

陆面潜在蒸散计算模型在甘肃省黄土高原的适用性研究

杨小利^{1,2}, 蒲金涌³, 马鹏里⁴, 姚小英⁵

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃兰州 730020; 2. 甘肃省平凉市气象局, 甘肃平凉 744000; 3. 甘肃省天水农业气象试验站, 甘肃天水 741020; 4. 兰州区域气候中心, 甘肃兰州 730020; 5. 天水市气象局, 甘肃天水 741000)

摘要: 甘肃省黄土高原地区处于半干旱半湿润气候过渡区, 潜在蒸散的准确估算是该区水资源评估的重要工作之一。运用西峰国家基准气候站 1961—2006 年气象资料, 选用 5 种半干旱地区研究潜在蒸散普遍适宜的计算模型, 以该区的蒸发量为参考, 对各种计算模型进行了评估。结果表明, FAO Penman—Monteith(1998)模型与蒸发量相关性显著, 均方差值小, 稳定性高, 是计算该地潜在蒸散的首选模型; 其次为 FAO PPP—17 模型; Hargreaves 模型所需气候因子较少, 计算便捷, 准确性较好, 有一定使用优势; Priestley—Taylor 模型计算值有一定参考意义, 但在夏季与蒸发量的相关水平较低, 在使用时还要作进一步地订正; 24Radiation 模型的夏季计算值与蒸发量的相关性不能通过假设检验, 有一定的时间局限性, 不宜作为该地区研究潜在蒸散的计算模型。

关键词: 潜在蒸散; 模型; 黄土高原; 适用性; 甘肃省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)02-0184-06

中图分类号: S274

Adaptability of Potential Evapotranspiration Estimation Models in the Loess Plateau of Gansu Province

YANG Xiao-li^{1,2}, PU Jin-yong³, MA Peng-li⁴, YAO Xiao-ying⁵

(1. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Change and Disaster Reduction of CMA, and Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou, Gansu 730020, China; 2. Pingliang Meteorological Bureau, Pingliang, Gansu 744000, China; 3. The Agrometeorological Experimental Station of Tianshui, Tianshui, Gansu 741020, China; 4. Lanzhou Regional Climate Center, Lanzhou, Gansu 730020, China; 5. Tianshui Meteorological Bureau, Tianshui, Gansu 741000, China)

Abstract: The Loess Plateau of Gansu Province is located in semi-arid and semi-humid transition zone. The accurate estimation of potential evapotranspiration is one of the main works in assessment of water resources. Based on the meteorological data at Xifeng National Base Climate Station in 1961—2006, 5 kinds of model for calculating potential evapotranspiration widely used in semi-arid area are chosen for the evaluation with reference of evaporation. The FAO Penman—Monteith (1998) model has a significant relevance, small standard deviation with evaporation, and the high stability and is the most suitable model for calculating the potential evapotranspiration. The next suitable model is the FAO PPP—17 model. The Hargreaves model has the advantages of fewer climatic factors, convenient use, and higher accuracy over other models in estimating potential evapotranspiration. It is demonstrated that the Priestley—Taylor model has some reference values in calculating evapotranspiration, but the model shows a low relevance level with evaporation. Therefore, the model should be modified before it is put into use. The association between calculated value of the 24Radiation model and evaporation dose not reach the level of assumption checking in summer and thus its use is limited. The model should not be used in research work in the Loess Plateau of Gansu province.

Keywords: evapotranspiration; model; Loess Plateau; adaptability; Gansu Province

陆面潜在蒸散量又称最大可能蒸发量或蒸发力,是指下垫面足够湿润条件下的蒸发量。用来表达气候条件决定各种下垫面蒸发过程的能力。不仅代表某地区的干湿情况,同时亦表示热力条件,是气候学上的一个重要特征。对于土壤含水量乃至水资源的利用评估非常重要^[1-4]。由于下垫面状况的复杂性,迄今为止,潜在蒸散的精确测算仍是大气科学中尚未解决的难题之一,在研究中一般都由经验公式计算而得^[5-8]。在以往的研究中,曾针对干旱半干旱气候特征,推出了多种潜在蒸散的计算模型。虽然这些模型在解决潜在蒸散的定量估算有一定可信度。但由于模型研究环境的复杂性及针对问题的具体性,在使用这些模型的过程中发现它们都有一定的条件适宜性。在一定地域使用时都要作进一步的订正、评估^[9-13]。

