

doi: 10.12029/gc20210620

陈骥,张万益,姜在兴,周宝洁,刘超,许文茂. 2021. 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, 48(6): 1935–1946.  
Chen Ji, Zhang Wanyi, Jiang Zaixing, Zhou Baojie, Liu Chao, Xu Wenmao. 2021. Characteristics of wind field around Qinghai Lake and its influence on sedimentary system [J]. Geology in China, 48(6): 1935–1946(in Chinese with English abstract).

## 环青海湖地区风场特征及其对沉积体系的影响

陈骥<sup>1,2</sup>, 张万益<sup>1</sup>, 姜在兴<sup>2</sup>, 周宝洁<sup>3</sup>, 刘超<sup>2</sup>, 许文茂<sup>4</sup>

(1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257015; 4. 北京科技大学, 北京 100083)

**摘要:** 为分析风场与沉积体系之间的耦合关系, 综合运用野外考察、遥感影像解译和气象数据综合分析等手段。分析结果表明: 风场的变化除了受控于盛行风系以及季风的变化以外, 还受到地貌、湖泊效应产生的湖陆风等因素影响。风场对青海湖沉积体系的影响体现在局部区域气候的干湿、物源的供给量、波浪和沿岸流的强弱程度等方面。局部区域气候的干湿差异性造成地表植被覆盖率有所不同, 导致地表的抗风化能力有所不同。抗风化能力较弱的地带为风砂堆积提供充足的物源。盛行风向产生的波浪和沿岸流对湖泊中的砂体产生较强的搬运和改造作用。

**关键词:** 青海湖; 风场; 沉积体系; 控制因素; 地质调查工程

**中图分类号:** P512.2<sup>1</sup>; P512.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–3657(2021)06–1935–12

## Characteristics of wind field around Qinghai Lake and its influence on sedimentary system

CHEN Ji<sup>1,2</sup>, ZHANG Wanyi<sup>1</sup>, JIANG Zaixing<sup>2</sup>, ZHOU Baojie<sup>3</sup>, LIU Chao<sup>2</sup>, XU Wenmao<sup>4</sup>

(1. Development and Research center, China Geological Survey, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257015, Shandong, China; 4. University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The field investigation, remote sensing image interpretation and comprehensive analysis of meteorological data were used to analyze the coupling relationship between wind field and sedimentary system. The analysis results show that the change of wind field is not only controlled by the change of prevailing wind system and monsoon, but also affected by geomorphology and lake land wind generated by lake effect and other factors. The influence of wind field on the Qinghai Lake sedimentary system embodies in the local area of dry and wet climate, source of supply, and degree of wave and the strength of the offshore current. The difference of dry and wet climate in local region results in the difference of vegetation coverage and the difference of weathering resistance. The weak weathering resistance zones provide ample source for sand accumulation. The waves and offshore current resulting from prevailing wind direction strengthen the transport and transform function for sand body.

收稿日期: 2019–01–17; 改回日期: 2019–06–15

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190464)和国家重大科技专项(2011ZX05009–002)共同资助。

作者简介: 陈骥, 男, 1988 年生, 副研究员, 主要从事地质战略规划 and 石油地质综合研究工作; E-mail: chenji2007@foxmail.com。

通讯作者: 姜在兴, 男, 1963 年生, 教授, 主要从事沉积学与层序地层学研究工作; E-mail: jiangzx@cugb.edu.cn。

**Key words:** Qinghai Lake; wind field; sedimentary system; controlling factors; geological survey engineering

**About the first author:** CHEN Ji, born in 1988, male, associate researcher, engaged in geological strategic planning and comprehensive research of petroleum geology; E-mail: chenji2007@foxmail.com.

**About the corresponding author:** JIANG Zaixing, male, born in 1963, professor, mainly engaged in sedimentology and sequence stratigraphy; E-mail: jiangzx@cugb.edu.cn.

**Fund support:** Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190464) and the National Major Science and Technology Project (No.2011zx05009-002).

## 1 引 言

地质学家已普遍认为“现代是打开过去的钥匙”。利用比较沉积学和“将今论古”的方法论对地表沉积物展开深入研究也是国内外学者研究现代沉积的常用方法。早在20世纪60至70年代,为了深入了解湖泊沉积的沉积特征和生油能力,中国科学院下属的兰州地质研究所、微生物研究所、水生生物研究所和南京地质古生物研究所等组成青海湖综合考察队,对青海湖展开了多学科的综合研究,涉及了青海湖的地理概括、演化过程、水体的物理化学特征、水动力分带特征、微生物与有机质之间的相互关系以及湖底沉积物的地球化学特征和早成岩过程等方面(中国科学院兰州地质研究所等,1979)。

在1989—1991年,中国科学院兰州分院和中国科学院西部资源环境研究中心组织了兰州地质研究所、兰州高原大气物理研究所、冰川冻土研究所、西北高原生物研究所、青海盐湖研究所等有关科研人员,对青海湖及其周缘地区的气象、水文、沉积、水化学、稳定同位素和生物地球化学等方面展开深入研究,对冰后期以来的青海湖环境演变过程进行了恢复,并对其今后的发展做出预测(中国科学院兰州分院等,1994)。自此以后,对青海湖现代沉积的研究多集中在单一的沉积相上(师永民等,1996,2008;宋春晖等,1999,2000,2001;韩元红等,2015;陈骥等,2019)。

气候指的是某一地区多年时段大气的一种状态,也是各种天气过程的综合表现。气候要素包括气温、降水、蒸发、风力等。前人(李林等,2002,2005;李凤霞等,2008)对于青海湖地区的气候研究多集中气温、降水、蒸发等,却罕有人研究风场对青海湖现代沉积物平面展布的影响。韩元红等(2016)利用青海湖水深、地形和湖区多年的水文、气象数据资料,借助数值模拟技术,综合分析了青

海湖水动力特征。陈骥等(2018)以野外地质考察和遥感影像资料为基础,引入“源-汇”体系研究思路,详细分析倒淌河流域和青海湖东岸沙丘的沉积特征和控制因素。

笔者在青海湖现代沉积研究过程中,发现青海湖气候条件,尤其是风力变化特征对青海湖滨岸带及其周缘区域有着重要的影响。通过野外考察、遥感影像数据和气象数据的综合对比,研究环青海湖风力变化特征和控制因素,探讨风力特征与沉积体系之间的响应关系。

## 2 区域地理

青海湖是中国最大的内陆高原微咸水湖泊。青海湖地处青藏高原的东北部,位于 $36^{\circ}32' \sim 37^{\circ}15' N$ ,  $99^{\circ}36' \sim 100^{\circ}16' E$ 。湖区四周被高山环抱:北面是近东西走向的大通山,主峰海拔4200 m以上。湖区东面是呈北—北西走向的日月山。自北向南可将日月山分为三段:北段为海拔4025 m的团保山,中段为海拔4389 m的达坂山,南段为海拔4832 m的野牛山。湖区南面是呈北西西向延伸的青海南山。自西而东可将青海南山分为三段:西段由三列平行山脉组成,它们是切十字大坂(海拔3500 m)、中吾农山(海拔3800~4300 m)和茶卡北山(4300~4700 m),山脉向西延伸,成为青海湖盆地与柴达木盆地的分水岭;中段是塔温山、哈堵山和龙保欠山(海拔4200~4500 m),成为青海湖盆地与南侧的共和盆地的分水岭;东段是加拉山(海拔3800~4000 m),与野牛山共同组成青海湖盆地与贵德盆地的分水岭(图1)。青海湖的长轴方向(近东西向)约为106 km,横轴方向(近南北向)约为63 km,湖面海拔为3193~3198 m,面积为4264~4473 km<sup>2</sup>,环湖周长约360 km。湖面东西长,南北窄,呈近椭圆形,长轴北西西向约315°。湖水平均深度21 m,最大水深32 m,蓄水量达1000亿 m<sup>3</sup>左右。

