

# 基于同一地区水面蒸发站点优化分析方法研究

## ——以江西省宜春市袁州区为例

刘卫根, 黄敏, 冷太铁, 刘永红, 张紫君, 杨莹, 鄢景雄, 邓小龙

赣江下游水文水资源监测中心, 江西 宜春

收稿日期: 2023年8月30日; 录用日期: 2023年9月27日; 发布日期: 2023年10月27日

### 摘要

土库水文站和四方井水文站同属江西省宜春市袁州区, 本文将土库水文站人工观测蒸发与四方井水文站自动监测蒸发进行比对观测, 进行一致性和误差分布情况分析, 并采用统计学方法 $F$ 检验、 $t$ 检验对布设于同一行政区的两观测场蒸发观测数据进行统计分析, 从误差分布和统计学方法探讨土库水文站蒸发观测项目撤销的可行性, 为赣西地区蒸发站网优化提供技术支撑。

### 关键词

水面蒸发, 人工观测, 自动监测, 比测分析

# Optimal Analysis of Water Surface Evaporation Station Network in the Same District

## —Taking Yuanzhou District, Yichun City, Jiangxi Province for Example

Weigen Liu, Min Huang, Taitie Leng, Yonghong Liu, Zijun Zhang, Ying Yang, Jingxiong Yan, Xiaolong Deng

Hydrology and Water Resources Monitoring Center of Lower Ganjiang River, Yichun Jiangxi

Received: Aug. 30<sup>th</sup>, 2023; accepted: Sep. 27<sup>th</sup>, 2023; published: Oct. 27<sup>th</sup>, 2023

### Abstract

Tuku and Sifangjing hydrologic stations are both located in Yuanzhou District, Yichun City, Jiangxi Province. In this paper, the agreement rate, absolute error distribution,  $F$ -test and  $t$ -test analysis of water surface evaporation data collected by manual observation at Tuku hydrologic station and collected by

作者简介: 刘卫根(1987.02-), 男, 江西宜春人, 研究生, 工程师, 主要从事水文监测和资料整编分析工作。Email: 443104100@qq.com

文章引用: 刘卫根, 黄敏, 冷太铁, 刘永红, 张紫君, 杨莹, 鄢景雄, 邓小龙. 基于同一地区水面蒸发站点优化分析方法研究[J]. 水资源研究, 2023, 12(5): 546-552. DOI: 10.12677/jwrr.2023.125060

automatic observation at Sifangjing hydrologic station were analyzed. The feasibility of evaporation observation project revocation of Tuku hydrologic station was discussed by error distribution analysis and statistical methods, which could offer technical support for monitoring station network optimization in West Jiangxi area.

## Keywords

Water Surface Evaporation, Manual Observation, Automatic Monitoring, Comparative Analysis

Copyright © 2023 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/>



Open Access

## 1. 引言

蒸发是水文循环的主要环节之一，是重要的水文监测要素。水面蒸发资料为防汛抗旱、水资源管理、生态文明建设等提供了重要支撑和依据。根据水利部行业标准《水面蒸发观测规范》(SL630-2013)规定，具备条件的水文监测站应建设标准蒸发雨量观测场，并采用标准水面蒸发器进行观测。

赣西地区宜春市袁州区辖区内目前布设有土库水文站和四方井水文站两个水面蒸发站点，两站直线距离约 7.8 km；鉴于两站距离较近，且均位于宜春市袁州区城郊，对同一行政区辖区内水面蒸发站网进行优化具有重要意义。本文将土库水文站人工观测蒸发与四方井水文站自动监测蒸发进行比对观测，分析蒸发观测资料的可靠性、一致性，为土库水文站蒸发观测项目撤销论证分析和赣西地区蒸发站网优化提供技术支持。

## 2. 测站概况

土库水文站位于江西省袁州区南庙镇邮桥村土库组，114°24'17.2"E，27°45'07.1"N，测站编码为 62311350。于 1979 年 1 月 1 日设立，属于小河站，是袁水一级支流南庙河下游控制站，站址以上控制流域面积 154 km<sup>2</sup>，距河口 9.7 km。因场地限制，观测场为 4 × 4 m，现场安装有 E-601B 型人工蒸发观测器和 JQH-1 型人工雨量器；在观测场附近装有 JDZ05-1 型遥测雨量计，为巡测站。

