

青海湖水动力特征对滨湖沉积体系的控制^①

韩元红^{1,2} 李小燕³ 王琪¹ 郝乐伟¹ 田兵¹ 马晓峰¹
朱军⁴ 廖朋⁵ 吉鸿杰^{1,2} 马东旭^{1,2}

(1.甘肃省油气资源研究重点实验室/中国科学院油气资源研究重点实验室 兰州 730000;

2.中国科学院大学 北京 100049;3.中国科学院兰州文献情报中心 兰州 730000;

4.中国石油青海油田公司勘探开发研究院 甘肃敦煌 736202;5.中国石化江汉油田分公司物探研究院 武汉 430035)

摘要 青海湖盆地是我国西北内陆干旱区典型的山间断陷湖盆,与我国西北一些含油气盆地沉积特征十分相似,发育有一系列有利于油气储集的沉积体系。对青海湖沉积体系的研究,可以为陆相古含油气盆地沉积原貌的恢复提供借鉴。通过对比总结前人研究资料、实地考察以及对湖区近40年(1972~2010)来8张遥感图像的判读,分析了青海湖滨湖区沉积体系演变特征。同时,在青海湖水动力特征研究的基础上,通过沉积物输运模拟,结合每一区域沉积演变特征,分析该区域沉积体系形成演变的水动力成因机制,并预测未来一段时间内环青海湖滨湖区沉积体系演变趋势。研究表明:青海湖水动力特征主要表现出三个顺时针主旋回和湖湾和河流入湖口等处的次级旋回,沉积物输运和堆积趋势与水动力流特征对应一致,水动力特征控制着沉积体系的形成及演变;河流入湖口、沙岛—海晏湾、郎剑沙嘴以及东南湖湾等区域,是青海湖滨湖区沉积演变最明显的区域;今后较长时期内,沉积物输运、堆积趋势将不会发生大的改变。

关键词 沉积体系 演变特征 水动力 成因机制 青海湖

第一作者简介 韩元红 女 1988年出生 博士研究生 储层沉积学 E-mail: hanyuanhong222@163.com

通讯作者 王琪 男 研究员 E-mail: qiawang@lab.ac.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

青海湖地处青藏高原东北缘,是喜马拉雅运动的产物,湖区内发育着各种有利于油气储藏的沉积体系,是研究湖泊沉积与环境演变良好的天然实验室。早在20世纪60年代,为了研究湖泊沉积的生油能力,围绕陆相生油理论,中科院兰州地质所等^[1]对青海湖进行了多学科的综合考察。20世纪80年代中科院兰州分院和中、澳、瑞联合科学考察组等^[2]两次对青海湖的大型科学考察,把对青海湖的研究推上了一个新的阶段。20世纪90年以来,更多的科学家加入了研究青海湖的行列,研究内容涉及水文特征、气候环境、构造演化和沉积等多个方面,取得了丰富的研究成果^[3-15]。其中宋春晖,师永民等对青海湖的现代沉积体系如三角洲、滨湖、风成沙等的展布及成因进行了详细的研究^[16-20]。总之,上世纪60年代以来,我国学者对青海湖研究取得了丰富的成果。但是,前人对于沉积体系的研究大多更注重砂体定性研究,未能系统的阐述砂体时空演化的控制因素及其成

因机制。

沉积微相控制着储层的空间分布状况,造成砂体及其物性参数的空间分布差异,进而控制了油水的运移方式^[21]。对沉积微相特征及其形成机制的研究,一直是油气储层沉积学研究最重要、最常见的工作^[22-27]。滩坝等沉积微相在青海湖湖区十分发育,是良好的油气储集体,对于青海湖滨岸沉积微相形成演变及其成因机制的研究,可以为类似油气储集体沉积特征研究提供参考,还原陆相含油气盆地古沉积原貌,从而指导油气挖潜。本文通过多次实地考察,对前人研究资料的对比总结和遥感图像的判读,以及沉积物输运模拟,研究青海湖岸线形态和滨湖沉积体系的演变特征。同时,结合青海湖区常年盛行水动力特征,分析沉积体系形成及演变的水动力成因机制,探讨青海湖水动力特征及其与沉积物充填响应关系,预测青海湖滨湖区沉积体系未来演变趋势。

1 区域地质背景

青海湖是我国内陆最大的湖泊,也是我国第一大

①中国科学院西部行动计划项目“准东低熟气勘探潜力”(编号:KZCXZ-XB3-12)资助
收稿日期:2014-03-12;收修改稿日期:2014-06-10

咸水湖,位于青藏高原东北隅,流域面积为29 600多平方千米,湖泊面积4 000多平方千米,湖区海拔3 600~4 000 m,是第四纪初,距今2 Ma以来形成的地堑式不对称断陷湖泊。青海湖盆地处于南祁连槽向斜的东南部,东部和北部已跨入中祁连槽背斜带,南部紧临青海南山槽向斜,主要受北西西向、北北西向及近南北向三组断裂控制,使湖泊呈长条形不对称状态展布,北西南东向延伸。青海湖四周群山环绕,南、东、西和北面分别被青海南山、日月山、和大通山脉环绕,山地面积大,河谷和湖积平原所占面积较小(图1)。

