

莫皓焜,胡光印,孟惠聪.青海湖地区风沙活动研究进展[J].中国沙漠,2023,43(6):197-209.

# 青海湖地区风沙活动研究进展

莫皓焜,胡光印,孟惠聪

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119)

**摘要:** 青海湖位于青藏高原的东北缘,地处青藏高原与黄土高原的过渡地带,一直是风沙活动与风成沉积研究的理想区域。在现有的研究成果基础上,综述了青海湖地区的风沙活动研究进展,包括沙地分布,历史风沙活动记录,风成沉积的物源、输送过程、沉积特征,风沙地貌,以及土地沙漠化。当前,湖东与湖西是青海湖地区主要的沙地分布区,沙地内风成沉积的粒度、化学等沉积特征表明,更新世晚期、全新世早期、全新世晚期为青海湖地区主要的风沙活动时期。该地区位于气候变化的敏感区,气候环境多变,且湖东与湖西沙地的物源不同,风沙活动的输送过程常受大气环流与区域风况的影响。此外,青海湖沙地内沙丘广布,土地沙漠化受自然与人为因素影响而变化明显,但沙漠化程度有减弱的趋势。未来可在青海湖地区古气候环境的演化和差异、年代学框架的建立与完善、风沙活动过程等方面,进行更深入的研究。

**关键词:** 青海湖; 风沙活动; 环境变化; 风成沉积; 青藏高原

**文章编号:** 1000-694X(2023)06-197-13

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00150

**中图分类号:** P931.3

**文献标志码:** A

## 0 引言

青藏高原是世界上海拔最高的独特地貌单元,其地质历史时期强烈的构造活动,对西风环流分支的形成、现代东亚季风的演变、中国西北地区干旱化程度加剧等一系列环境变化和气候响应,具有强大的驱动和放大作用<sup>[1-2]</sup>。青藏高原上风力强劲,风沙活动一直很活跃,沙尘事件多发,风成沙和黄土大量堆积<sup>[3]</sup>,是全球范围内重要的沙尘释放源区和沉降区<sup>[4]</sup>。尽管风成沉积在青藏高原上广泛分布,但分布常不连续,大范围的沙尘堆积大多在青藏高原东北部的几个盆地中<sup>[5-6]</sup>。

位于青藏高原东北缘、具有中国内陆最大封闭咸水湖的青海湖盆地,是青藏高原上重要的沙尘沉积区,盆地内沙地广布,土地沙漠化问题严峻,是适合开展风沙活动与沙漠化研究的理想实验场地<sup>[7-8]</sup>。青海湖盆地处于东北季风区、西北干旱区和青藏高原高寒区的过渡地带,受盛行西风环流与亚洲季风环流的交互控制,对气候变化的响应异常敏感,是研究古气候环境、预测气候未来变化发展的热点区域。

另外,长期干旱、地表裸露、风沙活动频繁等环境条件,使青海湖周边形成了大量沙丘和广泛的风成黄土沉积。对这些风成气候信息载体进行研究,不仅可以厘清当地风成沉积所涉及物质生成、搬运、沉积和成土过程,还可以更好地理解青藏高原隆升所导致的气候变化,揭示北半球大气环流的演变历史<sup>[9-11]</sup>,有望能在区域环境变化方面获得更深入的理解和认识。

当前,针对青海湖地区的风成沉积,已展开了较多的研究工作,且研究仍在不断深入和拓展。由此,本文以青海湖地区为研究区域,对近年来青海湖地区风沙活动的研究进行综述,着重于青海湖地区的沙地分布、地质历史时期的风沙活动记录、风沙活动过程的研究进展,以及风沙地貌与土地沙漠化的影响因素,进而对上述研究成果做出总结和展望,以期对青藏高原湖滨地区风成过程的独特性有进一步了解。

## 1 青海湖地区概况

青海湖地区位于青藏高原东北部与黄土高原

收稿日期:2023-09-26; 改回日期:2023-10-23

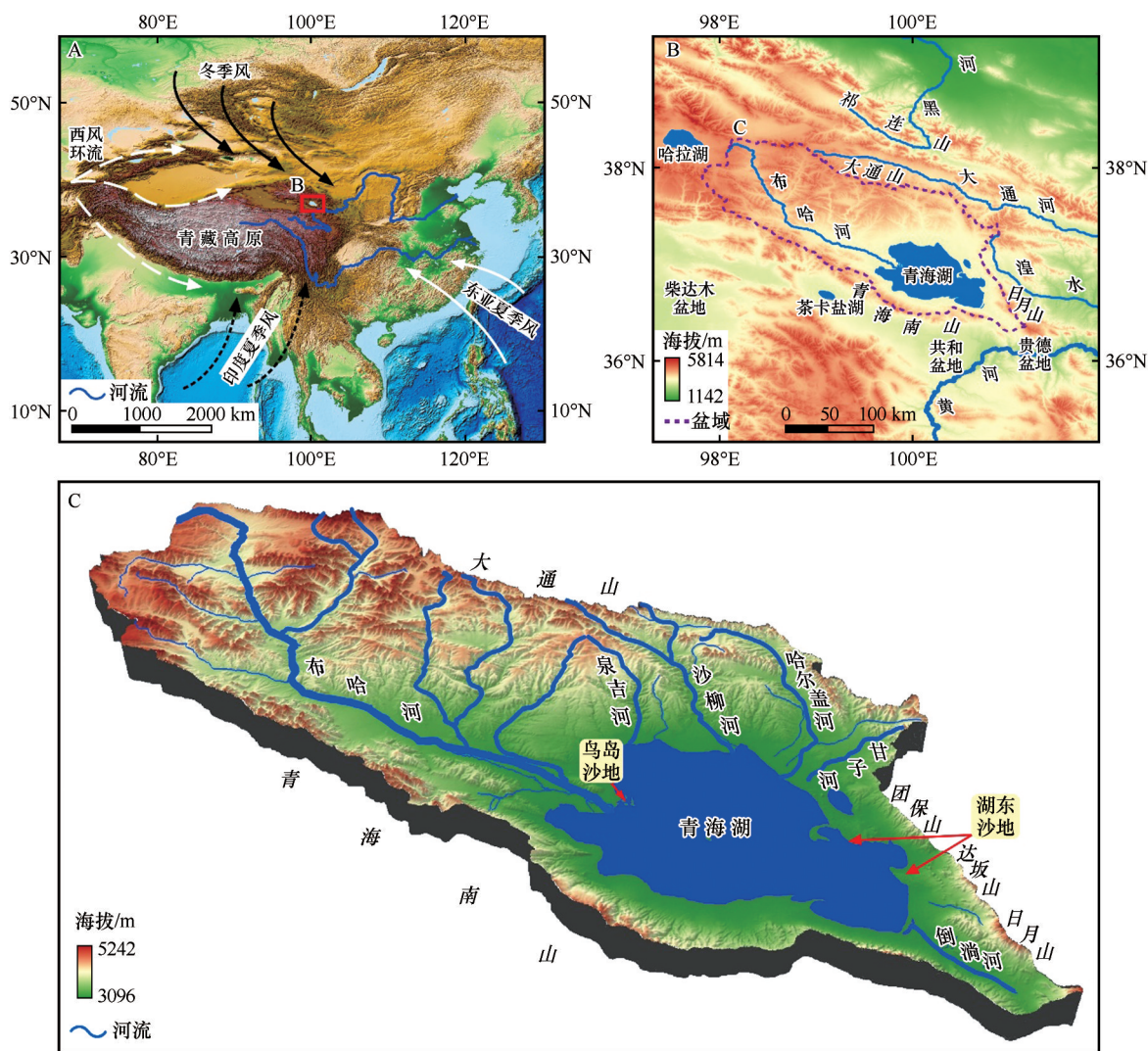
资助项目:国家自然科学基金项目(42071004);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0403)

作者简介:莫皓焜(1997—),男,广东肇庆人,硕士研究生,主要从事风沙地表过程相关研究。E-mail: mhhkunn@163.com

通信作者:胡光印(E-mail: guangyinhu@snnu.edu.cn)

的过渡地带(图1A),介于 $36^{\circ}15' - 38^{\circ}20'N$ 、 $97^{\circ}50' - 101^{\circ}10'E$ ,与柴达木盆地、贵德盆地、共和盆地、湟水河谷隔分水岭相邻<sup>[12]</sup>。青海湖盆地内海拔自西北逐渐向东南降低,并由青海南山、日月山、团保山、大通山等山体环绕,形成湖盆的基本地貌格局(图1B)<sup>[13]</sup>。湖盆内有水下三角洲、湖滨/冲积平原、湖岸多级阶地、夷平面等复杂多样的地貌类型<sup>[14]</sup>。青海湖东西长而南北窄,长轴北西西向,有形似椭圆的形态特点,湖四周大多为内陆封闭型间歇性的

