

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2024.03.004

不同面积蒸发池水温特征及 Penman 模型改进

陈军锋¹, 张淑煜¹, 杜琦², 薛静¹, 杨晓俊²

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 山西太原 030024; 2. 山西省水文水资源勘测总站太谷均衡实验站, 山西晋中 030600)

摘要: 分析蒸发池水温特征可深入认识蒸发池能量平衡特性, 研究 Penman 模型计算误差来源并改进, 对农业计划、水源评估和水文预报具有重要意义。基于太谷均衡实验站3个不同面积蒸发池的水温、蒸发量及气象数据, 分析各蒸发池的垂向水温分布和蒸发量的变化特征, 基于 Penman 模型探究适合3个蒸发池的模型参数。结果表明: 1 m²和5 m²蒸发池4—8月水温随水深增加而显著降低, 20 m²蒸发池各月水温分布均比较均匀, 且水温更高; 1 m²和5 m²蒸发池各月蒸发量相近, 与净辐射变化趋势一致, 20 m²蒸发池蒸发峰值滞后于净辐射峰值3个月; Penman 模型中加入反映除净辐射外能量的综合影响参数可提高模型计算精度, 夏季尤为明显, 1、5、20 m²蒸发池夏季的参数值分别为3.5、3.3和2.1。

关键词: 水面蒸发; 蒸发池; 水温; Penman 模型

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2024)03-0400-08

蒸发是水循环和能量循环的关键环节, 蒸发器皿是蒸发能力的直接观测, 因其简便性、低成本和实用性广泛应用于农业计划、水源评估和水文预报^[1-2]。研究器皿蒸发可以深入了解蒸发的物理机制和影响因素, 为进一步研究蒸发提供基础数据和理论支持。

水面蒸发有多种估算方法, 其中, 机理性方法主要考虑水汽传输和能量平衡2种机制^[3]。Penman 首先提出了一种结合空气动力学和太阳辐射驱动蒸发的半经验模型, 是目前应用最广泛的开放水域蒸发模型^[4-6], 其隐含的传热与传质系数之比(β)的值为1, 模型物理原理可靠, 精度较高。而器皿蒸发与开放水域不同, 蒸发皿侧壁拦截了额外的辐射并增强了热交换^[7], 使得 Penman 模型不能用于计算蒸发皿蒸发量。因此, Rotstayn 等基于 Penman 模型将 Linacre 的辐射分量和 Thom 等的空气动力学分量相结合开发了 PenPan 模型($\beta = 2.1$), 可以准确估算月尺度下美国 A 类蒸发皿的蒸发量^[2,8-9]; Yang 等^[10]改进了 PenPan 模型, 得出适用于中国 D20 蒸发皿的 β 为5; Lim 等^[9]认为 PenPan 模型中的辐射公式相对简化, 高估了辐射项对蒸发量的贡献, 将模型改进为 PenPan-V2 模型($\beta = 1.8$); Wang 等^[11]在 Lim 等^[9]研究的基础上开发了 PenPan-V3 模型, 得出中国 D20 蒸发皿的 β 为4.4, E601 蒸发皿的 β 为2.0。

自20世纪50年代起, 中国在许多地区建立了不同大小的蒸发皿和蒸发池进行小型水体蒸发的观测和研究^[12]。大型蒸发池的蒸发过程相比蒸发皿更接近实际水体, 在研究中多用其代表临近浅水湖泊或水库的蒸发量, 被国际气象组织推荐^[12]。基于北京官厅和河南三门峡水库20 m²蒸发池资料, 王菱等^[13]对 Penman 公式的加权因子进行高度修正。但埋入土壤中的蒸发池未做隔热处理时, 与土壤之间存在较大的热量交换, 而小型水体与土壤、沉积物之间存在较大的热量传递^[14], 在使用 Penman 模型估算蒸发量时不可忽略, 相关研究未考虑小型水体不同传热面积的影响。

收稿日期: 2023-11-07; **网络出版日期:** 2024-04-02

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20240401.1204.002>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41502243); 山西省自然科学基金资助项目(202203021221048)

