第36卷 第7期
2021年7月

地球科学进展
ADVANCES IN EARTH SCIENCE

Vol. 36 No. 7
Jul.，2021

柯思茵，张冬丽，王伟涛，等. 青藏高原东北缘晚更新世以来环境变化研究进展[J]. 地球科学进展，2021，36(7)：727-739. DOI：10.11867/j.issn.1001-8166.2021.056.[KE Siyin，ZHANG Dongli，WANG Weitao，et al. Progress of environmental change in the Northeastern Tibetan Plateau since Late Pleistocene[J]. Advances in Earth Science，2021，36(7)：727-739. DOI：10.11867/j.issn.1001-8166.2021.056.]

青藏高原东北缘晚更新世以来环境变化研究进展*

柯思茵，张冬丽，王伟涛*，王孟豪，段 磊，杨敬钧，孙 鑫，郑文俊
（1.中山大学地球科学与工程学院 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室，广东 广州 510275；
2.南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)，广东 珠海 519082；3.中国地震局地质研究所 地震动力学国家重点实验室，北京 100029）

摘 要：青藏高原东北缘作为响应东亚季风边缘区环境变化的理想场所，其丰富的沉积记录可反映详细的环境变化过程。重点对近30年来青藏高原东北缘沉积与环境演化研究中的年代学、环境代用指标、环境演化过程及区域一致性等方面的主要研究进展进行总结。青藏高原东北缘环境研究中粒度、磁化率、碳酸盐含量和以总有机碳、常微量元素为主的地球化学指标是最常用的研究手段；综合区域晚更新世以来沉积环境研究结果，将高原东北缘环境演化过程分成5个阶段，即在东亚季风和西风环流的共同影响下经历了温暖湿润—寒冷干燥—温暖偏湿—偏冷干燥转温凉偏湿—相对温湿转相对冷干的发展阶段；而青藏高原东北缘气候记录与亚洲区域及全球记录对比结果显示具有区域性，其主要因素可能是北半球太阳辐射变化的驱动所导致的高纬度温度和冰量变化以及北大西洋温盐环流的影响；青藏高原东北缘晚更新世可能存在两期大范围的高湖面，分别在MIS 3和MIS 5阶段，其时间的差异显示从高原内部向东北方向高湖面出现的时间逐渐变年轻，可能反映了高原东北缘构造与环境变化的响应。综合认为，未来青藏高原东北缘环境研究重点可从高分辨率沉积序列的建立、高湖面时间的确立以及更精确的环境代用指标应用等方面进一步深入研究，以期获得更高分辨的环境变化信息。

关 键 词：沉积序列；环境变化；气候波动；晚更新世；青藏高原东北缘
中图分类号：P534.63 **文献标志码**：A **文章编号**：1001-8166(2021)07-0727-13

1 引 言

青藏高原的第四纪环境变化一直是人们十分关注的科学问题，而青藏高原东北缘作为东部季风区、西北内陆干旱区与青藏高原高寒区三大自然地理区的交界位置，也是亚洲夏季风与西风带交汇的地区，对于区域以及全球气候变化响应十分敏感[1,2]。晚更新世以来，全球气候显著波动，在北大西洋深海沉积物和格陵兰冰芯中发现了一系列快速气候事件，包括DO旋回(Dansgaard-Oeschger)、Heinrich事件、YD事件(Younger Dryas)和BA暖期(Bolling-Allerod)等[3~6]。这些气候突变事件在青藏高原古里雅冰芯中能被识别出来，且冰芯记录的温

收稿日期：2021-04-09；**修回日期**：2021-05-24.
* **基金项目**：第二次青藏高原综合科学考察研究项目“活动断裂与地震灾害”(编号：2019QZKK0901)；国家自然科学基金项目“基于三维构造模型的滨海断裂带地震危险性评价和震害情景预测”(编号：41774049)资助.
作者简介：柯思茵(1996-)，女，广东茂名人，硕士研究生，主要从事第四纪沉积与环境研究. **E-mail**：kesy3@mail2.sysu.edu.cn
* **通信作者**：王伟涛(1979-)，男，陕西西安人，教授，主要从事新生代构造变形与演化研究. **E-mail**：wangweitao@mail.sysu.edu.cn

度变化更为剧烈[7]，因此青藏高原东北缘地区也就成为研究东亚季风边缘区晚更新世以来气候和环境变化的理想场所。

青藏高原东北缘晚新生代以来活跃的构造运动形成了呈北西—东南走向且基本平行展布的盆—山耦合地貌格局[8]，新生代盆地众多，包括柴达木盆地、共和盆地、青海湖盆地、陇中盆地和宁夏南部盆地等（图 1），这些盆地内部分布了广泛的第四系沉积物，主要由古风成砂、黄土—古土壤以及河湖相沉积等组成，可为青藏高原东北缘的研究提供丰富而详细的气候变化记录。目前利用青藏高原东北缘沉积物对沙漠进退、植被变化、湖泊水位变化、河道演化、季风变化模式及机制等方面进行了诸多研究[16,30,37,38]，然而由于气候指标的可靠性、沉积序列的分辨率、沉积记录的完整性等问题，至今对该地区沉积记录反映的气候变化特征仍缺少较为系统完整的认识。本文旨在对前人在青藏高原东北缘沉积与环境演化的研究进行总结，梳理了青藏高原东北缘气候变化的研究进展，在此基础上总结讨论了可能存在的问题并对未来的研究内容和方法等方面进行展望。

2 青藏高原东北缘晚更新世以来沉积记录及年代

晚更新世以来青藏高原东北缘以风成沉积和河湖相沉积为主，其中黄土主要围绕黄河源和长江源风沙区东部外围分布，包括青海湖盆地、共和盆地、门源盆地东部、西宁—民和盆地、湟源盆地和循化盆地等地，堆积厚度可超过 100 m，颗粒粗而疏松，次生黄土厚积，晚更新世马兰黄土和全新世黄土分布广泛，主要沉积于河流一、二级阶地冲积砾石、砂黏土之上或超覆于离世黄土之上；风成砂则主要集中在共和盆地、青海湖东西两侧的湖岸、柴达木盆地中东部及其西南缘的山前、河流阶地和干涸滩地区；而在湖泊地区除了现代积水湖盆外，大部分湖盆自第四纪以来都有连续湖相沉积，集中在了青海湖、柴达木盆地各盐湖以及共和盆地内部的古湖（更尕海、达连海等），此外在黄河源地区也沉积较厚的河湖相沉积物。

目前青藏高原东北缘的沉积物测年手段以 ^{14}C、TL 和 OSL 方法为主，其中 ^{14}C 测年结果可利用黄土沉积中古土壤的有机质获得，如陇西黄土顶部 ^{14}C 年龄（8.55±0.131）ka BP[9]；贵德盆地利用古土壤 ^{14}C 年龄建立了 10 ka BP 以来的年代序列[2]；由于风成砂沉积区多发育弱古土壤，同样可通过 ^{14}C 测年确定年代框架。而 ^{14}C 测年更多用于湖相沉积中，如达连海、更尕海、尕海和青海湖均利用植物残体的 AMS ^{14}C 测量建立 11~15 cal ka BP 以来各湖泊全新世的年代序列[17,39~41]。因湖泊中的植物残体多为水生植物，湖泊不同的沉积层位不可避免地存在“碳库效应”，可通过不同方法扣除碳库效应的影响，如茶卡盐湖利用全新世开始年龄与国内全新世开始期（^{14}C 年龄为 10 ka BP）之差作为碳库效应[42]；青海湖利用 ^{14}C 测年建立线性回归方程，推算得到碳库效应为 1 039 a[43]；更尕海则利用表层沉积 ^{14}C 年龄作为碳库效应[17]。通过碳库校正和树轮日历校正能够获得较为可靠的 ^{14}C 校正年龄。释光测年包括了 TL 和 OSL 两种方法，在早期多使用 TL 测年来确定黄土剖面的底界年龄，如合作盆地黄土剖面底界年龄在（152±12）ka BP[10]，陇西盆地黄土底部 S1 的年龄为（130.73±0.196）ka BP[9]，但是其绝对年龄存在较大误差。目前以石英、钾长石为对象的 OSL 测年能更好地反映沉积物的真实年龄，测年范围相对 ^{14}C 法范围更广，因而被广泛应用在风成沉积和湖泊沉积中。在湟水阶地之上的黄土运用粗颗粒石英 OSL 测年建立了 30 ka BP 以来的年代框架，年龄在地层序列中有较好的对应[18]；青海湖地区的黄土利用石英颗粒 OSL 测年得到的年龄与其他研究可相互验证[44]；共和盆地利用 OSL 测年结果确定了风成砂最早沉积的时间为（17.7±0.8）ka BP，意味着末次盛冰期以来风沙活动活跃[45]。

因此，青藏高原东北缘地区对古土壤和湖泊沉积可用 ^{14}C 法特别是 AMS ^{14}C 获得较为可信的年代框架，但是要注意去除碳库效应的影响，并将未经校正 ^{14}C 年龄进行树轮校正形成统一的日历年龄模式，而风成沉积可通过石英或钾长石 OSL 测年建立较为可靠的年代序列。

