

黄河源区鄂陵湖现代湖盆形态研究

沈德福^{1,2,3}, 李世杰^{1*}, 陈 炜¹, 姜永见^{1,2}, 聂 欣¹

(1.湖泊与环境国家重点实验室,中国科学院南京地理与湖泊研究所,江苏 南京 210008;

2.中国科学院研究生院,北京 100049; 3.安徽科技学院,安徽 滁州 233100)

摘要:鄂陵湖是黄河源区最大的淡水湖。通过基于GPS-RTK的技术定位以及测深仪的水下地形测量,结合相关历史资料和遥感数据分析,应用湖沼学理论,对鄂陵湖的湖盆形态进行量化研究。结果发现鄂陵湖最大水深33.2 m,平均水深15.55 m,湖长37.49 km,湖面最大宽度32.3 km;平均宽度16.76 km,岸线长226.3 km,湖面面积628.47 km²,湖泊容积97.76×10⁸ m³,湖盆形态为接近抛物线体形式的构造断陷湖,而不具备第四纪冰川侵蚀湖盆的地貌特征。研究结果可以对黄河源区的生态环境变化和黄河源区的水量管理提供基础信息。

关 键 词:鄂陵湖 湖盆形态 水下地形测量 黄河源区

中图分类号:P931.7

文献标识码:A

文章编号:1000-0690(2011)10-1261-05

青藏高原的湖泊敏感地记录着过去气候与环境变化过程的信息^[1],因在地球中、低纬度地区最少受人类活动干扰,环境的演化变迁真实地反映了纯自然过程,因此青藏高原正在成为研究全球变化的新的热点地区^[2],过去30 a以来在青藏高原已经开展了大量的湖泊沉积与环境变化的研究^[3,4],在20世纪70年代,中国科学院相关单位对青海湖进行了系统的综合的科学考察,获得了大量的基础资料,此后在青藏高原中西部也报道了一些湖泊的考察报告^[5-9]。近年来,结合遥感分析途径,加强了对湖泊形态的分析,提高了研究水平。但西藏大部分湖泊迄今为止仍缺乏详细的考察资料^[10]。

鄂陵湖位于青藏高原东北部,处在西南季风、东南季风和西风交互作用的气候区,是中国海拔最高的淡水湖之一,也是黄河源头最大的湖泊^[11]。由于其独特的自然地理条件,鄂陵湖成为进行古环境、区域生态系统和湖泊现代过程研究的理想地点,目前在环境变化方面的研究已取得了部分可喜的成果^[12-15]。但在青藏高原鄂陵湖野外考察工作难度较大,一是海拔高,空气稀薄、缺氧,且天气变化大;二是湖泊面积大,风大波浪高,大船无法运输到高原,小船下湖无法工作且危险;故

至今对黄河源区的湖泊,特别是最大湖泊鄂陵湖缺乏系统而详细的湖盆形态和水量资料,甚至连真正的水深都无所知。

随着黄河下游出现断流现象,作为黄河重要水源地的黄河上游青海境内的生态环境和水资源保护成为社会关注的焦点^[16-18]。进入20世纪90年代,黄河源区许多湖泊数量和面积锐减,造成水量减少,也引起人们的高度关注^[19-22]。因此,实地调查黄河源区的湖泊状态,开展湖泊沉积与环境变化的研究,了解地区的生态环境和气候变化的关系,了解气候变化对区域环境演变的影响有重要意义,对黄河流域水资源管理也是极重要的。

1 研究区概况

位于青海省东南部的鄂陵湖(34°45'N~35°05'N, 97°31'E~97°55'E),是青藏高原最大淡水湖之一,是黄河的源头湖和该外流区内面积最大的湖泊。鄂陵湖形状似钟形,长轴近南北向延伸,展布于巴颜喀拉山与其北面昆仑山脉的布青山之间的晚新生代断陷盆地内,该断陷盆地呈NW—SE展开,长约500 km,宽约150 km,海拔为4 000~4 500 m,属高原断陷盆地。盆地的基底为侏罗纪