四方井水文站位于江西省袁州区湖田镇坪田村，114°19'35.2"E，27°45'27.8"N，测站编码为 62311340。设立于 2015 年 08 月，属小河站，是袁水一级支流温汤河下游控制站，站址以上控制流域面积 174 km<sup>2</sup>，河长 36.9 km，距河口 8.5 km。为推进水文要素全自动化监测，推广和使用水面蒸发自动测报技术，提高测报的准确性和实效性，四方井水文站现场建有 12 × 12 m 标准降蒸观测场，现场安装了 JDZ05-1 型遥测雨量计，引进了徐州市伟思水务科技有限公司生产的 FFZ-01 (伟思二代)数字式水面蒸发自动站。

两站同隶属赣江下游水文水资源监测中心袁州水文水资源监测大队，测验项目有水位、流量、降水量、蒸发量等。

## 3. 蒸发量观测方法及原理

### 3.1. 人工观测[1]

采用 E-601B 型人工蒸发观测器，由蒸发桶(高 68.7 cm、直径 61.8 cm、面积 3000 cm<sup>2</sup>)、水圈、土圈(含防坍塌墙)、量测装置(包括测针及其插座，插座上设有静水器)、溢流桶等组成。

水面蒸发量每日 8 时观测一次，暴雨加密观测。在正点前 10 min 到达观测场，检查仪器设备是否正常，正点测记蒸发量，然后测记降水量和溢流量。每次观测应读取 2 次，读至 0.1 mm，两次读数差不大于 0.2 mm

时,即可取其平均值。蒸发量 = 昨日水位值 - 今日水位值 + 降雨量 - 溢流量,单位为 mm。

### 3.2. 自动监测

FFZ-01 型数字式水面蒸发站系统由数字水面蒸发计、JFZ-01 型数字雨量计、蒸发传感器、自动补水装置、采集控制柜、上位机系统和供电系统组成。其中雨量计和蒸发计分辨率均为 0.1 mm,溢流量的分辨率为 0.01 mm,符合相关国家标准最高等级要求。

水面蒸发量由 E-601B 型蒸发器内水面高度的变化表示,若有降雨和溢流则根据降雨量和溢流量进行相应综合计算。蒸发传感器可以完成对蒸发皿内水面高度的检测,溢流量传感器和雨量计完成溢流量和降雨量的检测,检测数据通过系统内部 RS-485 通讯总线传送到控制盒进行计算、处理和发报,从而实现水面蒸发量的在线自动化监测。

## 4. 数据采集和分析方法

### 4.1. 数据采集

同步收集土库水文站人工观测蒸发数据与四方井水文站自动监测蒸发数据,比测时段 2022 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日,总天数为 365 d。通过计算两观测场观测值的差值,再对比测时段内两观测场观测数据的一致性 & 误差分布情况进行分析。四方井水文站自动蒸发系统出现故障时,采用人工观测及邻站对照相结合的方式对蒸发数据进行插补。

### 4.2. 分析方法

#### 4.2.1. 一致性分析

一致率是指对比时段内两观测场观测数据相一致的指标,用来进行数据的一致性分析。采用两观测场观测数据绝对误差小于 1.0 mm 的天数占总有效观测天数的百分比表示,公式如下:

$$Y = \frac{y}{P_{\text{总}}} \times 100(\%) \quad (1)$$

式中:  $Y$  为蒸发观测一致率,%;  $y$  为蒸发观测绝对误差小于 1.0 mm 的天数;  $P_{\text{总}}$  为蒸发观测总有效天数。

#### 4.2.2. 误差分布情况分析

对观测数据进行统计分析,分别分析计算全时序、有雨日、无雨日三种情况的蒸发数据的累计值、绝对误差、相对误差,并统计出最大绝对误差、累计绝对误差、最大相对误差、相对系统误差、绝对不确定度、相对不确定度。根据上述统计数据,得出全时序、有雨日、无雨日三种情况下蒸发量比测差值及误差分布表,对比误差分布情况。

