

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.2011.03.008

## 水面蒸发对南水北调江苏段调水效率的影响

仇宝云<sup>1</sup>, 王 斐<sup>1</sup>, 冯晓莉<sup>1</sup>, 黄海田<sup>2</sup>, 杨兴丽<sup>1</sup>

(1. 扬州大学能源与动力工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 江苏省水利厅科学技术委员会, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 为了掌握南水北调东线江苏境内工程输水河道和调蓄湖库水面蒸发损失水量, 及其所造成的泵站机组损失功率, 了解水面蒸发对工程调水效率的影响, 分析比较了适用于工程所在地区的水面蒸发量计算模型和计算公式, 计算了工程沿线输水河道和调蓄湖库的水面蒸发量, 分析了工程水面蒸发量的时间和空间分布特征. 通过积分, 计算了水面蒸发造成的各梯级泵站的流量损失和输入功率损失, 求解并分析了水面蒸发对整个江苏段工程调水效率的影响. 结果表明: 工程沿线水面年蒸发量自南向北、西北方向逐渐递增; 蒸发量夏季最高, 冬季最低; 全线平均水面年蒸发量为 862.2 mm. 洪泽湖、骆马湖、白马湖和输水河道蒸发损失水量分别占总蒸发损失水量的 77.7%、13.3%、3.6% 和 5.4%, 蒸发损失水量约占源头泵站抽水量的 17.46%, 使工程平均调水效率降低 10.33%. 调水工程可以考虑采用管道输水, 从而避免蒸发损失.

**关键词:** 南水北调东线; 江苏段; 输水河道; 水面蒸发量; 工程调水效率; 调蓄湖库

**中图分类号:** S277.9; TV68 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2011)03-0219-05

Effects of water surface evaporation on water transfer efficiency for  
Jiangsu section of South-to-North Water Diversion ProjectQiu Baoyun<sup>1</sup>, Wang Fei<sup>1</sup>, Feng Xiaoli<sup>1</sup>, Huang Haitian<sup>2</sup>, Yang Xingli<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127, China; 2. Science &amp; Technology Commission of Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

**Abstract:** In order to know the evaporating capacity of channel and lake reservoir water surface along Jiangsu section of the Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project (JERP), its power loss of the pumping stations and its influence on water transfer efficiency of JERP, evaporating capacity calculating models and formulae which are suitable for the areas where JERP locates were analyzed and compared. Evaporating capacity of every channel and lake reservoir water surface along JERP was calculated by integral. Both spacial and temporal distribution characteristics of the evaporating capacities of water surfaces were analyzed. The discharge loss and input power loss of every step pumping stations caused by water surface evaporation were calculated. The effect of water surface evaporation on water transfer efficiency of JERP was computed and analyzed. The results show that the evaporating capacities of water surfaces gradually increase from south to north and north-west, and are largest in summer and least in winter. The annual average evaporating capacity of water surfaces amounts to 862.2 mm. The evaporation water volume losses of Hongze Lake, Luoma Lake, Baima Lake and water transfer channels are 77.7%, 13.3%, 3.6% and 5.4% of the total evaporation water volume loss respectively. 17.46% of the water pumped by source pumping stations loses for evaporation, which causes water transfer efficiency of JERP to decrease by 10.33%, and that is a considerable energy

收稿日期: 2010-07-27

基金项目: 全国百篇优秀博士学位论文作者专项基金资助项目(2007B41); 江苏省水利科技重点项目(2008054)

作者简介: 仇宝云(1962—), 男, 江苏扬州人, 教授, 博士生导师(yzdxqby@sohu.com), 主要从事大型泵站及其调水研究.

王 斐(1984—), 女, 江苏宜兴人, 硕士(wangfei\_wx@163.com), 主要从事大型泵站及其调水研究.

loss. Pipelines could be considered for the great water transfer projects which could avoid evaporating capacity of water surface.

**Key words:** Eastern Route of South-to-North Water Diversion; Jiangsu section; water transfer channels; evaporating capacity of water surface; water transfer efficiency of project; lake reservoirs

远距离电力提水调水工程,通过泵站提水、河道(渠道)或管道输水,在工程能量输送和转换过程中会产生各种能量损失。当采用河道(渠道)输水时,由于水面蒸发,将不可避免地产生水量和能量损失,影响工程的调水效率。工程输配电能量损失较小,计算简单;泵站能量损失已有大量研究,较为成熟。文献[1-2]分别计算了输电损耗和变压器损耗,文献[3]研究了泵站辅助设备的能耗计算,文献[4-5]在研究泵站运行优化方案中考虑了主机组的能耗。然而,输蓄水造成的损失,研究较少<sup>[6]</sup>,特别是河库水面蒸发水量损失对调水效率的影响,尚未知晓。

