

内蒙古不同气候区域参考作物腾发量 估算模型适用性分析

高晓瑜¹, 张莎¹, 屈忠义¹, 汤鹏程², 霍再林³

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古呼和浩特 010018; 2. 中国水利水电科学研究院
牧区水利科学研究所, 内蒙古呼和浩特 010020; 3. 中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘要:本研究基于内蒙古自治区50个站点1951—2013年的气象资料,对文献中已有的33个参考作物腾发量(ET_0)模型进行详细的统计分析,采用10个统计指标对 ET_0 估算模型的性能进行评价,并引入全球绩效指标(GPI)来对模型进行排名。结果表明,在特干旱和干旱地区,基于质量转换(Mass transfer-based, MTB)、基于温度(Temperature-based, TB)和简化彭曼(Simplified FAO-56 PM, SPM)模型的 GPI 接近于1,体现了较好的模拟效果,而基于辐射(Radiation-based, RB)的模型模拟效果最差。在干旱-半湿润和湿润-半湿润地区,SPM和RB模型 GPI 值较高,模拟效果较好,比如湿润-半湿润地区M1(RB)模型 GPI 达到1.0。考虑到模型的便捷性,基于温度(Temperature-based, TB)的模型在相对干旱地区最为适用,而基于辐射的模型在相对湿润地区更为准确。

关键词:参考作物腾发量(ET_0);估算模型; GPI ;气候区域;内蒙古自治区

中图分类号:S161.4 **文献标志码:**A

Applicability of reference evapotranspiration estimation model in different climatic regions of Inner Mongolia

GAO Xiaoyu¹, ZHANG Sha¹, QU Zhongyi¹, TANG Pengcheng², HUO Zailin³

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;
2. Institute of Water Resources for Pastoral Area, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Hohhot,
Inner Mongolia 010020, China; 3. Centre for Agricultural Water Research in China, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the meteorological data from 1951 to 2013 corresponding to 50 sites throughout the Inner Mongolia Autonomous Region, this study made a detailed statistical analysis of the 33 ET_0 models available in the literature. Ten statistical indicators were used to assess the performance of the models. And a global performance indicator (GPI) was introduced to rank the models. The results showed that in hyper-arid and arid areas, the GPI was shown in mass transfer-based (MTB), temperature-based (TB), and simplified FAO-56 PM (SPM) models being close to 1, which reflects the good simulation effect, while radiation-based (RB) model were amongst the worst performers. In the dry sub-humid and moist sub-humid areas, a better GPI was shown in SPM and RB models were higher and the simulation effect were better. For example, the GPI of M1 (RB) being 1.0 in the moist sub-humid area. Considering the convenience of models, Temperature-based (TB) models are the most suitable models in the relatively arid areas, while RB models are more accurate in relatively humid areas.

Keywords: reference crop evapotranspiration (ET_0); estimation model; global performance indicator (GPI); climatic region; Inner Mongolia Autonomous Region

作物腾发量(ET)是水文循环过程中的重要要素,是水文和农业研究中被广泛使用的农业气象变

收稿日期:2021-01-12

修回日期:2021-02-10

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51809142);内蒙古自治区引进人才科研启动项目(DC1900008439);内蒙古自治区自然科学基金面上项目(2020MS05011)

作者简介:高晓瑜(1988-),女,河北邢台人,讲师,主要从事多尺度水循环及农田用水效率研究。E-mail: gxy@imau.edu.cn

通信作者:屈忠义(1969-),男,内蒙古巴彦淖尔人,教授,主要从事水土资源与环境研究。E-mail: quzhongyi@imau.edu.cn

量,精确量作物腾发量对于灌溉制度制定和水资源管理具有重要意义。而 ET_0 估算是定量计算作物耗水量的一个关键环节,准确估算 ET_0 对提高农业用水效率具有重要意义^[1]。很多不同气候区的研究结果都证实了 FAO 56 Penman-Monteith 模型(以下简称 FAO-56 PM)的可行性,联合国粮农组织将其作为一种在全球适用的计算 ET_0 的标准方法。同时此模型在世界许多地区和气候区均适用^[2],而且与其他方法相比 FAO-56 PM 法一直是全球公认的标准 ET_0 估算方法^[3]。然而,FAO-56 PM 方程需要大量连续的气象数据,而许多地区特别是发展中国家的许多观测站缺少长期监测的数据^[4-5]。

因此,很多学者针对需要较少参数的简化 ET_0 估算模型进行了研究,可归类为经验方法^[6-8]、温度法^[9-10]、辐射法^[11-12]、简化彭曼方法^[13-14]和基于质量转换的方法^[15-16],在不同的环境中其性能不同。XU 等^[17]用 7 个基于温度的方程对加拿大两个气候站的 ET_0 进行了评估,结果表明,当使用原始常数值时,两个站的大多数方程都存在较大的偏差。LOPEZ-URREA 等人^[18]研究了 7 种不同经验方程估算半干旱地区 ET_0 的精确性,发现 Hargreaves 和 Sanami 模型是最准确的。SINGH 等^[15]估算并比较了 13 个基于质量转换法的蒸发方程,并建立了该类蒸发方程的广义模型形式。基于辐射的方法也得到了应用。TABARI^[19]估计了 4 种气候条件下需要少量气象数据的 4 种 ET_0 模型(Makkink、Turc、Priestley-Taylor 和 Hargreaves),结果显示:Turc 模型最适合估计寒冷潮湿和干旱气候下的 ET_0 ;在温暖湿润和半干旱地区,Hargreaves 模型是最精确的模型。TABARI 等^[20]在伊朗湿润气候条件下,采用 FAO-56 PM 模型对 8 种基于蒸发皿的方法、7 种基于温度的方法、4 种基于辐射的方法和 10 种基于质量转换的方法进行了评价,并从中选出最佳的方法。

目前在内蒙古自治区的不同气候区域,针对各种方法效果进行评估的研究尚不充分。该地区经度范围较广($97^{\circ}12'E \sim 126^{\circ}14'E$),气候类型多样,因此我们引入了全局性能指标(GPI)对各模型效果进行研究^[21]。本文参考联合国防治荒漠化公约中的全球干旱指数^[22]和任晓东^[23]关于内蒙古自治区的干旱研究将内蒙古自治区划分为特干旱、干旱、半干旱、干旱-半湿润和湿润-半湿润 5 个气候区,将 33 种常用的 ET_0 方程分为四类:(1)基于质量转换的方法;(2)基于温度的方法;(3)基于辐射的方

法;(4)简化 FAO-56 PM 方法。所有的评估均采用 FAO-56 PM 模型为标准,利用内蒙古自治区 5 个气候区 50 个站点的气候资料,确定各类模型在不同气候区的适用性。本研究的主要目的是:(1)选取的 33 种 ET_0 估算方法与标准 FAO-56 PM 方法在内蒙古自治区不同气候区域 1951—2013 年的适用性比较;(2)确定各气候区 FAO-56 PM ET_0 方程相对精确的备选模型,为内蒙古自治区各气候区 ET_0 估算提供参考方法。

