

FFZ-01Z型自动蒸发器 比测分析与提高精度的可行方法

郭天辰¹, 钱睿智¹, 李 杰², 朱光轩¹, 张艺铭¹

(1. 江苏省水文水资源勘测局泰州分局, 江苏 泰州 225300;

2. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 将兴化水位站FFZ-01Z自动蒸发器自动监测数据与E601水面蒸发器人工观测数据(245组)进行比测分析, 论证自动蒸发器的可靠性。为提高自动蒸发监测数据的精度, 基于数理统计, 对汛期的数据采用一元线性回归分析, 非汛期的数据采用偏态分布拟合, 通过同频率求得对应的理论值。结果表明: 处理后的数据平均绝对误差为0, 期望值符合人工观测序列, 有良好相关性且可减小离散程度, 能够满足自动监测需求, 该方法为解决精度问题提供一种可行思路。

关键词: FFZ-01Z型自动蒸发器; 比测分析; 精度提高; 数理统计; 误差分析

中图分类号: P332.2

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2024)05-0021-0006

A feasible method for accuracy improvement and comparative analysis of FFZ-01Z automatic evaporator

GUO Tianchen¹, QIAN Ruizhi¹, LI Jie², ZHU Guangxuan¹, ZHANG Yiming¹

(1. Taizhou branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Taizhou 225300, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The automatic monitoring data of FFZ-01Z automatic evaporator at Xinghua Water level Station is compared with the manual observation data of E601 surface evaporator (245 sets) to demonstrate the reliability of the automatic evaporator. To improve the accuracy of automatic evaporation monitoring data, based on mathematical statistics, linear regression analysis is used for flood season data, and skewed distribution fitting is used for non-flood season data. The corresponding theoretical values are obtained through the same frequency. The results show that the average absolute error of the processed data is 0, the expected value conforms to the manual observation sequence, has good correlation and can reduce the degree of dispersion, and can meet the needs of automatic monitoring. This method provides a feasible approach to solve accuracy problems.

Key words: FFZ-01Z automatic evaporator; comparative analysis; accuracy improvement; mathematical statistics; error analysis

随着现代水文水面蒸发观测设备的发展, 数字式水面蒸发器作为目前较先进的自动监测设备有广泛的应用, 例如丹江口水库蒸发站、石梁河水库水文站、舵落口水文站采用的FFZ-01Z蒸发器等^[1-3]。国内的主流研究方向是采取人工与自动监测设备

同步观测的方式, 通过数理统计、误差分析等方法论证二者的相关性, 但对于自动监测值的修正方法则鲜有提及。

兴化水位站2020年安装FFZ-01Z型自动蒸发器, 2021年1月开始与人工观测同步, 旨在通过人

收稿日期: 2023-12-01

作者简介: 郭天辰(2000—), 男, 本科, 主要从事水文水资源工作。E-mail: 651944576@qq.com

工观测与自动监测数据的比对,为自动监测设备能否替代人工观测工作这一课题提供基础的数据支撑。

本研究对2022年FFZ-01Z自动蒸发器监测获得的自动监测数据与E601水面蒸发器观测的人工观测日蒸发量数据(以下简称人工观测数据)进行比测,得到全年的自动监测数据与人工观测数据比测成果,通过数理统计的方法,对自动监测数据进行修正,以期自动蒸发器的可靠性提供理论依据与数据支撑。

1 测站和蒸发器概况

1.1 测站基本概况

兴化水位站是国家基本水位站,属于淮河流域里下河水系,设有泰州市里下河地区唯一的蒸发观测场,有良好的区域代表性。蒸发观测场位于兴化水文监测中心内部,尺寸为5.04 m×4.82 m,场地平整、清洁、无积水,地面种植草坪,离横泾河水体近,周围障碍物遮挡率满足SL 630—2013《水面蒸发观测规范》对周边环境的要求。蒸发场安装有蒸发、降水等设施,包括2套蒸发设备(E601型蒸发器和FFZ-01Z型自动蒸发器)^[4]。

