

岱海湖温排水对湖面附加蒸发量影响研究

张楠¹, 陈孝田¹, 李皓冰¹, 江红², 章博¹, 张凤燃¹

(1. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 黄河流域水资源保护局, 河南 郑州 450004)

摘要: 岱海湖为一内陆封闭型湖泊。本研究利用3、7、12月份冬夏工况,综合考虑岱海湖边界条件,水面温度、密度、水面天然温度、大气温度、相对湿度等影响因子,构建温排水对岱海湖附加蒸发量影响的计算公式。经计算,电厂温排水引起的岱海湖附加蒸发损失量为:3月份为39.46万 m^3 ,7月份为73.3万 m^3 ,12月份为10.6万 m^3 ,岱海湖电厂温排水年附加蒸发水量约为678.2万 m^3/a 。结果表明:附加蒸发量与电厂温排水量变化一致。本研究对干旱区水资源利用具有重要意义。

关键词: 温排水; 湖面蒸发; 附加蒸发量; 岱海湖

中图分类号:TV882.9

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2015)04-0018-04

Effect of warm water discharge on addition evaporation of surface of Daihai lake

ZHANG Nan¹, CHEN Xiaotian¹, LI Haobing¹, JIANG Hong², ZHANG Bo¹, ZHANG Fengran¹

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China;

2. Yellow River Basin Water Resources Protection Bureau, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: Daihai Lake is an inland and closed lake, this research used the winter and summer conditions of March, July and December, and comprehensively considered the boundary condition of Daihai lake and impact factors such as water surface temperature, density, natural temperature of water surface, atmospheric temperature, relative humidity to structure the formula about warm water drainage to additional evaporation of Daihai Lake. Through calculation, the additional amount of evaporation loss of Daihai Lake result from warm water drainage of power plant in March is 0.3946 million m^3 , that in July is 0.733 million m^3 , that in December is 0.106 million m^3 . There are about 6.782 million m^3 warm water drainage to additional evaporation of Daihai Lake every year. The result shows additional evaporation has consistent change with power plant warm water drainage. The research has important significant for the analysis of amount of evaporation to the use of water resources in dry area.

Key words: warm water discharge; lake evaporation; addition evaporation; Daihai lake

内陆湖泊作为我国干旱半干旱地区宝贵的自然资源,对区域经济发展和环境改善都起着举足轻重的作用,但由于其生态的脆弱性,内陆湖泊对气候和人类活动的变化反映十分敏感^[1]。近几十年来,随着人类掠夺式的开发土地,我国许多内陆湖泊出现萎缩、咸化,有的甚至完全消亡,如艾丁湖、艾比湖、罗布泊等^[2-3],湖泊的这些变化一方面导致原本脆弱的生态遭到破坏,另一方面也加剧了干旱半干旱地区的水资源危机^[4]。因此,开展内陆湖泊演变及其成因分析,确保地区水资源的可持续利用,已显得

十分紧迫和必要。

2001年,岱海湖被纳入自治区级自然保护区,同时,也被纳入国家重要湿地名录^[5]。相关学者研究表明^[5-6]:地表水和地下水从补给到排泄形成一个完整的水文地质单元,由于流域内人类活动日益增多及干旱气候的影响,岱海的补给水量急剧减少,岱海湖水位持续下降,湖泊面积持续萎缩,气候变化是近40a来岱海湖泊水面萎缩、水位波动的根本原因,现代人类活动的强烈干预是岱海湖萎缩的强化因素。岱海湖南岸建有一工业园区,占地面积约为

收稿日期:2015-03-19; 修回日期:2015-03-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51309107); 国家“十二五”科技支撑计划(2012BAB02B04)

