

北疆平原水库水面蒸发模型的建立与关键参数确定

毛海涛¹, 王正成^{1*}, 王晓菊², 侍克斌³, 黄庆豪³, 姜海波⁴

(1. 重庆三峡学院 土木工程学院, 重庆 404100; 2. 河海大学 环境学院, 南京 210098; 3. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 4. 石河子大学 水利建筑工程学院, 石河子 832000)

摘要: 北疆平原地区的温带大陆性干旱半干旱气候具有空气干燥、温差大、气压差异明显、风多且风速大等特点; 而该地区平原水库又具有坝长, 面积广而水深较浅的特点。已有的水面蒸发模型并未充分考虑到上述区域性和平原水库的特点, 计算误差较大, 不能准确估算出新疆灌区平原水库的蒸发量。文中以道尔顿模型为基础, 依据已有3因子模型的研究方法, 充分考虑了气压差、风速、湿度和温度共4个主要因素对水面蒸发的影响, 建立4因子模型。通过理论分析得到各影响因素的表达式, 由20 m²蒸发池试验观测获取公式中的关键参数。通过大泉沟平原水库完整的水文水资源观测资料, 采用水量平衡法计算出水库蒸发量, 4因子模型计算结果能与其基本吻合; 同时考虑到尺度上的差异, 引入修正系数对模型进一步进行修正, 通过对观测数据的深度分析最终确定, 在冰冻期修正系数为0.886, 非冰冻期修正系数为0.939。修正后的4因子计算模型不仅能准确模拟出大泉沟水库的水面蒸发量, 而且与北疆其他地区的7座水库蒸发量也能够较好吻合, 验证了该模型的精确性和可靠性。该模型所需的数据都是基本的气象资料, 易于获取, 计算简便, 实用性好。综上所述, 该模型方法正确, 能准确估算内陆干旱区平原水库的蒸发量, 为内陆干旱区水资源合理利用与科学管理提供理论支持。

关键词: 模型; 蒸发; 水库; 关键参数; 北疆

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.06.016

中图分类号: S161.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-06-0129-08

毛海涛, 王正成, 王晓菊, 侍克斌, 黄庆豪, 姜海波. 北疆平原水库水面蒸发模型的建立与关键参数确定[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 129-136. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.06.016 http://www.tcsae.org

Mao Haitao, Wang Zhengcheng, Wang Xiaojun, Shi Kebin, Huang Qinghao, Jiang Haibo. Establishment of water surface evaporation model and determination of key parameters for plain reservoir in Northern Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(6): 129-136. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.06.016 http://www.tcsae.org

0 引言

天山山脉将新疆分为南北两大部分, 天山以北为北疆, 为温带大陆性干旱半干旱气候, 是水资源科学管理与合理利用的重点研究区域^[1-3]。该区域降水稀少, 气候干燥, 温差较大, 蒸发强烈^[4-5]。水体水面蒸发是发生在水体与大气之间界面上的分子交换现象^[6-8], 是内陆干旱区水资源损失的主要原因之一。据统计, 北疆目前有平原水库400余座, 在新疆农田灌溉中有不可取代的作用; 但数据显示, 因平原水库坝长、面积广阔, 每年约有40%是因无效蒸发而损失^[9-11]。因此, 正确估算北疆平原水库等大水体的蒸发量显得极为重要^[12-13]。

如何准确地建立水面蒸发模型, 精确反映出各因素对干旱区平原水库水面蒸发量的影响, 是当前亟待解决的难题。在受到研究区域气象资料限制条件下, 基于水

汽质量输送的 Dalton 模型因简单易用而受到广泛重视, 体现了水汽压差与风速这两个相对独立的因素的影响; Penman 模型是近年来应用十分广泛的蒸发量预测模型, 以能量平衡原理和水汽扩散理论为基础, 只需利用常规气象资料便可较为准确地计算出蒸发量^[14-15]。金双彦等^[16]基于 Dalton 公式中风速函数应满足的条件, 细化了 Dalton 风速模型。闵睿^[17]在 Dalton 模型的基础上考虑了相对湿度 r 对蒸发的影响, 建立了3因子蒸发模型。李万义^[18]同样考虑了水汽压力风速和相对湿度对水面蒸发的影响, 建立3因子模型。滕凯^[19]以旬均最高气温、旬均风速、旬均饱和水汽压和旬均日照时间为影响因素建立了模型。魏光辉等^[20]以旬均温度、旬均最高温度、旬均水汽压、旬均风速及旬均日照时数为影响因子建立了模型。姜海波等^[21-22]基于 Penman 公式, 进一步考虑了太阳辐射对水面蒸发的影响, 建立了适用于冰冻期和非冰冻期的水面蒸发模型。

上述模型在建立过程中考虑的影响因素往往不够全面, 且在考虑部分因素对水面蒸发的影响时, 几乎都是建立的线性关系式。然而, 内陆干旱区水体水面蒸发影响因素多且较为敏感, 部分线性关系式难以描述各因素对蒸发量的影响规律, 计算结果误差较大。因此, 本文通过理论分析、现场试验等方法, 探究风速、湿度、温

收稿日期: 2017-10-31 修订日期: 2018-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309262、41602367); 重庆市科委基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjA1204、cstc2015jcyjA00022); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1601024); 重庆三峡学院校企合作项目(16PY03)
作者简介: 毛海涛, 博士、教授, 主要从事干旱区平原水库水面蒸发机理研究。Email: maohaitao1234@163.com

*通信作者: 王正成, 主要从事干旱区节水及土石坝渗流机理研究。

Email: wangzhengcheng194@163.com

度和气压等因素对内陆干旱区水面蒸发的影响,建立水面蒸发模型;并在新疆石河子大泉沟水库开展蒸发试验,对模型进行修正。此外,将该模型应用于北疆其他典型水库,对模型的适用性进行探讨。以期能更加精确地估算内陆干旱区平原水库的蒸发量,为内陆干旱区水资源合理利用与科学管理提供理论支持。

1 大水体蒸发模型的建立

1.1 蒸发模型的确定

1802年道尔顿提出在其他因素不变的情况下,蒸发量与水汽压差成正比,且风速会影响蒸发强度,因以道尔顿以风速和水汽压强为因子建立了道尔顿模型^[14-15](2因子模型)