1.2 蒸发器简介

FFZ-01Z型自动蒸发器,又称FFZ-01Z数字式

水面蒸发站系统,由FFZ-01数字水面蒸发计、JFZ01型数字雨量计、自动补水装置、采集控制柜、上位机系统和供电系统组成,结构图如图1所示。

在无降水日,蒸发站中的采集控制器会自动采集蒸发桶内水面高度变化并计算蒸发量。当蒸发桶内水面高度降至设定值时,采集器会控制补水泵工作,使水位恢复至水位标志线高度,然后,以补水后稳定水面的高度作为起测点,测量下一时段的蒸发量。在降水日,当蒸发桶水位升高至设定值时,采集器驱动电磁阀门关闭,记录此时的水面高度,溢流泵工作排出桶中的水,当水面下降到一定高度时,溢流泵停止工作,采集器记录此时的水面高度,记录器计算此次排水的高度差,从而根据蒸发桶的横截面积计算出此次的溢流量,记录器再打开电磁阀,等待下次溢流。

蒸发量的计算蒸发量公式为=(蒸发桶水位测量值-蒸发桶水位起算值)+降水量-溢流量。

2 数据分析

于2020年安装后至年底对FFZ-01Z型自动蒸发器进行安装调试,采用调试好的自动蒸发器与传统的人工观测方法进行同时测量。观测时间选择2022年全年,剔除冰期不合要求的蒸发数据后,获得自动蒸发器累积监测数据与人工观测对

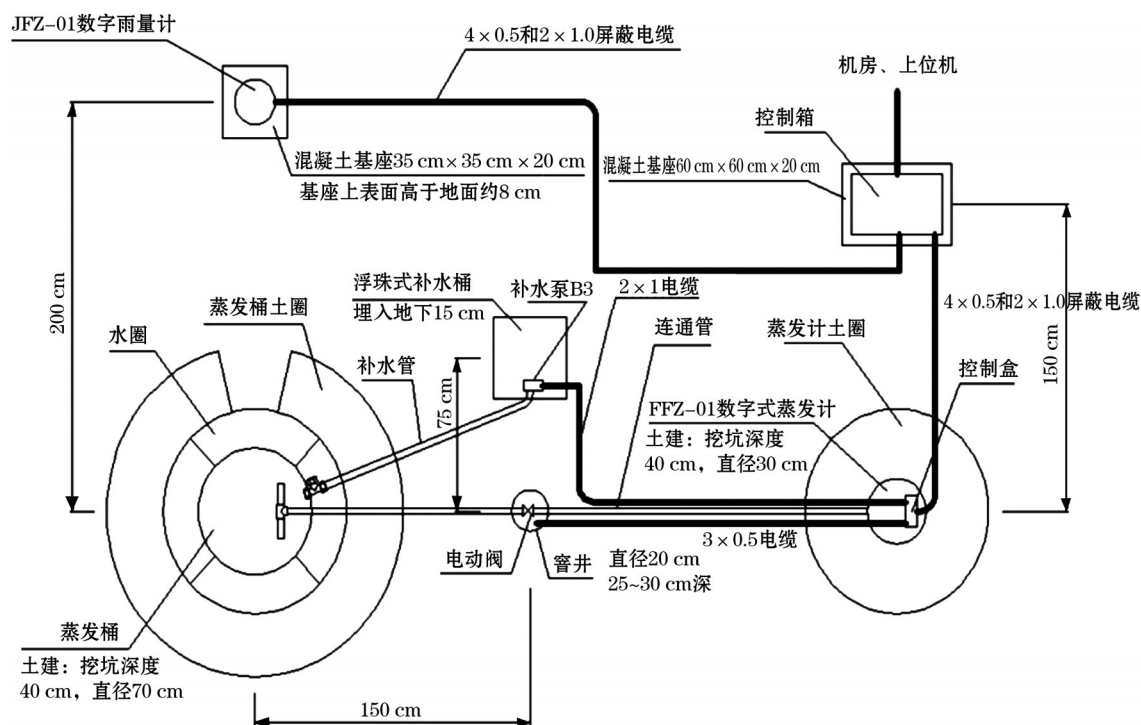


图1 自动蒸发器设备结构

照数据 245 组,通过以下 4 种参数评估 2 组数据的相关程度^[5-6]:

(1) 2 组数据之间的平均绝对误差 A_m 。计算公式如下:

$$A_m = \frac{\sum_{i=1}^n |E_{ai} - E_{zi}|}{N} \quad (1)$$

式中: E_{ai} 为第 i 次人工观测数据; E_{zi} 为第 i 次 FFZ-01Z 型自动蒸发装置自动监测数据; N 为观测总次数。

(2) 平均相对误差 δ_m 。计算公式如下:

$$\delta_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{E_{ai} - E_{zi}}{E_{zi}} \quad (2)$$

(3) 均方根误差 RMES。计算公式如下:

$$RMES = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (E_{ai} - E_{zi})^2} \quad (3)$$

(4) Person 相关系数 R 。计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (E_{ai} - \bar{E}_a)(E_{zi} - \bar{E}_z)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{ai} - \bar{E}_a)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{zi} - \bar{E}_z)^2}} \quad (4)$$

式中: \bar{E}_a 和 \bar{E}_z 分别为 E_{ai} 与 E_{zi} 的平均值。

4 种指标中有评判标准,相关系数 R 越接近 1,代表二者相关性越好;均方根误差 RMES 越小,代表二者离散程度越小,小于 1,则标准判断二者的离散程度合格^[7]。根据 2022 年全年日蒸发量采用 4 个公式计算判断序列离散程度,可得均方根误差为 0.95 mm,相关系数为 0.72,平均相对误差为 -2.3%,说明自动监测数据和人工观测数据有一定的相关性,但数据较为离散,用自动监测代替人工观测精度不高。究其原因,主要是雨水溅出的偶然误差、铅锤操作的机械误差、人为误差等不同的误差类型导致。

其中,由于雨强大于排水速率导致的机械误差、雨水溅出的偶然误差主要集中在降雨较为密集的汛期,人工补水与机械补水的差异、人工清洗时的操作不当致设备失灵、蒸发桶中的浮藻造成的系统误差主要集中在降水较少的非汛期,经过分析,提出一种解决思路:将时间序列划分为汛期与非汛期的连续的时间序列,再分别进行分析,以减小不同时期、误差类型对设备自动监测与人工观测造成的误差影响。

2.1 非汛期

2.1.1 数据分析

在观测时间内,在非汛期内的有效的人工观测与自动监测比测蒸发天数为 122 d,得到的参数如

表 1 所示。

表 1 兴化站 FFZ-01Z 型自动蒸发装置与人工观测数据比测对照

观测方式	期望值/ mm	总蒸发量/ mm	最大日蒸发量/ mm	出现日期
人工观测	2.65	323.5	6.4	4月12日
自动监测	2.45	298.7	6.9	4月12日

采用 4 种指标对数据序列进行分析评估,计算结果如表 2 所示。

表 2 兴化站 FFZ-01Z 型自动蒸发装置与人工观测数据回归分析

比测次数 N	平均绝对误差 A_m/mm	平均相对误差 $\delta_m/\%$	均方根误差 $RMES/\text{mm}$	Person 相关系数 R
122	-0.2	-0.33	0.65	0.899

根据表 2 的分析结果,发现单独的非汛期蒸发序列相较全年的序列,平均相对误差更小,相关性更好, RMES 体现的离散程度较小,可以验证思路的正确性。但由于均方根误差越小,数据准确度越高,根据表 1 的结果,若直接使用非汛期的自动监测数据代替人工蒸发观测值,现有的均方根误差仍然较大,存在精度不足的问题。

2.1.2 解决方案

散点图可以直观反映 2 个数据的分布情况,为此绘制散点图,得到人工观测数据与自动监测数据的对比情况,散点图如图 2 所示。分析时以人工观测数据作为自动监测对应的理论真值。

