

基于原位试验银川平原湖泊蒸发模型研究

李志萍, 闫静波, 徐敏, 赵贵章, 徐兆祥

A study of the lake evaporation model in Yinchuan Plain based on in-situ test

LI Zhiping, YAN Jingbo, XU Min, ZHAO Guizhang, and XU Zhaoxiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202301014>

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

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MOD16的银川平原地表蒸散量时空特征及影响因素分析

An analysis of spatio-temporal characteristics and influencing factors of surface evapotranspiration in the Yinchuan Plain based on MOD16 data

王卓月, 孔金玲, 李英, 张在勇, 刘慧慧, 蒋镒竹, 钟炎伶, 张静雅 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 53-61

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

武汉地区厚互层土中基坑抗突涌破坏评价方法研究

Study of evaluation method of anti-uprush stability of foundation pit with thick interbedded soil layers in Wuhan

熊宗海, 冯晓腊, 张红章, 范卫琴, 程华强 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 134-140

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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202301014

李志萍, 闫静波, 徐敏, 等. 基于原位试验银川平原湖泊蒸发模型研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 28-38.
LI Zhiping, YAN Jingbo, XU Min, *et al.* A study of the lake evaporation model in Yinchuan Plain based on in-situ test [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 28-38.

基于原位试验银川平原湖泊蒸发模型研究

李志萍¹, 闫静波¹, 徐敏², 赵贵章¹, 徐兆祥³

(1. 华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州 450046; 2. 北京岩土工程勘察院有限公司, 北京 100083; 3. 宁夏回族自治区水文环境地质调查院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 湖泊在流域水循环中具有重要作用, 对于地区的气候调节、促进地区经济可持续发展和维护生态环境具有不可替代的作用。量化湖泊蒸发对西北干旱地区水资源与生态需水量评价至关重要。目前已有的湖泊蒸发量计算方法忽略了水深对蒸发的影响。在宁夏水与环境野外科学观测研究站开展不同水深的水面蒸发试验, 利用皮尔逊相关性和非线性回归分析, 探究水深与水面蒸发的关系。根据计算的水面潜在蒸发量折算系数, 拟合得到适用于银川平原水面蒸发的深度蒸发计算模型。以清水湖为例, 利用单波束无人船探测湖床形态, 得到湖水水深, 并将深度蒸发计算模型与 Penman-Monteith (PM) 公式进行对比分析。结果表明: 2 种模型得出的清水湖年平均水面潜在蒸发量相差 0.679 mm/d; 在月平均水面潜在蒸发量曲线的走势上, PM 公式的计算结果受温度影响明显, 而深度蒸发计算模型相对温度的变化具有滞后特征, 更好地反映了水深对温度的调节作用, 使水面潜在蒸发量的计算更加精准。本研究拟合的深度蒸发计算模型提高了银川平原湖泊水面蒸发的计算精度, 为银川市内湖泊生态研究提供了参考, 同时也对该地区的水资源利用和生态环境保护产生基础性影响。

关键词: 水面蒸发; 计算模型; 原位试验; 皮尔逊相关; 清水湖; 水深

中图分类号: P343.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)05-0028-11

A study of the lake evaporation model in Yinchuan Plain based on in-situ test

LI Zhiping¹, YAN Jingbo¹, XU Min², ZHAO Guizhang¹, XU Zhaoxiang³

(1. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China; 2. Beijing Geo-Technical Engineering Reconnaissance Institute, Beijing 100083, China; 3. Hydrological Environment and Geological Survey Institute of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: Lakes play an important role in watershed water cycle, and play an irreplaceable role in regional climate regulation, promoting regional economic sustainable development and maintaining ecological environment. Quantitative lake evaporation is very important for the evaluation of water resources and ecological water demand in arid areas of northwest China. At present, the existing calculation methods of lake evaporation ignore the influence of water level depth on evaporation. Therefore, water surface evaporation experiments with different

收稿日期: 2023-01-14; 修订日期: 2023-03-17

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972261); “一带一路”水与可持续发展科技基金项目(2021490511); 宁夏水与环境野外观测站维护运行项目(64000023300000010673); 宁夏生态地质调查示范项目(NXCZ20220201)

第一作者: 李志萍(1971-), 女, 博士, 教授, 从事地下水污染方面的研究。E-mail: lizhiping@ncwu.edu.cn

通讯作者: 赵贵章(1976-), 男, 博士, 副教授, 从事水文地质方面的研究。E-mail: guizhangzhao@163.com

water level depths were carried out in the Ningxia Water and Environment Field Scientific Observation and Research Station, and the relationship between water level depth and water surface evaporation was explored by the Pearson correlation and nonlinear regression analysis. According to the calculated water surface potential evaporation conversion coefficient, a deep evaporation calculation model suitable for water surface evaporation in the Yinchuan Plain was fitted. The Qingshui Lake was taken as an example, and a single-beam unmanned ship was used to detect the shape of lake bed, and the depth of lake water level was obtained. The calculation model of deep evaporation was compared with the Penman-Monteith(PM) formula. The results show that the difference between the two models is 0.679 mm/d. In the trend of monthly average potential evaporation curve, the calculation results of the PM formula are obviously affected by temperature, while the relative temperature change of deep evaporation calculation model has lag characteristics, which better reflects the adjustment of water level depth to temperature and makes the calculation of potential evaporation more accurate. The depth evaporation calculation model fitted in this study improves the calculation accuracy of lake surface evaporation in the Yinchuan Plain, provides a parameter test for lake ecological research in Yinchuan, and also has a basic impact on water resources utilization and ecological environment protection in this area.