3 青藏高原东北缘环境变化研究中代用指标选择的发展进程

迄今为止，青藏高原东北缘对黄土、风成砂、湖泊沉积以及河湖相沉积等多采用多维度的环境指标来进行综合分析，有效避免了单个指标无法准确反映古气候状况的情况。从 20 世纪 80 年代起，粒度、磁化率、孢粉、碳酸盐含量、总有机碳和常微量元素等已成为了常用指标，用于开展多个典型区域的环境变化研究（图 2），进而综合反演青藏高原东北缘的古环境演变过程。

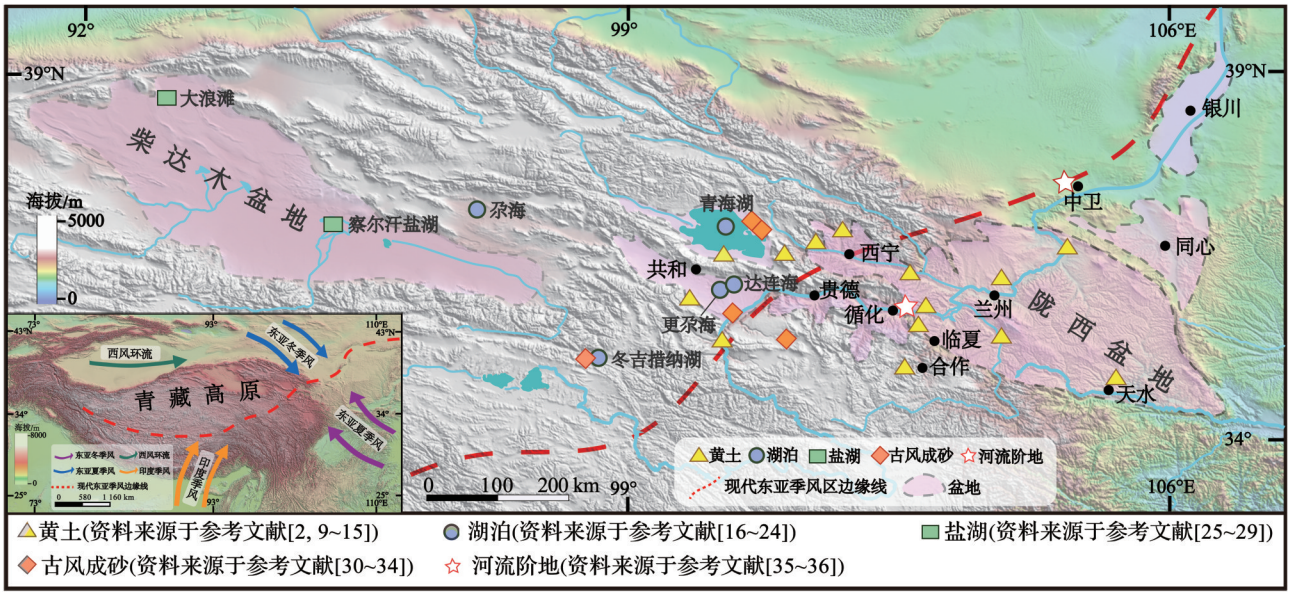


图 1　青藏高原东北缘地质概况及沉积示意图

Fig. 1　The map of geology and sedimentation in the NE Tibetan Plateau

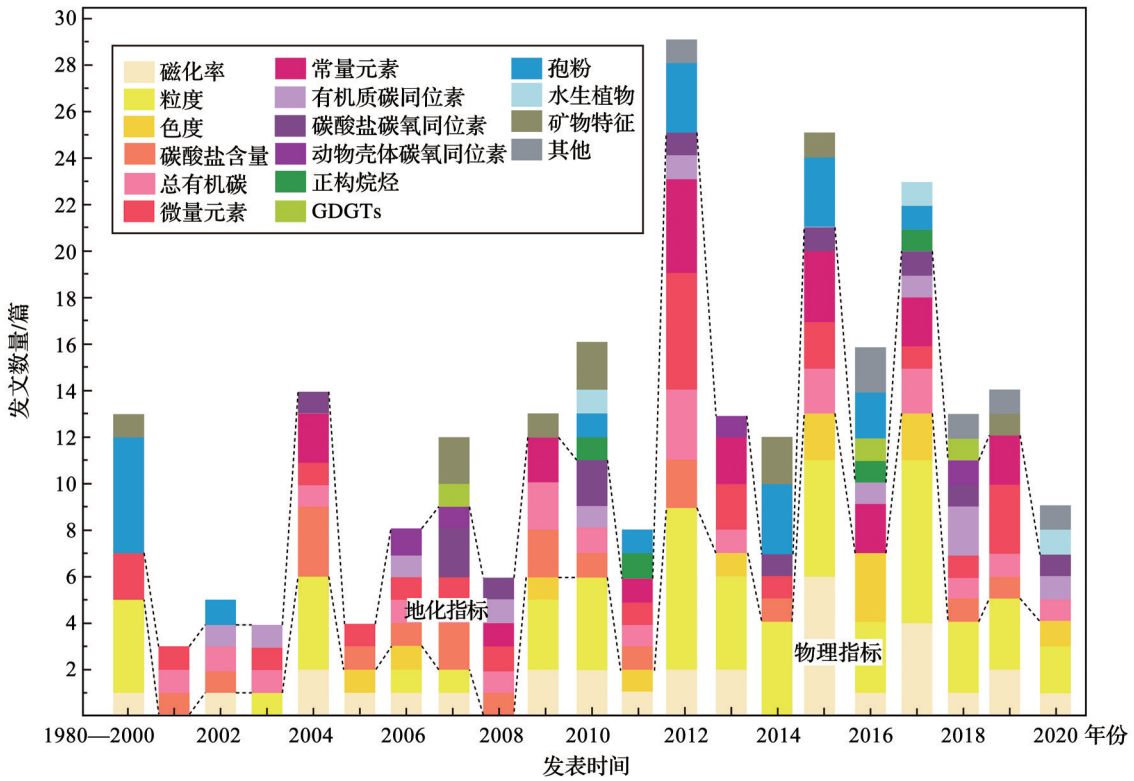


图 2　青藏高原东北缘环境代用指标研究进展和发展历程

Fig. 2　The process of environmental proxies in NE Tibetan Plateau

由于各种代用指标自身的适用范围及其局限性,不同的环境指标在解释各种沉积环境时具有多解性。粒度和磁化率是古环境研究中最常用的指标,其中粒度指标中常用不同的组分含量百分比来反映气候意义。合作盆地和西宁盆地黄土大于 40 μm 的粗粒含量可反映高原冬季风变化[10,11];共和—贵德盆地利用粗颗粒含量来反映风力强度和粉尘搬运距离[2];陇西盆地和循化盆地则用中值粒径来反映高原冬季风强弱和风力强度以及搬运距离[9,36];而在达连海和察尔汗盐湖等湖泊地区,通过

不同的粒径含量来研究湖泊动力条件和水量变化进而指示季风活动强度[46~49]；更尕海大于63 μm的粗颗粒含量用于指示风尘活动[17]；甚至在青海湖研究中用大于25 μm的颗粒含量来衡量西风环流的进退[19]。由此可以看出，不同的粒径含量都具有一定的沉积环境指示意义，但因沉积过程复杂多样，无法区分不同的物源和动力条件，因而可对粒度频率曲线进行函数拟合或计算粒级—标准偏差获得敏感粒级组分来指示东亚季风变化，该方法成功应用在古风成砂沉积区如共和盆地、柴达木盆地东部和青海湖盆等地，重建了沙地演化过程[30,31,50~52]。

而磁化率作为黄土高原夏季风的经典替代指标，在青藏高原东北缘的研究中常与粒度结合使用来共同反映夏季风强度变化和环境演化模式[2,9,13]，且频率磁化率在一定程度上反映成壤强度，目前在湟水阶地利用黄土频率磁化率来重建全新世的湿度变化[14]。然而磁化率在湖泊沉积中受到多种因素影响，其变化机制较为复杂，与湖盆物质的磁性特征、土壤侵蚀程度、湖泊沉积物中磁性矿物的富集程度以及湖内沉积物自生磁性物质等都存在密切的相关关系[53]，仅在察尔汗盐湖有初步研究，指示了湖泊水体的氧化还原环境[49]。因此在解释湖泊磁化率指标时应考虑多方面的影响因素。

从21世纪初开始，元素地球化学也被广泛运用在青藏高原东北缘的古环境研究中，包括总有机碳、碳酸盐含量、碳氧同位素和常微量元素等，其中在共和盆地、察尔汗盐湖和尕海、冬吉措纳湖以及达连海等地，利用常微量元素的淋溶迁移和富集程度来反映化学风化成壤程度[25,32,35,54~57]；碳酸盐碳氧同位素和有机质碳同位素也用于指示青海湖、更尕海、达连海和察尔汗盐湖等湖泊流域生产力以及降水和气温重建[21,26,46,58]。但是地球化学稳定同位素与气候指标间的定量转换关系仍需不断探索。目前的研究认为，孢粉和水生植物记录是一种可靠而准确的手段，可以从更加直观的角度来反映环境演替，已在柴达木盆地、更尕海和达连海利用蒿属/藜科值重建了区域植被变化历史[28,37,47,59]。不过由于孢粉的易扩散性以及孢粉组合的复杂性，在反演古植被时应结合高原隆升的特点更加仔细地分析孢粉来源。随着测试和观测技术的不断发展，近年来出现了新的古环境研究手段——生物标志化合物[甘油二烷基甘油四醚类化合物(Glycerol dialkyl glycerol tetraethers，GDGTs)和正构烷烃]，利用TEX_{86}(Tetraether index of tetraethers consisting of 86 carbon atoms)和ACE (Archaeol and Caldarchaeol Ecometric)指标可从更微观的有机分子角度来重建湖泊古温度盐度等[16,23]，在青海湖对钻孔1.8万年以来的古菌醚脂分布分析获得了早全新世湖面较低且盐度较高，中全新世湖面波动上升，晚全新世湖面相对较高而盐度较低的结果[60]。然而各研究结果还多关注在地球化学的表面现象和经验方程上，而且很多指标都具有一定的局限性，在使用该指标时需慎重[61]。

