

呼伦湖水位、盐度变化(1961–2002年)*

李 翀¹, 马 巍¹, 史晓新², 廖文根¹

(1: 中国水利水电科学研究院 水环境研究所, 北京 100038)

(2: 水利部水利水电规划设计总局, 北京 100011)

摘 要: 为重建水文资料缺乏的呼伦湖流域的水文、水质序列, 本研究基于长期的气象观测记录, 采用彭曼公式估计了湖泊的水面蒸发, 并建立一个两参数月水量平衡模型模拟湖周的入流, 通过水量平衡计算, 建立了42年(1961–2002)的呼伦湖区水量变化序列, 并模拟了湖泊月水量、水位、含盐度的变化。模拟的水位、含盐度变化趋势与实际比较接近, 模拟精度较好, 其误差在可以接受范围内。所重建的42年呼伦湖区水文、含盐度序列, 可为该区域的水资源评价管理、开发利用提供科学依据。

关键词: 水文序列重建; 含盐度; 水量平衡模型; 呼伦湖

Reconstruction of the hydrology series and simulation of salinity in ungauged Lake Hulun

LI Chong¹, MA Wei¹, SHI Xiaoxin² & LIAO Wengen¹

(1: Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR), Beijing 100038, P. R. China)

(2: Water Resources and Hydropower Planning and Design General Institute, MWR, Beijing 100011, P. R. China)

Abstract: Water resource plays an important role in social and economical activity in China, especially in northern arid or semi-arid regions. In the ungauged Lake Hulun basin, an approach combining two-parameters monthly water balance model and mass balance equation was developed in the study to reconstruct the hydrological and salinity series. 42-years hydrological and salinity monthly series are reconstructed in the Lake Hulun using the model. Simulated water level and salinity are in good agreement with the observed annual mean data. The estimation of water resources and salinity is reliable, and supports the solid base for wise management of water resources in Lake Hulun.

Keywords: Reconstruction of hydrological series; salinity; monthly water balance model; Lake Hulun

随着社会经济的发展, 水资源缺乏的干旱半干旱地区的水资源可持续利用, 成为人们关注的重点。在水文资料缺乏或不足的区域的水文系列生成及水资源估计与评价, 是一项很必要的工作, 更是区域水资源开发利用的前提和基础。无资料区水文预测(PUB, Prediction of Ungauged Basin)是国际水文学会(IAHS)现十年研究工作的重点^[1], 世界多个国家研究人员正对这一问题展开深入研究。

区域水量平衡的估计可以依据多种水文模型进行估计, 例如系统模型、概念性模型、物理模型等。月水量平衡模型由thornthwaite于1948年最早提出, 随后得到广泛的发展与应用, 我国仅在“八五”、“九五”科技攻关中就先后提出过五参数月水量平衡模型、新安江月模型、半干旱半湿润地区月水量平衡模型和两参数月水量平衡模型^[2]。它的一个主要目的是用于无资料地区或有较长年限的降水和蒸发(或气温)观测资料但流量资料年限太短的地区的长系列流量的重建。

湖泊的水化学变化, 尤其是西部湖泊含盐度的变化, 一直是人们关注的一个问题。通常根据湖水矿化度(含盐度)将湖泊分为淡水湖、咸水湖和盐湖三类, 即矿化度小于1.0 g/L的湖泊称为淡水湖, 矿化度在

* 国家自然科学基金(30490231)资助项目。2005-03-14 收稿; 2005-09-19 收修改稿。

李翀, 男, 1971年生, 高级工程师, 博士; E-mail: Lichong@iwhr.com.

1.0–35.0 g/L 之间的湖泊称咸水湖, 矿化度大于 35.0 g/L 的湖泊称为盐湖^[3]. 李万春从湖泊水量平衡及水文过程、湖泊水化学等方面对位于青藏高原中部的兹格塘错湖泊盐度变化进行分析, 研究了湖泊在气候变化和人类活动双重影响下的时空响应规律^[4]. 湖泊由淡水湖向咸水湖演变转化, 会对湖泊原有生态系统造成很大影响. 对于存在这种演变趋势的湖泊, 研究其含盐度的变化趋势, 就有很重要的实际意义^[3,4].