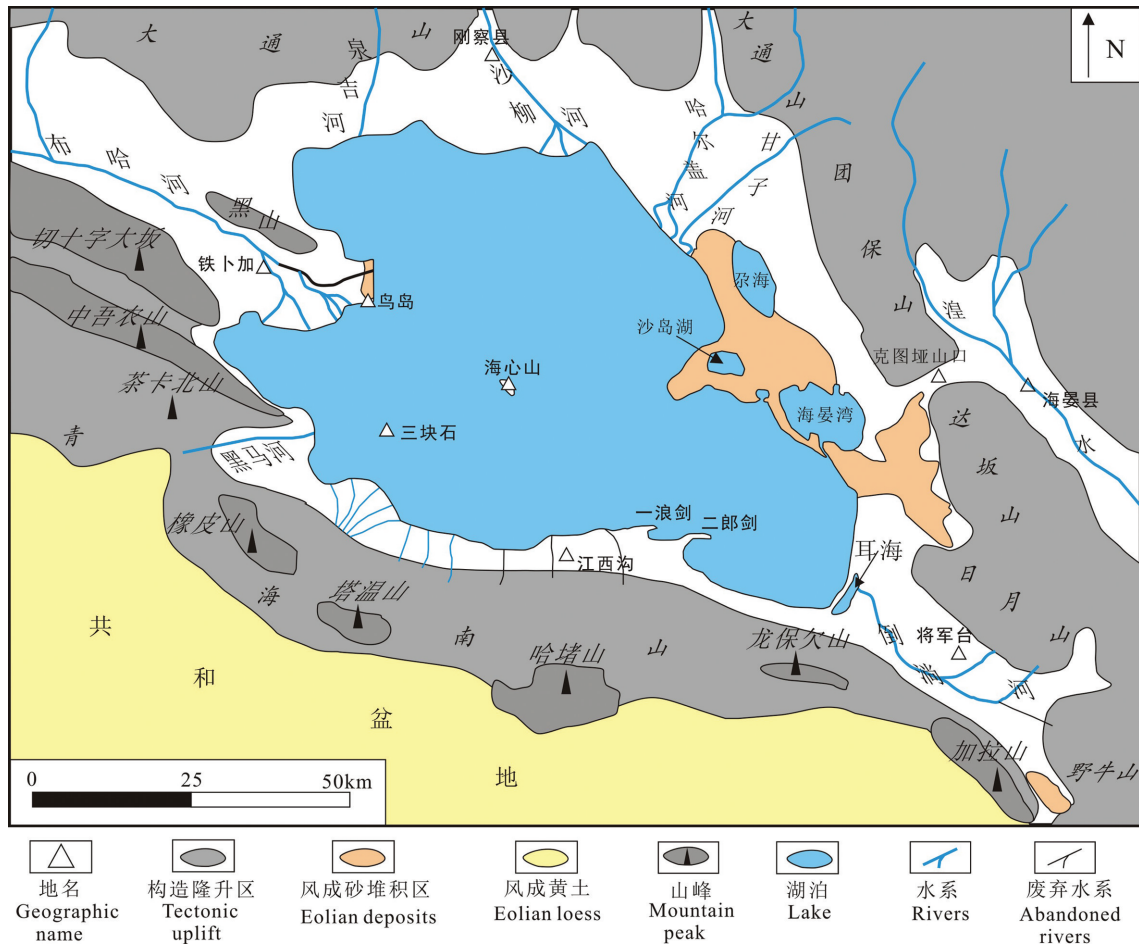


图1 青海湖地理概况简图  
Fig.1 Geographic map of Qinghai Lake

青海湖周围地区有内陆封闭型河流近40条,多数属于间歇河。水系具有明显的不对称性。流量较大的河流多分布在西面和北面,如布哈河、沙柳河、泉吉河和哈尔盖河等,流量较小的河流多分布在东面和南面,如甘子河、倒淌河和黑马河等。

发源于祁连山支脉的阿木尼尼库山的布哈河是流入青海湖的最大河流。全长约300 km,下游宽22 m,流域面积16570 km<sup>2</sup>,流向为西北向东南流入青海湖,年径流量近11亿 m<sup>3</sup>,占入湖总径流量的67%以上(李岳坦等,2010)。从河口至流域最高山顶的海拔为3198~5174 m,流域内海拔4000 m以上常年被冰雪覆盖。水量主要来自冰川雪水、上游降水以及地下径流的补给,中上游有多条支流汇入布哈河主河道。

发源于刚察县境内桑斯扎山的沙柳河,全长约106 km,流域面积约1442 km<sup>2</sup>,流向是由西北向东南

流入青海湖(李岳坦等,2010)。哈尔盖河位于青海湖短轴的东北缘,是本区第三大河,河长约100 km,流域面积约1420 km<sup>2</sup>,流向为东北向西南平均流量7.67 m<sup>3</sup>/s。倒淌河位于青海湖长轴方向的东南缘,是本区唯一一条流向为东南向西北的河流,其源头为日月山和野牛山的冰雪融水,流量较小,经常季节性干涸。

湖东岸有3个子湖,分别为尕海、新尕海和耳海。尕海位于青海湖的东北岸,地处团宝山的山前地带,面积约47.5 km<sup>2</sup>。长轴走向为近北-西向,长约12 km,短轴最宽约6 km。尕海的水深为8~9.5 m,水体性质为弱碱性,pH值为9.25,相对密度为1.0229,湖水含盐量为31.734 g/L。耳海位于青海湖东南缘,面积约8 km<sup>2</sup>,水深2~5 m,pH值为9.52,相对密度0.9983,含盐量为1.393~0.896 g/L。新尕海是近二十年由原来的沙岛闭合而形成,面积约4 km<sup>2</sup>。

### 3 数据来源

本次研究以野外考察为主,并基于详细的遥感影像资料和气象资料,笔者系统地分析了青海湖的气候条件和沉积体系之间的关系。气候资料主要来自青海省气象中心的刚察县气象站和江西沟气象站以及参考部分海晏县气象站的数据;物源方面的资料主要是查阅《青海湖综合考察报告》和《青海省区域地质志》总结所得;湖滨平原及其地形方面的资料主要是基于野外测量和遥感影像资料,其中遥感影像资料主要来自 Google Earth 及国家地理在线网。

### 4 气候背景

青海湖的气候属典型的高寒干旱大陆性气候,虽然有湖体对气温的调节作用,但年温差大,极端最高气温为 24.4~33.7℃,极端最低气温为-26.9~-35.8℃。降水量少,年降水量平均值在 291~579 mm,雨热同季,干湿季分明。环青海湖地区的平均气温上升幅度表现为:以南部最大,东部、西部、北部依次减小;秋冬季的平均气温增幅大于春夏季的平均气温增幅(严德行等,2011)。自 20 世纪 70 年代至今,青海湖的湿度呈现明显的下降趋势(王艳姣等,2003;许何也等,2007)。青海湖流域气候的干暖化,导致青海湖蒸发量增高,水面高程不断下降。这种气候的干暖化导致环青海湖地区荒漠化严重,出现明显的草地退化、河流流量减少和湖泊水位下降。

在青海省气象局,收集了距离青海湖较近的两个代表台站(北面的刚察和南面的江西沟)的气象资料(月平均气温、月平均相对湿度、月最多风向,月平均风速、月降水量和月蒸发量)。刚察站的气象资料为从 1961—2015 年。江西沟的气象资料从 1956—1962 年和 1974—1997 年。另外,收集了相关年份的铁卜加和海晏气象站的风向频率资料。4 个气象站的具体位置在图 1 中所示。

根据刚察站 1961—2013 年的气象资料:青海湖冬季的平均气温为-11.5℃,夏季平均气温 10℃,春秋季节气温在 0℃左右波动,从整体趋势来看,青海湖地区的气温有逐年缓慢上升的趋势,其中冬季气温的上升最为明显;青海湖地区降水量的季节分配不均,冬季降水量最少,平均仅 1 mm,夏季降水量最多,平均

