

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.05.03

鄂尔多斯高原湖泊蒸发原位试验研究

许文豪¹, 王晓勇², 张俊², 尹立河², 贾伍慧¹, 朱立峰², 董佳秋², 孙芳强²

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083;

2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 鄂尔多斯高原分布有大量湖泊, 湖泊蒸发作为地表水的主要排泄方式, 是准确评价水资源的关键均衡项之一。研究湖泊蒸发对于认识区域水循环、水资源评价和湖泊生态环境保护等方面有着重要的现实意义和科学价值。然而该地区对于湖泊蒸发的实测资料有限, 大多通过折算法和公式法计算。本次研究在鄂尔多斯高原典型湖泊——木凯淖开展原位试验, 通过安置在湖泊中心的蒸发器实测水面蒸发, 分析蒸发与气象因素之间的相关性, 并将原位湖水蒸发和湖边陆面蒸发皿蒸发以及 Penman 公式理论值进行对比。研究表明, 湖水蒸发受湿度和气温两种因素影响较大; 湖泊水面蒸发与湖边陆面小蒸发皿的折算系数约为 0.85, 较前人研究偏大; 湖水蒸发受湖水盐度影响很小, 可以忽略; 与 Penman 公式计算结果相比, 相关性分析结果较高, 在缺乏实测资料时, 可通过 Penman 公式估算湖水蒸发。

关键词: 湖泊蒸发; 原位试验; 木凯淖; 鄂尔多斯高原

中图分类号: P641.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)05-0016-08

Research on in-situ test of lake evaporation in the Ordos Plateau

XU Wenhao¹, WANG Xiaoyong², ZHANG Jun², YIN Lihe², JIA Wuhui¹, ZHU Lifeng²,

DONG Jiaqiu², SUN Fangqiang²

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: A large number of lakes exist in the Ordos Plateau. Lake evaporation, as the main discharge of surface water, is one of the key equilibrium terms for accurate evaluation of water resources. Research on lake evaporation is of important practical significance and scientific value for understanding regional water circulation, evaluating water resources and ecological environmental protection of lakes. However, the actual data of lake evaporation in this area are limited, and most of them are calculated by the conversion method and formula method. In this work, an in-situ test was carried out near the Mukainao lake, a typical lake in the Ordos Plateau, to measure water surface evaporation with an evaporator placed in the center of the lake. In this paper the correlation between evaporation and meteorological factors is analyzed. The evaporation of the lake water in situ is compared with the evaporation in the small evaporator on the lakeside and the theoretical value by using the Penman Equation. The results indicate that evaporation of lake water is more affected by humidity and temperature. The conversion coefficient of lake evaporation and small evaporator on land surface is about 0.85, which is higher than that in the previous studies. The effect of salinity on evaporation of lake water can be negligible. Compared with the calculation result with the Penman formula, the correlation result is higher. The lake evaporation can be estimated with the Penman formula in the absence of measured data.

Keywords: Lake evaporation; in-situ test; Mukainao; Ordos Plateau

收稿日期: 2018-09-10; 修订日期: 2018-12-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41402226; 41472228); 中国地质调查局地调项目(DD20160293)

第一作者: 许文豪(1993-), 男, 硕士研究生, 从事水文地质学研究。E-mail: 941734230@qq.com

通讯作者: 王晓勇(1977-), 男, 高级工程师, 主要从事生态水文地质及水文水资源研究。E-mail: wxiaoyong@cgs.cn

水面蒸发是自然界中水循环和水量平衡的重要环节,几乎所有有关水资源和农业问题的研究,都离不开水面蒸发的分析与计算^[1]。在干旱-半干旱地区,降水量较少而蒸发强烈,水资源紧缺,生态环境脆弱,水面蒸发的研究对于认识区域气候、揭示水循环机理、评价水资源以及生态系统的评估管理等具有重要意义^[2]。

由于观测大水面蒸发量十分困难,国内外对自然水面蒸发直接观测较少,有前人在大型水体中通过涡度相关系统观测水面蒸发^[3-4]。国外有研究采用水面漂浮蒸发皿实测小型水体蒸发^[5],研究表明水体中原位试验测量蒸发明显低于陆面条件蒸发观测,开展原位试验观测蒸发更接近于水面实际蒸发。由于实测资料有限,水面蒸发量确定比较困难^[6-7],目前,通常是通过观测小面积水面蒸发折算后间接推求大面积的水面蒸发,即蒸发器(皿)折算法^[1]。折算法一般使用不同直径的蒸发器(皿)(如E-601型蒸发器、 $\phi 20$ cm蒸发皿)观测的数据^[8],通过折算系数校正获取水面蒸发量,如王永义经计算检验表明采用折算法具有可推广性^[9],何渊等研究鄂尔多斯盆地沙漠高原区湖泊蒸发选用E-601型和 $\phi 20$ cm蒸发皿监测蒸发数据^[10]。蒸发器(皿)测量一般在陆面条件下进行,蒸发器及周围空气的动力及热力条件与水体有很大不同,测得的蒸发量不能代表自然界真实的蒸发量。同时,由于蒸发皿折算系数受多种因素影响且随季节变化^[3,11],即使通过折算系数进行校正,但也不能获得水面蒸发的精确值。计算水面蒸发的另一种主要方法是通过各种蒸发模型计算理论值,常用的有Penman公式、Jesen-Haise公式及经验公式等。不同的公式方法存在约束条件,推广应用收到一定的限制,如Penman公式需要较全的气象数据等^[12],通过计算所得的理论蒸发量同样不能代表水体的真实蒸发量。

