

黄河三角洲参考作物腾发量计算方法适宜性研究

尹春艳^{1,2}, 陈小兵¹, 刘虎³, 单晶晶^{1,2}, 卜凡敏⁵, 王德⁴, 孙海栓⁶

- (1. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所), 山东烟台 264003;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020;
4. 中国科学院海岸带研究所, 山东烟台 264003; 5. 山东省滨海盐碱地水土环境工程技术研究中心,
山东东营 257000; 6. 山东省汇邦渤海农业开发有限公司, 山东东营 257091)

摘要:准确估算各地区的参考作物腾发量(ET_0)是农业灌溉设计和节水规划中必不可少的内容。利用黄河三角洲地区4个典型气候区的气象资料,选用5种计算方法(P-M, FAO-79Penman、Priestley-Taylor, FAO-24Penman和Hargreaves-Samani)计算了 ET_0 ,并以P-M方法作为标准,对其他方法进行了评价。结果表明,在黄河三角洲各气候区FAO-Penman法估算的 ET_0 较Priestley-Taylor方法更接近于P-M法的计算结果,并且计算精度较高,误差在3%~10%之间。在缺少资料的湿润区,用Priestley-Taylor方法可以得到与P-M法估值相近的结果。

关键词:参考作物腾发量; P-M法; 黄河三角洲; Priestley-Taylor方法

中图分类号:S275.3

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.06.008

尹春艳,陈小兵,刘虎,等.黄河三角洲参考作物腾发量计算方法适宜性研究[J].灌溉排水学报,2017,36(6):36-41.

0 引言

参考作物腾发量(ET_0)是计算作物需水量的关键因子,是农业灌溉设计和节水规划中必不可少的内容。近些年来关于 ET_0 计算方法的研究很多, ET_0 的计算方法大致可以分为4类,即水面蒸发法、辐射法、温度法及综合法。基于辐射的方法主要有Priestley-Taylor(1972)和FAO24 Radiation(1977)等;基于温度的计算方法主要有FAO24 Blaney-Cridell公式、Thorntwait公式和Hargreaves-Samani(1985)等;基于综合计算方法有1948Penman-Monteith、FAO24 Penman(1982)和FAO56 Penman-Monteith等。这4类方法计算需要不同的基础资料,决定他们应用受到了基础资料的限制。

目前,国内外应用最多的是FAO推荐的基于能量平衡和空气动力学原理的FAO56 Penman-Monteith(P-M)方法,该方法不改变任何参数即可适用于世界各个地区,但是P-M法需要太阳辐射、最高最低温度、相对湿度与风速数据,如果缺乏某一项资料该方法难以应用。因此,近些年一些学者对不同地区将P-M法和其他方进行比较,试图找到在缺少资料的情况下应用别的方法替代P-M法。在我国,关于 ET_0 的研究都集中在北方和西部干旱半干旱地区,在北方地区研究者通过Penman-Monteith公式与其他公式计算了 ET_0 ,并且建立了 ET_0 与其他气象要素的经验模型^[1-2]。在新疆地区,通过应用Penman-Monteith公式与Penman修正正式计算塔里木盆地、阿克苏地区等不同地区 ET_0 ,发现采用不同的辐射项和空气动力项计算公式和参数是造成Penman修正正式计算的 ET_0 值略大于Penman-Monteith公式计算值的主要原因^[3-5],同时还有研究者应用Penman-Monteith计算极端干旱区 ET_0 ,得出在极端干旱区可利用Penman-Monteith代替标准的P-M公式计

收稿日期:2016-03-31

基金项目:公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903001);国家重点研发计划课题(2016YFD02003003);东营市重点研发计划项目(2016DYF、中科院海岸研究所部署项目(Y254021031);公益性行业(海洋)科研专项(201105020);新疆支撑项目(阿勒泰地区优质牧草综合节水技术优化集成及模式化研究)(201531115)