为 84 mm,近 50 年来夏季降水量逐渐上升,冬季降水量趋于稳定;青海湖地区四季的风速较为平均,相对而言春季风速最高,近 50 年来这一地区的风速逐年降低,平均风速由 4 m/s 降至 3.5 m/s 左右。

根据湖周边 4 个台站的风向资料的统计,计算出年的风向频率值,并绘制出风速玫瑰花图(图 2)。刚察气象站以北风为主,主要是由于此处受到行星风系(北风)的影响。江西沟气象站则常年盛行南风,主要受到青海湖的水体和青海南山山脉的影响。铁卜加气象站常年盛行北西西风,主要是北西西风在布哈河河谷的狭长地形被约束。海晏气象站位于山谷中,受到地形条件的约束,主要受到西北风和东南风(山谷风)的作用。

从年际气候条件来看,在 1974—1997 年间,江西沟气象站的月平均湿度为 57%,月平均降水量 34.87 mm,月平均蒸发量为 113.4 mm;刚察气象站的月平均湿度 54%,月平均降水量 31.81 mm,月平均蒸发量为 120.4 mm。结果显示刚察降雨量少,蒸发量大,湿度小,反映了南岸的气候比北岸的气候更湿润。

为了更好地对比刚察和江西沟两个地方的同一时间段内的气候,笔者以月为单位,将从 1—12 月的月平均气象资料依次对比,以寻找二者的相关性。从 4—10 月,刚察的月平均气温要高于江西沟的月平均气温;从 10—12 月和 1—4 月,刚察的月平均气温要低于江西沟的月平均气温;整体上来看,一年内刚察的月平均气温的变化幅度大于江西沟的月平均气温的变化幅度(图 3a)。在 1—4 月,刚察的月平均湿度比江西沟的月平均湿度稍微高点;在 4—12 月,刚察的月平均湿度与江西沟的月平均湿度相差不大,整体看来,在 5—8 月,刚察和江西沟的月平均湿度均有突变,主要是受到整个青海湖进入雨季的影响(图 3b)。在 1—5 月和 8—12 月,刚察的月降雨量和江西沟的月降雨量基本一致;在 5—8 月,江西沟的月降雨量明显大于刚察的月降雨量(图 3c);说明在夏季(雨季),青海湖南部的降雨量比北部的降雨量大。在 1—3 月和 10—12 月,刚察的月小型蒸发量与江西沟的月小型蒸发量基本一致;在 3—10 月,刚察的月小型蒸发量明显高于江西沟的月小型蒸发量(图 3d)。由于南北岸的地形因素,江西沟比刚察更靠近青海湖,受到湖泊效应的影响也更显著,表现为较小的温差,较多的降雨。

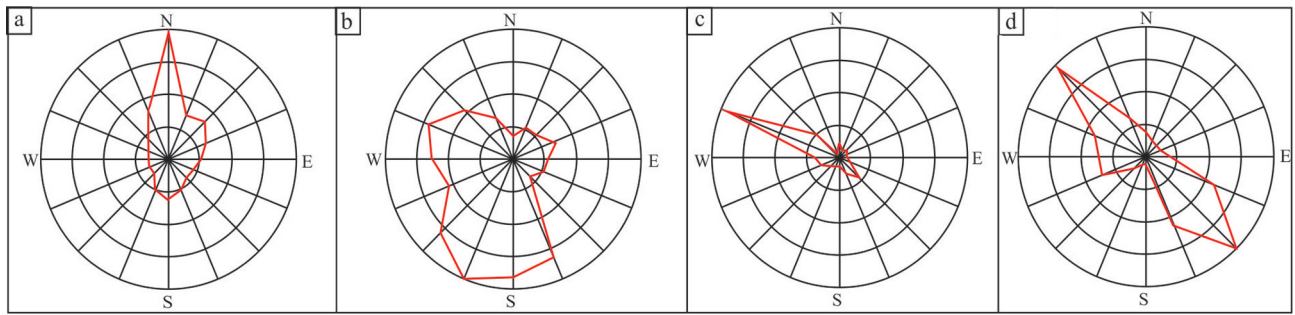


图2 青海湖4个气象站的年风向频率玫瑰花图

a—刚察气象站;b—江西沟气象站;c—铁卜加气象站;d—海晏气象站;4个气象站的位置见图1

Fig.2 Wind direction frequency rose figure of four weather stations of Qinghai Lake

a—Gangcha weather stations; b—Jiang Xigou weather stations; c—Tie Bojia weather stations; d—Hai Yan weather stations; the four weather stations location is in the Fig.1

### 5 沉积特征

#### 5.1 环青海湖区域岩性特征

青海湖周边山区主要岩性为岩浆岩及变质岩

(图4)。大通山的北部(布哈河谷北侧)出露下古生界浅变质岩和花岗岩,在刚察以西地层主要由中生界砂页岩组成,以东则出露前震旦系及震旦系变质岩(青海省地质矿产局,1991)。湖区东面的日月山

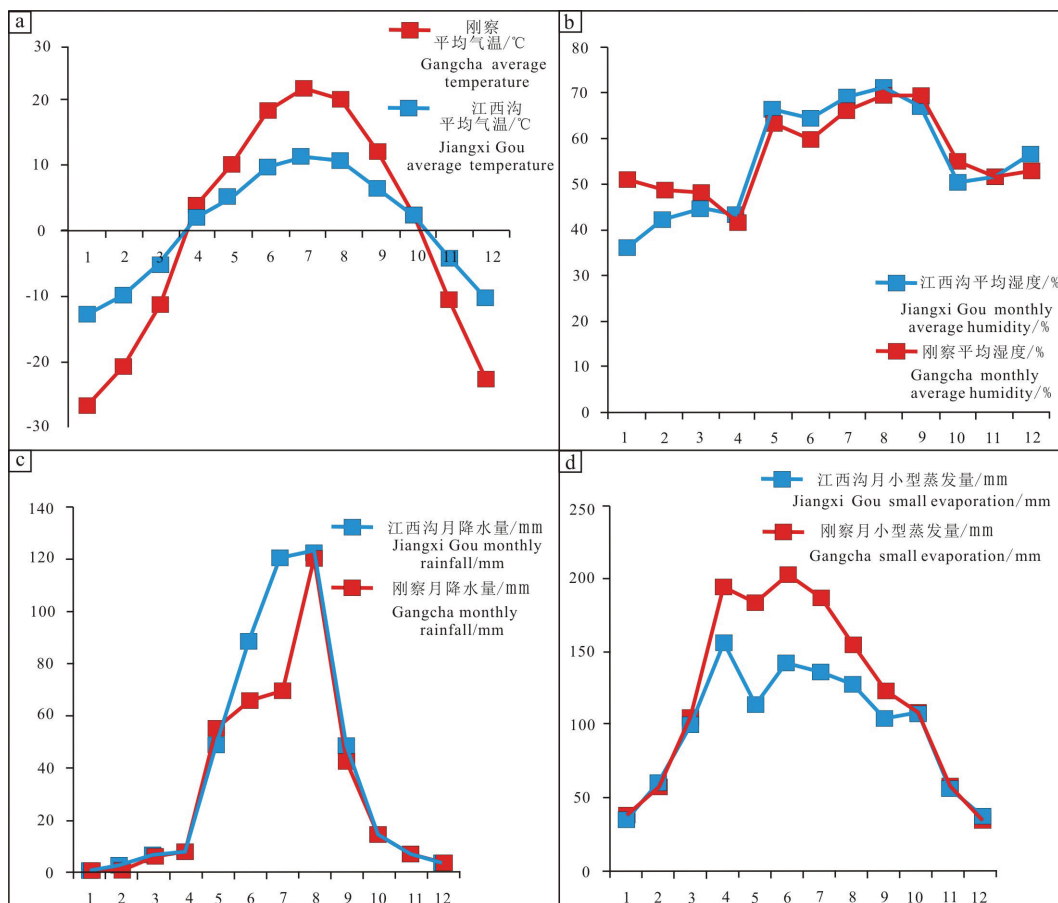


图3 刚察气象站和江西沟气象站月平均气象资料对比折线图

a—月平均气温对比;b—月平均湿度对比;c—月降水量对比;d—月小型蒸发量对比

Fig.3 The monthly average meteorological line chart of the Gangcha weather station and Jiang Xigou weather stations

a— The average temperature contrast line chart; b—Monthly average humidity contrast line chart; c—Monthly rainfall contrast line chart; d—Small evaporation contrast line chart)