河流,且河网水系分布不对称:布哈河、沙柳河、泉吉河和哈尔盖河等河流,位于盆地的西部与西北部,河网密布且流量大。布哈河为青海湖流域内最大的河流,也是最大的水源补给来源,其次为沙柳河与哈尔盖河;而位于盆地东南部与南部的甘子河、倒淌河和黑马河,为长河流,其他多为季节性河流,河网稀疏而流量少。除倒淌河为自东南向西北的流向外,青海湖内的河流基本都为自西北向东南的流向<sup>[15]</sup>(图1C)。



基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号:青S(2018)005号)制作,底图边界无修改

图1 青海湖地区所处的气候区位(A)、地理格局(B)和内部概况(C)

Fig.1 The climatic location (A), geographical pattern (B) and overview (C) of Qinghai Lake Basin

相比于中国西北地区连绵广布的沙地,青海湖地区的沙地面积小而形态破碎,主要在湖区的东岸和西岸上,形成连续分布的沙地<sup>[16]</sup>。其中,湖东沙地主要在团保山—达坂山间的滨湖平原上。从甘子河口起,南北向延展至达坂山北麓,广泛分布大

量的流动沙丘,并以横向沙垄、新月形沙丘(链)、星形沙丘为主要沙丘类型。而以海晏湾为界,湖东沙地还可分南北两部分:南部为克土沙地,从克土垭口一直往南到达坂山北麓;北部为尕海沙地,处于沙岛与尕海之间<sup>[17]</sup>(图1C)。沙岛最初是由湖浪与



沿岸流搬运湖底泥沙形成的水下沙堤,后不断增高增宽出露湖面形成沙岛,并继续接受经风搬运来的风沙物质而发展扩大<sup>[18]</sup>。在青海湖水位较低时,沙岛出露面积增加,并与陆地相连形成新尕海,海晏湾也因水下沙堤出露,被包围形成潟湖,因此湖东沙地面积易受水位高低的影响<sup>[19]</sup>。青海湖西岸沙地又名鸟岛沙地,主要分布在鸟岛的西北侧和布哈河三角洲的东北缘<sup>[20]</sup>(图1C),多为固定与半固定的新月形沙丘(链)<sup>[21]</sup>,在石乃亥乡与沙陀寺之间,就存在两片半固定沙丘(地)。而在鸟岛周围,沙丘(地)沿湖滨呈带状分布,并可见流动沙丘<sup>[19,22]</sup>。

此外,在青海湖湖盆东南缘的浪玛谢岗,即倒淌河(青海湖流域)与狼麻河(黄河流域)的分水地带,也有相对较大片的沙地<sup>[15]</sup>。虽现今该处沙地距离青海湖湖岸较远,但根据此地新老沙丘的研究推测,其历史成因和物质组成,与湖东沙地有较密切的联系<sup>[16,19]</sup>,过去经历多次扩张与萎缩<sup>[23]</sup>,近些年的土地沙漠化监测还表明,该处的沙地扩张发展较为快速<sup>[24]</sup>。而在甘子河乡热水村的东北处,以及青海湖南岸的江西沟,则发育有零星斑块状的沙丘(地),部分区域还有面积较小的半固定或流动的沙

丘(地)<sup>[19]</sup>。近年来,青海湖水量有增加趋势,湖面上涨,鸟岛、沙岛湖、海晏湾等地的湖岸线明显向陆推进<sup>[25]</sup>,鸟岛逐渐被淹没,沙岛湖、海晏湾重新与青海湖连通,裸露沙地面积逐渐减少<sup>[26-28]</sup>。

## 2 青海湖地区地质历史时期的风沙活动记录

由风成沙、黄土与古土壤交替形成的风成沉积序列,能作为反映地区气候与沉积环境变化的有效指示物<sup>[10]</sup>。风成沙堆积常代表风力侵蚀搬运作用显著、风沙活动强劲的干旱气候,古土壤的形成则常代表风沙活动弱、季风和降水较强、成壤过程显著的湿润气候<sup>[29]</sup>。而在青海湖地区,已有不少学者通过研究风成沉积并建立年代框架,重建青海湖地区的古气候环境,并推测历史风沙活动的强度变化。

目前已发表的风成沉积剖面,大多在克土沙地(图2C),且剖面中含有较多的风成沙沉积。黄土沉积主要在青海湖南岸的江西沟与黑马河一带,以及盆地的东南缘。尕海沙地与鸟岛沙地的风成沉积剖面较少,特别是近年因湖水上涨,鸟岛逐渐被淹

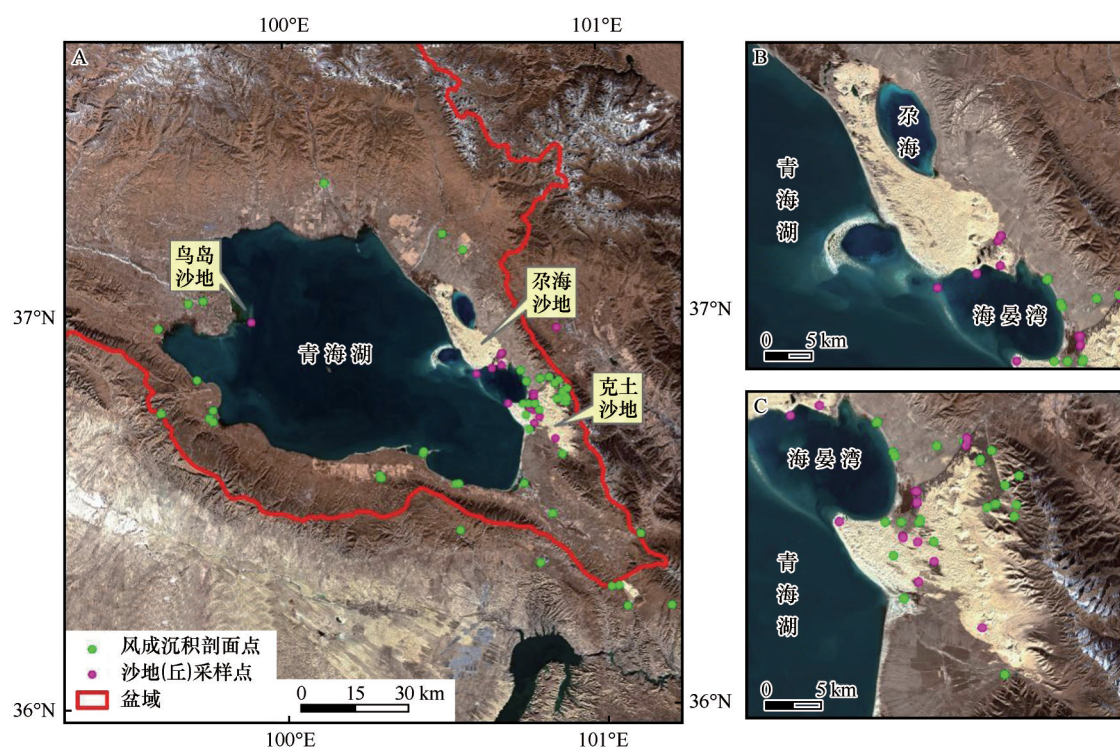


图2 青海湖地区部分已发表的风成沉积剖面与沙地(丘)采样点整体分布(A)及在尕海沙地(B)、克土沙地(C)局部分布

Fig.2 Some published aeolian sedimentary profiles and sampling sites of sandy land (hills) in Qinghai Lake area (A) and in Gahai Dunefield (B), Ketu Dunefield (C)

没,已难以上岛采样(图 2A 和 B)。当前已发表的青海湖地区最古老的风成沉积年龄超过 165 ka BP,是在克土沙地发现的黄土沉积<sup>[30]</sup>。风成沙沉积的记录最早可追溯到末次冰期<sup>[31]</sup>,并已在多个沉积剖面中发现了 3 个主要的风成沙堆积时段,表明风沙活动在此期间较为强烈:分别为更新世晚期(17.7—11.4 ka BP)、全新世早期(10.8—6.5 ka BP)和全新世晚期(1.9—0.7 ka BP),其中风沙活动强度达到最盛的时间,被认为是 13 ka BP 和 9.3 ka BP<sup>[6]</sup>。

## 2.1 全新世前的风沙活动与环境变化

当前,青海湖地区内有记录的风成沙沉积始于末次冰期<sup>[31]</sup>。在间冰阶期间,亚洲夏季风势力相对较强,气候整体温暖湿润,化学风化作用明显,成壤强度较高,风沙活动和流沙运移能力弱,青海湖周边土地沙漠化程度明显减弱乃至逆转,并对应发育较厚的古土壤层<sup>[32]</sup>。基于古湖岸线和古阶地<sup>[33-35]</sup>的记录推测,当时的青海湖处于高水位,且风成剖面中的色度与矿物记录,也指示该时期应是亚洲夏季风增强的暖湿阶段<sup>[31]</sup>。但该阶段内仍有短暂的冷暖气候波动,曾发生较强的风沙活动<sup>[36]</sup>。