作者简介: 陈军锋(1980—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 教授, 博士, 主要从事水文水资源方面研究。

E-mail: chenjunfeng@tyut.edu.cn

通信作者: 张淑煜, E-mail: zhangshuyu39@163.com

本研究从考虑蒸发池存在额外传热面积的角度分析 Penman 模型的误差来源, 针对不同面积蒸发池能量平衡特性和蒸发量计算问题, 以山西省水文水资源勘测总站太谷均衡实验站不同规格的蒸发池为主要试验设备, 分析面积分别为 1、5、20 m², 水深为 200 cm 的蒸发池月尺度下垂向水温分布特征, 探究不同面积蒸发池与土壤之间能量交换的差异及蒸发量的特征, 利用遗传算法优化求解 3 个不同面积蒸发池的 β' 值, 用来反映蒸发池除辐射之外的能量交换的影响, 提高模型计算精度, 为准确计算太原盆地小型水体蒸发量提供参考。

1 数据资料与方法

1.1 数据资料

本研究选择山西省水文水资源勘测总站太谷均衡实验站(112°30'E—112°33'E, 37°26'N—37°27'N)面积分别为 1、5、20 m², 水深为 200 cm 的 3 个蒸发池为研究对象, 各蒸发池为埋入型, 蒸发池与土壤之间未做特殊处理, 存在热量交换, 池口距地面 20 cm。蒸发池设有蒸发传感器和水温传感器, 用来监测蒸发池的蒸发量和不同深度处水温, 水温监测位置分别位于水面以下 5、25、45、65、85、105、125、145、165 和 185 cm 处。蒸发传感器量程为 0~200 cm, 分辨率为 0.1 mm, 精度为 ± 0.1 mm; 水温传感器量程为 -40~80 °C, 分辨率为 0.1 °C, 精度为 ± 0.1 °C。气象要素(太阳辐射、风速、大气压等)由地面气象站监测。气象数据、水面蒸发量和水温数据均自动采集, 频率为 1 次/h, 监测时间为 2021—2022 年的 4—10 月(无冰期)。

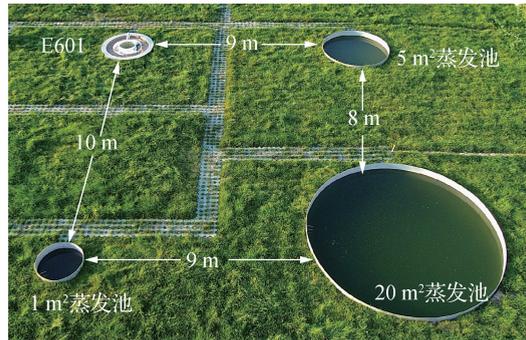


图1 水面蒸发试验平面布置

Fig.1 Installation and arrangement of surface evaporation experiment

1.2 研究方法

1.2.1 Penman 模型

利用月平均气象数据计算蒸发池的月尺度蒸发量^[15]:

$$E = \frac{sR_n + \gamma f(u)(e_a^* - e_a)}{\lambda(s + \gamma)} \quad (1)$$

式中: E 为月蒸发量, mm/月; λ 为蒸发潜热, 约为 2.45 MJ/kg; s 为气温为 T_a 时温度—饱和水汽压曲线的斜率, kPa/°C; γ 为湿度常数, 约为 0.066 kPa/°C; R_n 为净辐射, MJ/(m²·月); e_a^* 、 e_a 分别为气温为 T_a 时的饱和水汽压和大气水汽压, kPa; $f(u)$ 为风速函数。