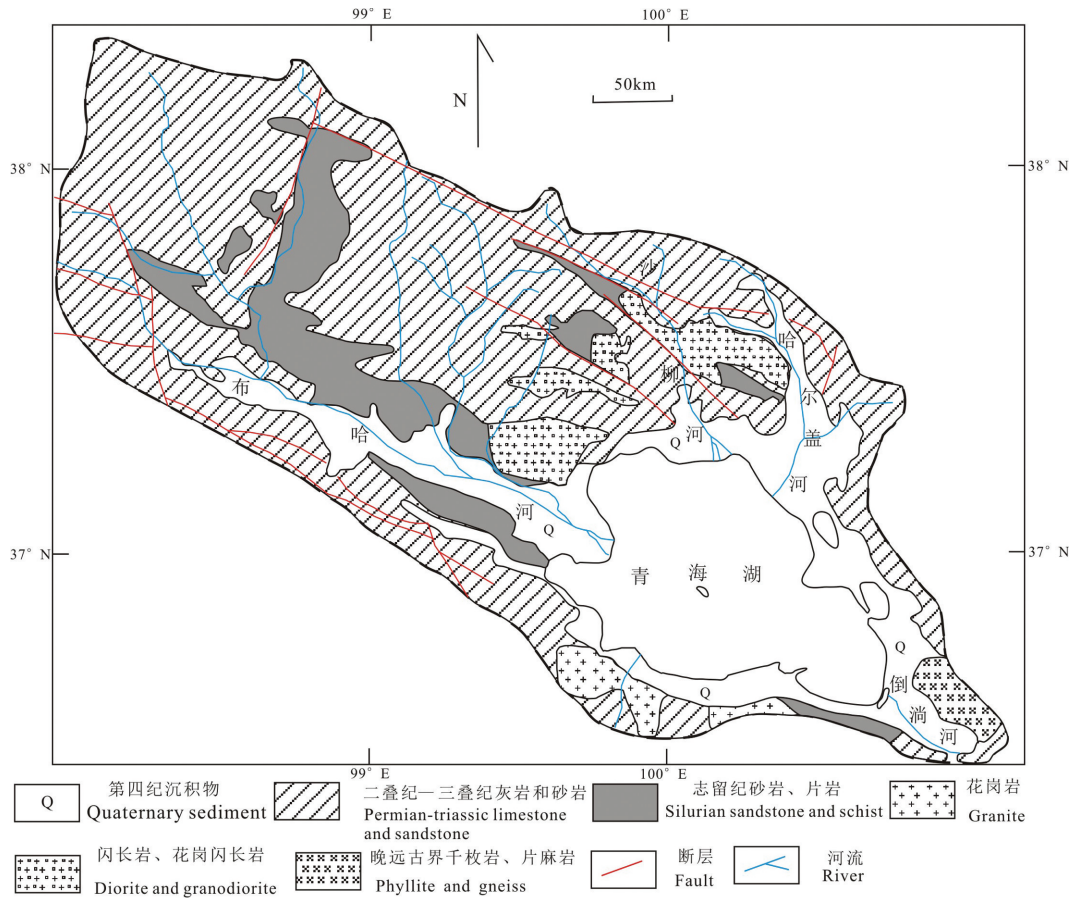


图4 青海湖流域地质图(据张飞,2009)

Fig.4 Geological map of the Qinghai Lake watershed (after Zhang Fei, 2009)

由前震旦系的片麻岩、花岗岩以及花岗闪长岩等组成。湖区南面的青海南山由二叠系、三叠系灰岩、变质砂岩、板岩、花岗岩、闪长岩、片麻岩等组成(张飞,2009)。

## 5.2 青海湖沉积体系特征

湖盆的西北端为布哈河辫状河-曲流河-三角洲沉积体系;湖盆的北端为大通山冲积扇-扇三角洲/辫状河-曲流河三角洲沉积体系;湖盆的东北端为哈尔盖河/甘子河-三角洲-潟湖-障壁岛沉积体系;湖盆的东端为冲积扇/滨岸-风成沉积体系;湖盆的东南端为辫状河-曲流河-三角洲-潟湖-障壁岛沉积体系;湖盆的西端为冲积扇-滨岸/扇三角洲沉积体系;湖泊存在北部凹陷、南部凹陷和东南凹陷,湖底沉积物具有明显的围绕凹陷中心分布的特点(图5)。

长轴方向西端的布哈河的上游为辫状河,河道宽,水流急,多砾石。下游为曲流河,以侧向加积为特

征。布哈河作为注入青海湖的最大河流,将大量的泥砂搬运至河口处,形成一个巨大的河控朵状三角洲。三角洲平原分流河道位于曲流河段之下,地势相对平坦,河道不断进行分叉伸向湖中。三角洲前缘发育多个河口坝和水下分流河道。水下分流河道延伸距离约500 m,其发育受控于湖平面的波动。在向湖方向为一个巨大的三角洲前缘斜坡,其上多为泥质粉砂沉积,一直延伸到半深湖-深湖区。

长轴方向东端的倒淌河的上游为辫状河,河道较窄,水流量较小。下游为曲流河,发育有牛轭湖、决口扇等沉积微相。受到古湖堤的影响,倒淌河在注入耳海之前形成一个狭长的水道。在倒淌河口附近发育有一个小规模三角洲。

短轴方向的青海南山和团保山-达坂山前多发育山麓冲积扇。这与短轴方向的高山地形较陡有关。青海南山的北端形成一个典型的靠山型扇三角洲。青海南山的南端和南端的滨岸地带多发

