

收稿日期: 2022-07-04; 修订日期: 2023-03-01

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20100102); 国家自然科学基金项目(42077415); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0202); 111计划(BP0618001) [Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA20100102; National Natural Science Foundation of China, No.42077415; The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research, No.2019QZKK0202; The 111 Project, No.BP0618001]

作者简介: 高铭君(1999-), 男, 河南驻马店人, 硕士生, 主要从事气候变化与人类活动研究。E-mail: 1418861798@qq.com

通讯作者: 李育(1981-), 男, 甘肃兰州人, 教授, 主要从事古气候学研究。E-mail: liyu@lzu.edu.cn

新世晚期以来人类活动强度和范围快速增加, 人类对环境的影响也越来越明显^[12], 如位于季风边缘区娘娘天池的碳、氮元素变化说明了1850年之后人类活动增加^[13], 黄土高原上的天池也有类似的记录^[14]; 青藏高原沙德错和月亮湖中大量重组的硅藻种类出现表示该区域受到了人类活动干预^[15]。目前古环境代用指标指示人类活动的研究多通过单一湖泊剖面重建古环境的研究方法, 采样点在古湖泊中的位置对重建结果影响较大, 就单个湖泊而言, 其流域的空间范围一般较有限, 湖泊沉积记录的环境变化信息在一定程度上带有地域性^[6], 对于整个区域尺度气候变化和人类活动的重建可信度有待提高。此外, 由于不同湖泊指示人类活动的代用指标并非完全一致, 同时单一湖泊的代用指标在不同时期的指示意义也会发生改变, 给环境演化序列的比较和利用指标指示人类活动带来了不确定性^[16-18], 特征沉积地层的形成、河流湖泊的演变过程以及人与环境的相互作用难以探讨。因此, 目前的研究还需要加强区域环境变化记录的综合集成, 分析不同指标重建的环境变化记录的区域性和一致性, 从而深入理解区域的人类活动与全新世环境变化的耦合过程和机理。

祁连山位于东部季风区、青藏高原区和西北干旱区的交汇地带, 是西北部重要的生态安全屏障。由于深居内陆, 远离海洋, 具有相对独立的地理环境, 该区域湖泊大部分为封闭半封闭的咸水湖, 是气候变化和人类活动的敏感区。祁连山拥有着丰富的人类活动历史, 见证了河西走廊地区众多古代王朝的兴盛与衰落和游牧文明向农耕文明的变迁。因此, 正确了解祁连山地区历史时期区域环境变化与人类活动的关系有助于理解该区域气候变化和人类活动的耦合关系。本文收集了该区域内流河终端湖沉积物数据, 还原祁连山及周边地区全新世以来的气候变化规律, 明确湖泊有机质来源和古环境代用指标的指示意义, 结合终端湖泊岩性、年代和古环境代用指标数据, 探寻晚全新世以来古环境代用指标波动剧烈的原因。在此基础上结合晚全新世以来气候演化特征、典型古气候记录中古环境代用指标变化和人类活动强度进行综合讨论, 为今后识别人类活动提供一定的科学支撑。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

位于青藏高原北缘的祁连山是由众多近似平行山脉组成的呈东西走向的巨大山体, 东接秦岭, 西连阿尔金山。以青海湖和哈拉湖为界线, 可以将祁连山地区分成东、中、西3段, 东段由大通河谷地、青海湖盆地、湟水谷地和拉脊山、大通山—达板山、冷龙岭3列较为平行的山脉共同组成; 西段由哈拉湖和疏勒河上游谷地以西的山地组成; 其余为中段。由于位于东部季风区、青藏高原区和西北干旱区的交汇地带, 地处季风边缘区, 祁连山受季风西风协同作用影响^[19] (图1)。东段山地受季风、西风影响较大, 气候较为温暖湿润; 中段地区地域辽阔, 冰川发育较多, 有众多高山草原; 西段山地干旱寒冷, 受干燥剥蚀作用植被覆盖度低, 还发育有雅丹地貌。

2.2 古气候收集和处理

祁连山及周边地区有众多内流河流域, 如石羊河流域、疏勒河流域和黑河流域等, 而其终端湖泊可以汇集整个流域的环境信息^[20]。因此, 终端湖沉积物古环境代用指标在一定程度上可以反映区域气候变化。岩性作为指示环境变化的重要指标, 沉积较为连续的岩性可以更加直观清晰地表现出不同时间尺度以来周边地区的环境变化^[21-22]。湖泊沉积物的年代学分析已成为古环境研究的基础, 其中放射性¹⁴C同位素测定是常见的年代测定

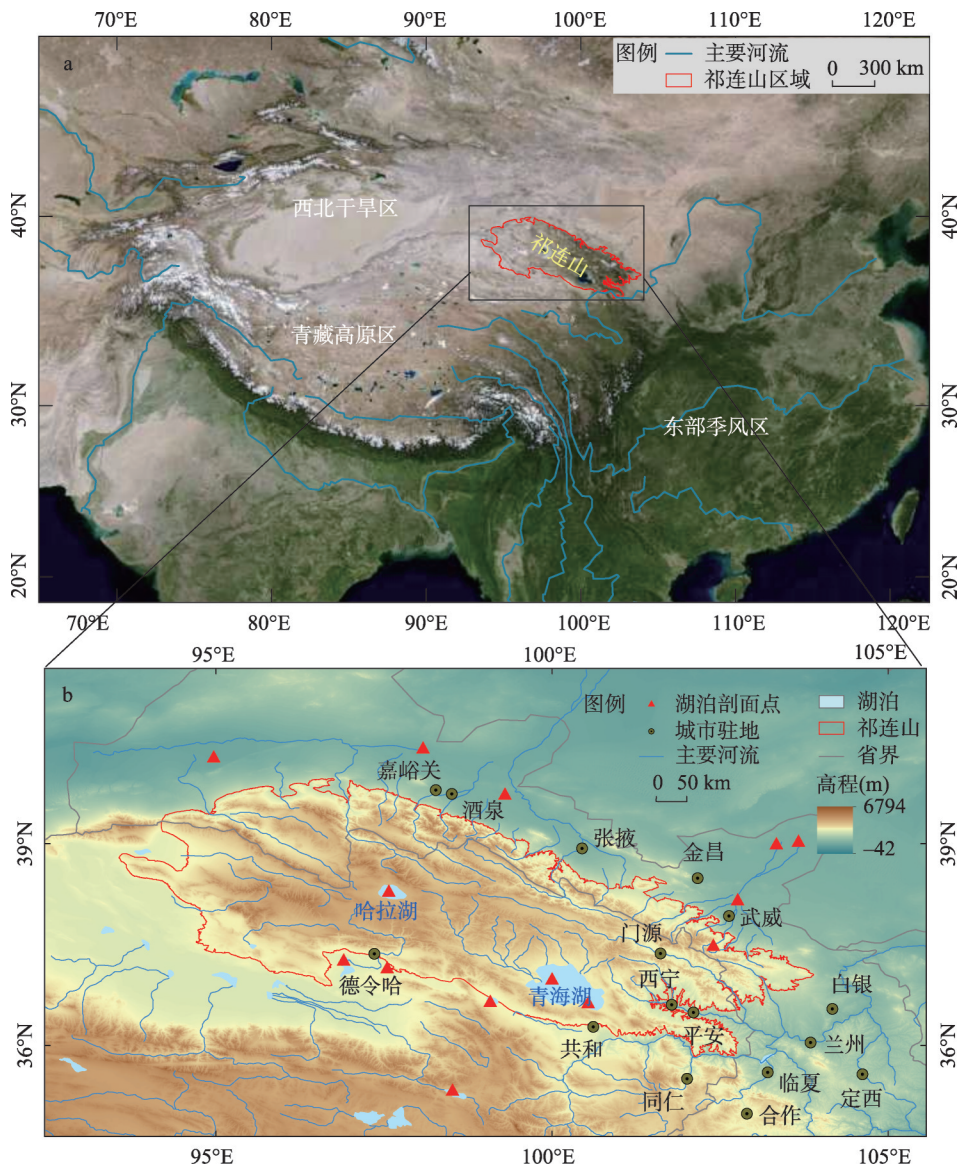


图1 祁连山区域位置示意
Fig. 1 Location of the Qilian Mountains

的分析手段。湖泊沉积物中¹⁴C测年材料多采用有机质、孢粉、植物残体等，但湖泊沉积过程中这些材料易受“碳库效应”影响，导致所测年代值偏老，该现象在干旱半干旱区更为明显^[23]。为解决碳库效应对湖泊沉积物高精度年代序列建立的影响，光释光(OSL)、²¹⁰Pb、¹³⁷Cs等高精度测年方法逐渐开始被学者们大量应用于实际测年中^[24]。为还原全新世以来祁连山及周边地区的气候变化，辨识该区域古环境代用指标中的人类活动信息，本文共收集了研究区内14个年代序列连续且没有沉积间断的终端湖沉积地层岩性、年代和古环境代用指标数据。年代数据以¹⁴C年代和OSL年代序列为主，包括已校正后的年代数据，对于未进行¹⁴C年代校正的数据已利用Calib 7.1进行了处理^[25]。本文选用的祁连山及周边地区终端湖沉积物信息汇总数据如表1。

表1 祁连山及周边地区终端湖沉积物信息

Tab. 1 Sediment information of terminal lakes in the Qilian Mountains and the surroundings