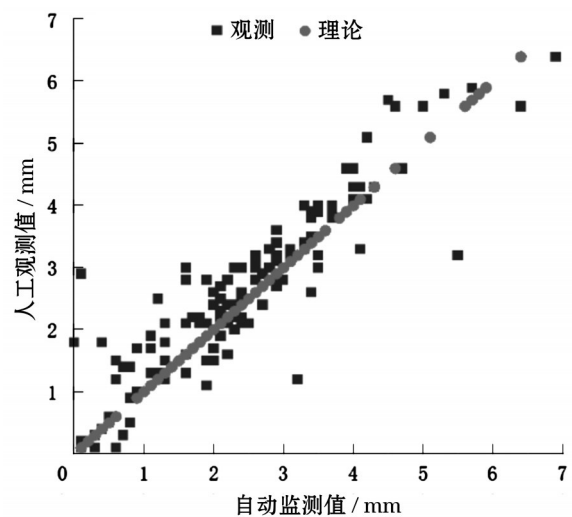


图 1 人工观测数据与自动监测数据对比

自动监测数据需要如图2中圆形散点分布,才能有良好的代表性。实际监测中自动监测数据较理论数据更加离散,同时在 $[0, 4.5]$ 区间内分布较为集中,较大值区间内分布较为稀疏,自动监测数据频率分布图如图3所示,图中,散点的分布大致呈偏态分布。

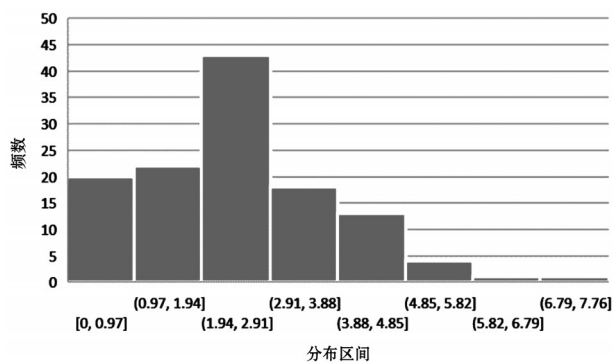


图3 自动监测数据频率分布

假设自动监测数据基于人工观测数据的分布,在时间序列上呈皮尔逊Ⅲ型偏态分布。其曲线是一条一端有限一端无限的不对称单峰、正偏曲线,数学上常称伽马分布。离均系数 C_v 与偏态系数 C_s 决定这一分布曲线的形状与尺度。故要验证这一假设,可以对分布中 C_v 与 C_s 等参数进行估计,如果估计值与样本序列适线的结果相吻合,则可以证明假设成立。参数估计可以采用极大似然法,得到人工观测数据的均值为2.65 mm,离均系数为0.54, C_s/C_v 为1.2,自动监测数据的均值为2.45 mm,离均系数为0.62, C_s/C_v 为1.7。

根据求得的参数,通过期望值公式^[8]验证,公式如下:

$$p = \frac{m}{n+1} \quad (5)$$

式中: n 为序列样本总数; m 为从大到小排列的第 m 个数。

通过点绘特定频率 p 对应的自变量进行适线,可以得到人工观测数据与自动监测数据的频率分布曲线,人工观测数据和自动监测数据的频率分布如图4~5所示,其中横坐标 p 代表频率,纵坐标代表蒸发量。可以看出,两者拟合的效果较好,可以反映分布特性;同时适线后的参数 C_v 与 \bar{C}_v 也与参数估计值相吻合,可以验证皮尔逊Ⅲ型分布假设的合理性。