不同面积水体的风速函数建议为^[16]

$$f(u) = 30(2.36 + 1.67u_2)^{A-0.05} \quad (2)$$

式中: A 为水体的面积, m^2 ; u_2 为水面以上 2 m 处的风速, m/s 。

1.2.2 能量成分估算方法

净辐射可由式(3)表示^[17]:

$$R_n = R_s - R_{sr} + R_a - R_{ar} - L_{out} = (1 - \alpha_s)R_s + (1 - \alpha_a)\varepsilon_a\delta(T_a + 273.15)^4 - \varepsilon_w\delta(T_s + 273.15)^4 \quad (3)$$

$$\varepsilon_a = 0.536 + 0.128\ln(1 + 0.1e_a) \quad (4)$$

式中: R_s 为太阳向下短波辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$, 由气象站直接测得; R_{sr} 、 R_a 、 R_{ar} 、 L_{out} 分别为水面向上反射短波辐射、大气下行长波辐射、水面向上反射长波辐射、水体辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$; α_s 为水面短波辐射反射率(0.06); α_a 为水面长波辐射反射率(0.03); ε_a 为大气发射系数^[18]; ε_w 为水的发射系数(0.97); δ 为玻尔兹曼常数, 其值为 $1.47 \times 10^{-7} \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4 \cdot \text{月})$; T_a 和 T_s 分别为气温和水面温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

1.2.3 改进模型

Penman 模型在应用于蒸发池时, 能量项中未考虑水体与土壤之间热量交换的影响, 故以 β' 反映蒸发池水体除辐射之外能量的综合影响, 提出以下改进模型:

$$E = \frac{sR_n + \beta'\gamma f(u)(e_a^* - e_a)}{\lambda(s + \beta'\gamma)} \quad (5)$$

2 结果与分析

2.1 蒸发池垂向水温特征

蒸发池水温可以体现蒸发能量的变化, 是计算水体蒸发量必须考虑的因素^[19]。2021—2022 年 4—10 月蒸发池的水温等值线如图 2 所示, 可以看出, 1 m^2 和 5 m^2 蒸发池 4—8 月水温随深度增加显著下降, 9—10 月垂向水温分布比较均匀, 而 20 m^2 蒸发池 4—10 月水温随水深均没有明显变化。这与 3 个蒸发池能量平衡的差异有关, 太阳辐射是地表及水体热量的主要来源, 实验场地水温高于土壤温度, 3 个蒸发池吸收相同的太阳辐射加热水体。 1 m^2 和 5 m^2 蒸发池由于体积更小, 水量更少, 与土壤的相对接触面积更大, 使得水体与土壤之间的热量传递比更高, 随着深度的增加, 土壤温度更低, 水温随水深的增加也明显降低; 而 20 m^2 蒸发池面积较大, 可以储存更多的热量, 与土壤的热通量相对较少, 水温随深度变化不明显。可见 3 个蒸发池虽水面温度相近, 但水面面积会影响水体传热效果。

2.2 水面蒸发量特征

水面蒸发受太阳辐射、风速、水汽压差等多种气象因素的影响, 在不同时间尺度上的主控因子也不尽相同, 在月尺度上, 净辐射的影响尤为突出^[6]。由图 3 可见, 1 m^2 和 5 m^2 蒸发池蒸发量变化趋势与 E601 型蒸发皿相同, 与净辐射变化趋势一致; 而 20 m^2 蒸发池蒸发量峰值相对于净辐射具有滞后性, 滞后时间为 3 个月。这是因为太阳辐射直接影响水温, 水体吸收太阳辐射, 用于水体加热并储存起来^[14], 20 m^2 蒸发池水量较大, 储热能力更强, 导致蒸发峰值滞后于辐射峰值; 并且由于蒸发池面积越大储热能力越强, 传递给土壤的热量相对越少, 水温越高, 进而导致累计蒸发量越大。2021 年 4—10 月 1、5、 20 m^2 蒸发池累计蒸发量分别为 641.4、643.2、838.5 mm; 2022 年 4—10 月 1、5、 20 m^2 蒸发池累计蒸发量分别为 660.1、668.5、831.8 mm, 水面蒸发量随水面面积增大而增大。E601 型蒸发皿结构特殊, 与 20 m^2 蒸发池累计蒸发量相近, 2021 年 4—10 月和 2022 年 4—10 月累计蒸发量分别为 808.8、820.8 mm。

