

陕西卤泊滩改良盐渍农田实际蒸散发估算方法比较

郭雪蕊, 黄领梅, 沈冰

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

摘要: 蒸散发是能量循环与水循环的结合, 准确测定与估算区域蒸散发对水资源规划与管理、农业节水研究、作物产量模拟等方面具有重要的现实意义。以陕西省富平县改良盐渍农田为研究对象, 以涡度相关法的实测资料为基准, 采用 Hargreaves - Samani 法 (HS 法)、修正的彭曼 - 蒙蒂斯法 (P - M 法)、Priestley - Taylor 法 (P - T 法) 估算盐渍农田实际蒸散量, 比较并检验了在不同时间尺度, 不同生育期, 不同天气条件下这些估算方法的精度, 以期为类似盐渍农田蒸散量估算提供借鉴。计算结果表明: 在研究期内, P - M 法估算效果最优, P - T 法次之, HS 法效果较差, 且精度允许范围内, 从计算方法的繁简与需求资料难易角度考虑, P - T 法较 P - M 法更适合。

关键词: 实际蒸散发量; 涡度相关法; 改良盐渍农田; 估算方法比较

中图分类号: TV93; S152.7⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)03-0239-05

Comparison on estimation of actual evapotranspiration from improved salinized land of Lubotan, Shaanxi

GUO Xuerui, HUANG Lingmei, SHEN Bing

(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Evapotranspiration is a combination of energy circulation and terrestrial water circulation. It has significant meaning to accurately monitor and estimate evapotranspiration for water resources planning, agriculture water saving research, crop yield simulation. This paper takes improved salinized land in Fuping county of Shaanxi province as the research object, based on the measured data of eddy covariance method, Hargreaves - Samani method (HS method), modified Pangman - Montis method (PM method), and Priestley - Taylor method were used to estimate the actual evapotranspiration (ETa) of salted farmland, and the accuracy of these estimation methods under different time scales, different growth stages and different weather conditions were compared and tested to provide reference for estimating the evapotranspiration of salted farmland. The results showed that P - M method is the best, then followed by P - T method, while HS method is the worst in the research period. The P - T method is more suitable than the P - M method considering the calculation method and the difficulty of the demand data.

Key words: actual evapotranspiration; eddy covariance technique; improved salinized land; estimation method comparison

蒸散发是陆地水循环过程的重要子过程, 决定了从土壤和植被进入大气的水分的多少, 以及伴随着这一过程的潜热和感热的变化, 从而显著地影响下垫面的气候和环境条件^[1]。农业用水中有绝大部分, 甚至 99% 是通过蒸散发的方式最终以汽态的形式返还到大气^[2], 而卤泊滩地区降雨量少, 蒸发量大, 本研究区在卤泊滩经改良后的农田上进行。资料显示, 类似卤泊滩这样的盐碱滩在陕西有 2.47

$\times 10^4 \text{ hm}^2$, 我国盐碱地面积约有 $0.35 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 全世界约有 $9.53 \times 10^8 \text{ hm}^2$; 对此类区域进行作物实际蒸散发研究, 既有必要, 也具有一定实用意义。

目前测定作物蒸发量的方法有很多, 常用的观测方法有涡度相关法、蒸渗仪法、波文比能量平衡法等, 这些方法各有其优缺点, 许多学者曾对测定和估算蒸散的方法做过比较。其中涡度相关技术以较坚实的物理理论基础, 被公认为测定生态系统蒸散量