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

式中 E 为自由水面蒸发量, mm/d; Δe 为饱和水汽压差, hPa; W 为水面上空 150 cm 处风速, m/s; $f(W)$ 为风速函数。

闵寿^[17]和李万义^[18]通过模拟试验发现,利用道尔顿(双因子)模型 $E = \Delta e f(W)$ 模拟月、旬水面蒸发量与月、旬平均饱和水汽压差、风速的关系时,会在不同季节出现正、负号不同的系统偏差,分析其原因在于不同季节的相对湿度存在较大的差异。因此,将湿度作为水面蒸发模型的因子,提高水面蒸发量的精度,建立 3 因子模型

$$E = \Delta e \cdot f(U) \cdot f(W) \quad (2)$$

式中 U 为相对湿度,以小数计, g/m³; $f(U)$ 为相对湿度函数。

内陆干旱区气温与其他地区有较大差别,白昼和夜间温差大,冰冻期和非冰冻期气温差异更显著^[23-24]。气温能直接影响水汽扩散的速度和接纳水汽的能力,气温较高时,水面上的饱和水汽压大,水汽压差大,易于水面蒸发;水面气温高时,水分子运动能量大,水面蒸发强度越大。因此,为了提高模型的计算精度,本文以 3 因子模型为基础,进一步考虑气温对水面蒸发的影响,建立了内陆干旱区大水体水面蒸发的 4 因子模型

$$E = \Delta e \cdot f(W) \cdot f(U) \cdot f(T_0 - T_{150}) \quad (3)$$

式中 T_0 为水面水温, °C; T_{150} 为水面上空 150 cm 处温度, °C; $f(T_0 - T_{150})$ 为温度函数。

1.2 风速函数的确定

风速是影响水面蒸发的重要气象因素,但风速作为影响因子时的模型是最难建立的。绝大多研究成果中^[17],都将风速函数 $f(W)$ 设置成带有常数项的幂函数形式

$$f(W) = a + bW^\alpha \quad (4)$$

式中 a 、 b 、 α 为待定系数; α 常见的取值有 0.5、0.76、0.85、1 和 2,中国地区取 $\alpha=1$,即风速函数为线性函数^[25]。因此,风速函数简化为

$$f(W) = a + bW \quad (5)$$

1.3 湿度函数的确定

相对湿度是空气中的实际水汽压与当时气温下的饱和水汽压之比,能反映出空气中的水汽含量距离饱和的程度^[26-27];此外,还能反映出水面上的水汽向外扩散

和交换的速度。当相对湿度较小时,水汽向外扩散和交换得快,蒸发强度越大;相对湿度增大后,它既对水分子的外逸有抑制作用,也使水汽的扩散和交换强度减弱,蒸发强度减小^[18]。

空气相对湿度在一定程度上反映了流经水面空气的水平非均匀性特征^[28]。目前,我国各地空气温湿观测高度一般采用 150 cm 或 200 cm,远远超出了有限水域温湿适应层的高度,故即使观测的相对湿度达到 1,贴近水面层空气的水平非均匀性特征依然存在;因此,湿度函数 $f(U)$ 中必须设置常数项^[18]。本文湿度观测高度取 150 cm,采用闵寿^[17]提出的相对湿度函数

$$f(U) = c + d(1 - U^2)^{0.5} \quad (6)$$

式中 c 、 d 为待定系数。

1.4 饱和水汽压差的确定

由于大气运动的作用,使水面上空不停地进行着干湿空气的掺混和交换,水面以上的水汽压梯度分布遭到破坏;为了恢复应有的水汽压梯度分布,就必须依靠水面蒸发来平衡水汽压^[14]。

饱和水汽压差反映了蒸发面上的湿度和蒸发面上一定高度内的湿度梯度,是影响水面蒸发速率的主要因素之一,根据扩散理论,蒸发率与饱和水汽压差成正比变化,饱和水汽压差愈大,蒸发作用越强^[17]。 Δe 采用下列计算式

$$\Delta e = e_0 - e_{150} \quad (7)$$

式中 e_0 为水面水汽压, Pa; e_{150} 为水面上空 150 cm 处水汽压, Pa。

1.5 温度函数的确定

水面和 150 cm 处温度会对相对湿度湿度造成直接影响,两因子是影响和制约的。因此,本文建立的温度函数 $f(T_0 - T_{150})$ 同风速函数 $f(W)$ 的表达式类似,都是带有常数项的幂函数

$$f(T_0 - T_{150}) = m + n(T_0 - T_{150})^\beta \quad (8)$$

式中 m 、 n 和 β 为待定系数。

将式(5)~(8)带入式(3),计算得到以饱和相对气压($e_0 - e_{150}$)、风速 W 、相对湿度 U 和温度($T_0 - T_{150}$)为影响因子的内陆干旱区水面蒸发模型

$$E = (e_0 - e_{150}) \cdot (a + bW) \cdot [c + d(1 - U^2)^{0.5}] \cdot [m + n(T_0 - T_{150})^\beta] \quad (9)$$

上述公式中 a 、 b 、 c 、 d 、 m 、 n 和 β 为待确定参数,本文将通过蒸发试验确定,最终的蒸发模型能精确计算内陆干旱区水库的蒸发量。

2 模型参数的确定

2.1 水面蒸发试验

试验场所位于新疆生产建设兵团石河子大学试验基地,该区域全年降水稀少,气候干燥,属于典型内陆干旱区气候,日照 2 300~2 700 h,年降雨量 180~270 mm,地表年蒸发量 1 000~1 500 mm。一年中的最高气温出现在 7 月,平均气温 25~26 °C;最低气温出现在 1 月。前

人研究发现 20 m² 或大于 20 m² 大型蒸发池的资料可以代表大水体的蒸发量^[25]。因此，本试验采用 20 m² 蒸发池如图 1 所示，蒸发池侧面与底面接缝处严格密封，防止渗漏造成误差；为减小外界因素对蒸发试验的影响，蒸发池嵌入土体 50 cm，且保证蒸发池底部水平。蒸发池内水量逐渐降低，读数后给蒸发池加水，为减小加入水体与蒸发池中水体的温差，在蒸发池附近设贮水池。试验于 2009—2012 展开，每隔 8~10 d 于 16:00 读取水位、风速、水汽压差、湿度和温度，共计 169 组。



