

近水面温湿度变化特征及水面蒸发量计算差异性分析

王周锋^{1,2,3*}, 高一博^{1,2}, 王文科^{1,2}, 方 圆^{1,2}, 寇晓梅^{3,4}, 高 繁^{3,4}

1. 旱区地下水与生态效应教育部重点实验室（长安大学），西安 710054
2. 长安大学 水利与环境学院，西安 710054
3. 陕西省“四主体一联合”河湖生态系统保护与修复校企联合研究中心，西安 710065
4. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司，西安 710065

摘 要：水面蒸发是水循环的主要途径之一，气象要素是影响水面蒸发的重要因素。为分析温度和湿度与水面蒸发量的关系，通过野外试验对水面上 25 cm 和 35 cm 处气温和相对湿度进行监测。同时，利用修正的 Penman-Monteith 方程计算了水面蒸发量，并与气象站数据计算结果进行比对。结果表明：近水面不同高度处相对湿度与气象站监测结果差异显著，差值均值在 12% 左右；近水面处气温和气象站监测气温的差异与距离水面高度有关，水面上 25 cm 和 35 cm 处气温和气象站气温的差值分别为 $(1.5 \pm 1.0)^\circ\text{C}$ 和 $(1.8 \pm 2.0)^\circ\text{C}$ 。水面蒸发量计算结果表明：气象站气象数据计算的水面蒸发量最大，而利用水面上 25 cm 和 35 cm 处气温和相对湿度计算的水面蒸发量近似。本研究为利用气象站数据计算水面蒸发量及结果修正提供了数据支撑。

关键词：水；相对湿度；气温；降雨量；水面蒸发

Analysis of characteristics of temperature and humidity near the water surface and differences in water surface evaporation estimation

WANG Zhoufeng^{1,2,3*}, GAO Yibo^{1,2}, WANG Wenke^{1,2}, FANG Yuan^{1,2}, KOU Xiaomei^{3,4}, GAO Fan^{3,4}

1. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region (Chang'an University), Ministry of Education, Xi'an 710054, China
2. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China
3. Shaanxi Union Research Center of University and Enterprise for River and Lake Ecosystems Protection and Restoration, Xi'an 710065, China
4. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China

Abstract: Background, aim, and scope Water surface evaporation, one of the key hydrological cycle processes, was significantly influenced by meteorological conditions. Surface water is an essential resource for people and ecosystems, a better understanding is needed for the fundamental controls of water surface evaporation

收稿日期：2023-04-15；录用日期：2023-06-30；网络出版：2023-07-15

Received Date: 2023-04-15; Accepted Date: 2023-06-30; Online first: 2023-07-15

基金项目：陕西省重点研发计划（2020SF-425，2019ZDLSF05-01）；陕西省大学生创新创业训练项目（S202110710302）；国家自然科学基金项目（41202164）

Foundation Item: Key Research and Development Program of Shaanxi Province (2020SF-425, 2019ZDLSF05-01); Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students of Shaanxi Province (S202110710302); National Natural Science Foundation of China (41202164)

通信作者：王周锋，E-mail: wangzf@chd.edu.cn

Corresponding Author: WANG Zhoufeng, E-mail: wangzf@chd.edu.cn

引用格式：王周锋，高一博，王文科，等. 2023. 近水面温湿度变化特征及水面蒸发量计算差异性分析 [J]. 地球环境学报, 14(5): 618–625.

Citation: Wang Z F, Gao Y B, Wang W K, et al. 2023. Analysis of characteristics of temperature and humidity near the water surface and differences in water surface evaporation estimation [J]. *Journal of Earth Environment*, 14(5): 618–625.

and its interactions with meteorological factors. **Materials and methods** In order to examine the relationship between temperature, humidity, and water surface evaporation, real-time monitoring of temperature and relative humidity at the heights of 25 cm and 35 cm above the water surface through field experiments were carried out. Furthermore, water surface evaporation was calculated by the modified Penman-Monteith equation, and the results were compared to those obtained from the data of weather station data. **Results** Great differences between the relative humidity at different heights near the water surface and the weather station monitoring results were monitored, and the mean value of the difference was about 12%. The differences between the temperature near the water surface and the air temperature at the weather station were related to the height from the water surface, and the mean values of the difference between the temperature at 25 cm and 35 cm above the water surface and the weather station were $(1.5 \pm 1.0)^\circ\text{C}$ and $(1.8 \pm 2.0)^\circ\text{C}$. The results of water surface evaporation calculation showed that the maximum water surface evaporation was calculated by the meteorological data of the weather station and the approximate water surface evaporation was calculated at 25 cm and 35 cm height on the water surface. **Discussion** Previous studies mainly using meteorological data from weather stations to calculate water surface evaporation. However, due to the high variability of both the subsurface of meteorological stations and the water surface, errors may occur in calculating water surface evaporation using meteorological data from these stations. At the same time, the evaporation of the water surface is comprehensively affected by meteorological factors such as relative humidity, temperature, radiation, wind speed, etc., and these meteorological factors continue to change with altitude. By studying the changing characteristics of meteorological elements at different altitudes and combining it with measured water surface evaporation, it may be possible to better reveal the mechanism of water surface evaporation. **Conclusions** In the study area, the primary factors affecting water surface evaporation are radiation, air temperature, and air pressure. **Recommendations and perspectives** This study offers supporting data for calculating water surface evaporation using meteorological station data and correcting the results.

