

## 岱海水质咸化过程中若干生态因子的变化

赵斌 蔡庆华 刘瑞秋 黎道丰

(中国科学院水生生物研究所;淡水生态与生物技术国家重点实验室,武汉 430072)

**摘要:** 在1996年夏季对岱海的综合调查基础上,结合自50年代以来关于岱海的地理学、水文学和水生生物学资料,对岱海水质咸化中的若干生态因子进行了比较分析,结果表明:目前岱海pH值为9.33,这已经接近生物适应范围的最上限;总碱度也逐年增长,而且增长极为明显;氯离子的含量也已经远远超过了1000mg/L的极限指标。上述变化清晰地说明,岱海的水质咸化过程正在加强。同时,钙镁比率越来越失调,水的硬度也不断增加,这些变化对渔业生产十分不利。

**关键词:** 岱海;水质咸化;生态因子;计算机拟合

**中图分类号:** Q178.1    **文献标识码:**A    **文章编号:**1000-3207(2000)05-0502-07

岱海( $112^{\circ}33'31''$ — $46'40''E$ ,  $40^{\circ}29'7''$ — $37'6''N$ )又名岱哈卓尔,位于内蒙古自治区乌兰察布盟凉城县境内,是一个规模不大的内流微咸水湖泊,它是在地堑盆地基础上经积水而成的一个断陷湖。该地在气候上正处在半湿润和半干旱区的过渡带,座落在东亚季风区的西北缘,属于中温带半干旱季风气候,冬季长而寒冷,夏季短而温暖,日照率高,无霜期短,年温差和日温差较大,降水较少,蒸发旺盛,多风沙天气。岱海流域面积为 $2289km^2$ ,陆地海拔介于黄海高程1221—2127m。岱海处于岱海盆地的最低处,最低点高程为1205m,依靠盆地内暂时性地表径流和地下径流以及湖面降水补给。没有出水口,水量支出全为蒸发。注入岱海的河流以及河沟共有22条,总长度409.6km,大都是季节性河流。

岱海地区地质构造复杂,湖水面曾有过大起大落的变化,是一个气候变化的敏感区。从本世纪30年代开始,地质学家们就对岱海开展了一系列的研究,50—80年代,国内的许多研究机构相继对岱海湖水化学特性、湖泊流域的地貌、生物资源及流域的水文特征进行了较为详细的调查研究。1986年,中国科学院南京地理与湖泊研究所开展了晚更新世以来岱海沉积环境与气候变化的综合研究,并写出了中国湖泊系列研究中的第一本专著<sup>[1]</sup>。1996年,笔者与中国科学院南京地理与湖泊研究所再次对岱海进行了地理学、水文学和水生生物学的综合考察。在这次考察的基础上,通过与历史文献数据相比较,探讨

**收稿日期:**1999-10-15; **修订日期:**2000-05-30

**基金项目:**国家自然科学基金(39670150);中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站项目;中国科学院湖沼特别支持领域第二期资助课题

**作者简介:**赵斌(1969—),男,湖北钟祥人,主要从事淡水生态学研究和网络信息系统开发工作。参加部分采样工作的还有中国科学院南京地理与湖泊研究所姜加虎、黄群、黄文钰等三位同志,在此特别感谢

岱海水质咸化过程中相关生态因子的变化规律。

## 1 采样点设置

岱海的形状较不规则,介于长方形和椭圆形之间。岱海湖底为一不对称的盆地,最深部位不在中部而偏向东北,湖区周围比较平坦,逐渐向湖心倾斜变深。根据湖盆的形态、水深和径流分布等因素,全湖共设定 13 个采样点(图 1)。水样根据实测水深分层采样,考虑到浅水区域受风力搅动的影响,表、底层水质比较均匀,所以仅分表、底两层采样,而深水区则分三层采样。表层水样在水面下 0.5m 处采得,底层水样在湖底上 0.5m 处采得,中层水样在温跃层下部采得,各采样点所采分层水样等量混合后测试。现场测定气温、水温、水深、透明度、pH、电导率和溶解氧等理化因子,其他理化项目的分析均在采样后不超过 48h 内完成。各样点在采样同时用 GPS 定位仪定位。