Keywords: water surface evaporation; computational model; in-situ test; Pearson correlation; Qingshui Lake; water level depth

蒸发是水三态转化的重要过程之一,也是水文循环中连接大气和地表系统的关键^[1-3]。平均每年有大约 577 000 km³ 的水由蒸发进入大气,再经降水返回海洋和陆地^[4]。水面蒸发不仅是估算陆地蒸发研究中的基本参量^[5-6],同时也是水资源利用效率研究的重要内容^[7],因此了解水面蒸发对于研究区域水文系统具有十分重要的作用。近些年来,全球气温持续上升,蒸发增加,干旱、半干旱地区太阳辐射强烈,降水稀少,部分地区甚至蒸发大于降水^[8],因此干旱、半干旱地区的水库和湖泊蒸发是导致这些地区水资源紧缺、生态环境脆弱的主要原因之一^[9-10]。因此准确量化西北干旱、半干旱地区的湖泊蒸发量对于该区地下水建模与大规模水文循环模拟都具有非常重要的意义^[11-13]。它既可以为提高水资源利用率提供重要参考,也可以为合理制定灌溉方案以及评估水生态系统提供重要依据。

随着对湖泊蒸发量化研究的深入,湖泊蒸发量的估算方法和技术也得到了长足的发展^[14]。在此期间,学者们提出了多种计算湖泊蒸发量的方法。例如,Vallet等^[15]使用湖泊能量平衡法、PM公式法和建立湖泊蒸发模型(crlc)3种方法对位于埃塞俄比亚主裂谷的Ziway湖泊蒸发量进行了估计,为预测该流域内用水量增加的影响提供了帮助。Metzger等^[16]在死海西部海岸进行了长期测量,通过建立多元回归模型估算死海蒸发量,同时使用改进的Penman-Monteith(PM)公式计算实际蒸发,并对二者进行了对比分析,结果

表明死海水面年蒸发量达到约 994 mm。总体上,目前估算潜在蒸散量的方法有综合法、温度法、辐射法、水平衡法和质量传导法^[17],其中以PM公式为代表的综合法是运用最为广泛的方法。例如,王志杰等^[18]使用PM公式计算了呼伦湖区的水面蒸发量,通过敏感性分析确定了水面蒸发的主控因子。孙萌等^[19]基于PM公式计算了1959—2019年三峡库区及周边25个气象站的潜在蒸发量,并采用累积距平法发现了1979—1980年三峡库区潜在蒸发量序列中的突变现象。但是PM公式法应用在干旱地区存在误差^[20],因此在干旱地区研究湖泊蒸发时多采用针对相应地区建立模型的方法。例如,Ma等^[21]提出的互补关系湖泊蒸发模型,很好地模拟了南哥湖的蒸发,得到了该湖泊的蒸发量。Shilo等^[22]和Singh等^[23]运用能量平衡法建立了针对相应地区的改良模型量化了湖泊蒸发。但是,在量化湖泊蒸发时运用的模型多是基于经验值或估计值,而不是当地的实测蒸发数据,给计算结果增添了不确定性^[24-25]。加之湖盆结构复杂且不易探查,湖水深度等因素对蒸发的影响又常被PM公式等计算模型所忽略,计算结果的正确性更是难以判断。因此在研究区内建立不同深度的蒸发池,利用监测数据并结合当地气候因素建立模型,有望精准量化计算当地湖泊蒸发,进而为西北干旱地区湖泊蒸发研究提供一条新的途径。

本研究首先利用等面积不同深度的蒸发池,观测不同深度蒸发池的水面观测蒸发量,然后依据可作为

自然水面潜在蒸发量的 20 m² 蒸发池的水面观测蒸发量, 计算银川平原水面潜在蒸发量折算系数, 再对不同深度条件下的水面观测蒸发量和水面潜在蒸发量折算系数进行拟合获得经验公式。最后, 以清水湖为例, 采用深度蒸发计算模型与 PM 公式分别计算水面潜在蒸发量, 并进行对比分析。

1 深度蒸发计算模型的提出

1.1 试验方案与设计

关于湖泊蒸发量的计算早在 1972 年 9 月世界气

象组织就提出使用 20 m² 蒸发池观测湖泊蒸发量, 即可以获得最接近自然水面的潜在蒸发量^[26]。本研究通过设置 20 m² 蒸发池和相同面积不同深度蒸发池, 监测蒸发池中的水位变化, 量化不同深度蒸发池的蒸发, 结合气象站收集的气象资料, 如: 气温、风速、压强等, 分析各气象要素、池水水体深度与水面观测蒸发量之间的关系, 对比相同面积不同深度蒸发池与 20 m² 蒸发池的水面观测蒸发量, 计算水面潜在蒸发量的折算系数。构建适用于当地条件的深度蒸发计算模型, 试验流程如图 1 所示。

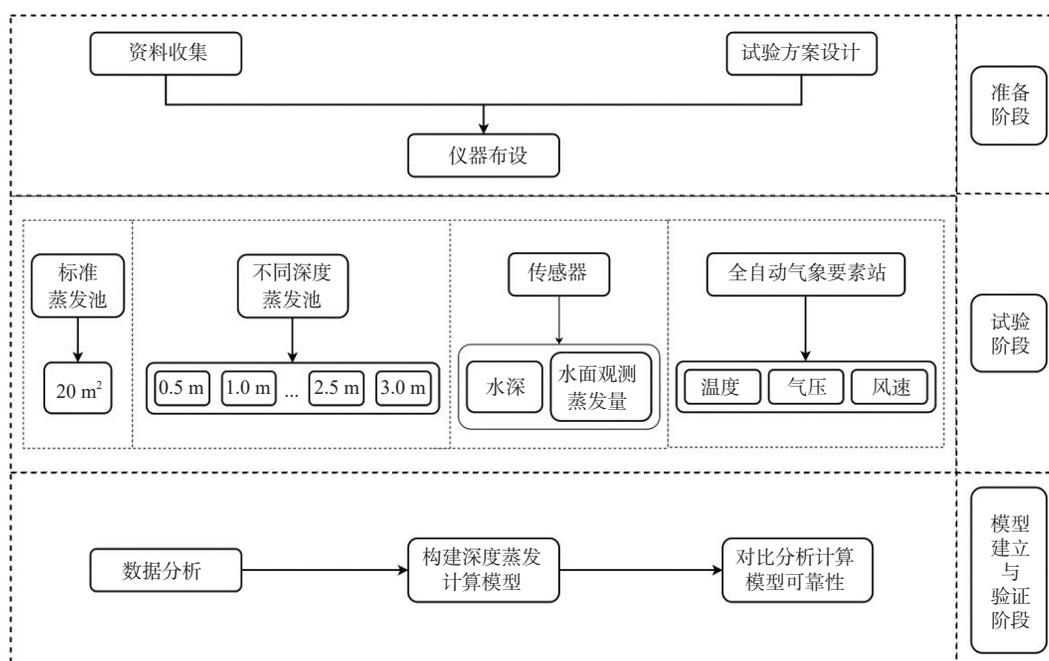


图 1 试验流程

Fig. 1 Test flow chart

原位试验场地位于宁夏水与环境野外科学观测研究站, 见图 2(a), 在试验场中的水分蒸发试验功能区设立 20 m² 蒸发池和相同面积、不同深度的 6 个圆形蒸发池, 如图 2(b) 所示。圆形蒸发池面积均为 1 m², 但深度分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 m。试验场内设置全自动气象要素观测站, 见图 2(a), 通过配置的风速风向传感器、净辐射传感器、空气温湿度传感器等设备完成风速(2 m 处)、气温、空气湿度、降雨量、大气压、温度等气象要素的实时观测、数据集成与自动传输。