若要用自动监测的蒸发数据替代人工观测数据,二者必然有着相同的频率分布与相同的极值,

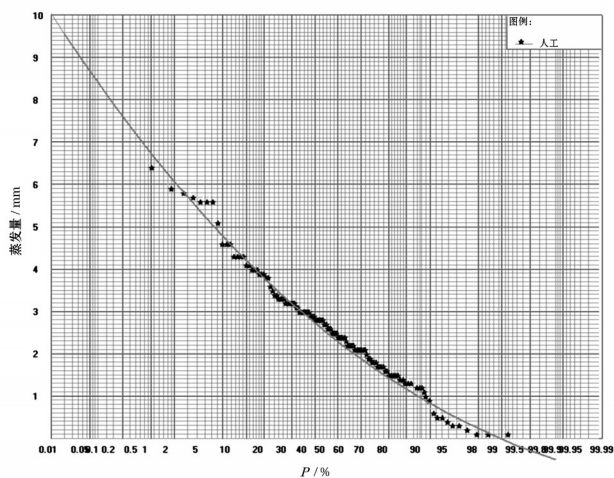


图4 人工观测数据频率分布

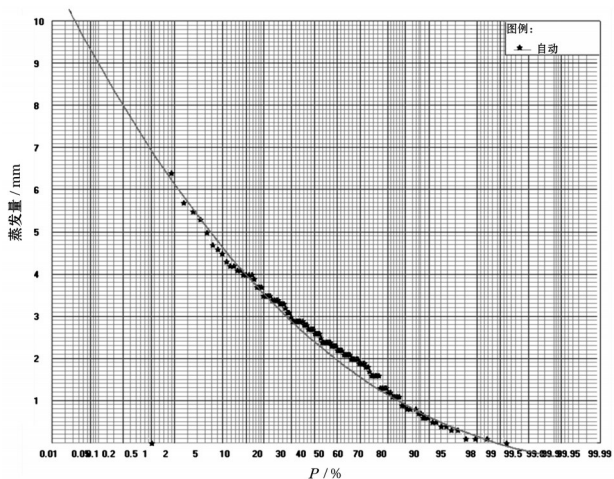


图5 自动监测数据频率分布

同时,每日的蒸发量均可视作独立且随机的变量,互不影响。通过频率分布曲线,根据自动监测的蒸发数据查图5曲线,通过对应的频率,查图4曲线得到相同频率对应的人工观测的蒸发量,通过这种方式对自动监测数据进行修正。但其步骤繁琐,如果对每个数据进行重复查表计算,计算量较大。因此为简便计算,采用每个散点之间近似线性的计算方法简化查表计算的流程。由于可以选取较为密集的散点,散点的连线与相邻散点之间曲线的切线近似重合,其与微积分的原理类似,对计算结果影响较小。通过随机抽取其中的20个数据来验证,计算结果与查表读数的误差范围是 $(0, 0.012)$,对最终的计算结果的影响可忽略不计。

关于散点的选取,可以通过指定一系列频率 P ,按照参数估计所得的 C_v ,通过查表得到该P-Ⅲ型分布标准化变量的离均系数 ϕ_p (例如指定3个频率为0.001, 0.01, 0.1的点,已知 C_v 为0.648,查表可得

ϕ_p)。按照以下公式计算修正后的自动监测值 X_p :

$$X_p = E(x)(\phi_p C_v + 1) = E(x)K_p \quad (6)$$

式中: $E(x)$ 为自动监测数据的均值。

计算相应于各种频率 P 的 X_p ,对应的点均在图6与图7曲线上。通过线性计算的方法,简化查表的步骤,可以将原序列自动蒸发的数据值代入计算进行验证。经过计算,可以得到验证值回归分析表,如表3所示。

表3 验证值回归分析

比测次数 N	平均绝对 误差 A_m/mm	平均相对 误差 $\delta_m/\%$	均方根误差 RMES/mm	Person相关 系数 R
122	0	10.82	0.63	0.891

选取2021年2和3月作为连续的非汛期时段验证结果。由于设备前期处于安装调试阶段,计算前选取了其中可信度较高的45个数值,得到的计算结果如表4所示。

表4 2021年2和3月验证计算结果

日期	人工观测 数据/mm	自动监测 数据/mm	修正后的计算 结果/mm
2021-02-01	1.600	1.400	1.700
2021-02-02	2.000	2.100	2.400
2021-03-30	5.200	4.600	4.600
2021-03-31	1.400	1.200	1.500