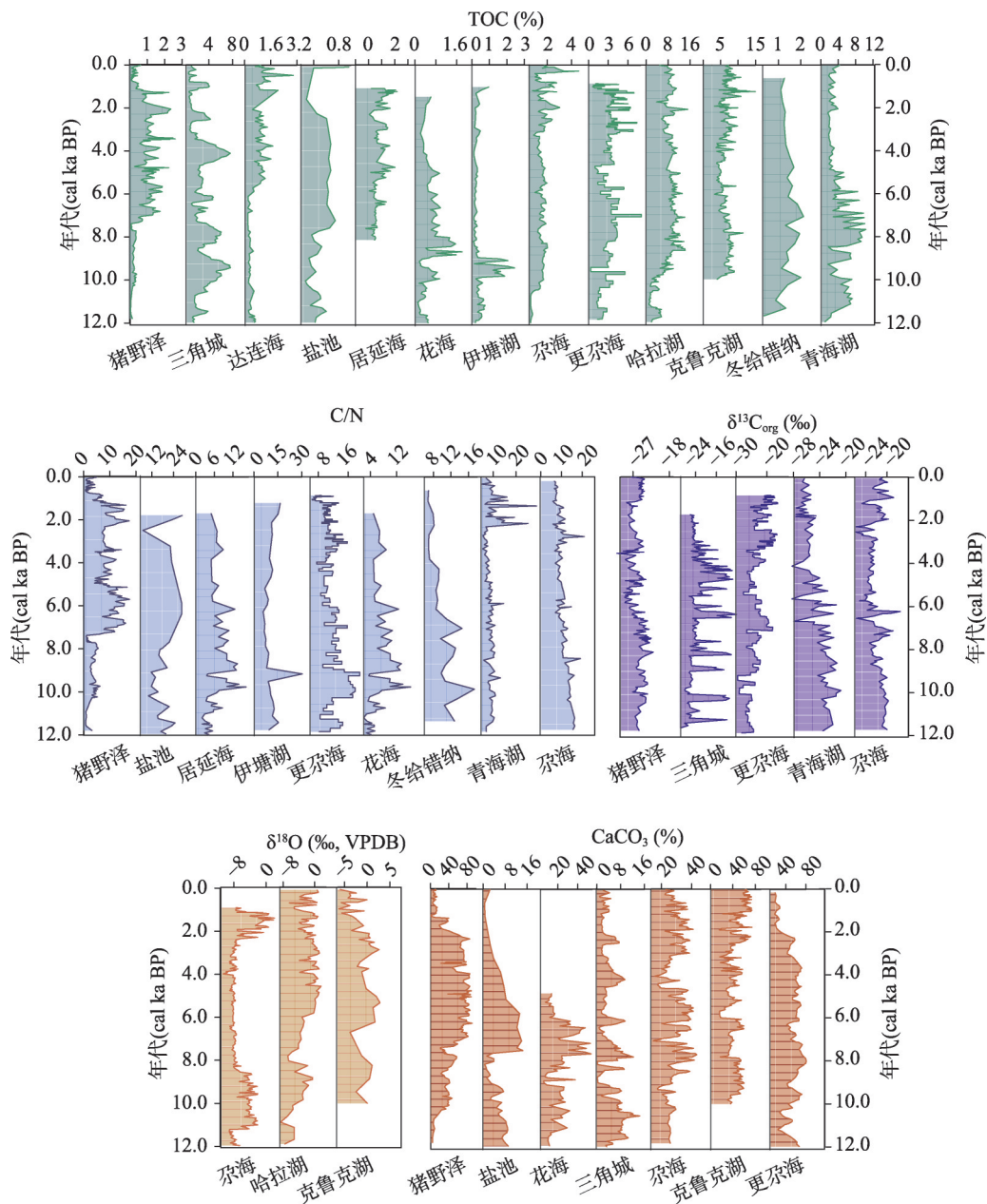
| 湖泊名称 | 类型 | 纬度(°N) | 经度(°E) | 海拔(m) | 深度(m) | 时段 (cal ka BP) | 所用古环境代用指标 | 参考文献 |
|--------|------|--------|--------|-------|--------|-------------------|--|---------|
| 猪野泽 | 干涸湖盆 | 39.05 | 103.67 | 1309 | 7.36 | 0—13.0 | TOC、C/N、CaCO ₃ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、粒度 | [26-27] |
| 三角城 | 干涸湖盆 | 39.01 | 103.25 | 1325 | 7.2 | 0—16.0 | TOC、C/N、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、CaCO ₃ | [28] |
| 盐池 | 干涸湖盆 | 39.75 | 99.33 | 1200 | 4.15 | 0—20.0 | TOC、C/N、CaCO ₃ 、粒度 | [29] |
| 花海 | 干涸湖盆 | 40.44 | 98.08 | 1195 | 8.50 | 0—13.0 | CaCO ₃ 、TOC、C/N、Ti | [30-31] |
| 条湖 | 干涸湖盆 | 40.26 | 99.31 | 1188 | 6.50 | 0—12.0 | Rb/Sr、Fe/Mn | [32] |
| 居延海 | 湖泊 | 41.89 | 101.85 | 892 | 8.25 | 1.7—10.7 | TOC、MS | [33-34] |
| 伊塘湖 | 湖泊 | 40.30 | 94.97 | 1073 | 292.80 | 2.08—23.38 | TOC、C/N、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ | [35] |
| 哈拉湖 | 湖泊 | 38.22 | 97.38 | 4100 | 2.93 | 0—8.8 | TOC、红度、烧失量(LOI) | [36] |
| 克鲁克湖 | 湖泊 | 37.28 | 96.90 | 2817 | 6.88 | 0—14.0 | TOC、CaCO ₃ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 Al/C | [37] |
| 尕斯库勒湖 | 湖泊 | 37.13 | 97.55 | 2850 | 13.08 | 0—12.0 | TOC、C/N、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、CaCO ₃ | [38] |
| 茶卡盐湖 | 湖泊 | 36.67 | 99.08 | 3200 | 9.00 | 0—17.2 | TOC、TN、石膏 | [39] |
| 青海湖 | 湖泊 | 36.65 | 100.54 | 4583 | 7.95 | 0—19.3 | TOC、C/N、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、孢粉、CaCO ₃ | [40] |
| 更尕斯库勒湖 | 湖泊 | 36.18 | 100.10 | 3000 | 7.82 | 0—17.0 | TOC、TN、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、CaCO ₃ | [41] |
| 冬给错纳 | 湖泊 | 35.30 | 97.53 | 4090 | 5.75 | 0—18.0 | TOC、C/N、砂含量、黄铁矿 | [42] |

3 结果与分析

3.1 湖泊沉积物古环境代用指标与气候干湿变化的关系

湖泊沉积物有机地化指标常用来指示湖泊有机质中内、外源物质的相对贡献^[26]。碳酸盐含量可以表明湖水矿化度的大小,一般来说,其低值表明区域降水量增多,湖泊水体淡化,气候湿润,含量高则与之相反^[43]。根据湖泊类型不同,碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 的主要影响因素也不同,在干旱、半干旱地区, $\delta^{18}\text{O}$ 偏正指示干旱环境,偏负则指示较湿润环境^[44]。本文通过探讨14个终端湖沉积物有机地化指标的变化情况,分析祁连山及周边地区全新世以来湖泊有机质的来源以及沉积地层碳酸盐含量和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化,验证其流域性指示意义并结合其他古气候记录综合分析了该区域全新世以来的气候变化(图2、表2)。

全新世期间,猪野泽剖面早、晚期较低的TOC含量表明该时期区域初级生产力较弱,虽然沉积物中C/N较低,但沉积相中含有部分砂层,表明该时期湖泊沉积物有机质多为陆生植被输入;中全新世TOC和C/N都较高代表了较高的湖泊及流域初级生产力和陆生高等植物密度,猪野泽剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的范围在-31.00‰~-22.00‰之间,这与C3植物的 $\delta^{13}\text{C}$ (-33.00‰~-21.00‰)相符^[56],说明猪野泽沉积物中有机碳主要来自于C3植物^[31]。三角城古湖泊剖面显示早全新世湖泊发育, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏重可能与沉水植物发育有关;中、晚全新世气候开始变干,湖泊水体较小,挺水植物和陆生植被开始在湖泊周边生长,沉积



注：哈拉湖 $\delta^{18}O$ 数据参考自文献[45],其他数据来源如表1所示。

图2 祁连山及周边地区全新世以来终端湖沉积物古环境代用指标变化

Fig. 2 Changes in palaeoenvironmental proxies in terminal lake sediments in the Qilian Mountains and the surroundings since the Holocene

物中有机质碳同位素组成相对较轻^[33]。花海剖面早全新世多为河流和风成沉积，所以较低的C/N不能确定是否来自于水生植物；中全新世TOC和C/N增加，湖泊初级生产力提高，气候温暖湿润。由于湖泊藻类的C/N通常小于10^[57-58]，此外，在中国干旱地区，冲积物的C/N小于5^[59]。花海剖面中全新世期间C/N通常小于10，部分C/N小于5，这些比值表明，该剖面的有机质主要来源于湖泊藻类和冲积物^[31]。盐池剖面早全新世较低的C/N

表2 祁连山及周边地区全新世以来气候变化信息

Tab. 2 Climate change in the Qilian Mountains and the surroundings since the Holocene

| 记录点 | 类型 | 纬度 (°N) | 经度 (°E) | 海拔 (m) | 所用代理指标 | 12.0—9.0 (cal ka BP) | 9.0—6.0 (cal ka BP) | 6.0—3.0 (cal ka BP) | 3.0—0 (cal ka BP) | 参考 文献 |
|------|------|------------|------------|-----------|---|----------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|----------|
| 敦德 | 冰芯 | 38.10 | 92.40 | 5325 | 孢粉 | X | W | W | D | [46] |
| 伊塘湖 | 湖泊 | 40.30 | 94.97 | / | 岩性、TOC、C/N、 $\delta^{13}C_{org}$ | D-W | W | W-D | D | [35] |
| 克鲁克湖 | 湖泊 | 37.28 | 96.90 | 2817 | 孢粉、CaCO ₃ 、TOC、 $\delta^{18}O$ 、A/C | W | D | D | D-W | [47] |
| 尕海 | 湖泊 | 37.17 | 97.55 | / | CaCO ₃ 、LOI、 $\delta^{13}C_{org}$ 、 $\delta^{18}O$ | W | W | W-D | D | [43] |
| 哈拉湖 | 湖泊 | 38.30 | 97.57 | 4072 | 孢粉、A/C | W | W-D | W-D | D | [48] |
| 花海 | 干涸湖盆 | 40.44 | 98.08 | 1195 | CaCO ₃ 、TOC、C/N、Ti | D-W | W | W-D | D | [30-31] |
| 冬给错纳 | 湖泊 | 35.35 | 98.52 | 4136 | 孢粉 | W | W | W | D | [49] |
| 盐池 | 干涸湖盆 | 39.75 | 99.30 | / | MS、CaCO ₃ 、亮度 | D | W-D | W-D | D | [50] |
| 青海湖 | 湖泊 | 37.00 | 100.00 | 3200 | 孢粉 | D-W | W | W | D | [51] |
| 更尕海 | 湖泊 | 36.18 | 100.1 | 2680 | TOC、TN、 $\delta^{13}C_{org}$ 、CaCO ₃ | W | D | D | D | [41] |
| 达连海 | 湖泊 | 37.91 | 100.41 | 2850 | 孢粉、中值粒径、CaCO ₃ | D | W | W | D | [52] |
| 青海湖 | 湖泊 | 36.65 | 100.54 | 3200 | 介形虫 $\delta^{18}O$ 、孢粉、粒度、CaCO ₃ | W | W | D | D | [40] |
| 扁都口 | 剖面 | 38.22 | 100.87 | 2844 | MS、亮度、CaCO ₃ | X | W | W | D | [50] |
| 居延海 | 湖泊 | 41.89 | 101.85 | 892 | 孢粉、岩性 | X | D | D | D | [53] |
| 哈溪 | 剖面 | 37.50 | 102.40 | 2450 | 岩性、CaCO ₃ 、TOC、MS | X | W-D | W | D | [54] |
| 三角城 | 干涸湖盆 | 39.01 | 103.34 | 1320 | 孢粉 | W | W-D | D | D-W | [55] |
| 猪野泽 | 干涸湖盆 | 39.05 | 103.67 | 1309 | 孢粉 | D-W | W | W | D | [26] |

