文章编号: 1672 - 3317 (2021) 02 - 0125 - 11

考虑"蒸发悖论"的洱海灌区逐日参考作物蒸散发预测

赵 众¹,周 密^{2,3},张刘东¹,顾世祥^{1,2*},李 靖¹

(1.云南农业大学 城乡水安全与节水减排高校重点实验室,昆明 650201; 2.云南省水利水电勘测 设计研究院,昆明 650021; 3.武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室,武汉 430072)

摘 要:【目的】为估算参考作物蒸散发(ET₀)和灌溉实时预报调度、区域农业干旱评估提供依据。【方法】以滇 中高原上洱海湖滨灌区的大理气象站为例,探究"蒸发悖论"现象出现的时期,采用气象因子线性回归模型、蒸发 皿折算系数 K_p模型、气象因子+蒸发皿蒸发(E_{pan})多元回归模型、Normal Copula 模型等4种方法计算逐日ET₀进 行预测对比,并与Penman-Monteith 公式计算所得的ET₀进行对比。【结果】①1954—2018年大理站20 cm 蒸发皿 蒸发量呈下降趋势,ET₀和气温呈上升趋势,但ET₀的上升趋势更平缓:虽然在长时间序列上ET₀和蒸发皿蒸发量有 相反的变化趋势,但在年代际存在显著的差异性,1960年和2000全年以及四季均出现"蒸发悖论",1970年则是 全年以及夏、秋、冬三季出现"蒸发悖论",1990年仅夏季出现"蒸发悖论",2010年秋季出现"蒸发悖论"。② 在未出现"蒸发悖论"时期,加入E_{pan}后的气象因子多元回归模型法(ET_{0.Epan+Metr})所得逐日ET₀预测结果与标准值 的误差最小,其次为单纯的气象因子多元线性回归模型法(ET_{0.Metr}),最差为K_p模型法(ET_{0.Kp});加入E_{pan}后的 气象因子多元回归模型(ET_{0.Epan+Metr})逐日ET₀预测的相对误差(ERR)小于15%、20%、25%的样本数达到了 79.18%~90.16%、89.32%~97.23%、94.79%~98.36%。③出现"蒸发悖论"时,蒸发皿蒸发与ET₀的变化趋势相反, 只能采用Copula 联合分布函数模型预测,构建T-T_{max}二维Normal Copula 模型的精度更高,ERR小于15%、20%、 25%的样本数为73.70%~86.56%,82.51%~92.95%,89.89%~98.52%。【结论】通过 M-K 检验判别是否处于"蒸发 悖论"期,以决策选用加入E_{pan}后的气象因子多元回归模型,还是T-T_{max}二维Normal Copula 模型,二者均可显著 提高逐日ET₀预测模拟的精度。

 关键词: ET₀; 蒸发皿蒸发量(E_{pan}); Mann Kendall 检验; Copula 函数; 洱海灌区
 調整

 中图分类号: S271
 文献标志码: A
 doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020306
 OSID: 副

赵众,周密,张刘东,等.考虑"蒸发悖论"的洱海灌区逐日参考作物蒸散发预测[J].灌溉排水学报,2021,40(2): 125-135.

ZHAO Zhong, ZHOU Mi, ZHANG Liudong, et al. Calculating Daily Reference Evapotranspiration in Erhai Irrigated District with the Evaporation Paradox in Consideration[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(2): 125-135.

0 引 言

【研究意义】蒸散发(*ET*)作为表征太阳辐射到 地面的水汽和能量转化的重要参数,是区域水循环中 最重要的水文过程之一^[1]。地面气象观测和卫星遥感 等多途径资料分析显示,由于植被叶面积指数增加, 全球自1978年以来蒸散发平均增长值为0.63 mm/a, 其中植被蒸腾增加速度为0.72 mm/a,土壤蒸发则以 0.32 mm/a 的速度减少^[1-2]。参考作物蒸散发(ET_0) 又是蒸散发的气象因素分量,其估算和准确测定具有 重要的现实意义^[3-5]。【研究进展】逐日 ET_0 的计算模 型主要包括 Penman-Monteith 公式^[5]、Priestley-Taylor 模型^[6]、Hargreaves 公式^[7]、Irmark-Allen 法^[8]等方法。 Penman-Monteith 公式作为联合国粮农组织(FAO) 推荐的基本公式,其理论完备性、计算精度和适用性 已经得到全球的公认,但所需的资料信息过多,故而 在数据缺乏的地区难以使用。 ET_0 的变化不是由于单 一气象因素的变化而决定的,Traore 等^[9]采用气象因 素基于人工智能网络对 ET_0 进行研究,发现 T_{max} 是很 重要的因素,但其对于预测的准确性还取决于太阳净 辐射的精度和实时的天气预报信息。

除上述的理论及经验模型计算法之外,FAO 还建

收稿日期: 2020-05-25

基金项目:云南省应用基础研究重点基金项目(2017FA022);云南重点 研发计划(科技入滇专项);国家自然科学基金项目(51669035);云南 省创新团队建设专项(2018HC024)