严登华等从呼伦湖流域生态水文过程的发生发展着手, 探求了生态水文过程对水环境系统的影响^[5]; 韩向红等在大量详实资料和调查基础上, 分析了呼伦湖富营养化状况及成因^[6]; 在两篇文献中, 引用的均是多年平均的水量数据. 关于呼伦湖流域的水文、水资源变化情况, 呼伦湖志给出部分年份(1959–1981年, 1991–1997年)的湖泊年平均水位序列^[7], 以及当地水文部门给出的多年平均水量分析^[8], 未见长序列的呼伦湖流域水文、水质公开成果. 本研究为重建水文资料缺乏的呼伦湖流域的水文、水质序列, 应用长期的气象观测记录, 采用彭曼公式^[9]估计了湖泊的水面蒸发, 并建立一个两参数月水量平衡模型^[10]模拟湖周的入流, 通过水量平衡计算, 建立了 42 年(1961–2002 年)的呼伦湖区水量变化序列, 并模拟了湖泊月水量、水位、含盐度的变化.

1 呼伦湖流域概况

呼伦湖也称达赉湖, 是我国北方最大的湖泊, 在湖泊水位 545.0 m(黄海高程)时, 湖水面积 2339 km². 她坐落在内蒙古呼伦贝尔大草原中部, 属额尔古纳河水系. 呼伦湖流域总面积为 33469 km², 呼伦湖水系包括: 呼伦湖、贝尔湖、乌尔逊河、克鲁伦河、哈拉哈河、沙尔勒金河、乌兰泡和新开河(达兰鄂罗木河)等主要支流和湖泊(图 1). 呼伦湖湖水补给除大气降水和地下水外, 主要来自发源于蒙古国东部的克鲁伦河, 以及连接贝尔湖和呼伦湖的乌尔逊河. 排水通道为新开河. 流域地处中温带半干旱大陆性季风区, 多年平均降水量为 268 mm, 76% 的降水集中在 6–9 月. 流域春季干燥多风, 夏季温热, 春夏两季蒸发量大, 5–9 月蒸发量为 1188–1444 mm, 5–6 月的蒸发量为 615–732 mm(20 cm 蒸发皿资料). 水系历年封冻期一般为 11 月至翌年 5 月, 长达 180 d^[6,7].

呼伦湖流域主要水文站有乌尔逊河的坤都冷水文站、克鲁伦河的阿拉坦额莫勒水文站, 以及邻近流域海拉尔河的嵯岗水文站(图 1). 达赉湖湖泊试验站曾于 1959–1981 年设立, 观测湖泊的水位、水温、降雨、蒸发、含盐度等多项记录, 而后于 1991 恢复测量水位. 试验站观测资料序列不完整, 能收集到的只有年平均、年最高、年最低三个水位, 未见长序列的水量分析成果. 虽然在新开河上修建有控制水闸, 但湖水出流没有任何观测记录. 坤都冷及阿拉坦额莫勒水文站以下未有控制观测站的流域面积超过 19000 km², 占总面积的 57%. 三个水文站及湖泊试验站观测记录资料情况如表 1 所示.

气象站比较靠近的是满洲里站, 在呼伦湖北边约 30 km 处(图 1). 具有 1960–1998 年的日观测气象数据, 气象参数包括日降水量、日平均气温、日最高最低气温、日平均风速、日平均相对湿度、日照时间等. 由于各水文站蒸发观测记录不连续, 且用于估计水面蒸发的折算系数未知, 因而本研究采用彭曼公式^[9], 用满洲里站 1960–1998 年的气象记录计算呼伦湖的水面蒸发, 并与最邻近湖泊的阿拉坦额莫勒站的蒸发观测记录比较, 其相关性达到 0.95, 拟合的折算系数为 0.61, 与 FAO 及前人的研究成果比较接近, 可以认为模拟的水面蒸发是合理的^[11].