作者简介:张楠(1981-),男,安徽阜阳人,博士,高级工程师,主要从事水文水资源、地下水等研究。

23 km²,目前仅有岱海电厂入驻。本篇通过数值模拟揭示岱海电厂温排水对岱海湖水面蒸发的影响。

1 岱海流域概况

岱海位于内蒙古自治区南部的凉城县境内,为一内陆封闭型湖泊,集水域面积约为2 312.75 km²。岱海湖北靠阴山支脉蛮汉山,东邻丰镇丘陵,南有马头山丘陵低山区,古长城横亘于岱海南约30 km处,仅西侧比较敞,以一低矮分水岭与桑干河水系相隔。岱海流域总面积2 314.2 km²,其中山丘区面积1 526.4 km²,占流域面积的65.9%;冲积面积718.3 km²,占流域面积的31.0%,岱海湖约69.5 km²(2014年3、7、12月3次实测值平均),占流域面积的3.0%。

岱海湖多年平均水位1 224.1 mm,湖水平均水深7 m,多年平均水面面积133.5 km²,蓄水量为11.2亿m³,其水源除湖面直接降水补给水及盆地周围地表和地下水流流入补给水。岱海入湖河流有22条,弓坝河、五号河;南侧的天成河、步量河来水量亦较大。岱海湖属天然补给湖泊,其补给来源主要是地面径流、地下径流和湖面上大气降水;其排泄和消耗主要是蒸发。岱海流域河流水系如图1所示。本次研究开展了岱海湖实地查勘及测试工作,收集了当地2005-2014年水文气象资料。

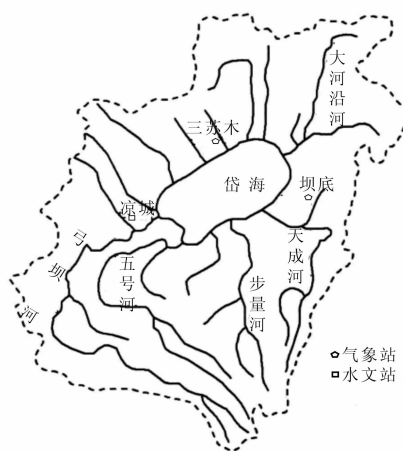


图1 岱海流域河流水系示意图

2 数值模型的构建

由于电厂温排水流入岱海湖,其温度要高于周围水体,扩散后使周围的湖水升温,导致水面蒸发量增加,即附加蒸发损失量。电厂温排水排入水体后所引起的水面附加蒸发量 ΔE_i 等于电厂修建后水体水面蒸发量 E 与电厂修建前水体自然蒸发量 E_∞ 之

差。

$$\Delta E_i = E_i - E_\infty \quad (1)$$

分别对冬季(3月、12月)和夏季(7月)的附加蒸发量进行数模计算。水面温度、密度参数全部通过实测获取,岱海电厂一期2台机组的主机和辅机均采用岱海湖水直流冷却,二期2台机组只有辅机采用岱海湖水直流冷却,正常工况下,实测4台机组的温排水量不论冬季和夏季均小于50 m³/s。

2.1 计算方法

首先考虑到岱海湖水面的温度是不均匀的,利用Delaunay三角形对湖面进行网格化,使计算区域由若干个三角单元构成(图2),假设在这个小单元上,温度、密度、气压、相对湿度等计算参数是相等的,然后分别计算每个单元的附加蒸发量 ΔE_i ,最后进行累加。由于网格点较多,实测点数不能完全覆盖到每一个点,故未覆盖到的点的参数值根据实测值通过插值求得。

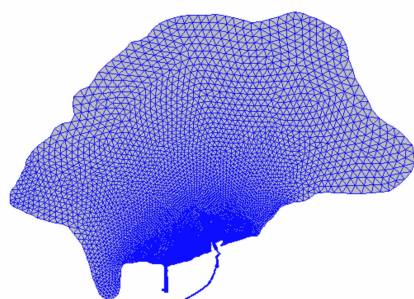


图2 计算网格分布图

2.2 计算方程

每个计算单元的附加蒸发量 ΔE_i 计算如下:

$$\Delta E_i = E_i - E_{\infty i} \quad (2)$$

冬季(3、12月),由于湖面存在结冰区域,而且湖面气温在0℃以下,岱海整个区域月附加蒸发量按照下式求得:

$$\begin{aligned} \Delta E &= MD \left[\sum_{i=1}^{N_1} E_i A_i + (A - A_1) E_{\infty 1} - A E_{\infty 1} \right] / A \\ &= MD \left(\sum_{i=1}^{N_1} E_i A_i - A_1 E_{\infty 1} \right) / A \end{aligned} \quad (3)$$