作者简介:赵众(1992-),女,云南临沧人。硕士研究生,主要从事农业水土工程研究。E-mail:442798050@qq.com

通信作者:顾世祥(1972-),彝族,云南镇雄人。教授级高工,博士, 主要从事农业节水灌溉理论技术研究。E-mail:gushxang@qq.com

议使用蒸发皿资料来确定 ET_0 (即直接法),通过设 计试验环境,采用蒸发皿等观测仪器观测水面蒸发量, 再经过折算系数 Kn转换计算得到 ET0^[10-11]。蒸发皿蒸 发作为揭示湖泊流域区气候变化响应最直接的指标, 在我国鄱阳湖、巴丹吉林沙漠湖泊、洱海等不同地理 区域的增减变化等研究均有应用[12-15]。在工程实践中 过去单纯使用气温、日照等单一或多个气象因子资料, 运用人工智能或统计模型的方法得到 ET₀ 估计值,近 年来已逐渐将蒸发皿蒸发作为新增输入项以提高 ETo 估计精度^[16-17]。Lennartz 等^[18]将 A 级蒸发皿资料用于 模拟计算逐日、逐小时等不同时间尺度的 ET₀,发现 在逐日的时间尺度下模拟值与标准值的决定系数高达 0.90~0.94, 但在小时等短时间尺度由于微气象环境的 随机波动,模拟效果较差。也有采用辐射与温度等参 数法估算 ET₀^[19-20],效果也很好。张鑫等^[21]针对西南 地区分析了9种K_p经验模型的适用性,得出A98模型 的适用性相对较好。【切入点】折算系数 K_n的确定需 全面考虑蒸发皿所处的下垫面、局部环境及风场和湿 度等条件^[5],数值范围不适于大尺度的推广使用,在 计算和推广上带来一定困难。由于"蒸发悖论"现象 的存在,且"蒸发悖论"的发生与时间尺度的长短又 有关^[22],因此在采用直接观测法对其进行分析计算时, 若 ET₀ 与水面蒸发的变化趋势相反时,也会导致其结 果走向出现误差。【拟解决的关键问题】探究出现"蒸 发悖论"时适宜的参考作物蒸散发量估算模型。

1 材料与方法

1.1 数据资料

洱海位于云南省大理白族自治州,属澜沧江—湄 公河水系,流域面积 2 785 km²,年均气温 15.1 ℃, 年降水量1057mm,水资源总量10.7亿m^{3[23]}。全球 气候变化及低纬度高原的区域响应, 2010-2015 年 洱海地区遭遇了的连续干旱灾害, 流域农业用水及农 田面源加大、湖水位下降、局部区域蓝藻爆发等问题 突出, 洱海流域水生态保护治理已成为全国关注焦点 之一[23]。使用资料包括:①洱海灌区内代表性的大理 气象站 1954—2018 年逐日平均气温(T)、最低气温 (T_{\min}) 、最高气温 (T_{\max}) 、日照时间 (n)、风速 (u)、相对湿度(RH)、降水量、20 cm 蒸发皿蒸发量 (E_{pan})。1954—2001年的20cm蒸发皿蒸发量为大 理站实测数据, 2002-2018 年缺乏实测值, 为保证 不同年代蒸发资料的一致性,采用"云南省地表水资 源"书中 E601/E20=0.69 等直线图,按 0.69 采用 E601 的实测资料对20 cm 蒸发皿蒸发量进行折算。②大理、 洱源、宾川等市县的自然地理、社会经济、农业综合 统计年报、水利(或年鉴)等技术成果。

1.2 逐日 ET₀ 模拟预测方法

加入蒸发皿蒸发资料后,逐日参考作物蒸散发 ET₀预测模拟的精度得到显著提高,本质上是基于中 长期蒸发皿蒸发与 ETo标准值的高度相关性。但具体 到不同的时期和季节,若出现"蒸发悖论"现象时, 二者的变化趋势完全相反,就不能再继续使用蒸发皿 蒸发来预测模拟逐日 ET0 了。为此,本文先采用 M-K 非线性趋势检验法对年、春夏秋冬季节的蒸发皿蒸发 和 ET₀ 的变化进行趋势检验, 识别出"蒸发悖论"时 段。其次,判断模拟预测时段所处时期是否存在"蒸 发悖论"现象,以决策采用不同的 ET₀ 实时预测模型 方法。第三,在"蒸发悖论"时期,由于蒸发皿蒸发 与 ET_0 的变化趋势相反,只能采用随机方法之Copula 联合分布函数模型预测^[24]。第四,未发生"蒸发悖论" 时期, 蒸发皿蒸发与 ET₀ 的变化趋势一致, 可采用多 元线性回归模型和 K, 折算系数模型, 或进一步加入 蒸发皿蒸发项以提高逐日 ET₀ 预测模拟的精度,其技 术流程图见图 1。为分析不同方法模型预报 ETo的精 度,使用4个常用的统计指数来进行评估,分别为平 均偏差(ME)、均方根误差(RMSE)、符合指数(IA)、 Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)^[25]。符合指数(IA) 在0和1之间, IA 越大模拟效果越好。Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)变化范围从-∞到1,值越接近1说 明模拟值和实际值越接近。



图1 技术流程

Fig.1 Research technical flow chart

1.2.1 M-K 趋势检验分析

为检验 *ET*₀、蒸发皿蒸发及气温的变化趋势,采用 Mann Kendall (M-K) 非线性趋势检验法^[26]。具体检验原理如下:

设时间序列为 $\{x_i\}$ (*i*=1,2, …, *n*), $\{x_j\}$ 的对偶数 *S* ($x_i < x_j$, *i*<*j*, *i*=1, 2,…, *n*, *j*=*i*+1, …, *n*)为:

$$S = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=i+1}^{n} \operatorname{sgn}(x_i - x_j)$$
, (1)

$$U = \frac{\tau}{\sqrt{Var(\tau)}},$$
 (2)

$$\tau = \frac{4S}{n (n-1) - 1},$$
 (3)

$$Var (\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)}, \qquad (4)$$

式中: sgn()为符号函数; U为 M-K 统计量。使用 M-K 法进行突变检验时,其原理如下:

$$d_k = \sum_i^k m_i \ (2 \leq k \leq n), \tag{5}$$

式中: m_i 为 $x_i > x_j$ (1 $\leq j \leq i$)的样本累积数; d_k 的均值以及方差定义如下:

均值:
$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4} (2 \le k \le n).$$
 (6)

方差:
$$Var(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}$$
 (2 $\leq \underline{k} \leq n$)。 (7)
在时间序列随机独立假设下,定义统计量:

$$UF_{k} = \begin{cases} 0 & k=0\\ \frac{d_{k}-E(d_{k})}{\sqrt{Var(d_{k})}} & 2 \leq k \leq n \end{cases}$$
(8)

所有的 UF_k组成 1 条 UF 曲线,把同样的方法引 用到反序列中,得到 1 条 UB 曲线,将统计量 UF 和 UB 2 条曲线与±1.96 2 条直图线绘制到同一坐标表下, 当出现 UF 和 UB 曲线 2 条线的交点时,即为突变点。 1.2.2 多元线性回归模型