图 1 试验用 20 m² 蒸发池
Fig.1 Evaporation pool of 20 m² for test

通过试验观测得到冰冻期和非冰冻期蒸发量及各影响因子的变化范围，如表 1 所示。

表 1 蒸发量及各影响因子
Table 1 Evaporation and each influence factor

项目 Items	非冰冻期 Non freezing period	冰冻期 Freezing period
日蒸发量 Daily evaporation/(mm·d ⁻¹)	5.3~8.57	0.15~2.38
风速 Wind speed/(m·s ⁻¹)	1.1~2.1	0.7~1.5
水汽压差 Vapor pressure difference/Pa	0.09~0.15	0.04~0.1
温度 Temperature/°C	11.2~32.8	-36.5~-4.9
湿度 Humidity/%	23.2~42.4	85~100

在蒸发池周边安装水银气压计、干湿球湿度计、水银温度计和热球式风速测量仪。测量气压 (e_0 、 e_{150})、相对湿度 (U)、温度 (T_0 、 T_{150}) 和风速 (W) 等关键参数。各关键参数采集过程中，同一量值观测多组数据并求平均值。

蒸发池的深度和水库深度存在尺度上的差异，蒸发池内的水较浅，受温度和风速的影响较大；因此，试验获得的蒸发量会大于实际值，需要增加系数进行修正^[29]，侍克斌等在新疆内陆干旱区做了大量的试验研究，研究表明蒸发池试验数据和水库等大水体观测值之间的修正系数为 0.939 5，即

$$E = 0.939 5E_0 \quad (10)$$

式中 E_0 为试验获得的日蒸发量，mm/d。

2.2 风速系数的确定

确定风速系数时，暂不考虑湿度和温度对蒸发的影响作用，即令公式 (9) 中相对湿度函数 $f(U)$ 和温度函数 $f(T_0-T_{150})$ 均等于 1。则公式 (9) 可简化为

$$E = (e_0 - e_{150}) \cdot (a + bW) \quad (11)$$

由公式 (11) 可得

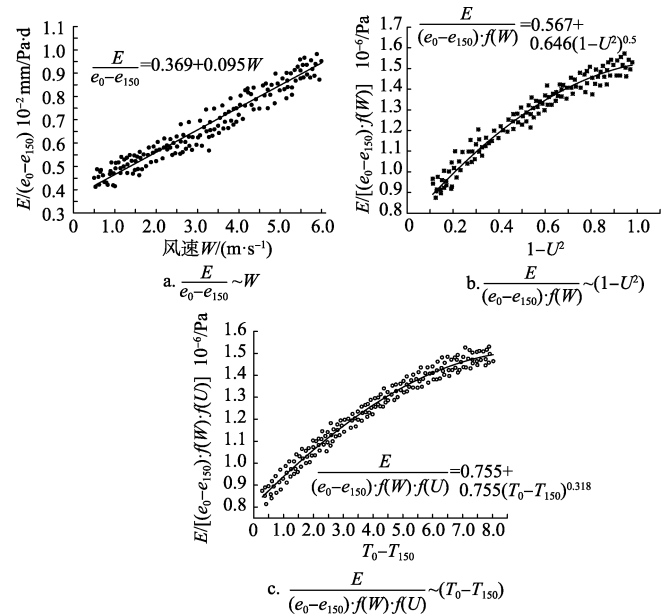
$$\frac{E}{e_0 - e_{150}} = a + bW \quad (12)$$

这样基于试验数据获取的修正蒸发量 E 、风速 W 、水汽压力差 $e_0 - e_{150}$ ，以 $\frac{E}{e_0 - e_{150}}$ 值为纵坐标，以 W 值为横坐标，将实测数据绘制在坐标系中如图 2a 所示。

根据图 2a 中各观测值拟合出 $\frac{E}{e_0 - e_{150}}$ 和 W 表达式为

$$\frac{E}{e_0 - e_{150}} = 0.369 + 0.095W \quad (13)$$

由公式 (13) 可得 $a=0.369$ ， $b=0.095$ 。



注： E 为自由水面蒸发量，mm·d⁻¹； e_0 为水面水汽压，Pa； e_{150} 为水面上空 150 cm 处水汽压，Pa； U 为相对湿度，g·m⁻³； $f(U)$ 为相对湿度函数； W 为水面上空 150 cm 处风速，m·s⁻¹； $f(W)$ 为风速函数； T_0 为水面水温，°C； T_{150} 为水面上空 150 cm 处温度，°C；

Note: E is surface evaporation of free water, mm·d⁻¹; e_0 is vapour pressure of water surface, Pa; e_{150} is vapour pressure at 150 cm over water surface, Pa; U is relative humidity, g·m⁻³; $f(U)$ is a function of U ; W is wind speed at 150 cm over water surface, m·s⁻¹; $f(W)$ is a function of W ; T_0 is water surface temperature, °C; T_{150} is temperature at 150 cm over water surface, °C.

图 2 风速、湿度和温度关系曲线
Fig.2 Relationship curve of wind speed, humidity and temperature

2.3 湿度系数的确定

在确定相对湿度函数 $f(U)$ 中的系数 c 和 d 时，同理，可令温度函数 $f(T_0-T_{150})=1$ 。此外，当取一固定风速值，风速函数 $f(W)=0.369+0.095W$ 计算结果为常数。则公式 (9) 可转换为

$$\frac{E}{(e_0 - e_{150}) \cdot f(W)} = c + d(1-U^2)^{0.5} \quad (14)$$

绘制 $1-U^2$ 为横坐标， $\frac{E}{(e_0 - e_{150}) \cdot f(W)}$ 为纵坐标的关系曲线如图 2b 所示。

基于图 2b 拟合处二者的非线性函数为

$$\frac{E}{(e_0 - e_{150}) \cdot f(W)} = 0.567 + 0.646(1 - U^2)^{0.5} \quad (15)$$