自 1948 年 Penman 推出潜在蒸散计算模型以来,由于其综合考虑了不同高度和温度下辐射、干燥度及空气动力对蒸散的影响。物理意义明确,使用效果较好,引起了许多学者的兴趣,在这以后几十年的里,衍生出许多订正后的 Penman 计算模型。其中 FAO PPP-17 Penman 模型使用最为普遍,我国学者曾使用该方法对区域的蒸散进行过深入的研究,取得了不少成果^[14-16]。1998 年 FAO 把经过 Monteith 订正的 Penman 公式 Penman-Monteith 公式推荐作为计算潜在蒸散的标准模型后,该方法的使用更为普遍^[17-20]。但在实际研究中,诸如 FAO-24 Radiation, Hargreaves, Priestley-Taylor 等计算潜在蒸散的方法,计算过程简便。在缺少某些气象要素测量值时也能使用^[21-23]。甘肃省黄土高原为半湿润和半干旱气候的过渡带,陆面潜在蒸散大于降水量,水资源供需矛盾较大。确定适用性较强的潜在蒸散计算模型,可避免因使用模型不同而引起的研究结果的可比性下降,也可为以后的研究提供理论依据。

1 资料及计算模型

1.1 数据资料

西峰国家基准气候站(35°44'N, 107°38'E)位于半湿润和半干旱气候的过渡区(年平均气温 8.7 °C, 降水量 527 mm, 蒸发量 1 451 mm),地处黄土高原的东部。气象资料观测始于 1937 年。本研究资料取自该站 1961—2006 年的气温、日照、气压、风速、相对湿度、蒸发量的旬平均值。

小型蒸发皿($\varphi = 20$ cm)测量的蒸发量,虽然与潜在蒸散有一定差异^[1]。但其测量标准统一、方法规范,在表示较大尺度的蒸散趋势中,是唯一具有较长时间序列的实测资料,在研究陆面蒸散时有着不可替

代和或缺的作用,是评估各模型的适用性时的主要实测参考量。

1.2 计算模型

1.2.1 FAO98 Penman-Monteith(98) 为 FAO 官方 1998 年推荐作为计算潜在蒸散的惟一标准模型(公式 1)。

$$ET_{0(98)} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中: $ET_{0(98)}$ ——潜在蒸散量(mm/d); R_n ——净辐射(MJ/m²); G ——土壤热通量(MJ/m²); T ——日平均气温(°C); e_a ——饱和水汽压(kPa); e_d ——实际水汽压(kPa); Δ ——饱和水汽压—温度的曲线斜率(kPa/°C); γ ——湿度计常数; u_2 ——2 m 高处的风速(m/s)。由于目前气象站普遍无 2 m 高处风速观测资料,风速用订正公式计算:

$$u_2 = 4.78 \times u_h / \ln(67.8h - 5.42)。$$

式中: h ——高度(m); u_h —— h 高处的风速(m/s)。本研究所用风速资料为气象站按统一标准测得,高度为 10.4 m。则风速换算公式为 $u_2 = 0.738 \times u_{10}$, 其中 u_{10} 为气象站所测风速。

1.2.2 FAO PPP-17 Penman(P-17) 公式(2) 是 Penman 公式的修正式,在国内外应用比较普遍。

$$ET_{0(P-17)} = \frac{0.408 \frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} R_n + 0.26(e_a - e_b)(1 + 0.54u_2)}{\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad (2)$$

式中: $ET_{0(P-17)}$ ——潜在蒸散量(mm/d); P_0, P ——分别为海平面气压及本站点气压(hPa); $R_n, \Delta, \gamma, e_a, e_d$ 及 u_2 所表示的物理意义及单位与公式(1)相同。

1.2.3 Hargreaves(H) 该模型是 Hargreaves 和 Samani 根据在加利福尼亚州 8 a 间试验用牛毛蒸渗仪数据导出的用气温为作为自变量,同时还引入温度差来反映辐射影响计算潜在蒸散的方法。

$$ET_{0(H)} = 0.0023(T_{max} - T_{min})^{0.5}(T + 17.8)R_a \quad (3)$$

式中: $ET_{0(H)}$ ——潜在蒸散(mm/d); T_{max} ——最高温度(°C); T_{min} ——最低温度(°C); T ——平均温度(°C); R_a ——天文辐射(MJ/m²)。

