

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

## 白洋淀湖泊原位蒸发试验研究

王晓燕, 尹德超, 王雨山, 吴 斌, 安永会, 徐蓉桢, 王 茜, 刘 蕴 Research on in-situ test of lake evaporation in the Baiyangdian Lake WANG Xiaoyan, YIN Dechao, WANG Yushan, WU Bin, AN Yonghui, XU Rongzhen, WANG Xi, and LIU Yun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211030

#### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

## 鄂尔多斯高原湖泊蒸发原位试验研究

Research on in-situ test of lake evaporation in the Ordos Plateau 许文豪, 王晓勇, 张俊, 尹立河, 贾伍慧, 朱立峰, 董佳秋, 孙芳强 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 16-23

## 白洋淀湖岸带地表水与地下水垂向交换研究

A study of vertical exchange between surface water and groundwater around the banks of Baiyangdian Lake 李刚,马佰衡,周仰效,赵凯,尤冰,李木子,董会军,李海涛 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 48-54

## 自反力双剪面大型剪切仪研发及应用研究

Application and research on large in-situ self-reacting direct shear apparatus owning two shear interfaces 龚辉, 郭娜娜, 葛邦云 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 168-175

## 基于蒸渗仪和解析法估算毛乌素沙地潜水蒸发量

Estimation of groundwater evaporation based on lysimeter experiment and analytical solution in the Mu Us sandy land 王文科, 尹红美, 黄金廷, 李俊亭 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 1-6

## 巴丹吉林沙漠潜水蒸发的数值模拟研究

Numerical simulation of groundwater evaporation in the Badain Jaran Desert of China 周燕怡, 王旭升 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 44-54

## 格尔木河流域水面蒸发特征及影响因素分析

Characteristics of evaporation and its effect factors in the Golmud River catchment 黄金廷, 李宗泽, 王文科, 宋歌, 王嘉玮 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 31-37



关注微信公众号,获得更多资讯信息

#### DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211030

王晓燕, 尹德超, 王雨山, 等. 白洋淀湖泊原位蒸发试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 204-212. WANG Xiaoyan, YIN Dechao, WANG Yushan, *et al.* Research on in-situ test of lake evaporation in the Baiyangdian Lake[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 204-212.

# 白洋淀湖泊原位蒸发试验研究

王晓燕,尹德超,王雨山,吴 斌,安永会,徐蓉桢,王 茜,刘 蕴 (中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,河北保定 071051)

摘要:在生态环境脆弱和水资源短缺的雄安新区白洋淀,湖泊水面蒸发是其地表水主要排泄方式之一,研究湖泊蒸发对认 识湖泊水循环、生态需水量评价及湖泊生态功能恢复等方面有重要现实意义和科学价值。然而白洋淀湖泊内蒸发实测资 料有限,一般采用邻近陆地观测站数据折算或经验模型法估算其蒸发量,计算误差较大,不能准确描述白洋淀湖泊蒸发 量。研究在白洋淀湖泊开展原位试验,在湖泊中心位置建立 E601 蒸发站和 20 m² 蒸发池观测蒸发量,并建立自动气象站同 时监测气象数据,利用 E601 蒸发站和气象站数据使用相关分析和多元线性回归模型方法分析了蒸发与各气象因素之间的 相关性,并将 E601 蒸发站观测数据与 20 m² 蒸发池观测数据及数值模拟结果进行了对比分析。结果表明,夏季白洋淀湖泊 水面蒸发量日变化较剧烈,变化范围在 0.4~6.6 mm/d,6 月蒸发量最大,7—8 月随降水增多蒸发量有所下降。夏季湖泊水 面蒸发受太阳辐射和湿度 2 种因素影响较大。以 20 m² 蒸发池蒸发量作为湖泊水面蒸发量,观测期内 E601 蒸发站观测蒸 发量高于湖泊水面实际蒸发量,通过当地蒸发折算系数折算后可更准确估算湖泊蒸发量。试验获得白洋淀湖泊内 20 m² 蒸 发池与 E601 蒸发站蒸发折算系数约为 0.98,较前人研究略偏大。研究结果可为白洋淀地区水面蒸发量计算提供基础依据。 关键词:湖泊蒸发;原位试验;E601 蒸发站; 20 m² 蒸发池;白洋淀

中图分类号: P426.2\*2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2023)06-0204-09

## Research on in-situ test of lake evaporation in the Baiyangdian Lake

WANG Xiaoyan, YIN Dechao, WANG Yushan, WU Bin, AN Yonghui, XU Rongzhen, WANG Xi, LIU Yun

(Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding, Hebei 071051, China)