试验场内蒸发池的蒸发量监测系统由数据管理平台、太阳能无线智能终端、高精度液位计、智能水表以及后备电池组成, 可以进行实时监测, 如图 3 所示。通过蒸发量监测系统获取原位试验场中 6 个不

同深度蒸发池的蒸发数据和气象站所观测的气象数据, 分析水面观测蒸发量(E_g)与温度(T)、气压(P)和风速(v)的相关性, 确定模型变量。再依据 20 m² 标准蒸发池的监测数据, 得到适用于银川平原的水面潜在蒸发量折算系数。综合分析, 构建适用于银川平原的深度蒸发计算模型。

1.2 数据分析

针对 2021 年 6—11 月各蒸发池的水面观测蒸发量和气象数据, 利用皮尔逊相关性分析法分析水面观测蒸发量(E_g)与深度(H)、气温(T)、高度 2 m 处的风速(v)和压强(P)之间的相关性, 共 582 个样本, 分析结果见表 1。

从表 1 可以看出, 4 个自变量的 Sig 值均为 0, 因此 E_g 与 4 个自变量都存在相关性。表 1 中的皮尔逊



图 2 原位试验场地布设图

Fig. 2 Layout of in-situ test site

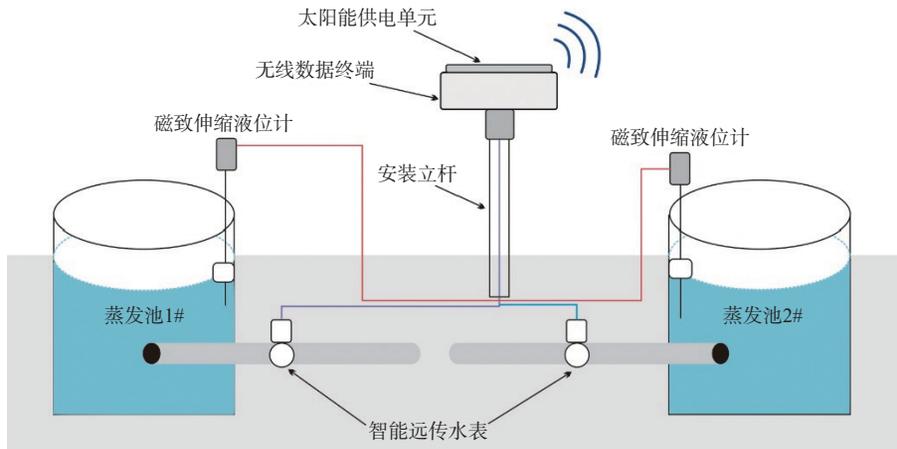


图 3 监测系统构造

Fig. 3 Monitoring system structure

表 1 相关性分析

Table 1 Correlation analysis

	E_g	T	v	H	P
皮尔逊相关系数	1	0.768**	0.034**	-0.223**	-0.599**
Sig. (双尾)		0.000	0.000	0.000	0.000

注: Sig. 值表示变量与变量关系的显著性, 当某自变量的 Sig. 值小于 0.05 时, 表明该自变量与因变量有相关性。**代表显著性, 表明 Sig. 值小于 0.01, 即变量与变量关系的显著性结论犯错误的可能性是 1%。

相关系数主要是用于度量 2 个变量之间的相关性(线性相关), 它的取值范围是 $[-1, 1]$ ^[27]。如值大于 0, 表示 2 个变量呈正相关; 如果值小于 0, 则 2 个变量呈负相关; 如果值等于 0, 则 2 个变量不相关^[28]。表 1 中, E_g 与 T 的皮尔逊相关系数为 0.768, 即两者为强正相关; E_g 与 P 的相关系数为 -0.599, 即为中度负相关; E_g 与 v 的相关系数为 0.034, 即为弱正相关; E_g 与 H 的相关性系数为 -0.223, 即为弱负相关。

根据上述皮尔逊相关性分析法, 得知 E_g 与 T 、 P

为线性相关。为确定 E_g 与 H 、 v 的变化关系, 对 E_g 与 H 、 v 分别进行曲线拟合, 结果表明 E_g 与 v 的皮尔逊相关系数小于 0.1。本试验中的 E_g 、 v 两者的 Sig. 为 0, 但皮尔逊相关系数小于 0.1, 这是由于试验所用的 1 m^2 蒸发皿的面积较小, E_g 对 v 的变化不敏感。由于湖泊会与邻近地表之间形成特定的湖风系统^[29-30], 使得气象站测量的风速值(空间插值)与其他变量(如气温和太阳辐射)相比具有更高的不确定性, 因此, 不考虑风速影响的湖泊蒸发模型可能是更理想的^[21]。因此, 本研究在拟合深度蒸发计算模型时忽略了 v 对 E_g 的影响。 E_g 与 H 的曲线拟合结果见表 2, 指数函数曲线的拟合优度最佳, 为 0.998。在模型拟合时, 对 H 采用非线性的指数方程拟合, 对 T 、 P 采用线性的回归方程拟合。

1.3 提出经验公式

由于该模型为具有 3 个变量 (T 、 P 和 H) 的函数,

表 2 深度与水面观测蒸发量曲线拟合优度参数

Table 2 Goodness-of-fit parameters of depth and observed evaporation curve on water surface