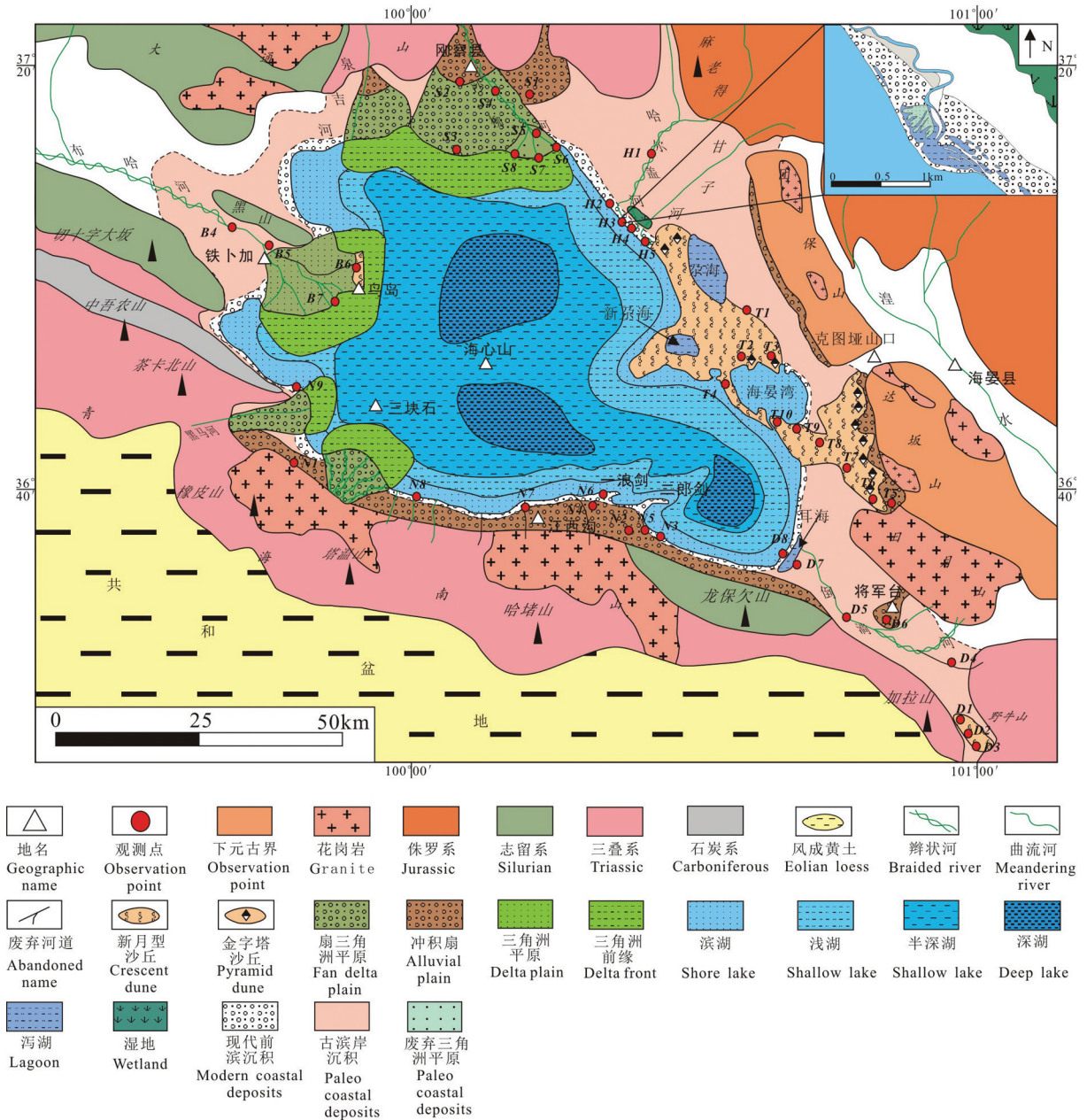


图5 青海湖沉积体系平面展布图  
 Fig.5 Plane of Qinghai Lake sedimentary system

育沿岸砾砂坝和沙嘴。大通山的山口形成以水流作用为主的刚察冲积扇和以泥石流作用为主的果洛冲积扇。刚察冲积扇向湖推进形成扇三角洲后,现今的沙柳河重新切割刚察冲积扇,形成一个曲流河三角洲。

哈尔盖河和甘子河在入湖口处,形成三角洲-泻湖-障壁岛沉积体系和障壁岛-水道-泻湖沉积体系以及喇叭状河口。团保山的山麓冲积扇逐渐过渡为湖滨平原。大面积的风成堆积物将尕海、新尕海和海

晏湾与青海湖主体分割开。达坂山的山麓地带冲积扇逐渐过渡为金字塔沙丘和新月形沙丘。

## 6 风力对沉积体系的影响

青海湖湖流域虽然地处内陆,但由于受到来自西南方向的暖湿气流和高原季风,加上湖泊自身的湖泊效应和西风带系统的频繁过境,导致该区的降水量比其他内陆地区丰富。年降水量由湖北山区向南逐渐较小,但在黑马河的降水量为一个高值区

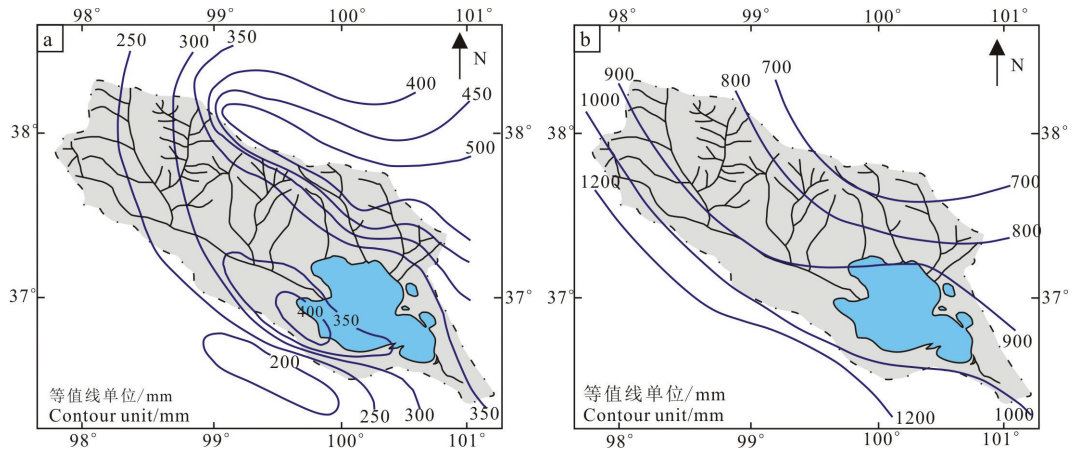


图6 青海湖流域多年平均降水量等值线图(a)和青海湖流域多年平均蒸发量等值线图(b)

Fig.6 Perennial mean precipitation contour map (a) and perennial mean evaporation contour map of Qinghai Lake Basin (b)

域(图6a)。前文地理概况中对比分析江西沟和刚察的降雨量,也指示了这一带降雨量较高的特征。而造成这种现象可能与此处地形有利于空气的抬升,从而易于形成降雨有关。

蒸发量是青海湖流域内水量的主要损失途径,多年平均蒸发量1000~1800 mm(20cm口径蒸发皿观测值)。蒸发量的变化趋势与降雨量的变化趋势相反,是由北向南蒸发量逐渐增加(图6b)。

对比可发现,黑马河一带与湖东沙区一带的年平均蒸发量相近,但前者的年平均降水量远高于后者的年平均降水量。因此,前者的地表湿度高于后者。这一点在地表植被覆盖程度和发育也有所体现,前者多发育喜湿性的温性草原,后者多发育灌丛类和沙棘类植物。

正是由于这种地表的干湿度和植被覆盖程度的差异性,风化剥蚀产生的沉积物也各有不同。西岸的植被覆盖率较高,较难被风化剥蚀,风化产物

多为砾石;东岸的植被覆盖率较低,易于被风化剥蚀,风化产物多为砂。两种风化产物的不同,导致西岸多发育砾砂质湖滩沉积(图7a),东岸多发育大面积的风成沙丘(图7b)。西岸偏湿润性的气候导致泥石流沉积和滨岸沉积中普遍发育有灰黑色泥质沉积物,东岸干燥性的气候导致泥质沉积物中多以红褐色为主,可见钙质结核。

风场的变化除了受控于盛行风系以及季风的变化以外,还受到地貌、湖泊效应产生的湖陆风等影响。青海湖新近纪以来的新构造运动存在明显的区域差异。青海南山的隆升幅度要比团宝山—达坂山一线的隆升幅度要大的多。根据DEM高程遥感数据,编制出青海湖西岸和东岸的三维地貌图。青海湖西岸的青海南山地貌高度较高,整体形态像一堵墙(图8a);青海湖东岸的日月山—团宝山则为区域隆升形成的层状地貌(图8b)。

而这种地形地貌上的差异性,加上湖陆风的作



图7 青海湖西岸的野外照片(a)和青海湖东岸的野外照片(b)

Fig.7 Field photos of the western coast (a) and the eastern coast (b) of Qinghai Lake



用,影响了区域风场,进而影响区域降水量产生差异(图9)。在盛行西北风的情况下,青海南山的南侧是广阔的共和盆地,受到共和盆地地形和热力作用共同影响,南侧地面盛行偏南气流。青海南山的北侧紧邻青海湖,盛行的西北风和湖风的作用,携带着水蒸气的气流导致在江西沟—黑马河一带降雨量远高于其他地区。团宝山—日月山系多山峰,每个山峰南北侧昼间的谷风会在山峰辐合抬升,众多山峰形成的祁连山群谷风的抬升作用下容易形成沿山脊的对流云带,在高空西北气流的推动下移到西侧,是造成东侧湟水河谷的降雨量比西侧湖东沙区的降雨量大。团宝山—日月山的山前则在盛行西北风和山谷风以及湖陆风的共同作用下形成多方向的风,从而形成金字塔沙丘。