2 呼伦湖水量平衡估算与水位变化

呼伦湖近乎一个内陆性湖泊, 只有在湖泊高水位或海拉尔河高水位时, 呼伦湖才会通过新开河与海拉尔河有一些水量交换. 呼伦湖水量平衡方程为:

$$\Delta H = P_L + R_S + R_C - E_L - R_{out} \quad (1)$$

其中, ΔH 为湖水水位升降幅度(mm); P_L 为湖面降水量(mm); R_C 为湖周入湖径流(地表、地下)折算径流深度(mm); R_S 为入湖河道径流折算径流深度(mm); E_L 为湖面蒸发量(mm); R_{out} 为流出折算径流深度(mm), 计算中当湖泊水位超过 544.8 m 时, 按新开河闸门设计过流能力泄流. 湖周径流包括地表径流和地下径流, 后者又包括潜水入流和地下泉水补给.

呼伦湖流域坤都冷站、阿拉坦额莫勒站两站的来水量认为是呼伦湖区主要的地表入流. 本研究根据泰

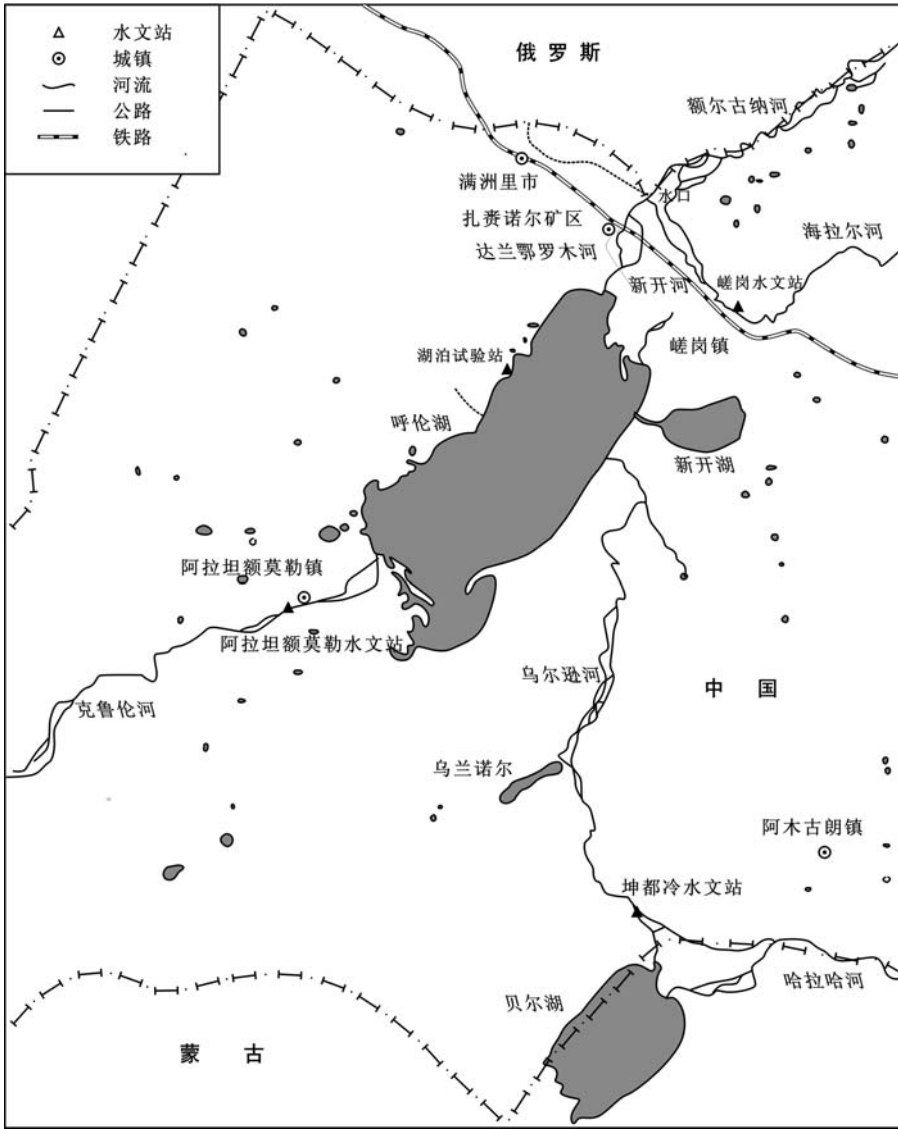


图1 呼伦湖流域示意图

Fig. 1 Sketch map of Lake Hulun

森多边形法,将坤都冷站、阿拉坦额莫勒站以下流域、呼伦湖区及周边无资料区,以满洲里、坤都冷站、阿拉坦额莫勒站和嵯岗站为中心划分为四个大区域,每区域含湖周汇流区、湖面两部分。湖面部分分别按对应站的降雨计算湖面降水量,蒸发统一采用计算的水面蒸发,1998年以后则用阿拉坦额莫勒站观测值折算。湖周部分建立月水量均衡模型来估计湖周分区的径流。

双参数月水量均衡模型在国内外被认为是结构相对简单但能有效模拟月出流^[10]。因此,本研究采用该模型来估算湖周入湖径流。模型简单表述如下:

$$\left. \begin{aligned} E_t &= C \cdot EP_t \cdot \tanh[P_t/EP_t] \\ Q_t &= [S_{t-1} + P_t - E_t] \cdot \tanh\{[S_{t-1} + P_t - E_t]/S_c\} \\ S_t &= S_{t-1} + P_t - E_t - Q_t \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, E_i 为实际月蒸发量; EP_i 为作物参考蒸发量, 可由彭曼公式计算; P_i 为月降水量; \tanh 为双曲正切函数; C 为模型参数; Q_i 为湖周入湖径流; S_i 为土壤含水量; S_c 为区域土壤含水状况, 是模型参数.