式中: N_1 为不结冰单元总数; A_1 为不结冰范围的面积; A 为计算水域总面积; $E_{\infty 1}$ 为冰面蒸发量; E_i 为电厂修建后单元水面蒸发量,mm/月。

$$E_i = \frac{1000}{(r_i + C_p T_i) \rho} \alpha_{2i} (e_{0i} - e_a) \quad (4)$$

式中: α_{2i} 为选用适合负气温条件的Rimsha-Dochenko公式:

$$\alpha_{2i} = 0.0027 [61.7 + 30.1W + 2.7(T_i - T_a)]$$

在夏季(7月),由于湖面不存在结冰现象,当地气温在 0°C 以上,采用下列方法求得附加蒸发量 ΔE_i 得:

$$\Delta E_i = \frac{1000}{(r_i + C_p T_i) \rho} [\alpha_{2i}(W, T_a, T_i)(e_{0i} - e_a) - \alpha_{2i}(W, T_a, T_{\infty})(e_{\infty} - e_a)] \quad (5)$$

式中: i 为单元号; r_i 为水的汽化潜热, kcal/t , $r_i = 5.973 - 0.56T_i$; T_i 为单元水面温度, $^{\circ}\text{C}$; C_p 为水的比热, $\text{kcal}/(\text{t} \cdot ^{\circ}\text{C})$; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; e_{0i} 为与水面温度 T_i 对应的饱和水汽压, mm 汞柱; e_{∞} 为与自然水温 T_{∞} 对应的饱和水汽压, mm 汞柱; e_a 为空气绝对湿度, mm 汞柱; α_{2i} 为单元水面蒸发散热系数, $[\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{mm})$ 汞柱]。

选用陈惠泉——毛世民公式:

$$\alpha_{2i} = 0.0275 [22.0 + 12.5 W_{1.5}^2 + 2.0 (T_i - T_a)]^{1/2} \quad (6)$$

式中: $W_{1.5}$ 为离水面1.5 m处风速, m/s ; T_a 为气温, $^{\circ}\text{C}$ 。

岱海整个水域月附加蒸发量:

$$\Delta E = MD \left(\sum_{i=1}^N \Delta E_i A_i \right) / A \quad (7)$$

式中: MD 为全年平均每月电厂运行天数,本项计算中 $MD = 7800 \text{ h}/(24 \text{ h} \times 12)$, $\text{d}/\text{月}$; N 为计算水域的三角形总数; A_i 为三角形单元水面面积, ΔE 为附加蒸发量, $\text{mm}/\text{月}$ 。

2.3 计算的控制条件

(1)计算工况选择。为使本次数模计算结果更加合理,湖面测试小组共对岱海湖进行了3次现场测试,测试时间分别在2014年3月下旬、2014年7月下旬和2014年12月上旬。3月、12月归入冬季工况,7月归为夏季工况。