Key words: water; relative humidity; air temperature; precipitation; water surface evaporation

水面蒸发是水文循环的重要环节之一,也是物质和能量传输的重要途径。水体和大气间的水热交换,会影响温度的时空分布、水分分配、植物生长等水文与生态过程(孙菽芬等,2008)。河流、水库、湖泊等水体的水分损失中,水面蒸发是重要的组成部分,在陆面蒸发研究中也是土壤蒸发和浅层地下水蒸发的基础(王振英,2013;童新等,2015)。已有研究表明,水面通过蒸发作用能够消耗50%的热量(Sartori,2000;王振英,2013)。因此,水面蒸发的研究对天气预报、气候变化、水资源形成与演化、水资源管理等方面具有重要作用(武金慧和李占斌,2007;王丹丹等,2017)。

净辐射、相对湿度、气温、水汽压差、日照时间等因素是影响水面蒸发的主要因素(滕凯,2011;童新等,2015;Kumar and Arakeri,2015)。徐仁(2010)的研究表明平均气温是影响水面蒸发量的主要因素,其他气象因素通过平均气温影响水面蒸发量。许文豪等(2019)对鄂

尔多斯高原湖泊的研究表明湖水蒸发受相对湿度和气温影响较大。但是,黄金廷等(2021)对格尔木河流域的研究表明流域内影响水面蒸发量的主控因素并不相同,上游山区主控因素为气温,中游地区主控因素为风速,终端尾间湖主控因素为水域面积。可见,因为研究区气候条件、地质地貌类型等的差异,影响水面蒸发的主控因素并不完全一致。

水面蒸发过程中,净辐射是水分汽化的能量来源,通过气温和水温的升高影响水面蒸发(童新等,2015)。受辐射影响,水面蒸发存在地区性、季节性和昼夜变化。肖曼珍等(2021)对中国南北过渡带水面蒸发的研究表明,水面蒸发量夏季>春季>秋季>冬季,而空间上表现为东部最高,西部其次,中部最低。由于水体的储热能力较土壤强,受水体热储量夜间释放的影响,夜间水面蒸发也非常显著,一些地区夜间湖泊蒸发能够占到全年蒸发的48%(王丹丹等,2017)。韩鹏飞等(2018)对巴丹吉林沙漠湖泊逐小时、逐

日和逐月尺度的水面蒸发量进行研究,发现尽管影响水面蒸发的气象要素为气温和水温,但还有其他因素的作用,短时间尺度蒸发机理更为复杂,需要深入研究。

基于上述原因,本文通过在近水面不同高度处架设气温和相对湿度监测探头,通过高密度观测数据,研究气象条件变化与水面水分蒸发之间的响应关系。在此基础上,利用修正的 Penman-Monteith 方程计算水面蒸发量,并对其差异性原因进行探究,研究成果可为进一步研究水面蒸发过程与机制提供思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与试验方案

研究在旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室(长安大学)进行(34°22'12"N, 108°54'E)(图1)。研究区位于关中盆地中部,属暖温带半干旱半湿润大陆性季风气候,9—11月是夏季风和冬季风转换的时期,年平均气温 13.3℃,年平均相对湿度 70%,年均降水量 500—600 mm,年蒸发量 1300 mm(安可栋等, 2015; 李婉歆等, 2021)。



图 1 试验区分布图

Fig. 1 The distribution of the experimental site

试验在水与环境原位试验场水面蒸发研究区进行,在面积为 20.24 m² 的水面中心位置安装探头

(图1),高度分别设置在水面上 25 cm 和 35 cm,探头可同时测量大气相对湿度(RH)和气温(083E 温度和相对湿度传感器,美国 Campbell 公司, RH 精度 2%, 气温精度 0.10℃),采集频率为 10 min·次⁻¹。

