

三峡库区蒸发特征及其影响气象要素关系浅析

向 娇, 张 楚*, 张释今, 曾 令

长江水利委员会长江三峡水文水资源勘测局, 湖北 宜昌

收稿日期: 2022年11月18日; 录用日期: 2022年12月17日; 发布日期: 2022年12月31日

摘 要

三峡工程建成后, 随着库区水面面积的突然增大, 该地区水面蒸发量的参数特征有了明显的改变, 因此分析三峡库区的水面蒸发特征, 对提高区域水文特征的认识非常有必要。选取三峡库区巴东蒸发站和巴东气象局多年观测成果为对象, 分析库区陆上蒸发场蒸发量、气温和水温等观测要素差异及其相关关系发现: 陆上水面蒸发量多年平均为852.9 mm, 蒸发量随月呈周期性变化, 整体呈现出1~8月为上升期, 9~12月为下降期; 水面蒸发量有明显季节性的特征; 蒸发量年际变化较大, 极值比为1.27; 气温与蒸发的正指数相关较好。

关键词

三峡库区, 水面蒸发量, 巴东蒸发站, 特征, 气温, 水温

Analysis of the Relationship between Evaporation Characteristics and Influences of Climate Factors in the Three Gorges Reservoir

Jiao Xiang, Chu Zhang*, Shijin Zhang, Ling Zeng

Yangtze River Three Gorges Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Changjiang Water Resources Commission, Yichang Hubei

Received: Nov. 18th, 2022; accepted: Dec. 17th, 2022; published: Dec. 31st, 2022

Abstract

After the completion of the Three Gorges Project, with the sudden increase of water surface in the reservoir area, the characteristic parameters of water surface evaporation nearby have changed obviously. Therefore, it is necessary to analyze the characteristics of evaporation in the Three Gorges Reservoir, so

作者简介: 向娇(1969-), 女, 工程师, 主要从事水文测验和水文水资源研究, Email: 448082491@qq.com

*通讯作者 Email: 602343995@qq.com

as to improve the understanding of regional hydrological characteristics. Based on years of observation in the Reservoir from Badong evaporation station and Badong Meteorological Bureau, the differences between evaporation, air temperature, water temperature and other observations are analyzed. The annual mean water surface evaporation on land is 852.9 mm, and the evaporation varies periodically with month, appearing as an increasing from January to August and a decreasing from September to December. The evaporation of water surface has obvious seasonal characteristics, the inter-annual variation of water evaporation is obviously and the extreme ratio can reach to 1.27. The air temperature has a positive exponential relationship between the land and water evaporation.

Keywords

Three Gorges Reservoir, Water Surface Evaporation, Badong Evaporation Station, Characteristics, Air Temperature, Water Temperature

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 前言

水面蒸发是水循环过程中的一个重要环节，是水库、湖泊等水体水量损失的主要部分。开展水面蒸发观测工作，能更好地探索水体的水面蒸发及蒸发能力在不同地区和时间上的变化规律，为水资源评价和科学研究提供依据[1][2]。

中国于 20 世纪 20 年代开始用直径 80 厘米蒸发器观测水面蒸发[3][4]，50 年代开展蒸发实验研究[3][5]。80 年代初根据全国蒸发实验资料，确定了不同气候区的各类蒸发器折算系数及水面蒸发计算模型[3][5]。随着现代社会的高速发展，人们生活水平的不断提高，水资源的开发、利用急剧增长，这就要求我们更精确地进行水资源的评价。开展水面蒸发实验与研究的目的，就是为了探求水体的水面蒸发量以及蒸发能力在不同地区和时间上的变化规律，弄清水面蒸发与气象因子的关系，从而准确得到水库、湖泊等天然水体的蒸发量。对于湖泊(水库)等天然水体水面蒸发量的观测和计算，我国开展了许多研究，取得了丰硕的成果，为湖泊(水库)规划、调度管理及水文、水资源分析与计算提供了可靠的决策依据[2][6]。

三峡水库建成后，库区水面增加导致水面蒸发损失量增大，研究作为自然界水循环中最基本因素之一的蒸发量已成必然[4]。巴东蒸发站从 2013 年 1 月开始筹建。7 月 1 日，开始陆上观测场陆上水面蒸发观测(E601B 型蒸发器)、气象自记观测，观测要素有：陆上水面蒸发量、降水量、气象辅助项目(包括气温、湿度、气压、风向、风速、日照、水温)[4]。巴东蒸发站的正式运行，为更加准确地提供三峡水库水面蒸发数据提供了有力的支撑，也为探求区域水体的水面蒸发以及蒸发能力的变化规律，正确评估库区蒸发量，为水库的科学合理调度提供资料。