作者简介:尹春艳(1983-),硕士,主要从事土壤盐渍化与改良技术方面的研究。E-mail: liuhuycy@163.com

通信作者:陈小兵(1974-),副研究员,硕士生导师,研究方向为水土资源管理及环境影响评价。E-mail: xbchen@yic.ac.cn

算 ET_0 ^[6];在内蒙古地区,利用多年的气象资料运用多种方法计算了内蒙古中部呼和浩特与河套灌区的 ET_0 ,并且得出FAO-Penman可以替代P-M方法计算 ET_0 ^[7],在比较干旱的浑善达克沙地Hargreaves-Samani更实用^[8];在黄河三角洲地区开展的关于 ET_0 的研究主要对 ET_0 影响因素以及采用遥感对 ET_0 进行估算在黄河三角洲地区开展的关于 ET_0 的研究主要对 ET_0 影响因素以及采用遥感对 ET_0 进行估算^[9-10],对于开展 ET_0 计算方法分析比对的研究尚未见报道。因此,选用目前应用较多的P-M、FAO-79Penman、Priestley-Taylor、FAO-24Penman和Hargreaves-Samani法等常用的5种方法,利用黄河三角洲4个典型气象站逐月气象数据计算 ET_0 ,并对 ET_0 计算结果分析对比,并以FAO56Penman-Monteith法(简称P-M)法计算结果为标准,应用线性回归和方差分析对不同 ET_0 计算方法在黄河三角洲地区的适宜性进行评价。

1 材料与方法

1.1 计算方法

1)FAO56 Penman-Monteith方公式(P-M法)

P-M公式以能量平衡和水汽扩散理论为基础,同时考虑了空气动力学参数和作物生理特征,具有较充分的理论依据和较高的计算精度,考虑的主要因素有冠层表面净辐射、最高温度、最低温度、平均温度、日照时间、风速、湿度和土壤热通量,公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\mu_2)}, \quad (1)$$

式中: ET_0 为参考作物腾发量(mm/d); R_n 为冠层表面净辐射[MJ/(m²·d)]; G 为土壤热通量[MJ/(m²·d)], $G=0$; T 为平均气温(°C); Δ 为饱和水汽压温度曲线的斜率(kPa/°C); μ_2 为高度2.0 m处风速(m/s); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); γ 为湿度计常数(kPa/°C)。

2)FAO-Penman(1979)法(简称FAO-79Penman)

Penman公式是国内外应用最普遍的综合公式,在能量平衡法的基础上引用干燥力的概念,经过简捷的推导,得到了一个用普通气象资料就可计算参考作物腾发量的公式。考虑的主要因素有冠层表面净辐射、最高温度、最低温度、平均温度、日照时间、风速和湿度,公式为:

$$ET_{op} = \frac{\frac{P_0}{P}(a_1 + b_1)(e_s - e_a) + \frac{\Delta}{\lambda}}{\frac{P_0 \Delta}{p \gamma} + 1}, \quad (2)$$

式中: ET_{op} 为FAO-Penman法得到的参考作物腾发量(mm/d); P_0 为海平面气压(hPa); P 为本站气压(hPa); $a_1=0.26$, $b_1=0.14$,风速是在气象站常规测量得到的数据基础上乘以修正系数0.75。

3)FAO-24 Penman

FAO-24Penman方法是依据能量平衡和紊流扩散原理导出的计算参考作物蒸发蒸腾量的方法,同时还包含风函数。主要考虑的主要因素有冠层表面净辐射、最高温度、最低温度、平均温度、日照时间、风速和湿度、土壤热通量,具体计算公式为:

$$ET_0 = \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + 6.43 \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} (1 + 0.862\mu_2) (e_s + e_a) / \lambda \right]. \quad (3)$$

4)Priestley-Taylor法

Priestley-Taylor(1972)假设周围环境湿润的前提下,忽略空气动力学项,以平衡蒸发为基础得出的简化方程,导出无平流条件下蒸发的估算公式,即Priestley-Taylor法(PT法)。考虑的主要因素有冠层表面净辐射、平均温度、湿度和土壤热通量。

$$ET_{opt} = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G), \quad (4)$$

式中: ET_{opt} 为应用Priestley-Taylor法所得的 ET_0 (mm/d); α 为经验系数,取1.26。

5)Hargreaves-Samani法(HS法)

HS法仅需提供日平均最高、最低气温以及天顶辐射即可计算 ET_0 ,该方法在风速和湿度等气象资料的地区得到广泛的应用,并被证明是一种有效的估算方法。

$$ET_{0HS} = 0.023R_a(T + 17.8)TD^{0.5}, \quad (5)$$

式中： ET_{0HS} 为应用HS法所得的 ET_0 (mm/d)； TD 为最高与最低气温之差(°C)； R_a 为天顶辐射(MJ/(m²·d))，可由温度估算得到。