气象数据从水与环境原位试验场气象站采集,主要有气压、气温、相对湿度、辐射、降雨量、风速风向等指标,采集频率为 10 min·次⁻¹。气压、气温、相对湿度、辐射、风速风向设备在距地面 2 m 处安装。本研究采集 2021 年 9 月 16 日至 2022 年 9 月 16 日数据进行分析。

1.2 水面蒸发量计算

为了研究相对湿度和温度对水面蒸发量的影响,分别采集气象站以及水面上不同高度处相对湿度和气温数据,利用修正的 Penman-Monteith 方程计算水面蒸发量。该模型假定蒸发池与周围土壤没有热交换,没有热存储和能量随水流入(Penman, 1948; McMahon et al., 2013)。对于水面蒸发,表面阻力项 r_s 为 0。因此,根据 Allen et al. (1998) 和 McMahon et al. (2013),水面蒸发量公式可用下式表示:

$$E = \frac{1}{\lambda} \times \frac{\Delta \times (R_{nw} - G_w)}{\Delta + \gamma} + \frac{1}{\lambda} \times \frac{\rho_a \times c_a \times (v_a^* - v_a) \div r_a}{\Delta + \gamma} \quad (1)$$

方程右边的第一项为辐射产生的蒸发,第二项为空气动力学部分产生的蒸发。其中: E 为水面蒸发量 (mm·d⁻¹); λ 是蒸发潜热 (MJ·kg⁻¹),在 20℃ 时取值 2.45; R_{nw} 为水面上净辐射 (MJ·m⁻²·d⁻¹),可通过气象站测定的太阳辐射进行计算,其值和表面反射率有关; G_w 为水的储热 (MJ·m⁻²·d⁻¹); Δ 为水汽压与温度曲线的斜率 (kPa·℃⁻¹); γ 为干湿球常数 (hPa·℃⁻¹); ρ_a 是常压下的空气密度 (kg·m⁻³),取值 1.02 (Li et al., 2020); c_a 是空气的比热 (J·kg⁻¹·K⁻¹),取值 1.01×10³ (Li et al., 2020); r_a 是水汽传输过程中的大气阻力 (s·m⁻¹); $(v_a^* - v_a)$ 是水汽压差 (kPa)。

水面上太阳净辐射 R_{nw} 可根据以下公式计算 (McMahon et al., 2013):

$$R_{nw} = R_{ns} - R_{nl} \quad (2)$$

式中: R_{ns} 和 R_{nl} 为气象站测定的净入射短波辐射和向上的长波辐射 (MJ·m⁻²·d⁻¹)。水面净入射短波辐射利用气象站入射短波辐射和蒸发面反射率估算:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \times R_s \quad (3)$$

式中: α 为蒸发面反射率, 水面反射率为 0.03, R_s 为入射太阳短波辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) (McMahon et al., 2013)。

水面日温度 T 可根据下式计算 (Stefan and Preud'homme, 1993):

$$T_i = 5.0 + 0.75 \times T_a \times (t - \delta) \quad (4)$$

式中: T_a 是空气温度 ($^{\circ}\text{C}$); δ 为滞后时间 (d), 本研究取 0; t 为时间, 取值 1 d 。

水体储热 G_w 也会影响到能量的平衡, 因此本文考虑了水体储热的影响, 可用下式计算 (McJannet et al., 2013):

$$G_w = \rho_w \times c_{pw} \times z \times (T_i - T_{i-1}) \div \Delta t \quad (5)$$

式中: ρ_w 为水的密度 ($997.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 20°C 时); c_{pw} 为水的比热 ($0.00419 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); z 是水深 (m); T 是水温 (K), i 是时间 (d), Δt 是时间步长 (1 d)。

水汽传输过程中的大气阻力 r_a , 可通过下式计算 (Chin, 2011):

$$r_a = 400 \div (1 + 0.536 \times u_2) \quad (6)$$

式中: u_2 为日平均风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

Δ 可通过下式计算 (Allen et al., 1998):

$$\Delta = 4098 \times 0.6108 \times e^{17.27 \times T_a \div (T_a + 237.3)} \div (T_a + 237.3)^2 \quad (7)$$

式中: T_a 为日平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)。

γ 可通过下式计算 (Allen et al., 1998):

$$\gamma = 0.00163 \times p \div \lambda \quad (8)$$

式中: p 为大气压 (hPa), 取气象站实测值。

特定温度下的饱和水汽压, 可通过下式计算 (Allen et al., 1998):

$$v_T^* = 0.6108 \times e^{17.27 \times T_a \div (T_a + 237.3)} \quad (9)$$

式中: T_a 是大气温度 ($^{\circ}\text{C}$), 本研究取气象站实测值或水面上不同高度处实测值。

因此, 日饱和水汽压可通过下式计算 (Allen et al., 1998):

$$v_a^* = (v_{T_{\max}}^* + v_{T_{\min}}^*) \div 2 \quad (10)$$

日实际水汽压可通过下式计算 (Allen et al., 1998):

$$v_a = (v_{a, T_{\max}}^* \times R_{H \min} \div 100 + v_{a, T_{\min}}^* \times R_{H \max} \div 100) \div 2 \quad (11)$$