将数据输入 SPSS 统计分析工具中,采用逐步回

归方法进行变量引入,采用 F 检验概率作为判断标准 值,进入概率<0.05,移除概率>0.1。

1.2.3 多元 Copula 函数预测 ET₀

构建 T、T_{max}、E_{pan}3 种气象因素的边缘分布函数, 选用有代表性的正态分布、gamma 分布、lognormal 分布、weibull 分布分别构建 T、T_{max}、E_{pan}的边缘分 布函数,并从中选择拟合效果最好的分布函数。T 选 择 weibull 分布,T_{max}选择 weibull 分布,E_{pan}选择正 态分布。之后分别构建 T-T_{max}-E_{pan} 三维 Normal Copula 模型,T-T_{max}、T-E_{pan}、T_{max}-E_{pan}的3种二维 Normal Copula 模型。计算出3种气象因素之间不同组合对应 的联合分布,并将其记为预测 ET₀ 分布概率,在带回 ET₀的边缘分布函数中计算出 ET₀的值,其中 ET₀的 边缘分布函数为 gamma 函数,即为预测 ET₀值,优 选出预测效果最佳的气象因子组合模型。详细的方法 模型及应用参见相关文献[24]。

2 结果与分析

2.1 变化趋势分析

采用 M-K 趋势检验法对大理站 1954—2018 年共 65 a 的蒸散发量、气温及 20 cm 蒸发皿蒸发量长时间 序列变化趋势,以及各年代际间的变化趋势进行检验, 结果如表 1。并绘制年值及春夏秋冬季各自 65 a 长时 间序列的所示变化趋势线以及 5 a 滑动平均曲线(图 2)。

语日	마구 탄자	1054—2018 在	年代际变化								
坝日	可权	1954—2018 年	1960—1969年	1970—1979年	1980—1989年	1990—1999年	2000—2009年	2010—2018年			
	全年	0.07*	-1.07*	-0.36*	-1.25	1.61	0.89*	-1.97			
	春	1.58*	-1.25*	0.00	0.18	1.25	1.25*	-0.54			
ET_0	夏	-0.70	-0.54*	-0.18*	-0.18	0.54*	1.07*	-0.89			
	秋	-2.53	-0.72*	-1.07*	-1.25	0.36	-0.36*	-2.50*			
	冬	-0.65	0.72	0.72*	-0.72	0.72	0.89*	-1.97			
	全年	3.13	-0.72	-0.36	0.18	1.97	1.61	-1.07			
	春	2.60	-1.07	0.00	0.18	1.25	0.98	-0.72			
Т	夏	1.92	-0.36	0.00	0.36	0.00	1.43	-0.18			
	秋	2.79	-1.25	-1.61	-0.72	0.72	0.72	0.00			
	冬	2.67	0.54	0.36	-0.36	0.89	2.15	0.00			
	全年	-5.46	0.00	0.00	-1.07	0.72	-0.36	-0.18			
	春	-4.84	0.00	0.18	0.54	0.72	-1.07	-0.36			
$E_{\rm pan}$	夏	-2.90	0.18	0.27	-0.18	-0.36	0.00	0.00			
	秋	-0.77	0.00	-0.36	-2.68	0.00	0.00	0.72			
	冬	-5.10	0.72	0.00	-1.61	0.89	-0.36	-1.34			

表 1 大理站 1954—2018 年 ET_0 、 T 和 E_{pan} 的 M-K 统计值 Table 1 Dali meteorological station's M-K statistics of ET_0 in 1954—2018

注 *为出现蒸发悖论现象。

由表 1 可知,大理站参考作物蒸散发 *ET*₀ 在 1954—2018 年长时间序列中 M-K 统计值为 0.07,呈 上升趋势,但除 1990 年和 2000 年呈上升趋势外,其 余年代呈下降趋势,由图 2 可看出,整体呈上升趋势。 气温的 M-K 统计值为 3.13,呈上升趋势,且其变化通 过 0.05 的显著性检验, 1960、1970 年及 2010 年呈下 降趋势。由图 2 可看出,整体呈先下降后上升趋势。 20 cm 蒸发皿蒸发量的 M-K 统计值为-5.46,呈下降趋势,且其变化通过 0.05 的显著性检验,只有 1990 年 呈上升趋势,并且并由图 1 可看出,整体呈下降趋势。 春夏秋冬四季按春季 2—4 月、夏季 5—7 月、秋季 8—10 月、冬季 11 月一翌年 1 月分段计。对于春季, 蒸散发量和气温基本上呈上升趋势,而 20 cm 蒸发皿 蒸发量呈下降趋势;参考作物蒸散发及气温均只有 1960 年和 2010 年呈下降趋势,20 cm 蒸发皿蒸发量在 20 世纪各年代(10 a)变化不大,进入 22 世纪后呈下 降趋势。对于夏、秋、冬三季,蒸散发量和 20 cm 蒸 发皿蒸发量基本呈下降趋势,而气温大多呈上升趋势。



图 2 1954—2018 年 ET₀、气温、20 cm 蒸发皿蒸发量的变化趋势



2.2 突变分析

采用 M-K 趋势检验法对大理站蒸散发量、气温 以及 20 cm 蒸发皿蒸发量 1954—2018 年共 65 a 的长 时间序列的变化趋势以及各季节的变化趋势进行突 变分析,其结果见图 3。由图 3 可知,蒸散发量对于 全年的长时间序列来说, UF 和 UB 的交点较多,表 示其变化较为频繁,而从 M-K 统计值分析可知在 1960、1970 年及 2000 年出现"蒸发悖论",但除 1960 年出现交点较多外,1970 年和 2000 年均未出现交点。 对于春、秋 2 季,春季突变在 2008 年和 2016 年,秋 季突变在 1993 年和 2015 年。夏、冬 2 季则变化较为 频繁。20 cm 蒸发皿蒸发量对于全年的长时间序列来



8 UF曲线 --- UB曲线 6 0 4 2 0 1 2 1.96 -1 96 -2 -4 1950 1965 1980 1995 2010 2025 年份 (b) 春季 ET₀ 8 UF曲线 --- UB曲线 6 0 ---- 1.96 M-K统计值 4 -1.96 2 0 -2 -4 1950 1965 1980 1995 2010 2025 年份 (e) 冬季 ET0 UF曲线 UB曲线 8 0 6 1.96 5 週 4 -1.96 4 2 0 W-K统计值 -4 -6 1950 1965 1980 1995 2010 2025 年份 (h) 夏季 Epan 8 UF曲线 UB曲线 6 0 196 M-K统计值 0 2 0 -1.96-2 -4 1950 1965 1980 1995 2010 2025 年份 (k) 全年 T