文中不考虑上游来水,计算南水北调东线江苏境内工程沿线输水河道及调蓄湖库的水面蒸发量和蒸发损失水量,分析蒸发量的时间和空间分布规律;研究蒸发水量损失造成的各梯级泵站的功率损失以及对整个工程调水效率的影响。

## 1 水面蒸发量与蒸发水量计算方法

### 1.1 蒸发量计算模型

在我国,水面蒸发量的计算,常用彭曼模型、质量转移模型和道尔顿模型,以及根据地区的气候、地理条件对这3种模型中的参数进行修正的公式。

彭曼模型需要使用水面辐射资料,而我国观测水面辐射的站点极少,使彭曼模型的使用受到一定限制。质量转移模型结构简单,在欧美地区广泛使用,但在我国的使用效果较差。作者采用道尔顿模型计算水面蒸发量。道尔顿公式的一般形式为

$$E = \Delta e \cdot f(w), \quad (1)$$

式中:  $E$  为单位时间(日)内的水面蒸发量, mm;  $\Delta e$  为表层水温对应的饱和水汽压差, hPa;  $f(w)$  为水面以上  $Z$  高度的风速的函数。

这里采用工程附近地区气象站蒸发池的水面蒸发量计算公式,计算工程当地的水面蒸发量,即

$$E' = 0.138 \Delta e' (1 + 0.725 w'_{10}), \quad (2)$$

式中:  $E'$  为蒸发池月平均日蒸发量, mm;  $\Delta e'$  为饱和水汽压差, hPa;  $w'_{10}$  为气象站 10 m 高处风速的月均值, m/s。

$$\Delta e' = e_0(t_{0.1}) - e_{1.5},$$

其中:  $e_0(t_{0.1})$  为查算出的气象站 0.1 m 深处地温  $t_{0.1}$  的月均值对应的饱和水汽压, hPa;  $e_{1.5}$  为气象站 1.5 m 高处水汽压的月均值, hPa。

由于式(2)为蒸发池的水面蒸发量计算公式,而自然水体和蒸发池蒸发量两者存在差异,因此需用表1的  $\alpha$  值进行校正,则水面蒸发量  $E$  计算公式为

$$E = \alpha E'. \quad (3)$$

表 1  $\alpha$  值在年内不同月份的取值

Tab. 1  $\alpha$ 's values of different months in the year

月份	$\alpha$	月份	$\alpha$	月份	$\alpha$
1	0.80	5	0.94	9	1.10
2	0.80	6	1.03	10	1.03
3	0.85	7	1.06	11	1.00
4	0.89	8	1.07	12	1.00

在缺少水汽压资料的情况下,  $\Delta e'$  可由空气饱和差  $d'$  求得<sup>[7]</sup>:

$$\Delta e' = 1.268 d' + 0.19, \quad (4)$$

式中:  $d'$  为地面月平均空气饱和差, hPa, 其值为

$$d' = (1 - S') e', \quad (5)$$

式中:  $S'$  为空气相对湿度, %;  $e'$  为饱和水汽压。

$$e' = e_0 \times 10^{\frac{7.63t}{241.9+t}},$$

其中:  $e_0 = 6.11$  hPa<sup>[8]</sup>;  $t$  为气温, °C。

综上所述,月平均日蒸发量的计算式为

$$E = 0.138 \alpha \left[ 7.735 (1 - S') \times 10^{\frac{7.63t}{241.9+t}} + 0.19 \right] \times (1 + 0.725 w'_{10}). \quad (6)$$

### 1.2 蒸发量与蒸发水量的计算公式

根据工程沿线各输水河道的长度,在每条河道中插入若干个计算点,按照区域内的气温、空气相对湿度和风速时空分布规律进行插值,得出各计算点各月份的地面气温、空气相对湿度和风速的多年月平均值,应用式(6)计算出各点的日水面蒸发量。

将江苏段工程输水河道分成 31 个河段,第  $i$  河段长度为  $L_i$ ,其任一断面的水面宽度,是自该河段起始断面至该断面的河道长度  $x$  的函数,设为  $b_i(x)$ 。该河段内有  $q_i$  个计算点,将该  $q_i$  个计算点第  $j$  月( $j = 1, 2, \dots, 12$ )的水面日蒸发量拟合成断面位置  $x$  的函

数  $E_{ij}(x)$  则第  $i$  河段第  $j$  月蒸发损失水量(体积)为

$$V_{ij} = n_j \int_0^{L_i} E_{ij}(x) b_i(x) dx, \quad (7)$$

式中:  $n_j$  为第  $j$  月的天数.