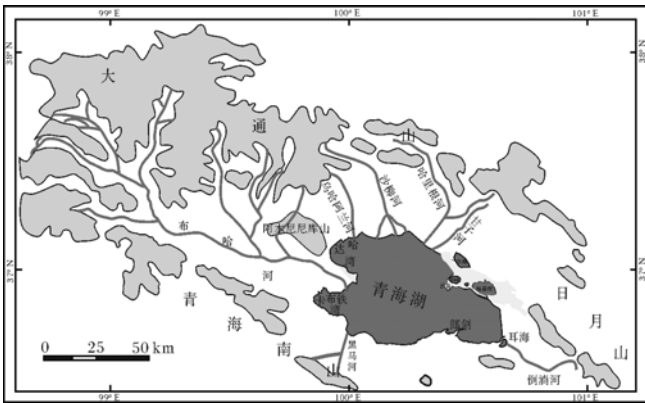


图1 青海湖区山系、水系展布图

Fig.1 River and mountain system around Qinghai Lake

2 研究方法

本次研究采用了资料调研、实地考察、遥感技术和计算机数值模拟技术等多种方法。通过:①上世纪60年代以来不同时期,青海湖湖岸形态和沉积特征研究资料对比分析;②青海湖先后两次(丰水期和枯水期)为期一个多月,环湖沉积微相和沉积体系实地考察;③近40年(1972~2010)来8张遥感图像的判读,分析沉积体系演变趋势;④水动力和泥沙输运计算机数值模拟技术运用,在模拟青海湖水动力特征的基础上,分析青海湖尤其是湖滨区域泥沙沉积物输运规律,并与沉积体系演变对应分析,探讨沉积演变与水动力特征的关系,分析沉积体系形成演变机制。

借助计算机数值模拟技术对青海湖常年盛行风下波浪、湖流等水动力特征进行了模拟研究。水动力模拟应用本区边界、地形和底床糙率和水文气象数据(包括湖区风场、入湖河流流量、湖泊蒸发降雨量等数据),基于二维非恒定浅水方程组进行计算。计算以补给湖泊的五条河流作为开边界,并输入了响应的流量(泥沙输运计算输入了相应的输沙量)。入湖布

哈河、沙流河、哈里根河、乌哈阿兰河和黑马河的流量分别为 $7.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $2.46 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.054 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $0.01 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中布哈河和沙柳河输沙量为 $3.55 \times 10^5 \text{ t/a}$ 和 $0.75 \times 10^5 \text{ t/a}$ ^[28]。另外,将计算机数值模拟计算水动力结果与前人实测+推测^[1]所得水动力特征图进行对比验证,得出合理的水动力特征及其多年演变特征。

泥沙模拟将沉积物以0.06 mm作为界限进行划分,粒径>0.06 mm为沙粒沉积物,粒径<0.06 mm为黏聚性沉积物,分别用沙模型和泥模型进行计算。中国科学院兰州地质研究所等^[1],在实测基础上,根据水深可大致将青海湖底床粒度分为3带:水深0~15 m, $Md > 0.02 \text{ mm}$;水深15~25 m, $Md = 0.01 \sim 0.02 \text{ mm}$;水深>25 m, $Md < 0.01 \text{ mm}$ 。在此基础上,本次研究进一步将粒度依据水深划分(图2)。

沙模型模拟了波浪和水流共同作用下的泥沙输运规律及底床演变趋势,模型利用STP的波周期公式计算输沙率,基于如下泥沙平衡方程:

$$\frac{\partial z}{\partial t_{mor}} - \frac{\partial S_x}{\partial X} + \frac{\partial S_y}{\partial y} = 0$$

上式中,Z是床底高程(正向向下); S_x 和 S_y 是平均泥沙输运矢量因子; t_{mor} 是时间,下标指底部变化的时间正逐渐变大。

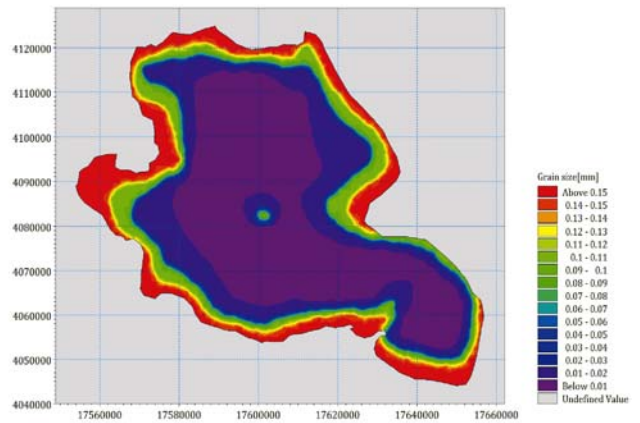


图2 青海湖底床粒度特征(数据来源文献[1])

Fig.2 Sediment grain size of the Qinghai Lake

泥模型结合了多粒径级和底床分层,依据经验公式描述了黏聚性泥沙在波浪和水流作用下的冲刷、运输和沉积。

此次遥感图像研究信息源为美国陆地卫星(Landsat 1-5,7)1972、1977、1987、1990、1995、2000、2006和2010年的MSS、TM和ETM数据,并对取得