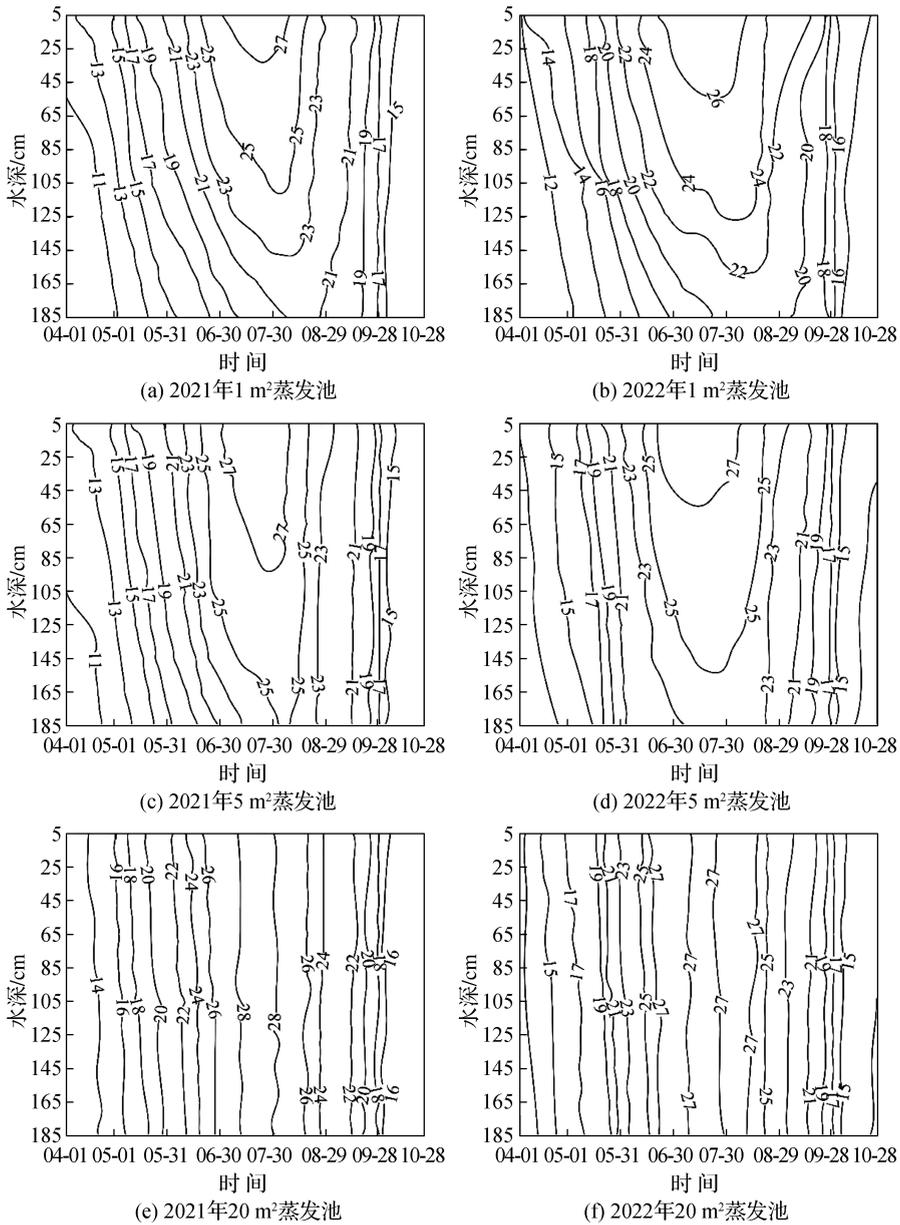


图2 2021—2022年4—10月蒸发池水温等值线(单位:℃)

Fig. 2 Water temperature contour map of evaporation ponds from April to October in 2021—2022