冰盛期是末次冰期气候环境异常寒冷干旱的阶段<sup>[37]</sup>,也是青海湖湖泊面积最小的时段<sup>[38-39]</sup>。但低温导致的蒸发减弱和显著的湖泊效应却使青海湖地区的相对湿度有所增加,表现出区域独立性<sup>[31]</sup>。大水塘剖面<sup>[31]</sup>、江西沟剖面<sup>[40]</sup>、鸟岛剖面<sup>[8]</sup>等,在该时期沉积了大量的风成沙,表明冰盛期的风沙活动十分强劲<sup>[36]</sup>。强大的风力作用还将因青海湖萎缩而暴露的湖泊沉积物吹扬到了日月山西侧,大量粗颗粒物在山麓和倒淌河河谷中堆积,使青海湖东岸发育大片沙地,因此,有学者认为青海湖东岸沙地的形成最晚是在冰盛期<sup>[40]</sup>。

冰消期是青海湖地区风成沉积开始广泛发育的阶段<sup>[9]</sup>。气温有所回升,降水有所增加<sup>[41]</sup>,但区域有效水分还较低,青海湖水位长期处于低位<sup>[42]</sup>,气候整体仍较冷干<sup>[43]</sup>,还经历了三冷两暖的气候交替。其中波令暖期(13.1~12.2 ka BP)与阿勒罗德暖期(11.5~11 ka BP)为夏季风势力主导的弱风沙活动时期<sup>[32]</sup>;古仙女木(15.2~13.1 ka BP)、老仙女木(12.2~11.5 ka BP)和新仙女木(11~10.4 ka BP)冷期为冬季风势力主导的强风沙活动时期<sup>[36]</sup>。特别是新仙女木冷期期间,气温急降<sup>[44]</sup>,风成沉积平均粒径变大,有机质含量与磁化率降低<sup>[45]</sup>。新仙女木冷

期之后,气温持续回升,降水增加,气候逐步向全新世气候过渡,地层中的风成沙沉积减少且粒度变小,成壤作用显现。湖东沙地部分已挖掘的沉积剖面中,还发现了钙积层<sup>[46]</sup>。

尽管研究表明,冰盛期和冰消期曾发生强烈的风沙活动,但目前大多数已报道的风成沙年龄却比这两个时期年轻<sup>[29]</sup>。青海湖地区的黄土沉积年龄也很少早于末次冰期,并常与下伏的砾石或湖岸沉积物年龄不连续,即形成于末次冰期及之前的风成沉积,没有得到较好保存<sup>[30]</sup>。对此学者们推测:一方面在末次冰期期间,青藏高原上的冰川与融水冲刷,破坏了先前形成的风成沉积,只有少数地区保留下未完全破坏的风成沉积<sup>[47-48]</sup>;另一方面是末次冰期的气候异常恶劣,不利于风成沉积的保存,暴露在地表的风成沉积不断接受风力侵蚀<sup>[29]</sup>,即当时的青海湖地区是剥蚀区而不是堆积区<sup>[49]</sup>,使较老的风成沉积在现今很少能被发现<sup>[29]</sup>。

## 2.2 全新世风沙活动与环境变化

相对于冰消期,早全新世期间的气候较为温暖<sup>[50]</sup>,但整体依旧干旱,风沙活动强劲,冷暖波动频繁,沉积地层中有多处古土壤与风成沙互层<sup>[46]</sup>。总体而言,早全新世的风沙活动分两个时段<sup>[45]</sup>:前期东亚夏季风强度减弱与冷事件的发生,使由季风带来的降水减少,有效湿度降低<sup>[51]</sup>,风沙活动强烈并达到峰值,有利于湖东沙地的发育<sup>[31,36]</sup>。后期东亚夏季风强度增强,气候由冷干向暖湿快速转变,风沙活动强度减弱,局部沙尘输入量减少<sup>[8]</sup>,土壤层在风成沙沉积上发育<sup>[10]</sup>,沙丘因植被生长被固定。但在向全新世中期过渡的时段里,气候曾又短暂地向冷干条件恶化<sup>[10]</sup>,植被覆盖面积萎缩<sup>[52]</sup>,沙丘恢复移动,风沙活动再次增强<sup>[45]</sup>。

在全新世中期,亚洲夏季风强度达到最盛<sup>[53]</sup>,气温上升,降雨强度最大<sup>[29]</sup>,青海湖水位达到最高。因此,全新世中期是全新世最暖最湿的时段,是全新世的大暖期<sup>[30]</sup>。此时,风沙活动与风力运输能力显著减弱,风成沙沉积速率降低<sup>[54]</sup>,沙丘或被植被固定<sup>[50]</sup>,或被古土壤掩埋,仅在靠近沙源或海拔高、缺水且风力强劲的地段,才有沙丘继续发育<sup>[31,33]</sup>。该时期的沉积物,也由风成沙和黄土沉积转向古土壤发育<sup>[55]</sup>,沙粒含量减少,粉沙与黏粒含量增加,沉积物整体粒径变小<sup>[36]</sup>,有机质含量增加,化学风化指数较高<sup>[56]</sup>。



随着大暖期结束,进入全新世晚期,青海湖地区再次进入强风沙活动期,风成沉积堆积速率加快,沉积物粒径变粗<sup>[55]</sup>,磁化率和化学风化指数降低<sup>[50]</sup>。该时期的湖泊沉积物中,植被孢粉浓度下降<sup>[41]</sup>、有机质含量减少<sup>[52]</sup>、红度信号低值<sup>[57]</sup>,也表明气候转向冷干。直到罗马暖期(1—200 AD)和中世纪暖期(941—1300 AD)<sup>[58]</sup>,冷干气候才有所缓解<sup>[59]</sup>,但后续到来的小冰期(1301—1900 AD)<sup>[58]</sup>让气候再次恶化<sup>[57]</sup>,风沙活动持续增强达到峰值<sup>[29]</sup>,青海湖水位不断下降<sup>[60]</sup>。多变的气候环境,也使古土壤与风成沙的沉积层理变化明显,各项沉积指标波动起伏较大<sup>[41,61]</sup>。放牧和农业耕作等人类活动对环境与风沙活动的影响也越见明显<sup>[62]</sup>。

### 2.3 地质历史时期风沙活动的驱动因素

季风环流<sup>[52]</sup>和日照强度<sup>[55]</sup>常被认为是控制大陆气候变化的主要因素。西风环流与强东亚冬季风常被认为与冷干空气的输送相关。西风环流将高纬度的冷空气,输送至青藏高原东北部<sup>[9]</sup>,并借由一定的通道,向青海湖地区输送了大量的沙尘物质<sup>[53]</sup>。强东亚冬季风则在晚冰消期至早全新世的过渡时期里,对青海湖地区的冷干气候,有一定的贡献<sup>[23]</sup>。而亚洲夏季风(东亚夏季风与西南季风)则与暖湿水汽的输入相关,随着亚洲夏季风强度的增强,风沙活动强度逐渐减弱。此外,有学者还发现,在地质历史时期东亚夏季风和西南季风的强度与水汽输送贡献比例的变化会影响青海湖地区的降水演变过程,并产生区域差异<sup>[63-64]</sup>。

部分学者认为,日照强度能通过影响亚洲夏季风和西风环流的强度,以及冷暖事件的发生来控制青海湖地区的冷暖干湿状况<sup>[57,65]</sup>,间接地影响风沙活动的强度变化。但在某些时段,青海湖地区的干湿状况与亚洲夏季风和日照强度变化的关系不明显,乃至相反<sup>[10]</sup>。因此还有学者认为,由高日照强度引起的高温和强烈蒸发会抵消亚洲夏季风带来的降水而形成干旱气候,为风沙活动的增强与沙丘活化提供条件<sup>[66]</sup>。有学者提出,青海湖地区有效湿度的变化才是触发风沙活动与沙漠演化最直接的因素<sup>[10,45]</sup>,而有效湿度与蒸发强度的变化是末次冰消期以来青海湖湖水位与亚洲夏季风、日照强度变化不同步的原因<sup>[42]</sup>。

但也有学者指出,风沙活动可能并不仅与气候变化直接相关,而且还受到沙源供应、风力输送、局

部地形差异等因素的影响<sup>[67]</sup>。青海湖地区原有的丰富河流沉积物为风沙活动提供丰富的沙源<sup>[29]</sup>。气候因素也会通过影响水位高低、成壤过程、植被与冰量覆盖等使地表裸露、沙丘活化。加上全新世晚期,人类活动的日渐增强,也促使裸露地表面积和活化沙丘数量增加<sup>[68]</sup>,使青海湖地区较周边区域更早进入风沙活动活跃期<sup>[6,62]</sup>。而沙尘输送需要风力达到一定的阈值才能启动,形成风沙活动<sup>[69]</sup>,且沙尘输送过程中的方向与强度变化也与当地的风况变化相关<sup>[17]</sup>。还有地貌和局部微地形的差异,既会影响区域风成沉积开始堆积的时间<sup>[49]</sup>,也会影响风成物质的沉积速率与堆积方式<sup>[70]</sup>。