1.2 气象站位置及基本资料介绍

应用黄河三角洲陵县、福山、垦利和沂源4个典型气象站2006—2014年逐日气象数据以及气象站的地理位置资料(表1)。温度、降雨、相对湿度、日照时间和风速的数据是通过气象站实际测得，辐射采用估算法得到。陵县位于山东省德州市，德州市受季风影响显著，四季分明、冷热干湿界限明显，具有显著的大陆性气候特征；福山位于山东省烟台市，烟台市属于温带季风气候，冬季空气更加温润；垦利县位于山东省东营市，东营市受亚欧大陆和西太平洋共同影响，属暖温带大陆性季风气候，基本气候特征为冬寒夏热，四季分明；沂源位于山东省淄博市，淄博市地处暖温带，属半湿润半干旱的大陆性气候。

表1 典型气象站的基本情况

台站名	北纬/(°)	东经/(°)	海拔/m	气候特征	代表区域
德州市陵县	37.33	116.57	18.6	温带大陆性季风气候	德州
烟台市福山	37.5	121.25	32.6	温带季风气候	烟台
淄博市沂源	36.18	118.15	305.1	半湿润半干旱的大陆性气候	淄博
东营市垦利	37.43	118.67	6	暖温带大陆性季风气候	东营

表2 气象站3—9月月 ET_0

计算方法	mm							
	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	
德州市陵县	P-M法	128.14	169.21	212.60	219.45	201.74	170.08	135.21
	FAO-Penman法	129.76	174.63	230.89	237.23	220.46	180.68	137.29
	Priestley-Taylor法	125.08	204.79	286.31	299.23	286.87	244.81	167.69
	Hargreaves-Samani法	176.93	272.51	374.48	430.98	395.63	336.72	268.61
	FAO-24 Penman	186.14	235.09	282.43	285.63	264.94	229.29	187.62
烟台市福山	P-M法	128.52	182.03	234.29	237.45	234.33	216.63	178.72
	FAO-Penman法	126.33	179.55	244.44	259.14	234.48	224.35	168.00
	Priestley-Taylor法	120.16	196.12	275.51	291.09	276.47	252.13	169.92
	Hargreaves-Samani法	150.62	241.93	353.02	370.58	351.97	318.54	244.66
	FAO-24 Penman	195.59	265.10	317.63	311.78	303.85	281.93	238.36
淄博市沂源	P-M法	109.98	155.88	196.69	180.81	184.35	164.96	120.47
	FAO-Penman法	108.39	165.04	214.11	193.71	197.80	175.75	124.74
	Priestley-Taylor法	127.75	204.66	277.93	282.18	275.36	243.84	168.43
	Hargreaves-Samani法	175.98	271.20	376.15	388.82	366.77	325.85	254.08
	FAO-24 Penman	157.81	214.49	261.18	239.91	244.28	222.62	170.75
东营市垦利	P-M法	127.19	179.10	234.98	235.02	227.69	199.70	157.80
	FAO-Penman法	128.10	172.66	253.47	247.78	235.63	200.68	160.41
	Priestley-Taylor法	122.89	200.79	273.95	292.95	277.94	235.39	152.66
	Hargreaves-Samani法	166.41	265.65	369.10	392.45	371.45	319.91	242.26
	FAO-24 Penman	186.14	250.58	312.17	304.94	294.41	261.86	212.77

2 结果与分析

2.1 5种方法逐月参考作物腾发量计算结果分析

由图1和表2可知，5种方法得到的4个地区的月参考作物腾发量的变化趋势基本相同，4个地区5种方法的计算结果变化趋势均先逐渐增大，达到某一个最大值之后，再逐渐减小；并且最大值出现在5、6月。各种方法的计算差异随 ET_0 的增加而增大，以东营市垦利气象站 ET_0 计算结果为例，P-M方法计算值为127.19 mm，另外4种方法与P-M法相比，计算得到的 ET_0 的偏差为-3.6%~46.5%；而当P-M方法计算值