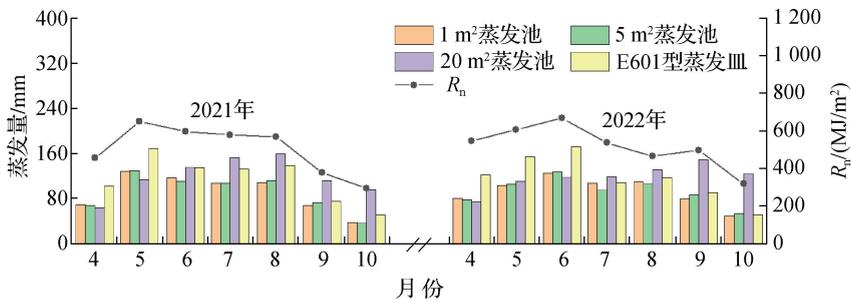


图3 月净辐射及水面蒸发量变化

Fig. 3 Chart of net radiation and evaporation from water surface

2.3 蒸发模型验证

基于 $f(u)$ 和气象数据, Penman 公式对 3 个不同面积蒸发池蒸发量的计算值与实测值见图 4。由图 4 可以看出, Penman 模型对 1、5 和 20 m² 蒸发池的水面蒸发量计算值分布在 1:1 线的上侧, 计算值较实测值偏高, 对 1、5 m² 蒸发池蒸发量计算的偏差百分比 (P_{BIAS}) 绝对值均超过 20%, 对 20 m² 蒸发池蒸发量计算的 P_{BIAS} 绝对值超过 10%, 3 个蒸发池蒸发量计算值的相对均方根误差 (E_{RRMS}) 均大于 25% (表 1), 模型计算效果一般, 存在高估现象。这是因为 Penman 模型计算的蒸发量是由净辐射引起的蒸发与空气动力引起的蒸发两者加权之和^[15], 而 Penman 模型仅使用净辐射来量化能量对蒸发的影响对蒸发池是不合理的, 因为蒸发池有额外的传热面积, 与周围土壤存在的能量交换造成了其他能量损失, 面积越小, 模型计算误差越大。

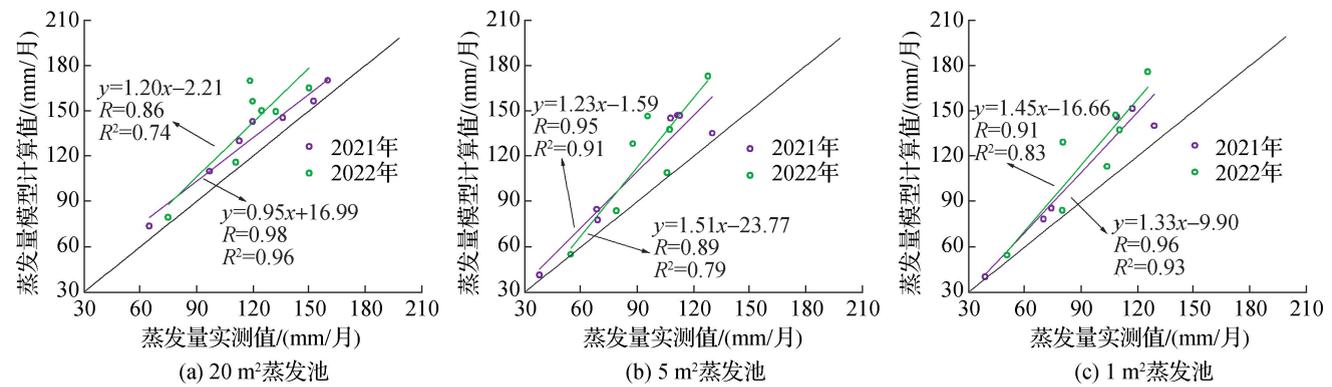


图 4 蒸发模型的计算结果与实测结果对比

Fig. 4 Comparison between the calculated results of evaporation models and the measured results

改进模型中加入参数 β' 来反映蒸发池水体与土壤之间的热量交换, 即除辐射之外能量的综合影响, 以提高计算精度。本文基于 2021 年实测数据, 利用遗传算法通过 R 语言实现对参数 β' 的优化求解, 以蒸发量模型计算值与实测值的均方根误差 (E_{RMS}) 为目标函数, 初始种群选为 100, 每代交叉概率为 1.0, 每代变异概率为 0.01, 不同面积蒸发池 β' 的优化结果见表 2。可见, 蒸发池面积越小, 其与土壤的相对接触面积越大, 热量传递相对就越多, 导致 β' 值越大。此外, 水温越高传递给土壤的热量越多, 水体与土壤之间的热量交换对蒸发池的影响在夏季尤为明显, 所以 β' 值在夏季 (6—8 月) 较大, 1、5、20 m² 蒸发池的 β' 值分别为 3.5、3.3、2.1; 春、秋季 β' 值较小, 为 1.5~1.9。

