

## 基于彭曼公式的宿州水面蒸发计算与分析

赵实<sup>1</sup>, 赵雷<sup>1</sup>, 周玉良<sup>2\*</sup> (1. 宿州市埇桥区农业农村局, 安徽宿州 234000; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽合肥 230009)

**摘要** 基于宿县闸站 2002—2010 年每年 2 月下旬至 10 月下旬的水面蒸发观测值, 通过彭曼公式和气压、气温、风速、湿度和日照等气象资料计算水面蒸发量, 以计算和观测的旬水面蒸发量误差最小化为目标函数, 采用遗传算法率定 Penman 公式中的参数。结果表明, 计算和观测的旬水面蒸发量平均误差小于 3 mm, 在缺乏观测的水面蒸发量或其时间尺度较长时, 可以用计算值代替观测值; 计算的宿县闸站 1953—2020 年的平均年水面蒸发量为 869.9 mm, 4—9 月水面蒸发量达 615.1 mm, 占年蒸发量的 71%; 1978 和 2003 年水面蒸发量计算值为最大和最小值, 分别为 699.2 和 1 040.1 mm; 计算的年水面蒸发量随时间呈下降趋势, 下降速率约为 17.0 mm/10 a。

**关键词** 蒸发; Penman 公式; 遗传算法; 宿州

**中图分类号** P 33 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2022)23-0199-04

**doi:** 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.23.050



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Analysis of Evaporation Based on Penman Equation in Suzhou City

ZHAO Shi<sup>1</sup>, ZHAO Lei<sup>1</sup>, ZHOU Yu-liang<sup>2\*</sup> (1. Yongqiao Agriculture and Rural Bureau of Suzhou City, Suzhou, Anhui 234000; 2. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009)

**Abstract** The Penman equation was employed to calculate water surface evaporation based on the daily mean air pressure, air temperature, wind speed, relative humidity and sunshine time. The parameters in the Penman equation was calibrated according to the observed and calculated dekad water surface evaporation based on genetic algorithm method with minimizing the error between them as the objective function. The observed dekad water surface evaporation from the late February to the late October during 2002—2010 in Suxian station was used to calibrate the parameters in the Penman equation. The results showed that the mean absolute error between observed and calculated dekad water surface evaporation was less than 3 mm, indicating that calculated daily water surface evaporation could be used in the hydrological model when there was no observed daily value. The calculated mean annual water surface evaporation in Suxian station was 869.9 mm during 1953—2020. The mean amount from April to September was 615.1 mm, accounting for 71% of the annual value. The calculated annual water surface evaporation in 1978 and 2003 were 699.2 mm and 1 040.1 mm, which were the minimum and maximum value during 1953—2020 in Suxian station. The annual evaporation shows a decreasing trend with 17.0 mm/10 a in Suxian station during 1953—2020.

**Key words** Evaporation; Penman equation; Genetic algorithm; Suzhou

蒸发是水文循环的重要环节, 涉及水量平衡和能量平衡<sup>[1-3]</sup>。蒸发量的准确估计是区域水资源量计算及合理配置、作物需水量分析和灌溉制度优化、农业生产布局和其他产业规划的基础<sup>[4]</sup>。在水文模拟中, 一般以水面蒸发量代表蒸发能力, 作为水文模型的输入项之一; 在气象干旱识别中, 蒸发量常作为干旱指标的组成因子, 如常用的标准化降水蒸发指数<sup>[5]</sup>。影响水面蒸发观测量的因素众多, 如观测器皿的尺寸和所处的高程、气象因子、水温、环境因素等<sup>[6-9]</sup>。相比而言, 水面蒸发观测资料较少, 且可能并非逐日观测, 而气压、气温、风速、湿度和日照等气象数据比蒸发观测资料丰富得多, 通常有日观测数据。在缺少日蒸发资料时, 可根据 Penman 公式<sup>[10-11]</sup>, 通过日气象数据计算日蒸发量。而 Penman 公式中的能量平衡项和空气动力项都含有一些参数, 采用推荐的参数值计算的蒸发量有时与实测值存在系统偏差, 在运用 Penman 公式计算水面蒸发量时, 需要对参数校正。

