

参考作物蒸发蒸腾量计算方法在额尔齐斯河流域的适用性研究

鞠彬¹, 胡丹²

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 靖江市港口管理局, 江苏 泰州 225300)

摘要: 基于额尔齐斯河流域5个气象站哈巴河、吉木乃、福海、阿勒泰、富蕴站1962-2012年的日观测气象资料, 选用7种方法计算各站历年逐日参考作物蒸发蒸腾量(ET_0), 并以FAO Penman-Monteith法计算结果为标准, 建立7种方法间的拟合关系, 以比较日尺度与月尺度下各计算方法的精度与地区适宜性。结果表明: 在额尔齐斯河流域, 7种方法计算的参考作物蒸发蒸腾量变化趋势基本相同, 但数值上有一定差异; Kimberly Penman法、Hargreaves-Samani法与FAO Penman-Monteith法计算结果接近, 适用性较好; 对于缺少气象资料地区, 使用Hargreaves-Samani法可获得较好估值; 同时分析了7种方法计算的 ET_0 与实测的水面蒸发量之间的关系, 利用拟合公式, 可以用水面蒸发资料估算该地区 ET_0 值。

关键词: 参考作物蒸发蒸腾量; ET_0 计算方法; 水面蒸发量; 额尔齐斯河流域

中图分类号: S161.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)05-0106-06

Research on adaptability of estimated method of different reference crop evapotranspiration in Irtysh river basin

JU Bin¹, HU Dan²

(1. School of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jingjiang Port Authority, Taizhou 225300, China)

Abstract: Based on the daily observation meteorological data at habahe, jimunai, fuhai, aletai and fuyun weather station, the paper calculated daily reference crop evapotranspiration by seven methods such as FAO Penman-Monteith, FAO-24 Penman, 1948 penman, Makkink, Priestley-Taylor, Hargreaves-Samani, Allen method. FAO Penman-Monteith method was taken as the standard. The paper established a fitting relationship for seven calculation methods and compared the accuracy of calculation method and regional suitability under daily and monthly scales. Results showed that the variation trend of ET_0 calculated by seven methods is basic same for five stations on Irtysh river basin, but the values are different. The difference between the results computed by The method of Kimberly penman, Hargreaves-Samani and FAO Penman-Monteith are so small, and they are adaptable for every region. If climatic data are insufficient, Hargreaves-Samani method can provide reliable ET_0 estimation. Meanwhile it analyzed the relationship between ET_0 computed by seven methods and evaporation of water surface. The evaporation can be used to estimate ET_0 by regression formula.

Key words: reference crop evapotranspiration; ET_0 estimated method; evaporation; Irtysh river basin

1 研究背景

自20世纪80年代以来, 随着我国社会经济的快速发展, 水资源供需矛盾日趋突出, 传统粗放型灌溉农业的发展受到越来越大的冲击。参考作物蒸发蒸腾量(ET_0)是作物灌溉预报的一个主要参数, 以

参考作物蒸发蒸腾量为基础, 计算实际作物蒸发蒸腾量, 是农业实时灌溉预报和节水规划中一个重要步骤, 对于重新核定更合理的灌溉定额和制定更科学的灌溉制度具有重要的参考价值^[1]。

额尔齐斯河作为我国唯一一条流入北冰洋的国际河流, 是中哈边境地区社会经济生活中的基础资

源和重要枢纽,其利用、开发、治理直接影响到我国与哈萨克斯坦之间的生态环境、经济发展及国家关系^[2]。同时新疆是中国五大牧区之一,额尔齐斯河流域所在地阿尔泰地区又是新疆最主要的牧区之一。目前国内对新疆地区蒸发量的研究较少,而发展节水灌溉、确定合理的灌溉制度都要求准确的计算作物蒸发蒸腾量。参考作物蒸发蒸腾量的计算公式较多,目前认为较精确且应用较多的是 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式,同时在特定地区,由半经验化公式组成的参考作物蒸发蒸腾量计算方法也具有较好的适用性^[3]。针对额尔齐斯河流域气候特点,在可获取的气象资料条件下,各参考作物蒸发蒸腾量计算方法的适用性需要更深入地研究。