1 材料与方法

1.1 研究区域和数据

内蒙古自治区位于中国北部,面积 $118.3 \times 104 \text{ km}^2$,约占中国陆地面积的 12.5%(图 1)。基于联合国防治荒漠化公约提出的全球干旱指数^[22]和任晓东^[23]关于 UNEP 干旱指数的计算结果,本研究将内蒙古自治区由西向东分为特干旱($UNEP < 0.08$)、干旱($0.08 \leq UNEP < 0.2$)、半干旱($0.2 \leq UNEP < 0.5$)、干旱-半湿润($0.5 \leq UNEP < 0.65$)和湿润-半湿润($0.65 \leq UNEP < 1.0$)气候区^[22](表 1)。内蒙古的主要气候特征是冬季长而寒冷、春季干旱有风、夏季短而温暖。年平均气温为 $-4^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$,年平均降水量为 $50 \sim 550 \text{ mm}$,降水集中,夏季降水量占年降水量的 60%~70%。5 个气候区各气象站点的降水量、日均气温和日均相对湿度见图 2。该地区参考作物腾发量波动范围为 $571 \sim 1\ 573 \text{ mm}$,随湿度增大而降低^[24]。

本文使用的数据包括分布于内蒙古自治区的 50 个地面气象站的日最高、最低和平均温度($^{\circ}\text{C}$),日照时数(h),相对湿度(%),气压(Pa)和风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。50 个地点的数据均来源于 1981—2012 年。气象数据来自中国气象数据共享网(<http://www.nmic.cn/>)。50 个台站的分布和详细信息见图 1 和表 1。

1.2 ET_0 估算方法

1.2.1 FAO-56 PM 方法

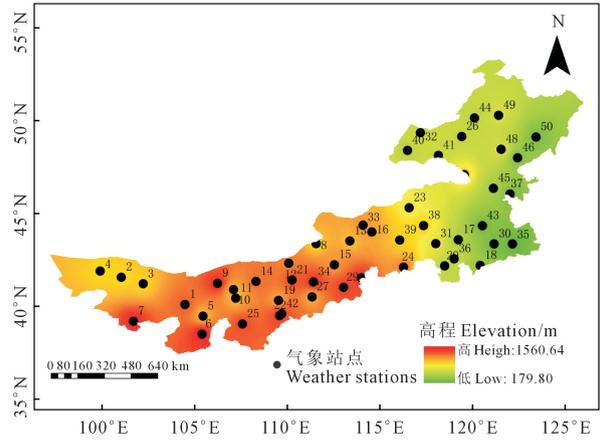
$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

式中, ET_0 为参照作物腾发量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为作物冠层表面净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); T 为平均温度($^{\circ}\text{C}$); u_2 为高度 2 m

处风速($m \cdot s^{-1}$); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压与温度曲线的斜率($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$); γ 为湿度计常数($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$)。本文以 FAO 56 PM 方法为标准,对 33 个 ET_0 简化模型进行评估排序。

1.2.2 简化模型 按照基于辐射方法、基于温度方法、简化的彭曼公式和基于质量转换方法将 33 个估算模型分为四大类。简化模型具体分类情况如表 2 所示。

(1) 基于辐射的方法。在基于辐射的方法中, α 为经验系数($\alpha=1.26$), λ 为蒸发潜热($=2.45 MJ \cdot kg^{-1}$), R_s 为太阳辐射或短波辐射 [$MJ \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$], C_T 为温度常数($C_T=0.025$), T_a 为平均日平均温度($^\circ C$), T_x 为常数(-3)。 T_{max} 和 T_{min} 是每日最高



注:图中站点数字详见表 1。

Note: Numbers of stations in figure are shown in Table 1.

图 1 研究区气象站点位置图

Fig.1 Location of weather stations in the study area

表 1 研究区气象站点分区

Table 1 Regions of weather stations in the study area

区域 Area	地点 Site	区域 Area	地点 Site	
特干旱地区 Hyper-arid area	巴彦诺尔公 Bayannuoergong(1)	半干旱地区 Semi-arid area	海拉尔 Hailaer(26)	
	额济纳 Ejina(2)		呼和浩特 Huhehaote(27)	
	拐子湖 Guaizihu(3)		化德 Huade(28)	
	吉柯德 Jikede(4)		集宁 Jining(29)	
	吉兰泰 Jilantai(5)		开鲁 Kailu(30)	
干旱地区 Arid area	阿拉善左旗 Alashanzuoqi(6)		林西 Linxi(31)	
	阿拉善右旗 Alashanyouqi(7)		满洲里 Manzhouli(32)	
	二连浩特 Erlianhaote(8)		那仁宝力格 Narenbaolige(33)	
	海力素 Hailisu(9)		四子王旗 Siziwangqi(34)	
	杭锦后旗 Hangjinhouqi(10)		通辽 Tongliao(35)	
	临河 Linhe(11)		翁牛特旗 Wengniuteqi(36)	
	满都拉 Mandula(12)		乌兰浩特 Wulanhaote(37)	
	苏尼特左旗 Sunitezuoqi(13)		西乌珠穆沁 Xiwuzhumuqin(38)	
	乌兰特中旗 Wulatezhongqi(14)		锡林浩特 Xilinhaote(39)	
	朱日和 Zhurihe(15)		新巴尔虎右旗 Xinbaerhuyouqi(40)	
半干旱地区 Semi-arid area	阿巴嘎旗 Abagaqi(16)		新巴尔虎左旗 Xinbaerhuzuoqi(41)	
	巴林左旗 Balinzuqi(17)		伊金霍洛旗 Yijinhuoluqi(42)	
	包头 Baotou(18)		扎鲁特 Zhalute(43)	
	宝国图 Baogutu(19)		额吉吉纳 Ejiguna(44)	
	赤峰 Chifeng(20)		索伦 Suolun(45)	
	达茂旗 Damaoqi(21)		扎兰屯 Zhalantun(46)	
	东胜 Dongsheng(22)		湿润-半湿润地区 Moist sub-humid area	阿尔山 Aershan(47)
	东乌珠穆沁 Dongwuzhumuqin(23)			博克图 Boketu(48)
	多伦 Duolun(24)			图里河 Tulihe(49)
	鄂托克旗 Ertuoqueqi(25)		小二沟 Xiaogou(50)	