所以, $c=0.567$ 、 $d=0.646$ 。

2.4 温度系数的确定

确定温度函数的系数 m 、 n 和 β , 试验观测时取一固定风速值 W 和湿度值 U 将风速函数 $f(W)$ 和湿度函数 $f(U)$ 转化为常数。将公式 (9) 转化为

$$\frac{E}{(e_0 - e_{150}) \cdot f(W) \cdot f(U)} = m + n(T_0 - T_{150})^\beta \quad (16)$$

以 $T_0 - T_{150}$ 为横坐标、 $\frac{E}{(e_0 - e_{150}) \cdot f(W) \cdot f(U)}$ 为纵坐标

绘制关系曲线如图 2c 所示。

基于幂函数拟合图 2c 曲线, 可得表达式如下

$$\frac{E}{(e_0 - e_{150}) \cdot f(W) \cdot f(U)} = 0.755 + 0.755(T_0 - T_{150})^{0.318} \quad (17)$$

所以, $m=0.755$ 、 $n=0.755$ 和 $\beta=0.318$ 。

综合式 (13)、(15) 和 (17) 可得, 内陆干旱区水面蒸发模型的表达式为

$$E = (e_0 - e_{150}) \cdot (0.369 + 0.095W) \cdot [0.567 + 0.646(1 - U^2)^{0.5}] \cdot [0.755 + 0.755(T_0 - T_{150})^{0.318}] \quad (18)$$

2.5 模型参数的显著性分析

实际中, 观测值和拟合值之间存在一定的误差, 上述各基本参数也是通过观测值拟合曲线而获取, 虽然具有较好的拟合关系, 但为了模型各参数的可靠性, 需要对 a 、 b 、 c 、 d 、 m 、 n 和 β 各参数进行显著性分析。以各参数为自变量, 蒸发量为因变量, 进行回归分析, 表明各参数值的变化对蒸发量的影响均达到极显著水 ($P < 0.01$), 决定系数 R^2 均在 0.98 以上 (表 2), 也反映了文中选取参数的合理性。

表 2 模型系数显著性分析

Table 2 Significance analysis of model coefficient

参数 Parameters	拟合值 Fitting values	最大值 Maximum	最小值 Minimum	R^2	P
a	0.369	0.371	0.367	0.994	0.001
b	0.095	0.098	0.092	0.997	0.000
c	0.567	0.577	0.557	0.985	0.004
d	0.646	0.658	0.634	0.992	0.002
m	0.755	0.754	0.756	0.998	0.000
n	0.755	0.741	0.769	0.992	0.002
β	0.318	0.315	0.321	0.987	0.004

3 模型验证与修正

上述公式 (18) 是在 20 m^2 蒸发池中通过试验获取, 除了外界温度、风速、湿度、气压等影响外, 水深、光辐射、水质和水体面积等因素也对水面蒸发量有一定的影响, 各因素对蒸发池和水库等大水体的影响效果是否相同, 该公式能否精准地反映内陆干旱区水库、湖泊等大水体的蒸发量仍需试验验证。

3.1 大水体蒸发试验

大水体试验选择距离石河子市区以北 18 km 处的大泉沟水库作为研究对象, 水库如图 3 所示。该水库总面积 10 km^2 , 水库采用全库盘土工膜防渗, 渗流量较小。此外, 该水库水文气象等资料完善, 配置完整的渗流观测资料且常年实时观测, 每月出入库水量也具有详细数据记录, 所以, 计算水库水面蒸发量时, 我们采用水量平衡法来计算蒸发量会更加准确, 其表达式如下

$$E = I - O + P - L \pm S \quad (19)$$

式中, E 为水面蒸发量, mm/d ; I 为入库 (湖) 的水量, mm/d ; O 为出库的水量, mm/d ; L 为渗漏量, mm/d ; S 为库蓄水变量, mm/d ; P 为降水量, mm/d 。

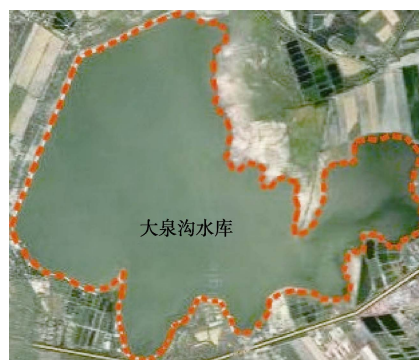


图 3 新疆石河子大泉沟水库

Fig.3 Daquangou reservoir in Shihezi, Xinjiang

试验时间是 2013 年 1 月—2016 年 12 月。

其中, 水库渗漏量通过大坝内部埋设的测压管数据进行分析计算, 同时根据水库所处地质特性和渗流控制措施, 采用数值模拟计算来对比验证, 保障数据的准确性。水库的蓄水量通过查阅水库“库容-水位”特征曲线获取; 出入库水量通过流量三角堰进行计算观测。若水库具有完整的观测资料, 可以直接采用观测资料进行推 (估) 算。

3.2 水库蒸发模型验证

将水库 2013—2016 年各月份的入库的水量; 出库水量、渗漏量、库蓄水变量、为降水量均统计带入公式 (19) 计算出蒸发量。此外, 将观测到的气压 (e_0 、 e_{150})、相对湿度 (U)、温度 (T_0 、 T_{150}) 和风速 (W) 等参数代入公式 (18), 获得蒸发量理论值。2013~2016 年期间的蒸发量试验值、理论值及差值如图 4 所示。

为了验证公式的合理性, 基于图 4 计算得出每月绝对误差 (最大值、最小值、平均值)、相对误差 (最大值、最小值、平均值)、合格率 ($\leq 5\%$ 、 $\leq 10\%$ 、 $\leq 15\%$ 、 $\leq 20\%$), 将各参数列入表 3。

由表 3 可得, 2013—2016 年期间绝对误差为 $0.3 \sim 18.4 \text{ mm}$, 平均值为 7.69 mm , 绝对误差较小。相对误差为 $1.18\% \sim 30.65\%$, 平均值为 9.13% , 相对误差也较小。水面蒸发模型计算的蒸发量合格率 $\leq 5\%$ 时的精确度为 $0\% \sim 25\%$, 平均值为 12.5% ; 合格率 $\leq 10\%$ 时的精确度为 $58.33\% \sim 83.33\%$, 平均值为 70.83% ; 合格率 $\leq 15\%$ 时的