**Abstract:** The Baiyangdian Lake is located in Xiongan New Area, which has a fragile ecological environment and a shortage of water resources. Lake evaporation is one of the main discharge of the Baiyangdian Lake, and research on lake evaporation is of important practical significance and scientific value for understanding lake water circulation and evaluating ecological water demand and for recovery of lake ecological function. However, the actual observed data on evaporation in the Baiyangdian Lake is limited, so it is usually estimated by converting the data of nearby land observation stations or empirical models, which cannot accurately estimate the lake evaporation because of large calculation error. In this work, in-situ experiments were carried out in the Baiyangdian Lake. This study established an E601 evaporation station and a 20 m<sup>2</sup> evaporation pool to observe the lake evaporation at the center of the Baiyangdian Lake, and an automatic weather station was established

收稿日期: 2022-11-09; 修订日期: 2023-01-17 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2021 YFC3200500);中国地质调查局地质调查项目(DD20190300; DD20230077)

第一作者: 王晓燕(1986-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事水文地质调查、水文地质参数方面的研究。E-mail: wxyhappygirl@163.com

simultaneously to get meteorological data. The correlation between evaporation by E601 evaporation station and meteorological factors is analyzed by methods of correlation analysis and multiple linear regression model. The evaporation of the E601 evaporation station is compared with the data of the 20 m<sup>2</sup> evaporation pool and the simulated evaporation. The results indicate that in the Baiyangdian Lake in summer, the diurnal variation of lake evaporation is intense, ranging from 0.4 mm/d to 6.6 mm/d, and the maximum evaporation occurs in June, but decreases with the increasing rainfall from July to August. Evaporation of lake water is more affected by radiation and humidity. The evaporation of 20 m<sup>2</sup> evaporation pool is taken as the evaporation of lake water. The observed evaporation of E601 evaporation station is higher than the actual evaporation of Baiyangdian Lake, which can be used to estimate lake evaporation more accurately by local evaporation conversion coefficient. In this experiment, the evaporation conversion coefficient between the 20 m<sup>2</sup> evaporation pool and the E601 evaporation station is higher than the 20 m<sup>2</sup> evaporation pool and the E601 evaporation station is higher than the 20 m<sup>2</sup> evaporation conversion coefficient. In this experiment,

the calculation of water surface evaporation in the Baiyangdian area. **Keywords:** lake evaporation; in-situ test; E601 evaporation station; 20 m<sup>2</sup> evaporation pool; Baiyangdian Lake

about 0.98, which is slightly greater than the previous studies. The results of this study provides a basic basis for

水面蒸发是自然界中水循环和水均衡的重要组 成,在湖泊水均衡计算和生态需水量评价中占有重要 地位<sup>[1-4]</sup>。近年来湖泊生态环境保护与修复日益受到 重视,在生态环境脆弱和水资源短缺情况下的湖泊水 资源管理和生态需水量评价尤为重要,湖泊蒸发研究 对认识湖泊水循环、生态需水量评价及生态功能恢复 等方面具有重要意义。

水面蒸发受环境综合因素影响,这里的环境包括 空气温度、湿度、风速、水气压等要素[2.5]。大水面蒸 发量直接观测难度较大,目前有学者在小型水体上采 用水面漂浮蒸发皿来测定蒸发量<sup>10</sup>。当实测资料匮乏 时,另有学者采用多种水面蒸发模型来估算蒸发量[7-8]。 前人研究表明,在湖泊内开展原位试验测得的水面蒸 发量与水面实际蒸发量更为接近[9-11]。1972年9月世 界气象组织蒸发工作组在日内瓦会议上做出决定,认 为采用 20 m<sup>2</sup> 蒸发池研究浅水湖泊蒸发可以得出满意 结果,此后世界各地在大气候区和湖泊带开始安装 20 m<sup>2</sup> 蒸发池来研究湖泊蒸发<sup>[5,9]</sup>。在实测资料有限的条件 下,通常采用折算系数法计算水面蒸发量,如把改装 的 E601K 型蒸发皿放置于湖泊周边没有较多植被覆 盖的区域,观测数据与区域上 20 m<sup>2</sup> 蒸发池和 E601K 观测站观测数据对比,并通过换算(口径和环境换算) 采用逐步逼近法得到湖面蒸发量<sup>[5]</sup>。折算系数通常受 到多种因素影响,并且伴随季节轮回发生变化,施成 熙等阿通过试验得出中国各地区不同蒸发器不同月的 折算系数,结果表明,折算系数年内变化较大,如华北 地区 20 m<sup>2</sup> 蒸发池夏季折算系数明显高于春秋季。

白洋淀作为华北平原最大的淡水湖泊,具有缓洪

滞沥、调节气候、维持生物多样性等重要作用,对维 持区域生态平衡和雄安新区生态安全意义重大[12]。白 洋淀湖泊总面积 366 km<sup>2</sup>,由大小不同、形状各异的 143个淀泊组成,淀内沟壕纵横,芦苇、荷塘、渔村星 罗棋布[13]。20世纪60年代开始,上游大量水利工程 实施,导致白洋淀入淀水量明显减少,生态功能退化[14]。 1983—1988年间曾出现连续5a干淀期,通过引黄入 冀补淀、引岳济淀及一系列生态补水工程的实施,生 态功能退化减缓,生态环境得到一定恢复。2017年雄 安新区成立,白洋淀是建设蓝绿交织空间的重要组 成,如何恢复白洋淀生态功能,生态需水量评价是一 项重要的任务,而湖泊蒸发量作为主要排泄项是生态 需水量评价的关键因素之一。目前白洋淀湖泊内尚 无完善的气象蒸发监测体系,蒸发实测资料有限,大 多通过邻近陆地蒸发站数据进行折算或经验模型法 估算,计算误差较大,不能准确描述湖泊蒸发量。