宿州市位于安徽省北部, 属淮北平原, 该地地下水资源和地表水资源量接近, 蒸发是该地水资源量及其分布的重要决定因子。为此, 笔者对 Penman 公式计算宿州市水面蒸发量的适用性进行分析, 即根据观测的水面蒸发量, 设置一定的目标函数, 通过优化算法确定 Penman 公式中的参数, 并对计算的水面蒸发量的特征进行分析。

### 1 材料与方法

**1.1 研究区域与数据来源** 收集 2002—2010 年共 9 年的宿县闸站(117°05' E, 33°40' N)水面旬蒸发量资料, 每年有 25 旬资料(从 2 月下旬到 10 月下旬), 共计 225 个数据。检查数据发现部分数据异常, 对临近站点(淮北临涣集站)以及其他年份同时段数据进行了修正。修正后的 225 个旬水面蒸发量见表 1。

计算宿县闸站日水面蒸发量所采用的日均气压、气温、湿度、风速、日照取自中国气象数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)宿县站(116°59' E, 33°38' N)逐日数据。

**1.2 研究方法** 基于日均气压、气温、风速、湿度和日照等计算水面蒸发量的 Penman 公式<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} E_0 = (\Delta H + \gamma E_a) / (\Delta + \gamma) \\ H = (1 - \alpha) R_A (0.18 + 0.55n/N) - \sigma T_a^4 (0.56 - 0.078 \sqrt{e_d}) \cdot \\ (0.1 + 0.9n/N) \\ E_a = 0.26(1 + 0.54u_2)(e_a - e_d) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\Delta$  为温度为  $T_a$  时的饱和水汽压-温度曲线的导数, kPa/°C;  $H$  为净辐射, mm/d;  $\gamma$  为湿度计常数, 约为 0.066 kPa/°C;  $E_a$  为由风速和饱和差引起的水面蒸发, mm/d;  $T_a$  为气温, °C;  $\alpha$  为水面反射率, 通常取 5%;  $R_A$  为大气层顶的太阳辐射, 取决于纬度和季节;  $n$ 、 $N$  分别为实际日照和大气层顶的理论日照;  $h$ ;  $\sigma$  为 stefan-Boltzmann 常数, 约为  $2.0 \times 10^{-9}$  mm/d;  $e_a$ 、 $e_d$  分别为水面气压和空气中实际气压, kPa;  $u_2$

**基金项目** 国家自然科学基金项目(51779067)。

**作者简介** 赵实(1986—), 男, 安徽宿州人, 工程师, 从事农业水利管理工作。\*通信作者, 教授, 博士, 从事水文水资源研究。

**收稿日期** 2022-05-29

为高度 2 m 处的风速, m/s。其中 0.18、0.55、0.56、0.078、0.10、0.90、0.26、0.54 等为经验常数, 不同地点可取不同值, 作

为待定参数, 可据实测水面蒸发量通过设置一定的目标函数, 进行优化确定。

表 1 宿县闸站 2002—2010 年各年 2 月下旬—10 月下旬逐旬蒸发量

Table 1 Evaporation of Suxian Gate Station from late February to late October of each year from 2002 to 2010