说, UF 和 UB 的交点出现在 1995 年, 即表示突变出 现在 1995 年, 处于 1990 年, 但只有夏季出现"蒸发 悖论";春、冬 2 季突变均出现在 1996 年, 夏季出 现在 1994 年, 秋季出现在 1987 年。气温对于全年的 长时间序列来说, UF 和 UB 的交点出现在 2009 年, 表示其突变出现在 2009 年, 处于 2000 年。其春、冬 2 季出现在 2008 年, 夏季出现在 2009 年, 秋季出现 在 2007 年。

蒸散发量、20 cm 蒸发皿蒸发量和气温出现突变的时间不同步,这可能是由于影响蒸散发量和 20 cm 蒸发皿蒸发量的因素不仅有气温,还与日照、辐射、降水等多种因素有关。



灌溉排水学报 http://www.ggpsxb.com





Fig.3 1954—2018 mutation analysis of ET_0 , temperature and evaporation capacity of 20 cm evaporating dish

2.3 逐日 ET₀ 预测方法对比分析

2.3.1 未出现"蒸发悖论"时期

 1)单纯的气象因子多元线性回归模型法(*ET*_{0,Metr}) 未引入蒸发皿蒸发项时,为方便对比计算,选择
 p=5%、25%、50%、75%、97%(第1组典型年)所
 对应的1993、1987、1996、1986、2012年共5a的数
 据带入模型之中进行验证。构建气象因素与*ET*₀的线
 性回归模型,其气象因素对*ET*₀影响的显著性及其模 型表达式见表 2。表 3 为不同水文年进行预测 *ET*₀, 其结果与实际逐日平均 *ET*₀(作为标准值)进行对比 的结果,也将 Copula 联合分布函数模型法的结果一 并列出(记为 *ET*_{0,Copl})。由表 3 可知,2 种模型的计 算结果,其相对误差小于 10%、15%、20%、25%的 样本数比例基本上都是多元线性回归模型优于 Copula 联合分布函数模型。

表 2 各气象因素在不同年份对 ET₀影响显著性结果(第1组典型年)

Table 2 Significant results of influence of meteorological factors on ET_0 in different years (Typical year of the first group)

陈 水 韬玄/0/	_	显著	性		粉些堆刑			
P年7八岁贝平7/ %	Т	T n RH u		и	<u></u>			
5	0.821	0.129	0.02	0.027	$ET_0 = 0.245T_A + 0.165n + 0.21S_w - 0.022\rho + 0.027P + 0.675$			
25	0.862	0.102	0.029	0.005	$ET_0 = 0.249T_A + 0.162n + 0.106S_w - 0.029\rho + 0.021P + 1.34$			
50	0.826	0.121	0.029	0.016	$ET_0 = 0.264T_A + 0.175n + 0.155S_w - 0.026\rho + 0.03P + 0.66$			
75	0.875	0.074	0.039	0.011	$ET_0 = 0.236T_A + 0.153n + 0.134S_w - 0.029\rho + 0.016P + 1.235$			
97	0.853	-	0.11	0.037	$ET_0 = 0.283T_A + 0.233S_w - 0.032\rho + 1.674$			

注 表中 ET_0 为日蒸散发, E_1 为 20 cm 蒸发皿蒸发量, ρ 为湿度, T_A 为气温, S_w 为风速, n为日照, P为降水量。

表 3 ET₀预测值与实际值精度统计(第1组典型年)

Table 3	Statistical table of accuracy	of ET_0 predicted	value and ET_0 actual value	(Typical year of the	e first group)
	-	• • • •	0	21 2	0 1

降水频率/%	模型形式	<i>ERR</i> <10%	<i>ERR</i> <15%	ERR<20%	ERR<25%	ERR<30%	ME	RMSE	IA	NSE
	回归模型	72.05%	84.93%	93.97%	96.44%	97.81%	0.38	0.37	0.98	0.93
5	T-T _{max} Copula 模型	71.64%	84.59%	94.39%	97.62%	98.40%	0.17	0.64	0.99	0.93
	回归模型	73.97%	86.58%	93.42%	96.71%	98.90%	0.46	0.36	0.98	0.94
25	T-T _{max} Copula 模型	61.37%	86.71%	87.95%	95.07%	98.36%	0.16	0.54	0.99	0.98
50	回归模型	77.87%	90.16%	97.27%	98.36%	98.91%	0.04	0.35	0.96	0.87
50	T-T _{max} Copula 模型	57.81%	81.23%	84.93%	91.78%	97.53%	0.25	0.59	0.99	0.93
75	回归模型	80.00%	89.32%	96.16%	97.81%	98.36%	0.65	0.38	0.99	0.95
75	T-T _{max} Copula 模型	58.49%	77.12%	80.55%	89.32%	94.79%	0.30	0.64	0.98	0.90
07	回归模型	61.64%	79.18%	89.32%	94.79%	97.81%	0.11	0.57	0.95	0.81
97	T-T _{max} Copula 模型	77.70%	82.46%	86.94%	95.33%	97.16%	0.12	0.63	0.99	0.91
								5013		

2) 蒸发皿折算系数 *K*_p模型法(*ET*_{0,*K*_p)}

有学者研究蒸发皿系数 $K_p = ET_0/E_{pan}$,将实际的 K_p 作为因变量,以实测的逐日相对湿度和 2 m 高度处

风速作为自变量。本文根据前人研究^[21],选用 A98 模型,并根据大理站的气象因素将其模型修正后为下:

$K_{\rm p} = 0.79 + 3.41 \times 10^{-3} RH - 4.5 \times 10^{-4} u_2 RH - 3 \times 10^{-5} u_2 F + 3.27 \times 10^{-3} u_2 \ln(F) - 3.89 \times 10^{-3} u_2 \times \ln(86.4 u_2)$