1.2.4 FAO-24 Radiation(24R) 该模型源于 Makkink 公式,主要根据太阳辐射估算蒸散量。

$$ET_{0(24R)} = a + b \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s \right) \quad (4)$$

式中: $ET_{0(24R)}$ ——潜在蒸散量(mm/d); Δ, γ, u_2 所代表的物理因子意义及单位如公式(3)。 R_s ——太阳辐射(MJ/m²); a, b ——经验系数, $a = -0.3, b =$

$1.066 - 0.013RH_{mean} + 0.045 u_2 - 0.000 2RH_{mean} - 0.000 315 (RH_{mean})^2 - 0.011u_{22}$, 其中 RH_{mean} 为平均相对湿度(%)。

1.2.5 Priestley-Taylor(P-T) Priestley-Taylor 方法是假设周围环境湿润的前提下,忽略了空气动力学项目而得出的简化方程,应用比较广泛。

$$ET_{0(P-T)} = 1.26 \left(\frac{\Delta R_n - G}{\Delta + \gamma} \right) \quad (5)$$

式中: $ET_{0(P-T)}$ ——为潜在蒸散量(mm/d); Δ , R_n , G 表示的物理量及单位同上述计算式相同; λ ——水的汽化潜热,在通常状态(20 °C)下, $\lambda = 2.45 \text{ MJ/kg}$ 。

2 结果与分析

2.1 模型计算值的年变化

各模型的潜在蒸散计算值的年变化趋势基本与蒸发量相同(图 1),最大、最小值出现时间存在不同程度的差异,蒸发量只有 Hargreaves 的最大值出现在 6 月,其余各模型都出现在 7 月;蒸发量的最小值出现在 12 月,除 Hargreaves 计算的最小值出现在 1 月份外,其余各模型均与蒸发量最小值出现时间相同。

根据公式(6)得到各模型的逐月计算值与蒸发量的相对误差。

$$V = \frac{ET_{\alpha} - E_i}{E} \times 100 \quad (6)$$

表 1 各种潜在蒸散模型计算值与小型蒸发皿测量值的相对误差

模型	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年
98	-21	-22	-27	-31	-21	-19	-5	4	14	4	-15	-19	-13
P-17	-6	-36	-31	-28	-16	-11	3	14	18	10	-25	-65	-12
H	11	19	26	32	54	62	77	83	89	65	30	15	56
24R	151	158	142	121	143	140	176	198	238	211	159	151	163
P-T	-31	-20	-18	-20	-9	-8	7	13	19	1	-27	-34	-6

2.2 各模型计算值的季节变化及与蒸发量的关系

各计算模型的计算值与同时段的蒸发量(E)、降水量(P)比较分析表明(图 2),蒸散模型的计算值的季节分布与蒸发量的四季分布是一致的。夏季是潜在蒸散的最盛季节,小型蒸发所测的蒸发量占全年总量的 40%,各种模型的计算值占全年的 41%~53%;其次为春季,蒸发量占全年的 33%,各种方法的计算值占 24%~30%;秋季蒸发量占 17%,各种模型的计算值占 18%~20%;冬季最少,蒸发量占 10%,各种计算模型占 5%~10%。秋季降水量大于春季,是一年之中仅次于夏季的第 2 个降水较多的季节,但秋季的蒸发(散)量却远不及春季。其它季节降水量的分布基本上与蒸发(散)值一致。

式中: i ——月份; V_i —— i 月的相对误差(%); ET_{0i} ——模型该月潜在蒸散的计算值(mm); E ——该月的蒸发量(mm)。结果表明(表 1),98Penman-Monteith, PPP-17 及 Priestley-Taylor 这 3 种模型的潜在蒸散计算值,11-6 月小于蒸发量,相对误差为 5%~36%。7-10 月计算值大于蒸发量,相对误差为 1%~9%,模型计算值的偏小幅度大于偏大幅度。7 月和 10 月是相对误差绝对值较小的时段,4 月和 12 月是相对误差绝对值较大的月份。Hargreaves 及 24Radiation 模型的计算值均大于蒸发量,相对误差比较大,24Radiation 模型相对误差可达 238%,Hargreaves 模型的最大相对误差也在 90%左右,这两种模型的最大误差值都出现在 9 月。