2. 观测试验及资料整理

2.1. 测站概况

巴东蒸发站位于长江上游干流、三峡库区中段，观测站位置见图 1 (110°22'E, 31°03'N)[4]。陆上水面蒸发观测场场地高程 181.3 m (1985 国家高程基准)，观测场四周较空旷，条件良好，是三峡库区的蒸发代表站。

2.2. 资料的收集与整理

2.2.1. 资料来源

巴东蒸发站依据《水面蒸发观测规范》(SL630-2013)采用 E601B 型蒸发器收集陆上水面蒸发量观测资料，



Figure 1. The location map of observation field on Badong Evaporation Station
图 1. 巴东蒸发站陆上观测场的位置图

以及实时配套收集的气象辅助观测资料。每月对收集的资料进行了整理、分析及月报表制作，年终按《水文资料整编规范》(SL/T 247-2012)要求进行了年度整编，经过专业水文机构的三性审查。

2.2.2. 资料的代表性分析

为了验证水面蒸发量观测成果的代表性，收集了巴东蒸发站与巴东气象局观测资料成果进行代表性分析。巴东蒸发站与巴东气象局地理位置相近，二者平面相距 2.8 km (图 1 所示)，高程差 113 m，总体上气候大背景条件一致[4]。

由于巴东蒸发站陆上水面蒸发量从 2013 年 7 月开始观测[4]，所以分析采用 2014~2021 年观测资料成果，统计两站点多年月平均水面蒸发量观测值，并绘出其变化曲线(见图 2)。从图上可知，两站点观测的水面蒸发量逐月变化过程是一致的；巴东气象局蒸发量在 1~6 月份和 9~12 月份高于巴东蒸发站蒸发量，在 7 月份和 8 月份较低；月份均值差在-7.1~8.9 mm 的变化范围内，年蒸发量相对误差为 1.5%~3.7%，成果比较接近。

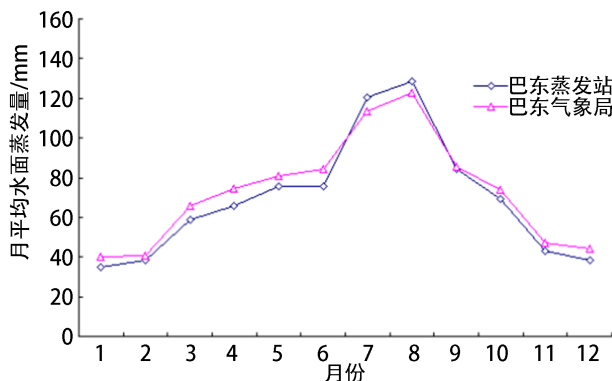


Figure 2. The changing process of monthly average evaporation at Badong Evaporation Station and Meteorological Bureau
图 2. 巴东蒸发站与气象局逐月平均蒸发量变化过程

进一步分析两观测站水面蒸发量的相关关系。图 3 给出了 2014 年~2021 年巴东气象局与巴东蒸发站陆上月蒸发量的相关图。由图可知，两观测站月水面蒸发量呈现显著的线性相关，相关系数为 0.975，线性函数关系式为：

$$y = 0.8637x + 11.241 \quad (1)$$

式中： x 为巴东漂浮蒸发试验站陆上月蒸发量(mm)； y 为巴东气象局月蒸发量(mm)。

经统计分析发现，整理后的蒸发资料完整，成果合理，数据正确，具有良好的连续性、可靠性和代表性。

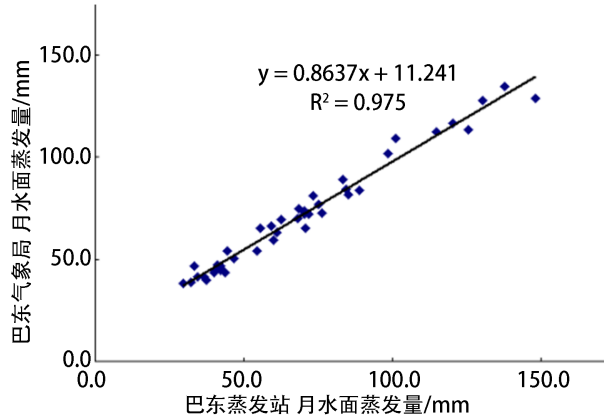


Figure 3. The relationship of monthly water surface evaporation at Badong Evaporation Station and Meteorological Bureau