参数	线性	对数	逆	二次	三次	复合	幂	S型	增长	指数	Logistic
R^2	0.927	0.914	0.738	0.996	0.997	0.997	0.908	0.729	0.917	0.998	0.927
显著性	0.000	0.003	0.029	0.000	0.000	0.000	0.005	0.031	0.003	0.000	0.000

拟合具有较高的难度,为此在本研究中,首先假定温度和压强为常数,拟合 E_g 与 H 之间的关系。通过水面观测蒸发量与深度之间的相关性分析,可知 E_g 与

H 之间呈负的指数关系,即深度越大,蒸发量越小,见图 4(a);且随着时间尺度的加长,深度效应对蒸发量的影响越明显,见图 4(b)。

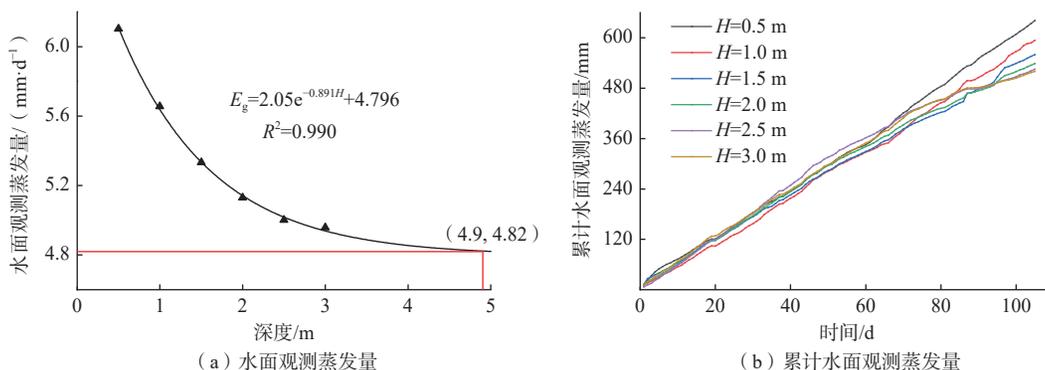


图 4 深度对水面观测蒸发量的影响关系

Fig. 4 Influence diagrams of depth on observed evaporation

拟合水面观测蒸发量 E_g 和蒸发池深度 H 所得的关系式为:

$$E_g = 2.05e^{-0.891H} + 4.796, H > 0 \quad (1)$$

根据该模型计算的蒸发量与实测值可以良好拟合,皮尔逊相关系数和均方根误差分别为 0.990 和 0.014 mm/d。由式(1)可知, E_g 随 H 的增加而逐渐减小。

在相同水面面积条件下,水深越小,气温高时水温相对较高,水体中热量交换强烈,水面观测蒸发量大于深度更大的蒸发池。由图 4(a)可知, $H > 4.9$ m 后, E_g 基本不再随 H 的增加而增加。 E_g 随 H 不再增加的现象,是在假设 T 和 P 为常数的条件下产生的。为减小模型拟合难度,同时考虑到 T 、 P 与 E_g 的皮尔逊相关系数均大于 0.5,提出整合指数函数与线性函数的模型:

$$E_g = 2.05e^{-0.891H} + aT + bP + c \quad (2)$$

将式(2)输入 SPSS 进行非线性方程拟合,即可确定待求参数 a 、 b 和 c 。此次拟合结果为:

$$E_g = 2.05e^{-0.891H} + 0.175T - 0.028P + 3.15 \quad (3)$$

该模型拟合残差为 1.038,修正平方和为 219.548, $R^2=0.995$,拟合效果优于式(1)。式(3)模拟的结果与银川试验场不同深度蒸发池蒸发量的水面观测值拟

合良好。式(3)是依据 1 m² 蒸发池的蒸发量数据所建立的,且计算所得的 E_g 是水面观测蒸发量。该模型忽略了面积对水面蒸发量的影响,计算结果也无法与传统计算方法——PM 公式的计算结果作对比。因此需要利用水面潜在蒸发量折算系数减小面积的影响,得到水面的潜在蒸发量。

在此将在银川平原试验场建立的 20 m² 蒸发池的水面观测蒸发量数据作为自然水面的潜在蒸发量,计算银川平原水面潜在蒸发量的折算系数 K :

$$E_{(20)} = K \times E_g \quad (4)$$

式中: $E_{(20)}$ ——20 m² 蒸发池的蒸发量/(mm·d⁻¹);

K ——银川平原水面潜在蒸发量的折算系数。

依据已知数据,计算得到如表 3 所示的不同月份、深度的水面潜在蒸发量折算系数的表达式。

联立式(3)、式(4)可得到深度蒸发计算模型:

$$E_0 = K_i \times (2.05e^{-0.891H} + 0.175T - 0.028P + 3.15) \quad (5)$$

式中: E_0 ——银川平原水面潜在蒸发量/(mm·d⁻¹);

K_i —— i 月的水面潜在蒸发量折算系数,依据表 3 中的表达式计算。

国内现用于计算水面蒸发量的经验公式有多种^[31-34],均反映了水面潜在蒸发量随水面积增大而减小的变

表 3 不同月份与深度的水面潜在蒸发量折算系数

Table 3 Conversion coefficient of water surface evaporation in different months and at different depths

月份	水面潜在蒸发量折算系数						表达式
	0.5 m	1.0 m	1.5 m	2.0 m	2.5 m	3.0 m	
1	0.290	0.388	0.487	0.585	0.684	0.782	$K_1=0.197H+0.191$
2	0.366	0.444	0.522	0.600	0.678	0.756	$K_2=0.156H+0.288$
3	0.385	0.449	0.514	0.578	0.643	0.707	$K_3=0.129H+0.320$
4	0.454	0.492	0.531	0.569	0.608	0.646	$K_4=0.077H+0.415$
5	0.660	0.698	0.736	0.774	0.812	0.850	$K_5=0.076H+0.622$
6	0.707	0.749	0.792	0.834	0.877	0.919	$K_6=0.085H+0.664$
7	0.797	0.836	0.875	0.914	0.953	0.992	$K_7=0.078H+0.758$
8	0.811	0.851	0.892	0.932	0.973	1.013	$K_8=0.081H+0.770$
9	0.669	0.696	0.723	0.750	0.777	0.804	$K_9=0.054H+0.642$
10	0.472	0.520	0.569	0.617	0.666	0.714	$K_{10}=0.097H+0.423$
11	0.337	0.412	0.488	0.563	0.639	0.714	$K_{11}=0.151H+0.261$
12	0.422	0.510	0.599	0.687	0.776	0.864	$K_{12}=0.177H+0.333$