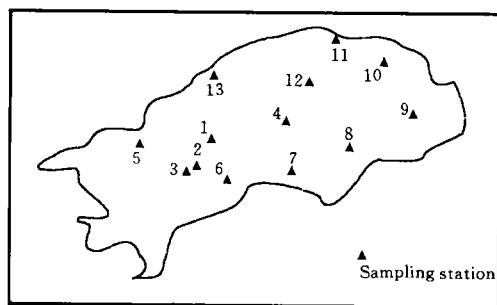


图 1 岱海采样点示意图

Fig. 1 Distribution of sampling points in Daihai Lake

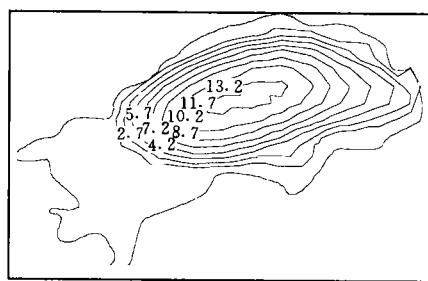


图 2 基于 13 个采样点拟合的岱海的水下地形图

Fig. 2 Topographic map fitted by depth of 13 sampling points in Daihai Lake

## 2 水质咸化相关因子的比较

### 2.1 水位及深度的变化

历史上岱海的面积较小,湖水矿化度较高,曾是熬盐沥碱的地方。自从 1929 年大旱以后,由于气候趋于湿润引起入湖水量增加,水面逐渐扩大,1943 年前水位基本保持稳定状态,此后,湖水上涨的幅度比较大,特别是 1956 年以后的湖水上涨尤为显著。但自 70 年代开始,由于兴修农田水利,在入湖河流的上游修坝拦洪,注入岱海的水量有所减少。近 30 年来,岱海水位呈下降趋势,湖水深度也相应减小,本次调查中所测定的最大深度仅 13.5m(12# 站),同 1986 年 7 月王苏民等测定的最大深度相比,约减少 2.5m。文中对以上 13 个采样点实际测定的深度在计算机上进行了等值线拟合,并绘制了水下地形图(图 2),它同王苏民等<sup>[1]</sup>用仪器所测的结果非常相似,似可说明岱海的水下地形在这 10 年内变化很小。

### 2.2 透明度

岱海湖水的透明度从湖岸到湖心逐渐增加(图 3)。岸边水浅,底部的底泥和河流所携带的泥沙增加了湖水的浊度,从而影响其透明度。同时,这些底泥和泥沙还为浮游生物

的生长提供了营养,浮游植物的生长和繁殖也可使水色增加,二者都对湖水透明度的增加有一定影响。

### 2.3 表层水温的平面分布及水温的垂直分布

岱海表层水温的平面分布差异比较明显,最高水温和最低水温相差  $1.7^{\circ}\text{C}$ 。总的的趋势是从岸边到湖心水温逐渐降低,西北方向的水温相对要比其他地方的低(图 4)。一般影响水温平面分布的主要原因除了太阳辐射外,还有风和降雨等因素。岱海接受太阳辐射基本是均匀的,不应当成为影响湖水表面温差的主要原因。岱海处于盆地之中,南北两侧尤其是北侧较高东西走向的山脉起了阻挡作用,使得岱海成为相对于风力强劲的近中蒙边界地区的风影区,平均风速和大风次数大大低于邻近地区,风力的减弱阻碍了表层水之间的交换,所以湖面的不同区域会出现较大的温差。

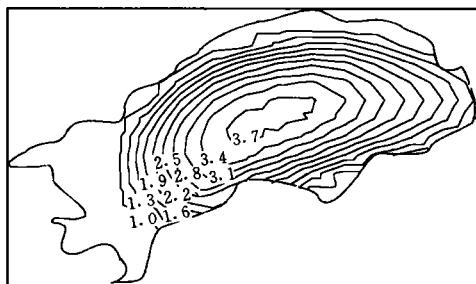


图 3 1996 年夏季岱海透明度等值线(m)