的标准方法^[3],而在估算潜在蒸散发的公式中, Penman - Monteith 公式计算结果较为准确,适用于不同气候类型区潜在蒸散发量计算^[4-6],但因所需气象资料多,实际应用时受到限制。各种简化公式广泛应用于气候变化情景下水文响应及水资源演变趋势评估,然而多数在方法比较中缺少实测资料做为标准。本研究以治理后还具有盐渍化特性的卤泊滩地区农田为研究对象,以涡度相关法的实测资料为标准,采用 Hargreaves - Samani 法(以下简称 HS 法)、修正的彭曼 - 蒙蒂斯法(以下简称 P - M 法)、Priestley - Taylor 法(以下简称 P - T 法)估算该地区农田蒸散量,对结果进行比较,分析各方法的优缺点,以期对盐渍农田蒸散量计算提供借鉴以及为干旱预测和农田水资源管理提供参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省富平县与蒲城县交界处,古称“卤阳湖”,今称卤泊滩,海拔 375 ~ 400 m,地理坐标是北纬 34°43' ~ 34°50',东经 109°18' ~ 109°42',总面积 8 160 hm²,是一个封闭式构造洼地。洼地内开阔平缓,且西部高东部低,由西北向东南方向倾斜,地面比降为 1/500 ~ 1/1000,地表水和地下水皆汇集于此。卤泊滩属于半干旱大陆性气候^[7]。无霜期 225 d,年平均气温 13.4℃,夏季最高气温 41.8℃,冬季最低气温 -22℃ ~ -10℃。多年平均降水量 484mm,降雨年内分布不均,多集中于 7 - 9 月份,占年降雨量的 52.7%,其他季节较早^[8]。

1.2 富平县生态监测站

富平县生态监测站(109°22'46.3"E, 34°48'00.4"N,海拔 380m)位于卤泊滩一片改良盐碱化农田。其中常规气象观测仪器全部安装于观测塔上,观测项目包括:空气温/湿度、净辐射、光合光子通量密度、(直接辐射强度大于 120 W/m²)日照时数、冠层温度、降雨、风速/风向等。湍流通量数据采集和存贮使用高速数据采集器,以 30 min 数据计算平均值以便分析。通过 EddyPro4.2.1 软件进行计算、检验、校正、存贮等预处理,最终获得显热通量、潜热通量和 CO₂ 通量,以及动量通量和摩擦风速等。有关该通量站详细说明请参见文献[7]。由于研究需要连续的数据,对于因恶劣天气、断电以及去除异常值后造成的缺失数据,采取内插法完善:2 h 内缺失的数据,采用线性插补法;2 h 以外的数据,需根据环境因子,建立相关关系进行插补。由于

2015 年 4 月至 6 月期间部分仪器受损,导致数据缺失,且缺失数据序列较长,无法进行插补。故本次比较仅针对 2015 年 7 月 10 日 - 10 月 6 日进行。

1.3 研究方法

1.3.1 模型原理 农田的实际蒸散量不仅与农田的水热条件有关,还与下垫面类型和作物生育期有关,在使用蒸散模式对作物蒸散发量估算时,需要使用作物系数 K_c 进行修正。在非充分供水条件下,农田蒸散量可以表示为^[9]:

$$ET_a = ET_0 \cdot K_c \quad (1)$$

式中: ET_a 为实际蒸散量,mm/d; ET_0 为参考作物蒸散量,mm/d; K_c 为作物系数。 K_c 采用 FAO - 56 的推荐值并根据试验地观测的气象资料调整得出^[10]。

本研究采用以下 3 种方法计算 ET_0 :

(1)P - M 法^[11]。FAO 对 Penman - Monteith 模型中的阻力参数进行简化,以充分湿润,高度为 12 cm 单叶气孔阻力为 100 m/s 的草地为参照表面,计算参考蒸散发量:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2)$$

式中: R_n 为冠层表面吸收的太阳净辐射通量密度, MJ/(m² · d); G 为增热土壤消耗的热通量, MJ/(m² · d); e_s 为环境饱和水汽压,kPa; e_a 为环境实际水汽压,kPa; Δ 为饱和水汽压 - 温度曲线斜率,kPa/℃; γ 为干湿表常数,kPa/℃; T 为空气温度,℃; U_2 为风速,m/s。计算所需的数据资料如日照时数、平均温度、最高温度、最低温度及相对湿度等均可在数据采集器所取得 daily 数据文件中直接采用。