注：X为无记录数据；W为湿润、高水位；D为干旱、低水位。

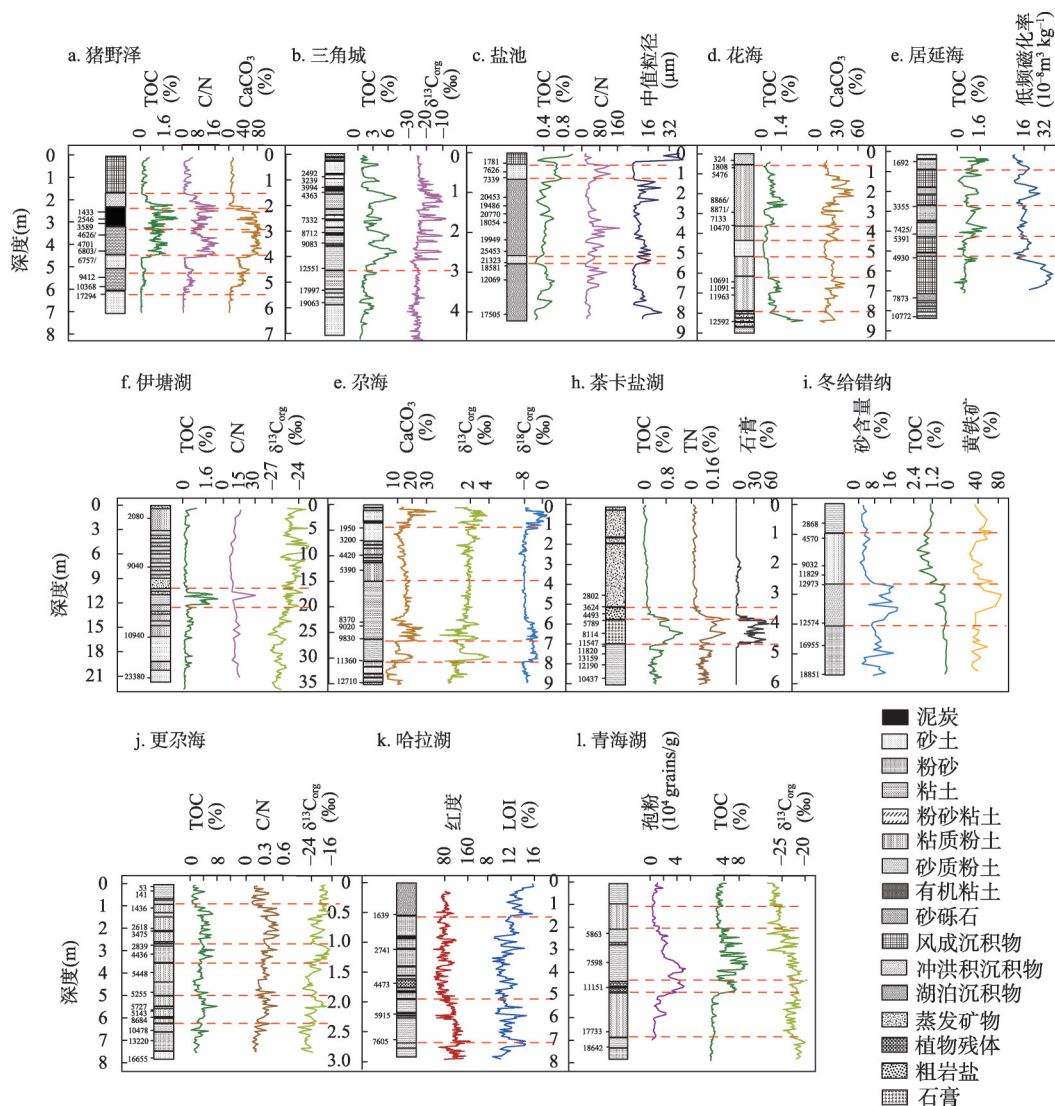
指示了内生有机质（如浮游动植物）为湖泊有机质的主要来源；中晚全新世逐渐增加的C/N表明陆源有机质输入增加^[29]。伊塘湖岩芯早全新世期间TOC和C/N均较高，其有机质来源主要是陆生植被；中全新世 $\delta^{13}C_{org}$ 偏负，C/N较低，湖泊内有机质来源以内源为主；晚全新世C/N增大，湖泊有机质多为陆生植被输入^[35]。尕海岩芯C/N和 $\delta^{13}C_{org}$ 的变化表明全新世以来湖泊有机质中陆源输入占比逐渐增大^[38]。通常，陆地有机质的C/N在20~30之间变化，藻类在4~10之间变化，水生植物在10~20之间变化，更尕海岩芯全新世时期C/N为6.5~19，低于20，表明水生植物对湖泊沉积物中有机质的主要贡献，陆地输入可忽略不计^[41]。冬给错纳岩芯全新世期间C/N始终小于20，且大多小于12。藻类和水生大型植物C/N介于5~12之间，这些值表明冬给错纳岩芯有机物主要来源于内源水生植物^[42]。青海湖岩芯显示早中全新世TOC和C/N增加，气候变湿润， $\delta^{13}C_{org}$ 相对偏正指示了陆生植被输入增加，有机质来源主要为C3植物；晚全新世以来C/N增大则指示了该时段陆生植物为该湖泊有机质的主要来源^[40]。

尕斯库勒湖岩芯早全新世 $\delta^{18}\text{O}$ 较高可能是温度上升,蒸发较大,导致碳酸盐沉积;中全新世较低的碳酸盐含量和 $\delta^{18}\text{O}$ 表示该时期气候湿润;晚全新世以来碳酸盐含量增大, $\delta^{18}\text{O}$ 呈现上升趋势,气候逐渐变干旱^[38]。哈拉湖岩芯 $\delta^{18}\text{O}$ 早全新世较高,气候干燥;中全新世期间 $\delta^{18}\text{O}$ 达到较低值,表明气候较湿润,后期 $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐增加;到晚全新世 $\delta^{18}\text{O}$ 数值波动幅度增大,但仍处于高值,气候趋于干旱化^[48]。克鲁克湖岩芯主要由碳酸盐和硅酸盐组成,低碳酸盐含量表明该区域气候较暖湿^[47]。盐池剖面早全新世 CaCO_3 含量较高,可能是流域输入的碎屑碳酸盐增加,中晚全新世随着湖泊退缩, CaCO_3 含量逐渐降低,环境变差^[34]。花海剖面早全新世初期时沉积物为冲洪积物,并不是湖相沉积,碳酸盐含量并不能反映湖泊水位高低。湖泊沉积物的自生碳酸盐含量通常被解释为有效湿度和盐度的代表^[60],早全新世中后期湖泊以自生碳酸盐为主,沉积碳酸盐含量增大,气候潮湿,湖泊水位上升;中全新世碳酸盐含量由低值转为高值,表明在中全新世经历了一个干旱事件,但整体属于温暖湿润期^[31, 61]。

3.2 湖泊沉积物岩性与古环境代用指标的关系

岩性的粒度变化与其沉积环境密切相关,通过分析沉积物的粒度可以反映沉积物的物质来源、搬运机制以及沉积环境等信息。沉积物粒度的环境意义常常解释为:粗粒沉积物指示低水位时期的干旱气候,细粒沉积物指示高水位时期的湿润气候。为此,本文选取了祁连山及周边地区共12个全新世以来终端湖沉积物的岩性和古环境代用指标数据,尝试分析岩性与古环境代用指标的对应关系(图3)。

猪野泽剖面沉积相变化较为明显,TOC、C/N和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 随沉积相变化而改变,说明沉积物中有机地球化学指标受沉积相控制^[26]。三角城古湖泊剖面460 cm以下主要为风成沉积层,含较粗的碎屑物质,TOC含量较低($< 2\%$), $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏轻,多分布在 $-30\text{‰} \sim -25\text{‰}$;460 cm以上沉积层以湖相沉积为主,TOC含量明显增大, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏重,约为 $-20\text{‰} \sim -10\text{‰}$,表明不同的沉积相中代用指标的变化存在差异^[28]。居延海岩芯中粉砂层TOC含量较高,风成沉积层TOC含量较低。根据磁学性质划分的层位对应到了沉积相发生砂层和粘土层相互改变的时期,因为磁性矿物与粒径组分变化情况相一致,沉积物中粒径 $> 30\mu\text{m}$ 的磁性矿物多于粒径 $< 2\mu\text{m}$ 的磁性矿物。因此,沉积相的改变会导致沉积物磁性颗粒数变化,改变磁性参数^[34]。花海剖面岩性、TOC、C/N、碳酸盐和粒度的演化过程表明,800 cm以下芒硝层出现和TOC含量降低象征着干旱环境;800 cm以上(8.8—10.4 cal ka BP)湖相沉积出现对应古环境代用指标指示由于干旱转为湿润的环境;5.5 cal ka BP以后间断沉积相的出现标志着该区域全新世中晚期向干旱环境过渡,代用指标对应发生变化^[31]。依据沉积地层变化,盐池剖面被划分成6个阶段,该剖面的岩性与粒度、矿物组成、碳酸盐含量、C/N等指标均有良好的对应关系,很好的还原了全新世以来的环境演化过程^[29]。伊塘湖剖面在936~1352 cm沼泽相沉积中TOC含量波动明显, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏正,表明此阶段湖泊生产力提高,气候趋于暖湿,与岩性体现的湖相沉积相一致;300~936 cm岩性变为粘土和粉砂粘土,TOC含量降低, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 偏正,表明水生植被为湖泊有机质的主要输入来源,此时处于全新世中期气候适宜期;300 cm以上为粘质粉土,TOC和C/N增大,但因邻近现代,所受影响因素较多^[35]。尕斯库勒湖岩芯共分为4个阶段:3073~3483 cm(1136—1271 cal a BP)以砂层为主,多为粉细砂和中砂,具有风成沉积特征;2280~3073 cm(8370—1136 cal a BP)以砂层、粘土层为主,代用指标变化较大,波动明显。尽管岩性没有发生太大变化,但根据岩层中碳酸盐含量、文石和石膏的变化情况可以判断出湖泊很有可能从硫酸盐沉积逆向演化成了碳酸盐沉积, $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的高值指示当时温度较高,蒸发作用较强;707~2280 cm(3200—8370 cal a BP)以粘土为主,气候较稳



注：尕斯库勒湖数据参考自文献[43]，其他数据来源如表1所示。

图3 祁连山及周边地区终端湖沉积物岩性与指标变化

Fig. 3 Changes in lithology and paleoenvironmental proxies of terminal lake sediments in the Qilian Mountains and the surroundings

定，指标变化相对一致；0~707 cm (0—3.2 cal ka BP) 以细砂和粉砂为主，各指标波动幅度变大，气候变化显著^[43]。茶卡盐湖剖面划分为5个阶段：693~900 cm (11.4—17.2 cal ka BP) 为层状粘土粉砂层，TOC和TN含量较低，表明初级生产力较低，温度可能达到低值；582~693 cm (6.0—11.4 cal ka BP) 由硫酸盐矿物和暗色粘质淤泥组成，TOC和TN含量突增，与当时温暖湿润的气候有关，石膏的出现表示湖泊从淡水到高盐度环境的改变；567~582 cm (5.3—6.0 cal ka BP) TOC和TN含量较高，土壤湿润，但盐度仍较高；270~567 cm (1.7—5.3 cal ka BP) 湖泊盐度快速升高，高盐度环境导致湖泊初级生产力低下，TOC和TN含量较低，分别为0.2%和0.03%；0~270 cm (0—1.7 cal ka BP) 岩盐含量急速增加，TOC和TN含量下降至0.06%和0.02%，湖泊盐度再次增加^[39]。根据沉