第  $i$  河段全年蒸发损失水量为

$$V_{ia} = \sum_{j=1}^{12} V_{ij} = \sum_{j=1}^{12} n_j \int_0^{L_i} E_{ij}(x) b_i(x) dx, \quad (8)$$

工程江苏段输水河道全年蒸发损失水量为

$$V_a = \sum_{i=1}^{31} \sum_{j=1}^{12} V_{ij} = \sum_{i=1}^{31} \sum_{j=1}^{12} n_j \int_0^{L_i} E_{ij}(x) b_i(x) dx. \quad (9)$$

为了便于分析比较,并为计算水面蒸发对各梯级泵站运行的影响提供资料,指导泵站运行管理,需要计算各河段不同季节的蒸发水量.

设  $s_k$  ( $k = 1, 2, 3, 4$ ) 分别对应于春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)和冬季(12—次年2月). 第  $i$  河段  $s_k$  季度的蒸发水量为

$$V_{is_k} = \sum_{s_k} n_j \int_0^{L_i} E_{ij}(x) b_i(x) dx, \quad (10)$$

第  $i$  河段  $s_k$  季度的季平均蒸发量为

$$E_{is_k} = \frac{\sum_{s_k} n_j \int_0^{L_i} E_{ij}(x) b_i(x) dx}{A_i} = \frac{\sum_{s_k} n_j \int_0^{L_i} E_{ij}(x) b_i(x) dx}{\int_0^{L_i} b_i(x) dx}, \quad (11)$$

式中:  $A_i$  为第  $i$  河段的水面面积.

对于第  $l$  个调蓄湖库,第  $j$  月的水面任一点的月平均日蒸发量与该点位置有关.

根据若干个水面已知计算点的月平均日蒸发量,拟合成水面月平均日蒸发量函数  $E_{0lj}(x, y)$ , 则第  $l$  个调蓄湖库、第  $s_k$  季度的蒸发水量和平均蒸发量分别为

$$V_{ls_k} = \sum_{s_k} n_j \int_{A_l} E_{0lj}(x, y) dA, \quad (12)$$

$$E_{ls_k} = \frac{\sum_{s_k} n_j \int_{A_l} E_{0lj}(x, y) dA}{A_l} = \frac{\sum_{s_k} n_j \int_{A_l} E_{0lj}(x, y) dA}{\int_{A_l} dA}, \quad (13)$$

式中:  $A_l$  为第  $l$  个调蓄湖库的水面面积.

同样可计算出调蓄湖库的年蒸发水量和平均蒸发量.

## 2 工程水面蒸发计算结果及分析

### 2.1 计算结果

工程输水河道和调蓄湖库不同季节水面蒸发量  $E$  与蒸发损失水量  $V$  见表 2.

表 2 南水北调东线江苏段工程调蓄湖库季水面蒸发量与蒸发损失水量

Tab. 2 Evaporating capacities and evaporating water losses in Jiangsu section of the ERP

调蓄库名称	春季		夏季		秋季		冬季		全年	
	$E/\text{mm}$	$V/10^6 \text{ m}^3$	$E/\text{mm}$	$V/10^6 \text{ m}^3$	$E/\text{mm}$	$V/10^6 \text{ m}^3$	$E/\text{mm}$	$V/10^6 \text{ m}^3$	$E/\text{mm}$	$V/10^6 \text{ m}^3$
输水河道	234.1	36.46	325.6	51.09	206.2	32.36	94.1	14.86	851.3	134.76
洪泽湖	227.6	527.60	319.5	740.60	202.3	468.90	93.1	215.80	842.5	1952.90
骆马湖	246.3	92.40	336.4	126.20	214.5	80.40	96.8	36.30	894.1	335.30
白马湖	222.9	24.10	315.0	34.00	199.9	21.60	92.6	10.00	830.3	89.70

### 2.2 蒸发量分析

南水北调东线江苏境内工程沿线输水河道和调蓄湖库水面平均年蒸发量为 862.2 mm. 蒸发量时空分布不均.

蒸发量季节分配不均,春、夏、秋、冬各季蒸发量分别占全年的 27%、38%、24% 和 11%,夏季最高,冬季最低,夏季蒸发量是冬季的 3 倍以上.

蒸发量地区分配不均. 工程自南方长江取水,向北偏西方向输水,由于沿线的气候差异,相对湿度南方高,北方低,东部高,西部低,水面蒸发量自南向

北、西北方向逐渐递增. 工程水面蒸发量,江淮地区为 818.5 mm,淮北地区为 894.2 mm.

### 2.3 蒸发损失水量分析

南水北调东线江苏境内工程全线水面年蒸发损失水量约为  $25.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 其中,输水河道损失  $1.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 占 5.4%; 洪泽湖损失  $19.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 占 77.7%; 骆马湖损失  $3.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 占 13.3%; 白马湖损失  $0.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 占 3.6%. 3 座湖库蒸发损失合计占 94.6%. 如果折算成流量,江苏境内工程蒸发损失总流量为  $79.9 \text{ m}^3/\text{s}$ .