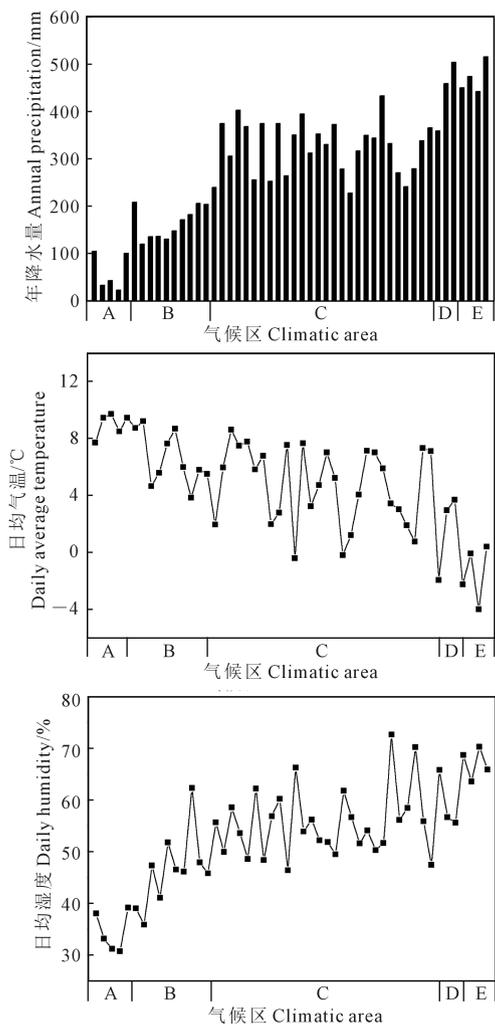
和最低温度($^\circ C$)。 β 随日最高温度 T_{max} 变化。该方法的主要难度是辐射数据为所有气象数据中较难获取的数据。

(2) 基于温度的方法。在表 2 中基于温度的方法中, R_a 为天顶辐射 [$MJ \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$],该参数只需要经纬度和日序数即可计算得到^[17]; P 为降水量(mm),Linacre 方法中 $T_m = T + 0.006 h$, T_m 为实际气温($^\circ C$), T 为观测气温($^\circ C$), h 为海拔(m); A 为纬度($^\circ$), T_d 为平均露点温度($^\circ C$); RH 为平均相对湿

度(%)。

(3) 简化彭曼方法。在简化彭曼方法中, φ 为纬度(rad), C_u 值随 RH 值的变化而变化。简化的 PM 方程所需参数较多,尤其是太阳辐射数据获取难度较大,但该方法的精度较高^[37]。

(4) 基于质量转换的方法。在基于质量转换的方法中, u 为风速。在 Rohwer 和 Penman 模型中, e_s 和 e_a 的单位为 mmHg(1 mmHg=133 Pa),在其余模型中 e_s 和 e_a 的单位为 hPa。除彭曼模型外,所有方



注:A:特干旱地区;B:干旱地区;C:半干旱地区;D:干旱-半湿润地区;E:湿润-半湿润地区。

Note:A: Hyper-arid area; B: Arid area; C: Semi-arid area; D: Dry semi-humid area; E: Moist sub-humid area.

图 2 5 个气候区各气象站点年降水量、日均气温和日均相对湿度

Fig.2 Annual precipitation, daily temperature and daily relative humidity of meteorological stations in five climatic regions

程中风速的单位都是 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;而在彭曼模型中风速的单位是 $\text{miles} \cdot \text{d}^{-1}$ ($1 \text{ miles} \cdot \text{d}^{-1} = 1.6 \text{ km} \cdot \text{d}^{-1}$)。基于质量转换的模型主要需要水汽压和风速等参数,获取难度较小,但该类模型多数为经验回归模型,适用条件限制较多^[15]。

1.3 统计评估

本文采用 10 个统计指标^[21]对 ET_0 估计模型进行评价(表 3),指标描述表中 $ET_{0,m}$ 和 $ET_{0,e}$ 分别为测量和估计的 ET_0 值, n 为观测次数, $ET_{0,m,avg}$ 为测量 ET_0 的平均值。

1.4 ET_0 估算方法的排序

统计误差指标很难对大量的估算方法进行比

较或排名,可使用代表所有统计指标乘法的全球绩效指数(GPI)对不同方程进行最终排序,然后估算 ET_0 值^[21]。GPI 的假设是,如果该指标的值大于中值,则该值离中值越远,模型的准确性相对于其他方法就越低。此外,为了避免某一指标的主导影响,对所有指标的值进行了缩放,使每个指标的取值范围在 0~1 之间。如果任何指标值为 0,则 GPI 值自动变为 0,与其他指标的值无关。另外,加法形式中单个指标不能正确影响 GPI 值,而这种方法还考虑了负 R^2 值的比较,这在其他 GPI 形式中是不可能的。方法 i 的 GPI 定义为:

$$GPI_i = \sum_{j=1}^{10} \alpha_j (\tilde{y}_j - y_{ij}) \quad (1)$$

其中, \tilde{y}_j 为指标 j 缩放值的中值, y_{ij} 为模型 i 指标 j 的缩放值,当 $j=7$ 时, $(R^2)\alpha_j$ 为 -1 ,其他指标下, α_j 为 1。该方法可以得到更高的 GPI 值。

2 结果与分析

2.1 不同气候区的 ET_0 估算模型评价指标

本研究计算了 33 个 ET_0 估算模型的 10 个误差统计指标,由于数据量较大,表 4 中列出了以均方根误差(RMSE)为标准,不同气候区排序前 10 位的模型。由结果可见,很难用单一的误差分析方法对大量不同的模型进行比较或排名。比如,基于 RMSE 值,特干旱、干旱、半干旱、干旱-半湿润和湿润-半湿润地区模型的模拟效果最好的分别为模型 33、18、18、18 和 18,而基于 RMSRE 值,在特干旱、干旱、半干旱、干旱-半湿润和湿润-半湿润气候区模型模拟效果最优的分别为模型 13、31、25、1、1。另外,各模型的精度随气候区域的不同而变化,比如模型 18 的 RMSE 值在特干旱、干旱、半干旱、干旱-半湿润和湿润-半湿润地区的值分别为 1.068、0.845、0.683、0.560、0.466 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$;模型 1 在特干旱、干旱、半干旱、干旱-半湿润和湿润-半湿润地区的 RMSRE 值分别为 0.503、1.193、2.564、2.183、2.143(表 4)。

2.2 ET_0 估算模型在 5 个气候区的适用性

图 3 按 GPI 排序,展示了 5 个气候区排名前 10 的 ET_0 估算模型。所有模型根据类型分为 4 组,分别为基于质量转换的模型(MTB)、简化的彭曼模型、基于温度的模型(TB)和基于辐射的模型(RB)。简化的彭曼模型是 FAO-56 PM 方程的一种简化方法,由于其综合性,它在所有 5 个气候区都表现良好。模型的模拟效果在 5 个气候区有所不同。在特干旱和干旱地区,MTB、TB 和 SPM 模型的 GPI 值更高,表明模拟效果更好,在特干旱地区 M30 模型的