#### 4.2.3. $F$ 检验[2] [3] [4]

设  $X \sim N(\alpha_{\text{人工}}, \sigma_{\text{人工}}^2)$ ,  $Y \sim N(\alpha_{\text{自动}}, \sigma_{\text{自动}}^2)$ , 其中  $X$  为人工观测蒸发量,  $Y$  为自动蒸发量,  $X$  与  $Y$  相互独立。现要检验  $\sigma_{\text{人工}}^2$  和  $\sigma_{\text{自动}}^2$  是否相等,即  $H_0: \sigma_{\text{人工}}^2 = \sigma_{\text{自动}}^2$ ;  $H_0: \sigma_{\text{人工}}^2 \neq \sigma_{\text{自动}}^2$ 。选择统计量

$$F = S_{\text{人工}}^{*2} / S_{\text{自动}}^{*2} = \left[ 1 / (n_{\text{人工}} - 1) \sum_{i=1}^{n_{\text{人工}}} (X_i - \bar{X})^2 \right] / \left[ 1 / (n_{\text{自动}} - 1) \sum_{i=1}^{n_{\text{自动}}} (Y_i - \bar{Y})^2 \right] \sim F(n_{\text{人工}} - 1, n_{\text{自动}} - 1) \quad (2)$$

若给定  $a$  值、自由度  $n_{\text{人工}} - 1$  和  $n_{\text{自动}} - 1$ ,可用统计函数 FINV 求得  $F_{a/2}$  值,  $F_{a/2} = \text{FINV}(a/2, n_{\text{人工}} - 1, n_{\text{自动}} - 1)$ ,若由样本算出的  $F$  值大于  $F_{a/2}$ ,则拒绝  $H_0$ ,否则接受  $H_0$ 。

#### 4.2.4. $t$ 检验[2] [5]

假设  $H_0: \alpha_{\text{人工}} = \alpha_{\text{自动}}$ ;  $\alpha_{\text{人工}} \neq \alpha_{\text{自动}}$ , 选择统计量

$$t = \frac{\bar{X}_{人工} - \bar{X}_{自动}}{\sqrt{\frac{(n_{人工} - 1)S_{人工}^{*2} + (n_{自动} - 1)S_{自动}^{*2}}{n_{人工} + n_{自动} - 2} \left( \frac{1}{n_{人工}} + \frac{1}{n_{自动}} \right)}} \quad (3)$$

式中,  $\bar{X}_{人工}$  和  $\bar{X}_{自动}$  分别人工观测和自动观测平均值,  $n_{人工}$  和  $n_{自动}$  分别为人工和自动蒸发观测样本个数,  $S_{人工}^{*2}$  和  $S_{自动}^{*2}$  为人工观测和自动观测均方差。如果  $|t| < t_{\alpha/2}$ , 估接受原假设, 即表示样本没有显著差异。

## 5. 结果分析

### 5.1. 一致性分析

土库水文站人工观测蒸发年蒸发量为 843.4 mm, 四方井水文站自动监测蒸发年蒸发量为 835.6 mm; 以土库水文站人工观测蒸发为真值, 两站年蒸发量绝对误差为 -7.8 mm, 相对误差为 -0.9%。分别对全年数据及日蒸发量  $\geq 1$  mm 时的数据一致率进行分析。分析结果如表 1。由表 1 可知, 两观测场日蒸发观测值的一致率达 85% 以上。

**Table 1.** The agreement rate of complete sequence water surface evaporation between the two observation fields

**表 1.** 全时序两观测场蒸发观测值一致率统计表

统计时段长(d)	一致率(%)			一致率(%) (日蒸发 $\geq 1$ mm)		
	差值绝对值 $\leq 0.2$ mm	差值绝对值 $\leq 0.5$ mm	差值绝对值 $\leq 1.0$ mm	差值绝对值 $\leq 0.2$ mm	差值绝对值 $\leq 0.5$ mm	差值绝对值 $\leq 1.0$ mm
365	32.3	64.9	88.2	28.9	60.7	87.4