表 1 呼伦湖流域各水文站流量、降水、蒸发有观测记录年限表

Tab. 1 Period of observed data at hydrological gauges in Lake Hulun basin

	坤都冷站	阿拉坦额莫勒站	嵯岗站	湖泊试验站
距离湖泊	199 km	16 km	30 km	湖泊近岸
高程(黄海高程)	579 m	548 m	548 m	540 m
年均/最高/最低水位	-	-	-	1959—1981 年 1991—2002 年
月流量	1961—2002 年	1960—2002 年	1960—1986 年	
月降水	1961—2002 年	1960—2000 年	1960—1986 年	
月蒸发	1966—2002 年	1960—1966 年 1974—1981 年 1996—2002 年	1974—1986 年	
盐度	1981, 2003 年	1981, 2003 年		1963, 1974, 1981 年 1985, 2002, 2003 年

考虑径流、气象等资料的配合性, 根据以上公式及水面蒸发估算结果, 计算出呼伦湖近 42 年(1961—2002 年)来湖泊水量平衡关系(图 2), 其中, 水量收入大于支出的有 22 年, 占 52.3%; 水量支出大于收入的有 20 年, 占 47.7%. 多年平均总入流是 $23.79 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中降雨 $5.76 \times 10^8 \text{ m}^3$ (24.2%), 有水文站的两河入流是 $12.07 \times 10^8 \text{ m}^3$ (50.7%), 湖周入流是 $5.96 \times 10^8 \text{ m}^3$ (25.1%). 多年平均总出流是 $24.76 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中蒸发 $23.32 \times 10^8 \text{ m}^3$ (94.2%), 新开河出流是 $1.44 \times 10^8 \text{ m}^3$ (5.8%). 从 1961 年到 2002 年的湖泊水量减少率是 $0.97 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$. 从整体上看, 尽管蒸发量较大, 但还是稍小于总入流量, 因此呼伦湖近 42 年来水量收入是微大于蒸发支出的.