风对于滨岸带现代沉积物的作用体现在盛行西北风和北风作用下产生长期的风生波浪和风壅水以及沿岸流。风生波浪和沿岸流将江西沟一带的沉积物搬运至一浪剑和二浪剑一带形成沙嘴。风生波浪和沿岸流作用于哈尔盖河北侧支流的河口处,形成长条状的沿岸坝和泻湖,使得哈尔盖北侧支流无法直接注入青海湖。风生波浪和风壅水作用于哈尔盖河南侧支流的河口处,形成喇叭状河口和湖水顺河而上的现象。风生波浪和风壅水作用于甘子河河口处,形成障壁岛—水道—泻湖沉积。长期的波浪和沿岸流作用使得尕斯库勒湖和海晏湾早已闭合。伴随着湖平面的下降,新尕斯库勒湖和海晏湾也逐渐闭合。由此看来,青海湖的东北岸—东岸—南岸普遍受到西北风和北风产生的波浪和顺时针方向的沿岸流作用。

风不仅仅通过波浪和沿岸流以及风壅水作用于湖平面以下的滨岸带,而且风力直接作用于湖平面以上的滨岸带和山麓地带。由于长期的风力作用于团宝山和达坂山的山麓地带以及山前平原地带,加上该区域的降水量较少,长期接受日照,蒸发量相对较高,地表易于被风化和吹蚀,从而形成大面积的风沙堆积。鸟岛北侧的西岸风成沙丘是由于布哈河改道以后,原本三角洲平原被废弃,三角洲平原被风吹蚀、搬运和堆积而形成。长期的风力作用和暖干化气候,导致倒淌河河谷东南缘发育以新月形沙丘为主的浪玛舍岗沙区。

来自达坂山的哈尔盖河和甘子河以辫状河向下游推进,进入平原地带时转变成呈“L”型的曲流河。哈尔盖河北侧支流的流量相对较大,携带的泥沙沉积物也相对较多,多发育边滩。盛行西北风产生的波浪和沿岸流作用下,河流所携带的沉积物和滨岸沉积物被搬运和改造,形成一个狭长的障壁岛。障壁岛阻碍了三角洲向青海湖的进一步延伸,导致哈尔盖河北侧支流所产生的三角洲仅仅发育三角洲平原部分。在风暴浪的作用下,风暴浪侵蚀障壁岛顶部形成冲溢沟和冲越扇,大量的早期滨岸相的砾砂质沉积物被搬运至坝后泻湖中。风暴浪导致湖水越过障壁岛后溯河而上。风壅水与河流共同作用于哈尔盖河南侧支流的河口,导致其形成呈不对称形态的喇叭状河口。在风壅水的作用下,甘子河河口区除了喇叭状河口,还形成障壁坝—水道—泻湖沉积。周期性的风壅水作用将泻湖的细粒沉积物搬运至障壁坝前的滨岸带。风对青海湖东岸的山麓地带和湖滨地带的长期吹蚀、搬运和堆积

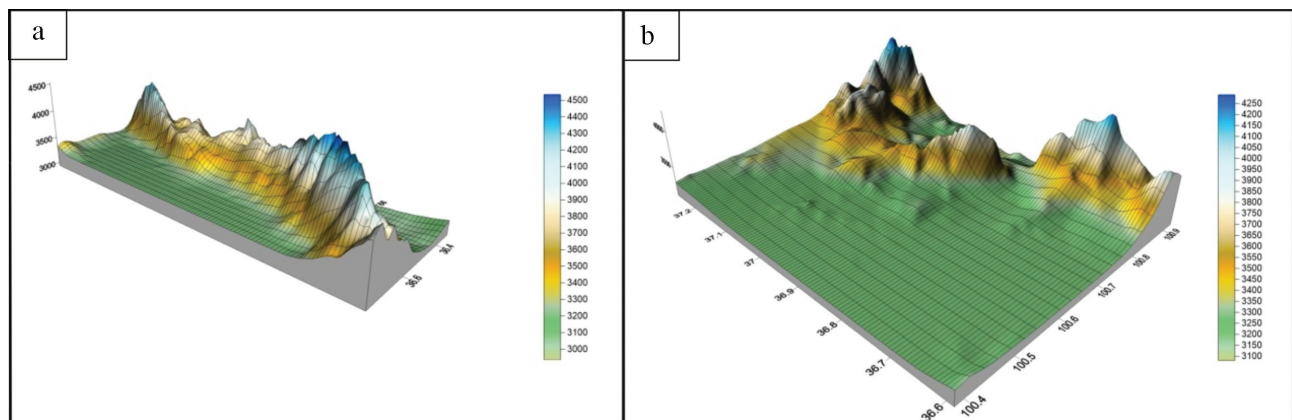


图8 青海湖西岸山地三维地貌(a)和青海湖东岸山地三维地貌(b)

Fig.8 Three-dimensional landscape of the western coast (a) and the eastern coast (b) of Qinghai Lake