综合以上的研究成果，青藏高原东北缘环境演化研究中以粒度和磁化率为代表的物理指标和以碳酸盐含量、总有机碳、常微量元素为主的地球化学指标仍是一直沿用的研究手段；色度和同位素地球化学方法则根据不同的研究区沉积物有选择地使用；而近年出现的生物标志化合物，不仅发展了新的技术替代指标，并成为未来可能潜在的环境重建工具。

4 青藏高原东北缘气候变化特征

根据目前青藏高原东北缘环境变化方面已有的研究进展和成果，通过对比粒度、磁化率、孢粉和碳氧同位素等不同代用指标所揭示的环境变化信息，可以将青藏高原东北缘晚更新世以来的环境演化过程分成以下5个阶段(图3)：

(1)阶段I(130~70 ka BP)：在末次间冰期时期，青藏高原东北缘整体处于比较温暖湿润的环境，该时段沉积中普遍发育古土壤[63]。通过对比青海湖东侧和陇西盆地的黄土粒度和磁化率的结果可以看出[图3(a)和(b)]，在120 ka BP前后(MIS 5a阶段内)青海湖黄土粒度达到较低值而陇西盆地黄土频率磁化率处于较高值，此时柴达木盆地盐湖碳酸盐氧同位素值升高，指示了该阶段东亚夏季风较强，使得青藏高原东北缘降水多、湿度大[58]；而在117~109 ka BP(MIS 5b)阶段粒径不断变粗，磁化率值处于低值，同时柴达木盆地以云杉、冷杉和松这几种喜冷湿的寒温性针叶林占优势[64]，这均表明高原东北缘整体处于寒冷的环境；到了109~97 ka BP(MIS 5c阶段)，陇西盆地的黄土频率磁化率处于高值状态，且青海湖黄土粒径在约105 ka BP达到最低值，此时循化盆地发育阔叶乔木[36]，这意味着整体环境逐渐好转，但是青海湖在105 ka BP以后粒度逐渐增加，并在接近90 ka BP达到最高值，而陇西黄土的频率磁化率值早已处于峰值状态，这可能是由于青海湖地区与季风区的距离比陇西盆地更远，受到东亚夏季风的影响略滞后，因而更具有气候区域性；

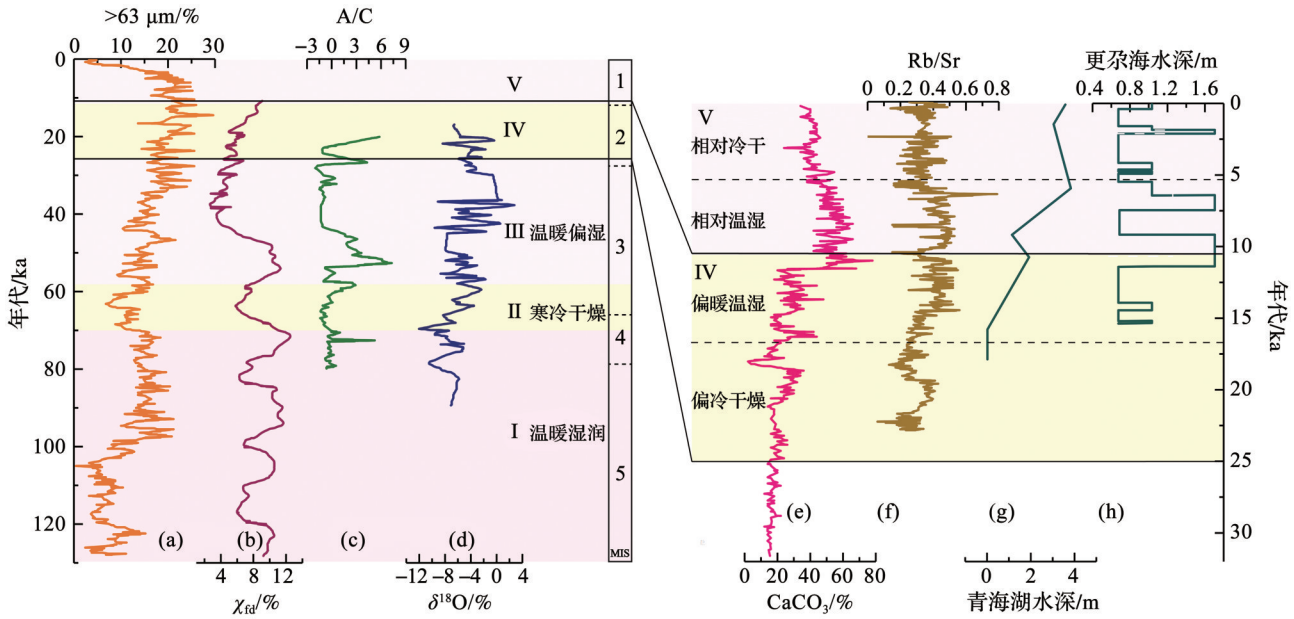


图3　青藏高原东北缘晚更新世以来各气候阶段划分

Fig. 3　The climatic stages since late Pleistocene in the NE Tibetan Plateau

(a)湟水阶地黄土粒径大于63 μm的含量[14];(b)陇西盆地黄土频率磁化率[9];(c)柴达木盆地孢粉蒿属和藜科比值(A/C)[28];(d)察尔汗盐湖碳酸盐氧同位素[26];(e)青海湖碳酸盐含量[19];(f)达连海Rb/Sr值[24];(g)青海湖水深变化[62];(h)更尕海水深变化[22]

(a) Content of loess particle size larger than 63 μm in Huangshui terrace[14]; (b) Frequency magnetic susceptibility of loess in Longxi Basin[9]; (c) Artimisia/Chenopodiaceae(A/C) ratio of pollen of Qaidam Basin[28]; (d) Carbonate oxygen isotope of Qarhan Salt Lake[26]; (e) Qinghai Lake carbonate content[19]; (f) Rb/Sr ratio of Dalian Lake[24]; (g) Water depth of Qinghai Lake[62]; (h) Water depth of Gengga Lake[22]

而85~70 ka BP(末次间冰期晚期),黄土的粗颗粒含量缓慢减少而磁化率相应增加,成壤强度增强,临夏盆地的伊/蒙混层黏土矿物含量升高、西宁盆地黄土粗粒含量减少以及察尔汗盐湖生长在温带草原的蒿属花粉含量增加都揭示了气候转暖,湖泊水位升高[11,15,28,65]。因此青藏高原东北缘末次间冰期气候普遍暖湿,但存在气候明显波动。

(2)阶段II(70~59 ka BP):到了末次冰期初期,青藏高原东北缘急剧变冷变干,原本的河道沉积转为了厚度较大的次生黄土沉积[36]。从察尔汗盐湖碳酸盐δ^{18}O组成明显变重可表明,该地区具有强烈的蒸发作用而降水较少[26](图3d)。与此同时,不仅湖泊退却出现了砾石层[48],合作盆地黄土粒径也远大于黄土高原中西部,存在2次明显的粒度变粗事件[10],而陇西盆地和湟水阶地上的黄土磁化率也迅速减小,总有机碳含量很低[9,14]。寒冷的气候条件不适宜植被生长,各地区孢粉浓度降低,云杉和松等针叶林逐步萎缩退回到附近高山中,而麻黄属和蒿属花粉不同程度增加,整体植被为荒漠草原—草原类型,而且草原退缩,荒漠化加剧[27,28]。以上说明了在70~59 ka BP青藏高原东北缘气候变得冷干,降水减少,冬季风强度增强。

(3)阶段III(59~26 ka BP):该阶段气候水热状况虽不及晚更新世早期,但总体处于温暖偏湿的环境,是一个较为特殊的暖期[7]。该阶段可以分3个亚阶段:第一亚阶段(59~47 ka BP)黄土频率磁化率值最高,此时蒿属和藜科比值(A/C)也处于最高值[图3(b)和(c)],这意味着水热组合处于最佳状况,使得草原面积扩大[36]。在一些高山地区甚至出现了落叶阔叶树种栎生长,形成一种针阔叶混交林的植被景观[66]。第二亚阶段(47~40 ka BP)比上一阶段变得冷干,此时粗颗粒含量在45 ka BP出现峰值,而磁化率值不断降低,蒿属和藜科比值也逐渐降至最低值,碳酸盐氧同位素值升高[图3(a)~(d)],这均表明此时水热条件变差,气候变冷,可能受到冬季风的影响。第三亚阶段(40~26 ka BP)不同湖泊都出现了高湖面,比如青海湖最高湖岸形成于38 ka BP左右,并在33.8~23.6 ka BP湖泊扩大、湖面上升,乔木和中生草本植物明显增加,反映了相对暖湿的环境[67];察尔汗盐湖也经历了湖泊扩张—萎缩—再扩张的过程[29]。甚至在临夏盆地通过黏土矿物伊/蒙混层峰值发现MIS 3早期比MIS 5更加温暖湿润[15],这一结果能与陇西盆地总有机碳含量高且$CaCO_3$淋溶淀积明显的情况相互印证[9]。因此青