(2)HS 法^[12]。HS 公式是在利用凉爽气候下的美国加利福尼亚州 Davis 草地测渗计观测数据的基础上发展起来的,基本公式为:

$$ET_0 = 0.0023 \frac{R_a}{\lambda} \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} (T_a + 17.8) \quad (3)$$

式中: R_a 为大气层顶辐射,MJ/(m² · d); λ 为水汽化潜热,MJ/kg; $\lambda = 2.45$ MJ/kg; $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 、 T_a 为日最高、最低气温和平均气温,℃。

(3)P - T 法^[13]。Priestley 和 Taylor 建立了适用于湿润表面的蒸散模式:

$$ET_0 = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} \quad (4)$$

式中: α 为常数($\alpha = 1.26$);其余各项均与公式(2)相同。

1.3.2 模型评价方法 为了更加清楚反映各模型估算蒸散量的准确性以及估算效率,使用相对均方差($RRMSE$)、模型效率(ME)、拟合系数 R^2 和模型决定系数(CD) 进行非线性拟合分析,参数表达式为:

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

(5)

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}$$

(6)

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n} \frac{1}{\bar{O}^2}}$$

(7)

式中: O_i 为第 i 个观测值; P_i 为第 i 个模拟或估算值; n 为样本数; $\bar{O}$ 为观测平均值。

ME 是衡量模拟值与实测值之间的相关性,若 $ME = 0$,则表示模拟值和实测值平均值的预测效果一样好;若 ME 在 $0 \cup 1$ 之间,则表示估算值较好,与实测值接近;若 ME 小于 0,则表示模拟效果不好,应舍弃。 CD 表示估算值对实测蒸散发平均值的偏离程度,若 CD 在 $0 \cup 1$ 之间,说明模型高估了观测值;若 CD 大于 1,说明模型低估了观测值,可据此判断模型对峰谷值的估算是否准确^[14]。相对均方差 $RRMSE$ 用于衡量残差的相对大小,该值越小则表明模型计算结果越好。

总体而言, $RRMSE$ 是衡量实测值与估算值的偏离程度, ME 与 R^2 倾向于预测变量和随机误差,其中 R^2 可直接反映因变量的变化可由自变量解释部分的比重, CD 主要用于反映峰谷值的估算是否准确^[15]。

2 结果与分析

选择 2015 年 7 月 10 日 - 10 月 6 日为研究时段,以涡度相关法的实测资料为标准,采用 HS 法、P - M 法、P - T 法估算农田蒸散量,分析比较各方法估算值与实测值之间的拟合参数,比较各方法的优缺点,找出最合适估算盐渍农田蒸散模型。

2.1 日时间尺度 ET_a

图 1 所示为 3 种方法估算的日时间尺度 ET_a 在

研究期内的变化过程。由图 1 可以看出,估算的日 ET_a 的趋势与涡度相关法基本接近。研究期内,涡度相关法的 ET_a 之和为 280.51 mm;估算 ET_a 之和,P - M 法为 279.62 mm,HS 法为 314.66 mm,P - T 法为 315.18 mm。其中估算 ET_a 误差最小的为 P - M 法,偏小 0.31%;HS 法、P - T 法偏大程度相当,为 12.3%。

3 种方法的日时间尺度 ET_a 相较于实测 ET_a 的相对均方差($RRMSE$)、模型效率(ME)、拟合系数 R^2 和模型决定系数(CD),见表 1。从单项评价指标判断,3 种方法的 ME 均在 $0 \sim 1$ 之间,说明计算结果均可靠;从 R^2 越大越优可知,P - M 法优于 P - T 法,P - T 法优于 HS 法;从 $RRMSE$ 越小越优可知,P - M 法优于 P - T 法,P - T 法优于 HS 法;P - T 法与 HS 法 CD 小于 1,说明高估蒸散量,P - M 法 CD 大于 1,说明低估了蒸散量。