$-0.010 6 \ln(86.4u_2) \ln(F) + 6.3 \times 10^{-4} [\ln(F)]^2 \ln(86.4u_2),$

式中: K_p即为蒸发皿系数; U₂为2m高度处风速; RH为相对湿度; F为生长作物顶风吹程, 20 cm 蒸发 皿安置与地面距离显著大于 Class-A 型蒸发皿, 受 F 影响较小, F 取经验值 20 m。预测结果与标准值见表 4。其预测结果总体上不如采用多元线性回归模型对 ET₀进行预测的效果好,这可能是由于该模型在预测 时间尺度较小时不适用,为进一步探究原因,又用该 模型进行了月尺度的 *ET*₀ 预测,其结果显示,相对误 差<10%的样本数增加到 45%、<15%的样本数为 55%、<20%的样本数为 76.7%、<25%的样本数为 90%、<30%的样本数为 95%。由此可知,该模型在 月尺度上的 *ET*₀ 预测精度较高,但在日尺度上预测精 度较低,可能是由于大理站风速在中短时间尺度下变 化各异,高原盆地和湖泊区形成的小气候影响所。

表 4 K_p蒸发皿折算系数模型 ET₀预测值与实际值精度统计(第1组典型年)

Table 4 Statistical table of accuracy of ET₀ predicted value and ET₀ actual value of conversion

_	coefficient model of K_p evaporating dish (Typical year of the first group)											
_	降水频率/%	IRR<10%	IRR<15%	IRR<20%	IRR<25%	IRR<30%	ME	RMSE	IA	NSE		
_	5	36.16%	50.41%	58.90%	68.22%	74.52%	-0.04	1.07	0.87	0.39		
	25	34.25%	50.14%	63.56%	70.68%	75.07%	0.70	1.17	0.87	0.31		
	50	37.81%	52.60%	60.82%	69.32%	75.07%	0.72	1.11	0.85	0.30		
	75	39.45%	55.07%	66.30%	74.79%	81.64%	0.35	1.05	0.90	0.56		
	97	27.67%	41.92%	55.34%	66.30%	75.89%	1.58	1.25	0.84	0.35		

表5 各气象因素在不同年份对 ET_0 影响显著性结果(引入 E_{nan})

Table 5 Significant results of influence of meteorological factors on ET_0 in different years (introduce E_{pan})

限水晒莎 /0/		显著	皆性		<i>粘</i> 7些 档 刊			
冲小小小平/%	T E _{pan} u n		n	<u> </u>				
5	0.37	0.13	0.23	0.18	$ET_0=0.155E_1+0.21 S_w+0.098n+0.305 T_A+0.019P-1.138$			
25	0.23	0.5	0.03	0.13	$ET_0{=}0.198E_1{+}0.228\ T_{\rm A}{+}0.069n{+}0.026P{+}0.059\ S_{\rm w}{-}0.954$			
50	0.73	0.03	0.05	0.15	$ET_0 = 0.14 E_1 + 0.131n + 0.141 S_w + 0.224 T_A + 0.024P - 0.011\rho - 0.201$			
75	0.43	0.11	0.14	0.15	$ET_0{=}0.125\ E_1 {\ +}0.076n{\ +}0.126\ S_{\rm w} {\ +}0.166\ T_{\rm A} {\ -}0.016\rho{\ +}0.053$			
97	0.853	-	0.037	-	$ET_0=0.283 T_A + 0.233 S_w - 0.032\rho + 1.674$			

表6 ET₀预测值与实际值精度统计(引入 E_{pan})

	Table 6	Statistical table of accuracy of	predicted value and actual value	(introduce E_{nan})
--	---------	----------------------------------	----------------------------------	------------------------

								P.m.		
降水频率/%	模型形式	<i>IRR</i> <10%	<i>IRR</i> <15%	IRR<20%	IRR<25%	IRR<30%	ME	RMSE	IA	NSE
-	回归模型	75.07%	89.59%	95.89%	97.26%	98.36%	0.30	0.33	0.99	0.94
5	T- E _{pan} Copula 模型	59.50%	84.20%	92.10%	96.40%	98.66%	-0.12	0.52	0.96	0.87
25	回归模型	82.19%	93.97%	96.99%	99.18%	99.45%	0.09	0.30	0.99	0.96
25	T- E _{pan} Copula 模型	65.21%	86.32%	92.10%	97.00%	98.90%	-0.15	0.44	0.98	0.91
50	回归模型	79.78%	92.35%	96.45%	98.63%	98.63%	-0.11	0.48	0.97	0.88
50	T- E _{pan} Copula 模型	60.70%	88.52%	91.00%	95.60%	98.60%	-0.22	0.53	0.95	0.84
75	回归模型	79.18%	91.51%	95.34%	97.53%	98.63%	0.39	0.35	0.99	0.95
15	T- E _{pan} Copula 模型	60.80%	79.52%	86.30%	94.80%	97.00%	-0.22	0.56	0.97	0.88
07	回归模型	61.64%	79.18%	89.32%	94.79%	97.81%	0.108	0.56	0.95	0.81
97	T- E _{pan} Copula 模型	59.70%	81.25%	88.30%	94.80%	97.23%	-0.19	0.63	0.95	0.84

3)加入 E_{pan}后的多元回归模型法(ET_{0,Epan+Metr})从大理站气象因子、蒸发皿蒸发与逐日 ET₀的线性回归分析看,将 20 cm 蒸发皿蒸发量与气象因子一并作为输入,采用多元线性规划方法推求模型参数、

预测逐日 *ET*₀,并进行误差分析,结果如表 5、表 6 所示。对比表 3 未引入 *E*_{pan}时的结果,其预测值与实 测值的精度均有提升。表 7 为单纯的气象因子多元线 性回归模型法(*ET*_{0,Metr})、*T-T*_{max}二维 Copula 联合分 布函数模型法($ET_{0,Copl}$)、蒸发皿折算系数 K_p 模型 法($ET_{0,Kp}$)和加入 E_{pan} 后的多元回归模型法 ($ET_{0,Epan+Metr}$)等4种模型方法,进行前述典型年组 的逐日 ET_0 预测,相对误差 ERR小于10%、15%、20% 和 25%的样本量占比。由表7可知,在未出现"蒸发 悖论"的时期,加入 E_{pan} 后的多元回归模型法 ($ET_{0,Epan+Metr}$)所得预测 ET_0 的预测结果与标准值间 的误差最小,其次为单纯的气象因子多元线性回归模 型法($ET_{0,Metr}$),最差的为蒸发皿折算系数 K_p 模型 法($ET_{0,Metr}$),最差的为蒸发皿折算系数 K_p 模型 法($ET_{0,Kp}$)。另一方面,参与对比的 $T-T_{max}$ 二维 Copula 联合分布函数模型($ET_{0,Copl}$)的预测效果总体最佳, 进一步表明其方法的普适性。