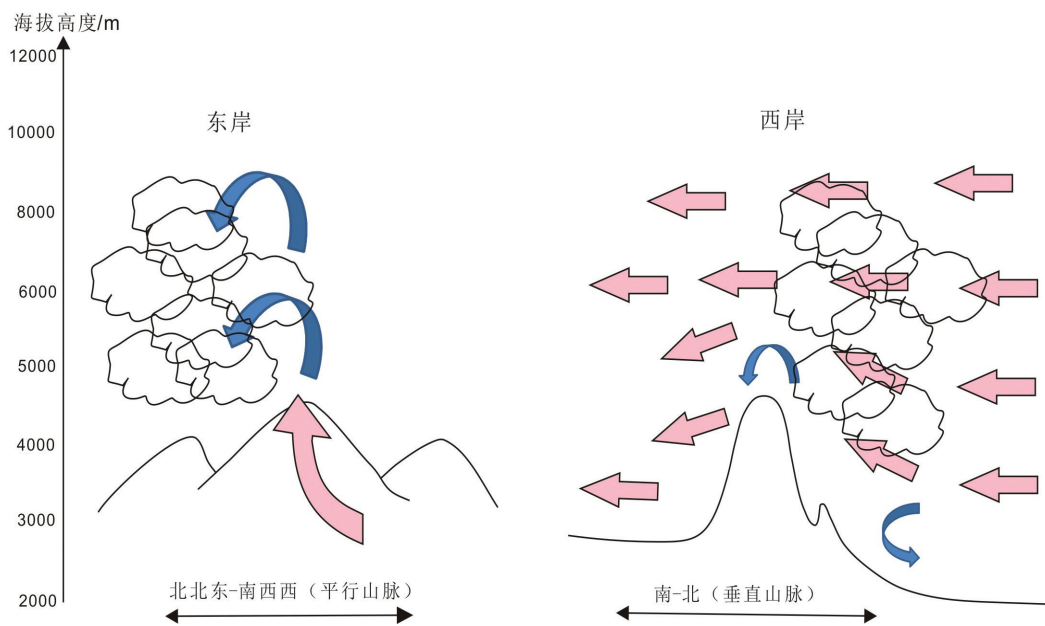


图9 青海湖地形云发展的模式图  
Fig.9. Terrain cloud development pattern of Qinghai Lake

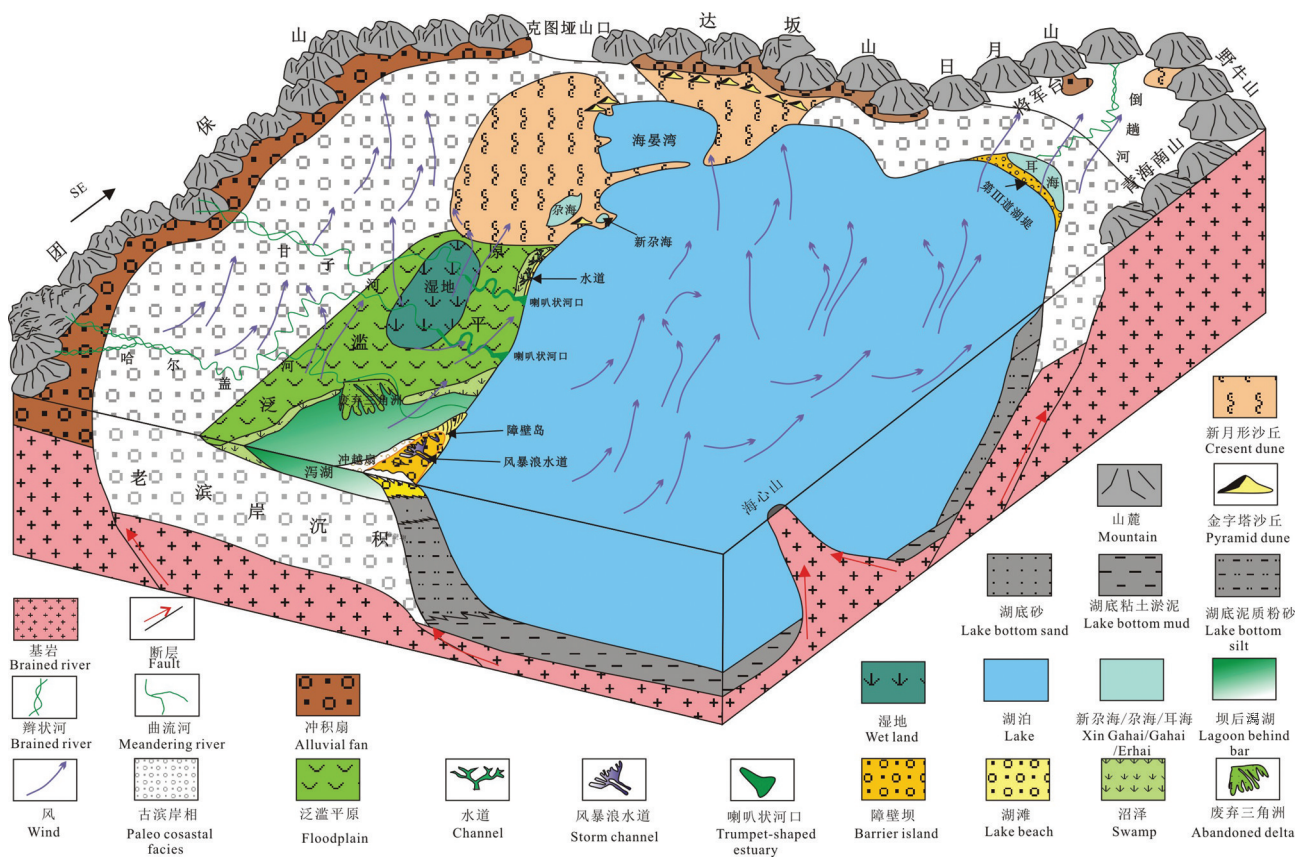


图10 青海湖东岸迎风侧沉积模式图  
Fig.10 Windward deposition pattern of the east coast of Qinghai Lake

作用,形成了大面积的风成沙堆积区。在盛行西北风、山谷风和湖陆风的共同作用下,在多风向的风力交汇区形成高大的金字塔沙丘。西北风产生的波浪和沿岸流作用于沙岛和海晏湾的滨岸带,导致滨浅湖的砂堆积形成沿岸沙坝。随着湖平面的下降,沿岸沙坝出露水面,并逐渐闭合形成障壁岛-潟湖沉积。日月山和野牛山的隆起,导致倒淌河的倒流和将军台冲积扇的形成。随着气候的暖干化,倒淌河的流量日趋减少,湖水位下降。在湖平面下降和盛行西北风产生的波浪及沿岸流的作用下,形成分割青海湖和耳海的第Ⅲ道湖堤,从而构成障壁岛-潟湖沉积。由此不难看出,在长期受到西北风和北风产生的波浪和沿岸流作用的青海湖东北岸-东岸-东南岸一带均发育有障壁岛-潟湖沉积(图10)。

## 7 结 论

(1)环青海湖地区的4个气象站指示了不同类型的风场特征。青海湖南岸的气候比北岸的气候更湿润,具有较小的温差和较多的降雨。风场的变化除了受控于盛行风系以及季风的变化以外,还受到地貌、湖泊效应产生的湖陆风等影响。

(2)风场对青海湖沉积体系的影响体现在:局部区域气候的干湿、物源的供给量、波浪和沿岸流的强弱程度等方面。局部区域气候的干湿差异性造成地表植被覆盖率有所不同,导致地表的抗风化能力有所不同。抗风化能力较弱的地带为风砂堆积提供充足的物源。盛行风向产生的波浪和沿岸流对湖泊中的砂体产生较强的搬运和改造作用。

## References

- Bureau of Geological and Mineral Resources of Qinghai Province. 1991. Regional Geology of Qinghai Province[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Chen Ji, Jiang Zaixing, Zhang Wanyi, Liu Chao, Xu Wenmao. 2019. The petrological characteristics and formation mechanism of Lake Beachrock in Lake Qinghai[J]. Journal of Lake Sciences, 31(6): 1783-1796 (in Chinese with English abstract).
- Chen Ji, Zhang Wanyi, Luo Xiao Lin, Jiangzaixing, Liu Chao. 2019. The discovery of microbe in the beach rock cement along the coastal zone of the Qinghai Lake [J]. Geology in China, 46(5): 1249-1250 (in Chinese with English abstract).
- Chen Ji, Jiang Zaixing, Liu Chao, Xu Wenmao. 2018. Depositional models of barrier shoreline sedimentary system under guidance of source-to-sink system theory: A case from Daotang river in Qinghai Lake[J]. Lithologic Reservoirs, 30(3): 71-79 (in Chinese with English abstract).
- Chen Ji, Jiang Zaixing, Zhang Wanyi, Liu Chao, Xu Wenmao. 2018. Discussion on depositional models of modern aeolian facies under the guidance of source-to-sink system theory: A case study of east coast of Qinghai Lake[J]. Journal of Desert Research, 38(5): 999-1008 (in Chinese with English abstract).
- Chen Liang, Chen Kelong, Liu Baokang, Hou Guangliang, Cao Shengkui, Han Yanli, Yang Long, Wu Yanpeng. 2011. Characteristics of climate variation in Qinghai lake basin during the recent 50 years[J]. Journal of Arid Meteorology, 29(4): 483-486 (in Chinese with English abstract).
- Han Yuanhong, Li Xiaoyan, Wang Qi, Hao Lewei, Tian Bing, Ma Xiaofeng, Zhu Jun, Liao Peng, Ji Hongjie, Ma Dongxu. 2015. Hydrodynamic control of sedimentary systems in shore zone of Qinghai lake[J]. Acta Sedimentary Sinica, 33(1):97-104.
- He Xuye, Li Xiaoyan, Sun Yongliang. 2007. Climatic change in the Qinghai lake watershed in recent 47 years [J]. Arid Meteorology, 25(2):50-54(in Chinese with English abstract).
- Lanzhou Institute of Geology, Institute of Aquatic Biology, Institute of Microbiology of Chinese Academy of Sciences. 1979. Comprehensive Survey Report of Qinghai Lake[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Lanzhou Institute, Research Center of Resources and Environment of Western China of Chinese Academy of Sciences. 1994. Evolution and Prediction of Modern Environment in Qinghai Lake [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Li Fengxia, Fu Yang, Yang Qiong, Xiao Jianshe. 2008. Climate change and its environmental effects in the surrounding area of Qinghai lake[J]. Resource Science, 30(3): 348-353 (in Chinese with English abstract).
- Li Lin, Wang Zhenyu, Qin Ningsheng, Wang Qingchun. 2002. Climate change and its impact on desertization around Qinghai lake[J]. Plateau Meteorology, 21(1): 59-65(in Chinese with English abstract).
- Li Lin, Zhu Xide, Wang Zhenyu, Wang Qingchun. 2005. Impacting factors and changing tendency of water level in Qinghai lake in recent 42 years[J]. Journal of Desert Research, 25(2): 689-696(in Chinese with English abstract).
- Li Yuetan, Li Xiaoyan, Cui Buli, Peng Haiying, Yi Wanjuan. 2010. Trend of streamflow in lake Qinghai basin during the past 50 years (1956-2007)—take Buha river and Shaliu river for examples[J]. Journal Lake Science, 22(5): 757-766 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ruixia, Liu Yujie. 2008. Area changes of lake Qinghai in the latest 20 years based on remote sensing study [J]. Journal Lake Science, 20(1):135-138(in Chinese with English abstract).
- Shi Xinghe, Li lin, Wang Qingchun, Liu Bei, Zhang Huanping, Liu