本次在白洋淀湖泊内建立 E601 蒸发站、20 m<sup>2</sup>蒸 发池、气象观测站,通过蒸发原位试验实测湖泊水面 蒸发量,并对蒸发量与气象要素的相关性进行分析, 获取湖泊蒸发的主要影响因子,为华北平原湖泊水面 蒸发研究提供参考依据。通过对淀泊内 E601 蒸发站 与 20 m<sup>2</sup>蒸发池数据进行对比,获取 E601 蒸发站与蒸 发池的蒸发折算系数,可为开展白洋淀湖泊水均衡分 析和计算生态需水提供基础数据。

#### 1 研究区概况

白洋淀湖泊位于保定市中东部地区,大部分位于 雄安新区安新县境内,是海河流域大清河水系下游的

天然汇水洼地<sup>[12]</sup>。白洋淀由8条大清河支流汇集而 成,包括潴龙河、孝义河、唐河、府河、瀑河、漕河、萍 河及白沟引河,入淀河流成扇形分布,分别自南、西、 北3面汇至淀区。目前大部分河流已干涸,仅有府河 和孝义河接纳城市中水后注入白洋淀。雄安新区成 立后,通过南水北调、引黄济淀和山区水库放水定期 补给白洋淀,人工调水成为白洋淀的主要水源。白洋 淀形成于河流的差异堆积作用,湖盆由一系列扇间洼 地和河间洼地构成,主要淀泊有藻苲淀、烧车淀、小 白洋淀、捞王淀、池鱼淀和泛鱼淀等。在淀内7m 水位条件下,水深一般为1~3m,部分村庄附近可达 10 m。白洋淀地区属于典型的暖温带大陆性半湿润 半干旱季风型气候,年平均气温 12.7 ℃,气温年内变 化明显,1月最低,7月最高;年平均降水量481 mm(白洋 淀 1980-2018 年); 年内 80% 的降水量集中在 7-9 月; 年平均水面蒸发量 925 mm(白洋淀 1980—2018 年)。

## 2 材料与方法

#### 2.1 试验方法

## 2.1.1 试验方案

为测得白洋淀湖泊蒸发量,本次研究在白洋淀湖 泊内中心位置(安新县圈头乡)建立 E601蒸发站,并 在其邻近 5 m 位置同时布设能代表浅水湖泊水面蒸发 量的 20 m<sup>2</sup>蒸发池,获取白洋淀水面蒸发量,对不同水 面蒸发量进行对比研究。为掌握白洋淀气象动态,在 E601蒸发站旁布设气象站观测气象数据。原位试验 观测受观测站初期设备维护等因素影响,部分时间段 数据不全,本次研究选择 2021年 6月1日至 2021年 9月 10日观测数据进行分析。

## 2.1.2 数据获取

气象站和 E601 蒸发站由数据采集系统和通讯 系统组成。数据采集系统主要包括空气温度、空气 湿度、风速、风向、雨量和总辐射的各个传感器以及 E601b 蒸发套件(包括蒸发器、静水桶、补水桶、编码 器、补水泵、溢流阀等)。气象站、E601 蒸发站对各 气象要素和蒸发量的监测频率均为1次/h。通讯系统 将数据通过 GPRS 无线传输至平台,气象和蒸发数据 可在电脑端及手机端实时查看。

E601 蒸发站可监测当前水位、降水量和溢流量。 蒸发量为时段初与时段末的水位差与该时段降水量 之和。

20 m<sup>2</sup> 蒸发池观测系统主要由 FFZ-01 型数字水面 蒸发计(分辨率 0.1 mm)、JFZ-01 型数字雨量计(分辨



图 1 白洋淀湖泊原位蒸发试验位置图 Fig. 1 Location of the in-situ test of evaporation in the Baiyangdian Lake



(a) E601蒸发站和气象站
 (b) 20 m<sup>2</sup>蒸发池
 图 2 白洋淀湖泊原位蒸发试验场图
 Fig. 2 In-situ test site of the Baiyangdian Lake

率 0.1 mm)、WFX-01 溢流传感器、数控补水箱、采集 控制箱、20 m<sup>2</sup> 蒸发池等构成。数据监测频率为 1 次/h, 日蒸发量采用当天 8:00 时刻水位与次日 8:00 时刻水 位差值加上当天降水量计算。