的遥感图像进行几何校正和复合处理。最终所得图像分辨率为 30~60 m。另外,还对比借鉴了前人研究的相关遥感资料^[29]。

3 结果及讨论

3.1 水动力特征

常年盛行风下,青海湖湖流特征如下(图 3):布哈河入湖口南、北两侧形成两个大的顺时针的主环流;东南湖湾也形成一个较大的顺时针环流,环流外围有与之相反的湖流;铁布卡湾,哈达湾分别有两个尺度较小的逆时针环流;沙岛附近有三个次级环流,分别是靠岸的两个顺时针环流和它们之间向湖一侧的逆时针环流,沙岛以北湖东北岸湖流表现出自南向北的特征;湖北岸沙柳河等入湖口处也形成顺时针小回流;湖南岸西部沿岸湖流以自东向西流动为主,郎剑附近因受波浪影响较大,湖流特征表现较复杂,其西一侧湖流有向东、南流动的趋势,且存在一些较小的环流。

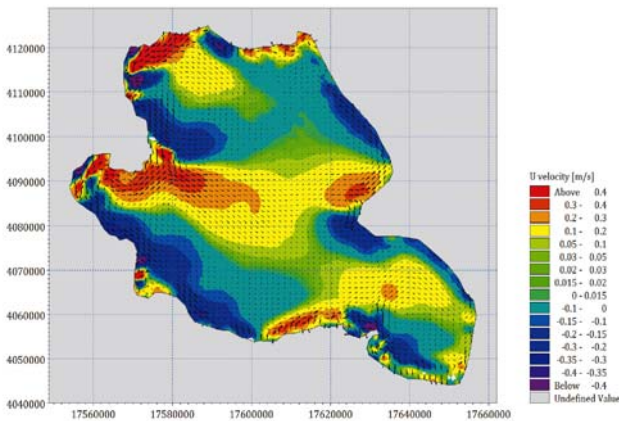


图 3 青海湖常年湖流特征

Fig.3 Prevailing current of Qinghai Lake

3.2 沉积体系多年演变及其成因机制

为寻找环青海湖区域环境演变痕迹,考察青海湖水动力季节变化和浪力特征等,对青海湖进行了实地考察,得出青海湖湖退明显,湖岸线向湖一侧迁移,沙岛等环湖多处多期次残留沙坝发育,入湖河流流量明显降低,废弃河道中众多,河流季节性变化明显。同时,对比总结不同时期研究成果,得出上世纪 60 年代至今,青海湖水位逐年下降(除个别年份),入湖河流数量减少、流量降低,布哈河改道,新尕海脱离广湖,海晏湾几近独立。近 40 年(1972~2010)来的 8 张遥感图分析(图 4)表明:全湖整体呈萎缩状态,湖岸线

向湖一侧演变,湖泊面积越来越小;各处湖岸线退缩程度存在明显的差异,湖西、北边界比湖东边界(除了沙岛—海晏湾区域)和南边界(除郎剑区域)萎缩程度更明显;湖东岸沙岛和海晏湾区域、北岸沙柳河入湖一带地区、西岸布哈河入湖地带湖岸变化最大,沙嘴、沙坝和三角洲向湖延伸,陆地大面积出露。不难得出,湖退的发生为气候终年干旱少雨所致,而西、北边界和东、南边界的湖退程度和演变最明显区域的产生却与湖区不同区域水动力特征差异有关,具体分析见下文。

(1) 湖东北部沙岛—海晏湾:从 1972 和 2010 年的遥感图(图 4E)可以明显看出,该区域砂体面积扩大,沙嘴尖部向湖中心一侧生长,沙嘴两侧湖湾区域沙粒物质堆积范围也在扩大。瀉湖面积逐渐减小,其周围沙粒物质堆积范围也明显增大,沙丘面积逐年增大。从青海湖水动力特征(图 3)和泥沙输运趋势(图 5)得出,西北风驱动下的波浪向岸冲刷,拍岸浪侵蚀湖岸,并将沙粒物质卷至离岸不远处的向湖一侧堆积,沙岛处南北两侧回流也将泥沙输运至此堆积。

青海湖东岸发育着一系列独特的水下沙堤(水下沙坝)—沙坝、沙嘴—瀉湖、沙丘沉积体系,这与该区域水动力特征密不可分。其形成和演变机制如下:首先,形成这一体系的物质基础,沙粒物质来源于四种途径:甘子河和哈里根河带入;西北风将甘子河和哈里根河三角洲泥沙吹入;湖流带至;强拍岸浪侵蚀湖岸,冲刷得到的沉积物。第二,这些沙粒物质随着河流和西北风驱动下的湖流输运,最终在湖滨区域堆积。青海湖最大风力可达 22 m/s,浪力最大可达 7~8 级,每年 6 级以上浪力可达 40 天,浪力翻搅深度可达 8 m 及以下^[2]。如此之大的风浪可将滨岸带沉积物冲刷扰动起来,以回流形式,在重力流和牵引流的双重机制下搬运至离湖岸不远的向湖一侧堆积下来,形成最初的水下沙滩和下水沙堤。第三,随着时间的推移,湖退的进行,湖水水位下降,沉积物不断堆积,水下堤越来越高,最终露出水面,成为水上沙坝,并将外湖残留水体隔开,形成瀉湖。第四,新的沙坝作为载体,接受由风力和湖流作用带来的沉积物堆积,规模进一步扩大。同时,新的沙坝作为岸边界,接受湖浪的不断侵蚀,拍岸浪将一部分沉积物卷起并带至向湖一侧堆积,形成新的水下沙堤,老的沙坝慢慢生长,瀉湖面积慢慢减小,沙坝堆积越来越高,最终形成沙丘,沙丘进一步演变为沙丘群,沙丘形成之后只接受风力吹来沙粒的堆积。