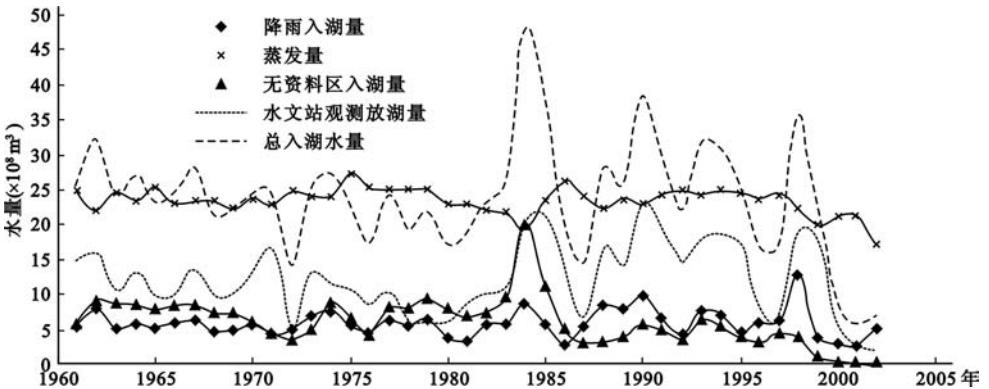


图 2 呼伦湖水量平衡变化

Fig. 2 Water balance during 1960–2002 in Lake Hulun

与已有研究成果比较,文献[5]-[8]成果相近,估计的呼伦湖年降水入湖量为: $6.29 \times 10^8 \text{ m}^3$,湖周地表径流为: $2.58 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水补给(1982年观测)为 $3.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,克鲁伦河与乌尔逊河入流为 $12.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,年蒸发量为 $25.8 \times 10^8 \text{ m}^3$.与上述研究成果比较,多年平均计算成果有将近10%的差别.这一差别一则是由于计算采用的年限不一致,二则是蒸发、湖周径流估计采用的方法不一致,文献采用取产流模数为0.1来估计湖周径流,地下水补给为1982年一个完整丰水年的调查数.本研究侧重在水文序列的重建,衡量重建序列是否合理,最好是与湖泊已有的观测记录比较,看误差是否可以接受,演变趋势是否一致.为此,本研究根据水量平衡方程式(1),推测了呼伦湖的月水位变化过程(图3).呼伦湖水位随降雨及入流波动较大.1961-2002年42年中,最低水位542.82 m(1982年6月),最高水位545.33 m(1962年10月).

由于呼伦湖实测水位只有有限年份的最高、最低、平均水位三个数据(如图3中的三种点所示),加上我们在计算过程中进行了若干处理和简化,如下垫面的季节变化、冻土层的影响、降水分布的不均匀性等方面都没有考虑,本文得出的水位变化与实际相比,除1998年在-51 cm,1992年在+33 cm,其余年平均水位的误差在-10 cm至+24 cm之间,多年平均误差为+5 cm.1992年、1998年误差相对较大,其原因可能在于,该年观测站观测的降雨代表性不够,模型中土壤含水量与该年的实际差别较大以及从新开河泄流与实际不符合.根据呼伦湖的水位库容关系,本文对比了年模拟库容与实际的差别,1998年差别最大,为 $10.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ (9.3%,占库容比),1992年为 $8.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ (6.7%),其余年在 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ (4.5%)内.多年平均误差 $1.19 \times 10^8 \text{ m}^3$ (1.0%),误差还是比较小的.