mm

时间 Time	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
2 月下旬	12.0	7.7	17.4	7.6	11.7	13.6	15.8	8.1	14.5
3 月上旬	14.8	12.0	27.5	15.1	12.3	15.1	21.7	15.3	14.7
3 月中旬	24.8	13.8	18.1	19.5	25.2	16.5	20.5	22.9	26.0
3 月下旬	19.8	27.2	22.6	25.7	28.3	21.9	22.8	22.7	21.7
4 月上旬	22.0	17.9	28.9	26.8	19.3	27.7	18.6	27.4	28.2
4 月中旬	24.0	20.4	24.9	27.1	24.6	25.9	17.7	27.3	16.3
4 月下旬	20.7	15.7	33.3	27.8	21.3	26.0	25.6	35.3	28.2
5 月上旬	12.2	22.5	21.3	33.5	29.0	31.6	30.7	41.7	28.6
5 月中旬	21.2	20.1	29.0	28.1	34.3	34.2	32.1	26.1	34.9
5 月下旬	33.1	32.0	39.3	42.6	36.8	32.7	37.2	34.7	31.3
6 月上旬	49.6	38.7	32.1	40.1	41.8	27.4	28.3	30.7	33.3
6 月中旬	55.0	40.1	27.0	57.8	54.4	34.6	18.0	35.4	32.8
6 月下旬	30.9	26.7	49.6	42.4	19.2	25.0	27.4	40.0	40.2
7 月上旬	40.1	18.3	40.3	26.5	16.4	18.6	26.4	40.6	31.7
7 月中旬	49.1	19.4	18.5	28.2	26.0	29.2	24.6	28.1	26.7
7 月下旬	25.6	35.0	44.1	29.6	23.1	29.9	15.6	29.8	34.0
8 月上旬	48.1	35.0	29.7	15.0	27.9	24.5	28.8	22.7	40.3
8 月中旬	24.6	12.1	31.9	37.3	36.6	27.8	26.0	34.0	33.8
8 月下旬	37.6	20.9	31.0	19.5	25.8	25.7	32.3	27.1	31.6
9 月上旬	37.1	15.9	35.0	27.0	24.1	24.5	26.3	25.2	15.8
9 月中旬	27.0	27.8	27.8	22.7	24.5	21.9	25.6	14.9	26.4
9 月下旬	32.7	31.8	27.8	13.8	20.4	20.7	20.1	20.4	27.1
10 月上旬	34.7	11.3	28.1	19.1	22.1	25.0	23.0	27.7	24.2
10 月中旬	27.1	20.5	24.3	22.5	19.7	19.3	23.1	28.2	15.7
10 月下旬	27.2	33.8	26.0	21.6	24.0	21.3	15.1	19.0	26.2

经验常数作为待优化变量的 Penman 公式(7 个优化变量为  $c_1 \sim c_7$ ):

$$\begin{cases} E_0 = (\Delta H + \gamma E_a) / (\Delta + \gamma) \\ H = 0.95 R_A (c_1 + c_2 \frac{n}{N}) - \sigma T_a^4 (c_3 - c_4 \sqrt{e_d}) \cdot [c_5 + (1 - c_5) \frac{n}{N}] \\ E_a = (c_6 + c_2 u_2 (e_a - e_d)) \end{cases} \quad (2)$$

由日均气压、气温、湿度、风速、日照等气象数据, 通过式(2)计算出日蒸发量, 累积日蒸发量得到计算的旬蒸发量。以计算的旬蒸发量和观测的旬水面蒸发量之间的绝对误差和最小化为目标函数, 采用实数编码的加速遗传算法<sup>[13]</sup>(RAGA)率定式(2)Penman 公式中的参数。式(2)中的日均气压、气温、湿度、风速、日照数据取自中国气象数据共享服务网提供的宿县站数据, 其中逐日平均风速为 10 m 高处的测量值。通过不同高处的风速转换公式, 将 10 m 高处的观测风速转换为 2 m 高处的风速, 高程为  $z$  处的风速  $u_z$  转换为 2 m 高处的风速  $u_2$  的公式<sup>[14]</sup>:

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (3)$$

2 结果与分析

RAGA 率定的 Penman 公式参数值分别为  $c_1 = 0.067$ 、 $c_2 =$

$0.364$ 、 $c_3 = 0.375$ 、 $c_4 = 0.048$ 、 $c_5 = 0.288$ 、 $c_6 = 0.091$ 、 $c_7 = 0.190$ 。采用率定参数值的 Penman 公式计算旬蒸发量和实测水面蒸发量的平均误差绝对值为 3.0 mm。计算和实测的旬水面蒸发量比较见图 1。