式中: $R_{H \max}$ 和 $R_{H \min}$ 分别是最大和最小日相对湿度 (%), 本研究取气象站实测值或水面上不同

高度处实测值。

2 结果与讨论

2.1 气象要素变化特征

研究区位于关中盆地中部, 受暖温带半干旱半湿润大陆性季风气候影响, 该地区的气象要素呈现季节性和气候多变的特征, 表现为冬季干燥寒冷, 春季温暖, 夏季炎热多雨, 秋季凉爽。如图 2 所示: 观测期内, 日平均气温与该地区物候变化一致, 低值出现在 2021 年 12 月至 2022 年 2 月, 最低气温 -2.7°C , 平均气温 13.3°C (图 2a)。降雨总体呈现时空分布不均和年内差异明显的特点。观测期内降雨总量 471.4 mm, 低于往年 500—600 mm 的年平均降雨量, 且主要集中在 2022 年 7—10 月 (图 2a)。最大降雨量在 2022 年 7 月 17 日出现, 达 41.8 mm; 最长历时降雨在 2022 年 7 月 14 日至 7 月 20 日, 降雨总量达 118.8 mm (图 2a), 占全年降雨总量的 25.2%, 总体降雨分布与历年降雨特征并无明显差异。相对湿度和水汽压数据显示 (图 2b): 日平均相对湿度和水汽压变化趋势较为一致, 总体均呈现为先下降后上升的趋势。受夏季风和冬季风转换的影响, 在 2021 年 9—11 月呈现持续下降的趋势, 相对湿度和水汽压均值分别为 $51.7\% \pm 14.6\%$ 和 $(1.1 \pm 0.7) \text{ hPa}$, 最大值分别为 82.3% 和 2.7 hPa, 最小值分别为 19.4% 和 0.2 hPa。观测期日平均净辐射在 $-7.1—282.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 变化, 受季节影响, 净辐射最大值在观测期内不断升高。气压变化呈冬季高、秋季和春季低的趋势, 日均气压为 $(972.2 \pm 9.5) \text{ hPa}$ (图 2c)。根据风速数据 (图 2d), 观测期日风速在 $0.1—2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 波动, 平均风速为 $(0.7 \pm 0.4) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2 水面上不同高度处相对湿度和气温变化特征

为探究水面上不同高度处气温和相对湿度的变化规律, 利用与气象站相同的温湿度探头监测水面上 25 cm 和 35 cm 高度处气温和相对湿度的变化, 采集 2021 年 9 月 15 日至 2022 年 7 月 7 日的连续数据 (图 3)。由图 3a 可知: 水面 25 cm、35 cm 处气温和气象站监测气温趋势整体一致, 但是水面上气温峰值相对于气象站监测气温略有滞后。对比水面上不同高度处气温可以发现: 水面上 25 cm 和 35 cm 处气温日均值为 $(14.9 \pm 8.8)^{\circ}\text{C}$ 和 $(15.2 \pm 10.0)^{\circ}\text{C}$ 。水面上不同高度处

相对湿度变化较为复杂（图 3b）。总体来看，大气相对湿度、水面上 25 cm 和 35 cm 处相对湿度分别为 $50.5\% \pm 15.0\%$ 、 $61.7\% \pm 14.7\%$ 和 $61.2\% \pm 15.0\%$ 。大气相对湿度低于水面上不同高度处相对湿度，且大气相对湿度峰值较水面上 25 cm、35 cm 处相对湿度峰值出现较晚，同时大气相对湿度变化较平滑。目前，还未有报道水面上不同高度处的气象要素以对比其差异性。本研究

发现，由于受水面水分的蒸发作用和水分进入大气后的扩散等作用的影响，不同高度处气温、湿度和气象站实测数据具有较大差异性。离水面越远，气温和相对湿度数据越接近气象站监测数据。由此可见，在分析水分蒸发过程时，通过监测不同高度处的气象要素变化特征，能够更清晰地认识水分蒸发过程以及水面上气象要素的影响。