	E601 evaporation station
Fable 1	Main parameter index of the weather station and
表 1	气象站和 E601 蒸发站传感器主要参数指标

	-			
技术参数	测量范围	分辨率	准确度	
空气温度/℃	-50 ~ 100	0.1	±0.5	
空气湿度/%RH	$0 \sim 100$	0.1	±5	
降水量/(mm·min <sup>-1</sup> )	$0 \sim 4$	0.2	±4%	
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	$0 \sim 70$	0.1	$\pm (0.3+0.03V)$	
风向	0 ~ 360	1	±3	
总辐射/(W·m <sup>-2</sup> )	0 ~ 2000	1	≤5%	
蒸发量/mm	$0\sim 1\ 000$	0.1	±0.5%	

注:表中"V"为风速。

## 2.2 多元线性回归分析

水面蒸发与多个气象要素密切相关,本次研究通

过建立蒸发量与各气象要素的多元线性回归模型来 识别分析水面蒸发的主要影响因子。多元线性回归 分析采用 SPSS 软件计算,由统计方法可知,为消除原 始变量单位不同及(或)量纲不同影响,首先对因变量 和自变量系列分别进行归一化处理:

$$x_n = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{1}$$

式中: x<sub>n</sub>——归一化后变量值;

x——原始变量值;

x<sub>min</sub>——原始变量样本最小值;

*x*<sub>max</sub>——原始变量样本最大值。

归一化后的因变量数据和自变量系列数据导入 分析软件中,建立多元线性回归模型。模型采用逐步 回归法进行变量筛选,该方法可以将不具有统计学意 义的自变量剔除,实现从相关性很强的多个自变量中 选择最显著的因子引入模型,从而避免多重共享线性 问题<sup>[10-11]</sup>。回归模型的假设检验采用*F*检验,将概率 值小于等于 0.05 的自变量引入,概率值大于等于 0.1 的自变量剔除。

2.3 纳什效率系数

纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient) 是一种在水文学中广泛应用的误差函数,通常用于验 证水文模型结果。本文采用纳什效率系数评价方法 进一步验证回归模型的可靠性:

$$N = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T} (Q_{o}^{t} - Q_{m}^{t})^{2}}{\sum_{t=1}^{T} (Q_{o}^{t} - \overline{Q_{o}})^{2}}$$
(2)

式中:N——纳什效率系数;

 $Q_{o}$ ——t 时刻观测值;

 $Q_{m}^{t}$ ——t时刻模拟值;

*ō*。——观测值的平均值。

N 越接近 1 表示模型拟合效果越好,可信度较高<sup>[11]</sup>。2.4 数值模拟

数值模拟技术在水资源评价、地表水与地下水转 化机制研究等方面广泛应用,常用模拟软件有 GMS, MIKE SHE, HydroGeoSphere, GSFLOW 等<sup>[15-17]</sup>。

本次采用 GSFLOW 模拟软件在白洋淀及周边地 区范围建立地表水一地下水耦合数值模型,对白洋淀 水均衡量进行模拟,由模型提取观测期内淀区日蒸发 量数据与实测数据进行对比,进一步分析观测期内湖 泊蒸发变化规律。

#### 3 结果

由 E601 蒸发站、气象站实测数据获得观测期 内日蒸发量与气象因素的变化特征。观测期内总蒸 发量为 320 mm,日均蒸发量为 3.14 mm,变差系数(*C*<sub>v</sub>) 为 0.39,蒸发量日波动较为剧烈,日蒸发量最大值为 6.6 mm,最小值为 0.4 mm,日蒸发量与降水量随时间 变化关系见图 3(a)。观测期内 6 月蒸发量最大,7月至 8 月中旬蒸发量有所下降,这一时段降雨次数较多, 尤其 7 月中旬雨量较大,蒸发明显减弱,8 月下旬蒸 发量有所回升,9 月开始蒸发量呈较为明显的下降趋 势(图 4)。观测期共计 102 d,其中有降水天数为 63 d,占总天数 62%,总降水量 371.8 mm。数据显示通 常在降水较多时段蒸发作用比较微弱,日均降水量最 大值出现在 7 月下旬,该时段湖水蒸发明显较少,日 均蒸发量也较低。

观测期内日平均辐射在 30 W/m<sup>2</sup>范围内波动,其 波动趋势大体与日蒸发量呈正相关,如图 3(b)所示。 日平均湿度 6 月中上旬整体较低,从 6 月下旬开始湿 度逐渐上升,直到 7 月下旬稳定在高值区,8 月开始呈 波动下降趋势。由日平均湿度对应日蒸发量随时间 变化关系曲线可知,两者大体呈现相反趋势。

观测期内日平均气温在整体上从6月上旬开始 至7月下旬不断上升,8月上旬开始逐渐呈现波动下 降趋势,这与日蒸发量变化规律较为相似,如图3(c) 所示。6—7月,日平均风速波动范围为0.36~2.09 m/s, 8月份开始呈减小趋势,其波动范围为0.18~1.39 m/s, 波动趋势与日蒸发量的变化规律也较为相似。