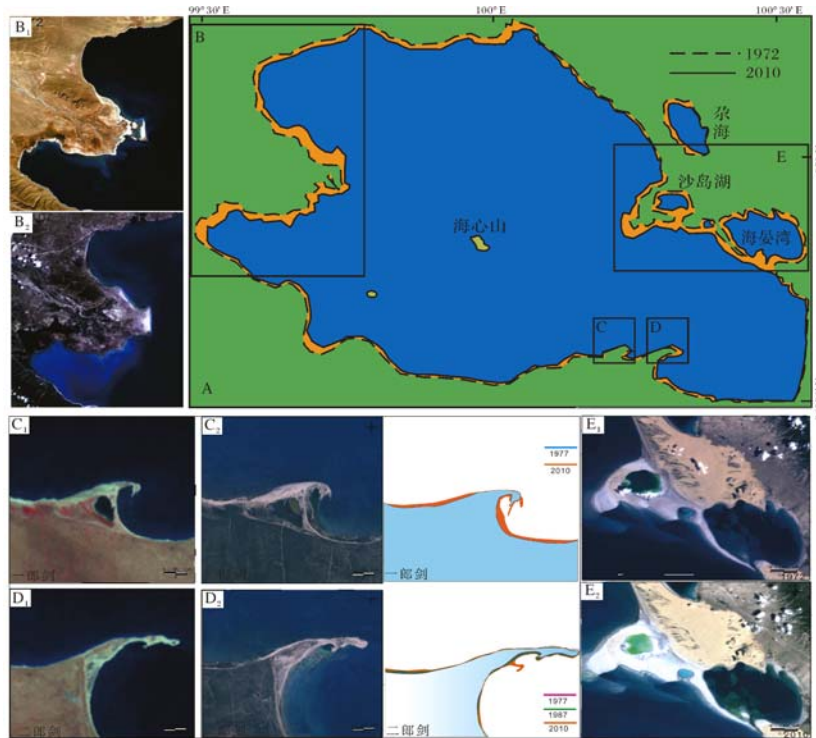


图4 青海湖湖岸线及沉积微相演变

注:A、B、C、D、E 分别为全湖、湖西边界、二郎剑、二郎剑和沙岛—海晏湾,下标 1 为 1972 年,2 为 2010 年。

Fig.4 Shoreline and sedimentary microfacies changes of Qinghai Lake

青海湖东岸发育的这种沉积体系,整体表现出北西—南东向展布的特点,如沙坝呈南北向展布,尕斯库勒湖形状也是南北长而东西短的近似菱形。沙坝体系的形成向南迁移,随着物质来源的减少和已有沙坝的阻隔,规模也越来越小,海晏湾面积较大与以前的广湖形状有关。这些特征都与西北风和平行于东岸的湖流作用有关。

另外,湖东南部耳海与沙岛湖(新尕斯库勒湖)、尕斯库勒湖形成机制如出一辙。但是,自耳海形成后,湖东南边界没有进一步发育沙坝—泻湖体系,原因在于沙岛附近湖岸呈北西南东向,而耳海西侧湖岸略呈北东—南西向,相比而言前者更容易接受西北风吹来的风沙堆积;倒淌河由最初的自东向西流动,到最终的流向改变为自西向东,使得这一区域物源供给越来越少。

(2) 湖南部二郎剑:综合对比 40 年(1972~2010)来的遥感图(图 4C、D),二郎剑沙嘴和二郎剑沙嘴沉积演变特征十分相似,都明显表现出沙嘴尖部西北侧被侵蚀,而东南侧湖湾和西侧平行于湖岸(东西向)地带沉积物逐年堆积的特征,沙嘴尖部向东南弯曲演变。遥感图反映沉积演变特征(图 4)与模拟所得泥沙输运趋势(图 5)非常一致,可以明显看出堆积区

域、侵蚀区域和泥沙输运方向。

二郎剑沙嘴西北侧作为迎风一侧,浪力作用极强,巨大的拍岸浪不断地冲刷侵蚀沙嘴湖岸,泥沙被带走,并在沙嘴西侧平行于东西向湖岸的区域堆积,使得这一区域东西向湖岸线向北迁移,而背风的沙嘴东南侧,风力较弱,浪力作用也很弱,东南湖湾顺时针环流将泥沙输运至此处堆积。这样的泥沙输运趋势,使得二郎剑沙嘴有着向东迁移,尖部向南弯曲的趋势。由此可见,西北风驱动的浪力作用对青海湖沉积体系演变起着重要作用,为湖滨区域湖岸侵蚀和泥沙输运主要的动力因素。

(3) 布哈河入湖口:多年(1972~2010)遥感图(图 4B)上可以明显看出,砂体沉积范围逐年增大,沿着布哈河入湖口向湖延伸,平行于湖岸呈弧线的水下堤和大片水下风沙堆积清晰可见,哈达湾水下沙堤向北迁移,铁布卡湾水下堤规模逐年扩大,布哈河北分支入湖口有沙丘发育,沙丘规模也逐年增大。

20 世纪 70 年代之前布哈河入湖主河道位于鸟岛以北哈达湾一侧,此时布哈河径流量和含沙量均很大,形成鸟足状三角洲。这一区域位于湖西北侧,平坦开阔,波浪作用弱而河流作用强,随着湖退的进行,