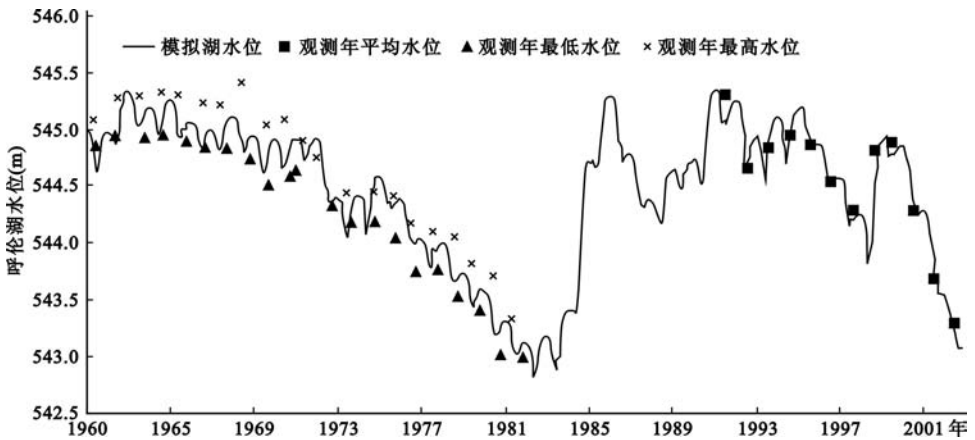


图3 呼伦湖1961-2002年月水位变化及与记录值比较

Fig. 3 Comparison between simulated monthly water level and observed record from 1961 to 2002 in Lake Hulun

由于没有更多的资料来率定与验证模型,模拟的水位在个别年份误差相对大一点,但水位变化的趋势与实际比较接近,湖泊水位、库容的误差及相对误差比较小,重建的水文序列是合理的.

3 呼伦湖含盐度变化趋势

呼伦湖是一个由淡水湖、微咸水湖(半咸水湖)和咸水湖不断相互转化的湖泊,上世纪三、四十年代,湖水含盐量大于 1000 mg/L ,属于微咸水湖.1962年为 777 mg/L ,变为淡水湖.1974年属微咸水湖,1981年湖水含盐量为 1261 mg/L ,目前湖水含盐量 1466 mg/L ,属微咸水湖.

为了解近42年来呼伦湖水体的化学变化历程,本研究在水量平衡估算的基础上,依据近42年来流域降水资料,结合流域的水体化学特征,运用盐度平衡方程,对呼伦湖水体近42年来盐度的变化进行了计算.

3.1 呼伦湖盐度平衡方程

内陆湖湖水的盐度受以下因子制约:入湖径流,地下水补给,降水化学成分,生物地球化学过程,湖内不

同盐的溶解度和沉降分异等等^[4]. 呼伦湖在 1961 - 2002 年期间可以看作一个封闭湖盆, 考虑盐度的年际变化. 研究中假设: (1) 各月湖水中含盐度均匀分布; (2) 多年入湖径流和地下泉水的盐度不变; (3) 多年降水的含盐量不变; (4) 每月通过各种渠道(吸附、沉降、沉淀、生物体吸收或消耗等)脱离湖体的盐分总量与湖泊总来水量正相关, 则盐度平衡方程可以表示为:

$$V_{i+1}S_{i+1} = V_iS_i + P_iS_p + R_{si}S_{RS} + R_{Gi}S_{Rg} - R_{out,i}S_i - D \quad (3)$$

其中, i 为月份, 以 1961 年 1 月为第 1 月 ($i=1$), 依次向后类推; V_i, V_{i+1} 分别为第 i 月和第 ($i+1$) 月湖泊容积 ($\times 10^8 \text{ m}^3$); S_i, S_{i+1} 则为第 i 月和第 ($i+1$) 月湖泊含盐度 (mg/L); $P_i, R_{si}, R_{Gi}, R_{out,i}$ 分别为第 i 月的降水量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$), 河流入湖径流 ($\times 10^8 \text{ m}^3$), 湖周入湖径流 ($\times 10^8 \text{ m}^3$) 和新开河泄流量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$); S_p, S_{RS}, S_{Rg} 分别为降水、入湖河流径流和湖周入湖径流含盐量 (mg/L); D 为每月通过各种渠道脱离湖体的盐分总量 (kg).