## 4 讨论

4.1 日蒸发量影响因素

4.1.1 日蒸发量与气象因素相关分析

分析日蒸发量与各气象因素变化特征可知,日蒸 发量与多个气象因素波动存在不同程度相关性。本 次研究对日蒸发量与多个气象要素的日平均值开展 相关分析,由散点图拟合线性方程的决定系数大小识 别相关性。由拟合结果(图 5)可知,日蒸发量与辐射 量的决定系数为 *R*<sup>2</sup>=0.60, 判定为相关性最好;日蒸发 量与湿度的决定系数为 *R*<sup>2</sup>=0.52,相关性次之;日蒸发 量 与气温、风速的决定系数分别为 *R*<sup>2</sup>=0.12和 *R*<sup>2</sup>=0.01,相关性分别为一般、较差。

由此可见,观测期内白洋淀湖泊水面日蒸发量受 辐射量影响最大,日辐射量越大则蒸发越强烈;受湿



图 3 日蒸发量与降水量(a)、辐射量与湿度(b)、风速与气温(c)随时间变化图 Fig. 3 Temporal variations in (a) daily evaporation and precipitation, (b) radiation and humidity, and (c) air temperature and wind speed





度影响次之,湿度较高一般对应较少的蒸发;在观测 期内受气温影响程度一般;日蒸发量与风速相关性较差。

## 4.1.2 多元线性回归模型

由日蒸发量与各气象要素相关分析可知,蒸发量 与辐射量、湿度等存在较显著相关性。因此采用归一 化处理后无量纲变量:日蒸发量和辐射量、湿度、气 温、风速日平均数据,采用逐步回归的方法建立多元 线性回归模型,在逐步回归分析过程中剔除了气温。 模型结果为:

 $E_0 = 0.527R - 0.345\rho + 0.298S_w + 0.228 \tag{3}$ 

式中: E<sub>0</sub>——日蒸发量;

由多元线性回归方程的决定系数(R<sup>2</sup>=0.74)可知,





模型拟合度较好。模拟结果同时采用纳什效率系数 评价方法进行验证,利用模型得到的日蒸发量模拟 值与实测值计算多元线性回归模型纳什效率系数为 0.74,说明模拟结果较好。多元线性回归模型结果中 包含辐射量、湿度、风速3个气象要素,结果显示辐 射量和湿度是模型中最为显著的2个因素,风速显著 性一般,说明对湖泊蒸发影响最大的气象因素为辐射 量和湿度,这也验证了相关分析方法的结论。

4.1.3 蒸发量与气象因素相关性

大量研究显示,湖泊水面蒸发受气温<sup>[18]</sup>、湿度<sup>[11]</sup>、水汽压差、辐射<sup>[19]</sup>、风速等多个气象因素影响<sup>[5,7,20]</sup>。 通过相关分析和多元线性回归模型分析,结果表明白洋 淀湖泊水面蒸发量与辐射量、湿度、气温以及风速之 间存在不同程度的相关性,这与前人的研究结论相符<sup>[11]</sup>。

在前人研究多个气象因素对湖泊水面蒸发影响 的显著性时,辐射量和湿度通常显著性较好<sup>[11,18]</sup>,如赵 长龙等<sup>[18]</sup>通过相关分析得出水面蒸发与日照时间以 及总辐射之间的相关关系显著。许文豪等<sup>[11]</sup>采用相 关分析法得出鄂尔多斯高原湖泊蒸发受湿度影响最 大。也有学者认为气温是水面蒸发的主要影响因 素<sup>[2,18]</sup>。本次研究表明,在夏季白洋淀湖泊日蒸发量 受辐射量和湿度影响显著,气温和风速相关性为一 般、较差,其中气温不显著,分析可能原因是试验观测 期在夏季,淀区气温一直在20~30°C波动,在夏季该 区气温相对较低且变化幅度小,未对蒸发量产生显著 影响,在其他季节的相关性有待进一步监测分析。日 尺度上蒸发量与风速相关性弱,有前人研究可能是由 于风速被日平均后对水面蒸发的影响淡化所致<sup>[11]</sup>。

## 4.2 不同方法蒸发量对比分析

### 4.2.1 与 20 m<sup>2</sup> 蒸发池蒸发量对比

将白洋淀湖泊原位试验场 E601 蒸发站和 20 m<sup>2</sup> 蒸发池蒸发量进行对比。观测期内 E601 蒸发站每日 观测数据均有效,蒸发池观测仪器因某些不确定因素 会出现个别日期无数据,观测期内有效数据为 82 d。 E601 蒸发站和 20 m<sup>2</sup>蒸发池日蒸发量动态变化规律见 图 6。由图可知 两者日蒸发量数据变化趋势一致,观 测期内出现少量差值较大点。观测期内 20 m<sup>2</sup>蒸发池 有效观测蒸发总量为 260.2 mm,对应时段 E601 蒸发 站观测蒸发总量为 266.7 mm,蒸发折算系数为 0.98(表 2)。由数据分析可知 E601 蒸发站蒸发量与湖 泊水面蒸发量接近,在没有大水面蒸发池测量湖泊蒸 发的条件下,采用 E601 蒸发站数据较为可靠,折算系 数为更加精确计算白洋淀湖泊蒸发量提供了试验参 考依据。