积相、地球化学和矿物等数据,冬给错纳岩芯被划分成5个岩性单元,反映了湖泊系统发育的不同阶段。全新世沉积环境发生明显变化,沉积成分改变影响古环境代用指标的变化情况^[42]。更尕海剖面主要以粘质粉土、粉砂和粉砂粘土相间存在,TOC、TN和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 指标波动较为复杂,随沉积相变化表现不明显,可能与沉积相频繁变换有关^[41]。哈拉湖剖面上部57 cm呈现相对柔软的褐色物质,含水量较大;57~200 cm沉积物逐渐致密,形成层压较好的灰色和深色层,同时,黑色层出现表明有大量有机物质沉积,与LOI含量的高值相对应;200~270 cm以褐色沉积物为主。一般情况下沉积物红度较高,对应上部沉积物中碳酸盐含量较高^[40]。

4 讨论

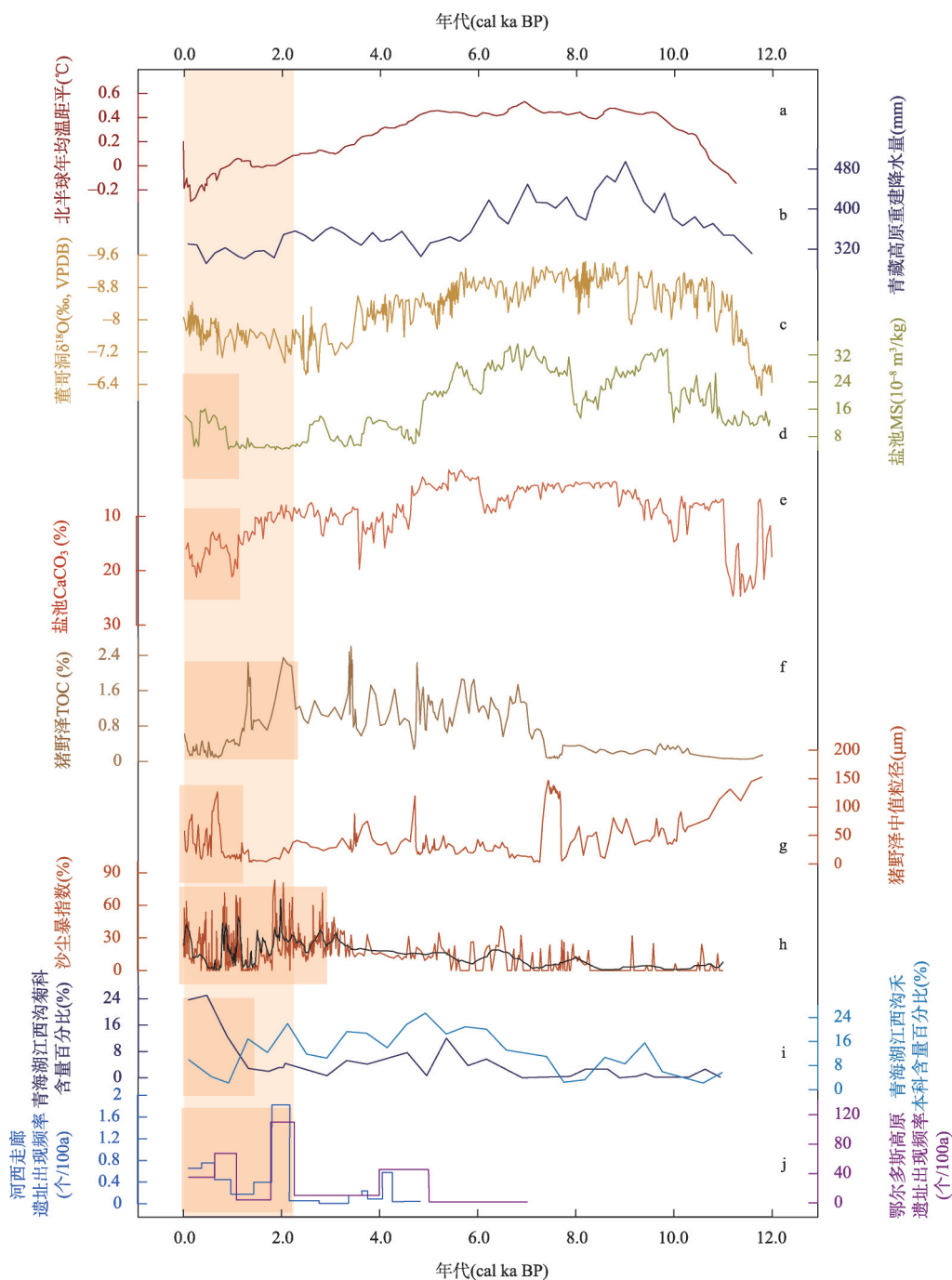
4.1 全新世以来古环境代用指标指示的人类活动

各种类型沉积物的代用指标可以指示人类活动^[2-3, 10],通过收集祁连山及周边地区部分古环境代用指标数据,可以人类活动对沉积地层古环境代用指标的影响,挖掘全新世以来古环境代用指标中的人类活动规律(图4)。

孢粉常用于还原古环境的植被组成,从而反映过去环境变化^[70]。青海湖江西沟2号遗迹文化层的孢粉研究发现,菊科、蔷薇科含量在4.0 cal ka BP以来大幅增加,2.0 cal ka BP以来仍持续增多,这些类型多是伴人杂草植物,与人类活动有关,表明晚全新世以来人类活动强度逐渐增强(图4i)^[71-72]。沙尘暴记录作为界定人为影响的重要标志,重建的北方沙尘暴数据表明2.0—11.0 cal ka BP期间沙尘暴主要受东亚夏季风和植被覆盖控制,2.0 cal ka BP以来,随着人类对地表覆被干扰的持续加剧,人类活动开始在几十年到百年的时间尺度上主导亚洲沙尘暴(图4h)。猪野泽沉积记录指出TOC含量在1.5 cal ka BP时开始大幅减少可能与1.5 cal ka BP以来该区域人口数量明显增加,人类乱砍滥伐森林、过度放牧等造成研究区植被数量迅速减少有关(图4f)。猪野泽沉积物的中值粒径在1.5 cal ka BP以来波动幅度较大,粒径显著增大(图4g)。人类对地表的改造作用也会造成沉积物粒径增大,该结果在盐池、花海、兴凯湖和青海湖等的粒度研究中已得到证实^[69, 73-74],结合猪野泽TOC的大幅减少,因此猪野泽沉积物中值粒径增大可能与人类活动对植被的破坏造成的水土流失加强有关。虽然不同地区粒径明显增大的时间略有不同,但整体而言,在2.0 cal ka BP以来粒度受人类活动影响的程度逐渐增大。

CaCO_3 含量通常被用来反映流域尺度的水分有效性。盐池剖面中晚全新世随着湖泊退缩 CaCO_3 含量逐渐降低,但是在1.0 cal ka BP左右出现了波动上升的趋势(图4e)。气温在千年尺度稳定下降,降水也未出现大幅波动,因此气候并非其变化的主要因素。在该时期,西夏完成了对河西走廊完成了统一,并进行了一系列经济开发措施。由于西夏是少数民族政权,重牧轻农的开发政策使得流域土地覆被改变,导致风化增强,输入物质增加,可能导致了该时期 CaCO_3 含量明显增高^[75]。

湖泊MS是记录陆地环境变化的重要信息来源,可被置于与人类活动相关的历史背景中进行讨论^[76]。2.5—1.2 cal ka BP期间MS急剧增加后又急剧减少表明了沙漠的迅速扩张和迅速退缩, CaCO_3 含量与之对应,表明该地区可能发生了较为剧烈的气候波动(图4d);0.2 cal ka BP以来MS和 CaCO_3 均出现增加趋势,表明气候趋于冷干,该时期内人口数量增多,活动强度增大,导致植被覆盖减少,水土流失严重,加快了湖泊萎缩速度,使得进入湖泊的外源物质明显增加,随着湖泊干涸,可能整个流域都受到碎屑磁性矿物的再沉积作用,间接对沉积物的MS造成影响^[77]。



注: a. 北半球年均温距平^[62]; b. 青藏高原重建降水量^[63]; c. 董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 综合记录^[64]; d. 盐池古湖泊MS^[50]; e. 盐池古湖泊 CaCO_3 占比^[50]; f. 猪野泽TOC含量^[65]; g. 猪野泽中值粒径^[66]; h. 中国西北地区沙尘暴指数重建结果^[2]; i. 青海湖江西沟菊科含量和禾本科含量^[67]; j. 河西走廊、鄂尔多斯高原遗址数据^[68-69]; 背景色为人类活动影响。

图4 全新世以来典型记录中古环境代用指标变化

Fig. 4 Changes in paleoenvironmental proxies from typical records since the Holocene

全新世期间 2.8—4.3 cal ka BP, 5.0—6.5 cal ka BP 和 7.0—8.5 cal ka BP 为中国人口增多的时期, 该时段内温和的气候刺激了史前人口增长和文化进步^[78]。研究区人类遗址的变化也显示出 4.0—6.0 cal ka BP 和 3.0 cal ka BP 以来人类遗址数量明显增加, 与之前的研究一致。图 4j 显示祁连山及周边地区人口遗址数量在 2.0 cal ka BP 左右开始急剧增加, 此时处于两汉时期, 气候温暖湿润, 大量人口迁入内地, 遗址数量明显增多^[79]; 在 1.0 cal ka BP 左右人口遗址数量也相对增加, 此时正处于宋元时期, 对应中世纪暖期 (MWP), 较适宜的气候和农耕经济的快速发展促使人类开始定居于此, 遗址数量逐渐增长^[80]。

图 4 显示古环境代用指标基本在 2.0 cal ka BP 左右开始发生较为剧烈的波动, 与 2.0 cal ka BP 以来气候的一致性较差, 可能是人类活动造成了地表作用形态改变, 导致湖泊沉积物粒径增大, 植被覆盖度的降低则使得有机质含量降低等。因此, 人类活动强度增大到一定程度时可以改变代用指标在自然状态下的变化趋势, 影响其指示意义。此外, 本文收集了一些关于利用沉积物古环境代用指标指示人类活动的研究, 结果表明人类活动对环境产生重要作用的时期多集中在 2.0—3.0 cal ka BP (表 3), 与上述发现代用指标异常波动的时期较为接近。

表 3 沉积物古环境代用指标指示的人类活动时期
Tab. 3 The period of human activities indicated by the paleoenvironmental proxy in the sediments

| 研究区 | 时间(cal ka BP) | 标志物 | 事件 | 参考文献 |
|------|---------------|---------------------------|---------------|------|
| 青藏高原 | 4.7 | 湖泊沉积物孢粉和考古学 | 放牧造成土壤退化 | [10] |
| 黄河流域 | 3.0 | 大型河流沉积物通量增加 | 人类对沉积物产生影响 | [81] |
| 长江流域 | 3.0 | 东海大陆架岩芯黑碳记录 | 火活动增强 | [3] |
| 非洲 | 2.6 | 湖泊沉积物植物蜡碳、 ³ H | 热带雨林系统改变 | [82] |
| 亚洲 | 2.0 | 亚洲沙尘暴、粒度 | 人类活动成沙尘暴的主控因素 | [2] |
| 珠江口 | 1.5 | 有机质输入减少, 陆源矿物碎屑物 | 土壤侵蚀流失加剧 | [83] |
| | | 质增多 | | |