为 235.02 mm, 另外 4 种方法的 ET_0 最大偏差达到了 66%(表 3)。下面对造成偏差的原因逐一详细的分析。

表 3 气象站 3—9 月 4 种计算方法结果与 P-M 的偏差 %

计算方法		3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	平均值
德州市 陵县	FAO-Penman法	1.26	3.20	8.60	8.10	9.28	6.23	1.54	5.46
	Priestley-Taylor法	-2.39	21.03	34.67	36.36	42.20	43.94	24.02	28.55
	Hargreaves-Samani法	38.07	61.05	76.14	96.40	96.11	97.97	98.67	80.63
	FAO-24 Penman	45.26	38.93	32.84	30.16	31.33	34.81	38.76	36.01
烟台市 福山	FAO-Penman法	-1.70	-1.36	4.33	9.13	0.06	3.56	-6.00	1.15
	Priestley-Taylor法	-6.51	7.74	17.59	22.59	17.98	16.39	-4.93	10.12
	Hargreaves-Samani法	17.20	32.91	50.67	56.07	50.20	47.04	36.89	41.57
	FAO-24 Penman	52.19	45.64	35.57	31.31	29.67	30.14	33.37	36.84
淄博市 沂源	FAO-Penman法	-1.44	5.88	8.86	7.14	7.30	6.54	3.54	5.40
	Priestley-Taylor法	17.85	24.01	29.81	45.67	39.21	38.74	35.02	32.90
	Hargreaves-Samani法	60.01	73.98	91.25	115.04	98.96	97.53	110.90	92.52
	FAO-24 Penman	43.50	37.60	32.79	32.69	32.51	34.95	41.73	36.54
东营市 垦利	FAO-Penman法	0.72	-3.60	7.87	5.43	3.49	0.49	1.65	2.29
	Priestley-Taylor法	-3.38	12.11	16.59	24.65	22.07	17.87	-3.26	12.38
	Hargreaves-Samani法	30.84	48.32	57.08	66.99	63.13	60.20	53.52	54.30
	FAO-24 Penman	46.35	39.91	32.85	29.75	29.30	31.13	34.83	34.88