化规律。但不管是依据 PM 计算模型还是其他专业认同的计算模型的任一修正式,水面潜在蒸发量随水面面积增加而增加,都没有涉及其他因素的限制,这和实际情况不符。实际上潜在蒸发量的增大会受到水深的限制,本文提出的深度蒸发计算模型正好体现了水深因素的影响,通过计算折算系数减小面积对蒸发影响的同时,反映了深度和水面潜在蒸发量之间的关系。

2 深度模型与 PM 公式对比分析

本研究以清水湖为例,进一步验证上述深度经验

公式的可信度。清水湖位于我国宁夏回族自治区银川市,地理位置如图 5 所示,总占地面积 $42.99 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。根据前期勘察,可将研究区分为 2 部分,即湖岸浅滩区和湖中深水区,针对不同深度的湖区,运用深度蒸发计算模型计算清水湖的水面潜在蒸发量,并与 PM 公式计算的结果进行对比,验证采用深度进行潜在蒸发量计算的准确性。为测量清水湖的水深,利用单波束无人船进行湖底地形探测。无人船结构如图 6(a) 所示,无人船既可以接收指令,依据岸基系统 PC 端划定的测区及布设的航线进行自动航行测量水深和水底高程,也可以通过遥控器手动遥控测量。无人船以

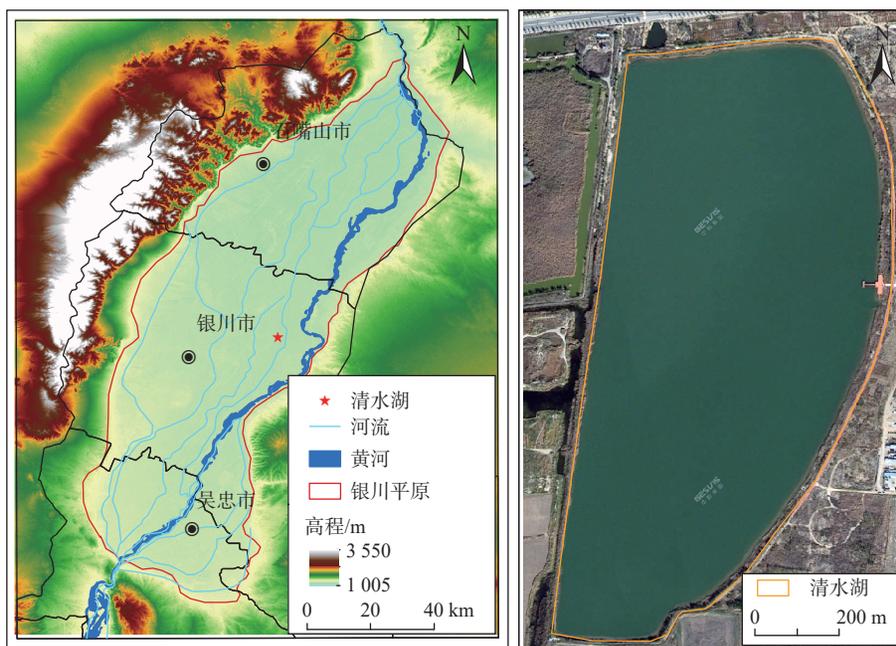


图 5 研究区地理位置

Fig. 5 Geographical location of the study area

单波束测深仪, 结合 GNSS RTK 定位, 以实现实时获取水下高程数据并进行水深测量。水深测量是河道

测量和湖底地形测量的基本手段, 通过测量水深和定位 GNSS 接收机, 获得水下三维地形图。

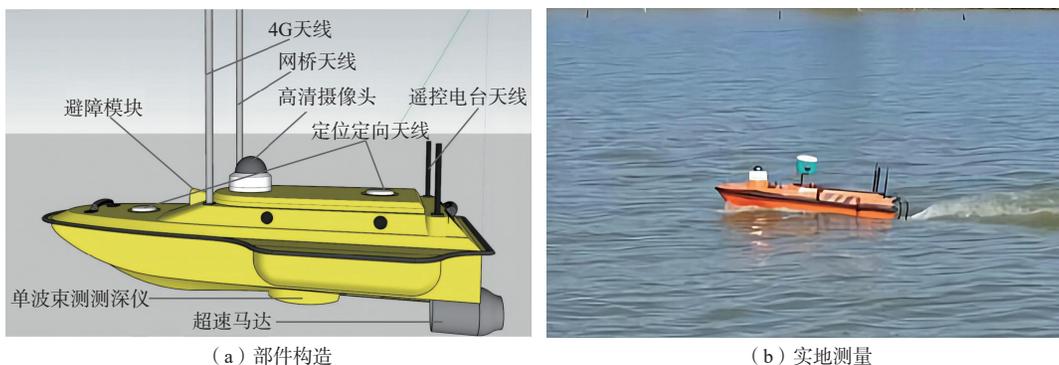


图 6 单束波无人船

Fig. 6 Single beam unmanned ship

利用单波束无人船对清水湖进行水深测量, 如图 6 (b) 所示, 得到清水湖湖水深度及湖床地形高程数据。整理无人船所测数据, 在 surfer 中绘制出清水湖湖床标高等值线, 获得清水湖湖床的三维图 (图 7)。通过分析湖床标高等值线的疏密和湖床结构, 确定如图 7 所示的分区界线。分区界限以外为湖岸浅滩区域, 面积为 87 975.28 m²; 分界线以内为湖中深水区, 面积为 341 963.66 m²。证实了前期勘察过程中湖床结构分区的结果。通过对比 2 区湖深数据, 发现 2 区湖深有较大差距。湖岸浅滩区水深最小值为 0.46 m, 湖中深水区水深最大值为 6.16 m, 两者之差为 5.70 m; 湖岸浅滩区的平均水深为 1.818 m, 湖中深水区的平均水深为 5.247 m, 两者相差 3.429 m。若忽略湖水深度对水面潜在蒸发量的影响, 将导致蒸发量的计算值存在偏差。因此本研究利用宁夏水与环境野外科学观测研究站内 20 m² 蒸发池与单位面积、不同深度的蒸发池所测水面观测蒸发量与气象站所测气象数据推导出的深度蒸发计算模型, 分区计算清水湖不同深度的水面潜在蒸发量。