表 1 Penman 模型和改进模型的评价指标

Table 1 Evaluation indexes of Penman model and the improved models

蒸发池	Penman 模型						蒸发模型(含不同 β' 值)					
	$E_{RMS}/(\text{mm}/\text{月})$		$E_{RRMS}/\%$		$P_{BIAS}/\%$		$E_{RMS}/(\text{mm}/\text{月})$		$E_{RRMS}/\%$		$P_{BIAS}/\%$	
	2021 年	2022 年	2021 年	2022 年	2021 年	2022 年	2021 年	2022 年	2021 年	2022 年	2021 年	2022 年
1 m ²	24.9	32.1	26.9	34.1	-21.9	-27.6	2.3	16.2	2.5	17.3	1.24	-9.56
5 m ²	24.5	32.1	26.9	34.1	-22.0	-26.6	1.2	16.5	1.3	17.6	0.58	-8.43
20 m ²	18.3	26.9	25.1	26.2	-14.1	-20.3	2.2	21.5	2.2	19.0	-0.82	-9.0

表2 不同面积蒸发池的 β' 值Table 2 Values of β' for evaporation ponds with different areas

蒸发池	春季	夏季	秋季
1 m ²	1.9	3.5	1.9
5 m ²	1.7	3.3	1.8
20 m ²	1.5	2.1	1.5

基于2021—2022年4—10月实测数据验证改进模型的准确性,改进模型蒸发量计算值与实测值对比如图5所示,可见,蒸发量实测值和计算值的散点均匀离散在1:1线的两侧,说明改进模型具有较高的蒸发量计算精度。并且改进模型评价指标结果也表明(表1)模型的 E_{RMS} 和 P_{BIAS} 值均显著减小, E_{RRMS} 均小于20%,计算结果良好。可见,对于不可忽略水体与周围土壤之间热通量的水体,建立的改进模型可有效提高计算精度。

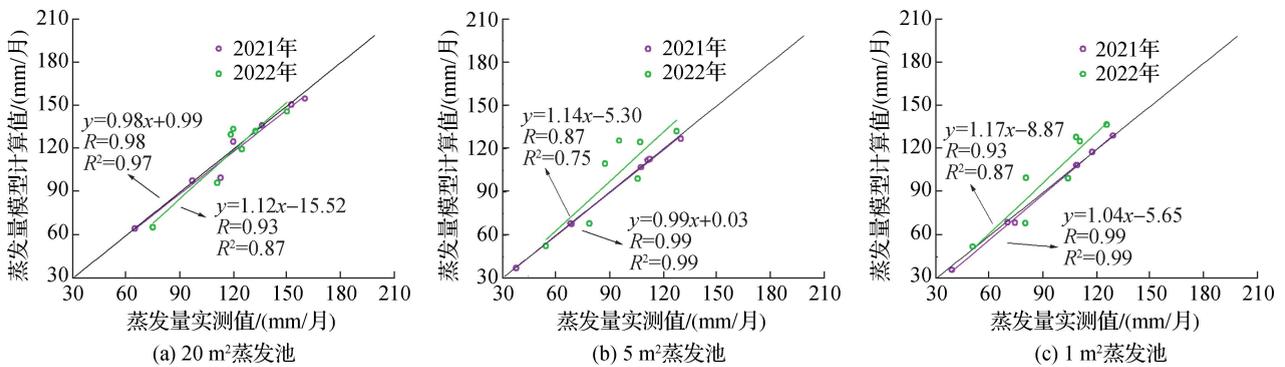


图5 改进模型的计算结果与实测结果对比

Fig. 5 Comparison between the calculated results of the improved models and the measured results