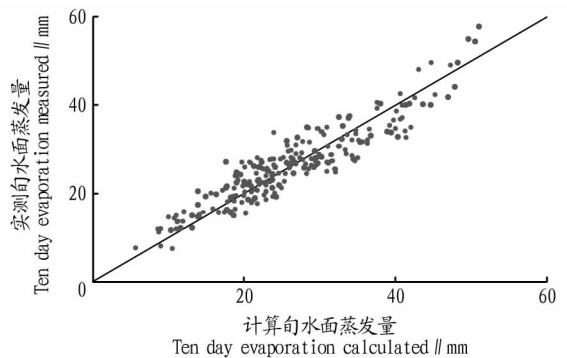


图 1 基于 Penman 公式计算和实测的旬蒸发量

Fig.1 Ten day evaporation calculated and measured based on Penman formula

由图 1 可知, 计算和实测的旬水面蒸发量较为接近。故在无实测水面蒸发量, 或实测水面蒸发量的时间尺度为旬或月时, 可采用计算的逐日水面蒸发量代替实测值。采用率定参数值的 Penman 公式, 根据宿县站 1953—2020 年逐日日均气压、气温、相对湿度、风速和日照计算日蒸发量, 累加为月

蒸发量。计算的 1953—2020 年逐月水面蒸发量见表 2。由表 2 可知,基于 Penman 公式计算的宿县闸站多年平均水面蒸发量为 869.9 mm,其中 4—9 月水面蒸发量达 615.1 mm,占年蒸发量的 71%。根据中国气象数据共享服务网提供的宿县闸站 1953—2020 年的逐日降水量,计算得到宿县闸站多年平均年降水量为 869.6 mm,与计算的多年平均水面蒸发量

极为接近。1978 和 2003 年的水面蒸发量计算值为最小和最大值,分别为 699.2 和 1 040.1 mm,最大值约为最小值的 1.5 倍,出现的年份与淮北平原五道沟实验站(117°21'E, 33°09'N)观测的最大值和最小值年份一致<sup>[1]</sup>。1978 年降水量很小,干旱严重,水面蒸发量大,而 2003 年降水量很大,洪涝严重,水面蒸发量小。

表 2 基于 Penman 公式计算的宿县闸站逐月水面蒸发量  
Table 2 Monthly water surface evaporation of Suxian sluice station based on Penman formula