精确度为 66.67%~91.67%，平均值为 85.42%；合格率 ≤ 20%时的精确度为 83.33%~100%，平均值为 93.75%。所以，大水体水面蒸发模型能较精确的计算得出水库水面蒸发量。

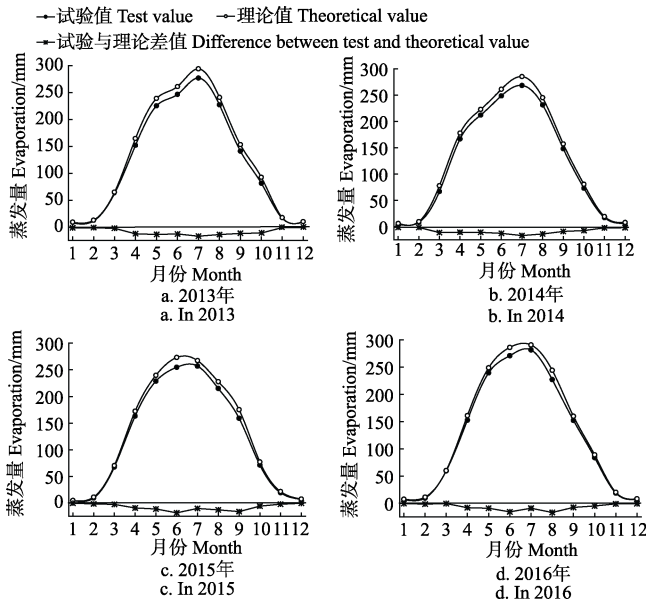


图 4 大泉沟水库 2013—2016 年蒸发量试验值与理论值对比
Fig.4 Comparison between experimental and theoretical values of evaporation in Daquangou reservoir in 2013—2016

表 3 水面蒸发预测模型误差分析

Table 3 Error analysis of water surface evaporation model

年份 Year	绝对误差 Absolute error/mm			相对误差 Relative error/%			合格率 (相对误差) Qualified rate (relative error)/%			
	最大值 Maxi- mum	最小值 Mini- mum	平均值 Aver- age	最大值 Maxi- mum	最小值 Mini- mum	平均值 Aver- age	≤5	≤10	≤15	≤20
	2013	17	1.1	8.54	21.92	3.69	9.33	8.33	66.67	91.67
2014	16.8	1.4	8.23	30.65	5.07	12.58	0	58.33	66.67	83.33
2015	18.4	0.3	7.57	17.89	3.84	7.6	25	75	91.67	100
2016	15.2	0.6	6.41	17.89	1.18	7.02	16.67	83.33	91.67	100
合计 Total	18.4	0.3	7.69	30.65	1.18	9.13	12.5	70.83	85.42	93.75

3.3 模型的修正

由图 4 可知，水库蒸发量计算值均大于试验值。经计算 2013—2016 年冰冻期（1—3 月和 11—12 月）的绝对误差为 0.3~11.1 mm，平均值为 1.89 mm；相对误差为 1.18%~30.65%，平均值为 12.81%。非冰冻期（4—10 月）的绝对误差为 5.1~18.4 mm，平均值为 11.82 mm；相对误差为 3.27%~13.64%，平均值为 6.51%。由此可见，非冰冻期内蒸发量的绝对误差较大，冰冻期内蒸发量的相对误差较大。基于相对误差的平均值，对公式（18）作进一步修正，引入修正系数后表达式如下：

$$E = \lambda(e_0 - e_{150}) \cdot (0.369 + 0.095W) \cdot [0.567 + 0.646(1 - U^2)^{0.5}] \cdot [0.755 + 0.755(T_0 - T_{150})^{0.318}] \quad (20)$$

式中 λ 为大水体冰冻期和非冰冻期修正系数，北疆地区 1—3 月，11—12 月时， $\lambda=0.886$ ；4 月—10 月 $\lambda=0.939$ 。

3.4 公式（20）精度分析

将 e_0 、 e_{150} 、 U 、 T_0 、 T_{150} 和 W 等参数代入公式（20）获取蒸发量理论值，2013—2016 年期间的蒸发量试验值、理论值及差值如图 5 所示。

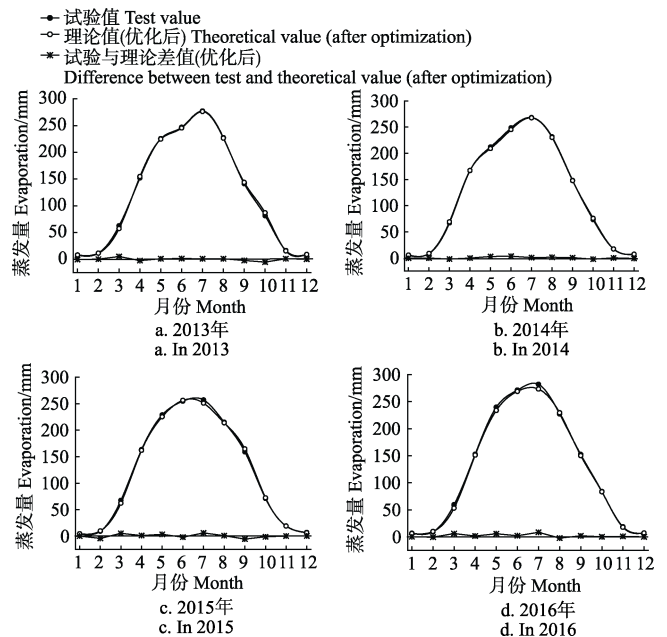


图 5 大泉沟水库 2013—2016 年优化后蒸发量试验值与理论值对比

Fig.5 Comparison between experimental and theoretical values of evaporation after optimization in Daquangou reservoir in 2013—2016