## 3 青海湖地区风沙活动研究进展

风沙活动的发生是物质侵蚀、搬运、沉积的自然过程<sup>[71]</sup>,该过程使风成沉积广泛分布,并在地表塑造了一系列的风沙地貌<sup>[72]</sup>。除了研究风成沉积剖面,学者们还通过采集沙丘和地表沉积样(图2),从风沙活动的物质来源、风力对地表物质的搬运、风成沉积物的沉积特征、环境意义与土地沙漠化过程等方面展开研究,以更好了解青海湖地区的风沙活动过程。

### 3.1 风沙活动的物质来源

借助扫描电镜分析湖东沙地的沙粒结构,发现其具有典型的风成特征。因此有学者推测,湖东沙地的风成沙可能主要来自古滨岸或古沙丘,属于近源的就地起沙类型<sup>[73]</sup>。而根据粒径组成、物质运输距离和潜在物源间的关系<sup>[74]</sup>,有学者认为,青海湖地区的风成沙沉积和部分粗颗粒的黄土沉积主要为近源沉积,较细颗粒的黄土沉积则可能是远源沉积<sup>[40]</sup>。有学者推测,青海湖地区的晚第四纪黄土沉积可能来源于柴达木盆地,风成沙沉积可能与乌兰、茶卡、临潼的黄土沉积同源<sup>[75]</sup>。在测量并对比风成沉积中的化学元素与矿物种类时,发现湖西沙地的粗颗粒沙物质与附近的河流相沉积物具有较大的相似性,推测湖西沙地的沙源为附近河流三角洲的河流沉积物。而湖东沙地与湖西沙地相比则具有较大差异,可推测两地的物源不同<sup>[20]</sup>。

除了研究物源,学者们还关注物源的供给条件及变化。尤其是在湖东沙地,古滨岸主要受湖水位控制。在高湖水位期间,古滨岸与湖滩被水覆盖免受风力吹蚀,使得沙源供给减少,风沙活动减弱,湖

东沙地发育减缓甚至萎缩。在低湖水水位期间,湖泊萎缩,裸露的湖泊沉积物在风力作用下向东边输送,为湖东沙地的发育提供新的沙源<sup>[43,53]</sup>。因此,针对湖泊演化与风沙活动、沙地演变间的关系会是青海湖及其他湖滨沙地今后重要的研究内容<sup>[74]</sup>。

### 3.2 风沙的输送过程

对于风沙的输送过程,学者们更关注驱动风沙活动的风力作用。除了基于地质记录来解释大气环流对历史风沙活动强度的影响<sup>[76-77]</sup>,青海湖周边大范围的现代降尘事件同样受学者们的关注<sup>[78-79]</sup>。通过站点监测、降尘样品收集<sup>[80]</sup>,结合模型、化学分析等方法,发现青海湖地区的降尘主要在冬春季,降尘粒径比低海拔地区大,磁性矿物含量有年内变化,化学成分与当地黄土成分相似,表明降尘具有较明显的区域代表性<sup>[81]</sup>。同时,遥感、雷达、气候再分析数据等资料为现代沙尘事件的发生、沙尘的输送与分布,乃至区分各沙源物质贡献比例提供了良好的研究手段<sup>[82-83]</sup>。

对于区域风况,学者们常使用气象站点的风况资料分析青海湖地区的风能环境、起沙风、输沙势等风沙活动特征,并解释其对青海湖地区风成地貌形成的影响<sup>[17,84-85]</sup>。当前,湖东沙地的风况整体为单峰或窄双峰类型,起沙风向偏西风多而东风少,但最大风速与起沙风速有降低的趋势;输沙势在冬春季最大,对应该时期的沙尘事件多发,夏秋季较小,潜在输沙方向单一<sup>[17,84-86]</sup>。但区域风况易受地形等因素影响,具体地方的盛行风向、风向变率、风能环境等可能存在差异。基于几个气象站点展开的研究,也未必能准确地描述青海湖地区的风况细节。因此,学者们常结合使用集沙仪实地采样,对具体地区的输沙量、风沙流,乃至沙丘上的风速廓线特征进行分析,从而能更好地描述气流变化与沙地、沙丘演化间的关系<sup>[87]</sup>。

### 3.3 风沙活动与风成沉积

#### 3.3.1 风成沉积的粒度特征

粒度是研究风成沉积的重要指标。学者们通过不同的分析方法,获取风成沉积物中的环境敏感粒度组分,用于指示风沙活动的物源、搬运与沉积过程以及当时的气候环境条件。尽管获取的环境敏感粒度不同,但学者们普遍认为,粗粒敏感组分指示了风沙活动的强弱变化,细粒敏感组分指示了

成壤作用与磁化率的变化<sup>[88-91]</sup>。此外,平均粒径、中值粒径、偏度、峰态、分选系数、概率分布等粒度参数<sup>[7,92]</sup>也常被用于描述粒径的组成、分布与变化<sup>[5]</sup>。

青海湖沙地风成沉积的粒度组分主要为沙(>63  $\mu\text{m}$ )和粉沙(2~63  $\mu\text{m}$ ),黏粒(<2  $\mu\text{m}$ )的含量较小。在风成沉积剖面中,风成沙沉积的整体粒径要比黄土和土壤沉积的粒径大,并常显示单峰偏态分布,具有中等或偏好的分选性,表示受到的风力作用相对强劲<sup>[76,93-96]</sup>。现代风成沙与表层古风成沙相比,虽然粒度组分相似,但现代风成沙的细沙组分较多,极细沙组分较少,平均粒径较大,分选性较好,表现了两者的物质沉积在时间上有较好的继承和改造关系<sup>[19]</sup>。

地表风成沉积的粒度分布易受地形起伏和表层性质的影响。一般而言,自然沙丘的沙脊(丘顶)部位粒度最大,其次是接受风蚀的迎风坡,而发生堆积的背风坡粒度最小<sup>[16]</sup>。但自然固定沙丘的丘顶因起伏平缓且有植被覆盖,粒度比沙丘其他部位小;人工(半)固定沙丘则因草方格设置表层细粒组分有所增加,且草方格设置时间的长短、不同的植被类型、植被盖度和植被分布也会使沙丘表层与下层沉积的粒度分布产生差异<sup>[96-97]</sup>。此外,不同地区沙粒的含量与组成会有各自的区域独特性,如湖东种羊场的沙丘要比克土流动沙丘的细沙含量高<sup>[97]</sup>。而不同的风向、丘间地风力的“峡谷效应”、人为对沙丘的踩踏等其他因素也会改变沙丘各部位的粒度组成与分布<sup>[96,98]</sup>。

#### 3.3.2 风成沉积的化学特征

气候环境的变化会影响沉积物的风化强度与成壤过程,使沉积物中的矿物与元素,具有不同的地球化学特征。风沙活动的发生常伴随着气候环境的冷干化,该环境下,抗侵蚀能力较强的Si与较活泼的化学元素(Ca、Mg、K、Na、Sr等)在风成沉积物中的含量要比暖湿时期的含量高<sup>[99]</sup>。因此描述风成沉积的地球化学特征,能推测物质沉积过程中的气候环境状况,以及风沙活动的强度变化<sup>[9,50]</sup>。但各元素和矿物本身还有一定的特性<sup>[99]</sup>,在不同地区不同沉积剖面中具有的环境指代意义未必相同<sup>[100]</sup>。因此,描述单一的地球化学特征未必能较好地表现环境与风沙活动变化的细节,应当综合多个环境指标进行对比分析。

另外,由于地区环境条件、原始物质来源、沉积剖面的体积等因素,不同地区与沉积剖面中元素的



绝对含量会有特征差异<sup>[101]</sup>,使用元素的绝对含量进行描述与比较不利于真实地反映沉积物的风化成壤过程与地球化学行为。因此,学者们常将多种地球化学元素的比值与综合参数结合应用于研究中<sup>[99]</sup>。如元素含量较低的标准差表明,风成沙中元素含量较稳定,元素聚集、迁移的活动性较弱,风成沙是在气候冷干、物理风化作用占主导的条件下堆积形成<sup>[101]</sup>。而化学蚀变指数CIA、化学风化指数CIW等指标表明,青海湖东岸的风成沉积主要经历了弱风化、中等程度的风化过程<sup>[76-77]</sup>,A-CN-K三元图则表明,种羊场沙区仍处于早期去Ca、去Na的初级风化阶段<sup>[56]</sup>。沙丘沙重矿物的成熟度还指示了青海湖东岸与西岸沙丘的不同源,布哈河和沙柳河三角洲的沉积物不是东岸沙丘的物源<sup>[73]</sup>。

### 3.3.3 风成沉积的其他沉积特征

除了粒度与化学特征,学者们还使用有机质<sup>[102-103]</sup>、磁化率<sup>[104]</sup>、色度<sup>[31]</sup>、孢粉、炭屑<sup>[59]</sup>、酸碱性<sup>[105-106]</sup>等不同指标来描述风成沉积的沉积特征,并根据部分沉积特征,重建古气候环境,推演风沙活动的变化规律。但不同的气候指标对气候环境变化的敏感性及响应的气候条件未必相同,解译获得的信息会不够细致或存在差异,乃至得出相反的结论<sup>[29]</sup>。