年份 Year	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年总量 Annual total amount
1953	30.1	23.9	61.3	97.0	134.7	136.9	103.8	112.1	102.1	81.1	42.4	34.2	959.6
1954	15.9	32.3	80.8	89.9	90.4	135.0	78.5	90.2	95.7	59.1	49.4	16.5	833.7
1955	17.1	39.7	41.4	98.9	134.1	159.6	108.9	109.3	69.7	70.3	58.2	44.7	951.9
1956	26.3	53.7	49.3	104.2	101.6	94.6	137.5	104.3	96.4	72.1	62.7	44.9	947.6
1957	15.0	22.1	69.9	81.7	116.0	124.9	89.7	112.2	110.9	88.4	42.8	25.1	898.7
1958	38.2	53.3	70.2	67.7	109.3	167.3	139.2	97.1	82.6	53.1	36.7	30.3	945.0
1959	38.5	29.7	67.3	94.2	86.5	136.7	169.3	152.0	92.3	76.6	24.2	19.1	986.4
1960	23.4	58.0	48.4	97.8	115.3	129.3	110.1	126.8	69.7	59.2	32.8	28.4	899.2
1961	38.2	57.1	68.2	122.6	136.6	114.8	132.5	102.1	68.3	68.1	29.4	27.1	965.0
1962	35.9	52.6	115.0	105.1	162.8	127.6	110.6	104.0	80.1	57.2	31.6	24.1	1 006.6
1963	46.9	49.1	77.7	54.7	63.2	124.1	95.4	77.8	67.9	69.7	44.5	33.6	804.6
1964	23.7	21.2	64.3	54.3	100.4	143.5	166.5	105.2	57.2	36.3	31.3	25.0	828.9
1965	34.2	31.7	86.8	86.5	145.6	153.6	76.0	90.8	90.4	50.4	36.2	39.0	921.2
1966	32.8	42.8	55.1	81.2	118.4	144.1	123.3	138.0	91.7	70.8	43.3	28.6	970.1
1967	29.7	33.5	58.4	78.9	121.5	165.2	107.9	135.4	73.1	65.0	33.7	24.8	927.1
1968	32.4	51.9	88.1	121.2	123.5	178.0	106.0	107.3	85.2	55.4	42.4	22.1	1 013.5
1969	20.1	15.3	53.6	81.0	114.2	145.3	102.3	124.9	66.3	75.9	45.4	40.3	884.6
1970	42.0	48.4	61.7	92.5	122.4	120.8	115.2	103.3	52.4	57.0	41.8	31.9	889.4
1971	33.2	28.1	67.8	90.6	133.2	83.9	144.9	95.4	85.2	56.3	43.0	33.9	895.5
1972	20.8	19.8	48.1	97.7	115.1	151.0	100.7	102.5	77.5	64.1	28.9	32.7	858.9
1973	17.5	22.2	61.1	82.4	90.6	121.1	95.6	139.3	73.2	57.3	50.0	40.9	851.2
1974	27.7	27.2	70.8	105.5	110.2	140.1	110.7	108.3	88.0	54.6	48.1	18.6	909.8
1975	25.1	37.6	78.4	66.5	118.2	131.9	73.9	94.7	73.0	50.0	37.8	23.9	811.0
1976	40.4	30.9	61.4	97.1	115.4	120.1	129.0	105.5	79.8	68.8	39.3	33.7	921.4
1977	31.4	58.8	88.2	82.2	70.0	149.6	93.0	102.2	75.6	65.5	40.8	23.4	880.7
1978	31.6	38.8	55.1	123.7	146.6	161.6	140.0	121.0	85.7	70.0	31.1	34.9	1 040.1
1979	31.2	37.1	65.7	79.2	130.1	147.6	99.1	116.2	57.5	79.3	57.1	19.1	919.2
1980	25.6	40.0	43.4	86.6	123.3	97.0	86.6	87.1	84.0	53.2	38.3	37.0	802.1
1981	29.8	32.4	72.8	86.5	146.0	130.2	125.2	103.7	80.7	46.7	30.0	31.0	915.0
1982	29.2	26.7	51.0	85.8	129.4	127.6	89.7	80.2	69.2	57.3	29.0	33.1	808.2
1983	29.4	42.9	61.0	97.3	124.8	121.4	95.4	115.4	72.8	37.9	32.7	27.9	858.9
1984	27.8	32.3	73.5	80.5	108.3	98.9	89.0	114.4	60.4	52.7	26.2	20.1	784.1
1985	23.9	28.9	46.3	101.4	86.9	121.0	118.4	113.1	52.5	39.4	31.7	23.1	786.6
1986	25.5	40.6	63.8	86.9	135.6	116.8	84.8	102.5	72.8	60.5	36.4	22.4	848.6
1987	24.8	31.3	44.2	76.8	107.6	108.7	87.8	98.1	101.5	56.2	30.8	29.3	797.1
1988	31.5	36.0	55.4	106.7	93.6	121.4	133.7	100.7	77.7	51.4	49.2	36.5	893.8
1989	18.5	25.0	62.2	75.5	89.8	90.2	70.0	87.9	75.0	73.3	26.8	25.0	719.2
1990	22.0	21.2	57.7	85.1	104.1	109.3	123.2	98.3	82.5	66.5	34.6	27.9	832.4
1991	24.6	26.5	35.3	73.8	76.9	76.0	104.4	94.9	74.2	76.3	44.3	25.6	732.8
1992	17.9	49.8	41.0	101.8	111.8	119.0	127.5	91.5	57.0	52.8	43.3	22.7	836.1
1993	15.8	32.9	63.0	97.2	85.3	131.6	93.7	75.8	78.3	72.8	25.2	34.8	806.4
1994	40.5	35.7	69.7	79.4	150.5	128.0	155.3	121.4	86.9	62.6	32.9	22.4	985.3
1995	33.0	47.1	72.3	86.9	114.6	119.9	99.9	105.4	84.0	59.6	56.7	35.8	915.2
1996	32.6	53.6	63.6	99.4	125.5	122.8	101.6	123.1	65.6	59.7	29.4	33.8	910.7
1997	33.0	45.2	60.1	78.6	137.4	147.5	107.2	122.9	100.3	86.8	31.9	21.5	972.4
1998	20.7	33.5	51.3	71.7	75.6	119.0	124.8	78.5	111.4	77.4	56.0	24.0	843.9