本文利用额尔齐斯河流域内 5 个气象站提供的 51 年逐日气象观测资料及地理位置数据,分别采用 FAO Penman-Monteith、Hargreaves-Samani^[3]、FAO-24 Penman^[4]、1948 penman(Kimberly Penman)^[5]、Makkink、Allen^[6]和 Priestley-Taylor^[7]法共 7 种方法计算各站历年逐日参考作物蒸发蒸腾量,并以 FAO Penman-Monteith 公式计算结果作为标准,建立各方法间的线性回归拟合公式,选取均值、方差、相对误差平均值(*MRE*)、统计参数均方根误差(*RMSE*)、一致性系数(*d*)等分析指标比较各方法计算结果间的差异,分析额尔齐斯河流域参考作物蒸发蒸腾量变化趋势情况,并评价各参考作物蒸发蒸腾量计算方法在额尔齐斯河流域的适宜性,为该区域农作物灌溉制度的制定、农业节水规划等提供理论依据与参考^[8]。

2 研究区域概况

额尔齐斯河流域地处新疆阿尔泰地区东北部,

东经 85°35′~90°30′,北纬 46°52′~49°15′。额尔齐斯河全长 4 248 km,发源于阿勒泰山南麓,在我国境内 546 km,流域面积 50 000 km²,占阿尔泰地区总面积的 43%,后经哈萨克斯坦和俄罗斯流入北冰洋,是我国唯一注入北冰洋的外流河。年径流量多达 119 亿 m³、水量仅次于伊犁河,为新疆第二大河。

额尔齐斯河流域因地形、气候和降雨等因素的影响,流域形状近似半圆形,完整系数较大。流域内河网密布,支流众多,水系呈梳子形分布,河系排列极不对称,具有不同于新疆内陆河呈向心水系构成的自然特征。额尔齐斯河流域是典型的大陆性干旱气候,光照丰富,日照时数长,温度日变化大,降水量少,蒸发量大,加之独特的地貌轮廓,气候特征在时空上差异显著。流域蒸发量随地势增高而降低,与降水量成反比。高山区降水量较少,低山区多年平均蒸发量 1 500 mm,其中东部蒸发量 1 200~1 400 mm,西北部 1 800~1 900 mm,荒原区年蒸发量 2 000~2 500 mm^[9]。

3 数据与方法

利用国家气象局提供的额尔齐斯河流域 5 个气象站点哈巴河、吉木乃、福海、阿勒泰、富蕴站 1962~2012 年 51 年观测的日照时数、风速、降雨量、气温、湿度、小型水面蒸发等日气象数据作为计算数据。气象站基本情况如表 1 所示。

本文选用三种类型共 7 种参考作物蒸发蒸腾量计算方法。其中,综合类 ET_0 计算方法:FAO Penman-Monteith 法、FAO-24 Penman 法、1948 penman(Kimberly penman)法;辐射类 ET_0 计算方法:Makkink 法、Priestley-Taylor 法;温度类 ET_0 计算方法:Hargreaves-Samani 法、Allen 法。

表 1 气象站点基本情况

站名	纬度	经度	高程	年降雨	年 ET_0	水面蒸发量	平均气温
哈巴河	48°03′	86°24′	532.6	185.54	955.49	2019.35	3.95
吉木乃	47°26′	85°52′	984.1	206.28	913.96	2118.64	3.21
福海	47°07′	87°28′	500.9	122.59	903.44	1816.23	3.36
阿勒泰	47°44′	88°05′	735.3	264.04	968.19	1692.36	4.60
富蕴	46°59′	89°31′	807.5	264.74	1004.37	1915.63	3.65

注:水面蒸发量为 20 cm 蒸发皿的蒸发量。

从表 1 的数据可以看出,哈巴河站和吉木乃站年降水量和蒸发量相差较小,阿勒泰站和富蕴站年降水量接近,福海站和富蕴站年蒸发量相差不大。

为了区分 7 种方法的计算结果且论述方便,FAO Penman-Monteith 方法(简称 P-M)计算结果用

ET_0 -PM 表示,FAO-24 Penman 方法(简称 FAO-24Pen)计算结果用 ET_0 -24Pen 表示,1948 penman(Kimberly penman)方法(简称 K-P)计算结果用 ET_0 -KP 表示,Makkink 方法(简称 MAK)计算结果用 ET_0 -MAK 表示,Priestley-Taylor 方法(简称 P-T)计