综上所述,3 种方法对日时间尺度 ET_a 的估算效果相比较,P - M 法最优,P - T 法次之,HS 法估算效果最差。

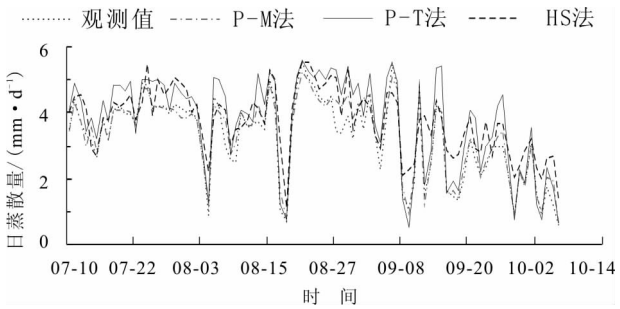


图 1 2015 年实测与估算日时间尺度 ET_a 变化过程

表 1 日时间尺度 ET_a 的估算值与实测值的效果评价

评价指标	R^2	ME	CD	$RRMSE$
H - S 法	0.65	0.48	0.82	0.43
P - T 法	0.84	0.7	0.74	0.37
P - M 法	0.91	0.9	1.18	0.21

2.2 30 min 时间尺度 ET_a

为进一步确定各方法在不同时间尺度上的适用性,将 3 种方法运用于时间步长 30 min。3 种方法的 30 min 时间尺度 ET_a 相较于实测 ET_a 的相对均方差($RRMSE$)、模型效率(ME)、拟合系数 R^2 和模型决定系数(CD),见表 2。

从单项评价指标判断,P - T 法和 P - M 法 ME 在 $0 \sim 1$ 之间,说明计算结果可靠,HS 法 ME 小于 0,说明计算结果差,应舍弃;由 R^2 值可知 P - M 法优于

P-T 法;由 $RRMSE$ 值可知 P-M 法优于 P-T 法;P-T 法 CD 值小于 1,说明高估蒸散量,P-M 法 CD 值大于 1,说明低估蒸散量。对比分析日时间尺度与 30 min 的评价指标,P-T 法和 P-M 法的 R^2 值相较于日尺度增加 0.07 与 0.01, $RRMSE$ 值相较于日尺度减少 0.2 与 0.12,说明两种方法在 30 min 计算精度更高。

综上可知,3 种方法对 30 min 时间尺度 ET_a 的估算效果,P-M 法最优,P-T 法次之,HS 法较差。与日时间尺度相比,P-T 法和 P-M 法估算效果更好,HS 法估算效果变差。

表 2 30 min 时间尺度 ET_a 估算值与实测值的效果评价				
评价指标	R^2	ME	CD	$RRMSE$
HS 法	0.25	-0.11	0.52	0.34
P-T 法	0.91	0.51	0.41	0.17
P-M 法	0.92	0.87	1.02	0.09

2.3 生育期 ET_a

该时间段内,将玉米生育期划分为穗期阶段,本研究约为 7 月 10 日至 8 月 10 日,以及花粒期阶段,约为 8 月 11 日至 10 月 6 日。

由图 1 可知,各生育期估算 ET_a 变化趋势与涡度相关法基本一致。穗期阶段,蒸散量逐渐增大,该阶段玉米生长发育比较旺盛,叶片增大增多;花粒期阶段,蒸散量逐渐减小,该阶段玉米果实长成、成熟,叶片、茎等逐渐老化。3 种方法估算 ET_a 相较于实测 ET_a 的相对均方差($RRMSE$)、模型效率(ME)、拟合系数 R^2 和模型决定系数(CD),见表 3。

表 3 各生育期 ET_a 估算值与实测值的效果评价						
评价 指标	穗期阶段			花粒期阶段		
	HS 法	P-T 法	P-M 法	HS 法	P-T 法	P-M 法
R^2	0.61	0.79	0.80	0.72	0.90	0.93
ME	0.59	0.78	0.71	0.41	0.67	0.94
CD	1.29	1.12	1.14	0.65	0.64	1.06
$RRMSE$	0.53	0.45	0.19	0.27	0.24	0.21