湖水位的下降,三角洲不断向湖延伸,70年代之后布哈河河道迁向鸟岛南侧,这一区域三角洲不再生长,三角洲前缘沉积物并在湖流改造下,形成沿岸展布的滩坝,西北风将废弃河道及三角洲沙粒物质的吹至湖泊沿岸堆积,形成沙丘。此外,顺时针湖流和乌哈阿兰河河流作用将入湖沉积物输运至哈达湾一侧(图5),使这一区域形成一定规模的平行于湖岸的水下沙坝和 underwater 沙滩。铁布卡湾水下沙坝主要由布哈河南分支的射流作用形成,湖流只在较小范围改造其形态。因此,布哈河入湖河道的分布和入湖泥沙量的多少决定着这一区域沉积体系整体特征,湖流对水下堤的形态和展布也起着重要作用。

近年来,人类活动(农耕、放牧和旅游)也在愈来愈大的程度上影响着青海湖周围生态环境,环青海湖地区土地沙化和草地退化日趋严重,对青海湖湖退及周围水系水量减少,及湖泊东西岸沙丘的发展有着一定的作用。

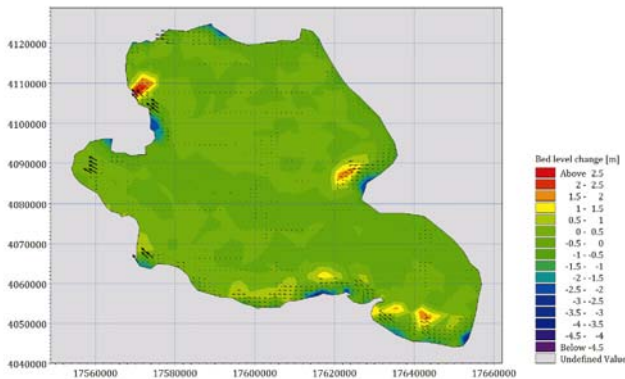


图5 青海湖泥沙输运和底床演变

Fig.5 Sediment transportation and bed level changes in Qinghai Lake

3.3 沉积体系形成演变与水动力特征响应分析

湖区水动力驱动下的泥沙输运规律与滨湖区域沉积体系演变趋势非常一致,可见水动力为沉积体系演变最重要的动力因素。根据青海湖水动力特征(图3),青海湖湖岸形态和沉积演变及成因分析,沙岛等变化最明显区域沉积演变特征和成因分析,做出青海湖滨岸水动力特征及沉积微相沉积模式图(图6)。图中水动力和沉积展布特征可以解释遥感图所反映的沉积演变趋势,反映上文描述各区域沉积演变过程,揭示青海湖滨湖区域沉积体系形成演变机制。湖区不同区域沉积特征的差异,也可以从水动力特征差异找寻原因,如由于湖流整体自西北向东南呈顺时

针流动,湖东、南岸湖岸线退缩程度比西、北侧小。布哈河入湖口出现河流主控区,湖东岸沙岛—海晏湾区域和南岸二郎剑出现湖流浪力主控区使得这些区域沉积体系演变最明显。单就二郎剑沙嘴而言,其东、西两侧沉积特征差异很大,也与这一区域水动力特征密切相关。综上所述,青海湖滨湖区域水动力特征决定着这一区域沉积体系展布和演变。

3.4 滨湖沉积体系演变预测

青海湖目前处于湖退期,尽管有的年份湖水水位略微上升,但湖水水位仍然以下降为主。持续干旱气候条件下,未来较长时期内,湖区水动力特征和沉积物的运输、堆积趋势将不会发生大的改变,沉积演变最明显的区域仍将会是布哈河入湖口、沙岛—海晏湾附近、二郎剑沙嘴区域、湖北部河流入湖口以及东部湖湾区域。根据各区域沉积演变特征及其成因机制,对未来一段时间内,气候环境不变的条件下,滨岸沉积体系演变做出如下推测:

沙岛沙嘴将进一步向湖心延伸,尕海、新尕海(沙岛湖)进一步缩小。海晏湾西侧的沙尖进一步生长拓宽,将海晏湾与青海湖彻底阻隔开来,此后海晏湾瀉湖也将逐渐缩小。新尕海和海晏湾之间不知名的小瀉湖将完全被阻隔,面积也将慢慢缩小,直至消失。向湖一侧将会有新的水下堤的出露和生长,但是由于物源供给明显比以前减少,规模不会很大。另外,随着气候持续干旱,耳海河水补给的阻断,甚至外流,加上西侧沙粒物质的推进,耳海形状也变得越来狭长,面积也将慢慢减小直至消失。

二郎剑湖湾地带,沙嘴尖部东侧沉积物持续堆积,西侧将进一步被拍岸浪侵蚀,沉积物被湖流带至平行于湖岸的滨岸区域堆积,沙嘴尖部向南弯曲迁移。较长时期内,二郎剑沙嘴将会慢慢消失,两侧湖岸相接,起初呈东西向向湖凸出展布,并将继续被侵蚀,沉积物向两侧迁移直至被移平,湖岸整体将向湖一侧迁移。自此,湖浪冲刷作用将一定程度的减弱,沉积物堆积速率也因物源供给受限而减慢,沉积物会在新的水动力特征驱动下迁移,演变出新的沉积特征。