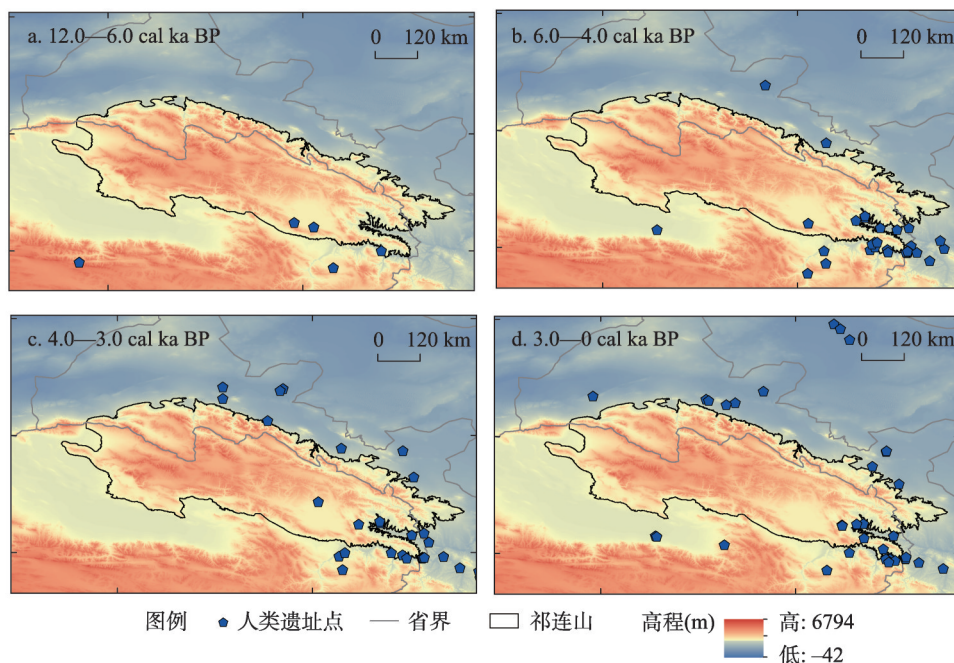
4.2 近 2000 年以来人类活动增强对环境的影响

晚全新世以来祁连山及周边地区整体降水较中全新世较少, 尽管在中世纪暖期和小冰期阶段存在不断的冷暖交替时期, 但依旧在区域内呈现干旱化趋势。在干旱化的背景下, 祁连山及周边地区湖泊面积逐渐退缩。然而从西北地区湖泊的演化过程来看, 近 2 ka 来湖泊干涸和萎缩速度已经远远超过自然时期的速度。研究显示猪野泽晚全新世以来湖泊面积明显缩小, 出现泥沼相沉积物, 最上面覆盖了现代风成沉积物^[26]; 三角城古湖泊自 6.4 cal ka BP 以来受气候环境变化和人口活动增加的影响, 被分割构成了几个碳酸盐湖和沼泽^[84]; 盐池在 4.7 cal ka BP 以来湖泊退缩速度加快, 最终干涸^[29]; 居延海面积从 2.0 cal ka BP 的 2000 km², 逐渐萎缩到现在的 66.3 km²; 条湖在唐代中期后变为干涸状态^[85]。青海湖、尕斯库勒湖、哈拉湖和尕斯库勒湖等水位下降, 湖泊面积迅速缩小^[52], 如尕斯库勒湖地区在 3.0 cal ka BP 以来降水量明显降低, 湖泊受到的蒸发作用增大, 面积减小, 湖水盐度明显增大^[38]; 茶卡盐湖自晚全新世以来湖泊萎缩明显, 咸化程度加大^[39]; 青海湖由秦汉时期的 6000 km²减少至 1970 年的 4474 km²。以上数据表明了晚全新世以来祁连山及周边地区许多湖泊面积出现明显退缩, 退缩速度远远超过了先前的湖泊演化速度, 这单单依靠千年以来的气候变化解释湖泊干涸的速度远远不够。

从西汉到清朝的 2 ka 间, 祁连山及周边地区开发可分为 5 个阶段: 即开拓、发展、鼎盛、衰落、恢复与缓慢发展。121 BC 汉武帝派霍去病收复祁连山北部的河西走廊, 这

块被匈奴占据多年的领土再次回到中原王朝手中。汉武帝实行移民实边, 厉行屯田的政策, 河西的开发从此发端。从西晋到隋朝是河西的发展时期, 五凉、西魏、北周等割据政权和统一的隋王朝都将河西作为重点开发地区, 由于这一时期统治者多为少数民族, 他们在重视农业经济的同时大力挖掘畜牧业资源, 这种农牧并举的方式为后来在唐代河西地区发展达到顶峰打下了基础。安史之乱前的唐王朝是河西开发的黄金时期, 对河西农业发展的建设和水利的开发出现了“天下富庶者无如陇右”的景象。从中唐到明的几百年间, 河西地区战乱不止, 在加之统治者的不重视, 限制了河西地区的发展, 导致了经济和社会的衰败。随着清朝对中国的统一, 河西地区再次进入统治者的视野, 先进的生产技术和屯田垦荒的政策使得河西地区开始恢复, 在清朝中叶甚至已经有了商品经济^[75]。

在河西的开发中, 人类的经济活动强烈地干预了自然绿洲的水文循环过程, 引起了一系列的水文效应和生态环境的恶化。历史时期以来人类开荒垦殖, 大兴修建水库, 破坏森林植被, 这种盲目开垦、无通盘计划地大量引灌等对水资源不合理的、掠夺式的开发和利用, 使得河西有限的水资源益感奇缺, 水土利用矛盾不断加剧。这种矛盾造成的水土流失、土地盐碱化, 改变了表层土壤物质的理化性质, 这些物质进入湖泊, 改变了湖泊原有的物质能量平衡, 使得沉积物的粒径、碳酸盐含量、红度、有机质含量等发生改变, 在加上气候干旱的影响, 最后导致沉积相的变化。并且这种因人类活动促进环境演变因素越趋晚近, 越占重要地位。明清时期以来, 工业革命带来科技的进步使得人类对区域环境的影响明显增大, 边疆拓荒屯垦活动明显增多, 河西的人口和人类活动强度也达到了顶峰(图5)。这种进步使得人类逐渐替代气候, 成为区域地表环境变化主要影响因素。大量的修沟筑渠, 引入高产农作物, 使得河西地区的农业水平在当时小冰期(LIA)寒冷气候影响下依旧达到历史时期的最高水平^[86]。



注: 数据来自文献[89]。

图5 祁连山及周边地区全新世以来人类遗址时空分布

Fig. 5 The spatiotemporal distribution of archaeological sites in the Qilian Mountains and the surroundings since the Holocene

此外,关于区域环境变化和人类活动信息的要素,如黄土、冰芯,树轮等的相关研究也体现了近2000年以来环境变化与人类活动的耦合关系。在黄土记录中,中世纪暖期(MWP)时期对应中国的宋元时期,气候温暖湿润,旱作农业得到快速发展^[87]。黄土高原六盘山北联池中晚全新世沉积记录发现,1.4—5.0 cal ka BP区域环境以自然气候为主,人类活动较少,0.8—1.4 cal ka BP人类活动开始影响湖泊周边环境,在0.8 cal ka BP以来,人类活动成为湖泊环境变化的主要影响因素^[88]。中低纬度冰芯与人类活动联系更为密切^[89],青藏高原冰芯中的 SO_4^{2-} 在1870年之后浓度快速升高^[90];慕士塔格冰芯发现Pb浓度在1973年以来大幅增加^[91];东绒布冰芯黑炭记录在近百年来明显增多^[92],均与近代工业活动增多,人类活动排放增加有关。用于火历史重建的碳屑研究中显示,美国西部火灾频率在MWP向LIA过渡时期发生较多,而LIA较少,冷湿气候会降低火灾发生频率,该结果在加拿大东部的森林研究中已被证实^[93]。欧洲树轮火疤分析显示,18世纪火偏多与人类养蜂活动密切相关^[94]。不同地区人类活动主要作用于环境的时间说法不一,但大多集中在18—19世纪,人类活动逐渐转变为区域环境变化的主要驱动力。

4.3 全新世以来湖泊沉积物的沉积相、代用指标与人类活动关系

本文设计了一个框架图来帮助理解全新世以来湖泊沉积相,古环境代用指标,人类活动,气候变化的关系(图6)。在早中全新世期间,气候温暖湿润,湖泊沉积相变化主要受控于气候变化,人类活动几乎没有过多影响。湖泊古环境代用指标可以反映当时的气候条件。晚全新世以来气候干旱化,同时人类活动强度增大,二者的共同作用使得湖泊沉积相发生改变,古环境代用指标波动剧烈。这一时期,古环境代用指标的指示意义较为复杂,对于气候变化和人类活动都有一定指示意义。距今200 a开始,人类活动对区域环境的影响显著增加,对区域环境变化起主导作用,该时间段人类活动信息的要素可以通过沉积物代用指标的变化分析。早期的研究对本文的框架图提供了支撑,Sakai等通过计算祁连山的出山水流量发现,历史时期至少有两次下游地区的干旱事件是人为驱动的^[95];李晓丽等通过分析鲁家沟黄土剖面代用指标,发现唐宋以来,气候总体向干旱化发展的同时,叠加了人类活动的影响,造成定西地区生态环境的恶化,而人类活动对环境的影响掩盖了气候环境自身由于自然原因引起的变化^[96]。Fontana等通过对公元元年以来博斯腾湖硅藻记录分析发现,气候变化和人类活动是博斯腾湖水文和生态状况的主要驱动因

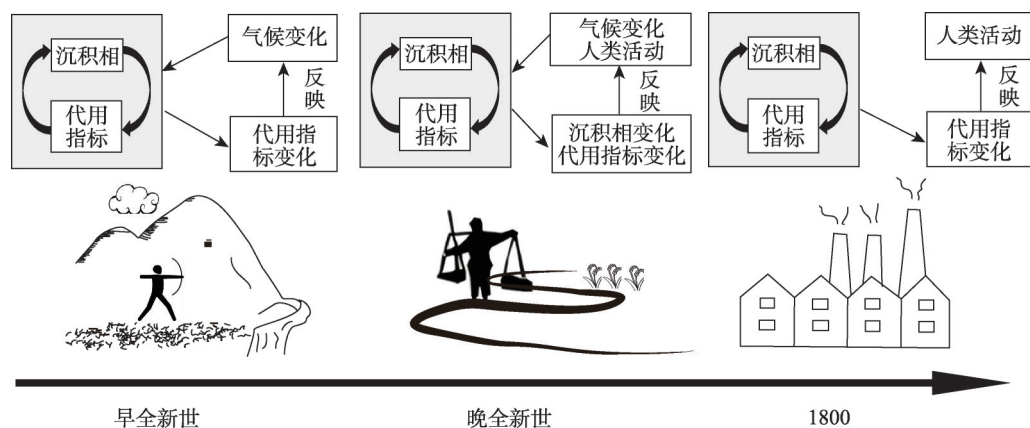


图6 全新世以来湖泊沉积相、古环境代用指标、人类活动和气候变化框架

Fig. 6 Frame diagram of interactions among lake sedimentary facies, paleoenvironmental proxies, human activities, and climate change since the Holocene