藏高原东北缘当时的气候条件比现代更温湿，水热组合更优，虽然冬季风在中后期有明显增强，但夏季风势力总体强于冬季风，是一个显著的暖期，这可能是由于低纬地区太阳辐射增加导致夏季风影响下区域性降水增多[64]。

（4）阶段IV（26~11 ka BP）：当逐步过渡到全新世时存在一个强烈的气候振荡时期——末次盛冰期，然后进入了末次冰消期[68]。在末次盛冰期间，青藏高原东北缘经历了一场持续将近10 ka的寒冷干燥期，古风成砂和黄土的粒径都比较粗而碳酸钙含量较低，甚至在18 ka BP出现最低值[图3(e)]，此时青海湖和达连海处于浅水环境，而更尕海仍处于风沙环境[69]。末次盛冰期后气候逐渐变暖，青藏高原东北缘多数地区像共和盆地、青海湖沙地和柴达木盆地开始发育明显的风成砂—古土壤序列[30,33,34]。16~14 ka BP达连海Rb/Sr值开始剧增意味着化学风化强度增加[24][图3(f)]，降水开始增多，在湖盆周围当时夏季风较强盛，山地降水较多，森林扩张，盆地内蒸发强烈，发育着藜科、蒿属和禾本科等组成的荒漠化草原，从而变得温凉湿润[28]。因此总体而言，青藏高原东北缘在26~14 ka BP偏冷干燥，14 ka BP后变得偏暖温湿，湖泊水位升高。

（5）阶段V（11~0 ka BP）：在早全新世时期，盆地地区发育有古土壤层，碳酸钙的含量增加而黄土粒径大于63 μm含量减少，说明气候相对温湿，降水较多，总体上伴随着较强的夏季风和减弱的冬季风[30]。而中全新世8~6 ka BP是青藏高原东北缘的大暖期，青海湖和更尕海都显示该阶段的湖泊水位最高[图3(g)和(h)]，其他指标的变化趋势也都揭示了该时期温度升高，降水量增加，植被覆盖高，成壤强度与化学风化强度增加，具有区域一致性[19,39,50]。此后气候逐渐向冷干方向发展，虽然总体温度还未达到寒冷状态，但各地区乔木花粉含量下降，荒漠草原和高山草原的面积开始扩张；黄土粒径逐渐变粗，磁化率降低，降水减少[14,16,37]，此时东亚夏季风对此区域的影响减小。因而青藏高原东北缘从全新世以来逐渐向相对冷干方向发展。

综上青藏高原东北缘晚更新世以来沉积环境的研究结果，可以整体反映出该区域气候的演化经历了温暖湿润—寒冷干燥—温暖偏湿—偏冷干燥转偏暖温湿—相对温湿转相对冷干等多个阶段的波动，暖期夏季风强度大而冷期冬季风势力强，盆地内部植被以温带草原、草原和荒漠草原为主，高山地区则发育针叶林甚至针阔叶混交林，不同湖泊在晚更新世早期和中晚期都曾出现过高湖面。不过由于各气候指标具有不同的气候指示意义，也可能受到区域气候格局影响，气候曲线所揭示的环境信息并非能完全一一对应，因而在综合对比各气候指标时应多考虑每个指标指示意义之间的关系及是否存在区域性气候因素。

5 青藏高原东北缘环境变化的区域一致性

将晚更新世以来的青藏高原东北缘气候记录与全球记录进行对比，发现具有较好的一致性。首先是深海底栖有孔虫氧同位素曲线和古里雅冰芯氧同位曲线共同揭示了5个冷暖阶段的变化[图4(a)和(b)][3,7]。在青藏高原东北缘地区，湟水阶地和合作盆地黄土的粗粒含量变化和趋势与古里雅冰芯更相似，并发现同时存在格陵兰冰芯氧同位素揭示的Heirich冷事件、DO冷暖旋回及末次冰消期YD事件[图4(c)和(d)][5,10,14]。通常认为轨道尺度的冰期—间冰期气候突变是由北半球高纬度夏季太阳辐射变化引起的全球冰量变化所驱动[70,71]，而亚轨道尺度的气候突变除了太阳辐射的影响，陆地—海洋—大气系统过程的内部驱动也发挥着关键作用。将青藏高原东北缘的气候记录与北半球夏季高纬度太阳辐射曲线对比可以发现两者变化具有相对一致性，且太阳辐射升降变化提前于气候记录，这意味着太阳辐射驱动着青藏高原东北缘的气候变化。

将青藏高原东北缘的气候记录与黄土高原区黄土、中亚干旱区黄土和南方石笋记录对比可以明显看出晚更新世以来青藏高原东北缘与三者的气候波动部分相似[72~75][图4(c)~(g)]。由于黄土高原是东亚季风影响区，中亚地区则受西风环流的影响，从地理位置上看，青藏高原东北缘受到了东亚季风和中纬度西风环流的共同影响[19]（图1）。在末次间冰期期间，青藏高原东北缘的黄土粒度曲线与南方石笋氧同位素和黄土高原粒度曲线较为一致[图4(c)和(g)]，认为高原东北缘受到了东亚季风的控制，间冰阶时期夏季高纬太阳辐射增强，北半球高纬度冰盖逐渐消融，西风带逐渐北移，风力逐渐减弱，从而使东亚夏季风强度增强，同时大量极地冰川融水注入大西洋，浮冰碎屑减少，温盐环流加强，使得东亚季风强度增强，冰阶时期则导致东亚冬季风增强。在末次冰期期间，中期60~40 ka BP青藏高原东北缘黄土记录与黄土高原和石笋记录具有相似性[图4(c)、(d)、(g)]，而早期和晚期与中亚地区黄土

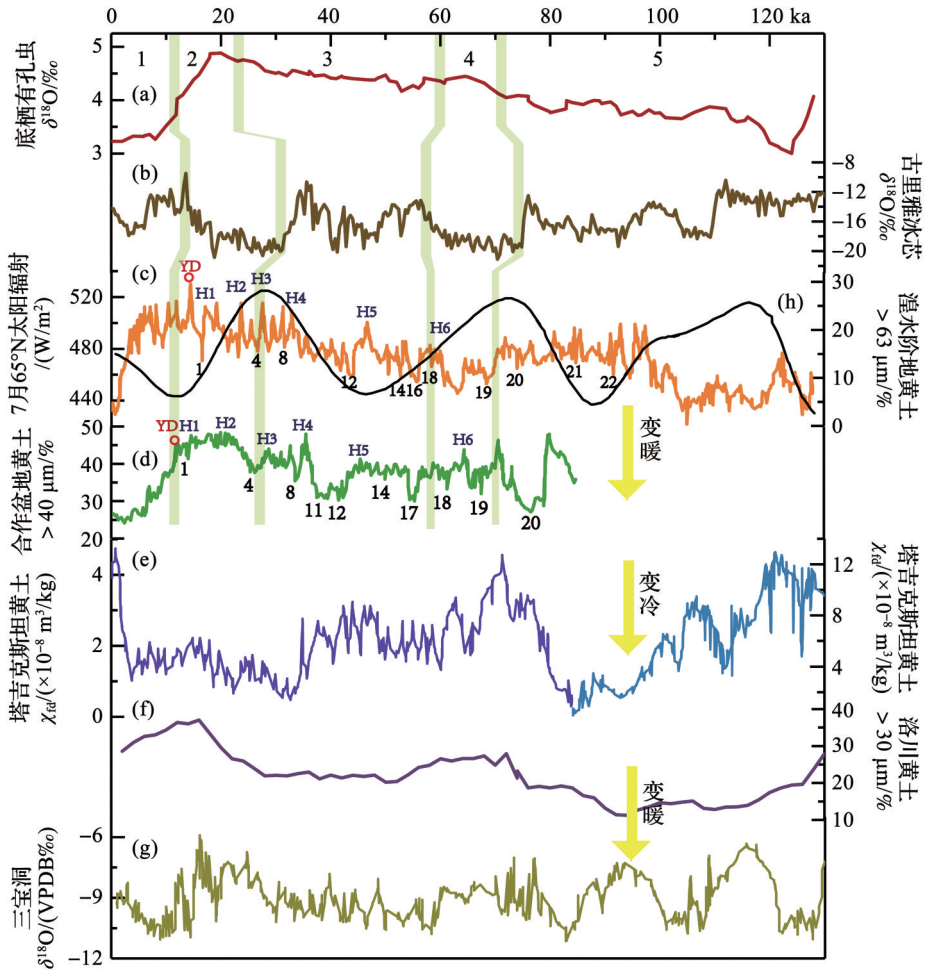


图 4　青藏高原东北缘气候记录与其他区域的对比

Fig. 4　Comparison between climate records in the NE Tibetan Plateau and other regions