接下表

续表 2

年份 Year	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年总量 Annual total amount
1999	34.8	52.0	45.7	84.1	109.3	114.7	115.6	94.6	93.1	39.2	37.5	39.5	860.1
2000	20.9	42.3	88.1	119.8	130.3	107.8	111.4	92.5	79.6	39.0	27.5	24.7	883.9
2001	18.3	24.0	77.5	97.8	132.3	114.5	130.0	97.3	116.2	60.5	41.2	23.8	933.4
2002	28.5	46.1	53.8	63.5	69.1	135.6	128.2	111.5	91.2	77.0	49.1	15.5	869.1
2003	28.7	24.6	55.4	64.3	87.0	122.0	82.4	61.1	69.4	51.8	30.7	21.8	699.2
2004	26.0	49.7	71.4	103.9	102.9	118.2	115.3	86.3	84.0	67.1	36.3	23.0	884.1
2005	25.4	26.0	66.9	106.8	110.2	149.9	80.4	71.6	58.7	57.5	35.8	32.9	822.1
2006	14.1	30.0	73.8	82.4	111.6	131.7	64.5	101.5	69.5	69.8	38.0	19.9	806.8
2007	28.9	34.1	54.1	93.8	130.3	108.6	83.4	79.7	76.9	61.1	36.7	19.6	807.2
2008	19.1	40.2	76.0	83.0	120.4	82.6	68.4	92.3	65.7	57.1	33.4	35.5	773.7
2009	32.6	30.5	61.8	98.5	118.1	117.9	104.4	77.7	57.6	76.0	29.4	22.9	827.4
2010	33.6	29.3	57.5	80.9	106.9	127.1	104.9	119.1	70.1	67.4	52.2	46.8	895.8
2011	38.8	35.9	80.1	116.9	119.7	121.7	101.0	69.0	59.8	62.5	29.9	24.0	859.3
2012	25.9	36.2	56.4	87.7	114.8	119.7	117.8	99.1	90.7	72.8	43.8	29.4	894.3
2013	24.4	33.3	81.4	114.6	111.7	131.1	129.4	143.3	76.2	80.6	37.2	28.3	991.5
2014	28.8	21.0	69.7	72.5	124.9	89.0	110.7	83.7	45.5	58.6	29.0	31.9	765.3
2015	30.0	37.7	53.0	75.0	91.4	96.7	100.3	103.2	76.6	66.7	19.3	23.2	773.1
2016	23.7	39.3	64.8	74.1	93.5	83.5	87.1	101.6	82.4	23.8	24.2	18.6	716.6
2017	22.9	35.6	61.0	100.2	127.6	115.2	116.0	90.6	59.1	40.8	42.4	29.0	840.4
2018	21.1	42.1	57.4	93.1	83.2	132.0	115.1	98.4	73.4	70.4	24.5	20.1	830.8
2019	19.7	18.1	69.6	63.1	116.2	148.6	124.1	102.3	88.0	54.4	49.4	25.6	879.1
2020	15.9	31.6	57.1	94.7	120.6	102.4	71.1	90.4	79.0	50.1	34.8	21.3	769.0
平均	27.5	36.1	63.7	89.2	113.0	124.8	107.9	102.3	77.9	61.5	37.8	28.1	869.9
最大	46.9	58.8	115.0	123.7	162.8	178.0	169.3	152.0	116.2	88.4	62.7	46.8	1 040.1
最小	14.1	15.3	35.3	54.3	63.2	76.0	64.5	61.1	45.5	23.8	19.3	15.5	699.2