对比图 4 和图 5 可得，优化后的蒸发量计算值和试验值几乎完全吻合，且差值与零刻线几乎重合。经计算冰冻期（1—3 月和 11—12 月）的绝对误差和相对误差平均值分别为 1.28 mm、5.51%；绝对误差和相对误差分别降低 32.28%、56.99%。非冰冻期（4—10 月）的绝对误差和相对误差平均值分别为 2.45 mm、1.42%；绝对误差和相对误差分别降低 79.27%、78.19%。综上所述，优化后模型的误差大幅度下降，精度大大提升。

3.5 北疆其他地区平原水库公式适应性验证

公式（20）是基于石河子地区蒸发池和平原水库观测资料得到的经验公式，该模型能否适用于北疆其他地区的平原水库，还有待进一步验证。为此，选取了北疆其他地区（乌鲁木齐、吐鲁番地区、阿勒泰地区、塔城地区、昌吉地区、伊犁州和博尔塔拉蒙古自治州）具有代表性的平原水库（红颜水库、火焰山水库、塘巴水库、恰夏水库、大海子水库、红旗水库和团结水库）进行公式适应性验证。所选水库均具有较完整的渗流观测资料和进出水量观测数据，可以计（估）算出渗流量、蓄水量和进出水库水量等关键值。因此，可以采用文中第 3 节的验证方法，分别获取蒸发量试验值和蒸发量理论值，并进行误差及合格率分析，列入表 4。

由表 4 可得，通过蒸发模型计算得出的北疆各地区平原水库蒸发量的绝对误差为 1.26~1.67 mm，平均值为 1.44 mm；相对误差为 1.07%~1.51%，平均值为 1.28%，绝对误差

和相对误差都较小。此外,水面蒸发模型计算的蒸发量合格率 $\leq 5\%$ 时的精确度为 33.33%~58.33%,平均值为 44.05%;合格率 $\leq 10\%$ 时的精确度为 50%~75%,平均值

为 59.52%;合格率 $\leq 15\%$ 时的精确度为 66.67%~91.67%,平均值为 78.57%;合格率 $\leq 20\%$ 时的精确度为 83.33%~100%,平均值为 91.67%。

表 4 北疆其他地区水库公式适应性验证表

Table 4 Formula adaptability verification table for reservoir in other areas of Northern Xinjiang

水库 Reservoir	所在地区 Region	平均蒸发量 Mean evaporation/mm		误差 Error		合格率(相对误差) Qualified rate (relative error)/%			
		试验值 Experimental data	理论值 Theoretical value	绝对误差 Absolute error/mm	相对误差 Relative error/%	≤ 5	≤ 10	≤ 15	≤ 20
红岩水库 Hongyan Reservoir	乌鲁木齐 Urumqi	113.32	114.69	1.37	1.21	41.67	50	75	100
火焰山水库 Flaming Mountain Reservoir	吐鲁番地区 Turpan Region	123.33	124.95	1.62	1.31	33.33	58.33	83.33	91.67
塘巴水库 Tangba Reservoir	阿勒泰地区 Altay Region	110.48	108.81	1.67	1.51	50	66.67	91.67	100
恰拉水库 Qiala Reservoir	塔城地区 Tacheng Area	112.57	113.95	1.38	1.23	50	58.33	75	83.33
大海子水库 Dahaizi Reservoir	昌吉地区 Changji Areas	115.45	114.21	1.24	1.07	58.33	75	91.67	91.67
红旗水库 Hongqi Reservoir	伊犁州 Yili Prefecture	106.98	105.42	1.56	1.46	41.67	58.33	66.67	83.33
团结水库 Tuanjie Reservoir	博尔塔拉蒙古自治州 Bortala Mongol Autonomous Prefecture	108.11	109.37	1.26	1.17	33.33	50	66.67	91.67
各水库平均 Average of all reservoirs		112.89	113.06	1.44	1.28	44.05	59.52	78.57	91.67

由此可知,上述模型能较好模拟北疆各地区平原水库水面的蒸发量。

4 讨论

4.1 增加因子的必要性

新疆特殊的地理位置和气候条件,具有冰冻期长、夏季炎热、昼夜温差较大等特点,气温对蒸发的影响不可忽视。因此,文中增加气温因子作为补充,建立了 4 因子模型,将文中模型和闵骞等建立的 3 因子模型(饱和水汽压差、风速、相对湿度)对比如表 5 所示。

表 5 蒸发模型合格率/%
Table 5 Qualified rate of evaporation models

模型 Model	年份 Years	合格率 Qualified rate
3 因子(闵骞) 3 Factors (Min Qian)	1993—1997	86.1
4 因子(本模型) 4 Factors (this model)	2013—2016	91.67

可见,4 因子模型的合格率相对于 3 因子模型提高了 6.47%,此外闵骞已经论证了 3 因子模型的合格率高于 2 因子模型,因此在已有的 3 因子模型的基础上增加因子是很有必要的。

4.2 公式的适用性

干旱区平原水库多数量多,面积大,且多处于灌区,具有鲜明的地域特色,水面蒸发损失量极大^[30-31]。目前该地区 20 m² 及以上的蒸发池设置还极其缺乏,传统意义上 E-601 型蒸发器等蒸发试验难以满足计算要求。文中以石河子地区 20 m² 蒸发池试验作为推求北疆平原水库蒸

发量公式参数的基础,通过水库水量平衡法来验证公式的合理性,并引入冰冻期和非冰冻期修正系数,最终公式也能较好拟合北疆其他区域平原水库的蒸发量实际情况。但该公式仍是基于道尔顿理论的经验公式,具有鲜明的地区性,对于山区或非干旱区水库,该公式中关键参数和修正系数将会发生变化,需要重新确定。

4.3 影响因素的进一步分析

文中在分析干旱区平原水库蒸发模型时,根据影响因素的主次,将湿度、温度、风速、气压作为决定因素来考虑,忽略了其他因素的影响。而水库水面蒸发的观测精度,不仅取决于上述因素,还受到其他因素的影响。如观测方法精细程度、水库面积尺度、周边遮挡率大小、气候环境变化、地下垫面植被高度、水深、降水、水质等。若所选水库各影响因素的权重与本文考虑的因素区别较大,将需要探索更加精准的数学模型。