算结果用 ET_0 -PT 表示, Hargreaves-Samani 方法(简写 H-S)计算结果用 ET_0 -HS 表示, Allen 方法(简称 Allen)计算结果用 ET_0 -Allen 表示。

4 结果与分析

4.1 参考作物蒸发蒸腾量日值序列统计特征分析

对额尔齐斯河流域内 5 站点 ET_0 -PM、 ET_0 -24Pen、 ET_0 -KP、 ET_0 -MAK、 ET_0 -PT、 ET_0 -HS 与 ET_0 -Allen 51 年日值序列进行统计特征分析, 分析结果见表 2。

从表 2 可以看出, 哈巴河、吉木乃、阿勒泰、富蕴站 FAO-24 Pen 法计算的均值和标准差最大, MAK 法计算的均值最小, P-T、MAK 法计算的均值远小于 P-M, 符合在干旱区低估蒸散量的结果; H-S、K-P、Allen 计算的均值、标准差与变异系数与 P-M 公式计算的结果很接近, 说明四者计算结果具有极高相似性, 各站所计算参考作物蒸发蒸腾量均远远小于水面蒸发量; 福海站属于干旱区, Allen 计算结果较 P-M 法偏大, 但相差不大, 仍有较高精度; Allen 法在 5 个站计算的结果变异系数小, 说明该方法计算的日参考作物蒸发蒸腾量结果最稳定。所有的变异系数均小于 1, 属于中等变异程度, 说明此次样本序列具有较高的可靠性。

为了进一步分析 7 种计算方法的精度和地区适宜性, 以 P-M 法的计算结果作为标准, 对其他 6 种方法的计算结果进行对比分析。图 1 显示了额尔齐斯河流域 5 个地区其他 6 种方法计算的参考作物蒸发蒸腾量与 P-M 法计算结果间的关系。

由图 1 可以看出, 其他 6 种方法计算结果与 P-M 法计算结果存在明显的线性相关关系, 因此利用下式(1)对计算结果进行线性拟合, 拟合结果见表 3。

$$ET_{OY} = K \cdot ET_{OPM} \quad (1)$$

式中: ET_{OPM} 为 P-M 公式计算的参考作物蒸发蒸腾量, mm/d; ET_{OY} 为其他 6 种方法计算的参考作物蒸发蒸腾量, mm/d。

由表 3 可见, 6 种方法计算的 ET_0 与 P-M 方法计算结果的决定系数均大于 0.9。从图 2 和表 3 总的看来, 其他 6 种方法计算结果与 P-M 法计算结果存在明显的线性相关关系, 但各地区 7 种方法计算结果间有一定差异, 其中 K-P、H-S 法与 P-M 方法计算结果差异较小, 具有较高的精度, P-T 和 Allen 法在各地区的差异性较大, 两者在福海站具有较高精度, 其他站则效果一般, 实际使用时需要进行修正与检验; FAO-24Pen、MAK 法在各个地区的精度都较低, 其中 FAO-24Pen 计算结果偏大, 而 MAK 计算结果偏小。

表 2 ET_0 日值序列样本统计特征

		mm/d					
站名	最大值	最小值	均值	标准差	方差	变异系数	
哈巴河	ET_0 -PM	8.299	0.098	2.618	2.075	4.304	0.792
	ET_0 -KP	9.515	0.001	2.748	2.244	5.038	0.817
	ET_0 -24Pen	12.805	0.001	3.210	2.692	7.246	0.839
	ET_0 -PT	5.883	0.001	2.066	1.878	3.525	0.909
	ET_0 -MAK	5.118	0.001	1.828	1.561	2.437	0.854
	ET_0 -HS	6.843	0.001	2.470	2.150	4.622	0.870
	ET_0 -Allen	5.949	0.001	2.513	1.787	3.192	0.711
吉木乃	ET_0 -PM	9.717	0.053	2.504	2.147	4.611	0.858
	ET_0 -KP	9.923	0.001	2.766	2.565	6.580	0.927
	ET_0 -24Pen	12.520	0.001	3.300	3.183	10.129	0.965
	ET_0 -PT	6.173	0.001	1.977	1.745	3.043	0.882
	ET_0 -MAK	4.956	0.001	1.771	1.490	2.219	0.841
	ET_0 -HS	7.054	0.001	2.427	2.094	4.383	0.863
	ET_0 -Allen	5.700	0.001	2.458	1.671	2.793	0.680
福海	ET_0 -PM	9.866	0.001	2.475	2.170	4.707	0.877
	ET_0 -KP	12.608	0.001	2.645	2.491	6.204	0.942
	ET_0 -24Pen	16.370	0.001	2.980	2.944	8.665	0.988
	ET_0 -PT	6.217	0.001	2.224	1.993	3.970	0.896
	ET_0 -MAK	5.304	0.001	1.947	1.639	2.685	0.842
	ET_0 -HS	7.391	0.001	2.559	2.245	5.038	0.877