鄂尔多斯高原位于干旱-半干旱地区,特殊的地质条件与内陆水循环的封闭性形成了众多湖泊,水体是水资源的重要组成部分,也是湖泊生态系统的重要组成部分。该地区湖泊主要接受地下水补给,湖面蒸发是湖泊唯一的排泄方式。因此,湖泊蒸发是区域水循环的关键过程,对水文循环研究有重要意义。同时,湖泊蒸发作为区域水平衡中重要均衡项,是准确评价水资源的关键项。因此,湖水蒸发研究对于认识区域水循环、水资源计算评价和湖泊生态环境保护等方面有着重要的科学价值和现实意义^[13]。

本次研究选择鄂尔多斯高原木凯淖为典型湖泊,

开展湖泊蒸发原位试验研究,通过湖泊蒸发量实测,分析蒸发量与各个气象要素之间的相关性,确定湖泊蒸发的影响因子,为鄂尔多斯高原湖水蒸发机理研究提供基础依据。通过湖面原位实测与陆面不同条件蒸发试验对比,获取适合本地区小型蒸发皿与湖水蒸发的折算系数,并通过与Penman公式计算蒸发量对比,分析Penman公式在本地区的适用性,为该地区湖泊蒸发提供依据和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鄂尔多斯高原位于我国内蒙古自治区西南部,总面积约 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。鄂尔多斯高原属干旱-半干旱大陆性气候,多年平均降水量约300 mm,该区降水较少且主要集中在夏季,蒸发强烈,年均潜在蒸发量是降水量的7倍。鄂尔多斯高原地势从西北向东南缓慢倾斜,海拔在1 300~1 500 m。北部为库布其沙漠,南部为毛乌素沙漠和滩地,中部隆起,海拔1 400~1 700 m,为鄂尔多斯台地。鄂尔多斯高原分布有大量湖泊,大多数为咸水湖泊,溶解性总固体较高,且湖水深度较浅。由于干旱少雨,蒸发量大,大多湖泊水质较差。尤其在毛乌素沙漠,湖泊更为多见,集水面积在 1 km^2 以上的湖泊有近70个^[10,14-15]。

本次研究选在鄂尔多斯高原较为典型的湖泊——木凯淖开展湖泊蒸发原位试验研究。木凯淖地处毛乌素沙漠北缘,属典型的干旱-半干旱气候。湖面海拔约1 370 m,面积约 2 km^2 ,湖水水深0.3~1 m,随季节波动,湖水溶解性总固体约1.5 g/L。根据距离木凯淖最近的乌审召气象站的长期气象资料(2000—2017年)显示,年平均降水量330 mm,年变化系数为0.3,70%以上的降水发生在6—9月。 $\phi 20$ cm蒸发皿测得的年平均蒸发量2 289 mm。

1.2 原位试验方法

1.2.1 试验方案

为测得木凯淖湖水蒸发量,本次研究在湖中心位置放置E-601型蒸发器,以钢架平台固定(图1),保持蒸发器平稳。为避免盐度变化对蒸发的影响,蒸发器中加入浅层湖水,每隔3~4 d进行人工换水,首先将蒸发皿中经过蒸发的湖水全部清空,然后重新加入湖水至与湖水面齐平,以避免蒸发富集引起的湖水盐度增加对蒸发的影响。在人工换水前后,人工测量换水前后蒸发皿中水位,用以对比校正蒸发皿中水位计监测数据。另外,为对比湖水蒸发和陆面蒸发以及咸淡水

等不同条件下的蒸发量,在湖泊附近的空旷位置安装两个 $\varphi 20$ cm 小型蒸发皿,用支架固定,器口距地面 70 cm。两个蒸发皿分别加入湖水和淡水,用来观测不同盐度对蒸发量的影响。小型蒸发皿中水位高度 7 cm,维持蒸发在 5d 以上,加水间隔为 3~4d。原位试验观测时间为 2017 年 6 月 9 日—9 月 9 日。