从单项评价指标判断,穗期阶段与花粒期阶段,3 种方法 ME 在 0~1 之间,说明计算结果可靠。从 R^2 可知 P-M 法优于 P-T 法,P-T 法优于 HS 法;从 $RRMSE$ 可知 P-M 法优于 P-T 法,P-T 法优于 HS 法。穗期阶段,3 种方法 CD 大于 1,说明均低估蒸散量。花粒期阶段,HS 法与 P-T 法 CD 小于 1,说明高估蒸散量,P-M 法 CD 大于 1,说明低估蒸散

量。花粒期阶段,3 种方法估算精度均有所提高。综上可知,3 种方法对穗期阶段与花粒期阶段 ET_a 的估算效果,P-M 法最优,P-T 法次之,HS 法估算效果较差。相较于穗期阶段,3 种方法在花粒期阶段估算效果更好。

2.4 晴天与阴天 ET_a

从研究时段内选取晴天与阴天,对 3 种方法估算蒸散量进行比较评价。3 种方法估算 ET_a 相较于实测 ET_a 的相对均方差($RRMSE$)、模型效率(ME)、拟合系数 R^2 和模型决定系数(CD),见表 4。

从单项评价指标判断,晴天时,3 种方法 ME 均在 0~1 之间,说明计算结果均可靠;由 R^2 值与 $RRMSE$ 可知,P-M 法优于 P-T 法,P-T 法优于 HS 法;由 CD 可知 P-T 法高估蒸散量,HS 法与 P-M 法低估蒸散量。阴天时,由 ME 可知,3 种方法计算结果可靠,由 R^2 值与 $RRMSE$ 值可知,P-M 法优于 P-T 法,P-T 法优于 HS 法,且 CD 值均小于 1,表明 3 种方法高估蒸散量。3 种方法在晴天的估算效果好于阴天, R^2 值较阴天均有增大, $RRMSE$ 值均减小。

综上可知,3 种方法在晴天与阴天时 ET_a 的估算效果,P-M 法最优,P-T 法次之,HS 法估算效果最差。相较于阴天,晴天的估算精度更高。

表 4 不同天气条件 ET_a 估算值与实测值的效果评价						
评价 指标	晴天			阴天		
	HS 法	P-T 法	P-M 法	HS 法	P-T 法	P-M 法
R^2	0.74	0.89	0.90	0.51	0.81	0.82
ME	0.32	0.20	0.82	0.03	0.63	0.85
CD	1.24	0.64	1.24	0.76	0.53	0.82
$RRMSE$	0.39	0.43	0.21	0.74	0.45	0.29

3 结 论

本研究基于富平县生态监测站 2015 年 7 月 10 日至 10 月 6 日期间的观测资料,对比分析涡度相关法实测与 3 种方法估算的农田蒸散量,以期为类似环境条件下的农田蒸散量估算提供借鉴。分析结果如下:

- (1)不同时间步长各方法测定蒸散发量比较可知,P-M 法与 P-T 法对于 30min 的模拟效果较日尺度好,计算结果可靠,HS 法在日尺度上模拟效果一般,对于 30 min 的模拟效果差,不建议使用。
- (2)不同生育期各种方法测定蒸散量比较可

知,穗期阶段,P-M法模拟效果一般,P-T法与HS法估算蒸散量与实测值相差较大,花粒期阶段3种方法模拟效果有所提高,P-M法与P-T法计算结果可靠。

(3)不同天气条件下各种方法测定蒸散量比较可知,3种方法在晴天的模拟效果要好于阴天,P-M法最优,P-T法次之,HS法模拟效果最差。

由分析结果可知,在进行该农田蒸散量计算时,在精度允许范围内,从计算方法的繁简与需求资料难易角度考虑,P-T法较P-M法更适合。

参考文献:

- [1] 刘树华,于飞,刘和平,等.干旱、半干旱地区蒸散过程的模拟研究[J].北京大学学报,2007,43(3):359-366.
- [2] Rana G, Katerji N, Ittersum M K V, et al. Measurement and estimate of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate[J]. European Journal of Agronomy, 2000,13(2-3):125-153.
- [3] 刘安花,李英年,薛晓娟,等.高寒草甸蒸散量及作物系数的研究[J].中国农业气象,2010,31(1):59-64.
- [4] 刘晓英,林而达.气候变化对华北地区主要作物需水量的影响[J].水利学报,2004,35(2):77-82.
- [5] 杨贵羽,王知生,王浩,等.海河流域 ET_0 演变规律及灵敏度分析[J].水科学进展,2009,20(3):409-415.