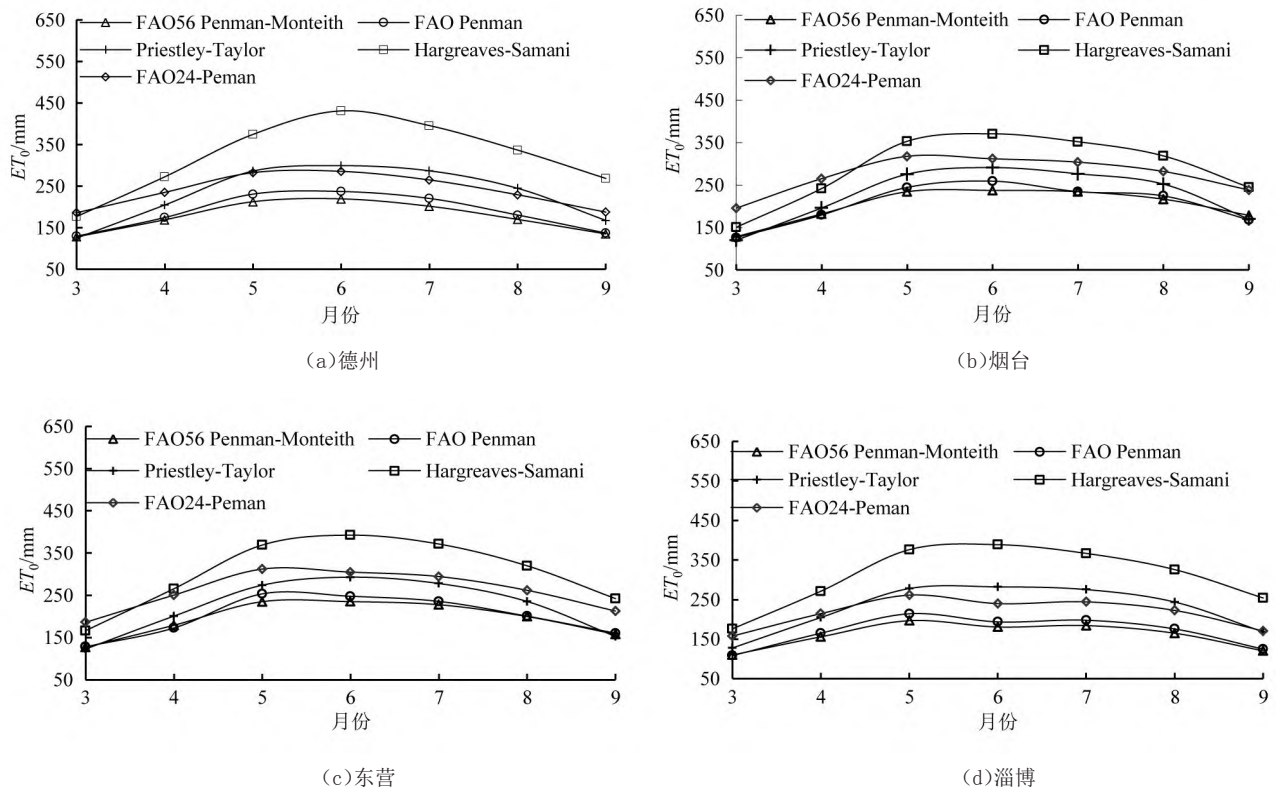


图 1 不同计算方法的逐月参照作物腾发量

FAO-Penman法计算结果是最接近P-M的,有的月份偏大,有的月份偏小。由于2种方法考虑不同的辐射项并且使用了和P-M法不同的风速公式造成了计算偏差。

Priestly-Taylor法是除了FAO-Penman法最接近P-M法的,其相对误差最大值为22.65%,最小值为-3.26%,平均相对误差为12.38%。由于Priestly-Taylor法没有考虑风速的影响,而3—9月平均风速变化较小,此时风速对PT法计算结果的影响微乎其微。另外,Priestly-Taylor法认为周围环境是湿润的,没有考虑

相对湿度变化对 ET_0 的影响,众所周知,相对湿度与参考作物蒸发蒸腾量负相关,当空气中相对湿度越大时, ET_0 将越小,故未考虑相对湿度的影响将会使计算结果偏大,尤其是在相对湿度变幅较大时,在黄河三角洲地区,虽然相对湿度变化较小,但是对 ET_0 计算结果会引起偏差。

Hargreaves-Samani法的计算结果在整个时段内计算结果均大于P-M法的计算结果。如表3所示,这主要是因为P-M法在计算 ET_0 时采用的是太阳净辐射,而HS法采用大气顶太阳辐射(R_a),同时HS也没有考虑相对湿度及风速的影响,其相对误差产生的变化原理同上,在此不加赘述。

FAO-24 Penman法的计算项中没有考虑作物的生理特征,比如作物的高度,而黄河三角洲地区植物在5—8月生长茂盛,因而这是造成FAO-24 Penman法产生较大误差的主要原因。

2.2 4种方法与P-M方法间的对比分析

为了进一步分析各种计算方法的计算精度在黄河三角洲地区的适宜性,以P-M方法的计算结果作为标准,将其他4方法的计算结果与其进行了对比分析。由图2可以看出,其他4种方法计算结果与P-M法计算结果存在明显的线性关系,因此,进行线性拟合($ET_0 = mET_{0x}$);同时计算了不同方法的逐月值与P-M方法的标准误差 S^2 ,并将计算结果列于表4。