续表2

	站名	最大值	最小值	均值	标准差	方差	变异系数
阿勒泰	ET_0 -Allen	5.981	0.001	2.650	1.848	3.416	0.697
	ET_0 -PM	8.513	0.000	2.653	2.249	5.058	0.848
	ET_0 -KP	8.846	0.001	2.968	2.500	6.250	0.842
	ET_0 -24Pen	10.974	0.001	3.424	2.959	8.757	0.864
	ET_0 -PT	6.021	0.001	2.119	1.904	3.625	0.898
	ET_0 -MAK	5.286	0.001	1.986	1.662	2.764	0.837
	ET_0 -HS	6.938	0.001	2.472	2.154	4.641	0.871
	ET_0 -Allen	5.692	0.001	2.526	1.785	3.185	0.706
富蕴	ET_0 -PM	9.049	0.001	2.752	2.498	6.241	0.908
	ET_0 -KP	9.194	0.001	2.938	2.664	7.095	0.907
	ET_0 -24Pen	11.306	0.001	3.326	3.089	9.544	0.929
	ET_0 -PT	6.489	0.001	2.239	2.015	4.060	0.900
	ET_0 -MAK	5.290	0.001	2.096	1.736	3.014	0.828
	ET_0 -HS	7.699	0.001	2.852	2.520	6.351	0.884
	ET_0 -Allen	5.713	0.001	2.615	1.819	3.310	0.696

表3 6种方法与P-M法的线性回归系数

气象站	哈巴河		吉木乃		福海		阿勒泰		富蕴	
	m	r^2								
K-P	1.062	0.968	1.162	0.937	1.121	0.966	1.102	0.983	1.056	0.979
FAO-24Pen	1.242	0.931	1.420	0.910	1.290	0.929	1.297	0.972	1.216	0.968
P-T	0.809	0.943	0.753	0.948	0.886	0.912	0.769	0.925	0.764	0.944
MAK	0.699	0.916	0.649	0.919	0.725	0.901	0.681	0.949	0.65	0.928
H-S	0.971	0.971	0.913	0.961	0.974	0.928	0.894	0.971	0.947	0.974
Allen	0.785	0.921	0.715	0.924	0.817	0.916	0.723	0.931	0.68	0.959

4.2 参考作物蒸发蒸腾量月值序列变化比较

图2为利用P-M法和其他6种方法计算的5个地区逐月 ET_0 变化趋势。

从图2可见,额尔齐斯河流域5个地区7种方法计算的 ET_0 的年内变化趋势基本一致,呈现出明显的季节性,在12-2月间有最低值,在5-7月间有最高值,呈抛物形;但各方法计算数值上存在一定差异,且方法间差异随 ET_0 的增大而增大。具体而言,FAO-24Pen法计算的月均值最大,尤其在5-8月其计算结果显然比其他几种方法高很多。而MAK法计算的月均值最小,尤其在5-8月其计算结果显然比其他几种方法低很多。其他5种方法计算结果的一致性较好,且在福海站5种方法计算结果较其他站点要好。

为进一步分析比较7种方法的计算精度和地区适宜性,以P-M方法的计算结果作为标准,选用相对误差平均值(MRE)、统计参数均方根误差(RMSE),一致性系数(d)3个指标对其他6种方法的计算值进行评价,评价结果列于表4。

统计参数均方根误差(RMSE)越小,一致性系数(d)越大,代表此方法与P-M法计算结果越接近。由表4总的来看,K-P、H-S法在5个站点的 ET_0 计算结果的统计参数均方根误差(RMSE)值均较小,误差10左右,精度较高,与P-M法计算结果较为接近,说明K-P、H-S法在额尔齐斯河流域具有很高的精度与适宜性;P-T法在富海站计算结果的RMSE值较小,精度较高,而在其他站点RMSE值均达到20以上;FAO-24Pen、MAK法各站点RMSE值均超过20,部分站点达到30以上,误差较大;Allen方法计算结果的RMSE值居中。