收稿日期:2010-11-03; 修订日期:2011-04-07

基金项目:中国科学院重要方向项目(KZCX2-YW-338)、国家科技基础性工作专项(2006FY110600)资助。

作者简介:沈德福(1970-),男,安徽马鞍山人,博士研究生,从事湖泊资源与环境变化研究。E-mail: robertsdf@163.com

通讯作者:李世杰,研究员,博士生导师。E-mail: shjli@niglas.ac.cn

泥灰岩、砂岩、浅变质岩,上面不整合堆积了厚数十米的第四纪河湖相沉积地层^[23]。湖泊集水面积为 18 188 km²,补给系数为 29.8,湖水主要依赖地表径流和湖面降水补给,河流有黄河、勒那曲等,多年平均年入湖径流量 12.57×10⁸m³,多年平均年出湖径流量 6.37×10⁸m³,蒸发量较大^[24]。

根据距鄂陵湖最近的玛多气象站多年观测资料,鄂陵湖湖区年平均气温-4.6℃,最热的月份为7月和8月,凌晨温度也常降至0℃以下,1月份平均气温在-16.9℃,年降水量200~400 mm。湖区在海拔4 200~4 500 m的河川、盆地和丘陵地带分布着寒漠土、草甸土、黑钙土、沼泽土、盐土和褐土等土壤类型,植被为高寒草原,因过度放牧和气候暖干化导致草场退化和沙化严重。

2 研究方法

根据2007~2009年开展的对鄂陵湖的实地考察测量资料,结合遥感数据的分析,以及区域气象站、水文站的相关资料,对鄂陵湖湖盆形态及其湖泊环境进行分析。

实地调查过程中主要基于GPS-RTK技术以及数字测深技术测量原理进行水下地形测量,利用GPS-RTK技术进行平面定位,利用测深仪测水深,采用电脑及导航软件实现测量船的水面导航和数据的自动存储^[25]。能记录瞬时的水深值(精确到0.01 m)和地理位置(精确到0.001'),测深声速设定为1 460 m/s,以机动气船作平台,以10s间隔记录一次湖底深度。采集的数据经过ArcGIS软件分析,以湖沼学的湖盆指标进行计算。

3 研究结果

3.1 湖面的形态指标

鄂陵湖湖面形态如图1所示,以1975年、1995年、2000年、2005年等年份的遥感数据作基础(遥感数据分析来自中国科学院南京地理与湖泊研究所遥感研究室),鄂陵湖湖盆面积在近20多年中一直在很小范围内变化,如1975年的湖盆面积为631.79 km²,1995年的面积为624.17 km²,2000年的湖盆为624.64 km²,2005年的湖盆面积628.47 km²,面积变幅不大。2005年的湖盆面积接近多年湖盆面积的平均值,可作为2007~2009年鄂陵湖调查的基础数据,其形状变化也极小,因此以2009年遥感图片作形态分析;以2008~2009年基于

GPS-RTK技术的实地测量结果,得到湖面形态基本数据(表1),这些基本数据确定了目前鄂陵湖的相应湖面形态参数。

从图1可以看出,鄂陵湖呈钟形,湖泊最长距离的AB线段,长度为37.49 km;线段CD和AB垂直,是湖泊的最宽距离,为32.3 km。整个湖泊水面的面积628.47 km²,湖泊岸线长度226.3 km。湖泊的东面、北面岸线较为平滑,南部与西部的岸线表现曲折,岸线发达系数为2.55。

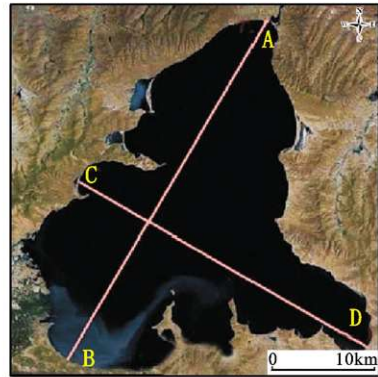


图1 鄂陵湖湖面形态(遥感图片来自2009年google网站)
Fig.1 Shape of the E'ling Lake(Image from google site in 2009)