- [6] 贾文雄,何元庆,王旭峰,等.祁连山及河西走廊潜在蒸发量的时空变化[J].水科学进展,2009,20(2):159-167.
- [7] 张晓龙.农田尺度水碳通量观测与研究[D].西安:西安理工大学,2015.
- [8] 苏建伟.基于通量站的农田蒸散发研究[D].西安:西安理工大学,2014.
- [9] 张淑杰,班显秀,纪瑞鹏,等.农田蒸散量模型构建及蒸散状况分析[J].中国农学通报,2006,22(10):454-458.
- [10] 梁文清,蔡焕杰,王健.陕西关中地区夏玉米作物系数试验研究[J].节水灌溉,2011(12):1-4.
- [11] 王卫华,邢旭光,吴忠东,等.作物蒸发蒸腾量计算方法研究与展望[J].安徽农业科学.2013(28):11255-11258.
- [12] 李晨,崔宁博,魏新平,等.改进Hargreaves模型估算川中丘陵区参考作物蒸散量[J].农业工程学报,2015,31(11):129-135.
- [13] 刘倪,夏伟,吴晓蔚,等.几种参考作物蒸散量计算方法的比较[J].河北科技大学学报,2009,30(1):17-24.
- [14] Verstraeten W W, Veroustraete F, Feyen J. On temperature and water limitation of net ecosystem productivity: Implementation in the C-Fix model[J]. Ecological Modelling, 2006,199(1):4-22.
- [15] Wallach D, Makowski D, Jones J W. Working with dynamic crop models[M]. Amsterdam: Elsevier, 2006.

(上接第238页)

- [6] 邓丽娟,马爱玲.基于CRITIC权重与TOPSIS模型的节水灌溉方案优选[J].水科学与工程,2010(2):10-12.
- [7] 于倩雯,吴凤平,沈俊源.基于区间直觉模糊TOPSIS法的节水灌溉工程方案优选[J].节水灌溉,2016(3):68-71.
- [8] 门宝辉.选择节水灌溉方式的灰色关联投影法[J].沈阳农业大学学报,2004,35(5):476-479.
- [9] 张小泓.基于变异系数法的灰色关联模型在节水灌溉工程投标方案优选中的应用[J].节水灌溉,2009(8):54-56.
- [10] 戚颖,付强,孙楠.黑龙江省半干旱地区水资源利用程度评价及节水灌溉模式优选[J].节水灌溉,2007(4):7-9.
- [11] 廖梓龙,魏永富,郭中小,等.基于证据理论的灌溉工程方案优选[J].中国农村水利水电,2012(8):30-33.
- [12] 郭耀煌,刘家诚,刘常青,等.格序理论[M].上海:上海

科技出版社,2003.

- [13] 郝光,牟奇峰,张殿业,等.基于格序偏好的模糊多目标决策方法[J].西南交通大学学报,2006,41(4):517-521.
- [14] 吴先聪,刘星.基于格序理论的管理者绩效评价方法[J].系统工程理论与实践,2011,31(2):239-246.
- [15] 吴凤平,贾鹏,张丽娜.基于格序理论的水资源配置方案综合评价[J].资源科学,2013,35(11):2232-2238.
- [16] 吴凤平,陈艳萍.现代决策方法[M].南京:河海大学出版社,2011.
- [17] 杨柳,周进梅,朱玮.基于改进TOPSIS模型的政府工程采购项目评标研究[J].项目管理技术,2015,13(2):51-55.