表 2 常用的 ET_0 估算模型
Table 2 Common ET_0 estimation models

模型序号 Model number	方法 Methods	方程 Equation	类型 Type
1	PT ^[25]	$ET_0 = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G)$	
2	Mak ^[26]	$ET_0 = 0.61 \left(\frac{1}{\lambda} \right) \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] R_s - 0.12$	
3	JH ^[27]	$ET_0 = \frac{C_T (T_a - T_x) \times R_s}{\lambda}$	
4	MB ^[28]	$ET_0 = \left\{ (0.0082 T_a - 0.19) \times \frac{R_s}{1500} \right\} \times 2.54$	基于辐射 Radiation-based (RB)
5	JR ^[29]	$ET_0 = \beta \times [3.87 \times 10^{-3} R_s (0.6 T_{\max} + 0.4 T_{\min} + 29)]$	
6	IA ^[30]	$ET_0 = 0.489 + 0.289 R_n + 0.023 T_a$	
7	Irm ^[30]	$ET_0 = -0.611 + 0.149 R_s + 0.079 T_a$	
8	T-1 ^[20]	$ET_0 = -0.642 + 0.174 R_s + 0.0353 T_a$	
9	T-2 ^[20]	$ET_0 = -0.478 + 0.156 R_s - 0.0112 T_{\max} + 0.0733 T_{\min}$	
10	HS ^[31]	$ET_0 = 0.0023 R_a (T_a + 17.8) (T_{\max} - T_{\min})^{0.5}$	
11	Sch ^[20]	$ET_0 = 16 \times \frac{T_a}{RH}$	
12	DA-1 ^[32]	$ET_0 = 0.0013 \times 0.408 R_a (T_a + 17) [(T_{\max} - T_{\min}) - 0.00123P]^{0.76}$	
13	DA-2 ^[32]	$ET_0 = 0.0030 \times 0.408 R_a (T_a + 20) (T_{\max} - T_{\min})^{0.4}$	基于温度 Temperature-based (TB)
14	DA-3 ^[32]	$ET_0 = 0.0025 \times 0.408 R_a (T_a + 16.8) (T_{\max} - T_{\min})^{0.5}$	
15	Tra ^[10]	$ET_0 = 0.0023 \times 0.408 R_a (T_a + 17.8) (T_{\max} - T_{\min})^{0.424}$	
16	Linacre ^[33]	$ET = \frac{500 T_m / (100 - A) + 15(T_a - T_d)}{80 - T_a}$	
17	Rom ^[34]	$ET = 0.0018 (25 + T_a)^2 \times (100 - RH)$	
18	Val-1 ^[35]	$ET_0 = 0.0393 R_s (T_a + 9.5)^{0.5} - 2.4 \left(\frac{R_s}{R_a} \right)^2 + C_u (T_a + 20) \left(1 - \frac{RH}{100} \right)$	简化彭曼 Simplified FAO-56 PM (SPM)
19	Val-2 ^[13]	$ET_0 = 0.0393 R_s (T_a + 9.5)^{0.5} - 0.19 R_s^{0.6} \varphi^{0.15} + 0.0061 (T_a + 20) \left(1 - \frac{RH}{100} \right)$	
20	Val-3 ^[14]	$ET_0 = 0.0393 R_s (T_a + 9.5)^{0.5} - 0.19 R_s^{0.6} \varphi^{0.15} + 0.0061 (T_a + 20) (1.12 T_a - T_{\min} - 2)^{0.7}$	
21	Dal ^[20]	$ET_0 = (0.3648 + 0.07223u) (e_s - e_a)$	
22	Trab ^[20]	$ET_0 = 0.3075 \sqrt{u} (e_s - e_a)$	
23	Mey ^[20]	$ET_0 = (0.375 + 0.05026u) (e_s - e_a)$	
24	Roh ^[20]	$ET_0 = 0.44 (1 + 0.27u) (e_s - e_a)$	
25	Pen ^[20]	$ET_0 = 0.35 (1 + 9.8 \times 10^{-3}u) (e_s - e_a)$	
26	Alb ^[20]	$ET_0 = (0.1005 + 0.297u) (e_s - e_a)$	
27	BW ^[20]	$ET_0 = 0.543 u^{0.456} (e_s - e_a)$	基于质量转换 Mass transfer-based (MTB)
28	WMO ^[20]	$ET_0 = (0.1298 + 0.0934u) (e_s - e_a)$	
29	Mah ^[20]	$ET_0 = 0.15072 \times \sqrt{3.6u} (e_s - e_a)$	
30	W-1 ^[36]	$ET_0 = 0.515 + 3.005(e_s - e_a)$	
31	W-2 ^[36]	$ET_0 = 0.799 + 1.942(e_s - e_a) + 0.064T$	
32	W-3 ^[36]	$ET_0 = -0.066 + 2.907(e_s - e_a) + 0.379u$	
33	W-4 ^[36]	$ET_0 = 0.004 + 1.867(e_s - e_a) + 0.063T + 0.371u$	

表 3 评价 ET_0 方法的 10 个统计指标Table 3 Ten statistical indicators for evaluating the ET_0