3 结 论

本文以山西省水文水资源勘测总站太谷均衡实验站3个不同面积的蒸发池为研究对象,利用蒸发池水温、水面蒸发量及气象要素的监测资料,揭示了不同面积蒸发池的垂向水温分布和蒸发量的变化特征及能量平衡特性,探究了适合不同水面面积蒸发池的蒸发模型。主要结论如下:

(1) 小型蒸发池和大型蒸发池水温分布具有明显差别,1 m²和5 m²蒸发池4—8月水温随水深增加而明显降低,9—10月水温比较均匀;20 m²蒸发池4—10月水温分布均比较均匀。

(2) 1 m²和5 m²蒸发池各月蒸发量相近,且蒸发量与净辐射变化趋势一致,而20 m²蒸发池蒸发量峰值滞后于净辐射峰值,滞后时间为3个月;1 m²蒸发池4—10月的水面蒸发量累计值最小,20 m²蒸发池最大,水面蒸发量随水面面积增大而增大。

(3) Penman 模型能量项中未考虑蒸发池水体与土壤之间的热通量,模型计算值存在较大高估误差,夏季尤为明显,可在模型中加入参数来反映除净辐射外能量的综合影响。太原盆地夏季1、5、20 m²蒸发池的该参数分别为3.5、3.3、2.1,计算内陆小型水体蒸发量时根据水体规格加入不同的参数可提高模型计算精度。但本研究对参数的率定仅基于1 a的试验数据,蒸发池水体与土壤之间的热量传递对蒸发池能量平衡的贡献有待进一步的实验研究。

参考文献:

- [1] 叶林媛, 鲁汉, 秦淑静, 等. 长江流域 1960—2019 年蒸发皿蒸发和实际蒸散发演变规律[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 718-729. (YE L Y, LU H, QIN S J, et al. Changes in pan evaporation and actual evapotranspiration of the Yangtze River basin during 1960—2019[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(5): 718-729. (in Chinese))
- [2] DU J Z, XU X L, LIU H X, et al. Deriving a high-quality daily dataset of large-pan evaporation over China using a hybrid model[J]. Water Research, 2023, 238: 120005.
- [3] 韩松俊, 王旭, 刘亚平, 等. 青藏高原潜在蒸发时空变化的南北分异特征[J]. 水科学进展, 2023, 34(4): 490-498. (HAN S J, WANG X, LIU Y P, et al. North—south differentiation on the spatiotemporal variations of potential evaporation in Tibetan Plateau[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(4): 490-498. (in Chinese))
- [4] HAN S J, GUO F J. Evaporation from six water bodies of various sizes in East Asia: an analysis on size dependency[J]. Water Resources Research, 2023, 59(6): e2022WR032650.
- [5] SIK K M, DONGWON C, MI L, et al. Prediction of brine evaporation rate in a pond: development of different models under controlled meteorological conditions and comparative evaluation[J]. Desalination, 2023, 551: 116415.
- [6] 崔逸凡, 刘元波. 湖泊蒸发观测与计算方法研究进展[J]. 湖泊科学, 2023, 35(5): 1501-1517. (CUI Y F, LIU Y B. Advances in observation and calculation of lake evaporation[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(5): 1501-1517. (in Chinese))
- [7] WANG H, SUN F B, LIU F, et al. Reconstruction of the pan evaporation based on meteorological factors with machine learning method over China[J]. Agricultural Water Management, 2023, 287: 108416.
- [8] RAZZAQ G A, MOHAMMED J, AFAQ A, et al. Simulation of pan-evaporation using penman and hamon equations and artificial intelligence techniques[J]. Water, 2021, 13(6): 793.
- [9] LIM W H, RODERICK M L, FARQUHAR G D. A mathematical model of pan evaporation under steady state conditions[J]. Journal of Hydrology, 2016, 540: 641-658.
- [10] YANG H B, YANG D W. Climatic factors influencing changing pan evaporation across China from 1961 to 2001[J]. Journal of Hydrology, 2012, 414: 184-193.
- [11] WANG K W, LIU X M, LI Y Q, et al. A generalized evaporation model for Chinese pans[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(19): 10, 943-10, 966.
- [12] 郭芳居, 韩松俊, 张宝忠. 基于广义互补 S 型公式的我国不同地区蒸发池蒸发量估算[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2023, 21(3): 277-286. (GUO F J, HAN S J, ZHANG B Z. Estimating evaporation by the sigmoid generalized complementary equation for evaporation tanks in different regions of China[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023, 21(3): 277-286. (in Chinese))
- [13] 王菱, 陈沈斌, 侯光良. 利用彭曼公式计算潜在蒸发的高度订正方法[J]. 气象学报, 1988, 46(3): 381-383. (WANG L, CHEN S B, HOU G L. Method for altitudinal corrections of penman evapotranspiration formula[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1988, 46(3): 381-383. (in Chinese))
- [14] 郭雅琼, 马进荣, 程梦妍. 潮间带滩涂沉积物与水体热通量模拟[J]. 水科学进展, 2018, 29(5): 728-736. (GUO Y Q, MA J R, CHENG M Y. Modeling the heat flux between the tidal flat sediment and seawater[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(5): 728-736. (in Chinese))
- [15] ZHAO G, GAO H L, CAI X M. Estimating lake temperature profile and evaporation losses by leveraging MODIS LST data[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 251: 112104.
- [16] MCJANNET D L, WEBSTER I T, COOK F J. An area-dependent wind function for estimating open water evaporation using land-based meteorological data[J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 31: 76-83.
- [17] ANTONOPOULOS V Z, GIANNIOU S K. Energy budget, water quality parameters and primary production modeling in Lake Volvi in Northern Greece[J]. Sustainability, 2023, 15(3): 2505.