表1 鄂陵湖湖面形态指标
Table1 The surface parameters of E'ling lake

指标	值	描 述
正南北长度	34.11 km	南北向直线距离
正东西长度	33.17 km	东西向直线距离
最大长度 L	37.49 km	湖泊岸线相距最远点的直线距离
最大宽度 B_0	32.30 km	两岸间垂直于湖长的最宽距离
平均宽度 B_p	16.76 km	$B_p=P/L$, P_0 表示湖水水面面积, L 是湖长
岸线长度 l	226.3 km	主要依据遥感数据,结合GPS定点数据
岸线发达系数 K	2.55	湖岸线的长度与同面积的圆的圆周之比, 即 $K=\frac{1}{2\pi R}$, $R=\sqrt{\frac{P_0}{\pi}}$, 所以 $K=\frac{1}{2\sqrt{P_0\pi}}$

水面的面积 $P=628.47$ km²湖岸线所围区域面积

注:表1和表2中的公式来自湖沼学概论^[26]。

3.2 湖体的形态指标

湖泊形态指标影响着湖水的理化性质和水生生物的分布规律。在湖泊形态上一般采用湖面高程、面积,最大水深、平均水深和容积等指标进行阐述^[1],大部分都是对湖泊的湖盆大致的描述。随

着气候、人类活动,地质、生物环境等的变化,湖泊湖盆的许多参数和指标都在不断改变,如湖泊几何形态的大小是以水深、面积和容积三要素表示,因水深和面积是个变数,容积是二者的函数,也随着水深和面积发生变化。

依据实地 GPS-RTK 技术定位和测深仪的水下地形测量结果,应用湖沼学理论选取相关的湖体形态指标,研究得出鄂陵湖湖体形态如表2所示。

表2 鄂陵湖湖体形态指标

Table 2 The tridimensional parameters of E'ling lake

指标	值	描述
平均深度	15.55 m	h_{cp} = 湖的容积 V / 湖表面积 P 。
最大深度	33.2 m	根据水下地形测量结果确定
容积	$97.76 \times 10^8 \text{ m}^3$	根据水深实测数据经解算求得

根据水下地形实测数据,将测深仪的数据转换成表格数据,利用 ArcGIS 软件构建 DTM(digital terrain model),然后再进行等高线计算和张力样条光滑计算,初步绘制等深线,之后分析及改正错误点,重新生成等深线,并依据精度、地貌的整体性、图形的美观方面的要求对等深线进行修饰,生成等深距为 4 m 的湖泊闭合等深线如图2所示。各等深线所围面积(即该高程水位对应的水面面积)利用地理信息系统软件 ArcView 获得。

从图2可以看出,最深的等深线为-32 m,大部分位于湖泊的中部和北部区域。从等深线分布看,西北部较为密集,东部其次,西南面的等深线较稀疏,这意味着西南面的湖泊水下坡度较缓,而西北部的坡度较陡。这与湖泊的主要来水有很大关系:扎陵湖位于鄂陵湖西南方,扎陵湖流入鄂陵湖的大

量湖水,带来较多的泥沙,沉积在湖的西南部。

3.3 鄂陵湖水位、面积和容积关系

水位(深度)和面积曲线可以表示深度和与深度相应的等深线围成的面积之间的关系曲线,而容积曲线是表示湖的容积和深度之间的关系。两个相邻等高面间的水层的容积采用以下截角锥形的公式计算得出^[26]:

$$V = \frac{h}{3} (p_1 + p_2 + \sqrt{p_1 \times p_2}) \quad (1)$$

式(1)中, p_1 、 p_2 、 h 分别为截角锥形上下的面积和高。

从表3可知,湖泊最深处为 33.2 m,在 0 m 水深的湖面面积为 628.47 km²(在 2009 年 7 月湖面水位为海拔 4 272.5 m),在水深 16 m 之下的湖泊面积为 293.9 km²,约占整个湖泊面积的 43%。湖泊整个容积为 $97.76 \times 10^8 \text{ m}^3$,在水深 16 m 之下的湖泊容积为 $18.39 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占湖泊总容积的 19%。

表3 鄂陵湖水位-面积-容积关系

Table 3 Relation among water level, area and volume of E'ling lake

水深(m)	面积(km ²)	容积(10^8 m^3)
0	628.47	97.76
4	504.8	75.14
8	421.4	56.64
12	335.9	41.52
16	293.9	28.94
20	234.6	18.39
24	189.9	9.91
28	132.2	3.51
32	42.79	0.17
33.2	0	0