Fig. 3 Isoline of transparency in the Daihai Lake  
(Summer, 1996)

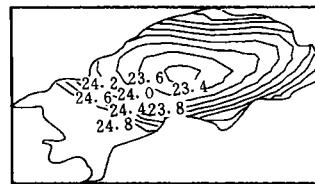


图 4 1996 年夏季岱海表层水温等值线(℃)

Fig. 4 Isoline of surface temperature in  
Daihai Lake (summer, 1996)

岱海主要受西北风的影响,风吹打在水面上,增加了水分蒸发,而水分的蒸发要吸收大量的热量,使得周围的温度降低。这是引起岱海西北向水温比其他方位低的主要原因之一。同时,由于蛮汗山的作用,岱海的西北有较多的地形雨<sup>[1,2]</sup>,这也是引起岱海西北水温相对低的原因。

从水温的垂直分布来看,岱海的深水区(1<sup>#</sup>, 4<sup>#</sup>, 12<sup>#</sup> 采样点)都出现了明显的分层现象,甚至在同一地点的不同深度上出现数个温跃层的情形,因为辐射加热作用可以使在弱风条件下表层形成温跃层,最后在强风作用下下降,接着在弱风条件下又形成新的表面温跃层<sup>[3]</sup>。例如 4<sup>#</sup> 采样点(图 5),一个明显的温跃层出现在 10—12m 深度之间,另一个不太明显的温跃层出现在 2—3m 深度之间。

### 2.4 电导率的分布

电导率综合反映溶解在水中各种带电荷离子的导电能力,也是间接反映水中溶解盐含量的一个指标。测得岱海电导率的平均值为  $6.86\text{mS/m}$ ,这同 1987 年测得湖水的电导率( $5.57\text{mS/m}$ )相比,有明显的增加。电导率的变化同矿化度的变化是一致的,这也说明了岱海的矿化度还在增加。从电导率的平面分布(图 6)来看,岱海西南部、东部和北部比西部和东北部要高。而岱海电导率垂直分布并不明显(表 1)。

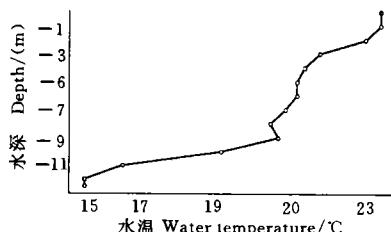


图 5 1996 年夏季岱海水温的垂直变化

Fig. 5 Vertical changes of temperature in  
Daihai Lake (summer, 1996)

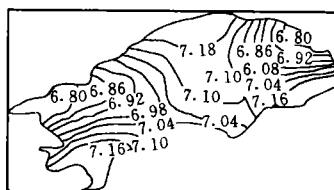


图 6 1996 年夏季岱海电导率等值线 (mS/m)

Fig. 6 Isoline of electric conductivities in Dajhai Lake (summer, 1996)

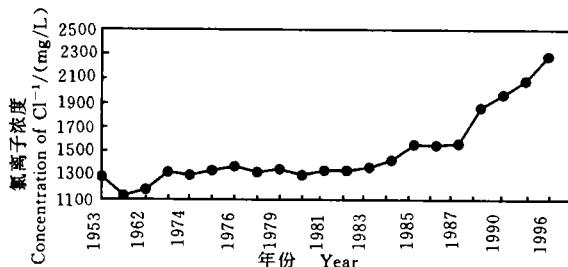


图 7 岱海历年氯离子的浓度变化(横坐标非等分划分)

Fig. 7 Concentration variety of chloride ion in Daihai Lake from 1953 to 1996 (Axis of abscissa is non-uniform scale)

表 1 1996 夏季岱海电导率垂直分布

Tab. 1 Vertical distribution of electric conductivities in Daihai Lake (summer, 1996)

| 采样点<br>Sampling points | 1 <sup>#</sup> | 2 <sup>#</sup> | 3 <sup>#</sup> | 4 <sup>#</sup> |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 表层 Surface             | 6.85           | 6.90           | 6.90           | 6.80           |
| 中层 Middle              | —              | —              | —              | 6.80           |
| 底层 Bottom              | 6.85           | 6.90           | 6.90           | 6.75           |