图 6 E601 蒸发站与 20 m<sup>2</sup> 蒸发池蒸发量动态曲线 Fig. 6 Dynamic variation of evaporation between in the E601 evaporation station and 20 m<sup>2</sup> evaporation pool

表 2 E601 蒸发站、20 m<sup>2</sup> 蒸发池蒸发结果统计 Table 2 Evaporation of the E601 evaporation station and 20 m<sup>2</sup> evaporation pool

82 d 观测数据	总蒸发量/mm	日平均蒸发量/(mm·d <sup>-1</sup> )	折算系数	
E601蒸发站	266.7	3.25	0.00	
20 m <sup>2</sup> 蒸发池	260.2	3.17	0.98	

研究表明,同一地点 E601 蒸发站蒸发量比 20 m<sup>2</sup>蒸发池水面蒸发量略大,这符合普遍认为的 20 m<sup>2</sup> 蒸发池水面蒸发量更能代表水面实际蒸发量的规律, 如张有芷等<sup>[21]</sup>认为 20 m<sup>2</sup>大型蒸发池蒸发量可以代表 大水体的蒸发量,湖泊附近 20 m<sup>2</sup>蒸发池观测资料可 用于直接计算湖泊蒸发量。20 m<sup>2</sup>蒸发池蒸发量与 E601 蒸发站蒸发量折算系数在各地区不同季节取值 不一。

研究表明,夏季白洋淀湖泊 E601 蒸发站蒸发量与 湖泊水面蒸发折算系数约为 0.98。根据前人研究华北 地区 E601 蒸发站年折算系数为 0.93<sup>[9]</sup>,因折算系数在 不同地区不同季节不同的特点,夏季折算系数月折算 系数偏大<sup>[9,22]</sup>,华北官厅试验数据显示 6—9月月均折 算系数为 0.96<sup>[9]</sup>。河北平原水资源实验站(衡水实验 站)25 a (1986—2010 年)的水面蒸发观测数据显示, 6—9月 20 m<sup>2</sup>蒸发池与 E601 蒸发站月均蒸发折算系 数为 0.95<sup>[23]</sup>。根据世界气象组织仪器和观测方法委员 会提出以 20 m<sup>2</sup>蒸发池作为水面蒸发量的临时国际标 准,可参考用来计算白洋淀湖泊蒸发量。有学者提出 用 20 m<sup>2</sup>水面蒸发池代表湖泊水面蒸发量受蒸发池与 湖泊距离影响<sup>[24]</sup>,本次研究在湖泊内建立原位试验, 避开了这一影响因素,获取的蒸发观测数据更接近实 际值。本次结果与前人研究一致,结果异同受试验方 法影响,本次在白洋淀湖泊内开展原位试验,所得到 的蒸发折算系数对计算白洋淀湖泊水面蒸发量提供 了可靠的参考依据。

4.2.2 与数值模型计算蒸发量对比

采用 GSFLOW 建立白洋淀淀区及周边地区地表 水一地下水耦合数值模型,由模型提取观测期内淀区 日蒸发量数据,数据显示:整体上 6—7月日蒸发量都 处于高值,在7月中旬由于降水次数较多,日蒸发量 多次出现低值;到8月日蒸发量开始呈明显下降趋 势,变化规律与实测值较为相近(图7)。观测期总蒸 发量模拟值较实测值大,总蒸发量相对误差为38% (相对误差由模拟值与观测值之差与模拟值的比值来 表示),其中日蒸发较大差值(4~6 mm)主要出现在 6月中下旬、7月下旬,日蒸发较小差值(±2 mm 以内) 主要在6月上旬、8月。



Fig. 7 Dynamic variation in the observed and simulated evaporation

数值模拟技术在水文地质领域广泛应用,得到了 很好的模拟效果<sup>[15-17]</sup>。本次在白洋淀地区建立地表 水一地下水耦合模型,开展白洋淀水均衡分析,模型 模拟水均衡结果较好。由模型提取得到的淀区蒸发 量与观测值变化趋势较为一致,因考虑淀区植被蒸腾 作用等因素,蒸发量数据较实际观测水面蒸发量大。 水面蒸发是地表水重要的排泄项之一,在没有观测站 数据时数值模型结果可作为水均衡分析的有效工具。