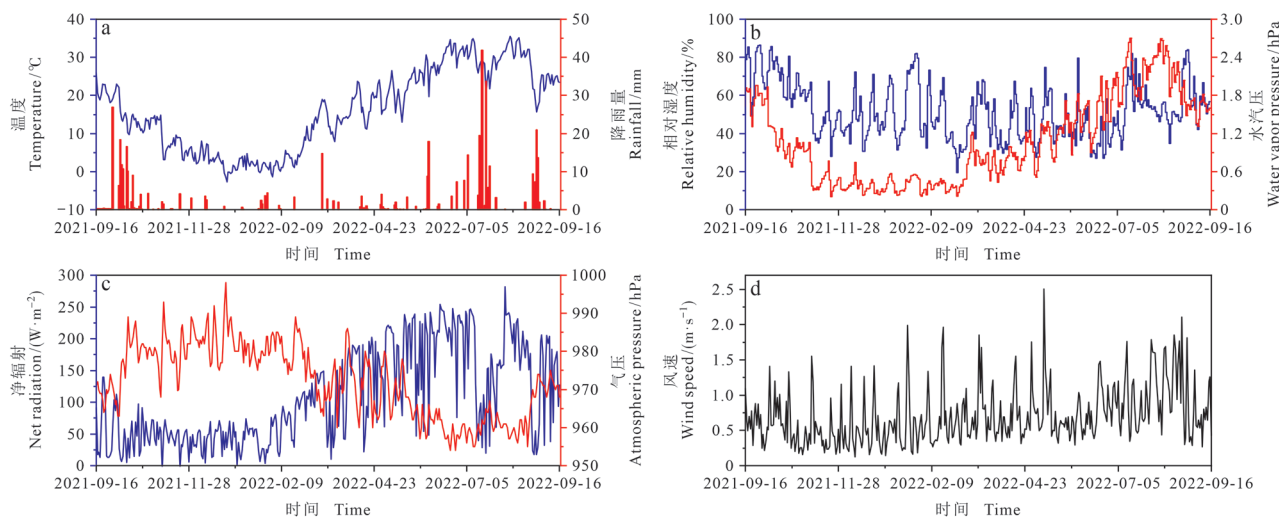


图 2 观测期气象要素变化特征

Fig. 2 Variations of meteorological factors during the observation period

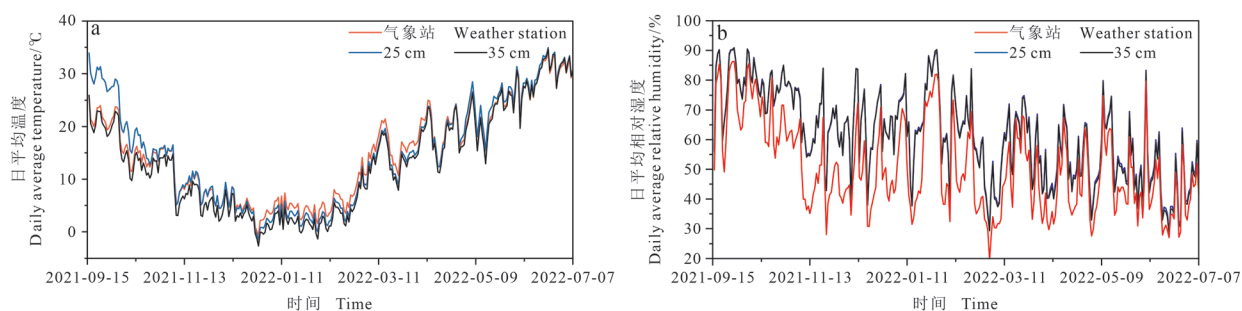


图 3 近水面不同高度处日平均气温和相对湿度随时间变化图

Fig. 3 Variations of daily average air temperature and relative humidity with time at different heights near the water surface

2.3 水面蒸发量计算及差异性分析

以往的研究中，一般以气象站数据作为计算水面蒸发量的基础数据。本研究利用水面上不同高度处及气象站的气温和相对湿度数据，通过 Penman-Monteith 方程计算水面蒸发量来对比不同高度相对湿度和气温差异对水面蒸发量计算结果的影响（图 4）。由图 4 可见：气象站、水面上不同高度处数据计算的水面累积蒸发量具有一定的差异性。观测期内，气象站、水面

上 25 cm 和 35 cm 高度计算的累积蒸发量分别为 865.7 mm、835.4 mm 和 826.7 mm，最大差异达 39.0 mm（图 4）。

目前，水面蒸发量数据的获取主要通过原位观测或者利用气象数据通过模型计算获取（许文豪等，2019）。已有研究表明，水面蒸发量受太阳辐射、气温、相对湿度、饱和水汽压差、大气压、风速等气象要素影响（Piri et al., 2009；滕凯，2011；童新等，2015；Kumar and Arakeri，