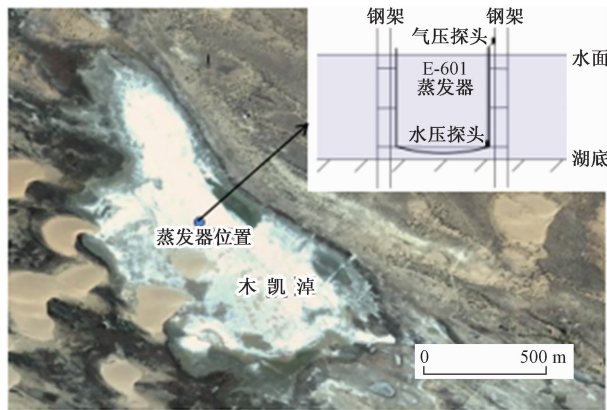


图 1 研究区位置及原位试验图

Fig. 1 Location of the study and in-situ test

1.2.2 数据获取

在 E-601 蒸发器底部安装测量精度 ± 1 mm 的水压力传感器 (Keller DCX-22A, Winterthur, Switzerland), Keller 同时配有气压传感器探头,固定于钢架平台。Keller 监测气温和水温数据,监测间隔为 1h。在距离木凯淖湖边 200 m 处放置自动雨量筒 (52203 RM Young rain gauge, R. M. Young Co., Michigan, USA), 安装高度为 70 cm, 测量精度 0.2 mm, 监测降雨量数据。同时,收集乌审召气象站 (木凯淖东南 20 km) 湿度、风速等气象要素的日平均数据。另外从 Earth Data 数据网站下载日净辐射数据 (<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?keywords=GLDAS>), 空间精度 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间间隔 3h。

计算通过 E-601 蒸发器中水压与气压差值分别获取该时段初和时段末的水位,水位差值加上该时段内的降雨量得到蒸发实测值。如计算日蒸发量:由当天 0:00 时刻水位与第二天 0:00 时刻水位的差值加上该天降雨量。

$\varphi 20$ cm 小型蒸发皿每次加水前后用直尺测量水面距皿口高度。计算某一时段小蒸发皿蒸发量:该时段初与时段末的读数差值加上该时段内降雨量。

1.3 多元线性回归分析

湖水蒸发受到多个气象因素的影响,本次研究通过建立多元线性回归模型对湖水蒸发的影响因子进行

分析。根据统计学方法^[16],首先对因变量和自变量系列数据进行归一化处理:

$$x_n = \frac{x - \text{Min}}{\text{Max} - \text{Min}}$$

将归一化后的数据输入 SPSS 统计分析工具软件中,建立蒸发量与气象要素的多元线性回归模型。采用逐步回归分析方法进行变量引入。逐步回归分析法可以从相关性很强的多个自变量中选择最显著的因子放入回归模型,避免多重共线性问题^[17]。采用 F 检验概率值作为判断标准,使用系统默认值,进入概率小于等于 0.05,移出概率大于等于 0.1。

1.4 水面蒸发彭曼公式

在计算水面蒸发的模拟公式中,最常用的方法是 Penman 公式^[2]:

$$E = \frac{(\Delta R_n + \gamma E_a)}{(\Delta + \gamma)}$$

式中: E ——水面蒸发量/ $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$;

R_n ——净辐射的蒸发当量/ $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$;

E_a ——干燥力/ $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$;

Δ ——饱和水汽压与温度曲线的斜率/ $(\text{hPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$;

γ ——干湿球常数/ $(\text{hPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$ 。

1.5 Nash 效率系数

Nash 效率系数 (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient) 简称 NSE ,一般用来验证水文模型结果:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2}$$

式中: Q_o ——观测值;

Q_m ——模拟值;

Q_t —— t 时刻值;

$\bar{Q}_o$ ——观测值总平均。

NSE 接近 1,表示模型精度高,可信度较高; NSE 接近 0,表示模拟结果接近观测值平均值水平,即总体结果可信,但模拟误差较大; NSE 小于 0,则模型不可信,模拟失败。

2 结果分析

2.1 蒸发量变化及影响因素分析

2.1.1 日蒸发量及气象因素变化特征

日蒸发量及降水量随时间变化见图 2(a)。观测期内木凯淖实测总蒸发量 603.3 mm,平均日蒸发量 6.49 mm,变差系数 (C_v) 0.43,日蒸发量波动剧烈,最

大日蒸发量接近 13 mm, 最小不足 1 mm, 蒸发强烈时日蒸发量可达蒸发弱时的 17 倍。观测期内, 日蒸发量的整体变化趋势从 6 月中旬至 7 月中旬呈上升趋势,