素,干旱的背景和流域人口的增加导致博斯腾湖水进一步富营养化和高盐度^[97];王乃昂等定量分析了历史时期人类活动对湖泊变化的贡献率,发现整个历史时期人类活动对石羊河下游湖泊影响的量级为28%,清代以来高达88%,人口增多是晚近湖泊快速萎缩乃至沙漠化的主要原因^[98];对现代人类活动影响水文干旱的研究表明,水文干旱最直接的影响因素是气候变化,但人类活动本身表现出显著加剧水文干旱的作用效应。就研究区而言,人类活动增加水文干旱强度达14.5%,延长水文干旱时间达2.3%~6.7%^[99]。在气候背景下和人类活动的综合影响下,祁连山及周边地区水资源条件恶化,湖泊面积逐渐退缩,萎缩速度明显加快,沉积相由原来稳定的深水环境变为了不稳定的浅水环境,导致沉积岩性发生变化。总而言之,人类活动强度增大会改变流域植被、土壤性质导致输入湖泊物质的变化,在加上围垦、封堵等直接改造湖泊的行为,导致环境退化,绿洲废弃。

董广辉等提出了“支点”概念模型来探讨过去人地关系在时间维度上的演变轨迹和机制^[100]。当自然生态系统和人类社会系统达到平衡状态,气候环境变化和人类活动变化都有可能打破其平衡状态。当这种平衡状态被打破时,人类社会系统就会做出调整,通过“量变平衡模式”或“质变平衡模式”建立新的平衡态。对于长时间尺度的气候变化,在人类社会体现为人口数目的变化的“量变平衡模式”进行适应,而在湖泊沉积物中则体现为代用指标与气候的一致性变化。对于十年到百年尺度的气候百年变化,人类通过社会组织结构和技术进步改造地表环境应对气候危机,这种方式在湖泊沉积物中体现为湖泊代用指标的突变,代用指标开始对人类活动具有一定的指示意义,并随着人类活动的增加,湖泊沉积物代理指标开始主要反映人类活动。“支点”概念模型和本文设计的框架图都重点探讨了时间维度下的人与环境的相互作用模式,前者主要侧重于人地关系演变的机制,后者则主要关注人地关系演变对于湖泊沉积物的影响。“支点”概念模型和框架图都认为人类社会应对生存环境变化的社会韧性呈现增加趋势,人地关系演变的主导因子逐渐由自然因素向人为因素转变(图6)。

湖泊作为一个独立的自然综合体,是流域气候、水文、土壤、生物和地貌相互作用的连接点。湖泊沉积物的沉积相,代用指标的变化,反映的不仅仅是尾间地区的环境变化,对整个流域的地表过程也有响应。晚全新世以来,特别是公元元年以来,人口扩张和技术进步增加了人类活动的影响^[101-103]。这种悠久的人类活动历史改变了全球许多地区的自然过程,从区域水文和沉积物到地表过程。因此对于湖泊沉积相和代用指标的变化,应从流域地表环境的整体性进行考虑,综合利用水动力学,地球化学等多种角度分析,探究湖泊沉积相和代用指标变化背后的人地因素。

5 结论

(1) 全新世以来祁连山及周边地区终端湖泊有机质多为水生植物和陆生植物混合来源,位于高海拔地区且人类活动强度小的湖泊,其有机质主要来自于水生植被。研究区早中全新世气候较晚全新世更为暖湿,早全新世温度上升,主要为湖泊发育期;中全新世气候为较稳定的温暖湿润期,湖泊面积最大;晚全新世以来气候波动频繁,趋于干旱化。

(2) 沉积相变化往往控制着古环境代用指标的变化,湖相沉积层主要形成于暖湿气候时期,TOC、C/N增大、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、碳酸盐含量降低;风成沉积层的形成则对应较冷干的气候,指标变化与上述多呈相反趋势。

(3) 晚全新世以来人类活动强度增加导致湖泊退缩速度明显加快,加剧了区域干旱化,导致沉积相发生变化。2.0 cal ka BP以来沉积物沉积相的变化与人类活动密切相关,此时人类活动已开始逐渐影响区域环境变化。1800年开始人类活动对区域环境变化起主导作用。

致谢:衷心感谢两位审稿人及编辑部老师提出的宝贵意见,使论文能够进一步完善。

参考文献(References)

- [1] IPCC. Summary for policymakers//Masson-Delmotte V P, Zhai A, Pirani S L, et al. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] Chen S Q, Liu J B, Wang X, et al. Holocene dust storm variations over northern China: Transition from a natural forcing to an anthropogenic forcing. *Science Bulletin*, 2021, 66(24): 2516-2527.
- [3] Pei W Q, Wan S M, Clift P D, et al. Human impact overwhelms long-term climate control of fire in the Yangtze River Basin since 3.0 ka BP. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 230: 106165. DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106165.
- [4] Rao Zhiguo, Qin Qianqian, Wei Shikai, et al. Holocene temperature history and its significance to studies on historical human-land relationship in China. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(5): 1169-1180. [饶志国, 秦倩倩, 魏士凯, 等. 全新世温度研究回顾及对历史人地关系的启示. *地理学报*, 2022, 77(5): 1169-1180.]
- [5] Yang Linhai, Zhou Jie, He Zhong, et al. Review of research on correlation of Holocene environmental change and human activities in China. *Journal of Salt Lake Research*, 2009, 17(2): 63-68. [杨林海, 周杰, 何忠, 等. 国内全新世环境变化与人类活动关系研究略评. *盐湖研究*, 2009, 17(2): 63-68.]
- [6] Shen Ji. Progress and prospect of palaeolimnology research in China. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(3): 307-313. [沈吉. 湖泊沉积研究的历史进展与展望. *湖泊科学*, 2009, 21(3): 307-313.]
- [7] Chen F H, Xu Q H, Chen J H, et al. East Asian summer monsoon precipitation variability since the Last Deglaciation. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 11186. DOI: 10.1038/srep11186.
- [8] Li Mingqi, Shao Xuemei, Zhang Yong. Precipitation variation and its linkage with solar activity and large volcanic eruptions during 392 BC-2017 AD in northeastern Qaidam Basin, China. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(1): 71-86. [李明启, 邵雪梅, 张永. 392 BC—2017 AD柴达木盆地东北部降水变化及其与太阳活动和强火山喷发的联系. *地理学报*, 2023, 78(1): 71-86.]
- [9] Zhang C, Zhao C, Zhou A F, et al. Late Holocene lacustrine environmental and ecological changes caused by anthropogenic activities in the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 203: 266-277.
- [10] Huang X Z, Liu S S, Dong G H, et al. Early human impacts on vegetation on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau during the middle to late Holocene. *Progress in Physical Geography*, 2017, 41(3): 286-301.
- [11] Park J J, Byrne R, Böhnelt H, et al. Holocene climate change and human impact, central Mexico: A record based on maar lake pollen and sediment chemistry. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(5/6): 618-632.
- [12] Hillman A L, Romain S S. Lake Martin, Louisiana sediments as a record of geomorphology, paleoenvironment, and human activities. *Journal of Paleolimnology*, 2020, 64(2): 91-105.
- [13] Zhang Qing. The anthropogenic characteristics of alpine Lake sedimentary records in the monsoon fringe [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019. [张青. 季风边缘区高山湖泊沉积记录的人类世特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.]
- [14] Chen J, Liu J B, Xie C, et al. Biogeochemical responses to climate change and anthropogenic nitrogen deposition from a-200-year record from Tianchi Lake, Chinese Loess Plateau. *Quaternary International*, 2018, 493: 22-30.
- [15] Hu Zhujun. Ecological changes and driving mechanisms of alpine lakes in the southeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. [胡竹君. 青藏高原东南缘高山湖泊生态变化与驱动机制 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.]
- [16] Zhang Zhenke, Wu Ruijin, Zhu Yuxin, et al. Lacustrine records of human activities in the catchment of Erhai Lake, Yunnan province. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(1): 66-74. [张振克, 吴瑞金, 朱育新, 等. 云南洱海流域人类活动的湖泊沉积记录分析. *地理学报*, 2000, 55(1): 66-74.]
- [17] Fu Xia, Zhang Jiawu, Wang Lin, et al. Recent human impacts on sedimentary record: A case from Lake Toson.