## 2.5 钙镁含量与总硬度的变化

一般认为,当 Al, Fe, Mn, Sr, Zn 含量不高时,湖水的总硬度主要由 Ca, Mg 离子当量确定。从历年的数据来看(图 8),岱海的 Ca 离子从 60 年代到 80 年代呈现逐年减少的趋势,80 年代末和 90 年代初略有上升;而 Mg 离子则保持逐年增长的趋势,并且增加较快,特别是从 1986 年到 1996 年 10 年时间增加了 44% (1986 年为 93.4mg/L, 1996 年为 134.39mg/L)。这一方面使得总硬度相应呈现逐年增加的趋势,另一方面又使得钙镁比例关系发生明显变化,钙镁的比值越来越小,导致严重的钙镁比例失调,这对鱼类生长是极为不利的。如黄旗海,在 1964 年钙镁的当量比为 0.0867(1:11.53)时,湖中鲤、鲫生长尚好,且能繁殖,鲢、鳙也能生长,但到 1972 年湖水中钙镁当量比为 0.0406(1:24.62)时,湖中鲤、鲫不能繁殖,鲢、鳙也大量死亡<sup>[4]</sup>。目前,岱海钙镁当量比为 0.1824(1:5.48),这一变化趋势应当引起注意。

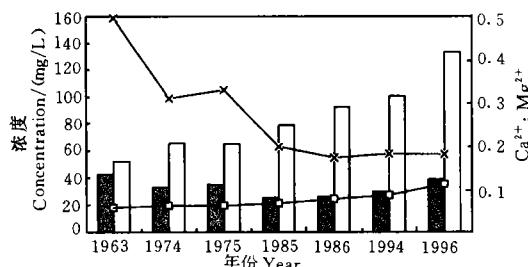


图 8 岱海历年 pH 值及总碱度的变化  
(横坐标非等分划分)

Fig.8 Variety of pH and total alkalinity in Daihai Lake from 1953 to 1996 (Axis of abscissa is non-uniform scale)

■Ca<sup>2+</sup> □Mg<sup>2+</sup> \* 钙镁高量比 □总硬度

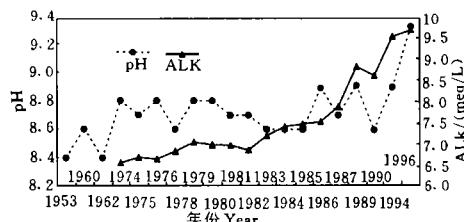


图 9 岱海不同年代钙、镁含量和总硬度的变化

Fig.9 Concentration changes of calcium ion, magnesium ion and total hardness (German Degree) in Daihai Lake from 1963 to 1996

## 2.6 氯离子的变化

在岱海的阴离子中,Cl<sup>-</sup>是最主要的(约占阴离子总数的80%),它是决定岱海湖水矿化度高低的主要成分,而且氯离子含量的高低也直接反映了湖水补给的多少以及湖水处于淡化或浓缩的过程。一般情况下,水位降低、湖水量减少时,氯离子含量将增加。

岱海的氯离子从1953—1974年的二十来年里一直在1100—1300mg/L之间波动;从1974年以后略有上升,但一直到80年代中期也一直比较平稳,总的的趋势是略有增长但变化不大,稳定在1300—1500mg/L之间。之后,氯离子浓度增加速度加快:从1984年到1990年6年时间增加546mg/L,增长幅度为37.8%;从1990年到1996年又一个6年时间增加861mg/L,增长幅度为43.3%。这种氯离子含量增长加速的现象应当引起足够的重视。因为较高的氯离子浓度对鱼类受精卵的孵化率有不利影响。目前岱海水中氯离子的含量(2306.1mg/L)已远远超过影响渔业生产的1000mg/L的上限指标<sup>[4-7]</sup>。