近年来,在持续干旱的气候条件下,布哈河径流量减少,布哈河入湖主河道南迁。布哈河入湖北分支干涸,河流作用停止,使得这一区域从之前的河流占主导作用演变为湖流占主导作用,布哈河携带的泥沙不再源源不断的输入,只能靠回流和湖浪将泥沙带至岸边堆积,现存水下堤生长速度减小,并将随着湖退慢慢露出湖面,与现存沙丘连成一片。布哈河哈达湾

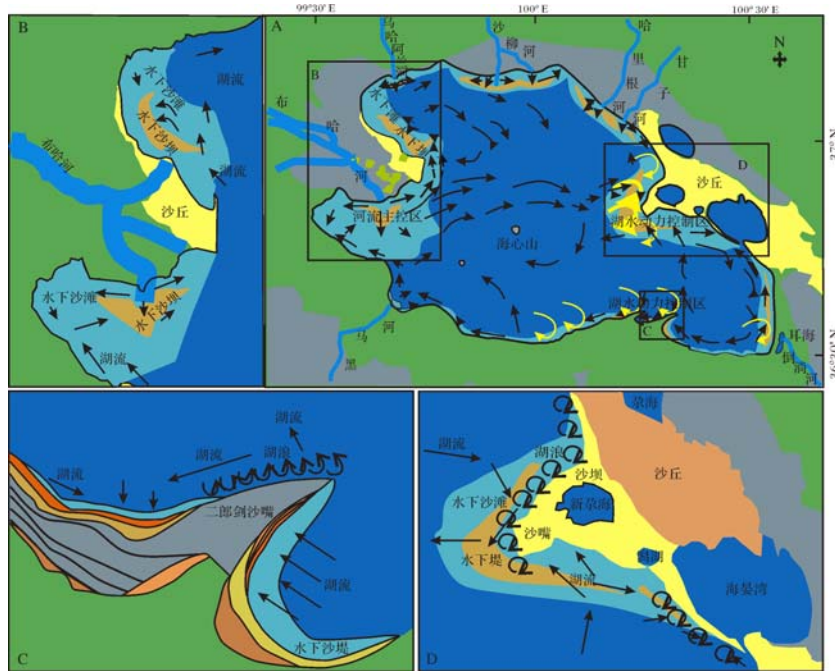


图6 青海湖滨岸水动力特征及沉积微相沉积模式图

注:A、B、C、D 分别为全湖、湖西边界,二郎剑和沙岛—海晏湾区域。

Fig.6 Sedimentary model and its hydrodynamic mechanism of sedimentary microfacies in shore zone of Qinghai Lake

一侧已形成的沙丘将进一步接受西北风吹来的来自布哈河三角洲的沙粒物质堆积,规模将不断扩大。布哈河主河道南迁,使得铁布卡湾一侧河流作用占主导,河流将自身携带的泥沙运输至此,水下沙堤规模越来越大,向湖突进。气候持续干旱较长时间内,随着河流流量的减小和湖退的过程的发生,铁布卡湾水下堤也将出露水面,接受风沙堆积,形成小型沙丘,并慢慢与北侧沙丘相连,使整个西边界发展成为沙丘群,这将取决于河水水动力特征。

4 结论及展望

(1) 青海湖滨湖区域沉积特征明显,滨湖浅水带尤其在河流入湖口处和浪力作用较强的区域,发育着很多不同规模水下沙滩和水下沙坝,湖东岸发育有一系列典型的水下滩坝—沙坝、沙嘴—瀉湖—沙丘沉积体系。随着时间的推移,这些沉积体系发生着一定的变化,并有着特定的变化趋势。不同区域沉积体系演变特征差异很大,布哈河等河流入湖口、沙岛—海晏湾、二郎剑沙嘴以及东部湖湾区域为全湖演变特征最明显的区域,可以根据每一区域沉积演变来反推其形成过程。同一水域不同方位,沉积物运输趋势也会存在十分明显的差异。

(2) 青海湖水动力特征决定着沉积物运输趋势,

也是滨湖沉积体系形成、展布和演变的主要决定因素。全湖来看,滨岸区域水动力强,沉积物粒度粗,水动力对沉积体系改造也更明显,湖心深水区沉积物以悬浮颗粒的形式存在,随着湖流而运输。

(3) 青海湖目前整体处于湖退期,尽管有的年份水位略微上升,湖水水位整体还是以下降为主,河流作用明显减弱。今后较长时期内,气候条件不变的情况下,青海湖湖退过程会继续发展,湖泊水动力特征和沉积物运输、堆积趋势在大的区域内将不会发生大的改变,沉积演变最明显的区域仍将会是布哈河等河流入湖口、哈达湾、沙岛—海晏湾、二郎剑沙嘴以及东部湖湾区域。

参考文献 (References)

- 1 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,等. 青海湖综合考察报告[M]. 北京:科学出版社,1979. [Lanzhou Institute of Geology, CAS, Institute of Hydrobiology, CAS, Institute of Microbiology, CAS, et al. An Report on Comprehensive Exploration of Qinghai Lake [M]. Beijing: Science Press, 1979.]
- 2 中国科学院兰州分院,中国科学院西部资源环境研究中心. 青海湖近代环境的演化和预测[M]. 北京:科学出版社,1994. [Lanzhou Branch of Chinese Academy of Sciences, Research Center for Resources and Environment of Western China, Chinese Academy of Sci-