低磁化率常被认为与冷干的沉积环境相关,风沙活动与风力运输能力强<sup>[104]</sup>。但有学者指出,青海湖典型风成黄土沉积的磁化率可能存在“海拔效应”:在海拔低于3 300 m时,磁化率随海拔上升而增加,并能较好地指示气候变化;但海拔高于3 400 m时,磁化率会随海拔上升而降低,对环境变化不如粒度指标敏感<sup>[107]</sup>。红度也能反映沉积环境的变化<sup>[31]</sup>,有学者认为红度变化与成壤作用相关,低值红度指示了成壤作用弱、风成沙堆积的冷干气候<sup>[32]</sup>,但有学者却认为,红度变化与风力输送的风化物质相关,高值红度才指示风力输送能力强的冷干期<sup>[9]</sup>。学者们还常根据风成沙-黄土-古土壤的交替沉积,来指代古气候环境的交替变化,但古土壤的发育对亚洲夏季风增强与增温增湿过程的响应具有一定的滞后性,即短暂的暖湿时段里,可能没有古土壤发育<sup>[45]</sup>。另外,在使用湖泊沉积的同位素、有机质、碳酸盐等指标来重建古气候环境时也会发现,它们与从风成沉积中解译得到的信息可能会有一定的矛盾<sup>[29]</sup>。因此,利用不同的沉积物或气候指标重建青海湖地区的气候环境会有局限性和

差异性,需要谨慎使用,且应当结合具体环境条件与多个指标和方法来对比分析。但长久至今,风成沉积仍被视为能较好反映气候干湿和风沙活动强弱变化的环境指标<sup>[29]</sup>。

青海湖巨大的水体也是风沙物质的接收容器。河流和降水对风成沉积的侵蚀、风力输送、大气沉降会将风沙物质搬运进湖盆底部沉积。已有的定量研究也表明,风沙活动的物质输送对青海湖湖泊沉积的物质与化学组成,以及河湖水的化学性质具有较大的贡献<sup>[81,108-109]</sup>。学者们还认为,表层湖泊沉积Pb等重金属含量要比底层含量高,与人类生产生活排放和沙尘事件的物质输送相关<sup>[110]</sup>。此外,最新研究还发现:青藏高原东北部湖面的季节性封冻可能会影响风成沉积物粒度的空间分布。粗糙的冰面与风成沉积的低比热容使粗沙易被冰层捕获截留,而细沙继续经风力搬运,在湖岸的下风向处堆积,使下风向的风成沉积粒度较细<sup>[111]</sup>。笔者在2023年3月的青海湖考察中也发现了湖冰上的冰裂隙和冰缝中的风成沙,据此推测青海湖的季节性封冻可能也会对当地风沙物质的输送、分选、沉积过程产生影响。

### 3.4 风沙活动与风沙地貌

风力作为风沙活动驱动力的同时,也作为强大的外营力作用参与了地表地貌形态的塑造过程<sup>[72]</sup>,而以沙丘为代表的风积地貌是青海湖地区主要的风沙地貌类型<sup>[3]</sup>,其形态、分布与移动长期受风力作用的影响。如新月形沙丘的走向大多垂直于主风力方向<sup>[73]</sup>,但主风向季节性的变化会使沙丘的迎风坡发生季节性转变<sup>[17]</sup>,复杂的风况还会形成复合形态的沙丘<sup>[112]</sup>。金字塔沙丘的形成则与盛行风、山谷风以及湖陆风共同作用形成的多方向风相关<sup>[15]</sup>。但由于当前对青海湖地区的山谷风和湖陆风缺乏直接的观测资料,两者的形成过程、风力强弱与贡献程度还待考究,需要结合实地风速数据进行具体分析。

沙源、地表起伏、植被覆盖、水文条件等诸多因素能通过影响风沙活动的过程来影响沙丘的形成与发育。山地的风化剥蚀物质、裸露的河湖沉积及周边区域的沉积物为青海湖地区的沙丘发育提供了充足沙源。如在西岸湖滩一带,离湖岸和沙源区较近的地方风沙物质供应充足,沙丘发育高大;离湖岸和沙源区较远的沙丘则因沙物质供应相对不

足,发育低矮<sup>[20]</sup>。活化的古沙丘也会成为新的沙源,或成为现代沙丘发育的基础<sup>[19]</sup>。青海湖南北两侧的高大山脉控制了盛行风向,使风沙流在湖盆内主要沿西北-东南向输送物质<sup>[73]</sup>,致使湖东沙地的新月形沙丘链主要呈东北-西南走向<sup>[21,112]</sup>,而湖东沙地低缓的滩地和平原,以及高陡的山地斜坡等地形条件还有利于爬坡沙丘的形成<sup>[113]</sup>。但降水的增多与地下水位的上漲使沙丘含水量增加,沙丘的物质容重增大,结构稳定性增强,沙丘不易移动和被风蚀<sup>[98,114-115]</sup>,限制了风沙活动的物质搬运过程。这也有利于植被在沙丘表面生长恢复,阻碍沙丘的移动和发育,乃至改变沙丘的形态<sup>[116]</sup>。如在湖东沙地,大面积的沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等固沙植被的覆盖,阻碍了新月形沙丘链向湖的迁移<sup>[12,73]</sup>。湖泊水位下降,则使水下沙堤出露,扩大了可接受风蚀的裸露沙地面积,为沙丘发育与沙地扩张提供条件,并促使沙岛沙嘴发育与沙岛湖的形成<sup>[18]</sup>。

### 3.5 风沙活动与土地沙漠化

青海湖流域的生态环境较为脆弱,易受各种因素的扰动而发生环境恶化,且风沙活动的发生常伴随着土地沙漠化的发展。湖东沙地与湖西沙地是青海湖盆地主要的沙地分布区<sup>[117]</sup>,众多测年结果表明,湖东沙地的形成历史较为久远,并长期受气候变化的影响,经历多次扩张与收缩<sup>[40]</sup>。而因河流改道被废弃的水下三角洲,及经湖水动力作用改造的沙坝和沙滩为湖西沙地的形成奠定了物质基础<sup>[20]</sup>。随后,气候持续干旱、湖泊萎缩<sup>[25-27]</sup>、风沙流运输能力增强<sup>[118-119]</sup>,及原本存在的土地沙漠化问题等<sup>[120-123]</sup>,促使湖西沙地面积在20世纪60—90年代不断扩张,直至近20年,青海湖水位上涨将鸟岛淹没,湖西沙地面积才逐渐减少。此外,学者们常通过遥感监测技术对青海湖地区土地沙漠化程度<sup>[124]</sup>、土地景观格局<sup>[125-126]</sup>、沙漠化敏感性<sup>[121]</sup>等方面进行研究。尽管存在区域差异,但青海湖及周边的土地沙漠化面积曾经历了扩张、平稳和减少的过程,土地沙漠化程度也有阶段性变化,现今沙化土地面积减少趋势逐渐明显,未来土地沙漠化扩张将会不断减弱乃至逆转<sup>[122-123,127-128]</sup>。

较多的研究表明,风沙活动的主导因素与自然和人类活动的关系较为密切<sup>[62,129]</sup>。青藏高原上广布的风化剥蚀物质、古河湖沉积物<sup>[130]</sup>、退化的多年冻土<sup>[131]</sup>、质轻疏松的沙质土壤<sup>[122]</sup>,以及沙堤裸露与

古沙丘活化<sup>[19]</sup>等自然条件为风沙活动提供大量的物源。风力侵蚀<sup>[69]</sup>、河流冲刷<sup>[68]</sup>等外力作用则为风沙物质的搬运提供主要的动力条件。而气候因素对青海湖地区植被、水文、土壤、生物等条件的影响则为风沙活动的发生提供环境条件。至于人为因素,一方面,人口增加、人类耕作、放牧、城建等人类生产生活对当地自然环境造成破坏,加剧了沙漠化的进程<sup>[129]</sup>;但另一方面,人类退耕还林还草、围栏与封禁、设立草方格等防风固沙与生态治理工程措施,以及大范围的光伏发电基地建设又改善了局部地区的气候与环境条件,使风沙活动减弱,沙漠化受遏制乃至逆转<sup>[122,127,132-134]</sup>。目前,对于气候与人为因素对风沙活动的影响,及各因素作用的贡献比例还存有争议。有学者认为,人为因素对青藏高原沙漠化的影响程度还未超过气候变化的影响<sup>[72]</sup>,但也有学者认为,人类活动的增强是造成2.0 ka BP以来青藏高原东北部风沙活动的强度变化存在时空差异的主要原因<sup>[62]</sup>。