## 2.7 pH 值及总碱度的变化

从图9可以看出,历年来岱海的pH值有逐步上升的趋势,这主要因湖水蒸发浓缩而引起离子浓度及比例之间的变化等原因所致。在1974—1989年的15年中,pH值变化较为平缓,呈缓慢上升趋势,一直大于我国渔业用水标准。80年代末到90年代中期,pH值几乎是跳跃性地上升。一般在生物能适应的pH值(6—9.5)范围内,较高的pH值能支持更多量的水生植物的生长与繁殖<sup>[9]</sup>。但目前岱海pH值(9.33)已经接近鱼类生存范围的最上限10<sup>[6-8]</sup>,如果再继续发展下去,势必造成对水生生物生存的不利影响,对渔业生产构成严重威胁。

岱海的总碱度也有逐年增长的趋势,而且增长极为明显。一般认为,当总碱度>3.5meq/L时,会抑制水生生物的生长。目前岱海的总碱度(9.68meq/L)已远远高于这个指标,将严重影响岱海水生生物生长及渔业生产的提高。

## 3 小结

### 3.1 岱海研究具有重要意义

在封闭型内陆湖泊中,流域内的河、溪通过径流排水于终点湖(Terminal lake),水分

蒸发后,盐分不断汇集,水体内溶解盐浓度逐渐增加的过程称为内陆水体盐碱化<sup>[10]</sup>。在特定的自然条件下,水质咸化过程是一个自然演替现象。在中国,面积大于1km<sup>2</sup>的湖泊大约有2300个,其中总湖泊面积的一半是咸水湖泊<sup>[11]</sup>,主要分布在内蒙、新疆、青海和西藏地区。另外,中国的28座大型湖泊(面积>500km<sup>2</sup>)中有14座是咸水湖泊<sup>[12]</sup>。

尽管内陆湖泊的水质咸化是一个自然过程,但是人为的对自然水文循环的干扰及不合理的开发利用也是引起湖泊盐度增加的重要因素,这种干扰引起的湖泊盐碱化一般被称作为次生盐碱化(Secondary salinization)<sup>[13]</sup>。

岱海是一个典型的封闭型内陆湖泊,它的水位变化及其水量的增加完全受控于流域降水、入湖水量,而排水则完全靠湖面的蒸发。晚更新世以来,由于气候的变化和季风的强弱而引起的气候带界限的迁移极为频繁,使得岱海成为一个气候敏感区。另外,岱海自其成湖以来,一直是一个封闭湖泊、湖滨的地貌和钻孔沉积物特点均反映出湖水面有着大起大落的变化,即使在人类历史时期也仍然继续保持着这种变化的特点,相应地湖水的盐度也表现出较大的变化幅度<sup>[1]</sup>。所以,岱海的研究对于了解中国北方水体水质咸化过程具有相当重要的意义。

### 3.2 岱海的水质咸化过程正在加强

在岱海流域,随着人口的增长,农牧业的不断发展,耕地面积逐年增加,天然草场变为耕地,植被覆盖率大幅度降低,水土流失日趋严重,造成岱海水体的盐碱污染负荷增加。根据近40年的资料记录来看,盐碱化仍然是岱海突出的问题。而且进入90年代,这种趋势更加愈演愈烈。pH值、总碱度、氯离子含量的变化都清晰地表明,岱海的水质咸化过程正在加强。这同哈伦等<sup>[14]</sup>1986年根据历史数据对岱海盐碱化的预测存在较大的差距。

### 3.3 岱海的水质还在高度硬化

岱海从1962年以来,其硬度一直在硬水范围之内,而且增加速度很快,这与岱海周围土质有密切的关系。与此同时,岱海湖水不断蒸发,碱度不断增加的同时,钙离子以碳酸钙的形式析出,而碳酸镁的溶解度又比碳酸钙要高,所以,湖水中镁离子浓度相应地不断增加。这种比例的失调将造成对渔业生产十分不利。

### 3.4 岱海的富营养化程度减轻

不管是从单因子的比较,还是从综合营养状态指数来看,岱海的营养状态同80年代相比,都有不同程度的降低,岱海已经从中-富营养状态,甚至是富营养状态转变成了中营养和贫-中营养状态,叶绿素和初级生产力也十分低下<sup>[15]</sup>。这种由中-富营养状态转变成贫-中营养状态的情况在其他湖泊中并不多见。究其原因,是因为岱海入水中污染物减少所致,还是因为渔业产量的提高(1995年的鱼产量为724t,比80年代提高了数倍,为自岱海开展渔业生产以来的最高记录)而产生的“下行效应”?但目前如此低的浮游植物初级生产力<sup>[15]</sup>对岱海渔业生产的持续发展并不十分有利。