(2)计算因子确定。按照冬季和夏季的两种计算方法,满足本次附加蒸发计算所需基本因子包括:边界条件,水面温度、密度、水面天然温度、大气温度、相对湿度等。

(3)边界条件。冬季水面边线,岱海湖的岸线通过采用Google Earth中岱海湖轮廓加主要控制点修正

的方式获取,不结冰水面岸线通过GPS实测获取。

夏季主要是水面边线的获取,采用Google Earth中岱海湖轮廓加主要控制点修正的方式获取。

(4)水面温度。根据不同工况的计算要求,本研究开展了3次水面温度测试,从测试结果看:冬季:3月温度开始回升,冰面开始融化,取水口与退水口之间水面连通,未封冻水面面积约 7.5 km^2 ,和往年11月(11月为冰冻封湖期)的情况基本相反。12月温度较低,岱海湖大部分水面结冰,取水口与退水口之间区域亦封冻,只有排水口附近大约 1.3 km^2 的水面未封冻。从水面温度场分布情况看,3月、7月时,排水口附近温度较高的区域主要分布在排水口东侧靠近湖岸一侧。夏季:排水渠道与退水口附近温度较高,且高温水有对冲至北岸的迹象,岱海湖东西两侧温度基本未受影响。

3种方案所测湖面面积分别为 68.4 、 71.0 、 66.3 km^2 。

测试期间,3、7和12月水温测点分布情况见图3~5,温度场分布情况见图6~8。

(5)水面密度。本研究开展了3次水面密度测试,从水面密度测试结果看,岱海湖水面密度无明显变化,和水密度(1 kg/m^3)基本一致。

测试期间,3、7、12月份水密度测点分布情况见图9~11。

(6)其它。根据不同计算方案需要,气温、相对湿度选用多年(2010~2013)同月数据的平均值作为初始计算条件。

自然水温是自然界中一定的气温条件下,湖库池等水体的水温并非是完全确定的,而是取自一定范围内的一个数值,多年平均自然水温为 23.3°C ,对比2010~2013年7月下旬的水温,本次计算依然采用 23.3°C 。

为合理计算岱海湖月附加蒸发水量,需考虑机组的运行时间,机组平均运行小时数按 7800 h 计。

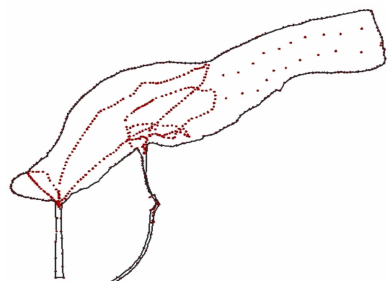


图3 3月水温测点分布示意图



图4 7月水温测点分布示意图

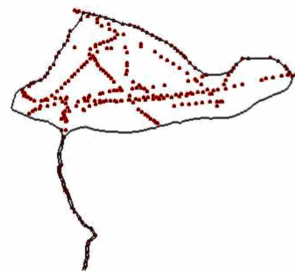
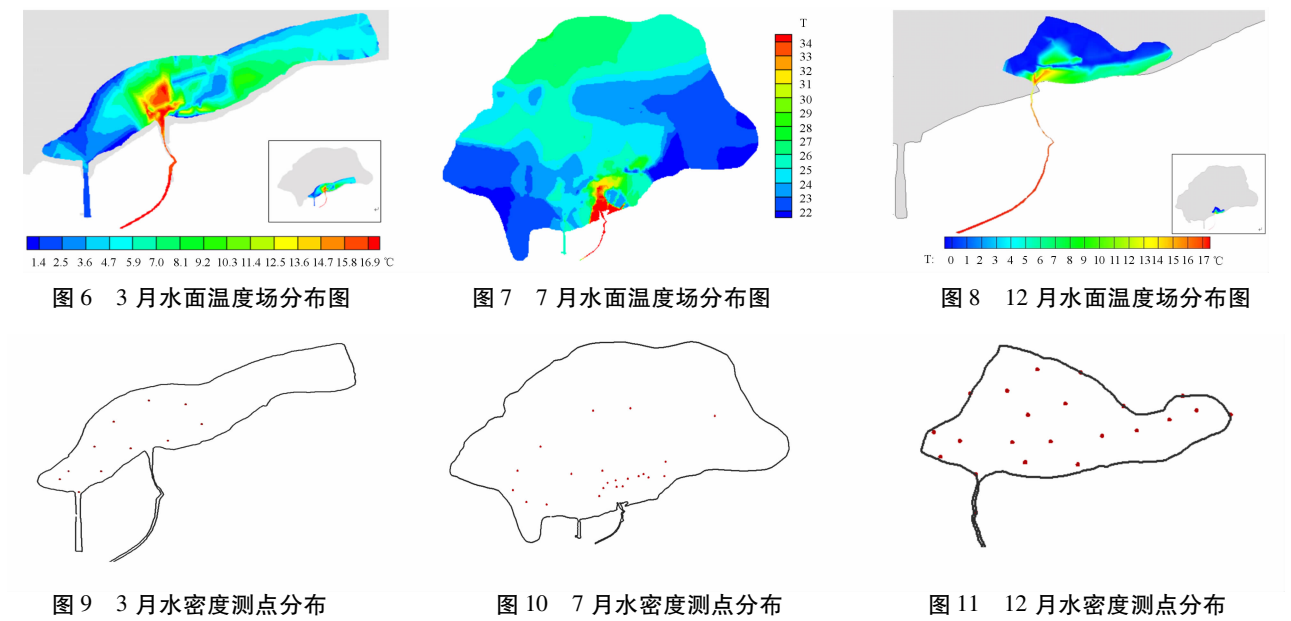