在 7 月下旬出现一系列低值, 而这段时期降雨量大, 8 月上旬恢复较高的蒸发, 至 9 月上旬日蒸发量呈现下降趋势(图 3)。

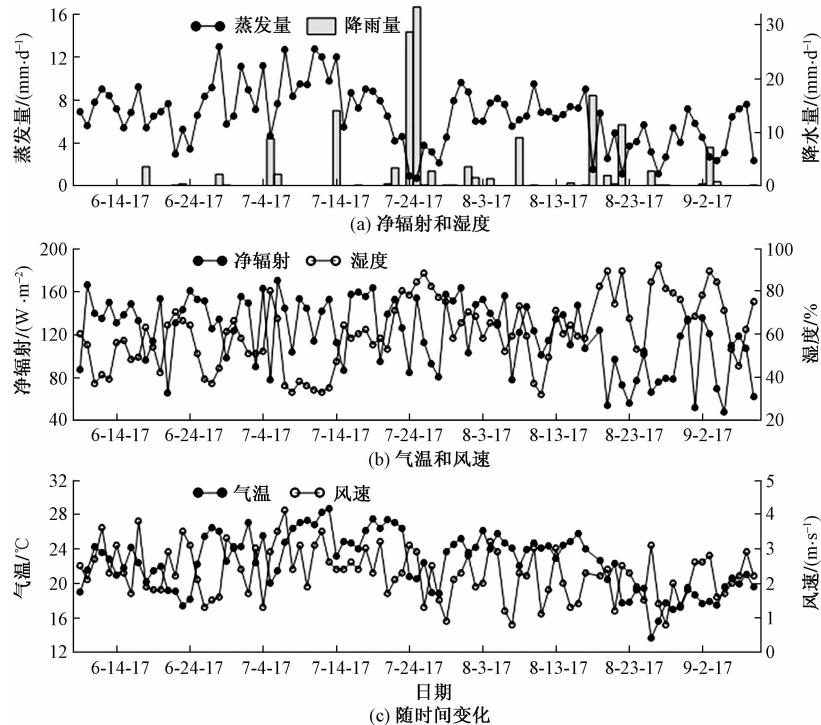


图 2 日蒸发量和降水量(a)、净辐射和湿度(b)、气温和风速(c)随时间变化图

Fig. 2 Temporal variations in (a) daily evaporation and precipitation, (b) net radiation and humidity, and (c) air temperature and wind speed

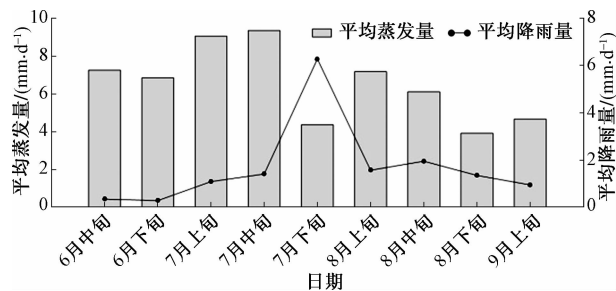


图 3 旬平均蒸发量与降雨量

Fig. 3 Average evaporation and precipitation at ten-day's scale

观测期内有降水天数 35d, 占总天数的 38%, 总降水量 159.8 mm。一般在降水较多时对应微弱的蒸发, 7 月下旬平均日降雨量较大, 对应的该时段内湖水蒸发较少, 平均日蒸发量较低。

观测期内日平均湿度及净辐射随时间变化过程见图 2(b)。日平均湿度从 6 月上旬到 7 月中旬整体下降, 而在 7 月下旬日平均湿度较高, 到 8 月上旬恢复到较低值后整体呈上升趋势。这与日蒸发量的变化呈现相反的趋势。日平均净辐射在 47.40 ~

169.71 W/m² 间波动, 其波动趋势整体上与湿度呈现一定的负相关。

由日平均气温和风速随时间变化(图 2(c))可以看出, 日平均气温在整体趋势上, 由 6 月上旬到 7 月中旬不断上升, 在 7 月下旬下降, 8 月上旬恢复较高气温后到 9 月上旬呈现整体下降趋势。这与日蒸发量的波动规律相似。观测期内日平均风速随时间在 0.8 ~ 4.1 m/s 之间上下波动。

2.1.2 日蒸发量与气象因素相关分析

日蒸发量与气象因素的波动规律存在一定的相关性。将日蒸发量与各气象要素日平均值进行相关分析, 见图 4。通过散点图拟合线性方程, 根据决定系数大小, 蒸发量与湿度的相关性最好 ($R^2 = 0.59, p < 0.01$), 与气温的相关性次之 ($R^2 = 0.47, p < 0.01$)。蒸发量与净辐射也呈现较好的相关性, 其 R^2 为 0.23, $p < 0.01$ 。而蒸发量与风速相关性较差, R^2 为 0.05, $p < 0.05$ 。