(a)深海底栖有孔虫氧同位素[3];(b)古里雅冰芯氧同位素[7];(c)湟水阶地黄土粒径大于63 μm的含量变化[14];(d)合作盆地黄土粒径大于40 μm的含量变化[10];(e)塔吉克斯坦黄土频率磁化率[72];(f)洛川黄土粒径大于40 μm的含量变化[73];(g)三宝洞石笋氧同位素[74];(h)7月 65°N 太阳辐射[75]

(a) Oxygen isotope of deep sea foraminiferan[3]; (b) Oxygen isotope of Guliya ice core[7]; (c) Content of loess particle size larger than 63 μm in Huangshui terrace[14]; (d) Content of loess particle size larger than 40 μm in Hezuo Basin[10]; (e) Frequency magnetic susceptibility of Tajikistan loess[72]; (f) Content of loess particle size larger than 40 μm in Luochuan[73]; (g) Oxygen isotope of stalagmite of Sanbao Cave[74]; (h) 65°N solar radiation in July[75]

记录相似[图4(c)~(e)],说明在早晚期西风环流占主导地位,降水减少,中期则受到东亚季风的调控,气温升高,降水丰富。前人研究表明了中亚干旱区与东部季风区在全新世的干湿变化模式存在明显的错位相乃至反相位关系[76]。进入早全新世,北半球高纬太阳辐射增强,高纬度冰盖面积开始变小,但总体积仍很大,此时中纬度西风环流较强从而削弱了东亚夏季风强度。中全新世高原东北缘处于大暖期,此时东亚夏季风强劲,来自太平洋丰沛的水汽会被带到青藏高原东北部,削弱的西风增强了冷空气的入侵,冷暖气流相遇容易产生更丰富的降水,导致青藏高原东北部中全新世最为湿润。因此可以认为青藏高原东北部夏季降水的变化受东亚夏季风与中纬度西风环流相互作用的影响。晚全新世西风环流占主导地位[76~78],中纬度西风带的强度由中高纬度的热力差异决定,晚全新世期间北半球高纬地区的温度变化改变了高纬的冰盖面积,极地高压的强度也发生了变化,这进一步改变了西风带的位置,使西风带往南部移动,影响了青藏高原东北缘地区[77]。

总体而言,青藏高原东北缘气候记录具有区域性,末次间冰期与东部季风区气候变化较一致,末次冰期受到了东亚季风和西风环流的交替控制,早—中全新世受控于夏季风强度,而晚全新世主要受西风环流影响,其驱动机制可能是北半球太阳辐射

变化的驱动所导致的高纬度温度和冰量变化以及北大西洋温盐环流的影响。

青藏高原古里雅冰芯氧同位素记录显示了在深海氧同位素3阶段更为频繁的气候波动，MIS 3晚期（40~30 ka BP）温度极高，甚至高于现代温度，说明在青藏高原MIS 3阶段是一个较为特殊的暖期[7]。在该时期，青藏高原、腾格里沙漠和吉兰泰湖均出现了降水增多和湖泊扩张的现象，出现了高湖面，被称为“MIS 3大湖期”[79~82]。可是近年来对湖岸堤的OSL年代学研究将高湖面出现的时间倒推到MIS 5时期，班戈错、纳木错、尕海和青海湖等湖泊在晚更新世早期发育高湖面，甚至在MIS 3和MIS 5均出现过高湖面（图5）[83~86]。因此，在青藏高原东北缘是否存在2次大湖期且高湖面首次出现的时间是青藏高原东北缘环境研究的较大争议之处。综合前人研究的^{14}C、^{10}Be、OSL和U系等测年结果来看，青藏高原东北缘可能存在2次古大湖时期（MIS 3和MIS 5），在高原内部高湖面主要出现在MIS 5阶段，而高原东北缘及其北部以MIS 3阶段为主；从青藏高原内部向东北方向，高湖面出现的时间越来越年轻，可能反映了高原东北缘构造与环境变化的一个响应。不过最高水位出现的时间则仍有很大争议，这也意味着在青藏高原东北缘MIS 3时期的温暖湿润程度是否与末次间冰期相当仍需要更多的研究来证明，可以通过建立晚更新世以来更高分辨的沉积序列，运用多种可靠的测年手段综合比较等手段来解决目前存在的问题。

6 结语与展望

目前对于青藏高原东北缘的研究，主要利用黄土、湖泊沉积和风成砂等沉积物作为研究介质，运用各种环境代用指标来获得较为丰富的环境信息，综合各气候记录建立了青藏高原东北缘较为清晰的环境演化过程，包括气候冷暖干湿变化、植被演替和湖

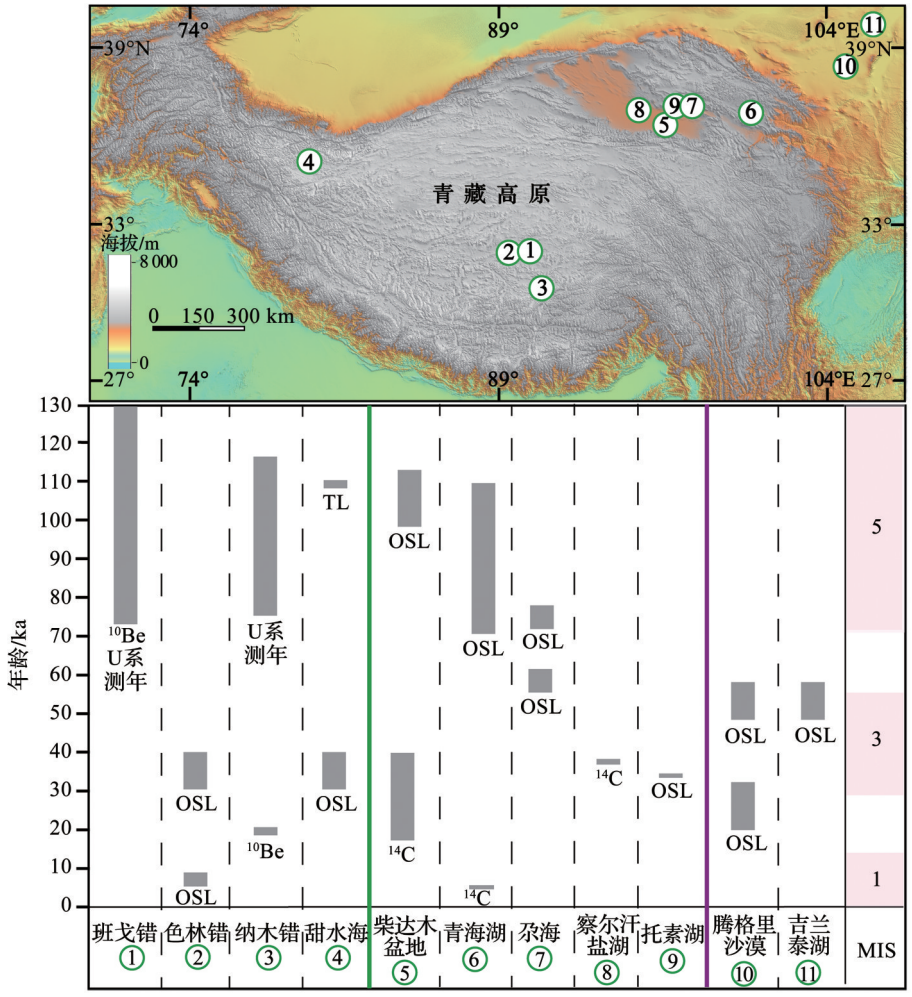


图5 青藏高原东北缘及其周围高湖面出现的时间

Fig. 5 Time of high lake level in NE Tibetan Plateau and its surrounding areas

泊水位变化,其气候变化具有全球和区域一致性。

但是由于缺乏长时间高分辨率的沉积序列,对于晚更新世青藏高原东北缘环境演化的研究不够深入,特别是气候驱动机制还未清楚。在运用不同气候替代性指标进行综合分析时,除了同位素具有全球可对比性,其他指标在一定程度上受到区域气候的影响,缺少较为系统的定量化特征,并且近年还未利用新的研究手段如生物标志化合物等来开展深入研究。另外,由于不同的年代手段可能得到不同的结果,且地貌演化作用较大地影响了真正的高湖岸堤地保留,因而关于晚更新世以来高湖面出现的时间存在较大的争议。

综上,要清楚地认识青藏高原东北缘的环境演化和气候更替及其动力机制,可能需要从以下几方面进行深入探究:建立长时间尺度高精度分辨率的沉积序列,发掘更详尽的气候记录;在解释不同的环境指标时注意其区域指代性,以定量化的方法揭示气候信息;将关注点放在晚更新世中晚期,即MIS 3阶段,在结合更精确的测年方法的基础上,运用最基础的沉积地质记录来回答高湖面时间之争。

参考文献(References):

[1] QIANG Mingrui, SONG Lei, CHEN Fahu, *et al*. A 16-ka lake-level record inferred from macrofossils in a sediment core from Genggahai Lake, northeastern Qinghai Tibetan Plateau (China)[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2013, 49(4):575-590.

[2] QIN Xiaoguang, YIN Zhiqiang, WANG Meihua, *et al*. Loess records of the Holocene climate change of Gonghe and Guide basins in the northeastern boundary of the Tibet Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(1):266-286.[秦小光,殷志强,汪美华,等. 青藏高原东北缘共和—贵德盆地全新世气候变化[J]. 地质学报,2017,91(1):266-286.]