2.3.2 出现"蒸发悖论"时期

为方便计算,选择 p=7%、37%、47%、77%、95% (第 2 组典型年,处于"蒸发悖论"期)所对应的 2000、2016、2001、2003、1960年共5a的数据带入 模型之中进行验证。构建气象因素与 ET₀的线性回归 模型,其气象因素对 ET₀影响的显著性及模型见表 8。 由表 9 可看出,在"蒸发悖论"时期,蒸发皿蒸发与 同期 ET₀的变化趋势相反,只有采用修正后的 T-T_{max} 二维 Copula 模型(记为 ET_{0,Copl}),其预测精度也显 著高于多元线性回归模型。

Table 7	Relative error ratio of four daily ET_0 prediction models										
降水 频率/%	模型形式	IRR<10%	<i>IRR</i> <15%	IRR<20%	IRR<25%						
	$ET_{0,Metr}$	72.05	84.93	93.97	96.44						
5	$ET_{0,Copl}$	71.64	84.59	94.39	97.62						
5	$ET_{0,Kp}$	36.16	50.41	58.90	68.22						
	$ET_{0,Epan+Metr}$	75.07	89.59	95.89	97.26						
	$ET_{0,Metr}$	73.97	86.58	93.42	96.71						
25	$ET_{0, Copl}$	61.37	86.71	87.95	95.07						
25	$ET_{0,Kp}$	34.25	50.14	63.56	70.68						
	$ET_{0,Epan+Metr}$	82.19	93.97	96.99	99.18						
	$ET_{0,Metr}$	77.87	90.16	97.27	98.36						
50	$ET_{0,Copl}$	57.81	81.23	84.93	91.78						
50	$ET_{0,Kp}$	37.81	52.60	60.82	69.32						
	$ET_{0,Epan+Metr}$	79.78	92.35	96.45	98.63						
	$ET_{0,Metr}$	80.00	89.32	96.16	97.81						
75	$ET_{0, Copl}$	58.49	77.12	80.55	89.32						
15	$ET_{0,Kp}$	39.45	55.07	66.30	74.79						
	$ET_{0,Epan+Metr}$	79.18	91.51	95.34	97.53						
	$ET_{0,Metr}$	61.64	79.18	89.32	94.79						
00	$ET_{0,\mathrm{Copl}}$	77.70	82.46	86.94	95.33						
90	$ET_{0,Kp}$	27.67	41.92	55.34	66.30						
	ET _{0,Epan+Metr}	61.64	79.18	89.32	94.79						

表7 4种逐日 ET0 预测模型的相对误差占比

表 8 各气象因素在不同年份对 ET0影响显著性结果(第2组典型年)

Table 8	Significant results of	of influence of	meteorological	factors on ET_0	in different year	s (Typical)	vear of the second group)
	8						

陈水			显著性			<u> </u>		
四十八小八平/ %	Т	n	RH	и	Р	<u> </u>		
7	0.847	0.098	0.022	0.027	0.006	$ET_0 = 0.256T_A + 0.15n + 0.221S_w - 0.022\rho + 0.019P + 0.552$		
37	0.911	-	0.069	0.02	-	$ET_0=0.218T_A+0.213S_w-0.029\rho+2.6$		
47	0.658	-	0.324	-	0.018	$ET_0 = 0.214T_{\rm A} - 0.045\rho + 0.044P + 4.213$		
77	0.699	-	0.27	-	0.031	$ET_0=0.234T_{\rm A}-0.048\rho+0.073P+4.026$		
95	0.843	0.078	0.034	0.044	-	$ET_0 = 0.283T_A + 0.137n + 0.241Sw - 0.023\rho + 0.033P + 0.226$		

表9 逐日 ET₀预测值与实际值精度统计(第2组典型年)

降水频率/%	模型形式	IRR<10%	<i>IRR</i> <15%	IRR<20%	IRR<25%	IRR<30%	ME	RMSE	IA	NSE
7	回归模型	75.62%	81.23%	94.79%	98.36%	99.45%	0.73	0.35	0.98	0.93
	T-T _{max} Copula 模型	77.43%	86.56%	92.95%	98.52%	99.63%	0.28	0.56	0.99	0.91
37	回归模型	51.51%	67.67%	81.92%	87.67%	93.42%	-1.04	0.62	0.93	0.76
	T-T _{max} Copula 模型	75.89%	78.44%	84.79%	95.75%	96.05%	0.41	0.68	0.97	0.86
47	回归模型	50.41%	67.67%	78.90%	85.21%	91.78%	0.21	0.73	0.89	0.66
	T-T _{max} Copula 模型	68.36%	73.70%	83.04%	93.29%	95.58%	0.24	0.61	0.98	0.90
77	回归模型	47.40%	64.66%	78.63%	86.30%	91.78%	-0.45	0.78	0.89	0.67
	T-T _{max} Copula 模型	66.16%	76.71%	85.34%	94.66%	95.81%	0.25	0.61	0.99	0.90
95	回归模型	74.32%	86.89%	92.35%	95.90%	97.54%	-1.42	0.44	0.96	0.84
	T-T _{max} Copula 模型	74.10%	79.95%	82.51%	89.89%	97.16%	0.18	0.60	0.98	0.90

3 讨论

"蒸发悖论"的结果与谢平^[22]等采用云南省 1981—2011年长时间序列共 52个站点的气象数据对 云南省内滇西地区"蒸发悖论"的探讨结果趋势相同, "蒸发悖论"的有无与时间段的长短选取有关,长时 段的研究序列可能会掩盖短时段的"蒸发悖论"现象。