2015; 黄金廷等, 2021)。以往的研究中主要利用气象站的气象数据进行水面蒸发量的计算(童新等, 2015; 许文豪等, 2019), 并未有人通过对比水面上不同高度处和气象站获取的气象数据计算的水面蒸发量是否具有差异性。尽管通过 Penman-Monteith 方程计算的水面蒸发量和实测值具有一致性, 但是已有研究发现 Penman-Monteith 方程计算的结果低于实测值(许文豪等, 2019)。这有可能是因为气象站的气象要素下垫面和水面上具有差异性。同时由于气象站测定的气象要素数据高度更高, 其气象要素特征和水面上实际情况具有较大的差异性。本研究结果支持了上述猜测。进一步说明, 为了获取更为精确的水面蒸发量的计算结果, 需要对水面蒸发过程以及水面上气象数据加密观测, 来解析水面蒸发过程中水面上气象要素的空间分布特征以及水面蒸发量之间的关系。

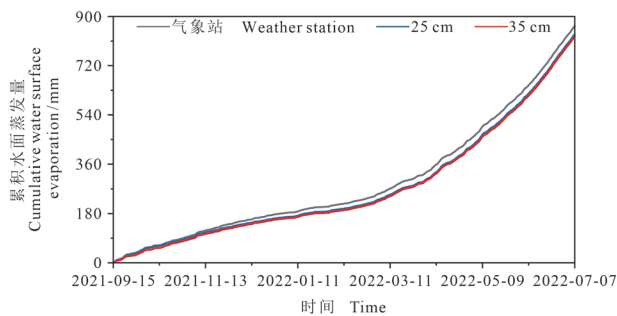


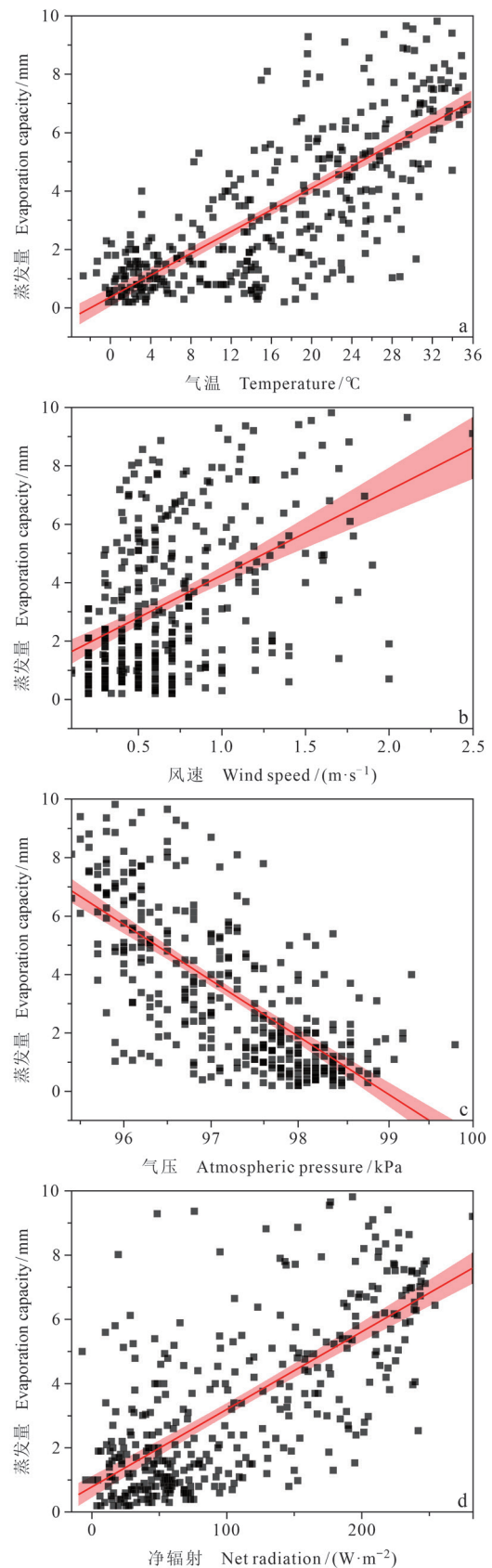
图4 不同气象要素计算的累积水面蒸发量

Fig. 4 Cumulative water surface evaporation calculated by different meteorological elements