统计指标 Statistical indicator	简写 Abbreviation	方程 Equation	方程描述 Description of equation
平均绝对误差 Mean absolute error	<i>MAE</i>	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ET_{0i,m} - ET_{0i,e} $	用于测量估计值与实测值的接近程度。 It was used for measuring how close estimated values are to measured values.
均方根误差 Root mean squared error	<i>RMSE</i>	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_{0i,m} - ET_{0i,e})^2}$	<i>RMSE</i> 越低,模型的预测能力越好。 The lower the <i>RMSE</i> , the better the predictive capability of a model is.
平均绝对相对误差 Mean absolute relative error	<i>MARE</i>	$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left \frac{ET_{0i,m} - ET_{0i,e}}{ET_{0i,m}} \right $	用估计值和测量值之间相对差的平均绝对值表示。 <i>MARE</i> 越小,模型就越好。 It was expressed as average absolute value of relative differences between estimated and measure values. The smaller the <i>MARE</i> , the better the models are.
95%置信水平的不确定性 Uncertainty at 95%	U_{95}	$U_{95} = 1.96 \times (SD^2 + RMSE^2)^{0.5}$	表示模型偏差的更多信息,其中 1.96 为 95%置信水平对应的覆盖率因子, <i>SD</i> 为估计值与实测值之差的标准差。 It was used in order to show more information about the model deviation. Where 1.96 was the coverage factor corresponding 95% confidence level, and <i>SD</i> was the standard deviation of the difference between the estimated and measured values.
均方根相对误差 Root mean squared relative error	<i>RMSRE</i>	$RMSRE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{ET_{0i,m} - ET_{0i,e}}{ET_{0i,m}} \right)^2}$	<i>RMSRE</i> 越小,模型越精确。 The smaller the <i>RMSRE</i> , the accurate the models are.
相对均方根误差 Relative root mean squared error	<i>RRMSE</i>	$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_{0i,m} - ET_{0i,e})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ET_{0i,m}} \times 100$	当 <i>RRMSE</i> < 10% 时,模型的精度被认为是非常高的;当 10% < <i>RRMSE</i> < 20% 时,模型的精度较高的;20% < <i>RRMSE</i> < 30% 时,模型的精度是较差的,当 30% < <i>RRMSE</i> 时,模型精度很差。 Model accuracy was considered excellent when <i>RRMSE</i> < 10%, good if 10% < <i>RRMSE</i> < 20%, fair if 20% < <i>RRMSE</i> < 30% and poor if <i>RRMSE</i> > 30%.
均值偏移误差 Mean bias error	<i>MBE</i>	$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET_{0i,m} - ET_{0i,e})$	表示模型低估(负值)或高估(正值) ET_0 的倾向,而 <i>MBE</i> 值最接近于零是可取的。 It expresses a tendency of model to underestimate (negative values) or overestimate (positive values) ET_0 , while the <i>MBE</i> values closest to zero are desirable.
决定系数 Coefficient of determination	R^2	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{0i,m} - ET_{0i,c})^2}{\sum_{i=1}^n (ET_{0i,m} - ET_{0m,avg})^2}$	通常用于估计模型性能。 R^2 的值接近于 1 表示模型更有效。 It was often used for estimating the performance of models. Values of R^2 close to 1 indicate more efficient models.
相对误差的最大绝对值 Maximum absolute relative error	<i>erMAX</i>	$erMAX = \max \left(\left \frac{ET_{0i,m} - ET_{0i,e}}{ET_{0i,m}} \right \right)$	<i>erMAX</i> 值越小,模型越精确。 The smaller the <i>erMAX</i> , the accurate the models are.
<i>t</i> 统计量 <i>t</i> -Statistic	<i>t</i> -stat	$t-stat = \sqrt{\frac{(n-1) MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}}$	最初由 STONE 提出,与 <i>MBE</i> 和 <i>RMSE</i> 一起使用,用于更完整地评估 ET_0 估计方法。 It was first proposed by STONE to be used in conjunction with <i>MBE</i> and <i>RMSE</i> for more complete evaluation of ET_0 estimation methods.

表 4 5 个气候区不同 ET_0 模式的适用性评价Table 4 Applicability evaluation of different ET_0 models in five climatic regions

地区 Area	模型编号 Model code	MAE	RMSE	MARE	U_{95}	RMSRE	RRMSE	MBE	R^2	erMAX	t-stat
特干旱地区 Hyper-arid area	33	0.587	0.772	0.286	2.086	0.725	18.895	0.223	0.956	0.402	29.055
	32	0.709	0.978	0.312	2.570	0.495	23.904	-0.433	0.929	0.940	49.713
	18	0.821	1.068	0.387	2.898	0.618	26.049	0.191	0.917	1.003	20.318
	31	0.803	1.099	0.283	2.936	0.503	26.728	0.368	0.913	0.369	32.299
	30	0.822	1.156	0.317	3.184	0.574	28.280	-0.070	0.901	0.242	15.098
	16	0.979	1.316	0.401	3.573	0.704	32.186	-0.143	0.873	0.510	31.535
	13	0.959	1.350	0.272	3.433	0.362	32.437	0.736	0.869	0.526	60.968
	14	1.007	1.380	0.318	3.493	0.436	33.211	0.772	0.863	0.649	64.235
	12	1.004	1.390	0.317	3.662	0.440	33.634	0.558	0.861	0.660	41.537
	20	1.019	1.402	0.349	3.585	0.486	33.734	0.737	0.859	0.890	57.824
干旱地区 Arid area	18	0.656	0.845	0.463	2.277	3.999	25.976	0.094	0.921	1.126	33.837
	31	0.720	0.942	0.445	2.410	1.193	28.730	0.446	0.904	0.872	69.988
	30	0.718	0.961	0.484	2.575	6.766	29.596	0.249	0.899	0.940	38.425
	13	0.730	1.024	0.325	2.657	2.141	31.044	0.396	0.886	0.503	59.620
	20	0.764	1.027	0.406	2.668	2.458	31.238	0.403	0.886	0.626	57.922
	14	0.790	1.069	0.387	2.736	1.313	32.410	0.496	0.876	0.714	66.348
	12	0.810	1.110	0.390	2.877	1.429	33.812	0.434	0.866	0.721	61.124
	16	0.860	1.117	0.552	2.978	1.695	34.875	-0.298	0.854	0.845	40.050
	10	0.825	1.127	0.374	2.830	1.523	33.978	0.626	0.862	0.657	78.941
	6	0.873	1.246	0.421	3.311	1.856	37.528	0.427	0.831	0.551	41.345
半干旱地区 Semi-arid area	18	0.524	0.683	0.562	1.877	4.910	25.764	0.042	0.926	1.365	19.093
	33	0.582	0.727	1.190	1.872	20.023	27.715	0.376	0.916	2.651	80.659
	20	0.597	0.782	0.505	2.155	4.818	29.537	0.072	0.903	1.204	16.882
	13	0.573	0.784	0.427	2.158	2.890	29.634	-0.007	0.902	1.045	17.906
	10	0.582	0.792	0.483	2.141	2.564	29.877	0.213	0.901	1.235	40.092
	31	0.626	0.805	0.887	2.068	9.139	30.599	0.400	0.898	2.503	80.033
	14	0.616	0.813	0.539	2.228	2.994	30.714	0.099	0.895	1.352	23.766
	32	0.658	0.831	0.749	2.297	2.915	31.662	0.060	0.889	2.330	12.227
	6	0.633	0.860	0.554	2.365	2.949	32.599	-0.062	0.884	1.056	17.610
	25	0.572	0.861	0.268	2.324	2.032	32.656	0.252	0.883	0.129	41.196
干旱-半湿润地区 Dry sub-humid area	18	0.433	0.560	2.290	1.541	35.589	26.497	0.029	0.932	3.168	17.333
	1	0.475	0.667	0.473	1.790	2.183	31.115	0.211	0.903	0.616	39.425
	15	0.506	0.696	3.177	1.813	101.863	32.617	0.331	0.895	4.971	66.067
	31	0.565	0.696	12.776	1.805	458.001	33.249	0.345	0.894	21.137	67.880
	20	0.535	0.701	2.109	1.918	44.829	33.276	-0.112	0.894	3.032	19.793
	8	0.514	0.701	10.765	1.851	388.113	33.356	0.296	0.893	18.704	58.005
	6	0.562	0.716	3.336	1.911	96.998	34.230	-0.247	0.888	5.526	45.153
	2	0.480	0.726	0.992	1.808	28.151	34.006	0.447	0.886	1.841	95.409
	10	0.555	0.739	3.747	2.039	121.726	35.185	-0.062	0.881	5.688	11.184
	33	0.631	0.779	21.418	1.931	755.059	37.879	0.488	0.858	28.307	94.187
湿润-半湿润地区 Moist sub-humid area	18	0.359	0.466	2.455	1.287	44.016	26.478	0.000	0.938	8.641	11.359
	2	0.292	0.475	0.878	1.230	18.770	26.947	0.238	0.936	2.405	63.071
	1	0.352	0.505	0.439	1.393	2.143	28.710	-0.041	0.927	1.080	15.096
	15	0.409	0.556	3.823	1.513	122.798	31.706	0.121	0.911	12.250	24.065
	8	0.456	0.587	10.996	1.611	397.891	33.574	0.110	0.901	27.342	20.634
	20	0.517	0.691	1.880	1.838	38.985	39.426	-0.260	0.863	3.318	44.222
	31	0.585	0.707	13.164	1.764	462.767	40.516	0.427	0.854	40.086	83.583
	19	0.564	0.709	4.864	1.770	152.559	40.391	0.432	0.856	14.014	83.945
	17	0.493	0.717	0.968	1.934	18.269	40.862	0.196	0.853	4.046	33.153
	23	0.509	0.770	1.642	2.063	41.401	43.953	0.265	0.830	1.317	40.939