图5 12月水温测点分布示意图



3 岱海湖附件蒸发水量分析

经模型计算,电厂温排水引起的岱海湖附加蒸发损失:3月份 39.46 万 m³,7月份 73.3 万 m³,12月份 10.66 万 m³。计算成果见表 1。

表 1 岱海湖附加蒸发量计算成果表					
工况	总面积/ km ²	水面面 积/km ²	附加蒸发 量/mm	附加蒸发水 量/(m ³ ·h ⁻¹)	月附加蒸发 水量/万 m ³
3月	68.4	7.5	5.8	607	39.46
7月	71.0	71.0	10.7	1132	73.58
12月	66.3	1.5	1.6	164	10.66

从上表中可以看出:
(1)冬季总的湖面面积要稍小于夏季的湖面面积。经分析,造成这种现象的主要原因是冬季较夏季降水小,径流量小。

(2)冬季附加蒸发量较夏季小。经分析,造成这种现象的主要原因是由于冬季大部分的湖区都被冰覆盖,而冰面的附加蒸发量较水面附加蒸发量要小。

(3)12月的水面面积明显小于3月,12月的附加蒸发量明显小于3月。经分析,造成这种现象的主要原因是:由于气候原因,12月测试时的气温明显小于3月的气温;12月测试时,全厂机组运行工况较3月低,虽然排入岱海湖的温排水水量差不多,但排入的热量却较3月少。

以3月份计算值代表1、2、4、11、12月份的附加蒸发水量,以7月份计算值代表5、6、8、9和10月份的附加蒸发水量,经计算,岱海湖年附加蒸发水量 678.2 万 m³(表 2)。对比岱海湖流域实测月蒸发量,冬季实测蒸发量与附加蒸发量相差不大,冬季岱海湖电厂温排水对湖面蒸发影响较大。

表 2 岱海湖附加蒸发量计算成果表													mm
项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年
附加蒸发量	39.5	39.5	39.5	39.5	73.6	73.6	73.6	73.6	73.6	73.6	39.5	39.5	678.2
实测蒸发量	40.7	47.2	58.6	141.7	159.8	173.6	159	124	102.7	94.3	62.8	41.8	1206.2

4 结 语

本研究结合研究区水面温度、密度等边界条件,计算电厂温排水对岱海湖附加蒸发量,以3月的计算值代表1、2、4、11和12月份的附加蒸发水量,以7月的计算值代表5、6、8、9和10月份的附加蒸发水量。经计算,岱海湖电厂温排水年附加蒸发水量

约为 678.2 万 m³/a,总体来看,附加蒸发量与电厂温排水量变化一致。

参考文献:

[1] 王亚俊,孙占东. 中国干旱区的湖泊[J]. 干旱区研究, 2007,24(4):422-427.

东北农业大学. 2008.