- ences. Evolution of Recent Environment in Qinghai Lake and Its Prediction[M]. Beijing: Science Press, 1994.]
- 3 李景贵,范璞,崔明中,等. 青海湖沉积物支链和环烷烃组分中 C₂₀, C₂₅和 C₃₀高度支链类异戊二烯烃[J]. 沉积学报,1995,13(4):82-92.[Li Jingui, Fan Pu, Cui Mingzhong, et al. C₂₀, C₂₅ and C₃₀ highly branched isoprenoid alkenes in the branched and cyclic hydrocarbon fractions of Qinghai Lake sediments[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 13(4): 82-92.]
 - 4 马宝林,王琪. 青海湖现代沉积物的元素分布特征[J].沉积学报,1997,15(3):120-125.[Ma Baolin, Wang Qi. Distribution characteristics of elements in modern sediments of Qinghai Lake[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(3): 120-125.]
 - 5 Liu Xingqi, Shen Ji, Wang Sumin, et al. A 16000-year pollen record of Qinghai Lake and its paleo-climate and paleoenvironment[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47 (22): 1931-1936.
 - 6 Yu J Q, Kelts K R. Abrupt changes in climatic conditions across the late-glacial/Holocene transition on the N. E. Tibet-Qinghai Plateau; evidence from Lake Qinghai, China[J]. Journal of Paleolimnology, 2002, 28(2): 195-206.
 - 7 史基安,郭雪莲,王琪,等. 青海湖 QH1 孔晚全新世沉积物稀土元素地球化学与气候环境关系探讨[J]. 湖泊科学,2003,15(1):28-34.[Shi Ji'an, Guo Xuelian, Wang Qi, et al. Geochemistry of REE in QH1 sediments of Qinghai Lake since Late Holocene and its paleoclimatic significance[J]. Journal of Lake Sciences, 2003, 15(1): 28-34.]
 - 8 刘兴起,王苏民,沈吉. 青海湖 QH-2000 钻孔沉积物粒度组成的古气候古环境意义[J]. 湖泊科学,2003,15(2):112-117.[Liu Xingqi, Wang Sumin, Shen Ji. The grain size of the Core QH-2000 in Qinghai Lake and its implication for paleoclimate and paleoenvironment[J]. Journal of Lake Sciences, 2003, 15(2): 112-117.]
 - 9 Henderson A C G, Holmes J A, Zhang J W, et al. A carbon-and oxygen-isotope record of recent environmental change from Qinghai Lake, NE Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(14): 1463-1468.
 - 10 刘小园. 青海湖流域水文特征[J]. 水文,2004,24(2):60-61.[Liu Xiaoyuan. Hydrological characteristics of Qinghai Lake basin[J]. Hydrology, 2004, 24(2): 60-61.]
 - 11 沈吉,刘兴起,Matsumoto R,等. 晚冰期以来青海湖沉积物多指标高分辨率的古气候演化[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2004,34(6):582-589.[Shen Ji, Liu Xingqi, Matsumoto R, et al. A high-resolution climatic change since the Late Glacial Age inferred from multi-proxy of sediments in Qinghai Lake[J]. Science China (Series D): Earth Sciences, 2005, 48(6): 742-751.]
 - 12 许长军,侯光良. 利用遥感和地理信息系统对青海湖环湖沙地的研究[J]. 青海大学学报:自然科学版,2005,23(3):63-66.[Xu Changjun, Hou Guangliang. Study of sandlands around Qinghai Lake using remote sensing technique and geography information system[J]. Journal of Qinghai University: Nature Science, 2005, 23(3): 63-66.]
 - 13 Ji Junfeng, Shen Ji, 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.
 - 14 李岳坦,李小雁,崔步礼,等. 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, 2010,22(5):757-766.[Li Yuetan, Li Xiaoyan, Cui Buli, et al. Trend of stream flow in Lake Qinghai basin during the past 50 years (1956-2007) —Take Buha River and Shaliu River for examples[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(5): 757-766.]
 - 15 李祥忠,刘卫国. 青海湖意外湖花介(*Limnocythere inopinata* Bird) 壳体稳定氧同位素组成对盐度的可能响应[J]. 湖泊科学,2012, 24(4):623-628.[Li Xiangzhong, Liu Weiguang. The stable oxygen isotopic composition of ostracoda *Limnocythere inopinata* Bird and its possible response to water salinity in Lake Qinghai[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(4): 623-628.]
 - 16 宋春晖,王新民,师永民,等. 青海湖现代滨岸沉积微相及其特征[J]. 沉积学报,1999,17(1):51-57.[Song Chunhui, Wang Xinmin, Shi Yongmin, et al. Sedimentary characteristics and microfacies of shore zone in Qinghai Lake[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(1): 51-57.]
 - 17 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.[Song Chunhui, Fang Xiaomin, Shi Yongmin, et al. Characteristics and formation of aeolian dunes on western shore of the Qinghai Lake[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(4): 443-446.]
 - 18 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.[Song Chunhui, Fang Xiaomin, Shi Yongmin, et al. Sedimentary characteristics of modern lacustrine deltas in Qinghai Lake and their controlling factors[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2001, 37(3): 112-120.]
 - 19 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):234-238.[Shi Yongmin, Wang Xinmin, Song Chunhui. Aeolian deposition in Qinghai Lake area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(Suppl.): 234-238.]
 - 20 师永民,董普,张玉广,等. 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,2008,28(1):53-57.[Shi Yongmin, Dong Pu, Zhang Yuguang, et al. Revelation of modern deposits in Qinghai Lake to precise exploration of lithologic hydrocarbon reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(1): 53-57.]
 - 21 靳松,朱筱敏,钟大康. 变差函数在沉积微相自动识别中的应用[J]. 石油学报,2006,27(3):57-60.[Jin Song, Zhu Xiaomin, Zhong Dakang. Application of variogram to automatic identification of sedimentary microfacies[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(3): 57-60.]
 - 22 朱筱敏,信荃麟,张晋仁. 断陷湖盆滩坝储集体沉积特征及沉积模式[J]. 沉积学报,1994,12(2):20-28.[Zhu Xiaomin, Xin Quanlin, Zhang Jinren. Sedimentary characteristics and models of the beach-bar reservoirs in faulted down lacustrine basins[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(2): 20-28.]
 - 23 李丕龙. 陆相断陷盆地油气地质与勘探[M]. 北京:石油工业出版社,2003.[Li Pilong. Petroleum Geology and Exploration of Continen-