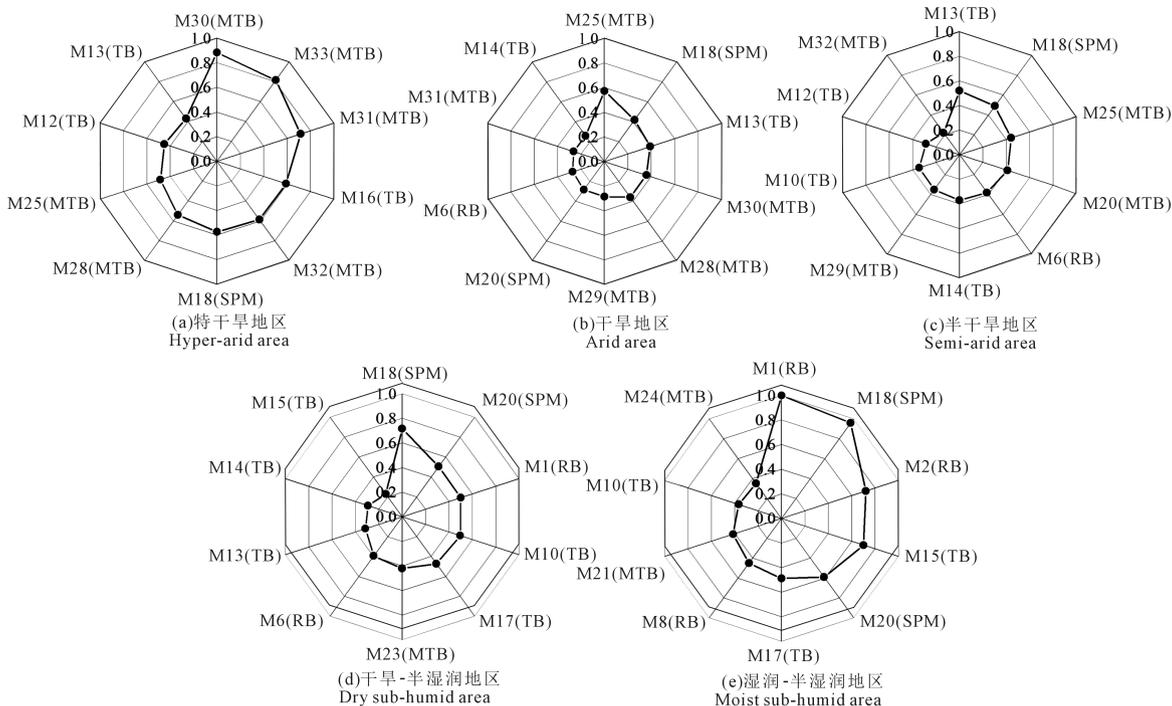
GPI 接近于 0.9, 而 TB 和 RB 模型的 GPI 值较小, 在特干旱地区 GPI 排名前 10 位内没有基于辐射的模型。这可能是由于温差大、日照长、降水少, 当利用温度和日照时数估算辐射时, 存在一定误差。然而, 在干旱-半湿润和湿润-半湿润地区, SPM 和 RB

模型的 GPI 值较高, 在干旱-半湿润地区 M18 (SPM) 的 GPI 为 0.7, 在湿润-半湿润地区 M1 (基于辐射的模型) 的 GPI 为 1.0。

在 5 个气候区中, MTB、SPM 和 TB 模型的 GPI 值较高。但由于 SPM 方法需要更多的计算参数, 一

定程度上选用存在困难。基于各气候区不同 ET_0 估算模型的 GPI 值,对各气候区不同类型模型进行描

述性统计分析,以更清楚地了解 5 个气候区各类型模型的 GPI 范围及其误差(见图 4)。



注:图中 M 代表模型,其后的数字为表 2 中的模型序号。

Note: M refers to the model, and the subsequent numbers are the model serial number in table 2.