由此可见, 蒸发受湿度影响最大, 日平均湿度较大一般对应较小的蒸发; 受气温影响次之, 气温越高则蒸

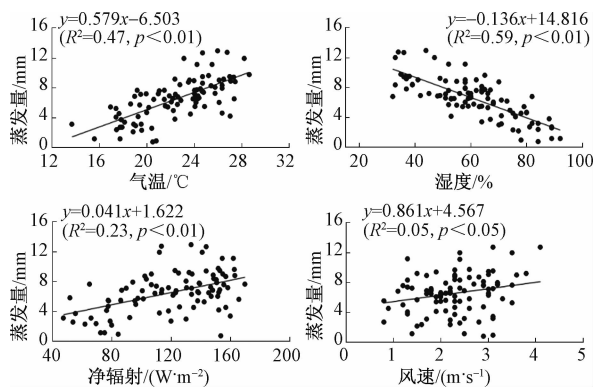


图4 日蒸发量与气温、湿度、净辐射及风速关系图

Fig. 4 Relationship between daily evaporation and air temperature, humidity, net radiation and wind speed

发越强烈。在日尺度上净辐射对蒸发的影响程度一般。此次研究发现,在日尺度上蒸发量与风速相关性很弱,可能原因是风速在一天内被平均后对湖水蒸发的影响淡化。

2.1.3 多元线性回归模型

日蒸发量和气温、湿度、净辐射、风速日平均数据建立的多元线性回归模型为:

$$E_0 = -0.462\rho + 0.373T_A + 0.178S_w + 0.395$$

式中: E_0 ——日蒸发量;

ρ ——湿度;

T_A ——气温;

S_w ——表示风速。

回归方程的决定系数 $R^2 = 0.69$, 说明模型拟合度好。模拟结果采用 Nash 效率系数 NSE 评价。利用多元线性回归模型得到的蒸发量模拟值与实测日蒸发量计算多元线性回归模型 $NSE = 0.69$, 证明模拟效果较好。模型结果中包含湿度、气温、风速, 剔除了净辐射, 对湖水蒸发影响显著性排序依次为湿度、气温和风速。湿度和气温是对湖水蒸发影响最大的前两个因素, 这与相关分析法得出的结论一致。

2.2 不同方法蒸发量对比

2.2.1 不同试验条件蒸发量对比

将不同试验条件下的 $\varphi 20$ cm 蒸发皿蒸发量与湖内蒸发量进行对比, 见表 1。观测期内总蒸发量湖内最小, 累计蒸发 129.4 mm, 湖边陆面加入淡水和湖水的小型蒸发皿分别累计蒸发 152.4 mm、151.4 mm, 蒸发量接近一致。逐时段内, 湖内蒸发量均小于湖边陆面小型蒸发皿蒸发量, 湖边陆面小型蒸发皿蒸发量差值很小。日平均蒸发量湖内 8.6 mm, 约为湖边陆面 $\varphi 20$ cm 蒸发皿的 85%。

表1 不同试验条件累计蒸发量

Table 1 Cumulative evaporation under different

时段	test conditions /mm		
	湖内 E-601 型蒸发器	湖边陆面 $\varphi 20$ cm 蒸发皿(淡水)	湖边陆面 $\varphi 20$ cm 蒸发皿(湖水)
06-28—07-01	22.4	28.4	25.4
07-01—07-04	21	25	25
07-04—07-09	38	46	49
07-09—07-13	48	53	52
合计	129.4	152.4	151.4
日平均值	8.6	10.2	10.1

蒸发皿加入淡水和湖水蒸发量一致, 可见蒸发皿中水的蒸发受盐度 ($< 1.5 g/L$) 影响较小, 可以忽略。湖内蒸发量均小于湖边陆面小型蒸发皿蒸发量。水体条件下, 由于水面大量水分蒸发, 其湿度一般大于陆面条件, 另外随着气温上升, 大水体水温的增长幅度远小于小型蒸发皿中的水温, 因此水面实际蒸发小于小型蒸发皿中水分蒸发。根据小型蒸发皿换算湖水蒸发需折算系数的校正, 本次研究表明, 木凯淖湖蒸发与湖边 $\varphi 20$ cm 小型蒸发皿的折算系数约为 0.85。

2.2.2 与 Penman 公式对比

将逐日蒸发量与 Penman 公式计算结果做对比, 两者逐日变化见图 5(a)。Penman 公式计算累计蒸发

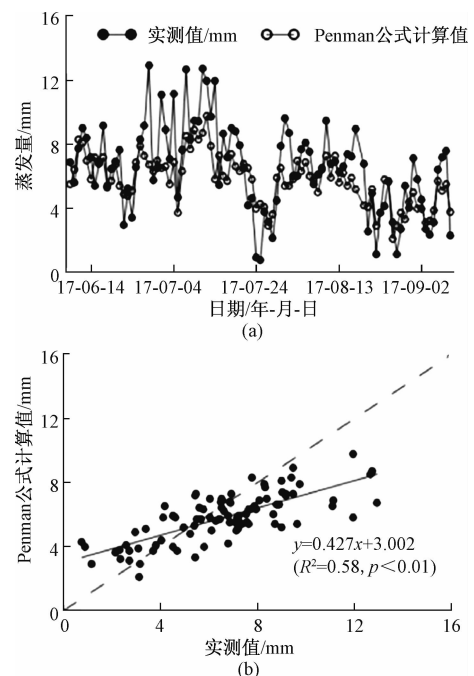


图5 实测日蒸发量与 Penman 公式计算结果动态曲线及关系图

Fig. 5 Dynamic variation (a) and relationship (b) between the observed results and estimated results by using the Penman Equation for daily evaporation