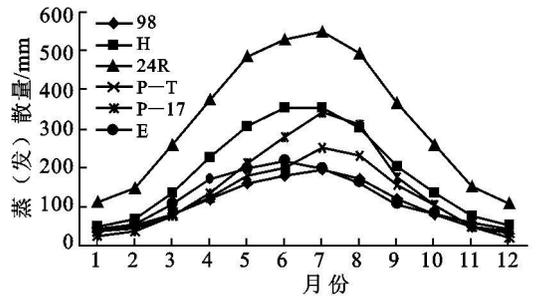


图 1 各潜在蒸散模型计算值

注: 98: FAO 98Penman-Monteith 模型; P-17: FAO PPP-17 模型; H: Hargreaves; 24R: FAO-24Radiation 模型; P-T: Priestley-Taylor 模型; E: 蒸发量。下同。

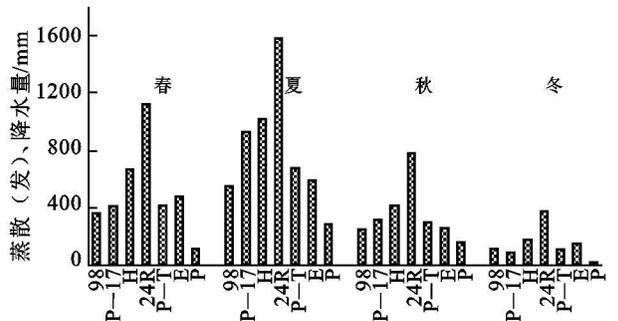


图 2 各潜在蒸散计算模型蒸发量(E)、降水量(P)在各季的分布

进一步分析发现,各种蒸散模型的计算量值与蒸发量之间存在比较明显的线性关系(公式 7)。用模型的计算值来模拟蒸发量的值,大多数季节都可以取

得比较好的效果(表 2)。

$$E = B + K \cdot ET_0 \quad (7)$$

式中: E ——模拟蒸发量 (mm); B, K ——系数; ET_0 ——模型计算值(mm)。

用研究年份的蒸发量与模型计算值的均方差(公式 8)也可作为评估模型对蒸散表达的准确性之一(表 2)。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{46} \sum_{j=1}^{46} (E_j - ET_{0j})^2} \quad (8)$$

式中: σ ——均方差; j ——年份; E_j ——蒸发量 (mm)。各种模型的计算值与蒸发量的相关程度不同。

对 98Penman—Monteith 模型及 PPP—17 模型来说, 各季节的相关性均很显著, 可以通过 0.001 的信度检验。98Penman—Monteith 模型与蒸发量的相关性比 PPP—17 模型与蒸发量的相关性更为显著。除春季外, 其它各季节 Penman—Monteith 模型与蒸发量的均方差也小于 PPP—17 模型。Hargreaves 模型与蒸发量的相关系数在春、夏两季大于 Penman—Monteith 模型及 PPP—17 模型, 但在秋、冬两季的相关系数小于上述两个模型, 且均方差值均大于上述两个模型。24Radiation 模型计算值与蒸发量的相关系数在夏季不能通过 0.10 信度的水平假设检验, 其均方差是所有研究模型最大的, 在估算蒸散时应作进一步订正。Priestley—Taylor 模型在研究模型中计算值与蒸发量方差均最小, 但在夏季其与蒸发量的相关显著性不高, 使用时有一定的时间局限。