[3] LISIECKI L E, RAYMO M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records[J]. *Paleoceanography*, 2005, 20(1). DOI:10.1029/2004PA001071.

[4] HEINRICH H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years[J]. *Quaternary Research*, 1988, 29(2):142-152.

[5] DANSGAARD W, JOHNSEN S J, CLAUSEN S B, *et al*. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record[J]. *Nature*, 1993, 364(6 434):218-220.

[6] BOND G, HEINRICH H, BROECKER W, *et al*. Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic Ocean during the Last Glacial Period[J]. *Nature*, 1992, 360(6 401):245-249.

[7] YAO Tandong, THOMPSON L G, SHI Yafeng, *et al*. Climate variation since the Last Interglaciation recorded in the Guliya ice core[J]. *Science in China* (*Series D*), 1997, 27:447-452.[姚檀栋,THOMPSON L G,施雅风,等.古里雅冰芯中末次冰期以来气候变化记录研究[J].中国科学:D辑,1997,27:447-452.]

[8] WANG Weitao, KIRBY E, ZHANG Peizhen, *et al*. Tertiary basin evolution along the northeastern margin of the Tibetan Plateau: evidence for basin formation during Oligocene transtension[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2013, 125(3/4):377-400.

[9] YANG Dong, JIAO Jinyu, TIAN Na, *et al*. Process of monsoon variations of the northeastern Qnghai-Xizang Pateau from the loess record of Longxi Basin since the Last Interglacial Epoch[J]. *Arid Land Geography*, 2008, 31(1):23-30.[杨东,焦金鱼,田娜,等.陇西黄土沉积记录反映的末次间冰期以来青藏高原东北部季风的演化过程[J].干旱区地理,2008,31(1):23-30.]

[10] LÜ Lianqing, FANG Xiaomin, LU Huayu, *et al*. Millennials-scale climate change since the Last Glaciation recorded by grain sizes of loess deposits on the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(11):1 157-1 164.[吕连清,方小敏,鹿化煜,等.青藏高原东北缘黄土粒度记录的末次冰期千年尺度气候变化[J].科学通报,2004,49(11):1 157-1 164.]

[11] LU Huayu, WANG Xiaoyong, MA Haihzou, *et al*. The plateau monsoon variation during the past 130 kyr revealed by loess deposit at northeast Qinghai Tibet (China)[J]. *Global and Planetary Change*, 2004, 41:207-214.

[12] RAO Zhiguo, CHEN Fahu, WANG Haibin, *et al*. Eastern Asian summer monsoon variation during MIS 5e as recorded by paleosoil S1 at Jiuzhoutai loess section[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(2):103-111.[饶志国,陈发虎,汪海斌,等.九州台古土壤S1记录的末次间冰期东亚夏季风变化[J].海洋地质与第四纪地质,2006,26(2):103-111.]

[13] YIN Zhiqiang, WEI Gang, QIN Xiaoguang, *et al*. Study on the loess record of the climate change since 26 ka B.P. from Xunhua to Guanting Basin in the northern boundary of the Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Science*, 2019, 39(5):1 181-1 190.[殷志强,魏刚,秦小光,等.青藏高原东北缘循化—官亭地区2.6万年以来气候变化研究[J].第四纪研究,2019,39(5):1 181-1 190.]

[14] LI Guoqiang, ZHANG Haixia, LIU Xiangjun, *et al*. Paleoclimatic changes and modulation of East Asian summer monsoon by high-latitude forcing over the last 130,000 years as revealed by independently dated loesspaleosol sequences on the NE Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020. DOI:10.1016/j.quascirev.2020.106283.

[15] YIN Ke, HONG Hanlie, GAO Wenpeng, *et al*. Clay mineralogical and geochemical records of paleoclimate in Linxia since the Last Interglacial[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(2):246-259.[殷科,洪汉烈,高文鹏,等.末次间冰期以来临夏地区气候变化的黏土矿物学及地球化学记录[J].土壤学报,2012,49(2):246-259.]

[16] WANG Huanye, DONG Hailiang, ZHANG Chuanlun, *et al*. Water depth affecting thaumarchaeol production in Lake Qinghai, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau: implications for paleo lake levels and paleoclimate[J]. *Chemical Geology*, 2014, 368:76-84.

[17] LANG Lili. Dust storm recorded by Lake Genggahai since 15 ka BP[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.[郎丽丽.

15 ka来更尕海湖泊沉积记录的尘暴事件[D].兰州:兰州大学,2010.]

[18] WANG Xianyan, YI Shuangwen, LU Huayu, *et al*. Aeolian process and climatic changes in loess records from the northeastern Tibetan Plateau: response to global temperature forcing since 30 ka[J]. *Paleoceanography*,2015, 30(6): 612-620.

[19] AN Zhisheng, COLMAN S M, ZHOU Weijian, *et al*. Interplay between the Westerlies and Asian monsoon recorded in Lake Qinghai sediments since 32 ka[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2:619.

[20] CHEN Zhong. Carbon and oxygen isotope record of climatic environmental evolution in the Gahai Lake, Delingha since Late Deglaciation[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2007.[陈忠.冰消期晚期以来德令哈尕海湖气候环境演变的碳、氧同位素记录[D].北京:中国科学院大学,2007.]

[21] 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[J]. *Science in China* (*Series D*), 2004, 34(6):582-589.[沈吉,刘兴起,MATSUMOTO Ryo,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,2004,34(6):582-589.]

[22] QIANG Mingrui, SONG Lei, JIN Yanxiang, *et al*. A 16ka oxygen-isotope record from Genggahai Lake on the northeastern Qinghai Tibetan Plateau: hydroclimatic evolution and changes in atmospheric circulation[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 162:72-87.

[23] SAINI J, GÜNTHER F, AICHNER B, *et al*. Climate variability in the past ~19, 000 yr in NE Tibetan Plateau inferred from biomarker and stable isotope records of Lake Donggi Cona[J]. *Quaternary Science Reviews*,2017,157:129-140.

[24] WU Duo, ZHOU Aifeng, ZHANG Jiawu, *et al*. Temperature-induced dry climate in basins in the northeastern Tibetan Plateau during the early to middle Holocene[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 237(8). DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106311.

[25] AN Fuyuan, MA Haizhou, WEI Haicheng, *et al*. Distinguishing aeolian signature from lacustrine sediments of the Qaidam Basin in northeastern Qinghai Tibetan Plateau and its palaeoclimatic implications[J]. *Aeolian Research*, 2012, 4:17-30.

[26] FAN Qishun, MA Haizhou, WEI Haicheng, *et al*. 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 Sciences*, 2014, 85:202-209.

[27] HOU Xianhua, ZHENG Mianping, YANG Zhenjing, *et al*. Sporo-pollen assemblage and palaeoenvironment since 130 ka BP in Dalangtan Lake of Qaidam Basin[J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(2): 243-251.[侯献华,郑绵平,杨振京,等.柴达木盆地大浪滩130 ka BP以来的孢粉组合与古气候[J].干旱区地理,2011,34(2):243-251.]

[28] WEI Haicheng, FAN Qishun, ZHAO Yan, *et al*. A 94-10ka pollen record of vegetation change in Qaidam Basin, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015,431:43-52.

[29] ZHANG Hucai, LEI Guoliang, CHANG Fengqin, *et al*. Age determination of shell bar section in Salt Lake Qarhan, Qaidam Basin[J]. *Quaternary Science*, 2007, 27(4): 511-521.[张虎才,雷国良,常凤琴,等.柴达木盆地察尔汗贝壳堤剖面年代学研究[J].第四纪研究,2007,27(4):511-521.]

[30] LIU Bing, JIN Heling, SUN Lianying, *et al*. Holocene climatic change revealed by aeolian deposits from the Gonghe Basin, northeastern Qinghai Tibetan Plateau[J]. *Quaternary International*, 2013, 296:231-240.

[31] LÜ Zhiqiang, LU Ruijie, LIU Xiaokang, *et al*. Holocene aeolian activities on sedimentary record at the east of Qinghai Lake[J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(3):536-544.[吕志强,鲁瑞洁,刘小槺,等.青海湖湖东沙地沉积记录的全新世以来风沙活动变化[J].干旱区地理,2018,41(3):536-544.]

[32] LI Mingzhi. Aeolian activity and climatic changes in the Gonghe Basin since the Last Glacial Maximum[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.[李明治.共和盆地末次盛冰期以来的风沙活动历史与气候变化[D].兰州:兰州大学,2012.]

[33] CHEN Tao. Climate change recorded by aeolian deposits from eastern Qaidam Basin since the Last Deglaciation period[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.[陈涛.末次冰消期以来柴达木盆地东部风成沉积记录的气候变化[D].北京:中国科学院大学,2015.]

[34] HU Mengjun, LI Sen, GAO Shangyu, *et al*. Evolution process of land desertification around Qinghai Lake since 32 ka BP reflected by sediment grain-size features[J]. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(5):1 240-1 247.[胡梦珺,李森,高尚玉,等.风成沉积物粒度特征及其反映的青海湖周边近32 ka以来土地沙漠化演变过程[J].中国沙漠,2012,32(5):1 240-1 247.]