2.4 水面蒸发量及其与气象因子相关性

为了进一步分析水面蒸发量与不同气象要素的相关性, 利用气象站气象要素研究了观测期内水面蒸发量与各气象要素的相关性。研究表明(图5): 水面蒸发量与净辐射的相关性最好($r=0.93$, $P<0.01$); 气温和气压对蒸发量的影响次之($r=0.56$, $r=-0.46$, $P<0.01$); 而风速和相对湿度对蒸发量的影响不显著。在冬季结冰期, 冰层的表面升华和气温回升后的表面融化也是水体水分蒸发的途径之一(Huang et al., 2016)。本研究中亦存在可能的结冰期(2021年12月26日至2022年1月1日连续7 d 温度低于 0°C), 存在上述途径的水面蒸发。但是由于该时期时间较短, 且温度相对较高, 其产生的蒸发效应可能相对较弱。因此, 本研究忽略了结冰产生

的水分蒸发。



(待续 To be continued)

(续图 5 Continued Fig. 5)

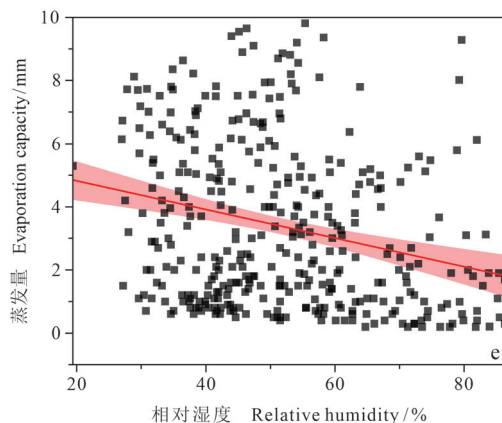


图 5 日蒸发量与主要气象要素关系

Fig. 5 Relationship between evaporation and main meteorological elements

相对湿度也是影响水面蒸发的重要因素（许文豪等，2019），本研究中这一影响因素并不显著。可能是由于两个原因：一是气象站相对湿度的测定位于 2 m 高度处，水面水汽蒸发进入空气后通过湍流等混合作用，在 2 m 高度处基本上没有了差异；第二个原因可能和下垫面的差异性有关。

现阶段，本研究仅围绕水面上不同高度处相对湿度和气温与气象站数据差异性进行了对比分析，并利用不同数据计算了水面蒸发量。但水面蒸发量受相对湿度、温度、辐射、风速等气象要素的综合影响（Piri et al., 2009；黄金廷等，2021），还需要更多的监测数据对现有结果进行验证。同时，本研究也没有实测的水面蒸发量，所以对于上述结论还需要进一步探讨。此外，实际应用中，近水面附近气象要素并不在气象站的观测范围，因此需要建立近水面附近气象要素与气象站气象要素相关关系，进而利用气象站气象要素数据计算水面蒸发量，这是本研究下一步的重点内容。

3 结论

（1）受下垫面条件和距离水面高度的影响，水面上不同高度处相对湿度与气象站相对湿度差异性显著，差值均值在 12% 左右；近水面气温和气象站监测气温差异与距离水面高度相关，距离水面上 25 cm 和 35 cm 处温度和气象站温度差值均值分别为 $(1.5 \pm 1.0)^\circ\text{C}$ 和 $(1.8 \pm 2.0)^\circ\text{C}$ 。

（2）利用气象站气象数据和水面上不同高度处相对湿度和气温数据计算的水面蒸发量结果表

明，观测期内，利用气象站气象数据计算的水面蒸发量最大，利用水面上 25 cm 和 35 cm 高度处相对湿度和气温计算的水面蒸发量近似，但均小于气象站气象数据计算的水面蒸发量。

（3）水面蒸发量与气象要素关系研究表明：蒸发量与净辐射的相关性最好，气温和气压对蒸发量的影响次之，风速和相对湿度对蒸发量的影响不显著。

参考文献

- 安可栋, 王文科, 王周峰, 等. 2015. 风积沙热参数计算及其与含水率关系研究 [J]. *水文地质工程地质*, 42(5): 129–133. [An K D, Wang W K, Wang Z F, et al. 2015. Soil thermal parameters of aeolian sand and its relationship with water content [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 42(5): 129–133.]
- 韩鹏飞, 王旭升, 胡晓农, 等. 2018. 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*, 35(5): 1012–1020. [Han P F, Wang X S, Hu X N, et al. 2018. Dynamic relationship between lake surface evaporation and meteorological factors in the Badain Jaran Desert [J]. *Arid Zone Research*, 35(5): 1012–1020.]
- 黄金廷, 李宗泽, 王文科, 等. 2021. 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*, 48(3): 31–37. [Huang J T, Li Z Z, Wang W K, et al. 2021. Characteristics of evaporation and its effect factors in the Golmud River Catchment [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48(3): 31–37.]
- 李婉歆, 尹红美, 王文科, 等. 2021. 基于野外观测与能量守恒原理分析饱和裸土与水面蒸发量的差异 [J]. *水文地质工程地质*, 48(3): 38–44. [Li W X, Yin H M, Wang W K, et al. 2021. Evaporation between saturated bare soil and water— an analysis based on field observations and energy balance consideration [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48(3): 38–44.]
- 孙菽芬, 颜金凤, 夏南, 等. 2008. 陆面水体与大气之间的热传输研究 [J]. *中国科学 (G 辑: 物理学力学天文学)*, 38(6): 704–713. [Sun S F, Yan J F, Xia N, et al. 2008. Study on heat transfer between land water body and atmosphere [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 38(6): 704–713.]
- 滕凯. 2011. 水面蒸发模型的进一步优化 [J]. *水资源与水工程学报*, 22(1): 163–166. [Teng K. 2011. Optimization of water surface evaporation model [J]. *Journal of Water*