2.3 各种计算模型的灵敏度分析

灵敏度表示模型中某一参数在其取值发生微小

变化时, 模型输出结果变化的大小程度 [公式(9)]²⁴⁾。

$$S_x = \frac{ET^{0(1.1x_i)} - ET^{0(0.9x_i)}}{ET_{0(x_i)}} \quad (9)$$

式中: S_x ——灵敏度; ET_0 ——模型计算的潜在蒸散量 (mm); x_i ——模型中的某一参数。

根据公式(9)对各个计算方法进行各计算模型的稳定程度分析, 得知各种气象因子对不同模型精确度的影响各不相同(表 3)。其中对温度变化灵敏程度最高的为 PPP-17 模型, 从仲春至仲秋(4—9 月)灵敏度均大于 0.10, 在年内温度最高的为 6—9 月, 灵敏度大于 0.20; 其次为 98Penman—Monteith 模型和 Hargreaves 模型, 夏季(6—8 月)的灵敏度均在 0.10 以上; Radiation24 及 Priestly—Taylor 模型对温度的变化灵敏度较低, 全年均在 0.10 以下。PPP-17 模型对日照变化比较灵敏, 4—10 月敏感度大于 0.10, 且年灵敏度为 0.16; 其余各模型对日照的敏感度均小于 0.10。对相对湿度变化比较灵敏的是 Priestly—Taylor 模型及 PPP-17 模型, 在 5—10 月及 4—9 月 PPP-17 模型及 Priestly—Taylor 模型的灵敏度均在 0.10 以上, 全年灵敏度也在 0.10 以上; 其余各模型的灵敏度均在 0.10 以下。对风速变化比较灵敏的模型只有 Priestly—Taylor 模型, 且灵敏度大于 0.10 的时间在气温较低、风速较大的 11 月至次年 3 月。对气压变化较为灵敏的是 Radiation24 模型及 Priestly—Taylor 模型, 灵敏度较大的时间是在气压较高的 11 月至次年 3 月; 而 PPP-17 模型全年之中只是在 12 月和 1 月对气压的灵敏度大于 0.10, 其余时间均小于 0.10。

表 2 各种模型不同季节计算值与蒸发量线性模拟系数及均方差值(S_i)

模型	春季				夏季				秋季				冬季			
	R^2	B	K	S_i	R^2	B	K	S_i	R^2	B	K	S_i	R^2	B	K	S_i
98	0.77	-866	3.76	20.7	0.63	-610	2.19	16.4	0.78	-653	3.66	7.8	0.92	-88	1.36	2.8
P-17	0.47	-5	1.30	14.7	0.45	-20	0.65	52.7	0.70	-45	0.95	10.9	0.85	-162	0.57	10.8
H	0.86	-591	1.59	29.9	0.79	-1008	1.58	64.0	0.41	-341	1.41	25.3	0.62	7	0.28	16.9
24R	0.46	1014	1.33	95.6	0.12	-572	0.73	146.7	0.41	-760	1.30	78.1	0.26	32	0.63	20.1
P-T	0.85	1648	-2.87	18.7	0.31	2576	-2.99	22.2	0.84	1189	-3.20	12.6	0.56	59	1.36	1.9

注: $\alpha_{0.001} = 0.4648$; $\alpha_{0.10} = 0.2426$ 。

纵观各模型在不同时段对各气候因子的灵敏度, 温度、日照、湿度因子在 4—10 月对计算值影响较大, 而风速、气压在 11 月至次年 3 月影响显著。温度是影响 Hargreaves 模型的惟一气候因子。98 版的 Penman—Monteith 模型虽然涉及诸多因子, 但温度仍是影响模型计算值的最主要因子。而温度、日照及湿度是影响 PPP—17 模型计算值的主要因子, 个别时段气压

和风速对其计算值也有影响。温度、日照虽然对 Radiation24 及 Priestly—Taylor 模型的计算值影响不大, 但风速和气压在个别时间段对其也有影响。

3 结论

(1) 所选 5 种潜在蒸散的计算模型与蒸发量的实测值之间的年际变化趋势基本一致, 除 Hargreaves 模

型与蒸发量的最大值同时出现在 6 月外,其余 4 个模型的最大值均比蒸发量推后一个月出现;除 Hargreaves 模型比蒸发量的最小值推后 1 月,其余各模型的最小值均与蒸发量的出现时间一致。98Penman—Monteith

等 3 种模型的计算值 11 月至次年 6 月有 8 个月的时间大于蒸发量,其余 4 个月的时间小于蒸发量。Hargreaves 及 24Radiation 模型的计算值始终大于蒸发量,用它们来估算潜在蒸散一般说来是偏大的。