533.1 mm, 日平均 5.79 mm (实测值分别为 603.3 mm、6.49 mm), 均略低于实测值。Penman 公式计算值波动幅度较小, 最大日蒸发量 9.8 mm, 最小日蒸发量 2.1 mm, C_v 为 0.26; 实测日蒸发量波动幅度较大, C_v 达到 0.43。蒸发很强烈时, 如在 7 月 11 日和 12 日蒸发量均相对较高, 实测蒸发量高于 Penman 公式计算值; 而在蒸发很微弱时, 如 7 月 24 日和 25 日蒸发量均相对很低, 实测值则低于计算值。

由图 5(b) 可以看出, 实测蒸发量和 Penman 公式计算值相关系数 $R^2 = 0.58$, $p < 0.01$, 相关性较好。计算 Nash 效率系数 $NSE = 0.46$, 说明使用 Penman 公式计算日蒸发量效果较好。当蒸发量偏离平均值时, 使用 Penman 公式存在误差; 当蒸发很弱时, 使用 Penman 公式高估湖水蒸发, 计算日蒸发量偏大; 当蒸发强烈时, 使用 Penman 公式低估湖水蒸发, 计算结果偏低。

3 讨论

3.1 蒸发量与气象因素相关性

湖水蒸发受多个气象因素的影响, 大量研究表明, 影响干旱—半干旱水面蒸发的因素包括气温、水汽压差、风速、湿度和辐射等^[2,10,18]。通过相关和多元统计回归模型两种方法分析, 结果表明日蒸发量与湿度、气温、净辐射和风速间有一定的相关性, 这与前人的结论一致。

研究显示, 不同因素对蒸发影响的显著性中蒸发量受气温影响较显著, 与其他前人研究结论一致, 如徐仁通过通径分析得出平均气温是水面蒸发量的主要影响因素^[19], 李慧菁采用影响因子分析法得出气温对水面蒸发影响占主要地位等^[20]。本次研究表明, 湿度对湖水蒸发影响显著。对于湿度与水面蒸发相关性, 目前有不同观点, 有些学者认为, 蒸发与湿度相关性大, 如方晓明等通过研究表明日蒸发量与日均相对湿度显著负相关^[21], 而有些学者认为蒸发受湿度影响不明显^[18]。

3.2 与小型蒸发皿对比

本次研究表明, 湖内蒸发量小于陆面小型蒸发皿观测蒸发量, 这符合普遍认为的小型蒸发皿观测蒸发量大于水面实际蒸发的规律^[1], 如 Masoner J R 在美国的研究表明, 实测蒸发速率明显小于陆面蒸发皿蒸发速率^[5]。水面蒸发与小型蒸发皿折算系数在各个地区不同季节取值不一^[22]。本次研究表明鄂尔多斯高原地区夏季湖水蒸发与 $\phi 20$ cm 小型蒸发皿的折算系数约为 0.85。根据前人研究, 黄河流域干旱半干旱地

区 6—9 月小型蒸发皿与 20 m² 蒸发池 (近似代表湖泊蒸发) 的折算系数多年平均值介于 0.634 ~ 0.677^[23], 本次结果偏高。不同的结果与试验方法有关, 本次在湖泊内部进行原位试验, 所得折算系数对本地区具有一定的参考性。

此次研究发现小型蒸发皿中加入水的盐度 (< 1.5 g/L) 对湖水蒸发量影响不大, 可以忽略。这与前人在本地区的研究结论一致^[10], 并符合李阳等在干旱地区盐度水面蒸发试验研究得出的规律, 水体盐度在 0.8 ~ 10 g/L 范围内对蒸发量影响较小^[24]。

3.3 Penman 公式适用性

Penman 公式是国内计算水面蒸发时常用的方法, 然而对于不同的地区, 其适用性存在差别。有些研究发现, Penman 公式计算结果与蒸发实测值接近, 精度较高, 如前人在半干旱沙地—草甸区^[2]的研究, 而有些学者研究表明 Penman 公式模拟水面蒸发效果较差, 如韩鹏飞等在巴丹吉林沙漠的研究^[17]。本次研究将实测湖泊蒸发量与 Penman 公式计算结果进行对比, 发现两者相关性较高, 效果较好。