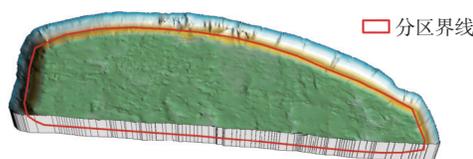


图 7 清水湖湖床结构

Fig. 7 Lake bed structure of the Qingshui Lake

2.1 深度计算公式

虽然清水湖的湖岸与湖中 2 区水深相差较大, 但在各自区域内水深分布较为均匀。因此为减小计算

难度, 将 2 区水深平均值代入式 (5), 同时利用中国气象数据服务中心发布的宁夏银川站 2000—2021 年的气象观测数据进行计算。计算所得的结果为 2 个独立的值, 无法直观地反映深度蒸发计算模型与 PM 公式在计算结果上存在的差异。

因此先计算清水湖的平均水深:

$$\bar{H} = \frac{H_1 \times A_1 + H_2 \times A_2}{A_0} \quad (6)$$

式中: \bar{H} ——清水湖的平均水深/m;

H_1 、 H_2 ——湖岸、湖中的水深/m;

A_1 、 A_2 ——湖岸、湖中的面积/m²;

A_0 ——清水湖的总面积/m²。

计算得到清水湖的平均水深为 4.545 m, 再和 2021 年各月的日平均气象数据, 一同代入深度蒸发计算模型, 计算清水湖各月的日平均水面潜在蒸发量, 如表 4 所示。

利用 20 m² 蒸发池和 1 m² 不同深度蒸发池的观测蒸发数据计算出各月份水面潜在蒸发量折算系数, 结合多年各月的日平均气象数据, 计算得到清水湖各月的日平均水面潜在蒸发量 (表 4)。这不仅考虑了不同月份、不同水深所对应的水面潜在蒸发量折算系数, 而且减小了模型拟合过程中因 1 m² 蒸发池面积较小而忽略面积和风速对水面蒸发的影响。由该模型计算所得清水湖各月的日平均水面潜在蒸发量为 5.589 mm。

2.2 Penman-Monteith 公式

1998 年, 联合国粮农组织 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 正式提出用 PM 公

表 4 清水湖各月的日平均水面潜在蒸发量

Table 4 Potential evaporation of daily average water surface in the Qingshui Lake in each month

计算结果	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
K_t	1.086	0.997	0.906	0.911	0.967	1.120	1.117	1.067	0.887	0.938	0.985	1.209
日均水面潜在蒸发量/mm	3.925	4.022	4.289	5.226	6.848	7.491	8.309	7.895	6.155	4.729	4.221	3.953

式作为计算陆地或水体表面潜在蒸散量的唯一标准方法^[35]。随着湖泊蒸发研究的发展,许多学者也提出了 PM 公式的修正公式。由于 FAO 推荐的 PM 公式中的物理量多且部分难以取得,因此本次研究采用《水文学手册》^[36]的 PM 修正公式:

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n + A_h}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{6.43(1 + 0.53u)(e_s - e_a)}{\lambda} \quad (7)$$

$$\Delta = \frac{de_s}{dT} \approx \frac{4098e_s}{(237.3 + T)^2} \quad (8)$$

$$\gamma = 0.00065813P \quad (9)$$

$$e_s = 0.6108e^{\frac{17.27T}{237.3+T}} \quad (10)$$

$$e_a = 0.65e_s \quad (11)$$

式中: R_n ——作物表面上的净辐射/(MJ·m⁻²·d⁻¹);
 A_h ——水体通热量/(MJ·m⁻²·d⁻¹);
 Δ ——饱和水汽压曲线在 2 m 处气温下的斜率/(kPa·°C⁻¹);
 γ ——湿度计常数/(kPa·°C⁻¹);
 λ ——湖水升华潜热/(MJ·kg⁻¹), $\lambda = 2.51 - 0.002367T$;
 e_s ——空气的饱和水汽压/kPa;
 e_a ——高度 2 m 处空气的实际水汽压/kPa;
 u ——2 m 高度处的风速/(m·s⁻¹);
 T ——平均气温/°C;
 P ——年平均大气压/kPa, 取 $P = 89.0196$ kPa。

A_h 是湖水吞、吐量引起的感热变化,在本次研究中忽略不计。

作物表面上的净辐射 R_n 的计算方法为:

$$R_n = 0.5833(1 - \alpha)R_a - R_{nl} \quad (12)$$

$$R_a = 37.5860d_r(\omega_s \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s) \quad (13)$$

$$R_{nl} = 0.7\sigma(0.34 - 0.14\sqrt{e_a})(237.3 + T)^4 \quad (14)$$

$$d_r = 1 + 0.033\left(\frac{2\pi J}{365}\right) \quad (15)$$

$$\delta = 0.409\sin\left(\frac{2\pi J}{365} - 1.39\right) \quad (16)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (17)$$

式中: R_a ——地球大气层接受的总外来辐射/(MJ·m⁻²·d⁻¹);

R_{nl} ——地面反射的长波辐射/(MJ·m⁻²·d⁻¹);

α ——短波辐射反射率,开阔水面的 α 经验值为 0.08;

d_r ——日地相对距离的倒数;

ω_s ——日落时太阳高度角/rad;

φ ——日落时纬度/rad, $\varphi = 0.6717$ rad;

δ ——日落时太阳赤纬/rad;

σ ——Stefan-Boltzmann 常数,为 4.903×10^{-9} MJ/(K⁴·m²·d);

J ——一年中每天的排序,如 1 月 1 日则 $J = 1$ 。

清水湖位于银川平原,因此将从中国气象数据服务中心所得到的 2000—2021 年宁夏银川站气象观测数据代入式(7)—(17)中综合计算。通过 PM 公式计算可得清水湖的年尺度上的日平均水面潜在蒸发量为 4.910 mm。