[35] YU Suhua, ZHENG Honghan. REE of sediments of the Changliushui Section at Zhongwei County of Ningxia Province and the environmental significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(1):149-155.[余素华,郑洪汉.宁夏中卫长流水剖面沉积物中稀土元素及其环境意义[J].沉积学报,1999,17(1):149-155.]

[36] HAN Fang, ZHANG Kexin, WEI Yi, *et al*. Sedimentary sequences and Paleoclimate of Late Pleistocene in Xunhua Basin, Qinghai Province[J]. *Eearth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(5):849-856.[韩芳,张克信,韦一,等.青海循化盆地晚更新世沉积序列与古气候[J].地球科学——中国地质大学学报,2010,35(5):849-856.]

[37] LIU Sisi, HUANG Xiaozhong, QIANG Mingrui, *et al*. Vegetation and climate change during the mid-late Holocene reflected by the pollen record from lake Genggahai northeastern Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36(2):247-256.[刘思丝,黄小忠,强明瑞,等.孢粉记录的青藏高原东北部更尕海地区中晚全新世植被和气候变化[J].第四纪研究,2016,36(2):247-256.]

[38] HU Xiaofei, PAN Baotian, GAO Hongshan, *et al*. Development of Holocene fluvial terraces in the eastern Qilianshan Mountain and its relationship with climate changes[J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(4):723-736.[胡小飞,潘保田,高红山,等.祁连山东段全新世河流阶地发育及其与气候变化的关系研究[J].第四纪研究,2013,33(4):723-736.]

[39] LIU Xingxing, VANDENBERGHE J, AN Zhihseng, *et al*. Grain size of Lake Qinghai sediments: implications for riverine

input and Holocene monsoon variability[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 449:41-51.

[40] CHENG Bo, CHEN Fahu, ZHANG Jiawu, *et al*. Palaeovegetational and palaeoenvironmental changes in Gonghe Basin since Last Deglaciation[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(11):1 336-1 344.[程波,陈发虎,张家武,等.共和盆地末次冰消期以来的植被和环境演变[J].地理学报,2010,65(11):1 336-1 344.]

[41] ZHANG Xiying, QU Jingwei, ZHANG Wei, *et al*. Age model and palaeoclimatic changes of DG03 Core of Gahai Lake in Delingha Basin[J]. *Ludong University Journal (Natural Science Edition)*, 2009, 25(1):68-72.[张西营,渠敬伟,张伟,等.德令哈盆地尕海湖DG03孔岩芯年龄模式与古气候变化[J].鲁东大学学报:自然科学版,2009,25(1):68-72.]

[42] LIU Xingqi, DONG Hailiang, RECH J A, *et a1*. 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.

[43] SHEN Ji, LIU Xingqi, WANG Sumin, *et al*. Palaeoclimatic changes in the Qinghai Lake area during the last 18,000 years[J]. *Quaternary International*, 2005, 136(1):131-140.

[44] YANG Shuaibin, QIAO Yansong, PENG Shasha, *et al*. Geochemical characteristics of eolian deposits in the northeastern margin of the Tibetan Plateau and implications for provenance and intensity[J]. *Quaternary Sciences*, 2017,37(1): 1-13.[杨帅斌,乔彦松,彭莎莎,等.青藏高原东北缘黄土的地球化学特征及其对物源和风化强度的指示意义[J].第四纪研究,2017,37(1):1-13.]

[45] LIU Bing, JIN Heling, SUN Zhong, *et al*. Progress of studies of climate and environment changes in Gonghe Basin, Northeastern Tibetan Plateau, since the Last Glacial Maximum Period[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(2): 403-410.[刘冰,靳鹤龄,孙忠,等.末次盛冰期以来青藏高原东北部共和盆地气候与环境变化研究进展[J].冰川冻土,2012,34(2):403-410.]

[46] WU Duo. Changes of regional hydrology and summer monsoon since the Last Glacial Maximum recorded by Dalianhai Lake, Tibetan Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.[吴铎.青藏高原达连海记录的末次盛冰期以来区域水文与夏季风变化研究[D].兰州:兰州大学,2017.]

[47] WEI Doudou. Study on Late Holocene environmental evolution recorded by Dalianhai Lake[D]. Xining: Qinghai University, 2015.[魏豆豆.达连海湖泊记录的晚全新世环境演变[D].西宁:青海大学,2015.]

[48] AN Fuyuan, MA Haizhou, WEI Haicheng, *et al*. Grainsize distribution patterns of lacustrine sediments of Qarhan area and its environmental significance[J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(2):212-220.[安福元,马海州,魏海成,等.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,2013,36(2):212-220.]

[49] LEI Guoliang, ZHANG Hucai, ZHANG Wenxiang, *et al*. Characteristics of grainsize and sedimentation of Shell Bar section in Salt Lake Qarharn Qaidam Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(2):274-282.[雷国良,张虎才,张文翔,等.柴达木盆地察尔汗古湖贝壳堤剖面粒度特征及其沉积环境[J].沉积学报,2007,25(2):274-282.]

[50] HU Mengjun, FENG Shuqin, LI Xiangfeng, *et al*. The environmental evolution of the Gonghe basin since the 12ka revealed by magnetic susceptibility data[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2019, 43(1):101-108.[胡梦珺,冯淑琴,李向锋,等.马四剖面揭示的共和盆地12 ka以来的环境演变[J].地层学杂志,2019,43(1):101-108.]

[51] LIU Bing, JIN Heling, SUN Zhong, *et al*. Spatiotemporal evolution of sandy land in the Gonghe Basin during the Holocene period and its driving mechanism[J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(4):982-991.[刘冰,靳鹤龄,孙忠,等.全新世共和盆地沙地时空演化及其驱动机制[J].中国沙漠,2014,34(4):982-991.]

[52] LI Tengfei, LI Jinfeng, LU Ruijie, *et al*. Extraction of grainsize components with environmentally sensitivity of aeolian sediments in eastern shore of Qinghai Lake and their palaeoclimatic implications[J]. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(5): 878-884.[李腾飞,李金凤,鲁瑞洁,等.青海湖东岸沙地风成沉积物粒度敏感组分及其古气候意义[J].中国沙漠,2017,37(5):878-884.]

[53] ZHOU Liping, OLDFIELD F, WINTLE A G, *et al*. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese Loess[J]. *Nature*, 1990, 346:737-739.

[54] LIU Bing, JIN Heling, SUN Zhong, *et al*. Millennial scale climate change in the Holocene revealed by trace elements of aeolian deposits in northeastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 15(3):423-433.[刘冰,靳鹤龄,孙忠,等.青藏高原东北部风成沉积微量元素揭示的全新世千年尺度气候变化[J].古地理学报,2013,15(3):423-433.]

[55] PAN Ninghui. The climate and environmental evolution and aeolian activity since the Holocene in the Gonghe Basin recorded by masi section[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2017.[潘宁惠.共和盆地马四剖面记录的全新世以来的风沙活动与气候环境演变化[D].兰州:西北师范大学,2017.]

[56] ZHANG Wanyi, ZHNG Jingya, NURSAT N, *et al*. The records of Donggi Cona lake level fluctuations since the Holocene in the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Science*, 2019, 39(4):1 018-1 033.[张菀漪,张静雅,NUSRAT Nazir,等.青藏高原东北缘冬给错纳湖全新世湖面波动[J].第四纪研究,2019,39(4):1 018-1 033.]

[57] IJMKER J, STAUCH G, PÖTSCH S, *et al*. Dry periods on the NE Tibetan Plateau during the Late Quaternary[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 346/347(3/4):108-119.

[58] HOU Xianhua, ZHENG Mianping, ZHANG Chengjun, *et al*. Sedimentary characteristics and paleoenvironmental of Dalangtan Salt Lake in western Qaidam Basin, since 140 ka BP[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(11): 1 623-1 630.[侯献华,郑绵平,张成君,等.柴达木盆地西部大浪滩140 ka以来沉积特征与古环境[J].地质学报,2010,84(11):1 623-1 630.]

[59] WEI Haicheng, FAN Qishun, AN Fuyuan. Chemical elements in core sediments of the Qarhan Salt Lake and palaeoclimate evolution during 94-9 ka[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, 37(2): 193-203.[魏海成,樊启顺,安福元.94~9 ka察尔汗盐湖的气候环境演化过程[J].地球学报,2016,37(2):193-203.]

[60] WANG H Y, DONG Hailiang, ZHANG Chuanlun, *et al*. Deglacial and Holocene archaeal lipid-inferred paleohydrology and paleotemperature history of Lake Qinghai, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Research*, 2015, 83(1):116-126.

[61] WANG Huanye, LIU Weiguo. Advances in paleoclimate proxies based on microbial glycerol dialkyl glycerol tetraether lipids on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2016, 24(2):75-82.[王欢业,刘卫国.青藏高原微生物甘油二烷基甘油四醚类化合物古气候指标研究进展[J].盐湖研究,2016,24(2):75-82.]

[62] WANG Zheng, ZHANG Fan, LI Xianzhong, *et al*. Changes in the depth of Lake Qinghai since the Last Deglaciation and Asynchrony between lake depth and precipitation over the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Global and Planetary Change*, 2020, 188:103156.