- tal Fault Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.]
- 24 高雷,朱筱敏,吕雪雁. 准噶尔盆地三个泉地区下白垩统沉积相特征[J]. 石油大学学报:自然科学版,2004,28(1):5-9.[Gao Lei, Zhu Xiaomin, Lü Xueyan. Sedimentary facies of Lower Cretaceous in Sangequan area of Junggar Basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2004, 28(1): 5-9.]
- 25 邓宏文,高晓鹏,赵宁,等. 济阳拗陷北部断陷湖盆陆源碎屑滩坝成因类型、分布规律与成藏特征[J]. 古地理学报,2010,12(6):737-747.[Deng Hongwen, Gao Xiaopeng, Zhao Ning, et al. Genetic types, distribution patterns and hydrocarbon accumulation in terrigenous beach and bar in northern faulted-lacustrine-basin of Jiyang depression[J]. Journal of Paleogeography, 2010, 12(6): 737-747.]
- 26 赵宁,邓宏文. 沾化凹陷桩西地区沙二上亚段滩坝沉积规律及控制因素研究[J]. 沉积学报,2010,28(3):441-450.[Zhao Ning, Deng Hongwen. Beach-Bar depositional laws and controls of the 2nd member of Shahejie Formation in Zhuangxi area, Zhanhua sag[J]. Acta Sedimentologica sinica, 2010, 28(3): 441-450.]
- 27 杨勇强,邱隆伟,姜在兴,等. 陆相断陷湖盆滩坝沉积模式——以东营凹陷古近系沙四上亚段为例[J]. 石油学报,2011,32(3):417-423.[Yang Yongqiang, Qiu Longwei, Jiang Zaixing, et al. A depositional pattern of beach bar in continental rift lake basins: A case study on the upper part of the fourth member of the Shahejie Formation in the Dongying sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 417-423.]
- 28 张登山,王彬. 青海湖中沙堤的形成及其对湖水位的影响[J]. 干旱区资源与环境,1991,5(1):96-102.[Zhang Dengshan, Wang Bin. The formation of sandbar and its influence on the level in the Qinghai Lake [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1991, 5(1): 96-102.]
- 29 李凤霞,李林,沈芳,等. 青海湖湖岸形态变化及成因分析[J]. 资源科学,2004,26(1):38-44.[Li Fengxia, Li Lin, Shen Fang, et al. Evolution of lakeshore shape of Qinghai Lake and its causes[J]. Resources Science, 2004, 26(1): 38-44.]

Hydrodynamic Control of Sedimentary Systems in Shore Zone of Qinghai Lake

HAN YuanHong^{1,2} LI XiaoYan³ WANG Qi¹ HAO LeWei¹ TIAN Bing¹
 MA XiaoFeng¹ ZHU Jun⁴ LIAO Peng⁵ JI HongJie^{1,2} Ma DongXu^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Petroleum Resources, Gansu Province/ Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000;
 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;
 3. Lanzhou Library of Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000;
 4. Qinghai Oilfield Research Institute of Exploration & Development, Dunhuang, Gansu 736202;
 5. Geophysical exploration research institute, Jiangnan oil field, SINOPEC, Wuhan 430035)

Abstract: Qinghai Lake is a typical intermontane downfaulted lake in the arid region of northwest China. It is very similar to some continental petroliferous basins, and developed a series of sedimentary facies which are favorable for hydrocarbon accumulation. Thus, researching the sedimentary systems of Qinghai Lake could provide us a good example of paleogeographic recovery in the similar ancient lacustrine basin. In order to analyze the evolution of coastline and sedimentary system of Qinghai Lake, field trip are taken, large amounts of previous data are summed up and 10 pieces of remote sensing images over the past 40 years are interpreted in this study. Meanwhile, on basis of detailed study of hydrodynamics of Qinghai Lake, computer numerical simulation method is used to reveal the sediment transport patterns of Qinghai Lake. There are mainly three clockwise currents in Qinghai Lake; the hydrodynamic characteristics in the beach area are more complicated, sediment transport patterns are consistent with regional hydrodynamic features. It indicates that hydrodynamic condition is the most important factor to affect the sedimentary system of Qinghai Lake. Furthermore, the area including, river estuary, sand island- Haiyan bay, Langjian spit and eastern bay, have the most obvious evolutionary characteristics in Qinghai Lake. It is inferred that the evolution pattern of sedimentary system will keep unchanging under the condition of dry climate in a short time.

Key words: sediment system; evolution of sedimentary process; mechanism; hydrodynamic; Qinghai Lake