图 3 5 个气候区不同 ET_0 模式的 GPI 排序

Fig.3 GPI ranking of different ET_0 models in five climatic regions

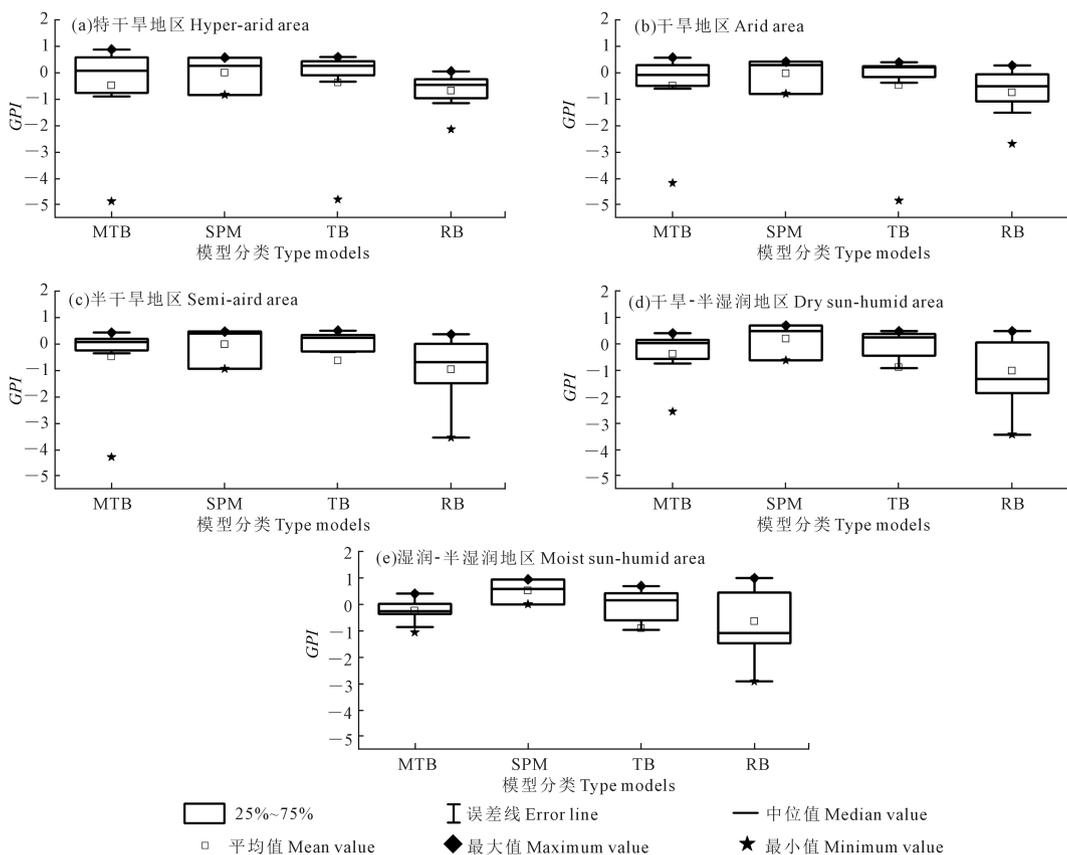


图 4 不同类型模型的描述性统计

Fig.4 Descriptive statistics of various models

33 个模型中,有 13 个基于质量的模型(MTB)、8 个基于温度的模型(TB)、3 个彭曼简化模型(SPM)和 9 个基于辐射的模型(RB)。从 GPI 最大值来看,在特旱区、干旱区、半干旱区、干旱-半湿润区和湿润-半湿润区模拟效果最好的分别为基于质量转换模型、基于温度模型、彭曼简化模型和辐射模型,例如在特旱区基于质量转换的方法 M30 的 GPI 为 0.882;在干旱区基于质量转换的方法 M25 的 GPI 为 0.572;在半干旱区的基于温度的方法 M13 的 GPI 为 0.520;在干旱-半湿润区简化彭曼方法 M18 的 GPI 为 0.715;以及在湿润-半湿润地区基于辐射的方法 M1 的 GPI 为 1.000(图 4)。从平均 GPI 来看,彭曼简化模型的模拟效果在各气候区均较好。但彭曼简化模型需要的参数较多,综合考虑多个模型的平均效果和模型可行性,在偏干旱地区,较为适用的模型为基于温度的模型;在偏湿润气候区,较为适用的为彭曼简化模型和辐射模型。

3 讨论

TABARI 等^[20]认为,基于质量转换的方程模拟效果最差,而在伊朗这种潮湿气候下,基于 RB 和 TB 的模型是估计 ET_0 的最适合的方程。此外,XU 等^[38]利用 1999—2007 年中国干旱地区 5 个气象站的数据,选择 HS 方法作为估算 ET_0 的最佳替代模型。这与本研究结果类似,在特干旱和干旱地区,基于 MTB 和 TB 的模型模拟 ET_0 具有更高的精度,而基于 RB 的模型则模拟效果较差,主要由于干旱地区温差大、日照长、降水少,当利用温度和日照时数估算辐射时存在一定误差。然而,在干旱-半湿润和湿润-半湿润地区,SPM 和 RB 模型具有更好的适用性。

结果显示,平均 GPI 的较高值都出现在 SPM 模型中。分析认为主要有两个方面的原因,首先简化后的彭曼模型是 FAO-56 PM 方程的一种简单方法,与 FAO-56 PM 方程类似,考虑的因素较多,能够全面反映各气象要素对参考作物腾发量的影响;其次,在模型误差分析中,简化的彭曼模型只使用了 3 个模型进行分析,具有一定的局限性。

GPI 值可以反映模型的准确性,但其参数的数量和获取难度也会影响模型的应用。虽然 SPM 模型中的 GPI 均值最高,但它比其他模型需要更多的参数。与 SPM 模型相比,基于 MTB 和 TB 的模型参数更少也更容易得到。5 个气候区 GPI 最佳的不同类型模型如图 3 所示。在基于质量转换的模型中,在特干旱地区、干旱地区、半干旱地区、干旱-半湿润地区和湿润-半湿润地区的最佳模型为 30、25、25、23 和 21。对于 TB 模型,特干旱、干旱、半干旱、

干旱-半湿润和湿润-半湿润地区的最佳模型分别为 16、13、13、10 和 15。因此,考虑到参数的易获得性,对于估算内蒙古自治区干旱地区的 ET_0 ,模型 25 和 13 可行性更高。此外,基于质量转换模型的计算采用风速、饱和和实际水汽压、温度,而基于温度模型的计算仅采用容易获得的空气温度值。在干旱地区,以温度为基础的模式是最合适的。然而在干旱-半湿润和湿润-半湿润地区,最高的 GPI 出现在简化彭曼模型和基于辐射的模型中,这是因为内蒙古东部的温差较小。与 PENG 等^[37]的研究相似,在干旱地区,HS 模型计算的 ET_0 值与 FAO-56 PM 评价的 ET_0 值相近,而 PT 模型更适合湿润地区。

4 结论

本文对 5 个气候区可用的 ET_0 模型进行了详细的适用性分析和比较。基于内蒙古 50 个站点的长期气象资料对 33 个 ET_0 模型进行评估,10 个统计指标被用来评估模型的性能。此外,引入全局性能指标(GPI),对所有分析模型都进行评估,以帮助选择最合适的模型。根据 GPI 值,特干旱地区、干旱地区、半干旱地区、干旱-半湿润地区和湿润-半湿润地区排名前 3 位的模型分别为模型 30、33、31,模型 25、18、13,模型 13、18、25,模型 18、20、1 和模型 1、18、2。对于干旱区,MTB、SPM 和 TB 模型更适合,而 RB 和 SPM 模型在湿润地区更准确。考虑到模型的便捷性,TB 模型在相对干旱地区最为适用,而 RB 模型在相对湿润地区更为准确。适宜的 ET_0 估算方法对评价作物实际蒸散发量和计算整个区域的水分平衡具有重要意义。在接下来的 ET_0 评价方法研究中,需要考虑模型精度和不同类型模型的参数数量对模型适用性的影响。

参考文献:

- [1] 汤鹏程,徐冰,高占义,等.西藏高海拔地区气象数据缺失条件下的 ET_0 计算研究[J].水利学报,2017,48(9):1055-1063.
TANG P C, XU B, GAO Z Y, et al. Simplified limited data ET_0 equation adapted for high-elevation locations in Tibet[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48 (9), 1055-1063.
- [2] 张倩,段爱旺,高阳,等.基于温度资料估算参考作物腾发量的方法比较[J].农业机械学报,2015,46(2):104-109.
ZHANG Q, DUAN A W, GAO Y, et al. Comparative analysis of reference evapotranspiration estimation methods using temperature data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2015, 46 (2):104-109.
- [3] CAI J B, LIU Y, LEI T W, et al. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 145 (1/2): 22-35.
- [4] 王升,陈洪松,聂云鹏,等.基于基因表达式编程算法的参考作物腾发量模拟计算[J].农业机械学报,2015,46(4):106-112.