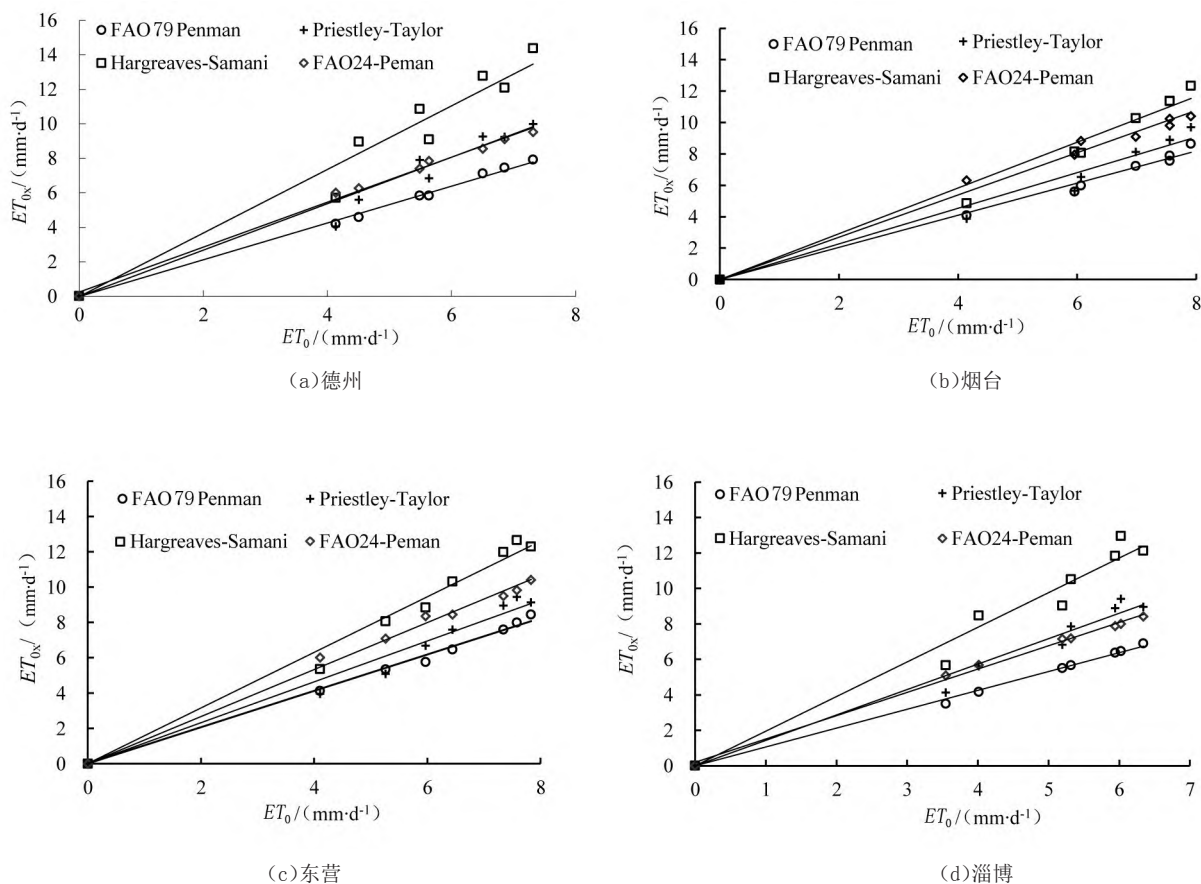


图2 4个地区5种方法与P-M法计算结果对比

表4 4种方法与P-M法的线性回归系数与标准差

方法	德州			烟台			东营			淄博		
	m	R^2	S^2	m	R^2	S^2	m	R^2	S^2	m	R^2	S^2
FAO-79Penman	1.19	0.999	0.017	1.17	0.972	0.089	1.14	0.982	0.064	1.204	0.998	0.026
Priestly-Taylor	1.827	0.951	0.185	1.628	0.979	0.107	1.614	0.985	0.089	1.838	0.942	0.204
Hargreaves-Samani	2.273	0.896	0.34	2.015	0.994	0.07	1.999	0.985	0.111	2.287	0.864	0.406
FAO24-Peman	1.186	0.999	0.18	1.061	0.962	0.094	1.123	0.988	0.056	1.125	0.993	0.041

由表4可见,4种方法计算的 ET_0 值与P-M法计算的结果的决定系数均大于0.8。对于靠近沿海较湿润的烟台市和东营市地区,FAO-Penman和Priestly-Taylor方法计算值与P-M法的计算结果拟合较好,FAO-

Penman在烟台市和东营市地区的计算结果与P-M法计算结果的决定系数大于0.97,计算结果和P-M法的最小误差小于0.5%,最大误差小于10%,标准差亦较小。Priestly-Taylor在烟台市和东营市地区的计算结果与P-M法计算结果的绝对系数大于0.97,计算结果和P-M法的最小偏差3.38%,最大偏差小于24.65%,标准差亦较小。Hargreaves-Samani和FAO24-Peman法的计算偏差超过20%。对于处于内陆的德州市和淄博市地区相对于滨海地区的烟台市和东营市地区降雨量小,气温高,风速小。FAO-Penman在德州和淄博半湿润半干旱地区的计算结果与P-M法计算结果的决定性系数大于0.94,FAO-Penman计算结果和P-M法的最小偏差小于1.2%,最大偏差小于10%,Priestly-Taylor在德州和淄博半湿润半干旱地区的计算结果与P-M法计算结果的计算结果和P-M法的最小偏差2.39%,最大偏差小于45.67%,方差亦较小Hargreaves-Samani和FAO24-Peman法的计算偏差超过30%。

总的来看,FAO-Penman法在黄河三角洲各气候区估算的 ET_0 值较Priestly-Taylor方法更接近P-M法的计算结果,其偏差在3%~10%之间,方差小于0.2。除了FAO-Penman法,在湿润黄河三角洲地区相对湿度变化较小区,Priestly-Taylor最接近P-M法的计算结果,结果均大于P-M法的计算结果,并且Priestly-Taylor与P-M法之间的相对偏差相对也较小,Priestly-Taylor这与其认为周围环境是湿润的基本假定相一致。