## 4 存在问题与展望

综上所述,尽管当前针对青海湖地区的风沙活动研究已取得一定的进展,但仍有许多问题有待讨论解决和深入探索。在古环境与年代学方面,学者们已基于多个风成沉积剖面提取的信息,重建了青海湖地区地质历史时期的环境演变过程,但青海湖地区属于高海拔地区,并处于中国季风区的边缘,属于干旱区与湿润区的交错地带,历史气候环境复杂多变,风沙活动的起始时间、强度变化、降水变化等环境演变过程与周边区域乃至全球环境存在差异,因此需要进行一定的对比研究,从而加深对青海湖地区古气候环境与风沙活动变化的认识。虽然学者们常基于环境代用指标来反演古气候环境变化,但不同指标对气候环境变化的敏感性不同,响应的气候环境条件也有差异,因此,在研究沉积环境时应结合多个指标和方法来对比分析。此外,不同测年技术的精度存在差异,且部分风成沉积会被侵蚀,或出现沉积间断和年代倒置,因此在青海湖沙地的演化过程、历史风沙活动、气候环境变化等方面还有许多细节问题未能解决,年代框架建立也还不够完善,需要采取更多更高密度的沉积记录获取更精确更系统的年代数据,以弥补年代认知的不足和差异。

在风沙活动过程方面,基于单独的气象站点数



据未必能准确地反映区域风况,应根据具体的区域状况,多样点布设测量仪器,以获取更准确的监测资料。这也有助于对风沙活动的具体沙源、活动轨迹、输送规律等内容进行区域化和分辨率更高的研究分析。当前,针对青海湖地区现代风成地貌的演化过程,诸如沙丘的形态、分布与移动等方面,还有待讨论与解释。在影响土地沙漠化的因素及其具体贡献比例、阶段性与未来的发展趋势,以及湖泊演化与风沙活动、沙地演变间的关系等方面则需要进行更多尺度更定量化的研究,以便能更客观地理解复杂过程。另外,青海湖的封冻期集中在冬春季,对应的是风沙活动多发的时段,前述提及了湖冰对风成沉积粒度分布的影响,也在野外考察中发现青海湖冰面上存在风成沙。因此,青海湖的季节性封冻对风沙物质的沉积过程有怎样的影响,也是日后值得深入研究的内容。

### 参考文献:

- [1] 潘保田,李吉均.青藏高原:全球气候变化的驱动机与放大器:III.青藏高原隆起对气候变化的影响[J].兰州大学学报(自然科学版),1996,32(1):108-115.
- [2] 郑度,李炳元.青藏高原自然地理研究的进展[J].地理学报,1990,45(2):235-244.
- [3] Dong Z B, Hu G Y, Qian G Q, et al. High-altitude aeolian research on the Tibetan Plateau [J]. Reviews of Geophysics, 2017, 55: 864-901.
- [4] Dong Z W, Brahney J, Kang S C, et al. Aeolian dust transport, cycle and influences in high-elevation cryosphere of the Tibetan Plateau region: new evidences from alpine snow and ice [J]. Earth-Science Reviews, 2020, 211: 103408.
- [5] 薛红盼.青海湖北部地区全新世风成沉积记录的环境变化[D].西宁:中国科学院青海盐湖研究所,2021.
- [6] Stauch G. Geomorphological and palaeoclimate dynamics recorded by the formation of aeolian archives on the Tibetan Plateau [J]. Earth-Science Reviews, 2015, 150: 393-408.
- [7] 赵亚娟.末次冰消期以来青海湖西岸风成沉积记录的高密度光释光年代学及环境演变[D].西宁:青海师范大学,2017.
- [8] E C Y, Zhang J, Chen Z Y, et al. High resolution OSL dating of aeolian activity at Qinghai Lake, Northeast Tibetan Plateau [J]. Catena, 2019, 183: 104180.
- [9] 鄂崇毅,曹广超,侯光良,等.青海湖江西沟黄土记录的环境演变研究[J].海洋地质与第四纪地质,2013,33(4):193-200.
- [10] Lu H Y, Zhao C F, Mason J, et al. Holocene climatic changes revealed by aeolian deposits from the Qinghai Lake area (northeastern Qinghai-Tibetan Plateau) and possible forcing mechanisms [J]. The Holocene, 2010, 21(2): 297-304.
- [11] 安芷生,吴国雄,李建平,等.全球季风动力学与气候变化[J].地球环境学报,2015,6(6):341-381.
- [12] 陈骥.青海湖现代沉积体系研究[D].北京:中国地质大学(北京),2016.
- [13] 边千韬,刘嘉麒,罗小全,等.青海湖的地质构造背景及形成演化[J].地震地质,2000,22(1):20-26.
- [14] 陈克造,黄第藩,梁狄刚.青海湖的形成和发展[J].地理学报,1964,30(3):214-233.
- [15] 陈骥,张万益,姜在兴,等.环青海湖地区风场特征及其对沉积体系的影响[J].中国地质,2021,48(6):1935-1946.
- [16] 师永民,王新民,宋春晖.青海湖湖区风成沙堆积[J].沉积学报,1996,14(增刊1):234-238.
- [17] Hu G Y, Dong Z B, Zhang Z C, et al. Wind regime and aeolian landforms on the eastern shore of Qinghai Lake, Northeastern Tibetan Plateau, China [J]. Journal of Arid Environments, 2021, 188: 104451.
- [18] 张登山,王彬.青海湖中沙堤的形成及其对湖水水位的影响[J].干旱区资源与环境,1991,5(1):96-102.
- [19] 姚正毅,李晓英,肖建华.青海湖滨土地沙漠化驱动机制[J].中国沙漠,2015,35(6):1429-1437.
- [20] 宋春晖,方小敏,师永民,等.青海湖西岸风成沙丘特征及成因[J].中国沙漠,2000,20(4):443-446.
- [21] 侯光良,许长军.利用(RS)和(GIS)对青海湖环湖沙地分布等情况的调查研究[J].青海环境,2005,15(3):105-107.
- [22] 何东宁,赵鸿斌,张登山,等.青海湖盆地沙地特征及风沙化趋势[J].地理科学,1993,13(4):382-388.
- [23] 张兆康.高密度光释光测年揭示青海湖流域千年尺度气候演变[D].西宁:青海师范大学,2023.
- [24] 胡梦珺,田丽慧,张登山,等.遥感与GIS支持下近30 a来青海湖环湖区土地沙漠化动态变化研究[J].中国沙漠,2012,32(4):901-909.
- [25] Cui B L, Xiao B, Li X Y, et al. Exploring the geomorphological processes of Qinghai Lake and surrounding lakes in the northeastern Tibetan Plateau, using multitemporal landsat imagery (1973-2015) [J]. Global and Planetary Change, 2017, 152: 167-175.
- [26] 杨璟,丁明涛,李振洪,等.Google Earth Engine支持下的青海湖空间格局演变分析[J].测绘地理信息,2022,48(5):1-6.
- [27] 祁苗苗,姚晓军,刘时银,等.1973-2018年青海湖岸线动态变化[J].湖泊科学,2020,32(2):573-586.
- [28] 祝存兄,史飞飞,乔斌,等.基于高分1号卫星数据的青海湖扩张及湖滨沙地变化特征分析[J].干旱区研究,2022,39(4):1076-1089.
- [29] Chen F H, Wu D, Chen J H, et al. Holocene moisture and East Asian summer monsoon evolution in the northeastern Tibetan Plateau recorded by Lake Qinghai and its environs: a review of conflicting proxies [J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 154: 111-129.
- [30] Liu X J, Lai Z P, Yu L P, et al. Luminescence chronology of aeolian deposits from the Qinghai Lake area in the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau and its palaeoenvironmental implications (CPCI-S) [J]. Quaternary Geochronology, 2012, 10(7): 37-43.