4.3 计算结果与水面蒸发量的关系

在生产实践中,一般通过蒸发皿观测来获取水面蒸发量(E_0),而 E_0 与 ET_0 之间有着密切的联系,通常认为呈线性关系^[10],可表示为:

$$ET_0 = \alpha E_0 \quad (2)$$

式中: α 为经验系数。

利用式(2)对计算和实测数据进行线性拟合,以分析两者间关系。将计算结果列于表5中。

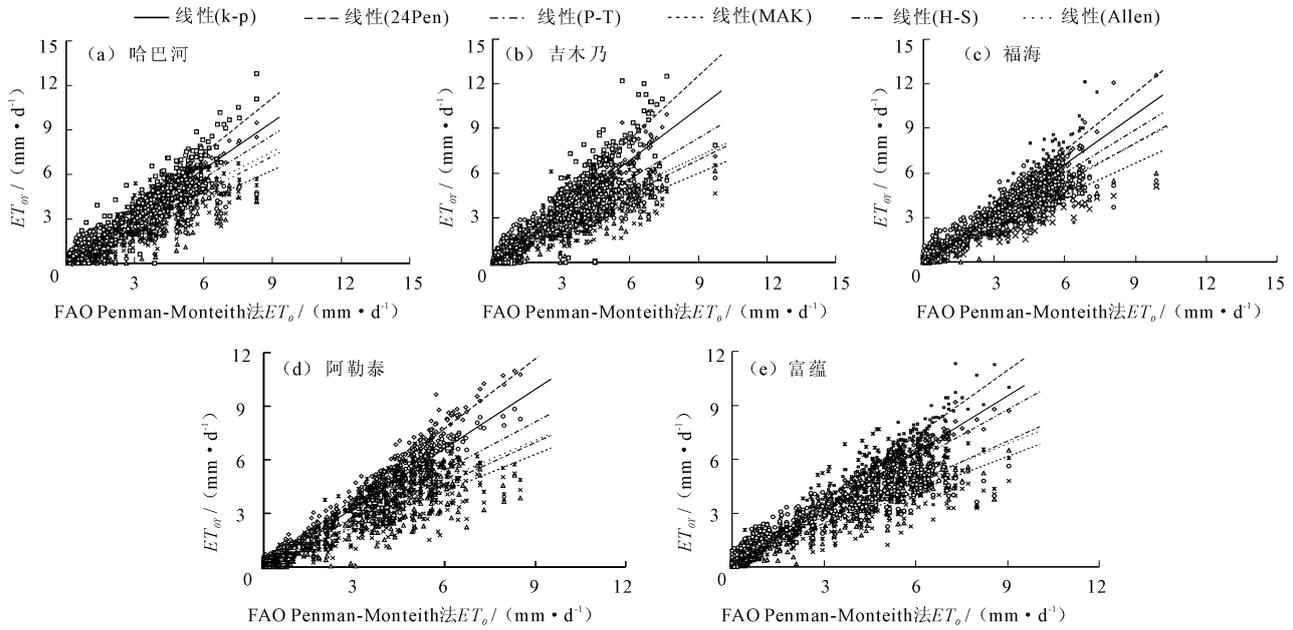
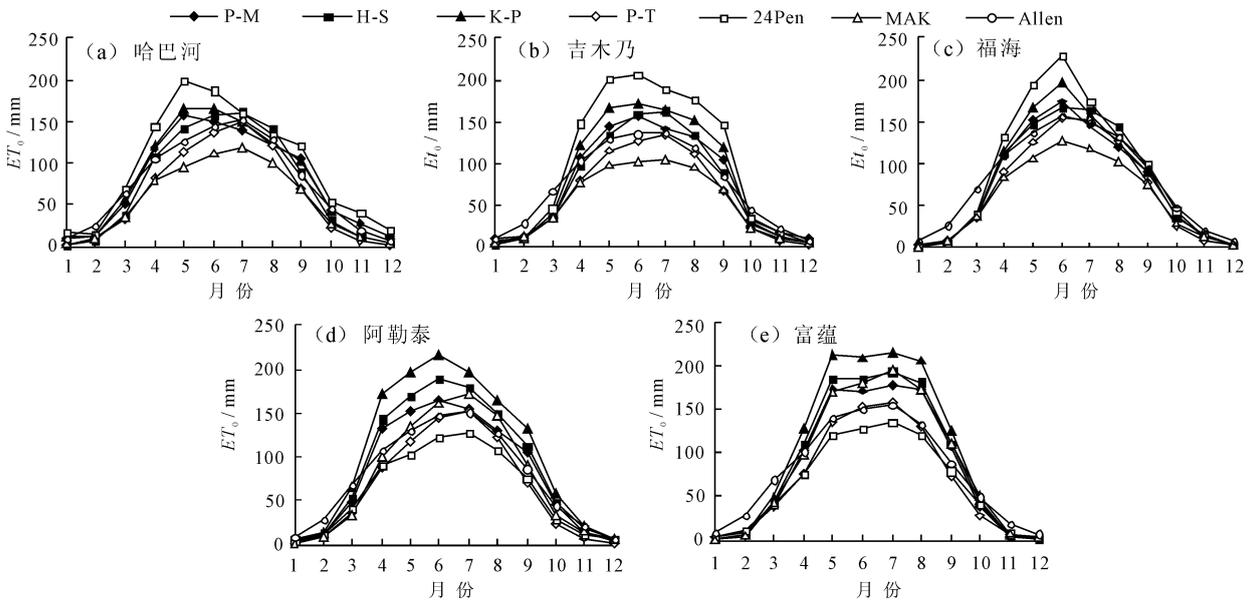
图1 6种方法计算的 ET_0 与P-M法计算 ET_0 的相关关系