当然,岱海中氨氮浓度的急速上升(从1989年的0.025mg/L增加到1996年的0.224mg/L)也应当是一个引起注意的问题<sup>[15]</sup>。这种不协调的变化,对于水体其他资源的开发构成了潜在的威胁。

## 参考文献:

- [1] 王苏民、余源盛、吴瑞金,等.岱海——湖泊环境与气候变化,中国湖泊系列研究之一[M].合肥:中国科学技术

- 大学出版社, 1990
- [2] 金相灿. 中国湖泊环境(第二册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1995
- [3] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 抚仙湖[M]. 北京: 海洋出版社, 1990
- [4] 黄河水系渔业资源调查协作组. 黄河水系渔业资源[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1986
- [5] 杜昭宏、张建华、张彩青. 内蒙古岱海水质环境演变及对渔业资源的影响[J]. 干旱区资源与环境, 1995, 9(1): 34—39
- [6] 史为良. 我国某些鱼类对达里湖碳酸盐型半咸水的适应能力[J]. 水生生物学集刊, 1981, 7(3): 359—369
- [7] 雷衍之、董双林、沈成钢. 碳酸盐碱度对鱼类毒性作用的研究[J]. 水产学报, 1985, 9(2): 171—183
- [8] 张礼善. 青草鲢鳙对氢离子浓度的生存适应性[J]. 水生生物学集刊, 1960, (5): 141—
- [9] 美国环保局(许宋仁译). 水质评价标准[M]. 北京: 建筑工业出版社, 1981
- [10] Williams W D. Salinization of river and streams: An important environmental hazard [J]. *Ambio*, 1987, 16: 180
- [11] Wang Hongdao. The water resources of lakes in China [J]. *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 1987, 5(3): 263—280
- [12] Chang W Y B. Large lakes of China [J]. *J. Great Lakes Res.*, 1987, 13(3): 235—249
- [13] Hart B T et al. A review of the salt sensitivity of the Australian freshwater biota. [J]. *Hydrobiologia*, 1991, 210: 105—144
- [14] 哈伦、白韶丽. 岱海湖盐碱化的预测[J]. 环境保护, 1986, 6(7): 26—30
- [15] 赵斌、蔡庆华、黎道丰, 等. 岱海水质咸化过程中营养状况的变化[J]. 水生生物学报, 2000, 24(5): 509—513

## STUDIES ON THE CHANGES OF SEVERAL ECOLOGICAL FACTORS DURING THE PROCESS OF WATER SALINIZATION IN DAIHAI LAKE, CHINA

ZHAO Bin, CAI Qing-hua, LIU Rui-qiu and LI Dao-feng

(Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences; State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Wuhan 430072)

**Abstract:** Daihai Lake ( $112^{\circ}33'31''$ — $46^{\circ}40'E$ ,  $40^{\circ}29'7''$ — $37^{\circ}6''N$ ) is a semi-saline-alkaline lake, which located in Inner Mongolia Plateau of China. Based on the results of the chemical and biological surveys of Daihai Lake in summer, 1996 and the survey of geography, hydrology and hydrobiology since 1950s, the author dealt with a comparative analysis on the changes of several relevant ecological factors from 1953 to 1996. Chloride ion, pH and total alkalinity of the lake were gradually increased during the study period, the concentration of chloride ion being  $2306.1\text{mg/L}$ , pH 9.33 and total alkalinity  $9.68\text{meq/L}$  in 1996, which approach to the upper limit for freshwater fish survival. According to above significant changes, the conclusion could be drawn that the process of salinization of Daihai Lake is getting strong. Also, in the study, the concentration changes of calcium and magnesium ion, ratio of calcium and magnesium, and total hardness was regarded.

**Key words:** Daihai Lake; Salinization of water; Ecological factor; Computer fitting