表 3 各模型的不同月份的灵敏度

项目	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年	
气温	98	0.05	0.02	0.03	0.07	0.09	0.11	0.11	0.11	0.09	0.07	0.02	0.03	0.08
	P-17	0.08	0.01	0.05	0.12	0.18	0.24	0.27	0.27	0.21	0.14	0.06	0.05	0.02
	H	0.07	0.03	0.03	0.07	0.09	0.10	0.11	0.11	0.09	0.07	0.02	0.05	0.08
	24R	0.04	0.02	0.02	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.02	0.03	0.05
	P-T	0.05	0.02	0.02	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09	0.08	0.06	0.02	0.02	0.07
日照	98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	P-17	0.04	0.03	0.08	0.12	0.17	0.19	0.20	0.19	0.15	0.12	0.05	0.05	0.16
	24R	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	P-T	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	98	0.07	0.04	0.02	0.00	0.01	0.03	0.03	0.02	0.01	0.03	0.07	0.09	0.01
相对湿度	P-17	0.04	0.02	0.03	0.09	0.15	0.018	0.20	0.19	0.14	0.11	0.05	0.01	0.15
	24R	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	P-T	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.10
	98	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.02
	风速	P-17	0.08	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.08
24R		0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
P-T		0.13	0.12	0.10	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05	0.06	0.07	0.10	0.13	0.07
98		0.05	0.06	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
气压		P-17	0.11	0.00	0.05	0.06	0.08	0.08	0.09	0.10	0.10	0.09	0.01	0.14
	24R	0.14	0.13	0.11	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.07	0.09	0.11	0.13	0.08
	P-T	0.13	0.12	0.10	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05	0.06	0.07	0.10	0.13	0.07

(2) 由模型计算值与蒸发量的相关关系及均方差分析可得,在研究模型中,98Penman—Monteith 模型 4 个季节的计算值与蒸发量的相关程度稳定,均方差偏小。是表征潜在蒸散最好的模型;PPP-17 在使用中有一定优点,适宜性次之;Hargreaves 使用时需要的气候因子较少,且有一定的准确度,尤其在气象资料比较缺乏的地区,有一定的使用价值;Prestly—Taylor 模型计算值有一定的参考意义,但夏季的计算值与蒸发量相关显著性较低,在使用时还要做进一步地订正;24Radiation 模型的计算值在夏季不能反映蒸发量的多少,且均方差较大,不宜作为计算潜在蒸散的主要模型来考虑。

(3) 各种模型对气候因子的灵敏度因时间不同而异。一般来说,温度、日照、相对湿度是影响计算结果的主要因子,其中又以温度的影响最大。温度是明显影响 98Penman—Monteith 模型计算值的唯一气候因子;气温、日照、相对湿度等 3 种气候因子对 PPP-17 模型均有影响,尤其在 6—11 月影响较大;98Penman—Monteith 和 PPP-17 两种模型相比,

98Penman—Monteith 具有更高的稳定性;Hargreaves 模型虽然只有温度一个因子,但其对计算值的影响较大;24Radiation 只对气压敏感,其余气候因子对其结果均无明显影响;相对湿度、风速、气压因子只在个别时段对 Prestly—Taylor 模型的计算值有影响。

[参 考 文 献]

- [1] 靳亚立,李静,王新,等.近 50 年来中国西北干湿状况时空分布[J].地理学报,2004,59(6):847-854.
- [2] 刘卉芳,曹文洪,王向东,等.晋西黄土区土壤水分时空分布规律[J].水土保持通报,2008,28(6):105-109.
- [3] 郭海英,万信,黄斌,等.气候变化背景下陇东塬区麦田土壤水分变化及生产特征研究[J].水土保持通报,2008,28(3):77-80.
- [4] 邬春龙,穆兴民,高鹏,等.黄土丘陵区土壤水资源评价与分析[J].水土保持通报,2007,27(6):189-193.
- [5] 马耀明,王介民.非均匀陆面上蒸发(散)研究概况[J].高原气象,1997,16(4):446-452.
- [6] 毛飞,张光智,徐祥德.参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较[J].应用气象学报,2000,11(S):128-136.