5 结论

1) 本文以道尔顿模型为基础,在现有 3 因子模型的基础上,考虑到干旱区水面蒸发的特点,增加了温度对水面蒸发的影响,建立了平原水库水面蒸发的 4 因子模型。

2) 文中 4 因子模型表达式中关键参数均由 20m² 蒸发池试验观测获取,受新疆特殊的大陆干旱性气候所致的缘故,已有研究“20 m² 蒸发池试验结果能代替大水体的蒸发量”这一结论,在北疆地区计算平原水库蒸发量存在较大误差,需要修正。

3) 北疆平原水库在冰冻期和非冰冻期蒸发量差异较大,引入蒸发池和水库蒸发拟合的修正系数,其中,在

冰冻期修正系数为 0.886, 非冰冻期修正系数为 0.939。

该模型能精确地计算出北疆各平原水库蒸发量, 所需的数据都是基本的气象资料, 易于获取, 计算简便, 实用性好。

[参 考 文 献]

- [1] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength[J]. *Nature*, 1995, 377(6551): 687—688.
- [2] Lawrimore J H, Peterson T C. Pan evaporation trends in dry and humid regions of the United States[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2000, 1(6): 543—546.
- [3] Adams E E, Cosler D J, Helfrich K R. Evaporation from heated water bodies: Predicting combined forced plus free convection[J]. *Water Resources Research*, 2010, 26(3): 425—435.
- [4] 陈伟涛, 孙自永, 王焰新, 等. 论内陆干旱区依赖地下水的植被生态需水量研究关键科学问题[J]. *地球科学*, 2014, 39(9): 1340—1348.
Chen Weitao, Sun Ziyong, Wang Yanxin, et al. Major scientific issues on water demand studying for groundwater dependent vegetation ecosystems in inland arid regions[J]. *Earth Science*, 2014, 39(9): 1340—1348. (in Chinese with English abstract)
- [5] 邓铭江, 石泉. 内陆干旱区水资源管理调控模式[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(9): 1046—1054.
Deng Mingjiang, Shi Quan. Management and regulation pattern of water resource in inland arid regions[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(9): 1046—1054. (in Chinese with English abstract)
- [6] Xue P, Pal J S, Ye X, et al. Improving the simulation of large lakes in regional climate modeling: Two-way lake-atmosphere coupling with a 3-D hydrodynamic model of the great lakes[J]. *Journal of Climate*, 2016, 30(5): 1605—1627.
- [7] Rye C F, Smettem K R J. The effect of water repellent soil surface layers on preferential flow and bare soil evaporation[J]. *Geoderma*, 2017, 289(3): 142—149.
- [8] Kuchma A E, Shchekin A K, Esipova N E, et al. Three stages of water microdroplet evaporation on hydrophobized surface: Comparison between steady-state theory and experiment[J]. *Colloid Journal*, 2017, 79(3): 353—359.
- [9] 张国威, 周聿超. 新疆内陆干旱区蒸发的计算和分析[J]. *水科学进展*, 1992, 3(3): 226—232.
Zhang Guowei, Zhou Yuchao. Evaporation properties and estimates in the landlocked arid region in Xinjiang, China[J]. *Advances in Earth Science*, 1992, 3(3): 226—232. (in Chinese with English abstract)
- [10] Qin Boqiang, Shi Yafeng, Wang Suming. The relationship between inland lakes evolution and climatic fluctuation in arid zone[J]. *Chinese Geographical Science*, 1991, 1(4): 26—33.
- [11] 赵晓松, 李梅, 王仕刚, 等. 鄱阳湖夏季水面蒸发与蒸发皿蒸发的比较[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(2): 343—351.
Zhao Xiaosong, Li Mei, Wang Shigang, et al. Comparison of actual water evaporation and pan evaporation in summer over the Lake Poyang, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(2): 343—351. (in Chinese with English abstract)
- [12] 施成熙, 卡毓明, 朱晓原. 确定水面蒸发模型[J]. *地理科学*, 1984, 4(1): 1—11.
Shi Chengxi, Ka Yuming, Zhu Xiaoyuan. Models for estimation of evaporation from water surfaces[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1984, 4(1): 1—11. (in Chinese with English abstract)
- [13] Camillo P J, Gurney R J. A resistance parameter for bare-soil evaporation models[J]. *Soil Science*, 1986, 141(2): 95—105.
- [14] Ershadi A, McCabe M F, Evans J P, et al. Multi-site evaluation of terrestrial evaporation models using FLUXNET data[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2014, 187(8): 46—61.
- [15] Allen R G, Pereira L S, Raes D S, et al. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. FAO Irrigation and Drainage, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nation, 1984: 41—56.
- [16] 金双彦, 蒋昕晖, 曹春燕. 黄河巴彦高勒蒸发实验站水面蒸发模型的建立[J]. *人民黄河*, 2011, 33(10): 21—22.
Jin Shuangyan, Jiang Xinhui, Cao Chunyan. Establishment of water surface evaporation model in Bayangaole evaporation experimental station on the Yellow River[J]. *Yellow River*, 2011, 33(10): 21—22. (in Chinese with English abstract)
- [17] 闵蹇. 水面蒸发计算模型研究[J]. *水利水电科技进展*, 2003, 23(1): 41—44.
Min Qian. Calculation model for water surface evaporation[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2003, 23(1): 41—44. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李万义. 适用于全国范围的水面蒸发量计算模型的研究[J]. *水文*, 2000, 20(4): 13—17.
Li Wanyi. A study on the generalized model of water evaporation[J]. *Journal of China Hydrology*, 2000, 20(4): 13—17. (in Chinese with English abstract)
- [19] 滕凯. 水面蒸发模型的进一步优化[J]. *水资源与水工程学报*, 2011, 22(1): 163—166.
Teng Kai. Optimization of water surface evaporation model[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2011, 22(1): 163—166. (in Chinese with English abstract)
- [20] 魏光辉, 董新光, 杨鹏年, 等. 基于灰色关联分析与多元线性回归模型的水面蒸发预测[J]. *节水灌溉*, 2010, 37(2): 41—44.
Wei Guanghui, Dong Xinguang, Yang Pengnian, et al. Study on water surface evaporation forecast based on multivariate linear regression model and gray relational analysis[J]. *Journal of Water Saving Irrigation*, 2010, 37(2): 41—44. (in Chinese with English abstract)
- [21] 姜海波, 唐凯, 何新林. 抑制干旱区平原水库蒸发试验及蒸发模型研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(1): 119—124.
Jiang Haibo, Tang Kai, He Xinlin. Experimental region study on inhibiting water surface evaporation of reservoir in arid[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(1): 119—124. (in Chinese with English abstract)
- [22] 姜海波, 唐凯, 何新林. 干旱区平原水库蒸发试验及蒸发模型研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(1): 119—124. (in Chinese with English abstract)
- [23] 姜海波, 唐凯, 何新林. 抑制干旱区平原水库蒸发试验及蒸发模型研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(1): 119—124.
- [22] Jiang Haibo, Tang Kai, He Xinlin. Experimental studies on reduction of evaporation from plain reservoirs in drought areas by benzene covering technology[J]. *Journal of Coastal Research*, 2015, 31(5): 177—182.
- [23] Wu Jianhua, Wang Lei, Wang Siting, et al. Spatiotemporal variation of groundwater quality in an arid area experiencing long-term paper wastewater irrigation, northwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(13): 460—471.