图2 不同方法计算的逐月参考作物蒸发蒸腾量

由表5可见,除MAK、Allen法,其余5种方法的决定系数 r^2 均大于0.92,说明各方法计算参考作物蒸发蒸腾量与水面蒸发量之间存在不同程度的线性相关关系,利用拟合公式,根据水面蒸发量可以较方便地估算各种方法计算的参考作物蒸发蒸腾量。因此在气象观测数据资料缺乏的地区,可以用水面蒸发量的观测结果来估算各种公式的计算结果。其中P-M法计算的 ET_0 值与气象站获得的水面蒸发量之间存在显著的线性相关关系,决定系数 r^2 均大于0.975,且斜率随着干旱程度的增加而减小,其平均值为0.510。在实际地区应用时应根据气候条件

相似性原则适当调整该系数,对于湿润地区系数应适当加大,而干旱地区则适当减小,可以较方便准确地估算各地区 ET_0 值。

5 结语

本文采用7种方法计算了新疆额尔齐斯河流域内5站点参考作物蒸发蒸腾量日值和月值序列,通过分析得到以下结论:

(1)以P-M方法计算的逐日参考作物蒸发蒸腾量数据作为标准,对其他方法进行评价,结果表明:K-P和H-S方法在额尔齐斯河流域计算结果十分接近

P-M 法的计算结果,具有较高精度,特别是 H-S 方法对于缺少辐射资料地区非常实用;FAO-24Pen 法计算结果偏高,其与 MAK 方法在额尔齐斯河流域计算精度较低,不具有适用性;Allen 法和 P-T 法计算结果时好时坏,具体使用时需要进行修正与检验。

(2)通过对各方法计算的逐月参考作物蒸发蒸腾量的分析比较发现,各种方法计算的 5 个地区 ET_0 年内变化趋势基本一致,具有明显的季节性,即在 12-2 月间有最低值,在 5-7 月间有最高值,呈抛物形,同时方法间的差异随 ET_0 值的增大而增大;FAO-24Pen 法计算的月均值最大,尤其在 5-8 月其计算结果显然比其他几种方法高很多。而 MAK 法计算的月均值最小,尤其在 5-8 月其计算结果显然比其他几种方法低很多。其他 5 种方法计算结果的一致性较好,且在福海站 5 种方法计算结果较其他站点要好。