蒸散发量、20 cm 蒸发皿蒸发量和气温出现突变的时间不同步,这可能是由于影响蒸散发量和 20 cm 蒸发皿蒸发量的因素不仅有气温,还与日照、辐射、降雨等多种因素有关^[27]。孙洁等^[28]通过对鄂尔多斯的蒸散发研究,发现风速的下降是潜在蒸散发量减小的主要因素;同时,日照时间的减小和降水量的增加也是鄂尔多斯高原西部潜在蒸散发量减小的关键因素。与分析结果相一致。

对于参考作物蒸散发量 *ET*₀的多元线性回归模型 预测方法、数值计算方法都有较多研究^[5-11],本文将 "蒸发悖论"与几种计算方法相结合,找出在未出现 "蒸发悖论"时采用线性回归模型方法较优,而在出 现"蒸发悖论"时,则采用高维 Normal Copula 函数 模型进行预测较优。

4 结 论

在 1954—2018 年的长时间序列上, 洱海流域大 理站的 20 cm 蒸发皿蒸发量均呈下降趋势, 参考作物 蒸散发量 *ET*₀和气温呈上升趋势, *ET*₀的上升趋势更 平缓, 但在短时间序列上结果存在年代各异性。

未出现"蒸发悖论"时期,加入 *E*_{pan}后的多元回 归模型法(*ET*_{0,*E*pan+Metr})所得逐日 *ET*₀的预测结果与 标准值间的误差最小,其次为单纯的气象因子多元线 性回归模型法(*ET*_{0,Metr}),最差为蒸发皿折算系数 *K*_p模型法(*ET*_{0,*K*p})。因此,可采用加入 *E*_{pan}后的多 元回归模型法(*ET*_{0,*E*pan+Metr})进行逐日 *ET*₀预测,气 温对其影响的显著性最大。出现在"蒸发悖论"时期, 采用 *T*-*T*_{max}二维 Normal Copula 模型的精度更高。

采用加入 *E*_{pan} 的多气象因子线性回归模型进行 预测时,其预测结果精度较高。而采用二维 Normal Copula 模型预测所需气象因素却是最少,可在气象因 素缺失时获得较好的预测结果。

参考文献:

- ZHANG Yongqiang, PEÑA-ARANCIBIA J L, MCVICAR T R, et al. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components[J]. Scientific Report, 2016, 6: 19124.
- [2] ZHANG Ke, KIMBALL J S, NEMANI R R, et al. Vegetation greening

and climate change promote multidecadal Rises of global land evapotranspiration[J]. Scientific Report, 2015, 5: 15956.

- [3] ZHAO L L, XIA J, XU C Y, et al. A review of evapotranspiration estimation methods in hydrological models[J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(2): 359-369.
- [4] 张强,杨泽粟,郝小翠,等.北方蒸散对气候变暖响应随降水类型转换特征[J].科学通报,2018,63(11):1035-1049.
 ZHANG Qiang, YANG Zesu, HAO Xiaocui, et al. Transition features of surface evapotranspiration responding to climate warming with spatial precipitation based climate type in northern China [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(11):1035-1049.
- [5] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration Guideline for computing crop requirement[J]. Irrigation and Drainage Paper No.56 FAO, 1998.
- [6] LIU Xiaoying, LIN Erda. Performance of the Priestley-Taylor equation in the semiarid climate of North China [J]. Agricultural Water Management. 2005, 71(1): 1-17.
- [7] 贾悦,崔宁博,魏新平,等.考虑辐射改进Hargreaves模型计算川中 丘陵区参考作物蒸散量[J].农业工程学报,2016,32(21):152-160.
 JIA Yue, CUI Ningbo, WEI Xinping, et al. Modifying Hargreaves model considering radiation to calculate reference crop evapotranspiration in hilly area of central Sichuan Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(21): 152-160.
- [8] IRMAK S, IRMAK A, ALLEN R S, et al. Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climate[J].
 ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(5): 336-347.
- [9] TRAORE S, LUO Y F, FIPPS G. Deployment of artificial neural network for short-term forecasting of evapotranspiration using public weather forecast restricted messages [J]. Agricultural Water Management, 2016, 163: 363- 379.
- [10] 樊军, 王全九, 郝明德. 利用小蒸发皿观测资料确定参考作物蒸散 量方法研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 14-17.
 FAN Jun, WANG Quanjiu, HAO Mingde. Estimation of reference crop evapotranspiration by Chinese pan[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(7): 14-17.
- [11] 段春锋, 缪启龙, 曹雯, 等. 西北地区小型蒸发皿资料估算参考作物 蒸散[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 94-99.

DUAN Chunfeng, MIAO Qilong, CAO Wen, et al. Estimation of reference crop evapotranspiration by Chinese pan evaporation in Northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(4): 94-99.

- [12] 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 Xiaosong, LI Mei, WANG Shigang, 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.
- [13] 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): 1 012-1 020.
 HAN Pengfei, WANG Xusheng, HU Xiaonong, et al. Dynamic relationship between lake surface evaporation and meteorological factors in the Badain Jaran desert[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1 012-1 020.
- [14] 黄慧君,王永平,李庆红. 气候变暖背景下洱海水面蒸发量的变化 及影响因素[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(1): 32-35.
 HUANG Huijun, WANG Yongping, LI Qinghong. Evaporation variation from Er hai Lake and its controls under climatic warming[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2010, 26(1): 32-35.
- [15] REZAIE-BALF M, KISI O, CHUA L H C. Application of ensemble empirical mode decomposition based on machine learning methodologies in forecasting monthly pan evaporation [J]. Hydrology Research, 2019, 50 (2): 498-516.
- [16] GHUMMAN A R, GHAZAW Y M, ALODAH A, et al. Identification of parameters of evaporation equations using an optimization technique based on pan evaporation [J]. Water, 2020, 12(228): 1-21.
- [17] NOURANI V, ELKIRAN G, ABDULLAHI J. Multi-station artificial intelligence based ensemble modeling of reference evapotranspiration using pan evaporation measurements [J]. Journal of Hydrology, 2019, 577:123958.
- [18] LENNARTZ F, KLOSS S. Evaluating class A Pan-based estimates of daily reference evapotranspiration with respect to irrigation scheduling on sandy soils in a hot arid environment [J]. ASCE Journal or Irrigation and Drainage Engineering, 2018, 144(7): 1-9.
- [19] 张颖,郝兴明,花顶,等. 潜在蒸散发估算的简化方法及其应用[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1 431-1 439.
 ZHANG Ying, HAO Xingming, HUA Ding, et al. A Simplified method and its application for estimating potential evapotranspiration[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1 431-1 439.
- [20] TEGOS A, MALAMOS N, EFSTRATIADIS A, et al. Parametric modelling of potential evapotranspiration-a global survey[J]. Water, 2017, 9 (10):795.