- [24] Xu Shuna, Liu Yanfang, Wang Xia, et al. Scale effect on spatial patterns of ecosystem services and associations among them in semi-arid area: A case study in Ningxia Hui Autonomous Region, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 598(5): 297–306.
- [25] 闵騫, 苏崇萍. 水面蒸发计算中几个问题的研究[J]. *武汉大学学报: 工学版*, 1993, 26(2): 105–112.
Min Qian, Su Chongping. Investigations into some problems in calculation of water surface evaporation[J]. *Journal of Wuhan University: Engineering Edition*, 1993, 26(2): 105–112. (in Chinese with English abstract)
- [26] Chakraborty R, Talukdar S, Saha U, et al. Anomalies in relative humidity profile in the boundary layer during convective rain[J]. *Atmospheric Research*, 2017, 191(4): 74–83.
- [27] Lovellsmith J W, Feistel R, Harvey A H, et al. Metrological challenges for measurements of key climatological observables, Part 4: Atmospheric relative humidity[J]. *Metrologia*, 2016, 53(1): R40.
- [28] 濮培民. 水面蒸发与散热系数公式研究(二)[J]. *湖泊科学*, 1994, 6(3): 201–210.
- Pu Peimin. Studies on the formulae for calculating evaporation and heat loss coefficient from water surface in China (II) [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1994, 6(3): 201–210. (in Chinese with English abstract)
- [29] 侍克斌, 严新军, 陈亮亮. 内陆干旱区平原水库节水及周边土壤盐渍化防治[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
Shi Kebin, Yan Xinjun, Chen Liangliang. *Water Saving of Plain Reservoir in Inland Arid Area and Prevention and Control of Soil Salinization in the Surrounding Area*[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [30] Xie Aili, Liu Pan, Guo Shenglian, et al. Optimal design of seasonal flood limited water levels by jointing operation of the reservoir and floodplains[J]. *Water Resources Management*, 2017, 32(2): 1–15.
- [31] Yuan Junping, Cao Xueshan, He Guiling, et al. Field test study of mechanism of bulge phenomenon under geomembrane in plain reservoir[J]. *Rock & Soil Mechanics*, 2014, 35(1): 67–73.

Establishment of water surface evaporation model and determination of key parameters for plain reservoir in Northern Xinjiang

Mao Haitao¹, Wang Zhengcheng^{1*}, Wang Xiaoju², Shi Kebin³, Huang Qinghao³, Jiang Haibo⁴

(1. College of Civil Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 4. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: The temperate continental arid semi-arid climate in plain area of Northern Xinjiang has some characteristics: Air is dry, temperature difference is large, air pressure change is obvious, and wind is large and speedy. In these areas, there are more than 400 plain reservoirs which have long dam, wide area and shallow water depth. Water surface evaporation is molecular exchange phenomenon that occurs between the water body and the atmosphere, which is one of the main reasons for the loss of water resources in the above arid regions, so the water resource annual loss is about 40% due to evaporation. At present, there is an irreplaceable role in farmland irrigation in Xinjiang. The calculation error is relatively larger about water surface evaporation model, and it is impossible to estimate reservoir evaporation accurately because the model can not fully consider characteristics of plain reservoirs in arid and semi-arid area. Based on the Dalton's model, fully considering the 4 influencing factors, i.e. air pressure difference, wind speed, humidity and temperature, a new calculation model is built on water surface evaporation. Each influencing factor of model was obtained by theoretical analysis, and key parameters in formula were obtained by 20 m² evaporation pool. Based on complete observation data of hydrology and water resources in Daquangou Reservoir of Shihezi in Xinjiang, the evaporation was calculated by water balance method, and calculated results by 4-factor model were basically in accord with observations. At the same time, considering scale differences, the model is further modified by introducing correction coefficient. We find the research conclusion “20 m² evaporation pool results can take the place of large water bodies on evaporation” is bigger error, and needs to be modified. Correction factor is finally determined by deep analysis of observation data, and correction coefficients were 0.886 and 0.939 in freezing and non freezing periods respectively. So the 4-factor calculation model after optimization can not only accurately simulate water surface evaporation of Daquangou Reservoir, but also fit the evaporation of 7 reservoirs in Northern Xinjiang, and accuracy and reliability of model are verified. The data required by model are basic meteorological data, easy to obtain, simple to calculate. To summarize, the evaporation model is correct, and it can accurately estimate evaporation of plain reservoir in inland arid area, which can provide theoretical support for rational utilization and scientific management of water resources in arid inland area. In the analysis of the evaporation model, the humidity, temperature, wind speed and air pressure are considered as the determinants, and the influences of other factors are ignored. The observation precision of evaporation on the surface of reservoirs depends not only on the above factors, but also on other factors, such as the fine degree of observation method, the size of the reservoir area, the surrounding occlusion rate, the climate change, the vegetation height, water depth, precipitation, and water quality. If the weight of the influential factors of the selected reservoir is different from the factors considered in this paper, a more accurate mathematical model will be needed again.

Keywords: models; evaporation; reservoirs; key parameters; North Xinjiang