- WANG S, CHEN H S, NIE Y P, et al. Simulation of reference evapotranspiration based on gene-expression programming methods[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 106-112.
- [5] TABARI H, TALAEE P H. Local calibration of the Hargreaves and Priestley-Taylor equations for estimating reference evapotranspiration in arid and cold climates of Iran based on the Penman-Monteith model[J]. Journal of Hydrological Engineering, 2011, 16(10): 837-845.
- [6] IRMAK S, IRMAK A, JONES J W, et al. Predicting daily net radiation using minimum climatological data[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(4): 256-269.
- [7] CHEN D L, GAO G, XU C Y, et al. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China[J]. Climate Resource, 2005, 28(2): 123-132.
- [8] XING Z S, CHOW L, MENG F R, et al. Testing reference evapotranspiration estimation methods using evaporation pan and modeling in maritime region of Canada[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2008, 134(4): 417-424.
- [9] YODER R E, ODHIAMBO L O, WRIGHT W C. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004, 21(2): 197-202.
- [10] TRAJKOVIC S. Hargreaves versus Penman-Monteith under humid condition[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2007, 133(1): 38-42.
- [11] ALI M H, SHUI L T. Potential evapotranspiration model for Muda irrigation project, Malaysia[J]. Water Resource Management, 2009, 23(1): 57-69.
- [12] TRAJKOVIC S, KOLAKOVIC S. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions[J]. Water Resource Management, 2009, 23(14): 3057-3067.
- [13] VALIANTZAS J D. Simplified forms for the standardized FAO-56 Penman-Monteith reference evapotranspiration using limited weather data[J]. Journal of Hydrology, 2013, 505: 13-23.
- [14] VALIANTZAS J D. Simple ETO forms of Penman's equation without wind and/or humidity data. II: Comparisons with reduced set-FAO and other methodologies[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2013, 139(1): 9-19.
- [15] SINGH V P, XU C Y. Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation[J]. Hydrological Process, 1997, 11(3): 311-323.
- [16] TRAORE S, WANG Y M, KERH T. Artificial neural network for modeling reference evapotranspiration complex process in Sudano-Sahelian zone[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(5): 707-714.
- [17] XU C Y, SINGH V P. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation[J]. Hydrological Process, 2001, 15(2): 305-319.
- [18] LÓPEZ-URREA R, MARTÍN DE SANTA OLALLA F, FABEIRO C, et al. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(1/2): 15-26.
- [19] TABARI H. Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates[J]. Water Resources Management, 2010, 24(10): 2311-2337.
- [20] TABARI H, GRISMER M E, TRAJKOVIC S. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions[J]. Irrigation Science, 2013, 31(2): 107-117.
- [21] DESPOTOVIC M, NEDIC V, DESPOTOVIC D, et al. Review and statistical analysis of different global solar radiation sunshine models[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 52: 1869-1880.
- [22] BINNS T. World atlas of desertification (2nd edn)[M]. London: United Nations Environment Programme, 1997: 182.
- [23] 任晓东. 内蒙古不同气候区 ETO 估算方法 (FAO-PM 温度法和 Hargreaves-Samani 法) 的适用性评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- REN X D. Assessment of ETO estimation methods (FAO-PM temperature and Hargreaves-Samani methods) in different climates of Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014.
- [24] 佟长福, 李和平, 胡翠艳, 等. 内蒙古自治区参考作物腾发量的时空变化[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(11): 1071-1075.
- TONG C F, LI H P, HU C Y, et al. Temporal and spatial variation of reference crop evapotranspiration in Inner Mongolia[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2018, 36(11): 1071-1075.
- [25] PRIESTLEY C H B, TAYLOR R J. On the assessment of surface heat flux and evapotranspiration using large scale parameters[J]. Monthly Weather Review, 1972, 100(2): 81-92.
- [26] MAKINK G F. Testing the Penman formula by means of lysimeters[J]. Journal of Institution of Water Engineering, 1957, 11: 277-288.
- [27] JENSEN M E, HAISE H R. Estimation of evapotranspiration from solar radiation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Division, 1963, 89(4): 15-41.
- [28] MCGUINNESS J L, BORDNE ERICH F. A comparison of lysimeter derived potential evapotranspiration with computed values[R]. Washington, DC: United States Department of Agricultural (USDA), 1972.
- [29] HOFFMAN G J, HOWELL T A, SOLOMON K H. Management of farm irrigation systems[M]. US: American Society of Agricultural Engineers, 1990: 63-89.
- [30] IRMAK S, IRMAK A, ALLEN R G, et al. Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(5): 336-347.
- [31] HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1985, 1(2): 96-99.
- [32] DROOGERS P, ALLEN R G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions[J]. Irrigation and Drainage System, 2002, 16(1): 33-45.
- [33] LINACRE E T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone[J]. Agricultural Meteorology, 1977, 18(6): 409-424.
- [34] ROMANENKO V A. Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area[R]. In: Proceedings Ukrainian Hydrometeorological Research Institute, 1961.
- [35] VALIANTZAS J D. Simplified limited data Penman's ETO formulas adapted for humid locations[J]. Journal of Hydrology, 2015, 524: 701-707.
- [36] 王旭明, 刘海军, 张瑞昊, 等. 河套灌区参考作物蒸发蒸腾量估算方法研究[J]. 干旱区农业研究, 2014, 32(3): 95-101.
- WANG X M, LIU H J, ZHANG R H, et al. Research on the estimating methods for reference crop evapotranspiration in Hetao Irrigation District[J]. Agricultural research in the arid areas, 2014, 32(3): 95-101.
- [37] PENG L L, LI Y, FENG H. The best alternative for estimating reference crop evapotranspiration in different sub-regions of mainland China[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 5458.
- [38] XU J Z, WANG J M, WEI Q, et al. Symbolic regression equations for calculating daily reference evapotranspiration with the same input to Hargreaves-Samani in arid China[J]. Water Resource Management, 2016, 30(6): 2055-2073.