3 水面蒸发对工程调水效率的影响

3.1 水面蒸发对调水效率的影响

工程在稳定调水过程中,输水河道和调蓄湖库  
水位不变,沿线第  $I(I = 1, 2, \cdots, 9)$  梯级、第  $J$  条输  
水路线泵站所抽水流量消耗于蒸发损失的流量

$Q_{clJ}$  抽  $c = 10.285715 - T_m = 584915 \text{ TD} [(水9-37(输流 TJ /Tc = 8(第) = 8(第耗 = 8(第.148(第蒸)-56(发)-所乘 -$

式中:  $K$  为泵站(群)的序号.

由此可见,水面蒸发损失所造成的工程调水效率的降低不容忽视.

### 3.2 减小水面蒸发损失的途径

#### 3.2.1 工程规划设计

湖库蒸发水量损失占工程总蒸发水量损失的94.6%,减小湖库蒸发是减小水面蒸发损失、提高工程调水效率的关键.减小蒸发比较可行的方法是合理选择输水线路,减小调蓄面积.

#### 3.2.2 调水管理

针对调水要求,准确计算各梯级泵站的运行工况,使之协同运行,减少沿线水量调蓄要求,减小蒸发水量和弃水量.

#### 3.2.3 采用管道输水

大中型输水工程,为了消除水面蒸发损失,可以考虑采用管道输水,但需要从工程造价、沿程阻力损失,以及运行费用、环境、水质要求等方面进行综合分析和比较后确定.

## 4 结 论

1) 南水北调东线江苏境内工程沿线水面平均蒸发量为862.2 mm.蒸发量年内分配不均,夏季蒸发量最高,占了全年的38%左右,冬季最低,只占全年的11%左右;地区差异大,由南向北、西北递增,工程在江淮地区蒸发量约为818.5 mm,淮北地区蒸发量约为894.2 mm.

2) 南水北调东线江苏境内工程全线,水面年蒸发损失水量约为  $25.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中,输水河道、洪泽湖、骆马湖、白马湖等的蒸发损失分别占5.4%,77.7%,13.3%和3.6%.3座湖库蒸发损失合计占94.6%.工程蒸发损失总流量约为  $79.9 \text{ m}^3/\text{s}$ .

3) 按规划设计运行方案,工程泵站抽提流量中,蒸发损失平均达到8.94%,占源头泵站抽提流量的17.46%,水面蒸发使工程调水效率平均降低10.33%.

4) 减小调蓄面积、合理选择输水路线、梯级泵站协同运行,可以减小工程水面蒸发损失;采用管道输水可以避免蒸发.但湖库调蓄还关系到当地的用水和环境、生态问题,引起工程耗能的还有沿程渗漏水量损失、输水水力损失、各泵站特性等,运行方案需要综合考虑优化.

## 参考文献(References)

- [1] 田野. 架空输电线路输电损耗的差异及降损措施[J]. 黑龙江电力, 2010, 32(6): 441-443.  
Tian Ye. Difference and loss-reducing measures of transmission loss of overhead transmission line[J]. *Heilongjiang Electric Power*, 2010, 32(6): 441-443. (in Chinese)
- [2] Pezzini Paola, Gomis-Bellmunt Oriol, Frau-Valenti Joan, et al. Energy efficiency optimization in distribution transformers considering Spanish distribution regulation policy[J]. *Energy*, 2010, 35(12): 4685-4690.
- [3] 陆永泉, 朱庆元, 仇宝云, 等. 大套第三抽水站辅助设备能耗计算分析[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(4): 340-343.  
Lu Yongquan, Zhu Qingyuan, Qiu Baoyun, et al. Calculation and analysis of auxiliary equipment dissipation energy in 3rd Datau pumping station[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2010, 28(4): 340-343. (in Chinese)
- [4] Feng Xiaoli, Qiu Baoyun, Cao Haihong, et al. Optimal operation for Baoying pumping station in East Route Project of South-to-North Water Transfer[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 22(1): 78-83.
- [5] Moreno M A, Carrión P A, Planells P, et al. Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations[J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 98(4): 479-486.
- [6] Lowe L D, Webb J A, Nathan R J, et al. Evaporation from water supply reservoirs: An assessment of uncertainty[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 376(1/2): 261-274.
- [7] 闵 骞. 蒸发量的气候学计算[J]. 南昌水专学报, 1992(2): 65-67.  
Min Qian. Study on the calculation method of reservoir surface evaporation[J]. *Journal of Nanchang College of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 1992(2): 65-67. (in Chinese)
- [8] 李爱贞, 刘厚凤. 气象学与气候学基础[M]. 北京: 气象出版社, 2001.
- [9] 中水淮河工程有限责任公司, 中水北方勘测设计研究有限责任公司. 南水北调东线第一期工程项目建议书[R]. 南京: 江苏省水利厅, 2004.

(责任编辑 张文涛)