表 2 呼伦湖及克鲁伦河、乌尔逊河含盐量观测记录

Tab. 2 Observed salinity record in Lake Hulun, Kelulun River and Wu'ersun River

年份	湖水含盐量 (mg/L)	克鲁伦河水含盐量 (mg/L)	乌尔逊河水含盐量 (mg/L)
1962	777		
1963	990		
1974	> 1000		
1981	1261	230	260
1985	1055		
2002	1300		
2003	1466	290.5	514

呼伦湖及克鲁伦河、乌尔逊河含盐量观测记录如表 2 所示. 模拟中, 入湖河流含盐量在 1981 年前假定为 1981 年观测值, 1981 年后按 1981 年到 2003 年观测值线性插值. S_p, S_{Rg} 根据相关文献赋值.

除 D 外, (3) 式中其余参数均可获得. 根据前述假定 (4), 结合 1981 年、1985 年记录数据, 对 D 进行了近似的估算:

$$D = \alpha \cdot \sum_{i=1}^{60} (P_i + R_{si} + R_{Gi}) \\ = [V_1S_1 - V_{60}S_{60} + \sum_{i=1}^{60} (P_iS_p + R_{si}S_{RS} + R_{Gi}S_{Rg} - R_{out,i}S_i)] \quad (4)$$

将 1981、1985 年湖水含盐度及前面模拟的月水量平衡数据代入, 得 $x = 180.0$, 即每年通过各种渠道脱离湖体的盐分总量大约为 $0.6 \times 10^6 \text{ t}$, 相应 2003 年湖泊总的含盐量是 $12.3 \times 10^6 \text{ t}$, 每年的去除量只占总含盐量的 5%.

4.2 呼伦湖近 42 年来盐度变化

根据 (3) 式, 假设 1961 年湖水含盐度为 1000 mg/L , 估算出近 42 年来呼伦湖盐度变化的大致历程 (图 4). 可以看出, 盐度与近 42 年来的水位变化大致成负相关关系, 湖水水位高时, 含盐度就低; 湖水水位低时, 含盐度就高. 根据表 3 中的含盐量观测与模拟结果比较可知, 观测与模拟结果绝对差值基本在 $\pm 100 \text{ mg/L}$ 以内 (1962 年差值稍大, 为 191 mg/L), 相对差值基本保持在 $\pm 10\%$ (1962 年稍大为 25%). 由于呼伦湖地处高纬度地区, 一年之中有半年时间湖泊处于封冻状态, 期间的含盐度比开封期会偏高 $300 - 400 \text{ mg/L}$, 而且湖泊不同区域的含盐度也会有 100 mg/L 左右的差别. 1962 年与 1963 年在水位差别只有 3 cm 的情况下, 含盐度却有将近 220 mg/L 的差别, 这不能排除其中一个年份的测量时间或测量位置与其余的有比较大的不同. 从变化趋势是否一致来看, 模拟结果能较好反映呼伦湖历年盐度的变化趋势.