图 3. 巴东蒸发站与巴东气象局月水面蒸发量相关图

2.3. 水面蒸发量与气象要素的相关性分析

水面蒸发过程是外界热力、动力条件下水分子乱流扩散运动的过程。蒸发量就是水(或冰)体中的分子从水面逸出和空气中的水分子进入水体的通量差。蒸发速度的大小，是由水体吸热(散热)的多少，及近水面空气层乱流扩散条件所决定的。水面蒸发受到多种气候因子的综合影响。大气温度、水体的水温、空气湿度或水汽压差、太阳辐射、风速风向、气温日较差、气压、地温等都会对蒸发量造成影响[2] [3] [5]。

结合巴东蒸发站观测的陆上蒸发量和气象辅助资料，分别计算水面蒸发量与各影响气象要素的相关性，计算结果见表 1。

Table 1. The correlation between water surface evaporation and meteorological elements

表 1. 水面蒸发量与各气象要素相关性

观测位置	气象要素	样本数	相关系数
陆上观测场	气温	82	0.868
	水温	82	0.836
	相对湿度	82	0.007
	日照时数	82	0.388
	风速	82	0.056
	气压	82	0.694

通过表 1 可以看出，陆上水面蒸发量与气温、水温的相关性较好，其次是气压(呈负相关) [7] [8]，与相对湿度、日照时数、风速、均较差。各气象要素对 E601B 型蒸发器水面蒸发量的影响程度，从大到小的排列顺序依次陆上为气温 > 水温 > 气压 > 日照时数 > 风速 > 相对湿度[7] [8]，水上为日照时数 > 水温 > 气温 > 气压 > 风速 > 相对湿度。

3. 水面蒸发量分布规律分析

3.1. 水面蒸发量月变化分析

采用陆上观测场 E601B 型蒸发器观测成果统计多年月平均蒸发量见表 2。从表中可以看出, 陆上水面蒸发量多年平均为 852.9 mm, 水面蒸发量随月呈周期性变化, 即最小蒸发量在 1 月份, 最大蒸发量在 8 月份。年内分布不均匀, 水面蒸发量 4~10 月占 75.6%, 最大占比 8 月为 16.3%, 是 1 月 4.1% 的 4 倍。从其它气象要素来看, 这一期间的温度高、风速大, 其中平均气温为 26.6℃, 最高气温更是达到 37℃ 以上。另外, 水温、水面与空气的水汽压、水质、水体的大小等也有一定的影响。

Table 2. Statistics of multi year monthly average evaporation

表 2. 多年月平均蒸发量统计表

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年
水面蒸发量/mm	35.3	36.1	60.3	68.3	86.1	70.0	117.7	139.3	92.9	70.5	42.1	34.6	852.9
月分配/%	4.1	4.2	7.1	8.0	10.1	8.2	13.8	16.3	10.9	8.3	4.9	4.1	100

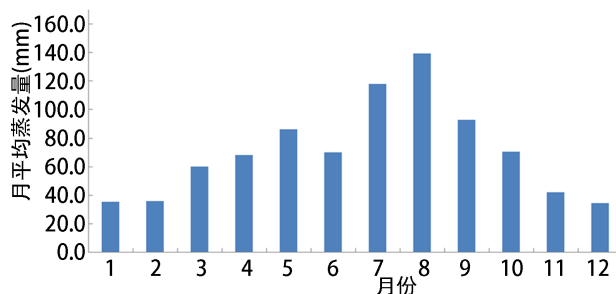


Figure 4. Changes in multi year monthly average land evaporation

图 4. 多年月平均陆上蒸发量变化

经统计绘出巴东蒸发站实测陆上蒸发量月平均蒸发量变化见图 4。从图 4 可以看出, 陆上蒸发随季节变化明显, 整体呈现出 1~8 月为上升期, 9~12 月为下降期。