本次研究通过白洋淀湖泊原位蒸发观测站对水

面蒸发量进行了分析研究, 白洋淀湖泊内除了水域 外, 另有多种植物如芦苇生长, 本次建立的原位观测 试验站, 只能代表水面蒸发量, 今后为更加精确的计 算整个淀区的蒸散发量, 需建立白洋淀生态系统蒸散 发观测站全面监测蒸散发量(如加入涡度相关技术 等)<sup>[25]</sup>, 为更准确评价白洋淀湖泊水均衡和生态需水 量等提供基础依据。

## 5 结论及建议

(1) 白洋淀湖泊在观测期内蒸发量日波动较为剧 烈, 波动区间为 0.4~6.6 mm/d; 蒸发量在 6 月最大, 在 降水较多的 7—8 月对应蒸发量有所下降, 9 月开始蒸 发呈明显减少趋势。

(2) 白洋淀湖泊夏季水面日蒸发变化主要受太阳 辐射和湿度影响。

(3)以 20 m<sup>2</sup> 蒸发池蒸发量作为湖泊水面蒸发量, 观测期内 E601 蒸发站观测蒸发量高于湖泊水面实际 蒸发量,通过当地蒸发折算系数折算后可更准确估算 湖泊蒸发量,本次试验获得白洋淀湖泊内 20 m<sup>2</sup> 蒸发 池与 E601 蒸发站蒸发折算系数约为 0.98,较前人研究 略偏大。

(4)在观测期内白洋淀湖泊观测蒸发量与数值模 拟值变化规律较为接近,由于数值模拟值考虑整个淀 区的蒸散量,总蒸发量模拟值大于实测值。

受限于本地区冬季结冰无法观测数据,未开展湖 泊年蒸发量研究,后续工作将妥善维护监测仪器获取 高质量非结冰期完整数据,以深入分析蒸发量在不同 季节的变化规律、影响因素,获取不同季节/月份的淀 区蒸发折算系数。为进一步准确评价白洋淀湖泊的 蒸发量,应同时建立考虑植被蒸腾作用等的蒸散发观 测站开展原位试验。

## 参考文献(References):

- [1] 孙夏利,费良军,李学军.我国水面蒸发研究与进展
  [J].水资源与水工程学报,2009,20(4):17-22.
  [SUN Xiali, FEI Liangjun, LI Xuejun. Research and development of water surface evaporation in China[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(4):17-22. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 黄金廷,李宗泽,王文科,等.格尔木河流域水面蒸发 特征及影响因素分析 [J].水文地质工程地质,2021, 48(3):31-37. [HUANG Jinting, LI Zongze, WANG Wenke, et al. Characteristics of evaporation and its effect factors in the Golmud River catchment [J]. Hydrogeology

& Engineering Geology, 2021, 48(3): 31 – 37. (in Chinese with English abstract) ]

- [3] MA Ning, SZILAGYI J, NIU Guoyue, et al. Evaporation variability of Nam Co Lake in the Tibetan Plateau and its role in recent rapid lake expansion[J]. Journal of Hydrology, 2016, 537: 27 - 35.
- [4] SHAO Changliang, CHEN Jiquan, CHU Housen, et al. Intra-annual and interannual dynamics of evaporation over Western Lake Erie[J]. Earth and Space Science, 2020, 7(11).
- [5] 王积强,陆旭,刘巽民.中国水面蒸发器的发展简史与相关技术问题探讨[J].水利技术监督,2011,19(3):
  9 11. [WANG Jiqiang, LU Xu, LIU Xunmin. Development history of surface evaporator in China and discussion on related technical problems[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2011, 19(3): 9 - 11. (in Chinese.]
- [6] MASONER J R, STANNARD D I, CHRISTENSON S C. Differences in evaporation between a floating pan and class a pan on land[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008, 44(3): 552 – 561.
- [7] 陆美美,周石砾,何霞.青藏高原湖泊蒸发估算方法的比较研究—以纳木错为例[J].冰川冻土,2017,39(2):281-291.
  [LU Meimei, ZHOU Shiqiao, HE Xia. A comparison of the formulas for estimation of the lake evaporation on the Tibetan Plateau: Taking Lake Nam Co as an example[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(2):281-291. (in Chinese with English abstract)]
- [8] WANG Wei, XIAO Wei, CAO Chang, et al. Temporal and spatial variations in radiation and energy balance across a large freshwater lake in China[J]. Journal of Hydrology, 2014, 511: 811 – 824.
- [9] 施成熙,牛克源,陈天珠,等.水面蒸发器折算系数研究[J].地理科学,1986,6(4):305-313. [SHI Chengxi, NIU Keyuan, CHEN Tianzhu, et al. The study of pan coefficients of evaporation pans of water[J]. Scientia Geogrophica Sinica, 1986, 6(4): 305 313. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 韩鹏飞, 王旭升, 胡晓农, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊水面 蒸发与气象要素的动态关系 [J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1012 1020. [HAN Pengfei, WANG Xusheng, HU Xiaonong, et al. Dynamic relationship between evaporation and meteorological factors in lakes in the BadainJaran Desert[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1012 1020. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 许文豪, 王晓勇, 张俊, 等. 鄂尔多斯高原湖泊蒸发原