- [16] 蔡振华. 甘肃省及黑河流域水足迹及虚拟水贸易研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [17] Okadera T, Geng Yong, Fujita T, et al. Evaluating the water footprint of the energy supply of Liaoning Province, China: A regional input – output analysis approach [J]. Energy Policy, 2015, 78: 148 – 157.
- [18] 蔡国英, 徐中民. 黑河流域中游地区国民经济用水投入产出分析——以张掖市为例 [J]. 冰川冻土, 2013, 35 (3): 770 – 775.
- [19] 马忠, 张继良. 张掖市虚拟水投入产出分析 [J]. 统计研究. 2008, 25(5): 65 – 70.
- [20] Wang Yong, Xiao H L, Lu M F. Analysis of water consumption using a regional input – output model: Model development and application to Zhangye City, Northwestern China [J]. Journal of Arid Environments, 2009, 73 (10): 894 – 900.
- [21] Zhao Xu, Yang Hong, Yang Zhifeng, et al. Applying the input – output method to account for water footprint and virtual water trade in the Haihe River Basin in China [J]. Environmental Science Technology, 2010, 44(23): 9150 – 9156.
- [22] Feng Kuishuang, Siu Yim Ling, Guan Dabo, et al. Assessing regional virtual water flows and water footprints in the Yellow River Basin, China: A consumption based approach Original Research Article [J]. Applied Geography, 2012, 32(2): 691 – 701.
- [23] 蔡燕, 王会肖, 王红瑞, 等. 黄河流域水足迹研究 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2009, 45(5): 616 – 620.
- [24] 路献品, 王刚, 陈宁, 等. 滦河流域水资源开发的水文效应及其生态环境响应 [J]. 环境保护科学, 2014, 40(1): 18 – 21.
- [25] 王腾飞, 苏布达, 翟建青, 等. 1961 – 2012 年滦河流域干旱演变分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29 (5): 180 – 185.
- [26] 吴争程. 福建省水资源投入产出分析 [D]. 福州: 福州大学, 2006.
- [27] 田建平, 张俊栋. 滦河流域水资源可持续利用评价及对策 [J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 56 – 59.
- [28] 刘起运, 陈璋, 苏汝劼. 投入产出分析 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2011.
- [29] 汪党献. 水资源需求分析理论与方法研究 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2002.
- [30] 许健, 陈锡康, 杨翠红. 直接用水系数和完全用水系数的计算方法 [J]. 水利规划设计, 2002(4): 28 – 30, 36.
- [31] 成琨, 付强, 陈曦, 等. 基于投入产出模型的黑龙省水资源利用效率分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(5): 141 – 145.
- [32] 姜莉. 海河流域京津冀地区虚拟水实证研究 [D]. 大连: 辽宁师范大学, 2011.
- [33] 刘玉芬. 滦河流域水资源可持续利用对策分析 [J]. 河北工程技术高等专科学校学报, 2012(1): 6 – 9.
- [34] 刘梅, 许新宜, 王红瑞, 等. 基于虚拟水理论的河北省水足迹时空差异分析 [J]. 自然资源学报, 2012, 27 (6): 866 – 867.

(上接第 21 页)

- [2] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 等. 论中国干旱区湖泊研究的重要意义 [J]. 干旱区研究, 2007, 24(2): 137 – 140.
- [3] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 等. 亚洲中部干旱区的湖泊 [J]. 干旱区研究, 2005, 22(4): 424 – 430.
- [4] 周云凯, 姜加虎. 近 50 年岱海生态与环境变化分析 [J]. 干旱区研究, 2009, 26(2): 162 – 168.
- [5] 胡林奎, 鲁文林. 凉城县岱海流域水环境现状及补水必要性分析 [J]. 内蒙古水利, 2014(1): 109 – 110.
- [6] 曹建廷, 王苏民, 沈吉, 等. 近 40 年来内蒙古岱海水位下降的主要原因 [J]. 干旱区研究, 2002, 19(1): 1 – 6.