表 2 中的年水面蒸发量  $E_t$  与时间  $t$  的相关系数为  $-0.441$ , 两者的线性关系:

$$E_t = -1.70t + 928.5 \quad (1 < t < 68) \quad (4)$$

式中,  $t=1$  表示 1953 年,  $t=2$  表示 1954 年, 余类推。

据  $t$  检验, 可得式(4)在 0.000 2 置信水平下, 蒸发量呈下降趋势, 下降速率约为  $17.0 \text{ mm}/10 \text{ a}$ , 与同处淮北平原的五道沟实验站观测的 1964—2009 年水面蒸发量呈下降趋势一致<sup>[1]</sup>。该实验站观测的水面蒸发量下降速率为  $92.9 \text{ mm}/10 \text{ a}$ , 主要原因可能是气溶胶含量增加导致的太阳总辐射和净辐射减少<sup>[1]</sup>。观测的水面蒸发量下降速率远高于宿县闸站计算的水面蒸发量的下降速率, 其原因可能是该研究计算水面蒸发量时未考虑气溶胶对太阳辐射的影响。后续可分析气溶胶含量与太阳辐射的关系, 研究水面蒸发量变化的能量机制, 构建考虑气溶胶含量影响的水面蒸发量计算方法。

### 3 结论

(1) 基于遗传算法率定参数的 Penman 公式计算的宿县闸站水面蒸发量与实测水面蒸发量接近, 平均旬蒸发量误差为  $3 \text{ mm}$ 。在缺少观测的水面蒸发量时, 可用 Penman 公式计算的水面蒸发量代替。

(2) 宿县闸站 1953—2020 年的平均年水面蒸发量计算值为  $869.9 \text{ mm}$ , 4—9 月水面蒸发量为  $615.1 \text{ mm}$ , 占年总量的 71%。1978 和 2003 年的水面蒸发量计算值为最小值和最大

值, 分别为  $699.2$  和  $1 040.1 \text{ mm}$ 。年水面蒸发量计算值呈下降趋势, 下降速率约为  $17.0 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。

### 参考文献

- [1] 钱筱暄, 马倩, 王振龙, 等. 五道沟实验站水面蒸发变化规律[J]. 中国农村水利水电, 2011(2): 72-75, 78.
- [2] 王怡宁, 丁佳楠, 吕海深, 等. 基于水面蒸发量及气温因子的潜水蒸发量计算模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(3): 69-74.
- [3] 金光炎. 用实测资料检验蒸发悖论问题[J]. 江淮水利科技, 2011(1): 31-33.
- [4] 李银坤, 詹保成, 郭文忠, 等. 基于蒸发皿水面蒸发量的温室生菜适宜灌溉量研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(4): 13-19.
- [5] 王兆礼, 黄泽勤, 李军, 等. 基于 SPEI 和 NDVI 的中国流域尺度气象干旱及植被分布时空演变[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 177-186.
- [6] 李万义. 适用于全国范围的水面蒸发量计算模型的研究[J]. 水文, 2000, 20(4): 13-17, 63.
- [7] 师丽莎, 李梦夏. 近 49 年汤阴县蒸发量变化特征分析[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(17): 225-226, 240.
- [8] 李家明, 何军, 贺胜男, 等. 基于通径分析法的漳河灌区参考作物蒸发蒸腾量变化成因研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(27): 193-195.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.
- [12] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [13] 金菊良, 丁晶. 水资源系统工程[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2002.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级: GB/T 20481—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.