注:自动监测数据:RMES值为0.511, R 值为0.894;修正后的计算结果:RMES值为0.507, R 值为0.881。

2.1.3 结论分析

通过表2与表3的对比,对于原序列而言,通过数理统计的方法,在保有原有相关性的条件下,修正后自动监测值均值为2.65 mm,与人工观测值相等,平均绝对误差为0,提高了精度,同时一定程度上减小了均方根误差RMES,使数据更集中,离散程度更小。通过2021年的验证计算结果,也可以得出这个结论,可以证明该方法对于减小非汛期的自动监测蒸发值的离散程度有一定的作用与合理性。

2.2 汛期

2.2.1 数据分析

对2种测量获得的数据进行分析可得在观测时间内的参数,如表5所示。

汛期采用同样的方式评估2组数据的相关程度,分析表如表6所示。

与非汛期不同的是,汛期极值的日期分布不一

表5 兴化站FFZ-01Z型自动蒸发器与人工观测数据比测对照

观测方式	期望值/ mm	总蒸发量/ mm	最大日蒸发量/ mm	出现日期
人工观测	4.58	563.9	8.1	8月14日
自动监测	4.18	514.3	7.4	8月6日

表6 兴化站FFZ-01Z型自动蒸发器与人工观测数据回归分析

比测次数 N	平均绝对误 差 A_m/mm	平均相对误 差 $\delta_m/\%$	均方根误差 RMES/mm	Person相关 系数 R
123	-0.40	-0.43	1.18	0.752

致,这里无法通过频率分析用数理统计的方式对自动监测数据进行校正。同时汛期的值更加离散,相关性也有明显的下滑。

2.2.2 解决方案

为减小数据的离散性,仍然先绘制散点图,如图6所示。

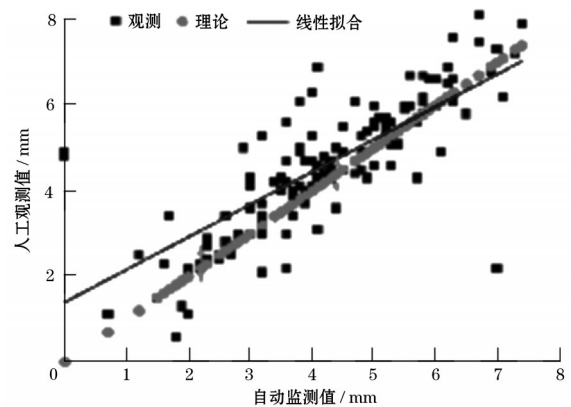


图6 人工观测数据与自动监测数据对比

根据非汛期的分析结果,合理假设汛期的蒸发值同样具有分布的规律。残差的分布可以反映原序列的分布,故绘制残差随蒸发自动监测数据的相关散点图,如图7所示。从图7可以看出,除了4个异常点位,其余的残差大体随自变量均匀分布。删去对应点的异常值,可以得到新序列,新序列的RMES为0.82 mm,相关系数 R 为0.882,新序列均方根误差显著减小,离散程度得到改善的同时相关性更好。由于新序列的残差随自变量均匀分布,前提条件成立,可以对新序列进行一元线性回归处理,减小自动序列的离散程度。对新序列回归处理后得到的一元回归方程如下:

$$Y = 0.9571X + 0.5193 \quad (7)$$

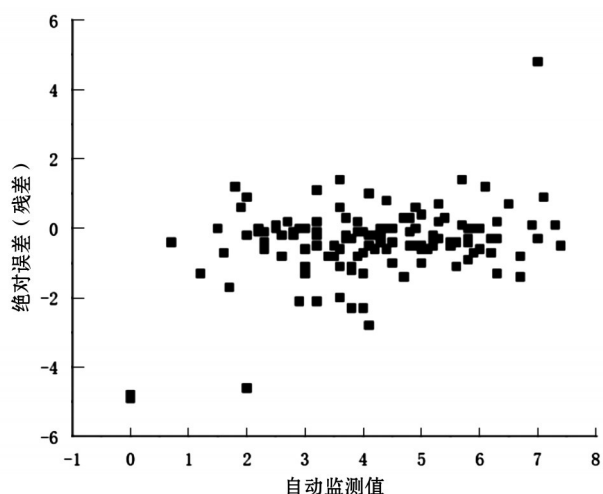


图7 残差随自变量相关图

式中: X 为自动监测数据值; Y 为人工观测数据值。

回归后的新序列得到的评估参数如表7所示。

表7 一元回归分析

比测次数 N	平均绝对误差 A_m/mm	平均相对误差 $\delta_m/\%$	均方根误差 RMES/mm	Person 相关 系数 R
119	0	-0.58	0.75	0.882