3.2. 水面蒸发量的季节性的特征

通过对巴东蒸发站的实测气温资料统计分析, 表明三峡水库区域四季分明, 春季为 3~5 月份、夏季为 6~8 月份、秋季为 9~11 月份和冬季为当年 12 月~次年 2 月份。水面蒸发量也有季节性的特征, 分布情况是春季占全年的 25.2%、夏季占 38.3%、秋季占 24.1%、冬季占 12.4%。

3.3. 水面蒸发量的年际变化特征

统计巴东蒸发站的年蒸发总量, 水面蒸发量年际变化较大。结果表明, 陆上观测场观测的年蒸发量年际变化为 770.4~981.8 mm, 极差为 211.4 mm, 极值比为 1.27。从历年年总蒸发量过程上看, 水面蒸发量逐年变化呈波动性, 在变化过程中水面蒸发量年际变化有显著逐渐下降的趋势, 平均每 10 年减少了 34.3 mm。

4. 影响水面蒸发量的主要气象要素分析

4.1. 气温与水面蒸发量关系分析

气温决定着空气里的饱和水汽含量和水汽分子散播的快慢。气温愈高, 蒸发也愈大[9] [10] [11] [12]。统计结果表明, 巴东蒸发站陆上的多年年平均气温为 18.5℃, 其年内分布特征是, 1 月份温度最低, 7 月份温度最高。

2~7 月份为气温上升阶段, 当年 8 月~次年 1 月份为气温下降过程, 气温年较差大。图 5 为陆上水面蒸发量与气温的相关图, 从水面蒸发量与气温的相关分析可知, 当风速等其它要素变化不大时, 水面蒸发量随气温的增高而增大, 一般呈正指数关系, 相关系数为 0.868。起初, 蒸发随气温的增高缓慢增加, 当达到一定气温(大约 20℃)以上时, 随着气温的增高, 蒸发量增加较快, 这是由于水分子活跃程度加速引起的。其拟定后的关系式为:

$$E_{\text{月}} = 21.217e^{0.0586t_{\text{气温}}} \quad (2)$$

式中: $E_{\text{月}}$ ——E601B 型蒸发器的月水面蒸发量, 单位: mm; $t_{\text{气温}}$ ——月平均气温, 单位: °C。

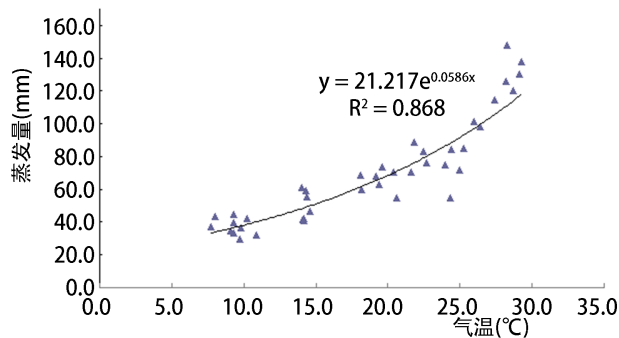


Figure 5. The relationship between land water surface evaporation and air temperature

图 5. 陆上水面蒸发量与气温关系

4.2. 水温与水面蒸发量关系分析

水温决定水分子活跃程度, 反映水分子运动能量的大小, 水温越高, 水分子运动能量越大, 逸出水面的分子就越多, 蒸发也越大。当水温高于气温时, 水面附近的薄层空气较暖而轻, 易于上升, 加速了蒸发的作用, 反之蒸发较慢[10] [11] [13]。

统计得出巴东蒸发站观测 E601B 型蒸发器内年平均水温为 18.4°C, 与年平均气温(18.5°C)相当。其年内分布特征为, 1 月份最低, 7 月份达到最高, 2~7 月份为水温上升阶段, 当年 8 月~次年 1 月份为水温下降过程, 年温差较大。图 6 为陆上水面蒸发量与水温的相关图, 可以看出其具有较好相关性, 水面蒸发量随水温的增高而增大, 一般呈正指数关系, 相关系数为 0.836。其拟定后的关系式为:

$$E_{\text{月}} = 21.827e^{0.0574t_{\text{水温}}} \quad (3)$$

式中: $E_{\text{月}}$ ——E601B 型蒸发器的月水面蒸发量, 单位: mm; $t_{\text{水温}}$ ——月平均水温, 单位: °C。

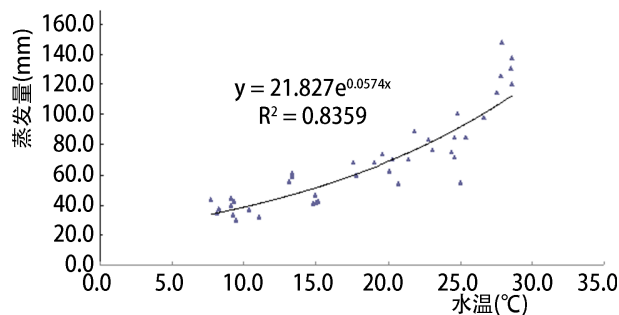


Figure 6. The relationship between land water surface evaporation and water temperature

图 6. 陆上水面蒸发量与水温关系

4.3. 气温与水温关系分析

统计气温和水温月年观测成果，绘制相关图 7。从图 7 可以看出，陆上水温与气温的存在很好的线性相关，相关系数为 0.992。其拟定后的关系式为：

$$t_{\text{水温}} = 0.998t_{\text{气温}} - 0.0679 \quad (4)$$

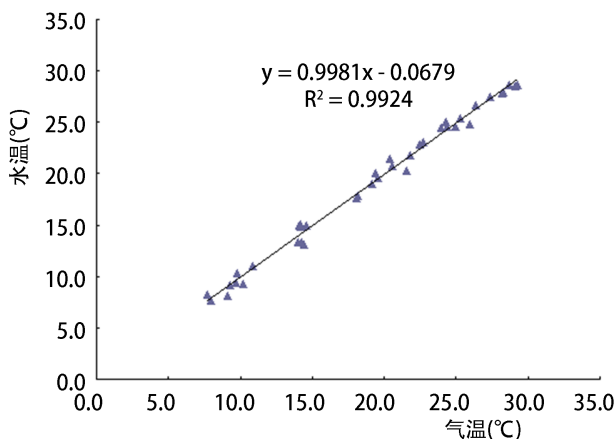


Figure 7. The relationship between land water temperature and air temperature

图 7. 陆上水温与气温关系

5. 结论

通过对巴东蒸发站和巴东气象局陆上水面蒸发场多年观测成果分析，发现三峡水库库区水面蒸发量主要具有以下蒸发特征：

1) 陆上蒸发量多年平均为 852.9 mm，蒸发量随月呈周期性变化，即最小蒸发量在 1 月份，最大蒸发量在 8 月份，整体呈现出 1~8 月为上升期，9~12 月为下降期。年内分布不均匀，水面蒸发量 4~10 月占 75.6%，最大占比 8 月为 16.3%，是 1 月 4.1% 的 4 倍。水面蒸发量有明显季节性的特征，分布情况是春季占全年的 25.2%、夏季占 38.3%、秋季占 24.1%、冬季占 12.4%。

2) 水面蒸发量年际变化较大。年水面蒸发量年际变化为 770.4~981.8 mm，极差为 211.4 mm，极值比为 1.27。从年总蒸发量过程上看，水面蒸发量逐年变化呈波动性，在变化过程中水面蒸发量年际变化有显著逐渐下降的趋势，平均每 10 年减少了 34.3 mm。

3) 陆上的多年年平均气温为 18.5℃，其年内分布特征为 1 月份温度最低，7 月份温度最高。2~7 月份为气温上升阶段，当年 8 月~次年 1 月份为气温下降过程，气温年较差大。陆上水面蒸发量与气温的相关性较好，当风速等其它要素变化不大时，水面蒸发量随气温的增高而增大，一般呈正指数关系，相关系数为 0.868。其拟定后的关系式为： $E_{\text{月}} = 21.217e^{0.0586t_{\text{气温}}}$ 。

4) 多年年平均水温为 18.4℃。其年内分布特征为：1 月份最低，7 月份达到最高，2~7 月份为水温上升阶段，当年 8 月~次年 1 月份为水温下降过程，年温差较大。陆上水面蒸发量与水温具有较好相关性，蒸发量随水温的增高而增大，一般呈正指数关系，相关系数为 0.836。其拟定后的关系式为： $E_{\text{月}} = 21.827e^{0.0574t_{\text{水温}}}$ 。