3 讨论

本研究中的深度蒸发计算模型利用当地观测蒸发数据并结合不同深度、不同月份的折算系数拟合而成。其对当地水面潜在蒸发量的计算结果比 PM 公式更具有参考性。

深度蒸发计算模型和 PM 公式所计算的清水湖多年各月的日平均水面潜在蒸发量分别为 5.589, 4.910 mm, 两者计算结果相差 0.679 mm, 不能直观地反映水深对于水面潜在蒸发量的影响。PM 公式与深度蒸发计算模型的多年各月的日平均水面潜在蒸发量的计算结果和温度曲线的对比见图 8。

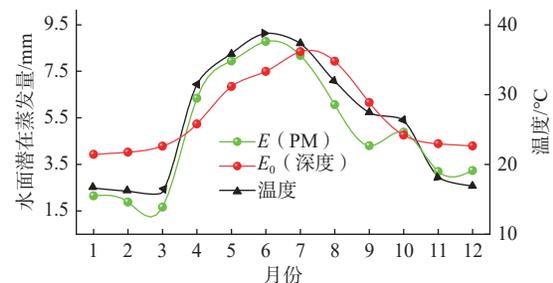


图 8 PM 公式与深度蒸发计算模型计算结果及温度曲线
 Fig. 8 Calculation results with the PM formula and depth evaporation calculation model and changes in temperature

从图 8 中可以看出, PM 公式计算的潜在蒸发量

较深度蒸发计算模型的计算结果的变化幅度较大,两者的变化趋势在春秋冬基本一致,在夏季深度蒸发计算模型相较于 PM 公式计算结果和温度的变化趋势具有滞后性。银川平原依据气候划分法,4—8 月为春夏季,9—翌年 3 月为秋冬季,且银川平原全季昼夜温差大。PM 公式计算结果曲线与温度曲线变化趋势相似,计算结果受温度变化影响明显,在春夏与秋冬变换处潜在蒸发量表现为陡升、陡降。深度蒸发计算模型计算结果曲线则变化趋势较缓,在春夏前后水面潜在蒸发量分别表现为缓升、缓降,这与 PM 公式计算结果曲线的急速变化不同。水体深度较大,水体存在“热缩冷胀”效应,使水体上下部分产生对流作用。水深越大,水体蕴藏的热量越大,对水体温度起到一定调节作用,使水面潜在蒸发量随时间的变化趋于稳定。清水湖湖中深水区面积约为湖岸浅滩区面积的 4 倍,各自平均水深相差 3.5 m,水深对清水湖水面潜在蒸发量的影响较为显著。深度蒸发模型在水体深度较大时,相较于传统水面潜在蒸发量计算方法——PM 公式更为准确。图 8 中深度蒸发计算模型的计算结果曲线仅在 1 年中的 4—6 月份位于 PM 公式计算结果曲线的下方,计算结果相差 1.09~1.29 mm;而其余月份深度蒸发计算模型的计算结果曲线均高于 PM 公式计算结果曲线,计算结果相差 0.16~2.63 mm。由此可知,深度蒸发计算模型的计算结果相较 PM 公式计算结果偏大。

深度蒸发计算模型是根据在银川平原设立的原位试验场的蒸发池水面蒸发量的观测数据推导而来,用此模型计算得出的清水湖水面潜在蒸发量更符合银川平原的蒸发规律。PM 公式计算所得的是在有充足水分供应条件下的水面潜在蒸发量,比本研究中的深度蒸发计算模型的结果曲线幅度更大,受温度影响较大,没有很好地考虑水深对温度的调节作用,使水面潜在蒸发量的结果曲线与温度的变化曲线趋于一致。因此深度蒸发计算模型比 PM 公式能更好地计算与预测银川平原的水面潜在蒸发量。

4 结论

湖泊水面蒸发是连接湖泊水分循环与能量平衡的关键纽带之一,量化湖泊水面蒸发对于地区的水资源利用和生态需水量评价都有着至关重要的作用。本文依托宁夏水与环境野外科学观测研究站,开展不同水深的水面蒸发试验,研究水深与水面潜在蒸发量的关系,取得了以下结论:

(1)利用皮尔逊相关性分析与非线性回归分析法,将水面观测蒸发量与深度、气温、气压等观测数据进行拟合,再依据 20 m² 蒸发池的观测数据,计算出不同月份、不同水深所对应的水面潜在蒸发量折算系数。将折算系数与前期拟合结果相结合,得到了深度蒸发计算模型。

(2)本研究以清水湖为例,分别利用深度蒸发计算模型与 PM 公式计算水面潜在蒸发量,结果表明了水深对水面蒸发的影响,验证了深度蒸发计算模型更符合研究区水面蒸发计算的需求。

(3)深度蒸发计算模型是基于原位试验场的观测数据,拟合、推导得出的适用于计算银川平原水面潜在蒸发量的计算模型。该模型适用于银川平原水体深度较大的湖泊、河流的水面蒸发研究,但对其它地区和水深较浅水体的适用性还需进一步研究。

参考文献 (References) :

- [1] BETTS A K, BALL J H, BELJAARS A C M, et al. The land surface-atmosphere interaction: A review based on observational and global modeling perspectives[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D3): 7209 – 7225.
- [2] SCHLESINGER W H, JASECHKO S. Transpiration in the global water cycle[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 189/190: 115 – 117.
- [3] ASSOULINE S, TYLER S W, TANNY J, et al. Evaporation from three water bodies of different sizes and climates: Measurements and scaling analysis[J]. *Advances in Water Resources*, 2008, 31(1): 160 – 172.
- [4] OKI T, KANAE S. Global hydrological cycles and world water resources[J]. *Science*, 2006, 313(5790): 1068 – 1072.
- [5] MCMAHON T A, PEEL M C, LOWE L, et al. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: A pragmatic synthesis[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(4): 1331 – 1363.
- [6] SHAHIN M. Evaporation and evapotranspiration: Water resources and hydrometeorology of the arab region[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007: 171–221.
- [7] XIAO Wei, WEI Zhongwang, WEN Xuefa. Evapotranspiration partitioning at the ecosystem scale using the stable isotope method: A review[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 263: 346 – 361.
- [8] 许文豪, 王晓勇, 张俊, 等. 鄂尔多斯高原湖泊蒸发原