· 212 ·

位试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 16-23. [XU Wenhao, WANG Xiaoyong, ZHANG Jun, et al. Research on in-situ test of lake evaporation in the Ordos Plateau[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 16-23. (in Chinese with English abstract)]

- [12] 王雨山,尹德超,祁晓凡,等. 白洋淀不同水体氢氧同 位素特征及其指示意义[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 1920 - 1929. [WANG Yushan, YIN Dechao, QI Xiaofan, et al. Hydrogen and oxygen isotopic characteristics of different water and iIndicative significance in Baiyangdian Lake[J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 1920 - 1929. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王晓燕. 白洋淀: 生态修复中的"华北明珠"[N].
  中国自然资源报, 2021, 6, 14(7). [Wang Xiaoyan.
  Baiyangdian Lake: "Pearl of North China" in ecological restoration[N]. China Natural Resources News, 2021, 6, 14(7). (in Chinese)]
- [14] 尹德超,王旭清,王雨山,等.近60年来白洋淀流域 河川径流演变及湿地生态响应[J]. 湖泊科学,2022, 34(6): 2122 - 2133. [YIN Dechao, WANG Xuqing, WANG Yushan, et al. Runoff evolution and wetland ecological response in Lake Baiyangdian Basin in recent 60 years[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(6): 2122 - 2133. (in Chinese with English abstract)]
- [15] HU Litang, XU Zongxue, HUANG Weidong. Development of a river-groundwater interaction model and its application to a catchment in Northwestern China[J]. Journal of Hydrology, 2016, 543: 483 - 500.
- [16] WU Bin, ZHENG Yi, WU Xin, et al. Optimizing water resources management in large river basins with integrated surface water-groundwater modeling: A surrogate-based approach[J]. Water Resources Research, 2015, 51(4): 2153 – 2173.
- [17] 祁晓凡,李文鹏,崔虎群,等.黑河流域中游盆地地 表水与地下水转化机制研究 [J].水文地质工程地质, 2022, 49(3): 29 - 43. [QI Xiaofan, LI Wenpeng, CUI Huqun, et al. Study on the conversion mechanism of surface water and groundwater in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 29 - 43. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 李慧菁, 贾尔恒·阿哈提, 程艳, 等. 准噶尔荒漠生态观测 站水面蒸发影响因素研究 [J]. 新疆环境保护, 2016, , 38(4): 1 - 5. [LI Huijing, ARHATI · Jaerheng, CHENG Yan, et al. Research on factors affecting water surface evaporation in Junggar ecological and environmental observation station[J]. Environmental

Protection of Xinjiang, 2016, 38(4): 1 – 5. (in Chinese with English abstract) ]

- [19] 赵长龙,刘毅,王金涛,等.不同材料蒸发皿及环境因素对水面蒸发测定的影响[J].灌溉排水学报,2019,39(9):108-115.[ZHAO Changlong, LIU Yi, WANG Jintao, et al. Pan materials and the working environment affect water evaporation measurements[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(9): 108 115. (in Chinese with English abstract).]
- [20] 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)]
- [21] 张有芷. 我国水面蒸发试验研究概况 [J]. 人民长江, 1999, 30(3): 6 - 8. [ZHANG Youzhi. Survey of experimental study on water surface evaporation in China[J]. Yangtze River, 1999, 30(3): 6 - 8. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 胡顺军,田长彦,宋郁东,等.塔里木河流域水面蒸发 折算系数分析 [J].中国沙漠, 2005, 25(5): 649-651.
  [HU Shunjun, TIAN Changyan, SONG Yudong, et al. Conversion coefficient of water surface evaporation in Tarim River Basin [J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(5): 649-651. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 王永亮,张学知,乔光建.河北省平原区 20 m<sup>2</sup>水面蒸发 池与不同型号蒸发器折算系数分析 [J] 水文, 2012, 32(4):58-62. [WANG Yongliang, ZHANG Xuezhi, QIAO Guangjian. Conversion coefficient analysis of 20m<sup>2</sup> evaporation pond and other evaporators for Hebei Plain[J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(4):58-62. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 王积强.关于上游水库水面蒸发量的估算——与吴申 燕先生商榷 [J] 新疆环境保护, 1997, 19(2): 50 – 53.
  [WANG Jiqiang. On the estimation of water evaporation of upstream reservoir : For discussing with Mr. Wu Shenyan[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 1997, 19(2): 50 – 53. (in Chinese)]
- [25] 王周锋,王文科,李俊亭.蒸散发水源组成与测定方法研究进展[J].水文地质工程地质,2021,48(3):19. [WANG Zhoufeng, WANG Wenke, LI Junting. A review of the advances in water source composition and observation methods of evapotranspiration[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(3):19. (in Chinese with English abstract)]