3 结论

1)以P-M方法作为标准,在黄河三角洲各气候区FAO-79Penman法和Priestly-Taylor法在黄河三角洲各气候区估算的 ET_0 值与P-M法的计算结果更接近,其中FAO-Penman法误差在3%~10%之间,标准误差小于0.2。因此在黄河三角洲地区可以用FAO-79Penman方法代替P-M方法;在缺少辐射和风速资料的地区,Priestly-Taylor方法可以获得与P-M法估值较相近的结果。

2)在黄河三角洲区各种方法变化趋势基本一致,方法间的差异随 ET_0 的增大而增大,在较湿润的黄河三角洲地区Priestly-Taylor和FAO-79Penman变化趋势较一致。

参考文献:

- [1] 刘晓英,林而达,刘培军,等. Priestly-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.
- [2] 王昊,许士国,孙石,等. 扎龙湿地参照作物蒸散发估算的经验模型[J]. 水科学进展,2007,18(2):246-251.
- [3] 胡顺军,潘渝,康绍忠,等. Penman-Monteith与Penman修正式计算塔里木盆地参考作物潜在腾发量比较[J]. 农业工程学报,2005,21(6):30-35.
- [4] 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.
- [5] 李彦,陈祖森,张保,等. 参考作物蒸发蒸腾量的多元线性回归模型研究[J]. 新疆农业大学学报,2005,28(1):70-72.
- [6] 刘洪波,白云岗,张江辉,等. 应用Penman-Monteith简化公式计算极端干旱区参考作物潜在腾发量[J]. 新疆农业科学,2012,49(5):909-916.
- [7] 闫浩芳,史海滨,薛铸,等. 内蒙古河套灌区 ET_0 不同计算方法的对比研究[J]. 农业工程学报,2008,24(4):103-106.
- [8] 刘艳伟,戈振扬,朱仲元,等. 浑善达克沙地参照作物腾发量简易计算方法初探[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(10):127-132.
- [9] 董旭光,顾伟宗,王静,等. 影响山东参考作物蒸散量变化的气象因素定量分析[J]. 干旱区资源与环境,2015,30(5):810-814.
- [10] 张长春,王晓燕,邵景力,等. 利用NOAA数据估算黄河三角洲区域蒸散量[J]. 资源科学,2005,27(1):86-91.

(下转第108页)

14.19 mm, 58.31 mm, 158.22 mm respectively. The Mann-Kendall test results showed that the precipitation decreased in whole growing stage, increased in early growth stage, decreased in the tillering-wintering stage and the turning green-heading-maturity stage. The precipitation in different growth stages changed with UF. In summary, water at the turning green-heading-maturity stage is in deficit in north of the province including Anyang, Xinxiang, but sufficient in the south including Zhumadian and Xinyang.

Key words: winter wheat; effective precipitation; water consumption; crop water deficit; precipitation; different growth stages; Mann-Kendall

责任编辑:刘春成

(上接第41页)

Comparison of Different Methods for Calculating Evapotranspiration of Crops in the Yellow River Delta

YIN Chunyan^{1,2}, CHEN Xiaobing¹, LIU Hu³, SHAN Jingjing^{1,2}, BU Fanmin⁵, WANG De⁴, SUN Haishuang⁶

(1. Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Water Resources for Pastoral Area Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China;

4. Yantai Institute of Coastal Zone Research Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;

5. Shandong Coastal Saline Soil and Water Environmental Engineering Research Center, Dongying 257000, China;

6. Shandong Huibangbohai Agriculture Development Limited Company, Dongying 257091, China)

Abstract: Accurately calculating crop evapotranspiration (ET_0) is important in designing water-saving irrigation schedule. This paper compared five methods: the P-M method, FAO-79Penman, Priestley-Taylor, FAO-24Penman and Hargreaves-Samani, for calculating evapotranspiration of crops in the Yellow River delta using data measured at four weather stations in the region. We took the P-M method as the control to evaluate the other methods. The results showed that the FAO-Penman was more accurate than Priestley-Taylor in all climatic regions, with errors between 3% and 10%. If there are no sufficient data in humid regions, however, the Priestley-Taylor works better giving more reliable ET_0 estimates.

Key words: reference evapotranspiration; P-M method; the Yellow River delta; Priestley-Taylor method

责任编辑:陆红飞