- Resources and Water Engineering*, 22(1): 163–166.]
- 童新, 刘廷玺, 杨大文, 等. 2015. 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*, 38(1): 10–17. [Tong X, Liu T X, Yang D W, et al. 2015. Simulating evaporation from a water surface for the sand-meadow ecotone of the semiarid region in North China [J]. *Arid Land Geography*, 38(1): 10–17.]
- 王丹丹, 王伟, 刘寿东, 等. 2017. 太湖小时尺度水面蒸发特征及3种模型模拟效果对比 [J]. *湖泊科学*, 29(6): 1538–1550. [Wang D D, Wang W, Liu S D, et al. 2017. Characteristics of modelling hourly water surface evaporation in Lake Taihu and comparison of simulation results by three models [J]. *Journal of Lake Sciences*, 29(6): 1538–1550.]
- 王振英. 2013. 天山西西部地区水面蒸发量计算模型研究 [J]. *南水北调与水利科技*, 11(6): 30–34, 38. [Wang Z Y. 2013. Research on the calculation model of western surface evaporation in western Tianshan area [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 11(6): 30–34, 38.]
- 武金慧, 李占斌. 2007. 水面蒸发研究进展与展望 [J]. *水利与建筑工程学报*, 5(3): 46–50. [Wu J H, Li Z B. 2007. Advances and prospect of research on water surface evaporation [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 5(3): 46–50.]
- 肖曼珍, 朱春苗, 宋小燕, 等. 2021. 我国南北过渡带水面蒸发的时空变化及趋势预测 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 19(2): 263–272. [Xiao M Z, Zhu C M, Song X Y, et al. 2021. Spatiotemporal changes and trend prediction of water surface evaporation in the north-south transitional zone of China [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 19(2): 263–272.]
- 徐仁. 2010. 水面蒸发量与各气象因素关系的通径分析 [J]. *地下水*, 32(4): 133–134, 149. [Xu R. 2010. Analysis on relations between water surface evaporation and meteorological factors based on path analysis [J]. *Ground Water*, 32(4): 133–134, 149.]
- 许文豪, 王晓勇, 张俊, 等. 2019. 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*, 46(5): 16–23. [Xu W H, Wang X Y, Zhang J, et al. 2019. Research on *in situ* test of lake evaporation in the Ordos Plateau [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 46(5): 16–23.]
- Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Chin D A. 2011. Thermodynamic consistency of potential evapotranspiration estimates in Florida [J]. *Hydrological Processes*, 25(2): 288–301.
- Huang W F, Li R L, Han H W, et al. 2016. Ice processes and surface ablation in a shallow thermokarst lake in the central Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Annals of Glaciology*, 57(71): 20–28.
- Kumar N, Arakeri J H. 2015. Natural convection driven evaporation from a water surface [J]. *Procedia IUTAM*, 15: 108–115.
- Li W X, Brunner P, Franssen H J H, et al. 2020. Potential evaporation dynamics over saturated bare soil and an open water surface [J]. *Journal of hydrology*, 590: 125140. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125140.
- McJannet D L, Cook F J, Burn S. 2013. Comparison of techniques for estimating evaporation from an irrigation water storage [J]. *Water Resources Research*, 49(3): 1415–1428.
- McMahon T A, Peel M C, Lowe L, et al. 2013. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(4): 1331–1363.
- Penman H L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032): 120–145.
- Piri J, Amin S, Moghaddamnia A, et al. 2009. Daily pan evaporation modeling in a hot and dry climate [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(8): 803–811.
- Sartori E. 2000. A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces [J]. *Solar Energy*, 68(1): 77–89.
- Stefan H G, Preud'homme E B. 1993. Stream temperature estimation from air temperature [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 29(1): 27–45.