- [7] 许迪, 刘钰. 测定和估算田间植物腾发量方法研究综述 [J]. 灌溉排水, 1997, 16(4): 54-59.
- [8] 武夏宁, 胡铁松, 王贵秀, 等. 区域蒸散发估算测定方法综述 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 257-261.
- [9] 刘钰, Pereira L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证 [J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 26-30.
- [10] 刘钰, 蔡根林. 参考腾发量的新定义及计算方法对比 [J]. 水利学报, 1997, 28(6): 27-33.
- [11] 刘晓英, 林尔达, 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.
- [12] Chiew F H S, Kamamaladasa N N, Malano H M, et al. Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia [J]. Agr. Water Mgmt., 1995, 28: 9-21.
- [13] Hobbins M T, Ramirez J A, Brown T C. The complementary relationship in regional evapotranspiration: the CRAE model and the Advection-aridity approach [J]. Proc. Annual A. G. U. Hydrology Days 1999, 37(5): 199-212.
- [14] 高国栋, 陆渝蓉, 李怀瑾. 我国最大可能蒸发量的计算和分布 [J]. 地理学报, 1978, 33(2): 102-107.
- [15] 钱纪良, 林之光. 关于中国干湿气候区划的初步研究 [J]. 地理研究, 1965, 31(1): 1-12.
- [16] 李林, 张国胜. 黄河上游流域蒸散量及其影响因子研究 [J]. 地球科学进展, 2000, 15(3): 256-259.
- [17] R G Allen, L S Pereira, Raes D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56 [M]. Rome: FAO-Food and Agriculture Organization, 1998.
- [18] 郭晓寅, 程国栋. 遥感技术应用于地表面蒸散发的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2004, 19(1): 107-114.
- [19] 杨小利, 杨兴国, 马鹏里, 等. PDSI 在甘肃中东部地区的修正和应用 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(9): 1022-1028.
- [20] 李晓军, 李取生. 东北地区参考作物蒸散确定方法研究 [J]. 地理科学, 2004, 24(2): 212-216.
- [21] 刘晓英, 林尔达, 刘培军. 干旱条件下 Priestley-Taylor 方法应用探讨 [J]. 水利学报, 2003, (9): 31-39.
- [22] 史晓南, 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.
- [23] 张国威, 周聿超. 新疆内陆干旱区蒸发的计算与分析 [J]. 水科学进展, 1992, 3(3): 26-232.
- [24] 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.
- [25] 刘绍民, 孙中平, 李小文, 等. 蒸散量测定与估算方法的对比研究 [J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 161-167.

(上接第 183 页)

[参 考 文 献]

- [1] 罗海明, 刘璐, 王殿海. 自动气象站的网络化构想 [J]. 黑龙江气象, 2007(2): 32-33.
- [2] 徐宁军, 陈战平, 冯智伟. GPRS 业务在自动气象站网数据传输中的应用 [J]. 气象科技, 2006, 34(6): 112-115.
- [3] 段文广, 王有毅. 基于 GPRS 的区域气象站组网技术 [J]. 成都信息工程学院学报, 2008, 28(1): 78-83.
- [4] 北京渠道科学器材有限公司. Vantage Pro2 自动气象站中文安装手册 [Z]. 北京渠道科学器材有限公司, 2008: 1-14.
- [5] 郑晓平, 修仕辉, 舒文琼. 从中国联通 CDMA 发展历程看 IPTV 推广策略 [J]. 通信世界, 2006(7): 18-20.
- [6] 周东明, 何伟芬. CDMA IX 在自动气象站监控系统中应用 [J]. 广东通信技术, 2006(5): 45-50.
- [7] 蒋文贤. 基于 CDMA IX-VPN 无线终端设备的应用与优化 [J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2008, 34(3): 295-302.
- [8] 张建臣, 张谷省. 基于 ADSL 虚拟拨号的动态域名解析的研究与实现 [J]. 德州学院学报, 2007, 23(4): 54-56.
- [9] 张勇刚, 吕奂坤, 刘爱明. 自动气象站设备夏季维护简析 [J]. 气象水文海洋仪器, 2009(2): 128-129.
- [10] 张小石, 黄莉芬. 自动气象站设备维护与撤换 [J]. 气象水文海洋仪器, 2009(2): 134-137.
- [11] 周钦强, 敖振浪, 谭鉴荣, 等. 基于 GPRS 的自动气象站通信组网方案研究 [J]. 微计算机信息, 2008, 24(5/3): 152-154.