- [21] 张鑫, 庄文化, 李洪宇, 等. 中国西南地区蒸发皿系数Kp研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(9): 109-112.
 ZHANG Xin, ZHUANG Wenhua, LI Hongyu, et al. Research of Pan Coefficient Kp in Southwest of China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(9): 109-112.
- [22] 谢平,龙怀玉,张杨珠,等."蒸发悖论"在云南省的探讨[J]. 灌溉排 水学报, 2016, 35(9): 81-87.
 XIE Ping, LONG Huaiyu, ZHANG Yangzhu, et al. Evaporation Paradox inYunnan Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(9): 81-87.
- [23] 中科院南京地理与湖泊研究所. 中国湖泊调查报告[M]. 北京: 北京
 科学出版社, 2019.
 Nanjing Institute of Geography and Lakes, Chinese Academy of

Sciences. China Lake survey report[M]. Beijing: Science Press, 2019.

- [24] 顾世祥,赵众,陈晶,等.基于高维Copula函数的逐日潜在蒸散量及 气象干旱预测[J].农业工程学报,2020,36(9):143-151.
 GU Shixiang, ZHAO Zhong, CHEN Jing, et al. Daily reference evapotranspiration and meteorological drought forecast based on high-dimensional copula joint distribution functions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(9):143-151.
- [25] LIANG Hao, HU Kelin, Batchelor W D, et al. An integrated soil-crop system model for water and nitrogen management in North China[J]. Scientific Report, 2016, 6: 25755.
- [26] DENG Wen, CHEN Jin, GU Shixiang, et al. Hydrological Variability of Water Level of Dianchi Lake and Its Application [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 780: 062048.
- [27] 杨宇娜, 汪季, 张成福, 等. 吉兰泰及周边地区蒸散发的时空变化规 律[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(S2): 30-36.
 YANG Yuna, WANG Ji, ZHANG Chengfu, et al. Spatial and temporal variations of evapotranspiration in Jilantai and its surrounding areas[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(S2): 30-36.
- [28] 孙洁, 王强民, 刘基. 鄂尔多斯高原西部潜在蒸散发量变化规律研究: 以鄂托克旗为例[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(11): 84-90. SUN Jie, WANG Qiangmin, LIU Ji. Change of the Potential Evapotranspiration in Western Ordos Plateau: Taking Etoke County as an Example[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(11): 84-90.

Calculating Daily Reference Evapotranspiration in Erhai Irrigated District with the Evaporation Paradox in Consideration

ZHAO Zhong¹, ZHOU Mi^{2,3}, ZHANG Liudong¹, GU Shixiang^{1, 2*}, LI Jing¹,

(1. Key Laboratory of Water Security and Water Saving and Emission Reduction in Yunnan Agricultural University, Kunming 650021, China;

2. Yunnan Institute for Investigation Design and Research of Water Resources & Hydropower Engineering, Kunming 650021, China;

3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: [Background] Evapotranspiration (ET) is an important process in the hydrological cycle and has been increasing, as shown by both field measurements and satellite remote sensing, at 0.63 mm/year over the past 30 years due to the increased leaf area index which resulted in a 0.72 mm increase in transpiration. In contrast, evaporation from soil has been decreasing at 0.32 mm/year, a phenomenon known as evaporation paradox. [Objective] The purpose of this paper is to compare the daily reference evapotranspiration (ET_0) calculated from the Penman-Monteith formula with the evaporation paradox in consideration with data measured from a 20cm pan in the Erhai lake irrigation district after modifying the measurements by a pan conversion coefficient. [Method] Meteorological data measured from Dali weather station at upper stretch of the Erhai Lake irrigation district in central Yunnan plateau was used to analyze the occurrence of the evaporation paradox. We then predicted ET_0 using four models: linear regressions using the meteorological factors only, multiplying measurements from the 20cm pan by a pan conversion coefficient, multiple regression model using the meteorological factors in combination with the pan measurements, and the normal copula model. The ET_0 predicted by these models was compared with that calculated from the Penman-Monteith formula. [Result] ①Data measured from the 20 cm evaporation pan showed that the evaporation had been in decline from 1954 to 2018, while ET_0 and temperature had been in increase although the former did not increase as fast as the latter. ET_0 and evaporation measured from the pan trend with time in opposite ways, but the difference between their annual means was not significant. Both seasonal and annual average evaporations showed paradox in the 1960s and the 2000s, while in the 1970s only did the annual average evaporation and seasonal average evaporation in summer, autumn and winter showed paradox. In the 1990s and 2010s, the paradox occurred only seasonally in summer and autumn, respectively. 2Without the evaporation paradox, the daily ET_0 predicted by the multiple regression model using both the meteorological factors and the pan measurements was most accurate compared to the standard ET_0 , followed by the linear regression model using the meteorological factors only; the worst was that calculated by multiplying the pan measurements by a pan conversion coefficient. Among all data we calculated by the model considering both the pan measurements and the meteorological factors, the fractions that have relative errors less than 15%, 20% and 25% were 79.18% ~90.16%, 89.32%~97.23%, 94.79%~98.36%, respectively. ③ In the presence of evaporation paradox, the evaporation measured from the pan and the ET_0 trended differently with time, and the ET_0 can only be calculated using the copula joint distribution function model. The constructed $T-T_{max}$ model was most accurate, and among all data calculated using it, the fractions that have relative errors less than 15%, 20% and 25% were 73.70%~86.56%, 82.51%~92.95%, 89.89%~98.52%, respectively. [Conclusion] We used the M-K test to determine the presence of evaporation paradox. We proved that in the absence of the paradox, the multiple regression model considering both meteorological factors and the pan measurements worked better, while in the presence of the paradox, the $T-T_{max}$ two-dimensional normal copula model was most accurate for predicting ET_0 .

Key words: ET₀; pan evaporation; Mann-Kendall test; Copula function; Erhai irrigated district

责任编辑:赵宇龙