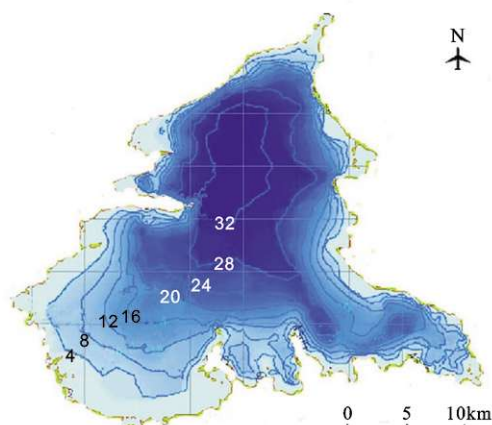


图2 鄂陵湖等深线

Fig.2 The isobath of E'ling lake

3.4 湖盆的形态

湖泊中一个重要的形态特征是湖盆的形态,它可以决定水域情况的许多特点,如面积广大但水浅的湖泊容易受到风力扰动混合。为了描述湖盆形态的特点,这里采用C.Д.穆拉维伊斯基湖盆形式的标志公式^[26]:

$$C = \frac{h_{cp}}{S_0}, S = \frac{\int_v \rho_0 dv}{\int_v \rho_0 dv} = \frac{\int_v z dv}{v} \quad (2)$$

式(2)中, S_0 是湖泊重心位置的深度; h_{cp} 是平均深度; ρ_0 为密度, V 为容积, Z 是深度; $\int z dv$ 的数值根据容积曲线利用图解法得到。

当最大深度 $h_{\max}=1$ 时, $h_{cp}=0.47$, $S_0=0.34$, $C=1.38$ 。将鄂陵湖的这些参数与湖盆形态参数等综合比较,湖盆形态较为接近抛物线体(抛物线体湖盆对应的参数 $h_{cp}=1/2$, $S_0=1/3$, $C=1.48$)。湖泊最深处在 33.2 m,而湖泊平均深度为 15.55 m,不足整个湖泊深度的 1/2,表明湖泊浅水区占有一定的面积(相对于鄂陵湖 33.2 m 深度),从图 2 可以看出,鄂陵湖水深在 4 m 以上的面积为 123.7 km²;水深 8 m 以上增加的湖泊面积为 207 km²,增加的面积约占整个湖盆的 1/3;而水深 8 m 以上的湖泊容积已经占到 41.12×10^8 m³,约占湖泊容积的 42%;水深在 12 m 以上几乎占了湖泊面积的一半。湖滨带在东部和北部面积较小,在西南部的河流入湖三角洲有一定的分布,并缓慢过渡到浅水带,而大部分的湖盆直接向深水带过渡。

另外,从其湖底形态可以看出,鄂陵湖底平坦,为长时间湖泊沉积所充填的结果,不具备有第四纪冰川侵蚀谷底的地貌形态,其湖盆没有经过第四纪冰川作用的痕迹。

在 2009 年测量中,湖面高程为海拔 4 272.5 m,比《中国湖泊概论》^[1]的 4 268.7 m 高出 3 m 多;与 2008 年实地考察所作湖面水位标志相比,湖面高程也有所上升,湖泊面积相应地扩大,反映出近些年来黄河源区降水量存在一定的波动。

3.5 湖盆成因

鄂陵湖断陷位于巴颜喀拉山北缘、布尔汗布达山南缘与布青山南缘的交会地块,为一走向为 NW-SE 向的狭长谷地。因鄂陵湖地处特提斯-喜马拉雅构造域^[27],新构造运动十分强烈,湖泊成因上属于构造断陷湖。有学者对该湖泊进行了专门研究,张森琦等^[28]在黄河源区进行生态环境地质调查发现,在新构造运动中,巴颜喀拉山北向运动,而布青山向南推进,造成黄河源区整体隆升,形成断块山与断陷盆地,湖泊广布。实际上沿昆仑山南麓分布着一条东西向延伸的深大走滑断层,在鄂陵湖一带形成一个走滑拉张的断陷盆地,其湖泊西、东边缘和南、北部各是一条断层控制,其湖周边断层崖多有分布就可见一斑。关于鄂陵湖的形成时间,则存在一定的争议:王天祯^[29]对青海黄河源地区的第四纪地层研究后认为,下更新统以河湖沉积物为主。王绍令等^[30]认为本区的湖相沉积主要发生在早更新世,其他时间湖相沉积均不发育,只有全新世的湖积物才分布于湖滨地