4 结论

(1) 鄂尔多斯高原湖泊水面蒸发受湿度、气温影响最大。

(2) 小型蒸发皿监测蒸发量高于湖泊蒸发, 与湖水蒸发折算系数为 0.85。小型蒸发皿中加入湖水和淡水蒸发量无明显差距, 水的盐度 (< 1.5 g/L) 对湖水蒸发影响很小, 可以忽略。

(3) 使用 Penman 公式估算湖泊蒸发量效果尚好。当蒸发很弱时, 使用 Penman 公式计算日蒸发量偏大, 而当蒸发强烈时, 使用 Penman 公式计算结果则偏低。

受限于本次原位试验观测时段, 未能就湖泊年蒸发量进行分析和讨论, 后续工作将延长观测期, 以深入分析不同季节的蒸发量变化规律及影响因素。

参考文献:

- [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 X L, FEI L J, LI X J. Research and development of water surface evaporation in China [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(4): 17 - 22. (in Chinese)]
- [2] 童新, 刘廷玺, 杨大文, 等. 半干旱沙地—草甸区水面蒸发模拟及其影响因子辨识[J]. 干旱区地理, 2015, 38(1): 10 - 17. [TONG X, LIU T X, YANG

- D W, *et al.* Simulating evaporation from a water surface for the sand-meadow ecotone of the semiarid region in North China [J]. *Arid Land Geography*, 2015, 38(1): 10–17. (in Chinese)]
- [3] 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 X S, LI M, WANG S G, *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)]
- [4] BLANKEN P D, ROUSE W R, CULF A D, *et al.* Eddy covariance measurements of evaporation from Great Slave Lake, Northwest Territories, Canada [J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(4): 1069–1077.
- [5] MASONER J R, STANNARD D I, CHRISTENSON S C. Differences in evaporation between a floating pan and class a pan on land 1 [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2010, 44(3): 552–561.
- [6] TANNY J, COHEN S, ASSOULINE S, *et al.* Evaporation from a small water reservoir: Direct measurements and estimates [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 351: 218–229.
- [7] 张强, 张之贤, 问晓梅, 等. 陆面蒸散量观测方法比较分析及其影响因素研究[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(5): 538–547. [ZHANG Q, ZHANG Z X, WEN X M, *et al.* Comparisons of observational methods of land surface evapotranspiration and their influence factors [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(5): 538–547. (in Chinese)]
- [8] 裴步祥. 蒸发和蒸散的测定与计算[M]. 北京: 气象出版社, 1989. [PEI B X. Measurement and calculation of evaporation and evapotranspiration [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1989. (in Chinese)]
- [9] 王永义. 水面蒸发计算方法及其检验[J]. *地下水*, 2006, 28(1): 15–16. [WANG Y Y. Calculation method and test of evaporation on water surface [J]. *Groundwater*, 2006, 28(1): 15–16. (in Chinese)]
- [10] 何渊. 鄂尔多斯盆地沙漠高原区湖泊和潜水面蒸发能力研究[D]. 西安: 长安大学, 2006. [HE Y. Study on lakes and evaporation capacity of water table in the desert plateau of the Ordos basin [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006. (in Chinese)]
- [11] GRISMER M, ORANG M, SNYDER R, *et al.* Pan evaporation to reference evapotranspiration conversion methods [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2002, 128(3): 180–184.
- [12] WINTER T C, ROSENBERRY D O, STURROCK A M. Evaluation of 11 equations for determining evaporation for a small lake in the north central United States [J]. *Water Resources Research*, 1995, 31(4): 983–993.
- [13] 吴敬禄, 马龙. 新疆干旱区湖泊演化及其气候水文特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(2): 135–143. [WU J L, MA L. Lake evolution and climatic and hydrological changes in arid zone of Xinjiang [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(2): 135–143. (in Chinese)]
- [14] 陈晓江. 鄂尔多斯高原湖泊动态及其生态系统功能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2016. [CHEN X J. Dynamic and ecosystem function research of the lakes in Ordos Plateau [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2016. (in Chinese)]
- [15] 张俊, 侯荣哲, 尹立河, 等. 盆地地下水流系统形成与影响因素分析[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(4): 8–14. [ZHANG J, HOU R Z, YIN L H, *et al.* Formation and influencing factors of regional groundwater flow systems [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(4): 8–14. (in Chinese)]
- [16] 贾俊平. 统计学[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008. [JIA J P. Statistics [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2008. (in Chinese)]
- [17] 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 P F, WANG X S, HU X N, *et al.* Dynamic relationship between evaporation and meteorological factors in lakes in the Badain Jaran Desert [J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(5): 1012–1020. (in Chinese)]
- [18] 徐继红. 干旱区影响水面蒸发的气象因素多元回归分析[J]. *水利规划与设计*, 2016(7): 62–64. [XU J H. Multiple regression analysis of meteorological factors influencing surface evaporation in arid area [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2016(7): 62–64. (in Chinese)]
- [19] 徐仁. 水面蒸发量与各气象因素关系的通径分析[J]. *地下水*, 2010, 32(4): 133–134. [XU R. Analysis on relations between water surface evaporation and meteorological factors based on path analysis [J]. *Groundwater*, 2010, 32(4): 133–134.