- Quaternary sciences, 2016, 36(6): 1456-1465. [付霞, 张家武, 王林, 等. 近期人类活动对湖泊沉积记录的影响: 以托素湖为例. 第四纪研究, 2016, 36(6): 1456-1465.]
- [18] Zhao Keliang, Li Xiaoqiang, Zhou Xinying, et al. Characteristics of agricultural activities and its impact on the environment at Xintala site, Xinjiang, reconstructed from archaeological plant remains. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(2): 219-225. [赵克良, 李小明, 周新郢, 等. 新疆新塔拉遗址农业活动特征及其影响的植物指标记录. 第四纪研究, 2012, 32(2): 219-225.]
- [19] Sun Meiping, Liu Shiyin, Yao Xiaojun, et al. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half century: Based on the revised First and Second Chinese Glacier Inventory. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1402-1414. [孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 近 50 年来祁连山冰川变化: 基于中国第一、二次冰川编目数据. 地理学报, 2015, 70(9): 1402-1414.]
- [20] Li Y, Zhang C Q, Wang N A, et al. Substantial inorganic carbon sink in closed drainage basins globally. *Nature Geoscience*, 2017, 10(7): 501-506.
- [21] Fu C F, An Z S, Qiang X K, et al. Origin of the yellow-brown earth sediment on the bottom of Yilangjian core from Lake Qinghai and its environmental implication. *Journal of Earth Environment*, 2011, 2(1): 312.
- [22] Derry L A, Kaufman A J, Jacobsen S B. Sedimentary cycling and environmental change in the Late Proterozoic: Evidence from stable and radiogenic isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(3): 1317-1329.
- [23] 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. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 203(1): 461-477.
- [24] Nowlan N V, Mitchell P I, Murray D A, et al. Measurement and interpretation of ^{210}Pb , ^{137}Cs , ^{134}Cs and ^{241}Am profiles in relation to sedimentation in some Irish Lakes. *SIL Proceedings*, 2017, 27: 2303-2306.
- [25] Stuiver M, Reimer P J, Reimer R W. CALIB 7.1. 2019. [WWWprogram] at <http://calib.org>, accessed 2019-11-11.
- [26] Li Yu, Wang Naiang, Li Zhuolun, et al. The relationship among organic geochemical indexes and their paleoenvironmental significance in the Zhuye Lake sediments. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 334-341. [李育, 王乃昂, 李卓仑, 等. 河西猪野泽沉积物有机地化指标之间的关系及古环境意义. 冰川冻土, 2011, 33(2): 334-341.]
- [27] Li Y, Wang N A, Cheng H Y, et al. Holocene environmental change in the marginal area of the Asian monsoon: A record from Zhuye Lake, NW China. *Boreas*, 2009, 38(2): 349-361.
- [28] Zhang C J, Chen F H, Shang H M, et al. The paleoenvironmental significance of organic carbon isotope in lacustrine sediments in the arid China: An example from sanjiaocheng palaeolake in Minqin. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(1): 88-94. [张成君, 陈发虎, 尚华明, 等. 中国西北干旱区湖泊沉积物中有机质碳同位素组成的环境意义: 以民勤盆地三角城古湖泊为例. 第四纪研究, 2004, 24(1): 88-94.]
- [29] Li Y, Wang N A, Li Z L, et al. Comprehensive analysis of lake sediments in Yanchi Lake of Hexi Corridor since the late glacial. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 7-11. [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. 地理学报, 2013, 68(7): 7-11.]
- [30] Li Z L, Wang N A, Cheng H Y, et al. Early-middle Holocene hydroclimate changes in the Asian monsoon margin of northwest China inferred from Huahai terminal lake records. *Journal of Paleolimnology*, 2016, 55(3): 289-302.
- [31] Wang N A, Li Z L, Li Y, et al. Millennial-scale environmental changes in the Asian monsoon margin during the Holocene, implicated by the lake evolution of Huahai Lake in the Hexi Corridor of northwest China. *Quaternary International*, 2013, 313: 100-109.
- [32] Li Xiaoqiang, Liu Hanbin, Zhao Keliang, et al. Holocene climate and environmental changes reconstructed from elemental geochemistry in the western Hexi Corridor. *Acta Anthropologica Sinica*, 2013, 32(1): 110-120. [李小明, 刘汉斌, 赵克良, 等. 河西走廊西部全新世气候环境变化的元素地球化学记录. 人类学学报, 2013, 32(1): 110-120.]
- [33] Herzschuh U, Tarasov P, Wünnemann B, et al. Holocene vegetation and climate of the Alashan Plateau, NW China, reconstructed from pollen data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 211(1-2): 1-17.
- [34] Liu Yuhang, Xia Dunsheng, Jin Ming, et al. Holocene environmental change recorded by core magnetic properties of Juyan Lake, northwestern China. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(4): 929-937. [刘宇航, 夏敦胜, 金明, 等. 阿拉善地区湖泊岩芯磁性特征记录的全新世环境变化. 中国沙漠, 2012, 32(4): 929-937.]
- [35] Zhao Liyuan, Lu Huayu, Zhang Enlou, et al. Lake-level and paleoenvironment variations in Yitang Lake (northwestern China) during the past 23 ka revealed by stable carbon isotopic composition of organic matter of lacustrine sediments.

- Quaternary Sciences, 2015, 35(1): 172-179. [赵丽媛, 鹿化煜, 张恩楼, 等. 敦煌伊塘湖沉积物有机碳同位素揭示的末次盛冰期以来湖面变化. 第四纪研究, 2015, 35(1): 172-179.]
- [36] Liu Song. Lacustrine sediment variations based on multi-proxy records and potential implications from Hala Lake, NW China [D]. Nanjing: Nanjing University, 2014. [柳嵩. 中国西北地区哈拉湖多指标记录揭示的湖泊沉积变化及其潜在含义[D]. 南京: 南京大学, 2014.]
- [37] Zhao L, Ma C M, Leipe C, et al. Holocene vegetation dynamics in response to climate change and human activities derived from pollen and charcoal records from southeastern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 485: 644-660.
- [38] Guo Xiaoyan. Holocene climate change documented by lake sediments from Lake Gahai in the monsoonal margin region, Northwest China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012. [郭小燕. 季风边缘区尕斯库勒湖记录的全新世气候变化[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.]
- [39] 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. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(3/4): 351-364.
- [40] Shen Ji, Liu Xingqi, Matsumoto R, et al. A high-resolution climatic change since the Late Glacial Age inferred from multiproxy of sediments in Qinghai Lake. *Science in China: Series D*, 2004, 34(6): 582-589. [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. 中国科学: D辑, 2004, 34(6): 582-589.]
- [41] Song L, Qiang M R, Lang L L, et al. Changes in palaeoproductivity of Genggahai Lake over the past 16 ka in the Gonghe Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(20): 2595-2605.
- [42] Opitz S, Wünnemann B, Aichner B, et al. Late glacial and Holocene development of Lake Donggi Cona, north-eastern Tibetan Plateau, inferred from sedimentological analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 337: 159-176.
- [43] Chen Zhong, Ma Haizhou, Cao Guangchao, et al. Climatic-environmental evolution in Gahai Lake area of Qaidam Basin since Late Last Deglacial Period. *Geochimica*, 2007, 36(6): 578-584. [陈忠, 马海州, 曹广超, 等. 柴达木盆地尕斯库勒湖冰消期晚期以来的气候环境演变. 地球化学, 2007, 36(6): 578-584.]
- [44] Zhang Jiawu, Wang Junlan, Guo Xiaoyan, et al. Paleoclimatic significance of oxygen isotope composition of carbonates from a sediment core at Bosten Lake, Xinjiang, China. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(6): 1078-1087. [张家武, 王君兰, 郭小燕, 等. 博斯腾湖全新世岩芯沉积物碳酸盐氧同位素气候意义. 第四纪研究, 2010, 30(6): 1078-1087.]
- [45] Yan D D, Wünnemann B. Late Quaternary water depth changes in Hala Lake, northeastern Tibetan Plateau, derived from ostracod assemblages and sediment properties in multiple sediment records. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 95: 95-114.
- [46] Liu K B, Yao Z J, Thompson L G. A pollen record of Holocene climatic changes from the Dundee ice cap, Qinghai-Tibetan Plateau. *Geology*, 1998, 26(2): 135-138.
- [47] Zhao Y, Yu Z C, Chen F H, et al. Holocene vegetation and climate history at Hurleg Lake in the Qaidam Basin, northwest China. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2007, 145(3/4): 275-288.
- [48] Hu Yu. Vegetation evolution and climatic change documented by Hala Lake sediments in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau since the Last Glacial Maximum [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. [胡玉. 青藏高原东北部哈拉湖地区末次盛冰期以来的植被演化和气候变化历史[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.]
- [49] Wang Y B, Herzschuh U, Shumilovskikh L S, et al. Quantitative reconstruction of precipitation changes on the NE Tibetan Plateau since the Last Glacial Maximum: Extending the concept of pollen source area to pollen-based climate reconstructions from large lakes. *Climate of The Past*, 2014, 10(1): 21-39.
- [50] Yu Y T, Yang T B, Li J J, et al. Millennial-scale Holocene climate variability in the NW China drylands and links to the tropical Pacific and the North Atlantic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 233(1/2): 149-162.
- [51] Liu X Q, Shen J, Wang S M, et al. A 16000-year pollen record of Qinghai Lake and its paleoclimate and paleoenvironment. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(22): 1931-1936.
- [52] Cheng B, Chen F H, Zhang J W. Palaeovegetational and palaeoenvironmental changes since the last deglacial in Gonghe Basin, northeast Tibetan Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(1): 136-146.
- [53] Herzschuh U, Tarasov P, Wünnemann B, et al. Holocene vegetation and climate of the Alashan Plateau, NW China, reconstructed from pollen data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 211(1/2): 1-17.
- [54] Wu Guangjian, Pan Baotian, Guan Qingyu, et al. Climatic changes in the north piedmont of eastern Qilian Mountains since 10 ka BP. *Journal of Desert Research*, 1998, 18(3): 193-200. [郭光剑, 潘保田, 管清玉, 等. 祁连山东段北麓近 10

- ka 来的气候变化初步研究. 中国沙漠, 1998, 18(3): 193-200.]
- [55] Chen F H, Cheng B, Zhao Y, et al. Holocene environmental change inferred from a high-resolution pollen record, Lake Zhuyeze, arid China. *The Holocene*, 2006, 16(5): 675-684.
- [56] Bowen R. *Isotopes and Climates*. New York: Elsevier Applied Science, 1991.
- [57] Stuiver M. Climate versus changes in ^{13}C content of the organic component of lake sediments during the Late Quaternary. *Quaternary Research*, 1975, 5(2): 251-262.
- [58] Krishnamurthy R, Bhattacharya S K, Kusumgar S. Palaeoclimatic changes deduced from $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and C/N ratios of Karewa Lake sediments, India. *Nature*, 1986, 323(6084): 150-152.
- [59] Chen Q M, Wang S Q, Yu G R. Spatial characteristics of soil organic carbon and nitrogen in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5): 699-704.
- [60] Zheng M P, Zhao Y Y, Liu J Y. Palaeoclimatic indicators of China's Quaternary saline lake sediments and hydrochemistry. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2000, 74(2): 259-265.
- [61] Li Zhuolun, Zhang Naimeng, Wang Naiang, et al. Lake evolution and its response to climate change during the late glacial: A record from the Huahai Lake in the Hexi Corridor of Northwest China. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(2): 342-348. [李卓仑, 张乃梦, 王乃昂, 等. 晚冰期以来河西走廊花海古湖泊演化过程及其对气候变化的响应. 中国沙漠, 2014, 34(2): 342-348.]
- [62] Marcott S A, Shakun J D, Clark P U, et al. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science*, 2013, 339(6124): 1198-1201.
- [63] Hou Guangliang, E Chongyi, Xiao Jingyi. Synthetical reconstruction of the precipitation series of the Qinghai-Tibet Plateau during the Holocene. *Progress in Geography*, 2012, 31(9): 1117-1123. [侯光良, 鄂崇毅, 肖景义. 青藏高原全新世降水序列的集成重建. 地理科学进展, 2012, 31(9): 1117-1123.]
- [64] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian Monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 2005, 308(5723): 854-857.
- [65] Li Y, Wang N A, Li Z L, et al. Holocene climate cycles in northwest margin of Asian monsoon. *Chinese Geographical Science*, 2012, 22(4): 450-461.
- [66] Li Y, Zhang C Q, Li P C, et al. Basin-wide sediment grain-size numerical analysis and paleo-climate interpretation in the Shiyang River drainage basin. *Geographical Analysis*, 2017, 49(3): 309-327.
- [67] Hou Guangliang, Wei Haicheng, E Chongyi, et al. Human activities and environmental change in Holocene in the northeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau: A case study of JXG2 relic site in Qinghai Lake. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(3): 380-388. [侯光良, 魏海成, 鄂崇毅, 等. 青藏高原东北缘全新世人类活动与环境变化: 以青海湖江西沟2号遗迹为例. 地理学报, 2013, 68(3): 380-388.]
- [68] Wen Penghui. Response of human activities to environmental changes in the Ordos Plateau during the Holocene [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021. [温鹏辉. 鄂尔多斯高原全新世人类活动对环境变迁的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.]
- [69] Yang L, Shi Z L, Zhang S J, et al. Climate change, geopolitics, and human settlements in the Hexi Corridor over the last 5000 years. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2020, 94(3): 612-623.
- [70] Chen J H, Lv F Y, Huang X Z, et al. A novel procedure for pollen-based quantitative paleoclimate reconstructions and its application in China. *Science China: Terra*, 2018, 48(1): 42-50. [陈建徽, 吕飞亚, 黄小忠, 等. 基于孢粉的古气候参数定量重建: 一种新思路及其在中国的应用实例. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(1): 42-50.]
- [71] Li Yiyin, Zhou Liping, Cui Haiting. Indicating human activities by pollen. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(9): 991-1002. [李宜垠, 周力平, 崔海亭. 人类活动的孢粉指示体. 科学通报, 2008, 53(9): 991-1002.]
- [72] Hannon G E, Bradshaw R H W. Impacts and timing of the first human settlement on vegetation of the Faroe Islands. *Quaternary Research*, 2000, 54(3): 404-413.
- [73] Zhang Longwu, Zhang Hucai, Chang Fengqin, et al. Spatial variation characteristics of sediment size and its environmental indication significance in Lake Yilong, Yunnan province. *Quaternary Sciences*, 2019, 39(5): 1159-1170. [张龙吴, 张虎才, 常凤琴, 等. 云南异龙湖沉积物粒度空间变化特征及其环境指示意义. 第四纪研究, 2019, 39(5): 1159-1170.]
- [74] Wu Jian, Shen Ji. Paleoclimate evolution since 27.7 ka BP reflected by grain size variation of a sediment core from Lake Xingkai, northeastern Asia. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(1): 110-118. [吴健, 沈吉. 兴凯湖沉积物粒度特征揭示的27.7 ka BP以来区域古气候演化. 湖泊科学, 2010, 22(1): 110-118.]