带;另根据鄂陵湖外围 200 m 钻孔的资料推测,其形成时代属中更新世至晚更新世。徐叔鹰^[31]根据 ¹⁴C 测年结果,认为本区湖相沉积的形成时代为晚更新世-全新世。朱大刚^[32]认为鄂陵湖谷地中发育有大量的第四纪河湖相沉积,其形成时代可能从早更新世开始一直延续到全新世。因而可以看出,鄂陵湖盆的构造断陷性质无异义,但形成时代尚无定论,值得进一步深入研究。

4 结 论

通过 GPS-RTK 技术定位以及测深仪的水下地形测量,结合相关历史资料,遥感数据分析,应用湖沼学理论,对鄂陵湖的湖盆形态进行定量研究,发现鄂陵湖最大水深 33.2 m,平均水深 15.55 m,湖长 37.49 km,湖面最大宽度 32.3 km;平均宽度 16.76 km,岸线长 226.3 km,湖面面积 628.47 km²,湖泊容积 97.76×10^8 m³。其湖盆形态为接近抛物线体形式,湖盆性质为构造断陷湖,第四纪期间盆地内没有经历冰川的侵蚀和沉积作用。鄂陵湖现代湖盆形态的研究对黄河源地区的环境保护和治理等提供基础信息支持。

致谢:中国科学院南京地理与湖泊研究所的段洪涛副研究员提供遥感分析的支持,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 施成熙. 中国湖泊概论[M]. 科学出版社,1989.
- [2] 李世杰,李万春,夏蔚岚,等. 青藏高原湖泊现代变化与考察初步报告[J]. 湖泊科学,1998,10(4):95~96.
- [3] 王苏民,张振克. 湖泊沉积与环境演变研究的新进展[J]. 科学通报,1999,44(6):579~587.
- [4] 王君波,朱立平. 青藏高原湖泊沉积与环境演变研究现状与展望[J]. 地理科学进展,2005,24(5):1~12.
- [5] 李世杰,郑本兴,焦克勤. 西昆仑山区湖泊初探[J]. 海洋与湖沼,1993,24(1):37~44.
- [6] 沈永平,徐道明. 西藏安多的湖泊变化与环境[J]. 冰川冻土,1994,16(2):173~180.
- [7] 李万春,李世杰,濮培民. 高原咸水湖水面蒸发估算——以兹格塘错为例[J]. 湖泊科学,2001,13(3):227~232.
- [8] 陈毅峰,陈自明,何德李,等. 藏北色林错流域的水文特征[J]. 湖泊科学,2001,13(1):21~28.
- [9] 邵兆刚,朱大岗,孟宪刚,等. 青藏高原近 25 年来主要湖泊变迁的特征[J]. 地质通报,2007,26(12):1633~1625.
- [10] 王君波,彭 萍,马庆峰,等. 西藏当惹雍错和扎日南木错现代湖泊基本特征[J]. 湖泊科学,2010,22(4):629~632.
- [11] 李万寿,冯 玲,孙胜利,等. 扎陵湖、鄂陵湖对黄河源头年径