### 5.2. 误差分布分析

#### 5.2.1. 全资料分析

采用全序列观测资料, 计算土库水文站和四方井水文站两观测场日蒸发量误差。由计算结果可知, 相对系统误差为 2.67%, 绝对不确定度为 1.38, 相对不确定度为 1.58。误差分布情况见表 2。

**Table 2.** The absolute error distribution of complete sequence water surface evaporation between the two observation fields

**表 2.** 全序列两观测场水面蒸发比测绝对误差分布表

绝对误差 $\delta_1$ (mm)	天数	百分比(%)	相对误差 $\delta_2$ (%)	天数	百分比(%)
$\delta_1 < -6.0$	0	0	$\delta_2 < -50$	19	5.2
$-6.0 \leq \delta_1 < -5.0$	0	0	$-50 \leq \delta_2 < -40$	16	4.4
$-5.0 \leq \delta_1 < -4.0$	0	0	$-40 \leq \delta_2 < -30$	19	5.2
$-4.0 \leq \delta_1 < -3.0$	0	0	$-30 \leq \delta_2 < -20$	22	6
$-3.0 \leq \delta_1 < -2.0$	4	1.1	$-20 \leq \delta_2 < -10$	34	9.3
$-2.0 \leq \delta_1 < -1.0$	12	3.3	$-10 \leq \delta_2 < -5$	31	8.5
$-1.0 \leq \delta_1 < 0$	141	38.6	$-5 \leq \delta_2 < 0$	16	4.4
$-0 \leq \delta_1 < 1.0$	174	47.7	$0 \leq \delta_2 < 5$	45	12.3
$1.0 \leq \delta_1 < 2.0$	30	8.2	$5 \leq \delta_2 < 10$	24	6.6
$2.0 \leq \delta_1 < 3.0$	4	1.1	$10 \leq \delta_2 < 20$	14	3.8
$3.0 \leq \delta_1 < 4.0$	0	0	$20 \leq \delta_2 < 30$	21	5.8

Continued

$4.0 \leq \delta_1 < 5.0$	0	0	$30 \leq \delta_2 < 40$	16	4.4
$5.0 \leq \delta_1 < 6.0$	0	0	$40 \leq \delta_2 < 50$	12	3.3
$\delta_1 \geq 6.0$	0	0	$\delta_2 \geq 50$	76	20.9
累计值	365		累计值	365	

5.2.2. 无雨日资料分析

从所列的数据中，筛选出无雨日观测数据进行比测分析( $P < 0.5 \text{ mm}$ )。计算无雨日两观测场观测值的差值，再对比测时段内两观测场观测数据的误差分布情况进行分析。由计算结果可知，相对系统误差为 0.91%，绝对不确定度为 1.43，相对不确定度为 0.59。误差分布情况见表 3。

Table 3. The absolute error distribution of non-rainy day water surface evaporation between the two observation fields

表 3. 无雨日两观测场水面蒸发比测绝对误差分布表

绝对误差 $\delta_1$ (mm)	天数	百分比(%)	相对误差 $\delta_2$ (%)	天数	百分比(%)
$\delta_1 < -6.0$	0	0	$\delta_2 < -50$	7	3.1
$-6.0 \leq \delta_1 < -5.0$	0	0	$-50 \leq \delta_2 < -40$	6	2.7
$-5.0 \leq \delta_1 < -4.0$	0	0	$-40 \leq \delta_2 < -30$	13	5.8
$-4.0 \leq \delta_1 < -3.0$	0	0	$-30 \leq \delta_2 < -20$	10	4.4
$-3.0 \leq \delta_1 < -2.0$	4	1.8	$-20 \leq \delta_2 < -10$	18	8
$-2.0 \leq \delta_1 < -1.0$	9	4	$-10 \leq \delta_2 < -5$	29	12.9
$-1.0 \leq \delta_1 < 0$	84	37.3	$-5 \leq \delta_2 < 0$	14	6.2
$-0 \leq \delta_1 < 1.0$	112	49.8	$0 \leq \delta_2 < 5$	33	14.7
$1.0 \leq \delta_1 < 2.0$	13	5.8	$5 \leq \delta_2 < 10$	22	9.8
$2.0 \leq \delta_1 < 3.0$	3	1.3	$10 \leq \delta_2 < 20$	12	5.3
$3.0 \leq \delta_1 < 4.0$	0	0	$20 \leq \delta_2 < 30$	16	7.1
$4.0 \leq \delta_1 < 5.0$	0	0	$30 \leq \delta_2 < 40$	14	6.2
$5.0 \leq \delta_1 < 6.0$	0	0	$40 \leq \delta_2 < 50$	9	4
$\delta_1 \geq 6.0$	0	0	$\delta_2 \geq 50$	22	9.9
累计值	225		累计值	225	