选取2021年5和6月作为连续的汛期时段验证结果,得到的计算结果如表8所示。

表8 2021年5和6月验证计算结果

日期	人工观测 数据/mm	自动监测 数据/mm	计算结果/ mm
2021-05-01	4.90	4.80	5.10
2021-05-02	6.60	6.70	6.90
2021-06-29	5.40	5.40	5.70
2021-06-30	6.00	5.20	5.50

注:自动监测数据:RMES值为0.760, R_p 值为0.927;计算结果:RMES值为0.740, R_p 值为0.927。

2.2.3 结论分析

通过对比表6与7可以得出:对于原序列而言,一元线性回归的方法,使得修正后的自动监测数据均值为4.58 mm,与人工观测数据值相等,平均绝对误差为0,对于提高精度和加强二者的相关性效果显著。对于2021年的数据而言,不改变数据相关性的同时,也起到了相同的作用。

2.3 误差成因分析

非汛期与汛期对监测数据修正后离散程度减小程度不够,原因在于原数据序列不够长,需要更具代表性、序列更长的自动监测数据。

存在异常值带来的显著误差,例如:短历时暴雨,雨强大于排水速率导致的误差,雨强过大雨水溅出导致的误差;人工误操作导致浮子式水位计铅锤触底,设备补排水失灵导致的误差;浮藻堵塞排水孔导致排水系统失灵而生产结果的误差等。

3 结 论

3.1 比测分析

通过比测分析,自动监测的原始数据相关性一般,离散程度较大。原因在于汛期的短历时暴雨对于自动蒸发器的精度有较大的影响;非汛期降雨历时短,频次少,设备的系统误差占主导因素;非汛期清洗时人工操作不当导致系统失灵等。

3.2 提高精度

根据雨情划分汛期与非汛期,对于提升两者的相关性起到显著的效果。修正后的自动监测数据期望值符合人工观测序列,离散程度较小。通过长时间的人工观测与自动监测数据比对,可以进一步提高修正的精度,更接近人工观测的真值。

3.3 改进建议

FFZ-01Z型自动蒸发器自动化程度较高,具有良好的使用前景,也有较大的改进空间。下一步可改进的内容包括对雨量计、水位计进行改造或选用更高精度设备,以提高自动蒸发站整体观测精度,累积时间序列更长的非冰期蒸发数据与人工观测值比对等。

参考文献:

- [1] 张莉,杨鑫,张德佩. FFZ-01Z型数字式水面蒸发器在丹江口水库蒸发站的应用[J]. 河南科技,2021,40(13):48-51.
- [2] 周佳华,朱佳奕,张巧丽. FFZ-01Z自动蒸发站在石梁河水库水文站的应用分析[J]. 黑龙江水利科技,2021,49(12):136-138.
- [3] 周明华,黄俊,黄新平. FFZ-01Z型数字式水面自动蒸发站的实际应用[J]. 资源节约与环保,2015(3):107,112.
- [4] 中华人民共和国水利部. 水面蒸发观测规范:SL 630—2013[S]. 北京:中国水利水电出版社,2013:2,17-20.
- [5] 王宝童,董波. FFH100型自动蒸发设备比对分析及使用[J]. 水利信息化,2023(1):55-58.
- [6] 汤华敏. FFH100型自动蒸发传感装置与人工观测蒸发比测分析[J]. 山西水利,2022(6):56-58.
- [7] 顾捷. 全自动蒸发站在蚌埠水文站的应用分析[J]. 科技论坛,2022(9):22-24.
- [8] 黄振平,陈元芳. 水文统计学[M]. 南京:河海大学出版社,2003:117-118.