- (in Chinese)]
- [20] 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 H J, JAERHENG·ARHATI, CHENG Y, *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)]
- [21] 方晓明,梁艳,刘峰,等. 影响平阳地区蒸发量的主要气象因素分析[J]. 现代农业科技,2012(4):11-13. [FANG X M, LIANG Y, LIU F, *et al.* Analysis on the impact of main meteorological factors on evaporation in Pingyang area [J]. Modern Agricultural Science and Technology,2012(4):11-13. (in Chinese)]
- [22] 金栋梁,刘子伟. 蒸发量评价简述[J]. 水资源研究,2005,26(2):11-14. [JIN D L, LIU Z W. Introduction of evaporation evaluation[J]. Journal of Water Resources Research,2005,26(2):11-14. (in Chinese)]
- [23] 梁贵生,卢寿德,蔡明奎. 干旱地区小型蒸发器的折算系数及气候推算[J]. 黄河水利职业技术学院学报,2002(03):37-39. [LIANG G S, LU S D, CAI M K. Conversion coefficient and climate prediction of small-scale evaporator in arid area[J]. Journal of Yellow River Conservancy Technical Institute,2002(3):37-39. (in Chinese)]
- [24] 李阳,贾瑞亮,周金龙,等. 干旱地区高盐度水面蒸发试验研究[J]. 水文,2016,36(6):24-27. [LI Y, JIA R L, ZHOU J L, *et al.* Experimental study on high salinity water surface evaporation in arid areas [J]. Journal of China Hydrology,2016,36(6):24-27. (in Chinese)]

编辑:张若琳

(上接第15页)

- [11] 李智民,刘云彪,赵德君,等. 鄂北严重缺水地区地下水富集模式与找水实践[J]. 资源环境与工程,2014,28(6):899-903. [LI Z M, LIU Y B, ZHAO D J, *et al.* Groundwater enrichment model and water exploration in severe water shortage areas in northern Hubei Province [J]. Resources Environment & Engineering, 2014, 28 (6): 899 - 903. (in Chinese)]
- [12] 陈常庆,黄守贵,黄远华,等. 核磁共振在鄂北缺水丘陵地区的找水应用[J]. 工程勘察,2008(8):69-74. [CHEN C Q, HUANG S G, HUANG Y H, *et al.* Application of MRI in water exploration in water lacking hilly area of northern Hubei province [J]. Geotechnical Investigation & Engineering, 2008 (8): 69 - 74. (in Chinese)]
- [13] 赵德君. 江汉平原及鄂北岗地地下水资源的开发利用[J]. 资源环境与工程,2004,18(4):69-72. [ZHAO D J. Development and utilization of groundwater resources in Jiangnan Plain and north Hubei plateau [J]. Resources Environment & Engineering, 2014,18(4):69-72. (in Chinese)]
- [14] 张陵,胡祥胜,关义涛,等. 江汉平原第四纪含水层系统特征[J]. 资源环境与工程,2016,30(6):895-898. [ZHANG L, HU X S, GUAN Y T, *et al.* Characteristics of Quaternary aquifer system in Jiangnan Plain [J]. Resource Environment & Engineering,2016,30(6):895-898. (in Chinese)]
- [15] 何国峰,张云,孙铁,等. 周期性开采和回灌条件下浅层地下水位变化特征研究——以天津滨海新区为例[J]. 水文地质工程地质,2016(6):27-34. [HE G F, ZHANG Y, SUN T, *et al.* Variation characteristics of shallow groundwater levels under periodic pumping and recharge test: exemplified by Tianjin Binhai New Area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016 (6): 27 - 34. (in Chinese)]
- [16] 谭伟,刘云彪,张军,等. 孝感城区地下水开发利用及监测体系建设[J]. 资源环境与工程,2013,27(3):279-283. [TAN W, LIU Y B, ZHANG J, *et al.* Development, utilization of groundwater and Construction of Monitoring System in Xiaogan [J]. Resources Environment & Engineering, 2013, 27 (3): 279 - 283. (in Chinese)]
- [17] 潘娜娜,冯雄彪,方星萍. 孝感市地下水资源保护利用与对策[J]. 科技创新导报,2016,13(1):76-78. [PAN N N, FENG X B, FANG X P. Protection and utilization of groundwater resources in Xiaogan and its countermeasures [J]. Science and Technology Innovation Herald,2016,13(1):76-78. (in Chinese)]

编辑:张若琳