5.2.3. 有雨日资料分析

采用有雨日观测资料( $P \geq 0.5 \text{ mm}$ )，进行两观测场蒸发量观测误差统计分析，计算有雨日量观测场观测值的差值，并对误差分布情况进行统计分析。由计算结果可知，相对系统误差为 10.12%，绝对不确定度为 1.32，相对不确定度为 2.45。误差分布情况见表 4。

Table 4. The absolute error distribution of rainy-day water surface evaporation between the two observation fields

表 4. 有雨日两观测场水面蒸发比测绝对误差分布表

绝对误差 $\delta_1$ (mm)	天数	百分比(%)	相对误差 $\delta_2$ (%)	天数	百分比(%)
$\delta_1 < -6.0$	0	0	$\delta_2 < -50$	12	8.6
$-6.0 \leq \delta_1 < -5.0$	0	0	$-50 \leq \delta_2 < -40$	10	7.1

Continued

$-5.0 \leq \delta_1 < -4.0$	0	0	$-40 \leq \delta_2 < -30$	6	4.3
$-4.0 \leq \delta_1 < -3.0$	0	0	$-30 \leq \delta_2 < -20$	12	8.6
$-3.0 \leq \delta_1 < -2.0$	0	0	$-20 \leq \delta_2 < -10$	16	11.4
$-2.0 \leq \delta_1 < -1.0$	3	2.1	$-10 \leq \delta_2 < -5$	2	1.4
$-1.0 \leq \delta_1 < 0$	57	40.7	$-5 \leq \delta_2 < 0$	2	1.4
$-0 \leq \delta_1 < 1.0$	62	44.3	$0 \leq \delta_2 < 5$	12	8.6
$1.0 \leq \delta_1 < 2.0$	17	12.1	$5 \leq \delta_2 < 10$	2	1.4
$2.0 \leq \delta_1 < 3.0$	1	0.7	$10 \leq \delta_2 < 20$	2	1.4
$3.0 \leq \delta_1 < 4.0$	0	0	$20 \leq \delta_2 < 30$	5	3.6
$4.0 \leq \delta_1 < 5.0$	0	0	$30 \leq \delta_2 < 40$	2	1.4
$5.0 \leq \delta_1 < 6.0$	0	0	$40 \leq \delta_2 < 50$	3	2.1
$\delta_1 \geq 6.0$	0	0	$\delta_2 \geq 50$	54	38.7
累计值	140		累计值	140	

### 5.3. F 检验

将采集到的 365 组土库水文站人工观测蒸发和四方井水文站自动监测蒸发数据代入公式求得  $S_{人工}^{*2} = 2.816$ ,  $S_{自动}^{*2} = 2.822$ ,  $F = S_{人工}^{*2} / S_{自动}^{*2} = 0.998$ 。由显著性水平  $\alpha = 0.05$ , 用统计函数 FINV 求得  $F_{\alpha/2} = FINV(0.05/2, 364, 364) = 1.19$ 。由于  $F < F_{\alpha/2}$ , 故接受原假设, 即  $H_0: \sigma_{人工}^2 = \sigma_{自动}^2$ , 土库水文站人工蒸发和四方井水文站自动蒸发数据方差无显著性差异。