- Zhenjun. 2005. Climate change and its influence on water level of Qinghai lake[J]. *Meteorological Science and Technology*, 33(1):58–62(in Chinese with English abstract).
- Shi Yongmin, Dong Pu, Zhang Yuguang, He Yong, Hu Xinping. 2008. Revelation of modern deposits in Qinghai lake to precise exploration of lithologic hydrocarbon reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 28(1):54–57(in Chinese with English abstract).
- Shi Yongmin, Wang Xinmin, Song Chuihui. 1996. Eolian sand accumulation of Qinghai Lake[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 14(S1): 234–238(in Chinese with English abstract).
- Song Chuihui, Fang Xiaomin, Shi Yongmin, Wang Xinming. 2001. Sedimentary characteristics of modern lacustrine deltas in Qinghai lake and their controlling factors[J]. *Journal of Lanzhou university (Natural Sciences)*, 37(3): 112–120(in Chinese with English abstract).
- Song Chunhui, Fang Xiaomin, Shi Yongmin, Wang Xinming. 2000. Characteristics and formation of Aeolian dunes on western shore of the Qinghai lake[J]. *Journal of Desert Research*, 20(4): 443–446(in Chinese with English abstract).
- Song Chunhui, Wang Xinmin, Shi Yongmin, Cao Jijun, Wu Anbing. 1999. Sedimentary characteristics and microfacies of shore zone in Qinghai Lake[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(1): 51–57(in Chinese with English abstract).
- Wang Yanjiao, Zhou Xiaolan, Ni Shaoxiang, Tu Qipu, Deng Ziwan. 2003. Analysis on climate change in the region of Qinghai lake in the last 40 years[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 26(2): 228–235(in Chinese with English abstract).
- Yan Dexing, Zhu Baowen, Xie Qiyu, Deng Yonglong, Tang Zhongtao, Ren Deping, Yan Yuxia, Wang Hongli, Zhou Shaolong. 2011. Characteristics of temperature variation in regions around Qinghai lake[J]. *Meteorological Science and Technology*, 39(1): 33–37(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fei. 2009. *Water Chemistry and Chemical Weathering at Lake Qinghai and Lake Daihai Catchments* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈骥,姜在兴,张万益,刘超,许文茂. 2019. 青海湖湖滩岩的岩石学特征及其形成机制[J]. *湖泊科学*, 31(6): 1783–1796. DOI: 10.18307/2019.0623.
- 陈骥,姜在兴,刘超,许文茂. 2018. “源-汇”体系主导下的障壁滨岸沉积体系发育模式——以青海湖倒淌河流域为例[J]. *岩性油气藏*, 30(3): 71–79.
- 陈骥,姜在兴,张万益,刘超,许文茂. 2018. “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*, 38(5): 999–1008.
- 陈骥,张万益,罗晓玲,姜在兴,刘超. 2019. 青海湖滨岸带湖滩岩胶结物中发现微生物[J]. *中国地质*, 46(5): 1249–1250.
- 陈亮,陈克龙,刘宝康,侯光良,曹生奎,韩艳丽,杨龙,武彦朋. 2011. 近 50a 青海湖流域气候变化特征分析[J]. *干旱气象*, 29(4): 483–486.
- 韩元红,郝乐伟,王琪,马东旭,吉鸿杰. 2016. 盛行风控制下的青海湖水动力特征[J]. *人民黄河*, 38(3): 51–55.
- 韩元红,李小燕,王琪,郝乐伟,田兵,马晓峰,朱军,廖朋,吉鸿杰,马东旭. 2015. 青海湖水动力特征对滨湖沉积体系的控制[J]. *沉积学报*, 33(1): 97–104.
- 李凤霞,伏洋,杨琼,颜良东,肖建设. 2008. 环青海湖地区气候变化及其环境效应[J]. *资源科学*, 30(3): 348–353.
- 李林,王振宇,秦宁生,汪青春. 2002. 环青海湖地区气候变化及其对荒漠化的影响[J]. *高原气象*, 21(1): 59–65.
- 李林,朱西德,王振宇,汪青春. 2005. 近 42a 来青海湖水位变化的影响因子及其趋势预测[J]. *中国沙漠*, 25(2): 689–696.
- 李岳坦,李小雁,崔步礼,彭海英,伊万娟. 2010. 青海湖流域 50 年来 (1956–2007 年) 河川径流量变化趋势——以布哈河和沙柳河为例[J]. *湖泊科学*, 22(5): 757–766.
- 刘瑞霞,刘玉洁. 2008. 近 20 年青海湖湖水面积变化遥感[J]. *湖泊科学*, 20(1):135–138.
- 青海省地质矿产局. 1991. *青海省区域地质志* [M]. 北京:地质出版社.
- 师永民,董普,张玉广,何勇,胡新平. 2008. 青海湖现代沉积对岩性油气藏精细勘探的启示[J]. *天然气工业*, 28(1): 54–57.
- 师永民,王新民,宋春晖. 1996. 青海湖湖区风成沙堆积[J]. *沉积学报*, 14(S1):234–238.
- 时兴合,李林,汪青春,刘蓓,张焕平,刘振君. 2005. 环青海湖地区气候变化及其对湖泊水位的影响[J]. *气象科技*, 33(1):58–62.
- 宋春晖,方小敏,师永民,王新民. 2001. 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*, 37(3):112–120.
- 宋春晖,方小敏,师永民,王新民. 2000. 青海湖西岸风成沙丘特征及成因[J]. *中国沙漠*, 20(4): 443–446.
- 宋春晖,王新民,师永民,晁吉俊,武安斌. 1999. 青海湖现代滨岸沉积微相及其特征[J]. *沉积学报*, 17(1): 51–57.
- 王艳姣,周晓兰,倪绍祥,屠其璞,邓自旺. 2003. 近 40 a 来青海湖地区的气候变化分析[J]. *南京气象学院学报*, 26(2): 228–235.
- 许何也,李小雁,孙永亮. 2007. 近 47a 来青海湖流域气候变化分析[J]. *干旱气象*, 25(2): 50–54.
- 严德行,朱宝文,谢启玉,邓永龙,唐仲涛,任得萍,严玉霞,王红莉,周少龙. 2011. 环青海湖地区气温变化特征[J]. *气象科技*, 39(1): 33–37.
- 张飞. 2009. *青海湖和岱海流域水化学特征及现代化学风化作用* [D]. 南京:南京农业大学.
- 中国科学院兰州地质研究所,中国科学院水生生物研究所,中国科学院微生物研究所. 1979. *青海湖综合考察报告* [M]. 北京:科学出版社.
- 中国科学院兰州分院,中国科学院西部资源环境研究中心. 1994. *青海湖近代环境的演化和预测* [M]. 北京:科学出版社.