- 流的影响[J]. 地理学报, 2001, 56(1): 75~82.
- [12] 马寅生, 施 炜, 吴满路, 等. 黄河源区 1000 年以来的环境演化[J]. 地质通报, 2004, 23(9, 10): 1012~1017.
- [13] 王少军, 张 志, 华学理, 等. 黄河源区两湖生态环境遥感分析[J]. 人民黄河, 2001, 23(11): 27~28.
- [14] 侯希斌. 黄河源头鄂陵湖区水环境现状评价[J]. 青海环境, 1998, 8(2): 85~88.
- [15] 朱大岗, 邵兆刚, 孟宪刚, 等. 青海巴颜喀拉山北麓古高位湖相沉积的分布与特征[J]. 地质通报, 2009, 28(5): 549~556.
- [16] 李万寿, 吴目祥. 黄青海省境内黄河干流水沙量变化历史分析[J]. 水土保持通报, 1999, 19(6): 1~5.
- [17] 张 俐, 李兰, 钟名军, 等. 黄河源区水资源的分布式计算和分析[J]. 人民黄河, 2005, 27(10): 51~53.
- [18] 康玲玲, 余 辉, 王金花, 等. 气候变化对黄河唐乃亥以上地区径流量的影响[J]. 水电发电, 2005, 31(7): 22~24.
- [19] 董立新, 王文科, 孔金玲, 等. 黄河上游玛多县生态环境变化遥感监测及成因分析[J]. 水土保持通报, 2005, 25(4): 68~72.
- [20] 鲁安薪, 姚檀栋, 王丽红, 等. 青藏高原典型冰川和湖泊变化遥感研究[J]. 冰川冻土, 2005, 27(6): 783~792.
- [21] 李道峰, 刘昌明. 黄河河源区近 10 年来土地覆被变化研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2004, 40(2): 269~275.
- [22] 王根绪, 丁永建, 王 建, 等. 近 15 年来长江黄河源区的土地覆被变化[J]. 地理学报, 2004, 59(2): 163~173.
- [23] 青海省地质矿产局. 青海省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [24] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1~580.
- [25] 王守彬, 王新洲, 刘晓东. GPS-RTK 与数字测深集成技术在地下地形测量中的应用[J]. 测绘信息与工程, 2004, 29(6): 30~31.
- [26] B B 波果斯洛夫斯基, C Д. 穆拉维伊斯基. 湖沼学概论[M]. 何志辉译. 北京: 科学出版社, 1958: 16~45.
- [27] 黄汲清, 陈炳蔚. 中国及邻区特提斯海的演化[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [28] 张森琦, 李永国, 尚小刚, 等. 黄河源区新构造运动对生态环境恶化的影响[J]. 地质通报, 2006, 25(1~2): 213~220.
- [29] 王天祯. 青海河源地区的第四纪地层划分[J]. 西北地质, 1989, 4: 1~51.
- [30] 王绍令, 李位乾. 黄河源区第四纪地层及古地理环境演化探讨[J]. 冰川冻土, 1992, 14(1): 45~54.
- [31] 徐叔鹰. 黄河源区晚第四纪环境变迁[J]. 铁道师院学报(自然科学版), 1995, 12(4): 36~45.
- [32] 程 捷, 姜美珠, 咎立宏, 等. 黄河源区第四纪地质研究的新进展[J]. 现代地质, 2005, 19(2): 39~246.

The Basin Features of E'ling Lake in the Head Area of Yellow River, Qinghai-Tibetan Plateau

SHEN De-fu^{1,2,3}, LI Shi-jie¹, CHEN Wei¹, JIANG Yong-jian^{1,2}, NIE Xin¹

(1. State Key Laboratory of Lakes and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Anhui Science and Technology University, Chuzhou, Anhui 233100, China)

Abstract: E'ling Lake is located in northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, and it is the largest freshwater lake with the surface elevation of 4 272.5m a.s.l in the headwater area of Yellow River. Because of its unique natural and geographical conditions, the E'ling lake is considered to be a ideal study object for the paleo-environment, regional ecological systems and modern processes of the lake. In recent decades, the Yellow River water resources decreased, the number and area of the lakes in the Yellow River source region dropped, which made water resources and the ecological environment in the Yellow River upper reaches became the focus of attention. Through GPS-RTK technology and submerged topographic survey instruments, adding to relevant historical data and remote sensing data analysis, the basin features of E'ling Lake had been investigated from 2008 to 2009. The results show that the lake area is 628.47 km², the maximum water depth of the lake is 33.2 m, and its average water depth is 15.55 m. The maximum length and width of the lake is 37.49 km and 32.3 km separately, and the lake's shoreline is 226.3 km. The total volume of water storage is up to 97.76×10^8 m³, which is an important freshwater resource for the regional ecosystem and the Yellow River. The shape of the lake bottom is quite flat, close to a parabolic body with the analysis of data. Subject to the new tectonic movement, E'ling Lake is a tectonic rift lake, but its formation time is inconclusive and it needs further study.

Key words: The E'ling Lake; basin features; submerged topographic survey; the head area of Yellow River