- [31] 李娜娜. 色度和粘土矿物记录的末次冰期间冰阶以来青海湖地区的环境演变[D]. 兰州: 西北师范大学, 2021.
- [32] 胡梦珩, 李娜娜, 张亚云, 等. 近 32 ka 以来青海湖古风成砂-古土壤序列色度参数变化特征及环境演变[J]. 第四纪研究, 2020, 40(5): 1105–1117.
- [33] 袁宝印, 陈克造, Bowler J M, 等. 青海湖的形成与演化趋势[J]. 第四纪研究, 1990, 10(3): 233–243.
- [34] 贾玉连, 施雅风, 范云崎. 四万年以来青海湖的三期高湖面及其降水量研究[J]. 湖泊科学, 2000, 12(3): 211–218.
- [35] David R, Ma H Z, David B M, et al. Paleoenvironmental and archaeological investigations at Qinghai Lake, western China: geomorphic and chronometric evidence of lake level history[J]. Quaternary International, 2010, 218(1/2): 29–44.
- [36] 胡梦珩, 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): 1240–1247.
- [37] Stephen C P, Ashok S, An Z S, et al. Luminescence age and palaeoenvironmental implications of a late Pleistocene ground wedge on the northeastern Tibetan Plateau[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2001, 12(2): 203–210.
- [38] Huang C, Lai Z P, Liu X J, et al. Lake-level history of Qinghai Lake on the NE Tibetan Plateau and its implications for Asian monsoon pattern: a review[J]. Quaternary Science Reviews, 2021, 273: 107258.
- [39] David B M, Ma H Z, David R, et al. Age constraints on the late Quaternary evolution of Qinghai Lake, Tibetan Plateau[J]. Quaternary Research, 2008, 69(2): 316–325.
- [40] 王中, 刘向军, 丛禄. 青海湖东岸末次冰期冰盛期和早全新世沙漠范围重建[J]. 盐湖研究, 2017, 25(2): 67–75.
- [41] Shen J, Liu X Q, Ryo M, et al. A high-resolution climatic change since the Late Glacial Age inferred from multi-proxy of sediments in Qinghai Lake[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2005, 48(6): 742–751.
- [42] Wang Z, Zhang F, Li X Z, 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.
- [43] Jin Z D, An Z S, Yu J M, et al. Lake Qinghai sediment geochemistry linked to hydroclimate variability since the last glacial[J]. Quaternary Science Reviews, 2015, 122: 63–73.
- [44] Colman S M, Yu S Y, An Z S, et al. Late Cenozoic climate changes in China's western interior: a review of research on Lake Qinghai and comparison with other records[J]. Quaternary Science Reviews, 2007, 26(17/18): 2281–2300.
- [45] Lu R J, Jia F F, Gao S Y, et al. Holocene aeolian activity and climatic change in Qinghai Lake basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 430: 1–10.
- [46] Shang Y, Lu R J, Jia F F, et al. Paleoclimatic evolution indicated by major geochemical elements from aeolian sediments on the east of Qinghai Lake[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2013, 5(3): 301–308.
- [47] Lai Z P, Kaiser K, Brückner H. Luminescence-dated aeolian deposits of late Quaternary age in the southern Tibetan Plateau and their implications for landscape history[J]. Quaternary Research, 2009, 72(3): 421–430.
- [48] Sun J M, Li S H, Muhs D R, et al. Loess sedimentation in Tibet: provenance, processes, and link with Quaternary glaciations[J]. Quaternary Science Reviews, 2007, 26(17/18): 2265–2280.
- [49] 常秋芳, 芦宝良, 赖忠平, 等. 青海南山风成沉积光释光年代学研究[J]. 盐湖研究, 2016, 24(2): 54–61.
- [50] 陈发虎, 汪世兰, 张维信, 等. 青海湖南岸全新世黄土剖面、气候信息及湖面升降探讨[J]. 地理科学, 1991, 11(1): 76–85.
- [51] Ding Z Y, Lu R J, Lyu Z Q, et al. Geochemical characteristics of Holocene aeolian deposits east of Qinghai Lake, China, and their paleoclimatic implications[J]. Science of The Total Environment, 2019, 692: 917–929.
- [52] 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.
- [53] An Z S, Colman S M, Zhou W J, et al. Interplay between the Westerlies and Asian monsoon recorded in Lake Qinghai sediments since 32 ka[J]. Scientific Reports, 2012, 2(1): 619.
- [54] Zhang J R, Liu Q, Yang L H, et al. Regional hydroclimates regulate the Holocene aeolian accumulation processes of the Qinghai Lake basin on the northeastern Tibetan plateau[J]. Catena, 2022, 210: 105866.
- [55] Xue H P, Zeng F M. Holocene environmental evolution in the Qinghai Lake area recorded by aeolian deposits[J]. Quaternary International, 2021, 580: 67–77.
- [56] 薛红盼, 曾方明. 青海湖东岸全新世风成沉积地球化学特征及其古气候意义[J]. 沉积学报, 2021, 39(5): 1198–1207.
- [57] Ji J F, Shen J, Balsam W, et al. Asian monsoon oscillations in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau since the late glacial as interpreted from visible reflectance of Qinghai Lake sediments[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233(1/2): 61–70.
- [58] 葛全胜, 刘健, 方修琦, 等. 过去 2000 年冷暖变化的基本特征与主要暖期[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 579–592.
- [59] Wei H C, E C Y, Zhang J, et al. Climate change and anthropogenic activities in Qinghai Lake basin over the last 8500 years derived from pollen and charcoal records in an aeolian section[J]. Catena, 2020, 193: 104616.
- [60] Liu X J, Lai Z P, Madsen D, et al. Last deglacial and Holocene lake level variations of Qinghai Lake, north-eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Quaternary Science, 2015, 30(3): 245–257.
- [61] 赵存法, 鹿化煜, 周亚利, 等. 青海湖地区冰消期以来气候变化的黄土记录[J]. 高校地质学报, 2009, 15(1): 135–140.
- [62] 唐道斌, 杨坤美, 曾兰华, 等. 2.0 ka 以来青藏高原东北部风沙活动增强的时空差异[J]. 地理学报, 2023, 78(9): 1–15.
- [63] Li X Z, Liu X J, He Y X, et al. Summer moisture changes in the



- Lake Qinghai area on the northeastern Tibetan Plateau recorded from a meadow section over the past 8400 yrs[J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 161: 1–9.
- [64] Xu H, Hou Z H, Ai L, et al. Precipitation at Lake Qinghai, NE Qinghai-Tibet Plateau, and its relation to Asian summer monsoons on decadal/interdecadal scales during the past 500 years[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 254(3/4): 541–549.
- [65] Yan D D, Wünnemann B, Hu Y B, et al. Wetland evolution in the Qinghai Lake area, China, in response to hydrodynamic and eolian processes during the past 1100 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 162: 42–59.
- [66] Wu D, Zhou A F, Zhang J W, 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: 106311.
- [67] Yang L H, Long H, Cheng H Y, et al. OSL dating of a megadune in the eastern Lake Qinghai basin (northeastern Tibetan Plateau) and its implications for Holocene aeolian activities[J]. *Quaternary Geochronology*, 2019, 49: 165–171.
- [68] Stauch G, IJmker J, Pötsch S, et al. Aeolian sediments on the north-eastern Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 57: 71–84.
- [69] Wang X Y, Yi S W, Lu H Y, 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.
- [70] 张晶, 鄂崇毅, 赵亚娟. 青海湖黑马河黄土的高密度光释光测年[J]. *地球环境学报*, 2018, 9(6): 557–568.
- [71] 王训明, 周娜, 郎丽丽, 等. 风沙活动对陆地生态系统影响研究进展[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(6): 627–635.
- [72] 董治宝, 吕萍. 70年来中国风沙地貌学的发展[J]. *地理学报*, 2020, 75(3): 509–528.
- [73] 陈骥, 姜在兴, 张万益, 等. “源-汇”沉积体系主导下的现代风成相发育模式探讨: 以青海湖东岸为例[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(5): 999–1008.
- [74] Liu X J, Cong L, An F Y, et al. Downwind aeolian sediment accumulations associated with lake-level variations of the Qinghai Lake during the Holocene, Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(1): 19.
- [75] 曾方明. 青海湖地区晚第四纪黄土的物质来源[J]. *地球科学*, 2016, 41(1): 131–138.
- [76] 陈东雪, 鲁瑞洁, 丁之勇, 等. 青海湖湖东沙地河湖-风成沉积记录的中晚全新世以来环境变化[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(6): 99–110.
- [77] 曾方明, 刘向军, 叶秀深, 等. 青海湖种羊场风成沉积的常量元素组成及其化学风化指示[J]. *盐湖研究*, 2015, 23(1): 1–7.
- [78] 郭晓宁, 王钰, 朱宝文, 等. 基于 HYSPLIT 模式的青海湖东部次浮尘污染过程的气象特征分析[C]//中国环境科学学会 2021 年科学技术年会议论文集(一). 天津: 中国环境科学学会, 2021.
- [79] 姚振, 张亚峰, 董峻麟, 等. 青海省东部地区大气降尘地球化学特征[J]. *中国矿业*, 2017, 26(增刊1): 170–172.
- [80] 席永帅. 青藏高原东北缘大气降尘的时空分异特征[D]. 西宁: 青海师范大学, 2016.
- [81] Wan D J, Jin Z D, Wang Y X. Geochemistry of eolian dust and its elemental contribution to Lake Qinghai sediment[J]. *Applied Geochemistry*, 2012, 27(8): 1546–1555.
- [82] 李璠, 徐维新, 祁栋林, 等. 1961–2015 年青海沙尘天气时空变化特征[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(2): 412–417.
- [83] Liu Z Y, Liu D, Huang J P, et al. Airborne dust distributions over the Tibetan Plateau and surrounding areas derived from the first year of CALIPSO lidar observations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2008, 8(2): 5957–5977.
- [84] 汪海娇, 田丽慧, 张登山, 等. 青海湖东岸沙地风沙活动特征[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(1): 49–56.
- [85] 张登山, 张佩, 吴汪洋, 等. 青海湖东克土沙区风沙运动规律及防治对策[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(2): 274–280.
- [86] 张乐春, 张登山, 汪海娇, 等. 青海湖湖东沙区风季起沙风况及输沙势特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(3): 91–97.
- [87] 吴汪洋, 张登山, 田丽慧, 等. 青海湖沙地人工治理沙丘的风速廓线变化特征[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(6): 162–167.
- [88] 白敏, 鲁瑞洁, 丁之勇, 等. 青海湖湖东沙地粒度端元分析及其指示意义[J]. *第四纪研究*, 2020, 40(5): 1203–1215.
- [89] 徐树建. 风成沉积物环境敏感粒度指标的提取及意义[J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(3): 95–98.
- [90] 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.
- [91] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components[J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152(3/4): 263–277.
- [92] 姜莹莹. 末次冰消期以来青海湖地区风成沉积记录的环境演变[D]. 西宁: 青海师范大学, 2015.
- [93] 展秀丽, 严平, 王宁, 等. 环青海湖固沙治理区与流动沙丘土壤特征研究[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(2): 292–297.
- [94] 袁杰, 曹广超, 鄂崇毅, 等. 环青海湖表层土壤沉积物粒度分布特征及其指示意义[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(3): 150–154.
- [95] 吕志强, 鲁瑞洁, 刘小榭, 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.
- [96] 张登山, 田丽慧, 鲁瑞洁, 等. 青海湖湖东沙地风沙沉积物的粒度特征[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(2): 203–211.
- [97] 展秀丽, 严平. 青海湖沙区风沙土壤机械组成特征[J]. *甘肃农业大学学报*, 2016, 51(1): 107–113.
- [98] 鲁瑞洁, 唐清亮, 桑艳礼, 等. 青海湖克土沙区不同类型沙丘土壤水分的动态变化[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(2): 111–115.
- [99] 杨龙, 孙永娟, 鄂崇毅, 等. 江西沟 1 号风成剖面地球化学元素特征及古环境意义[J]. *盐湖研究*, 2016, 24(2): 44–53.
- [100] 周笃珺, 马海州, 高东林, 等. 青海湖南岸全新世黄土地球化学特征及气候环境意义[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(2): 144–148.
- [101] 尚媛, 鲁瑞洁, 贾飞飞, 等. 青海湖湖东风成剖面化学元素特征及其环境指示意义[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(2): 463–469.