- [75] Wu Tingzhen, Guo Houan. Hexi Development History Research. Lanzhou: Gansu Education Press, 1996. [吴廷桢, 郭厚安. 河西开发史研究. 兰州: 甘肃教育出版社, 1996.]
- [76] Liu Q S, Roberts A P, Larrasoana J C, et al. Environmental magnetism: Principles and applications. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(4): RG4002. DOI: 10.1029/2012RG000393.
- [77] Evans M E, Heller F. *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics*. New York: Elsevier, 2003.
- [78] Wang C, Lu H Y, Zhang J P, et al. Prehistoric demographic fluctuations in China inferred from radiocarbon data and their linkage with climate change over the past 50,000 years. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 98: 45-59.
- [79] Zhu Shiguang, Wang Yuanlin, Hu Lingui. Study on climate variations in the region of Guanzhong in the historical period. *Quaternary Sciences*, 1998, 18(1): 1-11. [朱士光, 王元林, 呼林贵. 历史时期关中地区气候变化的初步研究. 第四纪研究, 1998, 18(1): 1-11.]
- [80] Hao Zhixin, Ge Quansheng, Zheng Jingyun. Temperature variations during the Song and Yuan dynasties (960-1368 AD) in the eastern part of Northwest China. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(5): 871-879. [郝志新, 葛全胜, 郑景云. 宋元时期中国西北东部的冷暖变化. 第四纪研究, 2009, 29(5): 871-879.]
- [81] Syvitski J P M, Kettner A. Sediment flux and the anthropocene. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2011, 369(1938): 957-975.
- [82] Garcin Y, Deschamps P, Menot G, et al. Early anthropogenic impact on western central African rainforests 2,600 yr ago. *PNAS*, 2018, 115(13): 3261-3266.
- [83] Tao Hui, Wang Jianhua, Chen huixian, et al. Characteristics of $\delta^{13}\text{C}$ and C/N in the Holocene organic material of borehole ZK19 in Lingdingyang Bay and the records of east Asian Monsoon variation. *Acta Scientia Rum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2019, 58(3): 1-12. [陶慧, 王建华, 陈慧娴, 等. 伶仃洋ZK19孔全新统有机物 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N值特征及东亚季风演变记录. 中山大学学报(自然科学版), 2019, 58(3): 1-12.]
- [84] Shi Q, Chen F H, Zhu Y, et al. Lake evolution of the terminal area of Shiyang River drainage in arid China since the Last Glaciation. *Quaternary International*, 2002, 93: 31-43.
- [85] Li Xiaoqiang, Liu Hanbin, Zhao Keliang, et al. Holocene climate and environmental changes reconstructed from elemental geochemistry in the western Hexi Corridor. *Acat Anthropologica Sinica*, 2013, 32(1): 110-120. [李小明, 刘汉斌, 赵克良, 等. 河西走廊西部全新世气候环境变化的元素地球化学记录. 人类学学报, 2013, 32(1): 110-120.]
- [86] Gansu Provincial Institute of Cultural Relics and Archaeology. *Prehistoric Archaeological Investigation Report of Hexi Corridor*. Beijing: Cultural Relics Press, 2011. [甘肃省文物考古研究所. 河西走廊史前考古调查报告. 北京: 文物出版社, 2011.]
- [87] Zhang Xiaoyan, Zhou Yali, Pang Jiangli, et al. The relationship between environmental changes and human activities during the medieval warm period and the little ice age in Otindag sandland by OSL dating. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(3): 535-546. [张小艳, 周亚利, 庞奖励, 等. 光释光测年揭示浑善达克沙地中世纪暖期和小冰期环境变迁与人类活动的关系. 第四纪研究, 2012, 32(3): 535-546.]
- [88] Zhang Can. Climate, human activities and their impact on lake ecology in the Loess Plateau during the Middle and Late Holocene: Taking Beilanchi of Liupan Mountain as an example [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. [张灿. 中晚全新世黄土高原地区气候、人类活动及其对湖泊生态的影响: 以六盘山北联池为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.]
- [89] Tian Lide, Yao Tandong. High-resolution climatic and environmental records from the Tibetan Plateau ice cores. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(9): 926-937. [田立德, 姚檀栋. 青藏高原冰芯高分辨率气候环境记录研究进展. 科学通报, 2016, 61(9): 926-937.]
- [90] Duan K Q, Thompson L G, Yao T D, et al. A 1000 year history of atmospheric sulfate concentrations in southern Asia as recorded by a Himalayan ice core. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(1): 155-170.
- [91] Li Zhen, Yao Tandong. Progress in the studies of heavy metals in snow and ice in polar ice sheets and alpine glaciers. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 322-330. [李真, 姚檀栋. 极地和山地冰川雪冰中重金属的研究进展. 冰川冻土, 2002, 24(3): 322-330.]
- [92] Xu B Q, Cao J J, Hansen J, et al. Black soot and the survival of Tibetan glaciers. *PNAS*, 2009, 106(52): 22114-22118.
- [93] Blarquez O, Ali A A, Girardin M P, et al. Regional paleofire regimes affected by non-uniform climate, vegetation and human drivers. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 13356. DOI: 10.1038/srep13356.
- [94] Niklasson M, Zin E, Zielonka T, et al. A 350-year tree-ring fire record from Białowieża Primeval Forest, Poland:

- Implications for Central European lowland fire history. *Journal of Ecology*, 2010, 98(6): 1319-1329.
- [95] Sakai A, Inoue M, Fujita K, et al. Variations in discharge from the Qilian Mountains, Northwest China, and its effect on the agricultural communities of the Heihe Basin, over the last two millennia. *Water History*, 2012, 4(2): 177-196.
- [96] Li Xiaoli, Zhang Chengjun, Yang Qili, et al. Climatic variations and human activities in Lujiagou, Dingxi region over the past 11200 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(11): 88-93. [李晓丽, 张成君, 杨奇丽, 等. 定西鲁家沟全新世以来的气候变迁及人地关系演化研究. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(11): 88-93.]
- [97] Fontana L, Sun M J, Huang X Z, et al. The impact of climate change and human activity on the ecological status of Bosten Lake, NW China, revealed by a diatom record for the last 2000 years. *The Holocene*, 2019, 29(12): 1871-1884.
- [98] Wang Naiang, Cheng Hongyi, Li Yu. The Shiyang River and the Lower Heihe Lake change: Impacts of climate change and human activities. *Abstracts of Academic Papers for the Centennial Celebration of the Chinese Geographical Society*, 2009: 124. [王乃昂, 程弘毅, 李育. 石羊河与黑河下游湖泊变迁: 气候变化和人类活动的影响. *中国地理学会百年庆典学术论文摘要集*, 2009: 124.]
- [99] Zhang D, Zhang Q, Qiu J M, et al. Intensification of hydrological drought due to human activity in the middle reaches of the Yangtze River, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 637/638: 1432-1442.
- [100] Dong Guanghui, Qiu Menghan, Li Ruoyu, et al. Using the Fulcrum Cognitive Model to explore the mechanism of past human-land co-evolution. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(1): 15-29. [董广辉, 仇梦晗, 李若, 等. 探讨过去人地关系演变机制的“支点”概念模型. *地理学报*, 2021, 76(1): 15-29.]
- [101] Zhao H F, Lin Y H, Delang C O, et al. Contribution of soil erosion to the evolution of the plateau-plain-delta system in the Yellow River basin over the past 10000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 601: 111133. DOI: 10.1016/j.palaeo.2022.111133.
- [102] Hillman A L, Yao A, Abbott M B, et al. Two millennia of anthropogenic landscape modification and nutrient loading at Dian Lake, Yunnan province, China. *The Holocene*, 2019, 29(3): 505-517.
- [103] Hippe K, Jansen J D, Skov D S, et al. Cosmogenic in situ ^{14}C - ^{10}Be reveals abrupt Late Holocene soil loss in the Andean Altiplano. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 2546. DOI: 10.1038/s41467-021-22825-6.

Study on lake sediments and human activities in closed basins around the Qilian Mountains

GAO Mingjun¹, LI Yu^{1,2}, ZHANG Zhansen¹, ZHOU Xueru¹,

LI Haiye¹, DUAN Junjie¹, XUE Yaxin¹

(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education),

Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The process and mechanism of coupling between human activities and Holocene environmental change has become a research hotspot in the field of earth sciences. Lake sediments store rich environmental information, which can help to reconstruct past climate changes. Up to now, most of the studies on the palaeoenvironmental proxies indicating human activities have focused on single lakes, and there is a lack of comprehensive studies at a regional scale. Furthermore, relatively few studies focus on the identification of regional human activities through the paleoenvironmental proxies, partly due to the uncertainty of their indicative significance. In this paper, we analyzed the lithology, ages, and palaeoenvironmental proxy data from 14 closed-basin lakes around the Qilian Mountains, reconstructed the Holocene climate change, and explored the coupling relationship between climate change and human activities. The results are as follows: the organic matter in the terminal lakes in the Qilian Mountains and the surroundings is mostly from the mixed sources of aquatic and terrestrial plants; it was warm and humid during the early and middle Holocene around the Qilian Mountains, then it has experienced significant regional aridification since the late Holocene; the changes of sedimentary facies are consistent with proxies, which have different significance in various sediments. The changes of lake sedimentary facies have been affected by human activities since 2.0 cal ka BP, and human activities have dominated the regional environmental changes since 1800 AD.

Keywords: Qilian Mountains; closed basins; lake sediments; paleoenvironmental proxies; human activities