- [18] 余珊珊, 辛晓洲, 柳钦火. 大气下行长波辐射参数化模型比较[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 751-762. (YU S S, XIN X Z, LIU Q H. Comparison of atmospheric downward longwave radiation parameterizations[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(7): 751-762. (in Chinese))
- [19] 高辉辉, 陈攀, 石喆, 等. 水温对器皿蒸发量影响的实验研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2022, 58(1): 147-156. (GAO H H, CHEN Z, SHI Z, et al. Experimental study of the influence of water temperature on pan evaporation[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2022, 58(1): 147-156. (in Chinese))

Water temperature characteristics of evaporation ponds with different areas and improvement of Penman model*

CHEN Junfeng¹, ZHANG Shuyu¹, DU Qi², XUE Jing¹, YANG Xiaojun²

(1. College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Taigu Water Balance Experimental Station, Bureau of Hydrology and Water Resources Survey of Shanxi Province, Jinzhong 030600, China)

Abstract: By analyzing the water temperature characteristics of evaporation ponds, we can deeply understand the energy balance characteristics of evaporation ponds, study the calculation error sources of Penman model, and improve the model, which is of great significance for agricultural planning, water source assessment and hydrological forecast. Based on the water temperature, evaporation capacity and meteorological data of three evaporation ponds with different areas in Taigu water balance experimental station, the vertical distribution of water temperature and the variation characteristics of evaporation capacity of each evaporation pond were analyzed. The model parameters suitable for the three evaporation ponds were explored based on Penman model. The results showed that the water temperature of the 1 m² and 5 m² evaporation ponds decreased significantly with the increase of water depth from April to August, that of the 20 m² evaporation pond was higher, which was uniformly distributed. The monthly evaporation of 1 m² and 5 m² evaporation ponds was similar, whose trend was consistent with the variation of net radiation, and the evaporation peak of 20 m² evaporation pond lagged behind the net radiation peak by 3 months. The addition of comprehensive influence parameters reflecting energy other than net radiation to the Penman model can improve the calculation accuracy of the model, especially in summer. The parameter values of 1 m², 5 m² and 20 m² evaporation ponds in summer are 3.5, 3.3 and 2.1, respectively.

Key words: water surface evaporation; evaporation pond; water temperature; Penman model

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41502243) and the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (No. 202203021221048).