- [102] Wang L D, Lu R J, Ding Z Y, et al. Holocene aeolian activity in the Ganzhihe sandy land, Qinghai Lake basin[J]. *Quaternary International*, 2021, 598: 56–65.
- [103] Zeng F M, Liu X J, Li X Z, et al. Aquatic species dominate organic matter in Qinghai Lake during the Holocene: evidence from eolian deposits around the lake[J]. *Journal of Earth Science*, 2017, 28(3): 484–491.
- [104] 杜婧, 鲁瑞洁, 刘小楝, 等. 青海湖湖东沙地全新世风成沉积物磁化率特征及其环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(2): 175–184.
- [105] 铁生年, 马丽莉, 杨兴学. 青海湖周边沙漠化沙粒表面性质研究[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2011, 29(5): 17–20.
- [106] 铁生年, 姜雄. 青海湖周边沙漠化沙粒基本性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2014, 33(4): 715–719.
- [107] 史运坤, 鄂崇毅, 张晶, 等. 青海湖地区不同海拔黄土磁化率环境指示意义[J]. *地球环境学报*, 2021, 12(3): 256–268.
- [108] 董吉宝, 安芷生, 卢凤艳. 湖泊沉积物中风成和水成组分定量判据的初步研究: 以青海湖为例[J]. *地质力学学报*, 2010, 16(4): 402–411.
- [109] Jin Z D, You C F, Yu J M, et al. Seasonal contributions of catchment weathering and eolian dust to river water chemistry, north-eastern Tibetan Plateau: chemical and Sr isotopic constraints[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(F4): F002002.
- [110] Jin Z D, You C F, Yu J M. Toward a geochemical mass balance of major elements in Lake Qinghai, NE Tibetan Plateau: a significant role of atmospheric deposition[J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24(10): 1901–1907.
- [111] Hu G Y, Hu J J, Dong Z B, et al. Seasonal ice-covered lake surface likely caused the spatial heterogeneity of aeolian sediment grain-size in the source region of Yellow River, northeastern Tibetan Plateau, China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1150585.
- [112] 徐叔鹰, 徐德馥. 青海湖东岸的风沙堆积[J]. *中国沙漠*, 1983, 3(3): 11–17.
- [113] Dong M, Yan P, Liu B L, et al. Distribution patterns and morphological classification of climbing dunes in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Aeolian Research*, 2018, 35: 58–68.
- [114] 鲁瑞洁, 唐清亮, 张登山, 等. 青海湖湖东克土沙区固定沙丘土壤水分动态变化的初步研究[J]. *地球环境学报*, 2010, 1(3): 183–188.
- [115] 鲁瑞洁, 唐清亮, 魏殿生, 等. 青海湖湖东沙地不同沙丘降雨入渗研究[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(3): 797–803.
- [116] Wu W Y, Zhang D S, Tian L H, et al. Morphological change and migration of revegetated dunes in the Ketu Sandy Land of the Qinghai Lake, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2023, 15(7): 827–841.
- [117] 李森, 董玉祥, 董光荣, 等. 青藏高原土地沙漠化区划[J]. *中国沙漠*, 2001, 21(4): 418–427.
- [118] 宋春晖, 方小敏, 师永民, 等. 青海湖现代三角洲沉积特征及形成控制因素[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2001, 37(3): 112–120.
- [119] 林建才. 青海湖周围地区荒漠化土地动态问题的探讨[J]. *青海农林科技*, 2003(4): 25–27.
- [120] 赵超, 鲁瑞洁, 李金凤. 青海湖流域土地沙漠化及表土粒度特征[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(2): 276–283.
- [121] 赵明月, 赵文武, 靳婷, 等. 青海湖流域土地沙漠化敏感性评价[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(32): 237–242.
- [122] 张慧超, 沙占江, 张婷婷, 等. 20年来环青海湖区沙漠化土地的空间变化及其驱动力分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(3): 59–64.
- [123] 李小雁, 许何也, 马育军, 等. 青海湖流域土地利用/覆被变化研究[J]. *自然资源学报*, 2008, 32(2): 285–296.
- [124] 张明. 基于遥感数据的青海湖流域土地沙漠化评价研究[J]. *国土与自然资源研究*, 2016(3): 35–37.
- [125] 郭丽红, 沙占江, 马燕飞, 等. 环青海湖区20年来沙漠化土地景观格局空间变化分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(3): 119–123.
- [126] 马燕飞, 沙占江, 牛志宁, 等. 环青海湖区沙漠化土地景观格局自相关分析[J]. *干旱区研究*, 2010, 27(6): 954–961.
- [127] 王静洁, 蔡延玲. 青海湖及其周围地区沙化土地变化动态研究[J]. *湖南林业科技*, 2016, 43(6): 81–89.
- [128] Wang H B, Ma M G, Geng L Y. Monitoring the recent trend of aeolian desertification using Landsat TM and Landsat 8 imagery on the north-east Qinghai-Tibet Plateau in the Qinghai Lake basin[J]. *Natural Hazards*, 2015, 79: 1753–1772.
- [129] 李庆, 张春来, 周娜, 等. 青藏高原沙漠化土地空间分布及区划[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(4): 690–700.
- [130] 铁生年, 李星, 李昀珩. 青海湖周边地区沙化现状和治理措施[J]. *青海科技*, 2009, 16(1): 22–26.
- [131] Yang M X, Wang S L, Yao T D, et al. Desertification and its relationship with permafrost degradation in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2004, 39(1): 47–53.
- [132] 马慧榕, 肖锋军, 董治宝, 等. 2000–2020年青海省共和县土地沙漠化动态及其驱动因素[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(6): 139–148.
- [133] 张慧超. 环青海湖区沙漠化土地变化及其成因分析[D]. 西宁: 青海师范大学, 2011.
- [134] 田丽慧, 张登山, 胡梦珩, 等. 1976–2007年青海省刚察县土地沙漠化驱动力分析[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(2): 493–500.



## Research progress on aeolian activity in the Qinghai Lake area, northeastern Tibetan Plateau

Mo Haokun, Hu Guangyin, Meng Huicong

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Qinghai Lake, located in the northeast margin of the Qinghai-Tibet Plateau and the transition region between the Qinghai-Tibet Plateau and the Loess Plateau, has always been an ideal area for the study of aeolian activity and aeolian sediments. Based on the existing results, we summarize research that improves our understanding of aeolian processes in the Qinghai Lake, including the distribution of sandy land, historical aeolian activity records, the provenance, transport process, and characteristics of aeolian sediments, aeolian geomorphology and land desertification. At present, the east and west of the lake are the main sandy land. Indicated by the grain size, chemistry and other sedimentary characteristics, the late Pleistocene, early Holocene and late Holocene were the main periods of aeolian activities and climatic variability in the Qinghai Lake. The provenance of the Hudong and the Huxi sandy land were different. The transport process is often affected by atmospheric circulation and regional wind conditions. In addition, the sandy land whose land desertification changes obviously under the influence of natural and human factors is covered with sand dunes, but the desertification degree has a tendency to weaken. The future research can be carried out in the evolution and differences of paleoclimate in Qinghai Lake, the establishment and perfection of chronology framework, aeolian sand activity process.

**Key words:** Qinghai Lake; aeolian activity; environmental change; aeolian sediment; Tibetan Plateau