(3)7 种方法计算的参考作物蒸发蒸腾量与实测水面蒸发量之间具有不同程度的线性相关性,利用拟合公式,可以用水面蒸发量估算各种方法计算

表 4 各地区站 6 种方法与 P-M 法计算结果误差

地区	哈巴河	吉木乃	福海	阿勒泰	富蕴	
K-P	<i>MRE</i>	0.058	0.287	0.120	0.127	0.140
	<i>RMSE</i>	6.500	14.049	9.851	13.184	8.512
	<i>d</i>	0.999	0.995	0.998	0.996	0.999
FAO-24Pen	<i>MRE</i>	0.224	0.229	0.135	0.252	0.231
	<i>RMSE</i>	21.979	34.823	23.980	30.585	24.642
	<i>d</i>	0.990	0.977	0.988	0.984	0.990
P-T	<i>MRE</i>	1.107	0.801	0.282	0.463	0.204
	<i>RMSE</i>	23.704	20.574	13.230	22.664	22.662
	<i>d</i>	0.983	0.986	0.995	0.986	0.988
MAK	<i>MRE</i>	0.776	0.477	0.252	0.309	0.251
	<i>RMSE</i>	30.299	30.141	23.843	28.118	31.128
	<i>d</i>	0.968	0.966	0.981	0.976	0.974
H-S	<i>MRE</i>	0.740	0.301	0.567	0.295	0.820
	<i>RMSE</i>	14.073	9.689	9.614	14.985	7.499
	<i>d</i>	0.995	0.998	0.998	0.995	0.999
Allen	<i>MRE</i>	0.229	0.216	0.272	0.239	0.368
	<i>RMSE</i>	14.127	15.828	14.812	15.158	22.495
	<i>d</i>	0.995	0.993	0.994	0.994	0.988

表 5 P-M 法计算的 ET_0 与水面蒸发量的拟合结果

气象站	哈巴河		吉木乃		福海		阿勒泰		富蕴	
	α	r^2								
P-M	0.466	0.98	0.445	0.975	0.497	0.98	0.546	0.978	0.595	0.976
K-P	0.489	0.949	0.491	0.914	0.531	0.947	0.612	0.961	0.635	0.956
FAO-24Pen	0.571	0.912	0.586	0.901	0.598	0.91	0.705	0.951	0.719	0.945
P-T	0.368	0.961	0.351	0.924	0.446	0.924	0.437	0.925	0.484	0.921
MAK	0.325	0.839	0.315	0.912	0.391	0.913	0.409	0.928	0.453	0.906
H-S	0.439	0.974	0.431	0.937	0.513	0.939	0.509	0.95	0.616	0.951
Allen	0.447	0.821	0.437	0.921	0.532	0.928	0.520	0.911	0.565	0.936

的参考作物蒸发蒸腾量。其中 P-M 法计算的 ET_0 值与水面蒸发量之间存在显著的线性相关关系,斜率随着干旱程度的增加而减小,其平均值为 0.510。在实际应用中,根据气候条件的变化适当调整经验系数,可以较方便准确的估算地区参考作物蒸发蒸腾量。

参考文献:

[1] 谢新民,郭洪宇,尹明万,等.我国华北地区蒸发能力及其变化趋势分析[J].水利规划设计,2001(4):24-27+33.
 [2] 张健荣.由新疆国际河流水利开发引发的思考[J].社会观察,2007(11):17-18.
 [3] 史晓楠,王全九,王新,等.参考作物腾发量计算方法在新疆地区的适用性研究[J].农业工程学报,2006,22(6):19-23.
 [4] 杨 玫,孙西欢.参考作物腾发量计算方法在玛纳斯河流域

的应用比较[J].灌溉排水学报,2011,30(1):125-129.
 [5] 彭世彰,徐俊增.参考作物蒸发蒸腾量计算方法的应用比较[J].灌溉排水学报,2004,23(6):5-9.
 [6] Allen RG, Pereira LS, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements [M]. Rome: United Nations FAO, 1998.
 [7] 刘晓英,林而达,刘培军. Priestley-Taylor 与 Penman 法计算参照作物腾发量的结果比较[J].农业工程学报,2003,19(1):32-36.
 [8] 廖显琴,李毅.参考作物腾发量计算方法的适用性研究[J].灌溉排水学报,2009,28(6):14-17+71.
 [9] 李定枝.额尔齐斯河流域水文特性[J].水文,1999,19(3):54-56+50.
 [10] 郭元裕.农田水力学[M].北京:中国水利水电出版社,1980.