[63] XU Shuying. The paleosols and their reflection of the environmental changes in the northeast region of the Qinghai Xizang Plateau[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1994, 14(3):225-232.[徐叔鹰.青藏高原东北部的古土壤及其对环境变化的反映[J].地理科学,1994,14(3):225-232.]

[64] YANG Qinghua, HOU Xianhua, YANG Zhenjing, *et al*. Vegetation characteristics and environmental changes since the Last Interglacial Period in western Qaidam Basin[J]. *Mountain Research*, 2017, 35(5):742-752.[杨庆华,侯献华,杨振京,等.柴达木盆地西部末次间冰期以来植被特征及其环境变化[J].山地学报,2017,35(5):742-752.]

[65] LUO Congwen, MA Yuzhen, WANG Kai, *et al*. Vegetation and climate inferred from pollen record in East Asian region during MIS 5: a review[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(5):540-551.[雒聪文,马玉贞,王凯,等.东亚地区MIS 5时期孢粉记录的植被与气候研究进展[J].地球科学进展,2019,34(5):540-551.]

[66] SHAN Fashou, DU Naiqiu, SUN Zhaochen. Vegetational and environmental changes in the last 350ka in Erlangjian Qinghai Lake[J]. *Journal of Lake Science*, 1993,5(1):9-17.[山发寿,杜乃秋,孙昭宸.青海湖盆地35万年来植被演化及环境变迁[J].湖泊科学,1993,5(1):9-17.]

[67] CHEN Kezao, BOWLER J M, KELTS K. Palaeocliniatic evolution within the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau in the last 40 000 years[J]. *Quaternary Science*, 1990(1):21-30.[陈克造,BOWLER J M,KELTS K.四万年来青藏高原的气候变迁[J].第四纪研究,1990(1):21-30.]

[68] MCMANUS J F, OPPO D W, CULLEN J L. A 0.5-million-year record of millennialscale climate variability in the North Atlantic[J]. *Science*, 1999, 283(5 404): 971-975.

[69] SONG Lei, QIANG Mingrui, LANG Lili, *et al*. Changes in palaeoproductivity of Genggahai Lake over the past 16 ka in the Gonghe Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(19):1 763-1 774.[宋磊,强明瑞,郎丽丽,等.16ka BP共和盆地更尕海湖泊生产力演化历史[J].科学通报,2012,57(19):1 763-1 774.]

[70] WANG Xin, ZHANG Jinhui, JIA Jia, *et al*. Pleistocene loess-paleosol sequences in arid Central Asia:state of art[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(1):34-47.[王鑫,张金辉,贾佳,等.中亚干旱区第四系黄土和干旱环境研究进展[J].地球科学进展,2019,34(1):34-47.]

[71] CHENG Hai, SINHA A, WANG Xianfeng, *et al*. The global paleomonsoon as seen through speleothem records from Asia and the Americas[J]. *Climate Dynamics*, 2012, 39(5): 1 045-1 062.

[72] WANG Youjun, JIA Jia, LIU Hao, *et al*. The magnetic susceptibility recorded millennial-scale variability in Central Asia during Last Glacial and Interglacial[J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 215(3):1 781-1 788.

[73] LU Huayu, AN Zhisheng. Paleoclimatic significance of grain size of loess-paleosol deposit in Chinese Loess Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(1):66-69.[鹿化煜,安芷生.洛川黄土粒度组成的古气候意义[J].科学通报,1997,42(1):66-69.]

[74] CHENG Hai, EDWARDS R L, SINHA A, *et al*. The Asian monsoon over the past 640,000 years and ice age terminations[J]. *Nature*, 2016, 534(7 609):640-646.

[75] BERGER A L. Longterm variations of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements 1[J]. *Quaternary Research*, 1978, 9(2):139-167.

[76] CHEN Fahu, JIA Jia, CHEN Jianhui, *et al*. A persistent Holocene wetting trend in arid Central Asia with wettest conditions in the late Holocene, revealed by multi-proxy analyses of loess-paleosol sequences in Xinjiang, China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016,146(15):134-146.

[77] LI Guoqiang, CHEN Fahu, XIA Dunsheng, *et al*. A Tianshan Mountains loesspaleosol sequence indicates antiphase climatic variations in arid Central Asia and in East Asia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 494(15):153-163.

[78] CHEN Fahu, XU Qinghai, CHEN Jianhui, *et al*. East Asian summer monsoon precipitation variability since the Last Deglaciation[J]. *Scientific Reports*, 2015,5. DOI:10.1038/srep11186.

[79] JIA Yulian, SHI Yafeng, CAO Jianting, *et al*. The precipitation of interior lakes in the southwestern Tibetan Plateau at 40~30 ka BP[J]. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(3):346-351.[贾玉连,施雅风,曹建廷,等.40~30 ka BP期间高湖面稳定存在时青藏高原西南部封闭流域的古降水量研究[J].地球科学进展,2001,16(3):346-351.]

[80] LI Bingyuan. The Last Greatest Lakes on the Xizang (Tibetan) Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000(2):174-182.[李炳元.青藏高原大湖期[J].地理学报,2000(2):174-182.]

[81] ZHANG Hucai, WÜNNEMANN B, MA Yuzhen, *et al*. Lake level and climate changes between 42,000 and 18,000 14 CyrBP in the Tengger Desert, northwestern China[J]. *Quaternary Research*, 2002, 58 (1): 62-72.

[82] CHEN Fahu, FAN Yuxin, MADSEN D B, *et al*. Preliminary study on the formation mechanism of the "Jilantai-Hetao" megalake and the lake evolutionary history in Hetao region[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(5):866-873.[陈发虎,范育新,MADSEN Davaid B,等. 河套地区新生代湖泊演化与"吉兰泰—河套"古大湖形成机制的初步研究[J]. 第四纪研究,2008,28(5):866-873.]

[83] FAN Qishun, LAI Zhongping, LONG Hao, *et al*. OSL chronology for lacustrine sediments recording high stands of Gahai Lake in Qaidam Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5(2): 223-227.

[84] MADSEN D B, MA Haihzou, RHODE D, *et al*. Age con-

straints on the Late Quaternary evolution of Qinghai lake, Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Research*, 2008, 69(2):316-325.
[85] LAI Zhongping, MISOHKE S, MADSEN D B, *et al*. 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* 2014, 51(2):197-210.
[86] ZHOU Jie, ZHOU Weijian, DONG Guocheng, *et al*. Cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al exposure dating of Nam Co lake terraces since MIS 5, southern Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 231. DOI:10.1016/j.quascirev.2020.106175.

Progress of Environmental Change in the Northeastern Tibetan Plateau Since Late Pleistocene*

KE Siyin, ZHANG Dongli, WANG Weitao*, WANG Menghao, DUAN Lei, YANG Jingjun, SUN Xin, ZHENG Wenjun

(1. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Geodynamics and Geohazards, School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou* 510275, *China*; 2. *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai Guangdong* 519082, *China*; 3. *State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing* 100029, *China*)

Abstract: The northeastern Tibetan Plateau is an ideal area to study the environmental changes in the East Asian monsoon marginal zone, and its rich sedimentary records can reflect the detailed environmental change process. The main research progress of sedimentation environment evolution on the northeastern Tibetan Plateau during the past 30 years is summarized, focusing on the chronological frame, the proxies for environmental research, environmental evolution process and the regional consistency of environmental changes in the northeastern Tibetan Plateau. The grain size, magnetic susceptibility and geochemical indicators dominated by carbonate content, total organic carbon and major and minor elements are the most commonly research methods in environmental studies in the northeastern Tibetan Plateau. Based on the research results of sedimentary environment since Late Pleistocene, the evolution process can be divided into five stages, which experienced the development stages of being warm and humid cold and dry, slightly warm and humid, slightly cold and dry then slightly moderate-wet, relatively moderate warm and humid then moderate cold and dry with the common influence of East Asian monsoon and west wind. The climate records of the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau are regional compared with those of Asia and the world, and the main factors may be driven by the change of solar radiation in the northern hemisphere and the North Atlantic thermohaline circulation. The research shows that there may be two periods of high lake level with large area, namely MIS 3 and MIS 5 stages. The difference of times shows that the occurrence time of high lake level becomes younger from the interior of the Tibetan Plateau to the northeast, which may reflect a response of tectonic and environmental changes in the northeastern Tibetan Plateau. In conclusion, the further environmental research on the northeastern Tibetan Plateau may focus on the establishment of high-resolution sedimentary sequence, the time of high lake level and the application of more accurate environmental proxies, in order to obtain higher resolution environmental change information.

Key words: Sedimentary sequence; Environmental change; Climate fluctuation; Late Pleistocene; Northeastern Tibetan Plateau.

* **Foundation item:** Project supported by the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research "Active faults and earthquake disasters" (Grant No.2019QZKK0901); The National Natural Science Foundation of China "Seismic risk assessment and damage scenario prediction of coastal fault zone based on 3D structural model" (Grant No. 41774049).

First author: KE Siyin (1996-), female, Maoming City, Guangdong Province, Master student. Research areas include quaternary sediments and environment. **E-mail**: kesy3@mail2.sysu.edu.cn

* **Corresponding author:** WANG Weitao (1979-), male, Xi'an City, Shaanxi Province, Professor. Research areas include cenozoic tectonic deformation and evolution. **E-mail**: wangweitao@mail.sysu.edu.cn