参考文献

- [1] 黄英, 王宇. 云南省蒸发量时空分布及年际变化分析[J]. 水文, 2003(2): 36-40.
HUANG Ying, WANG Yu. Spatial and temporal distribution and inter annual change analysis of evaporation in Yunnan Prov-

- ince. *Journal of China Hydrology*, 2003(2): 36-40. (in Chinese)
- [2] 孙夏利, 费良军, 李学军. 我国水面蒸发研究与进展[J]. *水资源与水工程学报*, 2009(8): 17-22, 25.
SUN Xiali, FEI Liangjun and LI Xuejun. Research and progress of water surface evaporation in China. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2009(8): 17-22, 25. (in Chinese)
- [3] 张有芷. 我国水面蒸发实验研究概况[J]. *人民长江*, 1999(3): 6-8, 50.
ZHANG Youzhi. A survey of experimental study on water surface evaporation in China. *Yangtze River*, 1999(3): 6-8, 50. (in Chinese)
- [4] 张祎, 刘杨, 张释今. 三峡水库近 20 年水面蒸发量分布特征及趋势分析[J]. *水文*, 2018(6): 90-96.
ZHANG Yi, LIU Yang and ZHANG Shijin. Distribution and trend analysis of surface evaporation in Three Gorges Reservoir in recent 20 years. *Journal of China Hydrology*, 2018(6): 90-96. (in Chinese)
- [5] 施成熙, 卡毓明, 朱晓原. 确定水面蒸发模型[J]. *地理科学*, 1984(3): 1-11.
SHI Chengxi, KA Yuming and ZHU Xiaoyuan. Determine the water evaporation model. *Scientia Geographica Sinica*, 1984(3): 1-11. (in Chinese)
- [6] 闵骞. 水库(湖泊)水面蒸发量推求方法的探讨[J]. *水文*, 1991(5): 39-43.
MIN Qian. Discussion on the method of calculating water surface evaporation in reservoir (lake). *Journal of China Hydrology*, 1991(5): 39-43. (in Chinese)
- [7] 张祎. 各种型式蒸发器(皿)水面蒸发量的统计相关分析[J]. *水文*, 1998(2): 45-47.
ZHANG Yi. Statistical correlation analysis of water evaporation in various types of Pan evaporators. *Journal of China Hydrology*, 1998(2): 45-47. (in Chinese)
- [8] 姚孝诚. 玻璃钢 E-601 蒸发器性能的比测试验[J]. *水文*, 1993(6): 35-39.
YAO Xiaocheng. Performance test of FRP E-601 Pan evaporator. *Journal of China Hydrology*, 1993(6): 35-39. (in Chinese)
- [9] 钱云平, 李万义. 动水水面蒸发实验研究初探[J]. *人民黄河*, 1997(4): 5-8.
QIAN Yunping, LI Wanyi. Experimental study on water surface evaporation. *Yellow River*, 1997(4): 5-8. (in Chinese)
- [10] 张祎, 牛兰花, 樊云. 葛洲坝蓄水以后库区蒸发水量的计算与分析[J]. *水文*, 2000(3): 33-35.
ZHANG Yi, NIU Lanhua and FAN Yun. Calculation and analysis of evaporation volume in the reservoir area after Gezhouba impoundment. *Journal of China Hydrology*, 2000(3): 33-35. (in Chinese)
- [11] 闵骞, 刘影. 鄱阳湖水面蒸发量的计算与变化趋势分析(1955-2004 年) [J]. *湖泊科学*, 2006(5): 452-457.
MIN Qian, LIU Ying. Calculation of lake evaporation and trend analysis of Poyang Lake: 1955-2004. *Journal of Lake Sciences*, 2006(5): 452-457. (in Chinese)
- [12] 王远明, 张祎, 李成荣. 宜昌站水面蒸发折算系数分析[J]. *人民长江*, 1999(1): 41-42, 45.
WANG Yuanming, ZHANG Yi and LI Chengrong. Analysis of water surface evaporation conversion coefficient of Yichang station. *Yangtze River*, 1999(1): 41-42, 45. (in Chinese)
- [13] 柯鸿水, 戴珍丽. 南四湖水面蒸发量分析计算[J]. *水文*, 1995(4): 13-17.
KE Hongshui, DAI Zhenli. Analysis and calculation of water surface evaporation of Nansi Lake. *Journal of China Hydrology*, 1995(4): 13-17. (in Chinese)