- 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)]
- [9] STURROCK A M, WINTER T C, ROSENBERRY D O. Energy budget evaporation from Williams Lake: A closed lake in north central Minnesota[J]. *Water Resources Research*, 1992, 28(6): 1605 – 1617.
- [10] JASECHKO S, SHARP Z D, GIBSON J J, et al. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration[J]. *Nature*, 2013, 496(7445): 347 – 350.
- [11] WINTER T C. Uncertainties in estimating the water balance of lakes[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1981, 17(1): 82 – 115.
- [12] ZHAO Lingling, XIA Jun, XU Chongyu, et al. Evapotranspiration estimation methods in hydrological models[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(2): 359 – 369.
- [13] ZHAO Xiaosong, LIU Yanbo. Lake fluctuation effectively regulates wetland evapotranspiration: A case study of the largest freshwater lake in China[J]. *Water*, 2014, 6(8): 2482 – 2500.
- [14] HUA Ding, HAO Xingming, ZHANG Ying, et al. Uncertainty assessment of potential evapotranspiration in arid areas, as estimated by the Penman-Monteith method[J]. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(1): 166 – 180.
- [15] VALLET COULOMB C, LEGESSE D, GASSE F, et al. Lake evaporation estimates in tropical Africa (Lake Ziway, Ethiopia)[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 245(1/2/3/4): 1 – 18.
- [16] METZGER J, NIED M, CORSMEIER U, et al. Dead Sea evaporation by eddy covariance measurements vs. aerodynamic, energy budget, Priestley–Taylor, and Penman estimates[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(2): 1135 – 1155.
- [17] XU C Y, SINGH V P. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation[J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(2): 305 – 319.
- [18] 王志杰, 李畅游, 贾克力, 等. 呼伦湖水面蒸发量计算及变化特征分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(3): 88 – 95. [WANG Zhijie, LI Changyou, JIA Keli, et al. Calculation and characteristics of Hulun Lake surface evaporation[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(3): 88 – 95. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 孙萌, 高斌, 肖伟华, 等. 近 61 年三峡库区潜在蒸发量时空演变规律及其驱动因素 [J]. *水电能源科学*, 2022, 40(5): 1 – 5. [SUN Meng, GAO Bin, XIAO Weihua, et al. Spatiotemporal variability of evapotranspiration in recent 61 years and its response to climate change in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(5): 1 – 5. (in Chinese with English abstract)]
- [20] HAO Xingming, ZHANG Shuhua, LI Weihong, et al. The uncertainty of penman-monteith method and the energy balance closure problem[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018.
- [21] A 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.
- [22] SHILO E, ZIV B, SHAMIR E, et al. Evaporation from Lake Kinneret, Israel, during hot summer days[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 528: 264 – 275.
- [23] SINGH R, SENAY G. Comparison of four different energy balance models for estimating evapotranspiration in the Midwestern United States[J]. *Water*, 2015, 8(1): 9.
- [24] SI Jianhua, FENG Qi, YU Tengfei, et al. Inland River terminal lake preservation: Determining basin scale and the ecological water requirement[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(7): 3327 – 3334.
- [25] 廖杰, 王涛, 薛娴. 黑河调水以来额济纳盆地湖泊蒸发量 [J]. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 228 – 232. [LIAO Jie, WANG Tao, XUE Xian. Lake's evaporation in the Ejin Basin since transferring water from the Heihe River[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(1): 228 – 232. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 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(4): 305 – 313. [SHI Chengxi, NIU Keyuan, CHEN Tianzhu, et al. The study of pan coefficients of evaporation pans of water[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1986(4): 305 – 313. (in Chinese with English abstract)]
- [27] SINHASHTHITA W, JEARANAITANAKIJ K. Improving KNN algorithm based on weighted attributes by Pearson correlation coefficient and PSO fine tuning [C]//2020-5th International Conference on Information Technology (InCIT). October 21-22, 2020, Chonburi, Thailand. IEEE, 2021: 27 – 32.
- [28] 雷震烁, 刘松涛, 葛杨, 等. 基于平均证据和焦元距离

- 的高冲突证据融合方法 [J]. *电光与控制*, 2021, 28(4): 6 – 10. [LEI Zhenshuo, LIU Songtao, GE Yang, et al. A high-conflict evidence fusion method based on average evidence and focal element distance[J]. *Electronics Optics & Control*, 2021, 28(4): 6 – 10. (in Chinese with English abstract)]
- [29] LIU Huizhi, FENG Jianwu, SUN Jihua, et al. Eddy covariance measurements of water vapor and CO₂ fluxes above the Erhai Lake[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(3): 317 – 328.
- [30] GERKEN T, BIERMANN T, BABEL W, et al. A modelling investigation into lake-breeze development and convection triggering in the Nam Co Lake Basin, Tibetan Plateau[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, 117(1): 149 – 167.
- [31] 张德朋. 利用多种方法计算巴丹吉林沙漠湖面蒸发量 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016. [ZHANG Depeng. Calculation of lake evaporation in Badain Jaran Desert by various methods[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 马己安, 冯克鹏, 李王成, 等. 基于水面蒸发量的宁夏中部干旱带土壤蒸发量估算研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(10): 35 – 41. [MA Ji'an, FENG Kepeng, LI Wangcheng, et al. Using water surface evaporation to estimate soil surface evaporation in arid regions in central Ningxia[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(10): 35 – 41. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 闵骞. 利用彭曼公式预测水面蒸发量 [J]. *水利水电科技进展*, 2001, 21(1): 37 – 39. [MIN Qian. Prediction of water surface evaporation by penman formula[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2001, 21(1): 37 – 39. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 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 study on inhibiting water surface evaporation of reservoir in arid region[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(1): 119 – 124. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 郭小娇, 石建省. 水分蒸散发研究国内外进展与趋势 [J]. *地质论评*, 2019, 65(6): 1473 – 1486. [GUO Xiaojiao, SHI Jiansheng. Global review of the research progress and trend of evapotranspiration[J]. *Geological Review*, 2019, 65(6): 1473 – 1486. (in Chinese with English abstract)]
- [36] DAVID R M. 水文学手册 [M]. 张建云, 李纪生, 译. 北京: 科学出版社, 2002. [DAVID R M. Handbook of hydrology[M]. ZHANG Jianyun, LI Jisheng, trans. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)]

编辑: 张若琳