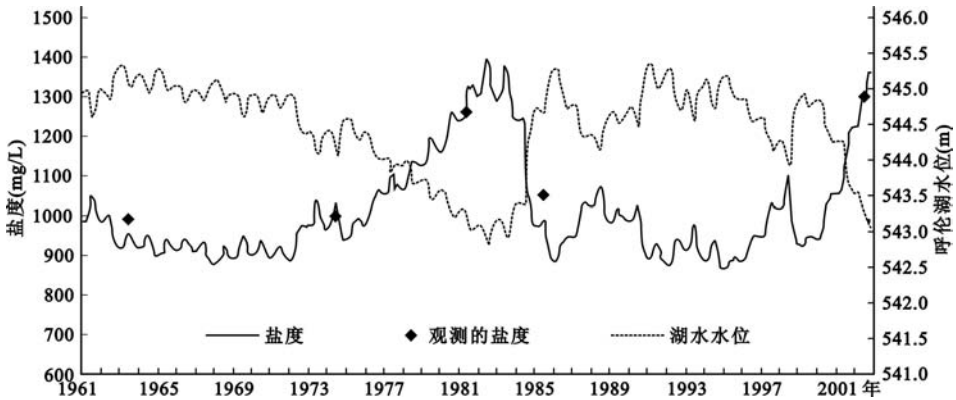


图4 呼伦湖含盐量变化

Fig. 4 Variation of salinity during 1961 - 2002 in Lake Hulun

表3 呼伦湖湖水含盐量、水位观测与模拟对比表

Tab.3 Comparison of simulated and observed data on salinity and water level in Lake Hulun

年份	年平均水位(m)		年平均容积($\times 10^8 \text{ m}^3$)		含盐量(mg/L)	
	观测值	模拟值	观测值	模拟值	观测值	模拟值
1962	545.04	545.05	132.20	132.2	777	968.0
1963	545.07	545.17	132.91	134.9	990	934.1
1974	544.28	544.37	114.65	117.1	>1000	977.6
1981	543.15	543.15	90.26	90.7	1261	1285.7
1985		544.88		128.5	1055	950.6
2002	543.29	543.28	93.17	93.5	1300	1302.1
2003	542.84		83.92		1466	

4 结论

本文基于长时序的气象观测资料,采用彭曼公式对半干旱区湖泊呼伦湖的水面蒸发进行估计,并构建一个两参数月水量平衡模型,在水文资料欠缺的呼伦湖流域,建立了42年(1961-2002)的呼伦湖区月水量变化序列,并比较了模拟的湖水位与观测的湖水位记录,趋势一致,误差在可以接受的范围之内。本研究基于水量平衡计算,建立含盐度质量平衡方程,估计了42年呼伦湖含盐度变化,并与观测的记录比较,趋势一致,误差在可以接受的范围之内。

总之,本文建立的估计无资料地区或有较长年限的降水和蒸发(或气温)观测资料但流量资料年限较短的半干旱地区的长系列水量平衡分析模型及含盐度质量平衡模型,其模拟结果可靠,所建立的呼伦湖流域水量平衡42年月序列数据及呼伦湖水位、含盐度演变序列,可以为该区域水资源分析评价、开发利用提供科学基础。

5 参考文献

- [1] Sivapalan M, et al. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003 - 2012: shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, 2004.
- [2] 熊立华,郭生练编著,分布式流域水文模型.北京:中国水利水电出版社,2004.

- [3] 金相灿等著. 中国湖泊环境, 第一册. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [4] 李万春. 青藏高原湖泊现代过程研究——以兹格塘错为例, 中国科学院南京地理与湖泊研究所[博士论文], 2001.
- [5] 严登华, 何 岩, 邓 伟等. 呼伦湖流域生态水文过程对水环境系统的影响. 水土保持通报, 2001, 21(5): 1 - 5.
- [6] 韩向红, 杨 持. 呼伦湖自净功能及其在区域环境保护中的作用分析. 自然资源学报, 2002, 17(6): 684 - 690.
- [7] 地方志编写委员会. 呼伦湖志(续志一, 1987 - 1997). 呼和浩特: 内蒙古文化出版社, 1998.
- [8] 金相灿等著. 中国湖泊环境, 第二册. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [9] Richard G. Allen *et al*, Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO, Rome, 1998.
- [10] Xiong Lihua, Guo Shenglian. Two-parameter water balance model and its application. *Journal of Hydrology*, 1999, 216: 315 - 347.
- [11] 李 翀, 马 巍, 叶柏生等. 呼伦湖水面蒸发及水量平衡估计, 水文, 2005(已接受).