### 5.4. t 检验

因  $\sigma_{人工}^2 = \sigma_{自动}^2$  成立, 土库水文站人工观测蒸发和四方井水文站自动监测蒸发方差无显著性差异, 故可用  $t$  检验进一步判断两站蒸发数据是否发生显著变化。 $n_{人工} = 365$ ,  $n_{自动} = 365$ ,  $x = \bar{x}_{人工} - \bar{x}_{自动} = 2.3 - 2.4 = -0.1$ , 将有关数据代入后, 得到  $t = 0.5$ , 由显著性水平  $\alpha = 0.05$ ,  $n_{人工} + n_{自动} - 2 = 728$ , 查  $t$  分布表得临界值  $t_{\alpha/2} = n_{人工} + n_{自动} - 2 = 1.96$ 。亦可由统计函数 TINV 求得  $t_{\alpha/2} = TINV(0.05, 728) = 1.96$ 。由于  $|t| < t_{\alpha/2}(728)$ , 故接受原假设, 土库水文站人工观测蒸发和四方井水文站自动监测蒸发数据没有发生显著变化。

## 6. 结论与建议

- 1) 经过 365 d 蒸发数据的同步比测分析, 全时序、无雨日和有雨日两观测场蒸发数据一致率均在 85% 以上, 且相对系统误差、绝对不确定度、相对不确定度较小, 两者关系较好。
- 2)  $F$  检验和  $t$  检验结果表明, 土库水文站人工观测蒸发和四方井水文站自动监测蒸发数据方差无显著性差异, 同一行政区两观测场蒸发观测结果没有发生显著变化。
- 3) 土库水文站人工观测年蒸发量(843.4 mm)和四方井水文站自动监测年蒸发量(835.6 mm)误差较小; 两站观测场附近的下垫面条件和气象特点相近, 均能代表该区域的一般情况, 反映该区域的气象特点, 辖区内保留一个蒸发站点即可满足《水文站网规划技术导则》(SL34-2013)规定的“2000~5000 km<sup>2</sup> 设一站”要求。土库水文站为巡测站, 现有雨量蒸发观测场地不符合相关规范要求, 建议撤销, 保留四方井水文站自动蒸发站。
- 4) 目前实现的是同一气象区内相邻两站间人工观测与自动监测比测, 严格意义说, 应在四方井水文站开展

人工与自动观测同步比测, 因此在加强四方井水文站自动蒸发系统的数据监控和设备维护的前提下, 建议采取必要的人工观测抽样方式, 采集数据比对。

## 参考文献

- [1] 《水面蒸发观测规范》(SL630-2013) [S]. 中华人民共和国水利部, 2014.  
Water surface evaporation observation specification (SL630-2013). Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2014. (in Chinese)
- [2] 刘卫根, 易珍, 黄敏, 等. 降蒸一体化自动监测系统在萍乡水文站的应用分析[J]. 江西水利科技, 2021, 47(1): 64-69.  
LIU Weigen, YI Zhen, HUANG Min, et al. Application of integrative and automatic monitoring system of rainfall and evaporation at Pingxiang Hydrologic Station. Jiangxi Water Science and Technology, 2021, 47(1): 64-69. (in Chinese)
- [3] 周建康, 李帆, 陈松生. 实用水文统计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017: 112-116.  
ZHOU Jiankang, LI Fan and CHEN Songsheng. Practical hydrological statistics. Beijing: China Water Power Press, 2017: 112-116. (in Chinese)
- [4] 胡尊乐, 黄炜, 唐大伟, 等. 沙河水库水文站两种浮子式自动蒸发仪运行分析[J]. 江苏水利, 2019(8): 7-13.  
HU Zunle, HUANG Wei, TANG Dawei, et al. The operation analysis of two float type automatic evaporation equipment at hydrologic station of Shahe Reservoir. Jiangsu Water Resources, 2019(8): 7-13. (in Chinese)
- [5] 罗国平, 王永东, 林祚顶. 水文资料整编[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017: 33-34.  
LUO Guoping, WANG Yongdong and LIN Zuoding. Hydrologic data compilation. Beijing: China Water Power Press, 2017: 33-34. (in Chinese)